



TalentDetector

**TalentDetector2022\_Summer**  
**MIĘDZYNARODOWA STUDENCKA**  
**KONFERENCJA NAUKOWA**

**Redakcja naukowa:**  
**dr hab. inż. Mirosław Bonek, prof. PŚ**

Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych,  
Wydział Mechaniczny Technologiczny,  
Politechnika Śląska  
13 czerwca 2022



**Katedra Materiałów**  
Inżynierskich i Biomedycznych

**Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych****Wydział Mechaniczny Technologiczny****Politechnika Śląska**

ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice tel. +48 (32) 2371322

**Redakcja techniczna i skład komputerowy:**

dr hab. inż. Mirosław Bonek, prof. PŚ

**Recenzenci:**

M. Adamiak, M. Bilewicz, M. Bonek, Z. Brytan, A. Czupryński, A. Drygała, E. Jonda, A. Kania, M. Kciuk, M. Król, L. Kuchariková, S. Lesz, G. Matula, C. Meran, A.J. Nowak, F. Nový, W. Pilarczyk, O. Polishchuk, M. Polok-Rubinić, M. Spilka, M. Sroka, M. Staszuk, A. Śliwa, T. Tański, E. Tillová, J. Mazurkiewicz, A. Włodarczyk-Fligier

Materiały są opublikowane na podstawie oryginałów dostarczonych przez Autorów, zaopiniowanych przez Zespół Recenzentów.

**Wydano za zgodą:**

Kierownika Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

Wydziału Mechanicznego Technologicznego

Politechniki Śląskiej

**Wydawca:**

Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

Wydział Mechaniczny Technologiczny

Politechnika Śląska

Gliwice 2022

Wszystkie opublikowane materiały stanowią utwór podlegający ochronie na mocy prawa autorskiego. Utwór ten w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych. Ponadto utwór ten nie może być umieszczany ani rozpowszechniany w postaci cyfrowej zarówno w Internecie, jak i w sieciach lokalnych, bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich.

**Seria wydawnicza:**

Prace Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

Wydział Mechaniczny technologiczny

Politechnika Śląska

Publikacja: lipiec 2022

ISBN 978-83-65138-33-0

**MIĘDZYNARODOWA STUDENCKA KONFERENCJA NAUKOWA  
TALENTEDETECTOR2022\_SUMMER  
POLITECHNIKA ŚLĄSKA, GLIWICE  
13 CZERWCA 2022**

Międzynarodowa Studencka Konferencja Naukowa TalentDetector2022\_Summer ma na celu zintegrowanie środowiska studenckiego i naukowego zajmujących się tematyką dotyczącą technologii materiałowych. Jest to miejsce dające możliwość wymiany doświadczeń, wiedzy, umiejętności oraz prezentacji dotychczasowego dorobku naukowego, rozwijające i poszerzające zainteresowania studentów w zakresie inżynierii materiałowej, inżynierii powierzchni, biomateriałów i inżynierii biomedycznej, nanotechnologii, technologii proekologicznych oraz komputerowej nauki o materiałach. Konferencja pozwala na przedstawienie projektów prowadzonych z przemysłem, w ramach działalności Studenckich Kół Naukowych, doktoratów wdrożeniowych, projektów realizowanych w formie PBL – Project Based Learning w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza na Politechnice Śląskiej, międzynarodowej współpracy bilateralnej oraz projektów realizowanych w ramach Visegrad Scholarship Program 2021/2022.



**ORGANIZATOR KONFERENCJI**

Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny,  
Politechnika Śląska, Gliwice

**WSPÓŁORGANIZATOR**

Koło Inżynierii Materiałowej przy Oddziale Wydziału Mechanicznego Technologicznego  
Stowarzyszenia Wychowanków Politechniki Śląskiej, Gliwice

**MIĘDZYNARODOWY KOMITET NAUKOWY**

dr hab. inż. Mirosław Bonek, prof. PŚ – *Przewodniczący*  
dr hab. inż. Marcin Adamiak, prof. PŚ  
dr hab. inż. Rafał Babilas, prof. PŚ  
prof. dr hab. inż. Adam Grajcar  
doc. Lenka Kuchariková, *University of Zilina, Slovakia*  
prof. Martin Kusy, *Slovak Technical University in Bratislava, Slovakia*  
dr hab. inż. Grzegorz Matula, prof. PŚ  
dr hab. inż. Janusz Mazurkiewicz, prof. PŚ  
prof. Cemal Meran, *Pamukkale University, Turkey*  
prof. Oleh Polishchuk, *Khmelnitskyi National University, Ukraine*  
prof. Mykola Skyba, *Khmelnitskyi National University, Ukraine*  
prof. Eva Tillova, *University of Zilina, Slovakia*  
dr hab. inż. Tomasz Tański, prof. PŚ

**KOMITET ORGANIZACYJNY***Przewodniczący*

dr hab. inż. Mirosław Bonek, prof. PŚ

|  |                                  |
|--|----------------------------------|
| dr hab. inż. Marcin Adamiak, prof. PŚ      | dr inż. Aneta Kania              |
| dr hab inż. Zbigniew Brytan, Prof. PŚ      | dr inż. Monika Kciuk             |
| dr hab inż. Sabina Lesz, Prof. PŚ          | dr inż. Mariusz Król             |
| dr hab inż. Grzegorz Matula, Prof. PŚ      | dr inż. Agnieszka Nowak          |
| dr hab inż. Wirginia Pilarczyk, Prof. PŚ   | dr inż. Magdalena Polok-Rubiniec |
| dr hab inż. Agata Śliwa, Prof. PŚ          | dr inż. Łukasz Reimann           |
| dr hab inż. Tomasz Tański, Prof. PŚ        | dr inż. Marcin Staszuk           |
| dr hab. inż. Janusz Mazurkiewicz, prof. PŚ | dr inż. Anna Włodarczyk-Fligier  |
| dr hab inż. Marek Sroka, prof. PŚ          | dr inż. Bogusław Ziębowicz       |
| dr inż. Marcin Bilewicz                    | mgr inż. Anna Kiljan             |
| dr inż. Aleksandra Drygała                 | mgr inż. Weronika Smok           |
| dr inż. Barbara Grzegorzcyk                | mgr inż. Anna Woźniak            |
| dr inż. Ewa Jonda                          | mgr inż. Marta Zaborowska        |

**ZAKRES TEMATYCZNY KONFERENCJI**

Materiały, własności materiałów, metodologia badawcza, modelowanie własności, procesy wytwarzania, czystsza produkcja, współpraca z przemysłem, praktyki studenckie, umiędzynarodowienie badań naukowych.

## Spis treści

|   |    |
|---|----|
| Morfologia i wytrzymałość na rozciąganie mieszanki polietylenu z kopolimerem blokowym polipropylenu<br>P. Arciszewski, J. Mazurkiewicz.....   | 1  |
| Súčasn  trendy systémov plánovania podnikov ch zdrojov<br>P. Chobot, M. Martinkovi , L. Kuchariková, E. Tillová.....  | 9  |
| Podnikateľsk  riziká a sp soby ich zni zovania<br>V. Chvaln kov , E. Bigořov , L. Kuchariková, E. Tillová .....   | 15 |
| Preliminary studies on the possibility of producing an adsorbent from thermally and thermochemically oxidized activated sludge<br>P. Cichy, R. Kupny, J. Rurańska, K. Dudzisz, P. Stuchlik, M. J drzejczyk, R. Kryst,<br>D. Pokoj, M. Bambynek, E. Puszczało, B. Pieczykolan, A. Marszałek, M. Sroka..... | 21 |
| Rainwater - physicochemical, microbiological and toxicological characteristics<br>P. Cichy, R. Kupny, J. Rurańska, K. Dudzisz, P. Stuchlik, M. Jędrzejczyk, R. Kryst,<br>D. Pokoj, M. Bambynek, E. Puszczało, B. Pieczykolan, A. Marszałek, M. Sroka.....   | 32 |
| Interdyscyplinarność laserowej obróbki powierzchniowej w kontekście zagadnień technologii materialowych oraz budowy maszyn<br>P. Cincio, K. Gawęda, P. Janiak, J. Kierepka, M. Paluch, K. Samek,<br>M. Bonek, O. Polishchuk .....   | 41 |
| Badanie struktury i w sności tribologicznych warstw napawanych łukowo spoiwem zapewniającym stopiwo na bazie żeliwa chromowego<br>R. Czarnecki, M. Szulc, A. Balon, K. Kubica, M. Burek, A. Makosz,<br>A. Czupryński, M. Źuk, M. Pacholarz .....  | 55 |
| Wpływ malowania proszkowego farbą poliestrową aluminiowo-miedzianego wymiennika krzyżowo-prądowego na jego efektywność wymiany ciepła<br>B. Czechowski, P. Drejka, M. Rejek, K. Smolaga, M. Tlon, P. Zdybel,<br>K. Jaszcz, J. Mazurkiewicz, A. Ryfa.....  | 65 |
| Badania powłoki TiO  uzyskanej metod  MSPVD na podłożu ze stali austenitycznej AISI 316L<br>A. Duda, M. Rejek, P. Falkowska, M. Olszowska, Ł. Reimann, M. Staszuk.....  | 75 |

---

|  |     |
|--|-----|
| Analiza rozkładu naprężeń oraz deformacji popychacza dźwigniowego w układzie rozrządu silnika spalinowego<br>A. Dziwis, M. Bonek.....                                    | 86  |
| Analiza rozkładu naprężeń, przemieszczeń oraz odkształcenia w uchwycie narciarskim<br>R. Dziwis, W. Kwaśny .....   | 95  |
| Symulacja komputerowa elementów konstrukcyjnych nadwozia samochodowego<br>A. Dziwis, W. Mikołajko, M. Marcinkowski, Ł. Lomania, A. Śliwa, M. Sroka .....                 | 105 |
| Włókna aramidowe – polimerowe złoto<br>P. Falkowska, W. Oleś, A.J. Nowak.....  | 114 |
| Wytwarzanie gradientowych materiałów polimerowych metodą FFF<br>P. Falkowska, M. Olszowska, M. Król.....   | 122 |
| Proces reklamacji a zadowolenie klienta<br>N. Gawęł, A. Kania.....   | 131 |
| Influence of artificial aging on the mechanical strength of multilayer LDPE foil made with recycles<br>T. Gliński, M. Bilewicz, T. Tański.....                           | 137 |
| Influence of calcium carbonate CaCO <sub>3</sub> addition on the tensile strength of the LDPE multilayer film<br>T. Gliński, M. Bilewicz, T. Tański.....                 | 147 |
| Wysokonapełniony kompozytowy filament do zastosowania w technologii druku 3D<br>M. Gocki, G. Matula .....  | 155 |
| Polimeryzacja chemiczna polipirolu – synteza i badania spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera (FTIR)<br>M. Gocki, A.J. Nowak .....                        | 163 |
| Przygotowanie modelu 3D do procesu wytwarzania techniką addytywną<br>T. Janczak, E. Jonda, A. Kiljan, Ł. Grabowski, M. Sobek .....                                       | 170 |
| Analiza parametrów nowoczesnej technologii cięcia laserowego stali<br>P. Janiak, J. Kierepka, M. Paluch, P. Cincio, K. Gawęda,<br>K. Samek, M. Bonek, O. Polishchuk..... | 181 |

---

|   |     |
|---|-----|
| Uszczelnianie barwnikowych ogniw fotowoltaicznych<br>A. Januła, L. Poniewiera, P. Pogorzelski, M. Stachura, J. Drygała, B. Drygała,<br>M. Drewniok, B. Grzegorzczak, S. Lesz, A. Drygała .....                      | 191 |
| Wpływ chemicznej pasywacji na własności użytkowe stali austenitycznej<br>J. Jaworska, M. Kciuk .....  | 200 |
| Aspekty materiałowe i technologiczne procesu przetapiania laserowego<br>M. Konieczny, A. Wójtowicz, K. Królikowska, M. Laskowski, P. Cisowski,<br>S. Jędrzejewski, M. Bonek, C. Meran .....                         | 206 |
| Kształtowanie drobnokrystalicznej struktury stali narzędziowej poprzez laserowe przetapianie<br>M. Konieczny, A. Wójtowicz, K. Królikowska, M. Laskowski, P. Cisowski,<br>S. Jędrzejewski, M. Bonek, C. Meran ..... | 221 |
| Hałas i wibracje w przekładniach i kolumnach wspomaganych elektrycznie<br>A. Kowol, M. Czechowski, I. Głąb, W. Pilarczyk .....  | 232 |
| Analiza termiczna komory próżniowej wykonanej z różnych materiałów<br>D. Lazaj, A. Sasiela, A. Śliwa .....  | 238 |
| Aspekty materiałowe i technologiczne w wytwarzaniu igieł gramofonowych<br>A. Ludwig, A. Olszewska, T. Słaboszewski, W. Wanczura, A. Woszczak,<br>A. Barczyńska, B. Ziebowicz, A. Ziębowicz .....                    | 251 |
| Experimental research of the quality of products obtained in the advanced process of<br>assembling supplies of upper shoes<br>P. Maidan, O. Polishchuk, M. Bonek, V. Danylchuk, V. Barabash .....                   | 258 |
| The effects of different clay compositions and additives on injera baking pans' energy<br>efficiency and impact resistance<br>M. Jemberu Dagnaw, Z. Brytan, R. Abebe Asefa, A. Appiah .....                         | 266 |
| The Investigation of Usability of XLPE Wastes in Cable Filler Layer<br>C. Meran, Ö. Eren, M. Altin, H.E. Kibar, B. Aydemir .....  | 278 |
| Autonomous Maintenance Application on Cable Armor Twisting Machine<br>C. Meran, K. İlhan, U. Avci, G. Guler, Y. Susar, B. Çalhan .....  | 284 |
| Usability of Recycled Cross-Linked Polyethylene in New Product<br>C. Meran, Y. Sendur, E. Cevrin, E. Metinel, K. İlhan .....  | 292 |
| Projektowanie i analiza MES kompozytów polimerowych<br>W. Mikołajko, M. Król .....  | 301 |

|  |     |
|--|-----|
| Analiza wytrzymałościowa belki zderzaka przedniego samochodu osobowego<br>W. Mikołajko, A. Śliwa .....   | 318 |
| Symulacja komputerowa zaczepu holowniczego wykonana w programie Solidworks<br>W. Mikołajko, A. Śliwa .....   | 327 |
| Numerical research of hydraulic distributor of the machine for pleating<br>with the use of the software environment FloWorks<br>V. Neimak, O. Polishchuk, T. Romanets, M. Bonek, A. Yerii, O. Posternak .....  | 335 |
| Materiały kompozytowe o osnowie polimerowej z naturalnym napętniaczem<br>K. Niemiec, A. Włodarczyk-Fligier .....   | 340 |
| Badania powłoki TiO <sub>2</sub> uzyskanej metodą MSPVD na podłożu ze stopu aluminium Al-Si-Cu<br>M. Olszowska, P. Falkowska, Duda, M. Rejek, M. Staszuk, Ł. Reimann.....  | 346 |
| Różnice osobowościowe pomiędzy inżynierem 3.0 oraz 4.0<br>L. Ośmiałowska, P. Ullmann, A. Kiljan, E. Jonda.....   | 359 |
| Recykłacja Al a jeho zliatin<br>I. Petrisková, L. Kuchariková, E. Tillová, L. Pastierovičová, M. Mazur, M. Bonek,<br>M. Roszak .....   | 368 |
| Analysis of mechanical models and analytical dependences for description of materials for<br>manufacture of light industry products<br>A. Polishchuk, O. Polishchuk, M. Skyba, S. Lisevych, M. Bonek, V. Grudinín .....  | 374 |
| Polymeric materials for manufacture of light industry products and their physical and<br>mechanical properties<br>A. Polishchuk, O. Polishchuk, M. Skyba, S. Lisevych, M. Bonek, A. Pervak.....  | 384 |
| Wpływ efektu starzenia i uszczelniania na własności elektryczne barwnikowych ogniów<br>fotowoltaicznych<br>L. Poniewiera, A. Januła, M. Stachura, P. Pogorzelski, B. Drygała, J. Drygała,<br>M. Drewniak, S. Lesz, B. Grzegorzczak, M. Kremzer, A. Drygała ..... | 394 |
| Polymérne kompozitné materiály vystužené vláknami<br>L. Šikyňa, R. Bašťovanský, L. Kuchariková, E. Tillová.....  | 402 |
| Vplyv chemicko-tepelného spracovania na únavovú životnosť austenitickej ocele AISI 304<br>M. Slezák, M. Uhrčík, E. Tillová, L. Kuchariková .....   | 409 |
| Teoretická analýza jednotlivých druhov AHSS ocelí využívaných v automobilovom priemysle<br>J. Smatana, D. Medvecká, F. Nový .....  | 416 |



---

|   |     |
|---|-----|
| Rodzaje systemów zarządzania wdrożonych w przedsiębiorstwach, a świadomość studentów uczelni technicznej na ich temat<br>K. Świeca, M. Stec, A. Kiljan, E. Jonda .....                              | 423 |
| Struktura i własności warstwy wierzchniej stali narzędziowej obrabianej laserowo<br>D. Tatar, A. Bodnar, K. Jędrzejczyk, P. Jerominek, P. Świerczek,<br>T. Głowinkowski, M. Bonek, E. Tillová.....  | 436 |
| Technologia laserowa w odniesieniu do innych procesów – fenomen wśród technologii<br>D. Tatar, A. Bodnar, K. Jędrzejczyk, P. Jerominek, P. Świerczek,<br>T. Głowinkowski, M. Bonek, E. Tillová..... | 448 |
| Projekt stanowiska pracy operatora maszyny z uwzględnieniem cech antropometrycznych człowieka<br>M. Tomala, M. Spilka.....  | 455 |
| Fabrication of polymer-clay nanocomposite sponge as an adsorbent for water treatment - MB dye<br>Y.M. Tsekpo, A. Appiah, M. Adamiak, E. Annan .....   | 465 |
| Analiza zvaru na poškodennom dne PHM zásobníka<br>N. Višňovská, R. Koňár, L. Kuchariková, E. Tillová .....  | 473 |
| Aspekty materiałowe i technologiczne w wytwarzaniu płyt gramofonowych<br>W. Wanczura, A. Woszczak, A. Ludwig, A. Olszewska, A. Barczyńska,<br>T. Słaboszewski, A. Ziebowicz, B. Ziębowicz .....     | 479 |
| Ocena ryzyka zawodowego narzędziem zapewnienia bezpieczeństwa na stanowisku pracy<br>K. Zajączkowska, M. Spilka .....   | 487 |
| Wpływ parametrów zgrzewania doczołowego na wytrzymałość połączenia rur polietylenowych<br>G. Zieliński, M. Polok-Rubiniec.....  | 499 |
| Analiza wpływu przekładki termicznej na współczynnik przenikalności termicznej drzwi<br>P. Płaczek, T. Tański, P. Snopiński .....   | 505 |
| Porównanie własności termicznych elementów wypełnień stalowego skrzydła drzwiowego<br>P. Płaczek, T. Tański, P. Snopiński .....   | 515 |

## Morfologia i wytrzymałość na rozciąganie mieszanki polietylenu z kopolimerem blokowym polipropylenu

P. Arciszewski <sup>a</sup>, J. Mazurkiewicz <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: piotrkarcia@gmail.com

**Streszczenie:** Wykonano badanie DSC oraz wytrzymałości na rozciąganie próbek folii wykonanych z czystego polietylenu małej gęstości oraz z niewielką domieszką kopolimeru blokowego polipropylenu. Przeprowadzono ocenę struktury przełomu próbek za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego. Mieszanka tworzyw przy ustalonej zawartości jest kompatybilna. Zaobserwowano korzystny wpływ kopolimeru na wytrzymałość na rozciąganie.

**Abstract:** The DSC and tensile strength tests were carried out on film samples made of pure low-density polyethylene and with a small admixture of polypropylene block copolymer. The fracture structure of the samples was assessed using a scanning electron microscope. The mixture of plastics is compatible with the agreed content. A beneficial effect of the copolymer on tensile strength was observed.

**Słowa kluczowe:** mieszanka, polietylen, kopolimer blokowy, polipropylen, LDPE, cPP, wytrzymałość, kompatybilność

### 1. WSTĘP

Wiele uwagi poświęcono kompatybilności mieszanek PE/PP i niektórzy badacze uważają, że PP ma bardzo ograniczoną kompatybilność z LLDPE i LDPE tam, gdzie PP nie jest składnikiem dominującym. [1-3] Z kolei inne badania wykazały, że niewielki procent metalocenowego polietylenu spowodował obniżenie tempa wzrostu sferolitu PP i zwiększenie energii zwijania łańcucha w krystalizacji PP. Natomiast polietylen o niskiej gęstości spowodował zmniejszenie wymiarów sferolitów polipropylenu. Powyższe zostało zinterpretowane jako częściowa kompatybilność PP i PE. [4-6]

Mieszanki polipropylenu i polietylenów, mimo iż są niekompatybilne mogą zapewnić uzyskanie lepszej wytrzymałości mechanicznej i termicznej oraz ułatwić przetwarzalność w przypadku, gdy dodatek LDPE nie przekracza 10% w/w mieszanki. [7]. Mieszanki poliolefinowe można stosować w celu poprawy udarności it-PP gdzie miękka i elastyczna faza PE blokuje pękanie na skutek dyssypacji energii uderzenia. [8,9] Powyższe mieszanki charakteryzują się również wyższą wytrzymałością na pękanie [10,11] oraz odporność cieplną

polietylenu. [12] Wytrzymałość na rozciąganie i moduł zmieniają się prawie liniowo wraz ze składem mieszanki przy minimalnej wartości mniejszej niż 10% w/w. [13-15]

Ze względu na niską adhezję międzyfazową polipropylenu izotaktycznego i polietylenu często do takich kompozycji wprowadzane są dodatkowo kompatybilizatory, takie jak: kopolimer blokowy etylen-propylen, znany również jako kauczuk etylenowo-propylenowy (EPDM) w celu poprawy adhezji międzyfazowej. Jak wykazały liczne prace właściwości mieszanek z dodatkiem kompatybilizatorów znacząco poprawiają właściwości mechaniczne. Przykładowo udarność mieszanki it-PP/PE, do której dodano EPDM może być nawet sześciokrotnie wyższa niż udarność czystego it-PP. [16-25]

W porównaniu z izotaktycznym PP, syndiotaktyczny PP ma ponad dwukrotnie więcej splątanych łańcuchów występujących na poziomie molekularnym co czyni go materiałem dużo mniej przepuszczalnym dla gazów. Inną właściwością st-PP jest wyższa od it-PP temperatura zeszklenia i większy współczynnik stratności oznaczany metodami dynamicznej analizy mechanicznej. Kolejnym aspektem jest niższa o 30-40°C temperatura topnienia oraz niższa wytrzymałość na rozciąganie st-PP w porównaniu do it-PP. Moduł Younga dynamiczny (w warunkach wibracyjnych) st-PP jest natomiast ok. 5-15% mniejszy w stosunku do wartości modułu wyznaczonego dla it-PP w zakresie temperatur od 0 do 25°C. Wraz ze wzrostem krystaliczności wzrasta opór dyfuzyjny membran st-PP natomiast spada wytrzymałość na rozciąganie. [26-33]

Badania mieszanek dowiodły że udział HDPE w st-PP już od 1% w/w silnie zwiększa szybkość krystalizacji st-PP (4 krotnie). Natomiast wraz ze zwiększaniem udziału st-PP do max. 60% w/w w matrycy HDPE spada wytrzymałość na rozciąganie oraz moduł Younga, przy czym w sytuacji odwrotnej gdy zawartość HDPE wynosi max. 20% jest zauważalny wzrost wyłącznie wartości współczynnika sprężystości podłużnej. [34-35] Z kolei inni badacze stwierdzili iż dla mieszanek st-PP z LDPE wytrzymałość na rozciąganie jest zgodna z logarytmiczną regułą mieszania i wzrasta wraz ze zwiększeniem udziału st-PP w zakresie od 0 do 100%. Natomiast wzrost różnicy pomiędzy teoretycznym a eksperymentalnym ciepłem topnienia mieszanki wskazuje na częściową zgodność st-PP/LDPE w stanie uplastycznienia powyżej temperatury topnienia składników. [36,37]

W niniejszej pracy sprawdzono morfologię i wytrzymałość na rozciąganie mieszanki polietylenu z kopolimerem blokowym polipropylenu. Celem jest ocena mieszalności i wpływu niewielkiej ilości dodatku na wytrzymałość folii polietylenowej.

## 2. METODYKA BADAŃ

### 2.1. Wytworzenie materiału do badań

Do wytworzenia próbek użyto polietylenu małej gęstości (LDPE) Sabic LDPE 2102X0 o gęstości 921 kg/m<sup>3</sup>, MFR 1,9 g/10min i deklarowanej wytrzymałości na rozciąganie 13MPa oraz kopolimeru blokowego polipropylenu (cPP) Mopolen EP300L gęstości 900 kg/m<sup>3</sup> MFR 5,0 g/10min i deklarowanej wytrzymałości na rozciąganie 26MPa.

Wytworzono folie z czystego granulatu LDPE oraz mieszanki LDPE/cPP w stosunku 95/5. Folia o grubości 50mic została wytworzona przy użyciu wyciarki Alemo EXT82 wyposażonej w dwuślimakowy układ uplastyczniający z 9 strefami regulacji temperatury, statyczny mieszalnik oraz głowicę szczelinową o szerokości 100mm. Temperatury wynosiły 185-195°C w strefach grzania oraz 200°C na głowicy. Prędkość ślimaków wynosiła 45 obr./min.

## 2.2. Badanie morfologii

Badanie morfologii folii wykonano na stanowisku do badań morfologii tworzyw wyposażonego w skaningowy mikroskop elektronowy (SEM) HITACHI SU8010 oraz w napyłarkę Cressington Sputter Coater z modułem pomiaru grubości napyłonej warstwy złota. Mikroskop wyposażony był w zimną katodę z emisją polową, dwa detektory SE, detektor BSE i detektor EDX do mikroanalizy rentgenowskiej. Badanie zostało wykonane po tygodniu od wytworzenia próbek. Próbki przed przełamaniem i pokryciem złotem były kondycjonowane w ciekłym azocie.

## 2.3. Analiza termiczna

Analizę termiczną próbek folii przeprowadzono przy użyciu skaningowej kalorymetrii różnicowej za pomocą aparatu DSC 822e/700 firmy Mettler-Toledo znajdującym się na wyposażeniu laboratorium Sieci Badawczej Łukasiewicz - Instytucie Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników w Toruniu. Badanie temperatury i entalpii topnienia i krystalizacji przeprowadzono wg. norm PN-EN ISO 11357-1 [38] oraz PN-EN ISO 11357-3 [39]. Badanie zostało przeprowadzone w zakresie temperatury 0-300°C, z prędkością nagrzewania i chłodzenia 10,00°C/min. Zastosowano azot przy stałym natężeniu przepływu strumienia 60 ml/min. Badanie wykonano dla wszystkich próbek folii w czasie dwóch tygodni od wytworzenia.

Procent fazy krystalicznej wyliczono z poniższego wzoru (1) [40] Do obliczeń przyjęto, że teoretyczna wartość entalpii topnienia 100% krystalicznego LDPE wynosi 290J/g [41], natomiast PP 209J/g [42].

$$X_C = \left( \frac{\Delta H_m}{w\Delta H_m^0} \right) \cdot 100\% \quad (1)$$

Gdzie:  $w$  – ułamek zawartości polimeru w kompozycie,  $\Delta H_m^0$  – teoretyczna wartość entalpii topnienia 100% krystalicznego polimeru.

## 2.4. Wytrzymałość na rozciąganie

Wytrzymałość przy rozciąganiu i wydłużenie względne przy zerwaniu próbek folii wykonano za pomocą uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej ZWICK ROELL Z010 wyposażonej w uchwyt szczękowy do cienkich próbek. Kształtki do badań były wycinane z arkusza ze środka wstęgi i zorientowane wzdłuż kierunku wytłaczania. Kształtki miały postać pasów o szerokości 25mm i długości 150mm. Szybkość rozciągania wynosiła 10 mm/s. Jako wynik badania przyjęto średnią z pomiarów 5 próbek.

## WYNIKI BADAŃ

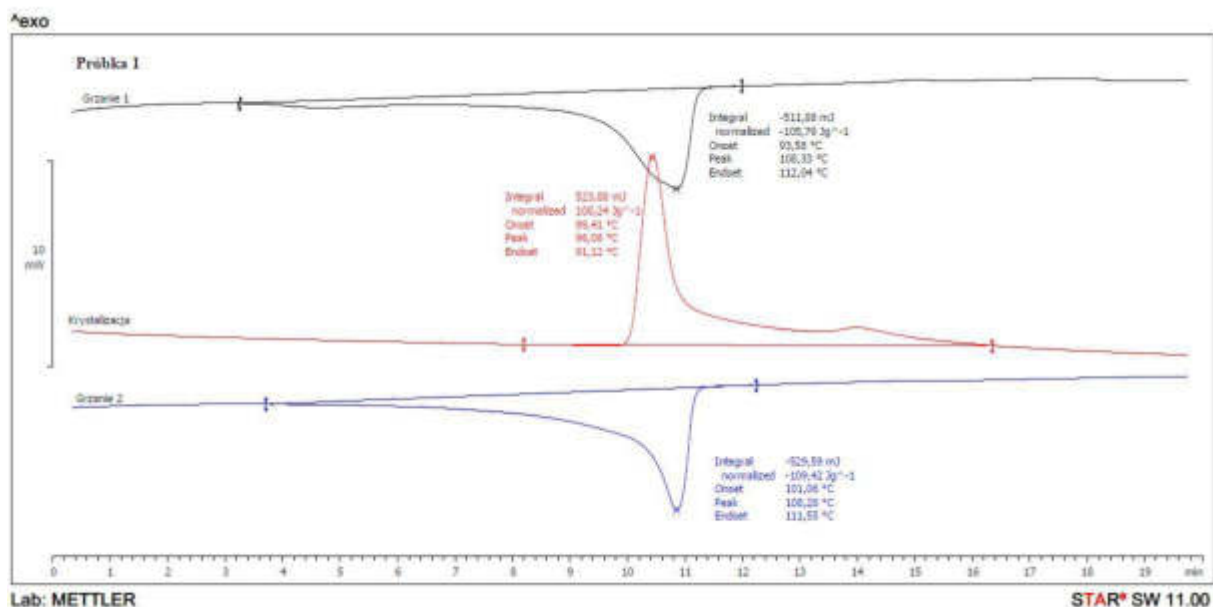
### 3.1 Analiza termiczna

W poniższej tabeli (Tab.1) zebrano wartości temperatury ( $T_m$ ) i entalpii topnienia ( $\Delta H_m$ ) dla pierwszego i drugiego grzania, temperatury ( $T_c$ ) i entalpii krystalizacji ( $\Delta H_c$ ) oraz procentową zawartości fazy krystalicznej w badanych próbkach ( $X_c$ ).

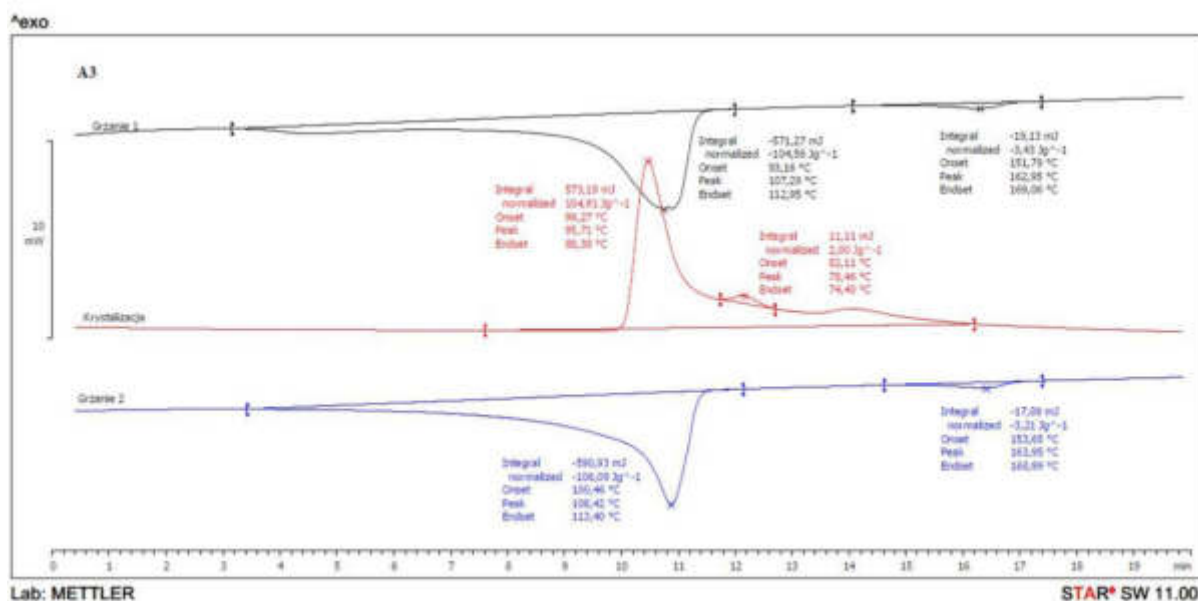
| Próbka               | LDPE   | LDPE/PP-b-PE (95/5) |        |
|----------------------|--------|---------------------|--------|
| <b>Grzanie 1</b>     |        |                     |        |
| $T_m^1$ [°C]         | 108,3  | 107,3               | -162,9 |
| $\Delta H_m^1$ [J/g] | -105,8 | -104,6              | -3,4   |
| $X_c^1$ [%]          | 36,48  | 37,97               | 32,54  |
| <b>Krystalizacja</b> |        |                     |        |
| $T_c$ [°C]           | 96,1   | 95,7                | 78,5   |
| $\Delta H_c$ [J/g]   | 108,2  | 104,9               | 2,00   |
| <b>Grzanie 2</b>     |        |                     |        |
| $T_m^2$ [°C]         | 108,3  | 108,4               | -163,4 |
| $\Delta H_m^2$ [J/g] | -109,4 | -106,9              | -3,2   |
| $X_c^1$ [%]          | 37,72  | 38,80               | 30,62  |

Tabela 1 Wyniki analizy termicznej

Na termogramie próbki LDPE (Rys.1) w pierwszym ogrzewaniu można zaobserwować endotermiczny pik topnienia. Wyznaczona z pików temperatura jest charakterystyczna dla LDPE. Ten sam pik występuje również w termogramie próbki z dodatkiem kopolimeru polipropylenu (Rys.2). Charakterystyczny pik topnienia PP pojawia się przy temperaturze 163°C. Dodatek kopolimeru spowodował wzrost krystaliczności fazy PE z 36,48% do 37,97%.



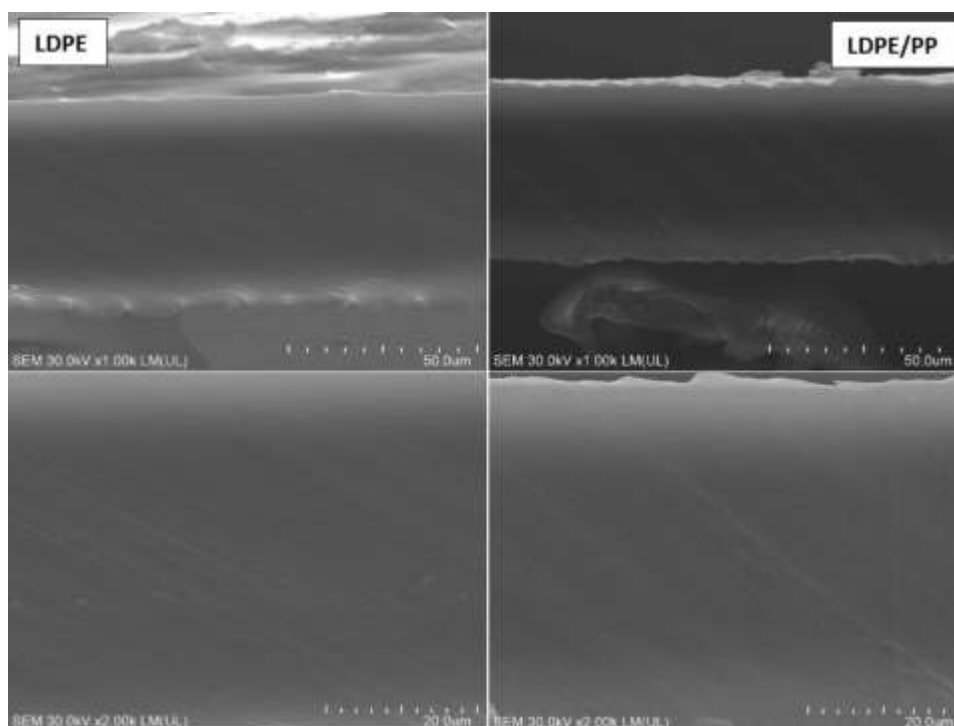
Rysunek 1 Termogram folia LDPE



Rysunek 2 Termogram folia LDPE/cPP

### 3.2 Morfologia tworzywa

Pomiędzy próbką folii z czystego polietylenu a próbką folii z dodatkiem kopolimeru cPP nie zaobserwowano różnicy co widać na poniższych zdjęciach. (Rys.3)

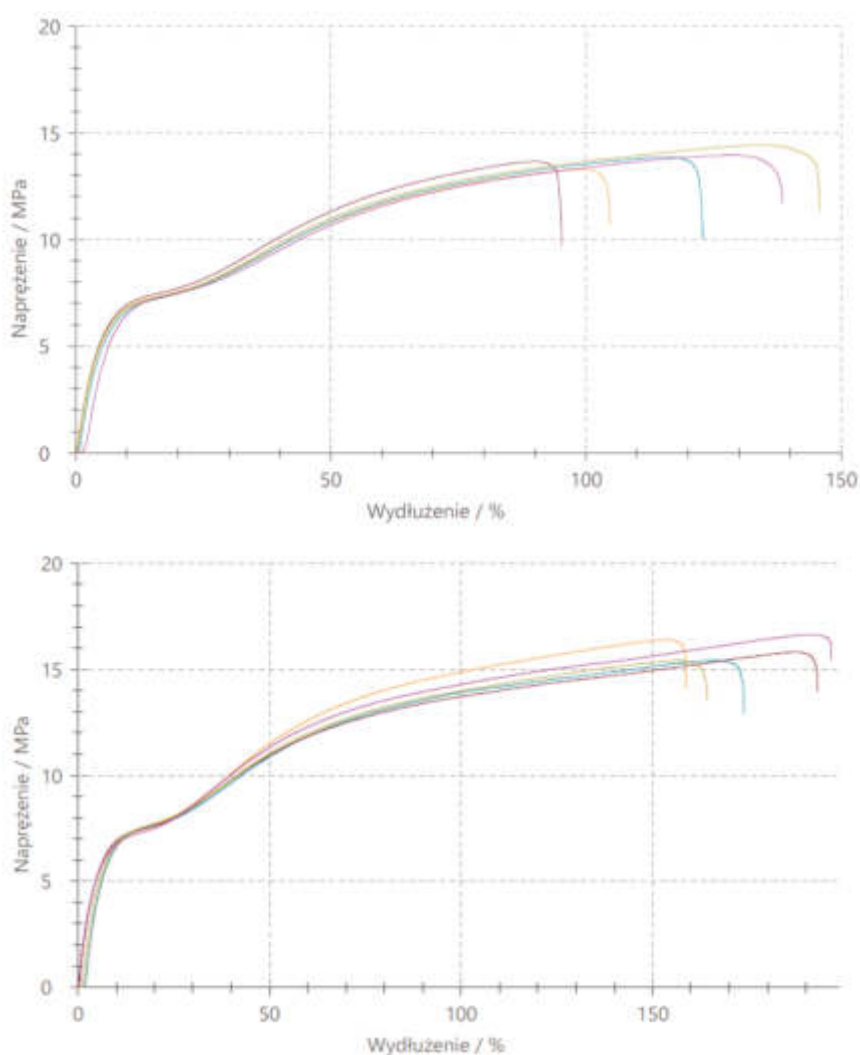


Rysunek 3 Morfologia folia LDPE oraz LDPE/cPP przy powiększeniu 1000x (górze) oraz x2000x (dół)

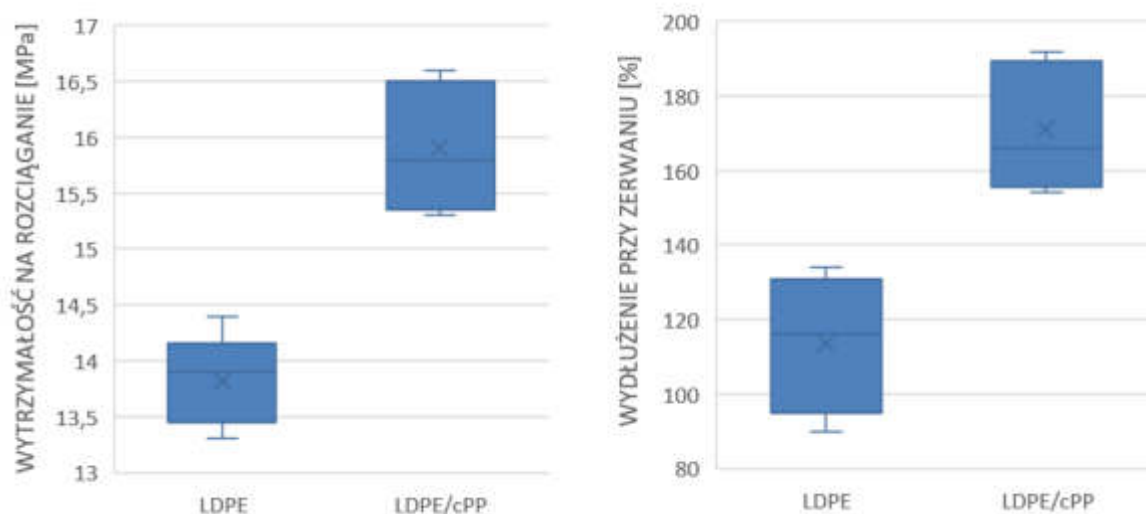
W próbce z dodatkiem kopolimeru nie występowały aglomeraty świadczące o złym wymieszaniu. Obserwowany przełom posiadał jednolitą strukturę, podobną do próbki czystego materiału co świadczy o bardzo dobrej mieszalności obu tworzyw.

### 3.3 Wytrzymałość na rozciąganie

Charakterystyka folii została przedstawiona na wykresach naprężenie-odkształcenie dla LDPE oraz LDPE/cPP (Rys.4). Średnia wytrzymałość na rozciąganie folii LDPE wyniosła 13,8MPa (sd:0,43MPa) natomiast folii z dodatkiem kopolimeru 15,9MPa (sd:0,56MPa). Wydłużenie przy zerwaniu wyniosło odpowiednio 114% (sd:19%) i 171% (sd:18%). Indywidualne wyniki zostały dodatkowo podsumowana na wykresach skrzynkowych. (Rys.5)



Rysunek 4 Wykres naprężenie-odkształcenie próbek folii LDPE (górną) oraz LDPE/cPP (dół)



Rysunek 5 Wykres pudełkowy z porównaniem próbek LDPE i LDPE/cPP

### 3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Dodatek 5% kopolimeru blokowego polipropylenu spowodował wzrost krystaliczności polietylenu o 4% w stosunku do czystego LDPE. Zaobserwowano również zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie o 15,2% oraz wzrost wydłużenia przy zerwaniu o 50% w stosunku do folii wytworzonej z czystego polietylenu. Materiał wykazał bardzo dobrą mieszalność podczas wytłaczania. W próbkach nie zaobserwowano niezhomogenizowanych aglomeratów lub innych zaburzeń struktury. Zalecane przeprowadzenie dalszych badań w celu ustalenia wpływu dodatku w większym udziale ilościowym.

Praca powstała w ramach doktoratu przemysłowego autora korespondencyjnego. Materiał do badań został wytworzony i dostarczony przez Centrum Badawczo-Rozwojowe Grupy Abriso w Gliwicach. Próbki zostały zbadane przy użyciu maszyny wytrzymałościowej będącej na wyposażeniu laboratorium przedsiębiorstwa Jiffy Packaging Sp. z o.o. w Gliwicach.

### LITERATURA

1. Mofokeng TG ,et al.; *Macromolecular Materials and Engineering* 300 (2016)
2. Li J. ,et al., *Journal of Applied Polymer Science* 87 (2003)
3. Li J ,et al., *Journal of Applied Polymer Science* 82 (2001)
4. Qin J ,et al., *Journal of Applied Polymer Science* 110 (2008)
5. Gao J. ,et al., *Journal of Applied Polymer Science* 93 (2004)
6. Christova D., Touleshkov N. , *Macromolecular Symposia* 181 (2002)
7. Otosuki Y. ,et al., *Polymer Journal* 52 (2019)
8. Strapasson R ,et al., *Polymer Testing* 24 (2005)
9. Wu H. Guo S-y, *Chinese Journal of Polymer Science* 25 (2007)
10. Salih S.E., *Modern Applied Science* 7 (2013)
11. Rasavi-Nouri M., *Journal of Chemical Engineering* 9 (2012)



12. Shafigullin LN ,et al., IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018
13. Liang JZ, Journal of Materials Processing Technology 66 (1997)
14. Shan GF ,et al., Journal of Macromolecular Science 46 (2007)
15. Schurmann BL, Polymer 39 (1998)
16. Penava NV ,et al., Journal of Elastomers & Plastics 45 (2012)
17. Nolley E. ,et al., Polymer Engineering and Science 20 (1980)
18. Ha ChS ,et al., Polymers for Advanced Technologies 7 (1995)
19. Holz N. ,et al. Polymer Engineering and Science 36 (1996)
20. AlJuhani AA, Suleiman MA, Journal for Science and Engineering 37 (2012)
21. Li L. ,et al., Polymer Physics 35 (1997)
22. Fortelny I ,et al., Macromolecular Materials and Engineering 238 (1996)
23. Borovanska I. ,et al., Journal of Elastomers & Plastics 46 (2014)
24. Vaccaro E. ,et al., Journal of Applied Polymer Science 63 (1997)
25. Chen JH ,et al., Polymer 48 (2007)
26. Mader D., et al., Macromolecules 32 (1999)
27. Uehara I., et al., Polymer 37 (1996)
28. Yamashita K. ,et al., Polymer Engineering and Science 49 (2009)
29. Supaphol P., Journal of Applied Polymer Science 82 (2001)
30. Harasawa J., et al., Journal of Molecular Structure 610 (2002)
31. De Rosa C., Auriemma F., Progress in Polymer Science 31 (2006)
32. Zhang X., et al., Polymer 46 (2005)
33. Amer I., et al., Materials Science 22 (2016)
34. Bonnet M, et al., Colloid and Polymer Science 276 (1998)
35. Loos J. ,et al., Polymer 41 (2000)
36. Drozdov AD ,et al., Computational Materials Science 50 (2010)
37. Ryba J., Ujhelyiova A, Acta Chimica Slovaca 1 (2008)
38. PN-EN ISO 11357-1:2016-11
39. PN-EN ISO 11357-3:2018-06
40. Batakliiev T., et al., Applied Composite Materials, 28/4 (2021)
41. Munaro M., et al., Journal of Polymer Research, 15 (2008)
42. Balkaev D., et al, Materials Today Communications, 26 (2021)

## Súčasn  trendy systémov pl novania podnikov ch zdrojov

Patrik Chobot<sup>a</sup>, Milan Martinkovi <sup>b</sup>, Lenka Kuchariková<sup>a</sup>, Eva Tillová<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Žilinská univerzita v Žiline, Strojnické fakulta, Katedra materiálového inžinierstva, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovak Republic

<sup>b</sup> Žilinská univerzita v Žiline. Strojnické fakulta, Katedra priemyselnoho inžinierstva, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovak Republic

**Abstract:**  l nok sa zaoberá súčasnými trendami, ktor  aktuálne prevládajú v systémoch plánovania podnikových zdrojov (Enterprise Resource Planning - ERP). V článku je spracovan  porovnanie piatich vybraných ERP systémov od rôznych dodávateľov, ktor  s  porovnaní podľa vybraných ukazovateľov. Cieľom tohto článku je komparácia vybraných ERP systémov, ktor  sú najviac vyu ivan  v praxi.

**Keywords:** podnikov  informa n  systém, ERP systém, trendy ERP, cloudov  ERP

### 1. ÚVOD

Správa informácií je dnes pre mnohé podniky veľkou výzvou. Sledovanie údajov vo viacerých systémoch často vedie ku problémom, duplikátom a chybám. Plánovanie podnikových zdrojov (ERP) je proces, ktorý podniky pou ivaj  na správu a integráciu dôležitých  ast  ich podnikania. Mnoho softvérových aplikácií ERP je pre podniky dôležitých, pretože im pomáhajú implementovať plánovanie zdrojov integráciou všetkých procesov potrebných na chod ich podniku do jednoho systému. Softv rov  systém ERP môže tiež integrovať plánovanie, nákup zásob, predaj, marketing, financie, ľudske zdroje a d alšie. Tento systém si je možné predstaviť ako lepidlo, ktor  spája veľk  skupinu rôznych po ita ov ch systémov pre veľk  organizáciu. Bez aplikácie ERP by malo ka d  oddelenie svoj systém optimalizovan  pre svoje konkrétne úlohy. Vďaka softvéru ERP m  ka d  oddelenie stále svoj systém, ale ku vsetk m systémom je možné pristupovať prostredníctvom jednej aplikácie s jedným rozhraním. To zvyšuje presnosť, konzistenciu a bezpečnosť obchodných údajov.

### 2. POROVNANIE ERP SYSTÉMOV PODĽA OBSAHU MODULOV

Dôležitou časťou pri výbere ERP systému je výber samotnoho systému podľa jeho modulov. Moduly si vyberajú podniky podľa svojich potrieb, preto nie všetky moduly sú pre podnik potrebn . Rôzne podnikateľske sektory si vyžadujú rôzne funkcie ERP. Príkladom môže byť farmaceutick  sektor, ktor  potrebuje pre svoju činnosť in  moduly ERP systému ako má

automobilový priemysel a zase automobilový priemysel potrebuje iné moduly ERP ako má napríklad chemický priemysel. Analýza sa zamerala na výber modulov, ktorých využitie je možné nájsť v strojárskom priemysle, odvetví priemyselného inžinierstva. Vybrané ERP systémy sú vyhodnotené v (Tab.1) podľa toho, či daný systém obsahuje konkrétny modul alebo nie.

Tab. 1 Porovnanie ERP systémov podľa obsahu modulov [1]

Table.1 Comparison of ERP systems according to the content of modules [1]

| INTEGROVANÉ MODULY                    | Microsoft Dynamics 365 | Epicor | Infor SyteLine | SAP S/4 HANA | Oracle ERP |
|---------------------------------------|------------------------|--------|----------------|--------------|------------|
| Business Intelligence / Analýza (BI)  | ✓                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |
| Riadenie vzťahov so zákazníkmi (CRM)  | ✓                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |
| Zákaznícky servis                     | X                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |
| Financie a účtovníctvo                | ✓                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |
| Ludské zdroje (HR)                    | ✓                      | ✓      | X              | X            | ✓          |
| Riadenie dodávateľského reťazca (SCM) | ✓                      | X      | ✓              | ✓            | ✓          |
| Riadenie zásob                        | ✓                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |
| Riadenie objednávok                   | ✓                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |
| Plánovanie                            | ✓                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |
| Projektový manažment                  | ✓                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |
| Nákup                                 | ✓                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |
| Kontrola kvality                      | ✓                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |
| Predaj                                | ✓                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |
| Distribúcia                           | ✓                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |
| Skladový manažment                    | ✓                      | X      | ✓              | ✓            | ✓          |
| Správa majetku                        | ✓                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |
| Riadenie podnikového výkonu (CPM)     | ✓                      | ✓      | X              | X            | ✓          |
| Správa dokumentov                     | X                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |
| Fakturácia                            | ✓                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |
| Kalkulácia                            | ✓                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |

### 3. POROVNANIE ERP SYSTÉMOV Z HĽADISKA CENY SOFTVÉRU

V závislosti od typu nasadenia používajú dodávatelia ERP systémov dva cenové modely:

- Trvalé licencie.
- Predplatné.

**Trvalé licencie** - spoločnosti, ktoré sa rozhodnú hostiť ERP softvér pomocou svojich vlastných serverov (lokálne nasadenie) zvyčajne platia neustály licenčný poplatok. Tieto jednorazové náklady sa platia vopred a sú založené na počte používateľov a úrovni prispôsobenia. Trvalé licencie zvyčajne nezahŕňajú opakujúce sa náklady, ako je údržba, podpora a aktualizácie.

**Predplatný program** - spoločnosti môžu tiež platiť poplatok za predplatné za prístup ku cloudovému softvéru ERP, ktorý predajca udržiava a hostí na dátovom servere tretej strany. Cenový model softvéru ako služby (SaaS) znamená, že poplatky sa platia za používateľa mesačne alebo ročne. Plány predplatného často vyžadujú, aby spoločnosti mali minimálnu dĺžku zmluvy a prichádzali do rôznych úrovní s rastúcou funkčnosťou a modulmi [2].

Cenové modely dávajú zákazníkom možnosť vybrať si ten najvhodnejší ERP softvér a prispôbiť ho svojim požiadavkám. Náklady majú teda veľký vplyv pri rozhodovaní podniku o tom, ktorý ERP systém je pre ich podnik tým najlepším riešením, či je to softvér s trvalou licenciou alebo je to softvér s mesačným predplatným. Dôležitým faktorom je aj spôsob hostingu ERP softvéru. Cloudové riešenia prinášajú väčšie množstvo výhod svojim používateľom ako riešenia on-premise a to hlavne z dôvodu úspory nákladov na zabezpečenie hardvéru systému, za ktorý je zodpovedný poskytovateľ služby. Ďalším veľmi dôležitým ukazovateľom je počet zamestnancov, teda používateľov, od ktorého sa vyvíja aj celková cena softvéru. Dvaja z vybraných dodávateľov ERP umožňujú používateľom vybrať si iba tie moduly a funkcie, ktoré skutočne potrebujú a prispôbiť ich tak svojim potrebám. Z tohto pohľadu sa ich cena môže výrazne líšiť oproti softvérom, ktoré nemajú v ponuke možnosť prispôsobenia modulov. Vybrané ERP systémy sú vyhodnotené v (Tab. 2) z hľadiska skúšobného obdobia, ceny a možnosti modulárnej architektúry.

Tab. 2 Porovnanie ERP systémov z hľadiska ceny softvéru [3]

Table. 2 Comparison of ERP systems in terms of software price [3]

| CENOVÉ PLÁNY             | Microsoft Dynamics 365 | Epicor              | Infor Syteline      | SAP S/4 HANA        | Oracle ERP          |
|--------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Skúšobné obdobie zadarmo | X                      | X                   | X                   | 14 dni              | 30 dni              |
| Cenový model             | Mesačné predplatné     | Trvalá licencia     | Mesačné predplatné  | Mesačné predplatné  | Mesačné predplatné  |
| Cena                     | 174 eur                | 145 eur             | 124 eur             | 137 eur             | 145 eur             |
| Cena za                  | Používateľ / mesiac    | Používateľ / mesiac | Používateľ / mesiac | Používateľ / mesiac | Používateľ / mesiac |
| Modulárna architektúra   | X                      | ✓                   | ✓                   | X                   | X                   |

Ceny vybraných ERP systémov v tabuľke vyššie sú uvádzané ako základné trhové ceny od ktorých sa začína. Cena za softvér narastá s pribúdajúcim počtom používateľov a taktiež, ak sa používatelia rozhodnú pre softvér s modulárnou architektúrou. Pri softvéri s modulárnou architektúrou si používatelia za každý modul navyše priplatia, o konkrétne ceny jednotlivých modulov je potrebné požiadať dodávateľa ERP softvéru. Softvér ERP nie je lacný a jeho ceny

sa môžu líšiť aj v závislosti od typu nasadenia, od úrovne prispôsobenia softvéru používateľmi a nákladmi na implementáciu.

#### 4. POROVNANIE ERP SYSTÉMOV PODĽA VEĽKOSTI PODNIKU

Veľkosť podniku je dôležitým ukazovateľom pri výbere ERP systému. Dodávatelia odporúčajú používateľom, aby pri svojom výbere zvažili, či je ERP systém vhodný pre ich veľkosť podniku. Podniky preto musia dbať aj na prispôbenie ERP systému z hľadiska veľkosti podniku. Možnosti a funkcie ERP systémov určené pre malé podniky nie sú totožné s možnosťami a funkciami pre veľké podniky. Vybrané ERP systémy sú vyhodnotené v (Tab.3) podľa toho, či je systém vhodný pre danú veľkosť podniku.

Tab. 3 Porovnanie ERP systémov podľa veľkosti podniku (Vlastné spracovanie)

Table. 3 Comparison of ERP systems according to the size of the company (own processing)

| VEĽKOSŤ<br>PODNIKU | Microsoft<br>Dynamics 365 | Epicor | Infor SyteLine | SAP S/4 HANA | Oracle ERP |
|--------------------|---------------------------|--------|----------------|--------------|------------|
| Malý podnik        | ✓                         | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |
| Stredný podnik     | ✓                         | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |
| Veľký podnik       | ✓                         | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |

#### 5. POROVNANIE ERP SYSTÉMOV PODĽA DĹŽKY IMPLEMENTÁCIE

Implementácia ERP systému popisuje proces plánovania, konfigurácie a nasadenia ERP. Pre implementáciu ERP systému neexistuje žiadny štandardný časový rámec, pretože sa môže líšiť od niekoľkých okolností. Implementácia ERP systému vo všeobecnosti trvá od 6 mesiacov do 2 rokov. Môže sa to však veľmi líšiť v závislosti od veľkosti podniku, zložitosti inštalovaného systému, od očakávaní súčasných používateľov, od prostredia podniku alebo od integrácie údajov zo starších systémov. Pri toľkých premenných je dôležité prijať trpezlivé myslenie, pretože z dlhodobého hľadiska sa proces implementácie ERP systému neoplatí uponáhľať [4].

Dĺžka implementácie vybraných ERP systémov sa nedá konkrétne časovo špecifikovať, pretože je to náročný proces, ktorý závisí od okolností spomenutých vyššie. Implementácia ERP systému je zložitá aj z toho dôvodu, že systém ERP podporuje a automatizuje mnoho rôznych funkcií. Rôzna dĺžka implementácie môže nastať aj v prípade, že si podnik nevyberie ERP systém so štandardným obsahom modulov, ale sa rozhodne pre výber systému, ktorý poskytuje modulárnu architektúru. Pri takomto riešení zohráva úlohu aj zložitosť procesov v podniku a aj počet vybraných modulov, ktoré si podnik plánuje prispôbiť svojim potrebám. Dĺžka implementácie závisí aj od schopností implementačného tímu, ktorého súčasťou by mali byť špecialisti z oblasti IT. Títo ľudia majú dôležité funkcie počas celého procesu implementácie a aj vďaka nim sa môže projekt stať úspešným.

Pre zaistenie úspešnej implementácie musí podnik starostlivo definovať svoje požiadavky, určiť ako procesy prepracovať tak, aby využili výhody systému, nakonfigurovať ERP systém tak, aby tieto procesy podporoval a pred finálnym nasadením na používateľov ho dôsledne

otestovať. Úspešná orientácia vo všetkých týchto krokoch podľa plánu si vyžaduje starostlivé plánovanie a štruktúrovaný postup implementácie [5].

## 6. POROVNANIE ERP SYSTÉMOV Z HĽADISKA MOBILNÝCH SCHOPNOSTÍ

Aktuálnym trendom pri ERP systémoch je podpora mobilných zariadení. Používatelia môžu pomocou smartfónov, či tabletov vykonávať obchodné operácie kedykoľvek a kdekoľvek a zlepšovať tak komunikačné schopnosti celého podniku. Vybrané ERP systémy sú vyhodnotené v (Tab.4) podľa toho, či je mobilná aplikácia ERP dostupná pre daný operačný systém a tiež či vybraný ERP softvér podporuje webové pripojenie.

Tab. 4 Porovnanie ERP systémov podľa mobilných schopností [1]

Table. 4 Comparison of ERP systems in terms of mobile capabilities [1]

| MOBILNÉ SCHOPNOSTI    | Microsoft Dynamics 365 | Epicor | Infor SyteLine | SAP S/4 HANA | Oracle ERP |
|-----------------------|------------------------|--------|----------------|--------------|------------|
| Aplikácia pre Android | ✓                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |
| Aplikácia pre IOS     | ✓                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |
| WEB                   | ✓                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |

## 7. POROVNANIE ERP SYSTÉMOV Z HĽADISKA SYSTÉMOVÉHO HOSTINGU

Pri systémovom hostingu v oblasti ERP systémov sú aktuálne lídrom cloudové riešenia, ale taktiež sa využívajú aj riešenia on-premise modelu, ktorý umožňuje ERP softvér nainštalovať a prevádzkovať priamo v priestoroch podniku, teda na mieste. Vybrané ERP systémy sú v (Tab.5) vyhodnotené podľa toho, aké možnosti hostingu systém ponúka.

Tab. 5 Porovnanie ERP systémov z hľadiska systémového hostingu [1]

Table. 5 Comparison of ERP systems in terms of system hosting [1]

| SYSTÉMOVÝ HOSTING | Microsoft Dynamics 365 | Epicor | Infor SyteLine | SAP S/4 HANA | Oracle ERP |
|-------------------|------------------------|--------|----------------|--------------|------------|
| Cloud             | ✓                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |
| On-premise        | ✓                      | ✓      | ✓              | ✓            | ✓          |

## 8. ZÁVER

Cieľom tohto článku bola komparácia vybraných ERP systémov, ktoré sú najviac využívané v praxi. Z najčastejšie využívaných ERP systémov sa vybralo päť, ktoré sa porovnali z hľadiska kľúčových vlastností, výhod a nevýhod, obsahu modulov, ceny systémov, prispôsobenia podľa veľkosti podniku, dĺžky implementácie, mobilných schopností a systémového hostingu.

Z pohľadu týchto ukazovateľov, je možné na základe celkového porovnania vybrať jeden konkrétny ERP systém. Po celkovom porovnaní vybraných ERP systémov, sa zdá byť výber ERP systému od spoločnosti Microsoft ako najlepšie riešenie. ERP systém Microsoft Dynamics 365 poskytuje sadu podnikových aplikácií, ktoré podnikom umožnia sledovať potencionálnych zákazníkov, zvyšovať predaj a zefektívňovať operácie. Využíva nástroje umelej inteligencie, strojového učenia a zmiešanej reality a môže tak svojim používateľom poskytnúť prediktívne pokyny pre predaj a automatickú ochranu proti podvodom. Aj keď sa rozhodlo v tomto článku pre tento ERP systém, je možné, že nie každému podniku by tento systém vyhovoval a preto je potrebné, aby si podnik vybral ten najvhodnejší ERP softvér podľa svojich vlastných požiadaviek, ktorý mu v budúcnosti poskytne priestor pre ďalší rozvoj.

### PodĎakovanie

Príspevok vznikol v rámci riešenia spoločného slovensko-poľského študentského projektu TalentDetector 2022 a projektu KEGA 016ŽU-4/2020.

### LITERATÚRA

1. ERPFocus, 2021. Find & Compare ERP Software. [online]. Dostupné z: <https://www.erpfocus.com/erp-product-comparison.html>
2. BetterBuys, 2021. How Much Does An ERP System Cost? 2021 Pricing Guide. [online]. Dostupné z: <https://www.betterbuys.com/erp/erp-pricing-guide/>
3. SoftwarePath, 2021. Find & Compare great software for your team. [online]. Dostupné z: <https://softwarepath.com/shortlists/93350535-b750-4492-a64a-5d23c7d0ac06>
4. ArcherPoint, 2015. How Long Should An ERP Implementation Take? [online]. Dostupné z: <https://www.archerpoint.com/blog/Posts/how-long-should-erp-implementation-take>
5. Schwarz, L. 2020. 6 Key Phases of an ERP Implementation Plan. [online]. Dostupné z: <https://www.netsuite.com/portal/resource/articles/erp/erp-implementation-phases.shtml>

## Podnikateľské riziká a spôsoby ich znižovania

Veronika Chvalníková<sup>a\*</sup>, Eleonóra Bigošová<sup>b</sup>, Lenka Kuchariková<sup>a</sup>, Eva Tillová<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra materiálového inžinierstva, Univerzitná 8215/1, 01026 Žilina, Slovak Republic

<sup>b</sup> Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra priemyselného inžinierstva, Univerzitná 8215/1, 01026 Žilina, Slovak Republic

\* email: chvalnikova4@stud.uniza.sk

**Abstrakt:** Cieľom tohto článku je analyzovať podnikateľské riziká a identifikovať spôsoby ich znižovania. Obsahuje podrobnejšie identifikované spôsoby znižovania podnikateľských rizík, odporúčania, ktoré môžu podniky použiť na znižovanie rizík avšak pre podniky nie sú finančne náročné. Na základe získaných poznatkov o častých rizikách a konkrétnych spôsoboch znižovania bola vypracovaná tabuľka, ktorá obsahuje informácie o tom aký spôsob znižovania je vhodné použiť na konkrétne riziká.

**Kľúčové slová:** podnikateľské riziko, diverzifikácia, delenie rizika, transfer rizika

### 1. ÚVOD

Každý fungujúci podnik sa zaoberá podnikateľskými rizikami. Existujú rôzne oblasti rizík, a každý podnik sa stretáva s inými problémami a riešeniami. Nie je možné použiť na rovnaký spôsob pre rôzne podniky s inými vstupnými údajmi. Ak je potrebné vyriešiť problém v podniku, je potrebné celý podnik a jeho okolie preskúmať do detailov. Cieľom podnikov nie je len vyriešiť problematiku rizík ale aj určovanie hrozieb a navrhovanie možných riešení, pretože niektoré faktory a príčiny, ktoré nepriaznivo vplyvajú na vznik rizika mnoho podnikov prehliada a zanedbáva. Je preto potrebné poukazovať a rozoberať niektoré spôsoby znižovania rizík a pripomenúť hlavne tie, ktoré sa pre podniky zdajú samozrejme.

### 2. SPÔSOBY ZNIŽOVANIA PODNIKATEĽSKÉHO RIZIKA

Podnikatelia môžu podnikateľské riziká znížiť vhodnými postupmi alebo opatreniami a v najlepšom prípade môže vzniknuté riziká úplne eliminovať. Tieto metódy, je možné použiť z hľadiska spôsobu hodnotenia rizika, pri ktorom je možné zistiť kvalitu a kvantitu. Z hľadiska zdrojov informácií je možné charakterizovať a analyzovať príčiny a následky z posudzovaných rizík a to deduktívne či induktívne. Induktívne je to možné z predpokladu a deduktívne z údajov získaných na základe udalostí. Väčšinu základných metód je možné použiť všeobecne



na vybraný problém podniku, iné je možné používať na špeciálne problémy a podľa špecifických situácií ich rozdeliť medzi jednotlivé pôsobiská a rizikové javy a určiť stratégie, ktorými sú podniky schopné znižovať podnikateľské riziká [1].

## 2.1 Diverzifikácia

Ak podnik vyvíja snahu rozkladať riziko na čo možno najväčšiu základňu, predchádza tak úplnému úpadku v jednej z oblastí a naopak nárast pôsobenia v ostatných oblastiach výroby, a tento úkon nazývame diverzifikáciou. Diverzifikácia je tvorená z niekoľkých základných metód, ktoré je možné používať v závislosti od daného problému. Prvou stratégiou je vertikálna integrácia, kedy podnik znižuje svoju závislosť na dodávateľoch tak, že nahradí nákup komponentov potrebných na výrobu, vlastnou výrobou. Horizontálna diverzifikácia rozširuje výrobu o produkty alebo výrobky, ktoré sú ušitým doplnkovým produktom a napomáhajú vylepšiť meno podniku, jeho možnosti, technológie či skúsenosti. Diverzifikáciou do nepríbuzných oblastí podnik vytvára a zavádza do výroby výrobok, ktorý nie je vo výrobnom programe a ani s ním nesúvisí. Geografická diverzifikácia a stratégia je stratégia, kedy podnik znižuje riziká svojou expanziou do viacerých krajín a tak z ekonomického, politického a kurzového hľadiska predchádza prepadnutiu prevádzky vo všetkých závodoch, tým pádom je stratová iba jedna z jeho prevádzok.

Dodávateľská diverzifikácia, diverzifikácia z hľadiska zákazníkov a odbytových ciest hovorí o rizikách spojených s jednostrannými aktivitami iba na domácom trhu. Čím viac sa podnik orientuje na viaceré oblasti či expedíciu do viacerých krajín tým je vyššia možnosť redukcie rizika aj zo strany dodávateľov a zlepšenie finančnej pružnosti. Použitie minimálne jednej stratégie diverzifikácie nám umožní obmedziť tvorbu rizika alebo úplnú elimináciu rizika v prípade ak nedôjde k závislostiam medzi prvkami a činnosťami diverzifikácií [2].

## 2.2 Flexibilita

Flexibilita je vlastnosť, ktorou ak podnik disponuje, použije minimum nákladov na obmedzenie a zníženie nežiadúcich zmien v organizácií. Ak podnik použije na výrobu univerzálne stroje či technológie, je schopný použiť výrobný program podľa dopytu. Môže využívať viac druhov energie a široké spektrum sortimentu, aby v prípade nedostupnosti jedného z nich vedel ovplyvniť chod výroby. Následne lokalizuje a obmedzí zhoršenie cenového i trhového rizika. Znižovanie režijných nákladov alebo uprednostnenie prenájmu pred kúpou výrobných prostriedkov je jedným z mnohých príkladov flexibility v podniku. V prípade, že podnik narába s viacerými alternatívami a je flexibilný najmä vo financiách napreduje v investovaní, jeho výdavky nemôžu ohroziť chod firmy a tak vytvára a zväčšuje náskok pred konkurenciou [2].

## 2.3 Delenie rizika

Zakladatelia spoločnosti, akcionári a účastníci spoločností pri zakladaní alebo realizácií podniku ako aj počas jeho fungovania rozdeľujú medzi seba podnikateľské riziko aj zisk podľa svojich podielov na kapitáli a pôsobenia v podniku. Cieľom takéhoto združenia nie je iba zmenšenie rizika v podniku ale aj zvýšenie hospodárnosti či zlepšenie postavenia na trhu. Vplyvné pozície, ich prednosti a podniková činnosť prispievajú do podniku schopnosťami získať pre podnik dotácie alebo sponzorov, ktorí sú pre podnik prínosom. Ďalším prínosom pre

podniky môže byť združenie s iným podnikom, čo prispeje k zlepšeniu postavenia podniku na domácom trhu alebo aj v zahraničí. Kooperácia a koncentrácia tvorí podniky na základe právneho a ekonomického postavenia a ich samostatnosti.

Formy združených podnikov rozdelíme na základe intenzity a dĺžky podnikania:

- *Konzorcium* - ide o dočasné združenie alebo kombináciu inštitúcií či podnikov, pre zapojenie sa do spoločného podnikania a splnenie určeného projektu, ktorého cieľ by podnik samostatne nezdolal na základe náročnosti projektu a schopnosti zvládať riziko.
- *Kartel* - je skupina firiem, ktoré sa dohodli na obmedzení hospodárskej súťaže v rámci odvetvia trhu. Je to zmluvná spolupráca, pri ktorej si podniky zachovávajú ekonomickú aj právnu samostatnosť a na základe dohody členovia obmedzujú svoju silu a vylučuje sa vzájomná konkurencia. Svojím podpisom sa zaväzujú k dodržiavaniu podmienok súvisiacich s predmetom zmluvy. V predmete zmluvy sa strany môžu dohodnúť na kartel výrobný, cenový, kartel rozdelenia zisku či odbytový kartel.
- *Odbytový zväz* - je združenie podnikov za účelom reprezentovania spoločných záujmov týchto podnikov voči zákonitosti štátu, verejnosti i štátnych správ. Ide o hospodárske odborné zväzy, komory alebo zamestnanecké zväzy.
- *Koncern* - je združenie podnikov, ktoré sú právne samostatné s jednotným vedením. Ide o ekonomický celok, ktorý nemá právnu subjektivitu. Medzi ne sa zaradzujú koncern založený na zmluvnom základe alebo koncern založený na vzťahovej závislosti.

V prípade kooperácie viacerých podnikov je dôležité zostavenie zmluvy, ktorá presne stanovuje práva a povinnosti zmluvných subjektov. Celkové fungovanie podnikov vplyva na riešenie a riadenie rizík a problémov v podniku. Ak by účastníci nemali rovnakú stratégiu v riešení projektu, bola by vysoká pravdepodobnosť neúspechu [3].

## 2.4 Transfer rizika

Presúvanie rizika na iné podnikateľské subjekty je ďalší často používaný spôsob eliminovania rizika. Tento spôsob sa využíva na zvládnutie finančných, úverových či kreditných rizík, kedy nie je subjekt schopný plniť svoje povinnosti voči druhému subjektu. Transfer rizika sa realizuje pomocou rôznych spôsobov:

- Uzatváranie dlhodobých kúpnych zmlúv na dodávky surovín, materiálov, polotovarov a komponentov za vopred stanovené pevné ceny, pri ktorých eliminujeme cenové riziká.
- Uzatváranie kontraktov na predaj výrobkov v cudzej ochotnej sieti za vopred stanovených podmienok pre znižovanie trhových rizík. Zvyčajne sa využívajú v prípade ak sú predávajúci ekonomicky silnejší a majú rozhodujúce slovo.
- Prenájom výrobného zariadenia, je špecifickou formou krytia dlhodobých požiadaviek nájomníkov. Podnikateľský subjekt potrebné zariadenie, majetok nekupuje iba ho prenajme na dočasné používanie s právom na odkúpenie. Prenájom platí na základe lízingovej zmluvy, v ktorej sú uvedené požiadavky lízingovej spoločnosti, ktorá je vlastníkom majetku, o predmete a požiadavkách na prenajímateľa, na ktorého je prenesené investičné riziko.
- Oddialenie termínov uzatvorenia kontraktov na určité projekty, napríklad vývoj nových technológií, do momentu znalosti skutočných nákladov, kedy sa presunú a zredukujú nákladové riziká na subjekty vytvárajúce podmienky kontraktu.
- Termínované obchody, je termínové zaistenie znižujúce hrozby z cenového pohybu, takým spôsobom, že sa vytvoria ďalšie zmluvy opačného charakteru, čo napríklad umožňuje kompenzáciu strát z predaja produktov a to ziskom z dosiahnutého nákupu toho istého

produktu. Termínové zaist'ovanie sa využíva pri základných priemyselných surovinách z búrzh tovaru. Ide o okamžitý tovar či tovar, ktorý je dodaný v oneskorených termínoch, pri ktorom finančné riziko rozložíme pomocou termínovaných obchodov [4].

- Odkúpenie pohľadávok patrí medzi najčastejšie spôsoby presúvania rizika. Faktoring je forma podnikového financovania, pri ktorom spoločnosti získajú hotovosť pre rast a ďalšie činnosti organizácie. Faktoringová spoločnosť alebo banka odkúpi od veriteľ'ov krátkodobé pohľadávky, ktoré vznikajú pri dodaní tovarov alebo služieb. Veriteľ'om pohľadávok sa stáva napríklad banka, ktorá financuje a preberá na seba riziko v prípade, že kupujúci nebude schopný zaplatiť. Podobný princíp je forfaiting, kde forfaitingové spoločnosti odkúpi strednodobé a dlhodobé pohľadávky od dodávateľa. Schopnosť takýchto pohľadávok je od 90 dní a vo väčšine prípadov sa obchoduje s vysokými menovitými hodnotami tovaru a zahraničnými odberateľmi. Vo forfaitingovej zmluve, ktorá sa uzatvorí pred vznikom pohľadávky sa nachádzajú práva a povinnosti oboch strán vyžaduje zaistenie pohľadávky a nezaväzuje sa kryť riziká v prípade nezaplatenia pohľadávky odberateľom, kedy môže vymáhať od dlžníka zaplataenie avšak v prípade nezaplatenia nie je povinný pohľadávku vrátiť svojmu klientovi [5].
- Zabezpečenie pracovných síl z externých zdrojov, (outsourcing).

## 2.5 Poistenie

Podnikatelia chránia spoločnosti a ich majetky, ktoré sa v mnohých prípadoch ocitajú v nepriaznivých rizikových situáciách. Poistenie majetku je nevyhnutné a má význam predovšetkým pre menšie firmy a malých podnikateľ'ov, ktorých by strata vo vysokej miere stála množstvo financií či krach. Poistné zmluvy sú rôzne a je možné si v nich zvoliť či bude náhrada škody čiastočná alebo úplná. Určenie hodnoty majetku aj náhradu vzniknutej škody je stanovené pri dojednávani poistenia. Poistník platí poistné pravidelne počas celej doby poistenia, v prípade zmeny vlastníka majetku poistenie zaniká. Medzi poistné riziká pri poistení majetku patria:

- poistenie v prípade požiaru a živelných škôd,
- poistenie zodpovednosti podnikateľ'ov za škody spôsobené prevádzkou podniku tretím osobám,
- poistenie v prípade havárie,
- poistenie v prípade vandalizmu.

Vhodné poistenie je efektívnym riešením pre zmiernenie či zníženie rôznych druhov rizík, tým sa podniky chránia a teda záleží na rozsahu poistených rizík.

## 3. ZHODNOTENIE A PRÍNOSY V RIEŠENEJ OBLASTI

Procesy riadenia rizika zväčša spočívajú v schopnosti používať opatrenia pre zníženie na akceptovateľnú úroveň alebo úplne odstránenie. Aby sa mohol zabezpečiť pozitívny výsledok v riešení problematiky je možné sa riadiť štyrmi spôsobmi. Eliminácia alebo odstránenie rizika, znižovanie možného rizika, presúvania rizika na iné systémy alebo tolerovanie rizika. V praxi je odstránenie rizika v mnohých prípadoch ťažko dosiahnuteľný výsledok a dá sa dosiahnuť iba za určitých podmienok. Je to náročný postup, pri ktorom je nutné neohrozovať organizáciu ďalšími menšími rizikami. Pre znižovanie úrovne existujúceho rizika do požadovanej úrovne je

potrebné charakterizovať pravidlá a hranice či bezpečné pracovné postupy, za ktoré sa nesmie v žiadnom prípade prejsť, pretože by sa závažnosť dôsledkov zhoršovala a pravdepodobnosť rizika zvyšovala. Ako špecifický prípad sa uvádza presúvanie rizika a to najmä do finančnej roviny. Tolerancia rizík je alternatíva, ktorá sa použije v prípade rizík, ktoré v momentálnej situácii nie je možné znížiť na základe vedeckých či technických poznatkov alebo náklady na obnovu a riadenie rizika presahujú celkové náklady spojené so stratami v dôsledku rizika. Ďalšie metódy k znižovaniu negatívnych dopadov rizika je vytváranie rezerv či vyhýbanie sa neprijateľnému riziku alebo pomocou vytvárania trhových prieskumov a analýz, či získavania informácií o konkurencii využiť oslabenie informačného deficitu a využitie dominancie nad konkurenciou.

#### 4. ZÁVER

Z podnikateľských rizík a spomenutých spôsobov znižovania podnikateľských rizík nachádzajúcich sa v tabuľke 1 je možné identifikovať, ktoré spôsoby je možné použiť na konkrétne riziká.

Tabuľka 1. Zhodnotenie vzťahov rizík a spôsobov ich znižovania  
Table 1. Evaluation of risk relationships and ways to reduce them

| Podnikateľské riziká        | Spôdoby znižovania podnikateľských rizík |             |                |                 |                  |
|-----------------------------|--|-------------|----------------|-----------------|------------------|
|                             | DIVERZIFIKÁCIA                           | FLEXIBILITA | DELENIE RIZIKA | TRANSFER RIZIKA | POISTENIE RIZIKA |
| Ekonomické                  | ✓  | ✓           | ✓              | ✓               | X                |
| Technicko-technologické     | ✓  | ✓           | ✓              | ✓               | X                |
| Výrobné                     | ✓  | ✓           | ✓              | ✓               | X                |
| Dodávateľské a odberateľské | ✓  | ✓           | ✓              | ✓               | ✓                |
| Politické                   | ✓  | ✓           | X              | X               | X                |
| Riziká zo zmeny vlastníkov  | X  | ✓           | X              | X               | X                |
| Živelné                     | ✓  | ✓           | X              | X               | ✓                |
| Finančné                    | ✓  | ✓           | ✓              | ✓               | X                |
| Trhové                      | ✓  | ✓           | X              | ✓               | X                |
| Legislatívne                | ✓  | ✓           | X              | X               | X                |
| Informačné                  | X  | ✓           | ✓              | X               | X                |
| Sociálno-pracovné           | ✓  | ✓           | ✓              | ✓               | ✓                |

Existuje množstvo rizík a každé je jedinečné, preto ak sú dve riziká, ktoré patria do rovnakého rozdelenia rizík neznamená to že sa dajú znižovať rovnakým spôsobom. V tabuľke

sú zaškrtnuté najmä spôsoby, ktoré pri jednotlivých rizikách nejdú vôbec ovplyvniť daným spôsobom. Ak sa do úvahy vezmú ekonomické riziká, je zjavné, že jediný s uvedených spôsobov, ktorý sa nedá aplikovať na takého riziká je poistenie. V prípade technicko-technologických a výrobných rizík je tiež nemožné poistiť neúspech zvolenej technológie či výrobku podniku. S politickými a legislatívnymi rizikami sa podniky stretávajú v čase, keď to najmenej očakávajú. Na takéto riziká sa dá pozitívne zareagovať v prípade, ak má podnik flexibilný manažment a pracovníkov čo nepriamo súvisí aj s diverzifikáciou ako napríklad ak má firma pobočky po celom svete a politické riziko zasiahne jednu z nich, ostatné môžu naďalej fungovať bezo zmeny. Riziko vznikajúce zo zmeny vlastníkov je možné ovplyvniť flexibilitou. Pri živelných rizikách je najlepší spôsob ochrany poistenie. Finančné riziká a trhové riziká obdobne ako aj ekonomické je málo pravdepodobné ovplyvniť poistením, ostatné spôsoby závisia od iných podrobnejších faktorov rizika. Ak v podniku zlyhajú informačné systémy je možné sa ochrániť pred informačnými rizikami flexibilitou či rozdelením rizika. Pri informačných a sociálno-pracovných rizikách, ich ovplyvnenie závisí od viacerých faktorov a na každé z takýchto rizík sadá použiť iný spôsob znižovania.

## PodĎakovanie

Príspevok vznikol v rámci riešenia spoločného slovensko-poľského študentského projektu TalentDetector 2022 a projektu KEGA 016ŽU-4/2020.

## LITERTÚRA

1. V. Smejkal, K. Rais, Řízení rizík ve firmách a iných organizáciách. Praha: Grada 2013, ISBN 978-80-247-3051-6.
2. M. Hudáková, Manažment rizík malých a stredných podnikov. Žilinská univerzita v Žiline EIDS-vydavateľské centrum ŽU, 2019, ISBN 978-80-554-1518-5.
3. Združovanie podnikov, <https://www.euroekonom.sk/%EF%BB%BFzdruzovanie-podnikov>, 2019.
4. Transfer rizika, <https://www.podnikas.sk/transfer-rizika>, 2019.
5. Faktoring a forfaiting z daňového a účtovného aspektu. <https://www.danovecentrum.sk/cely/odborny-clanok/Faktoring-a-forfaiting-z-danoveho-a-uctovneho-aspektu-1.htm>, 2013.

## Preliminary studies on the possibility of producing an adsorbent from thermally and thermochemically oxidized activated sludge

P. Cichy <sup>a</sup>, R. Kupny <sup>a</sup>, J. Rurańska <sup>a</sup>, K. Dudzisz <sup>a</sup>, P. Stuchlik <sup>b</sup>, M. Jędrzejczyk <sup>b</sup>, R. Kryst <sup>b</sup>, D. Pokoj <sup>b</sup>, M. Bambynek <sup>c</sup>, E. Puszczalo <sup>d</sup>, B. Pieczykolan <sup>e</sup>, A. Marszałek <sup>e</sup>, M. Sroka <sup>f</sup>

<sup>a</sup> Students of Silesian University of Technology, Faculty of Chemistry  
email: piotcic184@student.polsl.pl; romakup885@student.polsl.pl;  
julirur110@student.polsl.pl; katadud228@student.polsl.pl

<sup>b</sup> Students of Silesian University of Technology, Faculty of Energy and Environmental Engineering  
email: patrstu979@student.polsl.pl; martjed038@student.polsl.pl; rafakry874@student.polsl.pl;  
domipok608@student.polsl.pl

<sup>c</sup> Student of Silesian University of Technology, Faculty of Automatic Control, Electronics and Computer Science  
email: martbam617@student.polsl.pl

<sup>d</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Energy and Environmental Engineering, Department of Air Protection  
email: ewa.puszczalo@polsl.pl

<sup>e</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Energy and Environmental Engineering, Department of Water and Wastewater Engineering  
email: barbara.pieczykolan@polsl.pl; anna.marszalek@polsl.pl

<sup>f</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials  
email: marek.sroka@polsl.pl

**Abstract:** The article describes the idea of using modified activated sludge as an adsorbent. In the study sludge was subjected to combustion at 850 °C (adsorbent I) and also further it was subjected to chemical oxidation (adsorbent II). The structure and detection of functional group for adsorbents were studied. Moreover, the effect of pH reaction for efficiency of adsorption process for two azo dyes (Acid Red 18 and Reactive Blue 81) were tested.

**Keywords:** dye, adsorption, waste sorbent, activated sludge

## 1. INTRODUCTION

### 1.2. Adsorption process

Adsorption is divided into physical and chemical. In the case of physical adsorption, the molecules of the adsorbate - the adsorbed gas or liquid that are at the interface - are subject to

Van der Waals attraction forces.. Chemical adsorption is a phenomenon where adsorbate molecules are bound to the surface where chemical connections as a result of strong interactions are created [1]. Activated carbon, carbon sorbents and inorganic adsorbents are commonly used among adsorbents. Activated carbon are produced from wood, bituminous coal, lignite, peat and coconuts, or from the stones and shells of certain fruit. Carbon sorbents are produced from activated carbons, which are impregnated with suitable substances (salts, metal oxides, iodine, sulphur), which are capable of forming chemical compounds with specific gaseous components. Inorganic adsorbents include mainly silica gels and aluminium oxides [1].

Adsorption processes are widely used in the pharmaceutical industry, in water and sewage treatment, air purification, VOC waste gases, recovery of organic solvents. In the case of adsorption of organic substances from dilute aqueous solutions, the effectiveness of the process is influenced by such properties as: molecular weight, type of functional groups, polarity or solubility. The adsorption of dyes depends on the presence of acidic surface oxides. The adsorption efficiency of cationic dyes increases with more surface oxygen groups, which are formed as a result of carbon oxidation. In the case of anionic dyes, the effect is the opposite [2].

## 1.2. Synthetic dyes

Synthetic dyes are used in widely available branches of industry, inter alia, cosmetic, paper, pharmaceutical and textile. The textile industry is the main producer of wastewater with a high content of dye [3]. In this type of industry, dyes are used for dyeing, bleaching, finishing and cleaning. On account of their wide structural availability and widespread use, reactive dyes have a high durability, ease of application and a variety of shades. In addition to their permanent staining ability, they are resistant to water, sunlight and other factors that result from the use of dyed products [4]. Dyes are classified according to the chemical structure of the molecule, solubility and application. Due to the chemical structure of the molecule, dyes are divided into carbocyclic and heterocyclic dyes. Among the carbocyclic dyes, inter alia, azo dyes, nitro dyes and nitroso dyes are distinguished. Among the heterocyclic dyes there are xanthene, oxazine, acridine, azine, thiazine and other dyes [4]. The largest class of synthetic dyes are azo dyes. Azo dyes are carcinogenic and mutagenic not only to humans but also to other living species. These dyes affect photosynthesis and aquatic life by hindering the penetration of sunlight into the water stream [3]. The distinguishing feature of all azo dyes is the presence of one or more azo groups, which are generally combined with aromatic rings. Azo dyes include dyes of many utility classes: direct, acid, metal complex, reactive, slurry, chromium, mortar and pigments [5]. Due to solubility, dyes are divided into: water-soluble, insoluble (suspensible) dyes and pigments whose salts are soluble in water. Soluble dyes are divided into: reactive dyes, direct dyes, acid dyes, acid dyes, chromic dyes, metal complex dyes and basic dyes [4].

## 1.3. Waste sorbents

Sorbents are industrial products that allow the physical adsorption of different substances. They are characterized by a very large absorbent surface and are capable of adsorbing liquids and gases of various characteristics, including water solutions, oils and petroleum compounds. Sorbents control unwanted leakages and volatilization, both in industrial processes and in everyday life [6]. Waste sorbents are organic equivalents of sorbents made of plastics. They are

generally waste generated in agricultural or industrial production, and due to the presence of appropriate compounds in their structure, they can be used to adsorb harmful substances in the environment. The advantage of such substances is the lack of the need to invest a lot of money and safety for the environment [7]. Waste sorbents are very useful in the flow-through processes used in adsorption, for example for the adsorption of synthetic dyes. This is justified despite the fact that they generally do not show high adsorption efficiency. They are usually used in higher dosages because they are readily available and most importantly, inexpensive [8]. It is very interesting to use waste as a sorbent. Organic waste can be pyrolysed under various conditions to produce efficient adsorbents with high adsorption capacity, high environmental stability or high specific surface area. One of the biggest environmental problems is used tires because they are difficult to recycle. Interesting carbonaceous materials can be produced from tires by a pyrolysis process. These materials have been tested as adsorbents of inorganic and organic pollutants in aquatic environments. Other carbonaceous raw materials, including coal, coke oven peat, etc., can be used for the treatment of drinking water and waste water. Waste and its disposal is a serious environmental problem. The generation of waste cannot be stopped, but it can be reduced or the disposal of waste can be improved [9].

#### **1.4. The characteristic of activated sludge**

Wastewater treatment is carried out in two stages. The first stage is mechanical treatment and the second stage is biological treatment. Biological wastewater treatment involves the use of microorganisms in the form of suspended solids, i.e. activated sludge [10]. Activated sludge consists of so-called flocs composed mainly of heterotrophic bacteria bound together by mucus secreted from the cells. Their size ranges from 150 to 300  $\mu\text{m}$ . The flocs absorb the pollutants in the wastewater and the microorganisms in the flocs decompose the absorbed substances. Activated sludge is a flocculent suspension composed mainly of bacteria, protozoa - ciliates and flagellates as well as rotifers and some microscopic fungi [11]. The microorganisms that make up activated sludge produce enzymes that catalyze reactions involving the degradation of macromolecular compounds into final inorganic products [12]. The color of activated sludge depends mainly on the composition of the wastewater, but also depends on the degree of oxygenation, the age of the sludge and the degree of loading of the activated sludge. Deoxygenation or long age of the sludge causes darkening of the sludge. A greater sludge age also determines a larger than average floc size, and hypoxia causes a change in sludge odor from earthy and fresh to putrid. The vast majority (80-95%) of the floc composition is dead organic matter, while the remaining (5-20%) is bacteria [12]. A by-product of industrial or municipal wastewater treatment is sewage sludge. Its combustion process produces a fine ash of reddish, pale yellow, brown or gray color. The ash has a rough and porous surface which is beneficial to its ability to absorb water. The sewage sludge consists mainly (about 75%) of silica, calcium, aluminum oxide and iron oxide [13]. The ash produced from sewage sludge incineration contains between 2.6 and 11.4 % organic matter. However, for dewatered sludge, it is even more than 50% [14]. After dewatering of sewage sludge, usually 18 to 22% of dry matter remains in it, and when sewage sludge is dried, the dry matter content is about 90% [15]. Sewage sludge ash usually has 35-75% amorphous matter [13]. Sewage sludge is divided into primary sludge, which is separated from wastewater at the very beginning of wastewater treatment, and surplus sludge, which is a growing biomass [16]. It is separated in the secondary settling tank, from where a part of it is recirculated to the bioreactors, and a part is



diverted and directed to the sludge treatment process. This action is dictated by the necessity of maintaining microbiological balance in the activated sludge chamber [10]. It contains only 0,5 - 1% of dry matter [16].

### 1.5. Use of activated sludge as a sorbent

During the wastewater treatment process a huge amount of sewage sludge as a by-product is produced. In recent years, considerable attention has been paid to the beneficial utilization of sewage sludge to reduce the risks associated with sludge disposal [17]. The sludge generated in the sewage treatment plant is utilized. The sludge can be fertilized, used for soil reclamation, or may undergo drying and subsequent combustion processes. Other example is gasification of the sludge after drying. As a result of gasification of sludge, ash and sinter are formed, which can be used as waste sorbents [18]. An example of the use of sludge as a waste sorbent is the production of biochar from the pyrolysis of sewage sludge. This is a promising approach to convert waste from wastewater treatment plants into a potential adsorbent. Biochar from sewage sludge is a material that can make a significant contribution to the removal of pollutants from water or sewage by adsorption, with the added benefit of managing massive amounts of sewage sludge [19]. Another example of a waste sorbent is a magnetic sorbent. By the pyrolysis of Fe-containing sewage sludge activated with sulfuric acid, a magnetic and sulfur-resistant sorbent (FSS-SA) was obtained. Magnetic sorbent is used for capturing elemental mercury from flue gas [20].

One of the methods used to remove dyes is the adsorption process. In the process of dye adsorption, excessive activated sludge is often used as a waste sorbent [21]. Biochar is used as a sorbent to remove Remazol Brilliant Blue R (RBBR) from an aqueous solution [19]. A magnetic hydrochar synthesized from Fenton sludge (FS) and sewage sludge (SS) was employed in the anaerobic decolorization of acid orange 7 (AO7) [22]. Activated carbon is used to adsorb the textile dyes Synozol Blue reactive (RSB) and Setapers Yellow-Brown (P2RFL). Textile sludge activated carbon (TSSAC) is prepared by chemical activation with potassium hydroxide using the Response Surface Methodology (RSM) [23]. The adsorption process is a phenomenon that occurs at the boundary of two phases. It consists of retaining molecules of a specific substance on its surface by the action of surface forces. As a result, the concentration of a specific component changes. Adsorption is mainly used to remove organic pollutants (hydrocarbons and solvents) [1]. The sorbent should be characterized by a large specific surface of the body capable of thickening the absorbed substance. This is the actual adsorbent surface area involved in the adsorption process related to the adsorbent unit mass. The adsorption properties are also determined by factors such as the type of solid, chemical composition, size, structure and number of pores, their mechanical strength and abrasion [1].

In the case of the research described in this article, Reactive Blue 81 reactive dye and Acid Red 18 dye from the group of acid dyes were used [5].

## 2. METHODOLOGY

Two synthetic dyes were tested for adsorption: Acid Red 18 (C.I. 16255, molecular weight: 604.48) and Reactive Blue 81 (C.I. 18245, molecular weight: 808.49).

The dye Acid Red 18 belongs to the group of single azo dyes. It contains one azo bond in its molecule - the dye structure is shown in Figure 1. This dye is mainly used for wool, silk, polyamide fiber and its blended fabric dyeing. It can also be used for leather, paper, plastic, wood, medicine and cosmetics of dyeing [24].

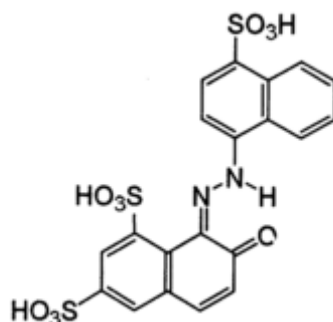


Figure 1. The chemical structure of Acid Red 18 [24]

The dye Reactive Blue 81 also belongs to the group of azo dyes. It contains one azo bond in its molecule - the dye structure is shown in Figure 2. Used for cotton fabrics, polyamide, wool dyeing or fountain of rolling dyeing [25].

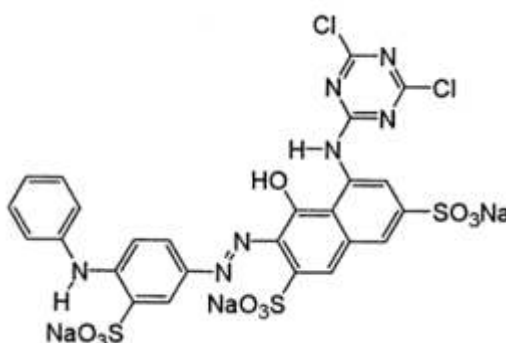


Figure 2. The chemical structure of Reactive Blue 81 [25].

In the study, waste adsorbents made of excessive activated sludge were used. The sludge was collected from a mechanical-biological municipal wastewater treatment plant where the complete removal of nutrients from wastewater takes place (organic compounds oxidation, biological removal of phosphates, nitrification process and denitrification process of nitrogen compounds occur).

Excessive activated sludge was collected from the secondary settling tank, it was pre-dried at the temperature of 105 °C and crushed to the grain size  $\Phi < 0.49$  mm. Then the sludge was combusted in a muffle furnace at 850 °C for 2 hours. The sludge prepared in this way was the first type of adsorbent used in the research (referred us adsorbent I).

The second type of adsorbent (referred us adsorbent I) was a sludge, which, after the combustion process at 850 °C, was additionally oxidized in a water bath using Fenton's reagent (Fenton process parameters: reaction pH = 3.0, dose of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> = 5 g/g of sorbent, mass ratio of Fe<sup>2+</sup>/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> = 0.25.). After the oxidation process, the sludge was washed with distilled water and dried again at 105 °C.

The FTIR-ATR measurement was performed in the research and is used to determine the functional groups present on the surface of the tested adsorbents. For this purpose

Spektrometr FTIR Nicolet™ iS50 firmy Thermo Scientific™ was used. Moreover, microscopic photos of the produced adsorbents were taken. For this purpose, the ZEISS SteREO Discovery stereoscopic microscope was used.

For both types of adsorbents and for both dyes, tests were carried out to assess the influence of the pH of the reaction environment on the effectiveness of the adsorption process. For this purpose, adsorption studies were performed in the batch adsorption process for each adsorbent-dye pair. 50 cm<sup>3</sup> of the dye solution at a given pH was introduced into 250 cm<sup>3</sup> conical flasks, then 0.1 g of adsorbent was added and shaken on a laboratory shaker for 60 minutes. After this time, the adsorbent was separated from the dye solution in the centrifugation process, and then the dye concentration in the solution after the process was measured. The measurement of the dye concentration was based on the use of the spectroscopic method, where the absorbance value of the solution was measured for a given wavelength. On the basis of the measured absorbance value, the dye concentration was then read using the standard curve. In the case of the Acid Red 18 dye, the wavelength at which the absorbance value of the solutions was measured was 506 nm, while in the case of the Reactive Blue dye - 582 nm.

The efficiency of the process was measured on the basis of the value of the degree of dye removal (eq. 1) and the value of the amount of dye adsorbed by the unit weight of the adsorbent (eq. 2).

$$R = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} [\%] \quad (1)$$

$$q = \frac{(C_0 - C_e)}{m_{sl}} \left[ \frac{mg}{g} \right] \quad (2)$$

Where:

$q$  – the amount of adsorbed dye per unit mass of sorbent [mg/g]

$C_0$  – initial concentration of dye [mg/dm<sup>3</sup>]

$C_e$  – dye concentration after adsorption process [mg/dm<sup>3</sup>]

$m_{sl}$  – the mass of sorbent at unit volume of solution [g/dm<sup>3</sup>]

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. The microscopic image

As part of the research, microscopic photos of the tested adsorbents were taken. The obtained images of both adsorbents are shown in Figures 3 and 4. The tests showed that both adsorbents show significant differences in the microscopic image. The adsorbent I was characterized by a less diversified and undulating grain surface (Fig. 3). On the other hand, the adsorbent II had more uneven, folded and extensive grain surface (Fig. 4). The structure of the grain surface and the degree of expansion of the specific surface may have a significant impact on the effectiveness of the adsorption process. It is believed that the adsorbents should have an extensive and diverse surface structure, which has a positive effect on the adsorption capacity of a given adsorbent.



Figure 3. Microscopic image of adsorbent I

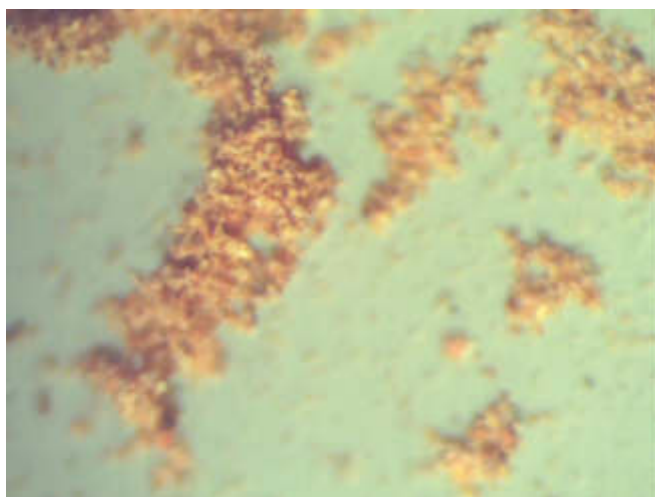


Figure 4. Microscopic image of adsorbent II

### **3.2. FTIR spectrum**

Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) in the wavenumber range from 400 to 3460  $\text{cm}^{-1}$  was used to determine the type of functional groups present on the surface of both tested adsorbents. Graphs of the dependence of the transmittance value on the wavenumber of both adsorbents are presented in Figure 5.

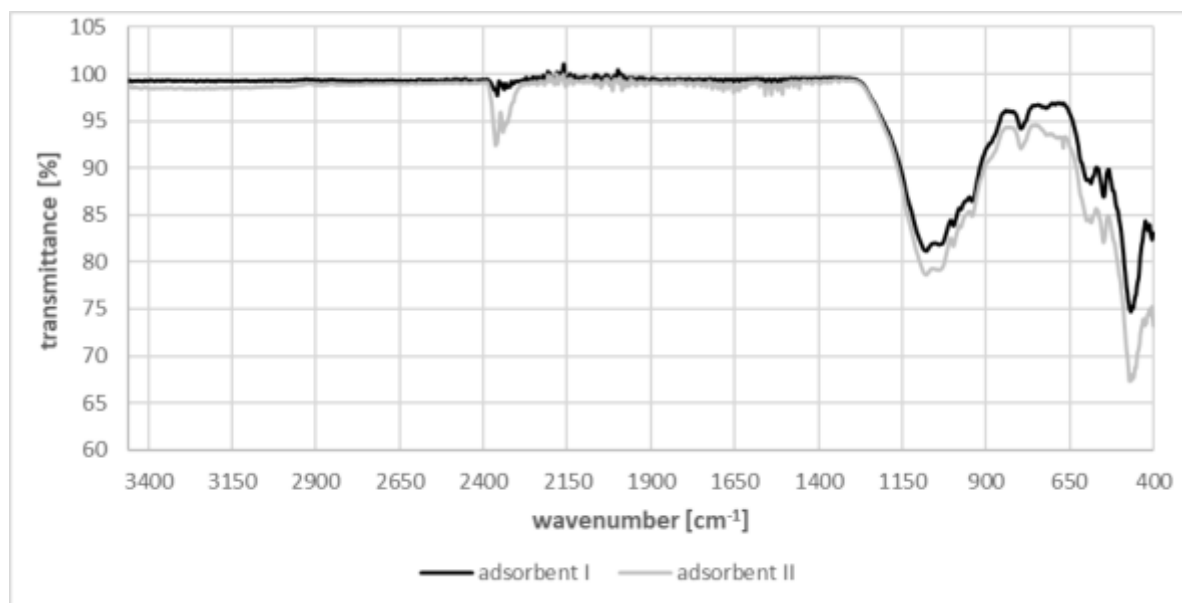


Figure 5. FTIR spectrum of adsorbents

For both sorbents in the 2500 to 4000  $\text{cm}^{-1}$  spectrum, there are no absorbance peaks, neither broad nor sharp. This is the single bond area where compounds with single bond are identified. The lack of broad absorption band in the range of between 3650 to 3250  $\text{cm}^{-1}$  proves that these adsorbents did not contain any water - it is related to the method of preparation of these adsorbents, which were subjected to a very high temperature of 850  $^{\circ}\text{C}$ .

In the case of both adsorbent spectra, peaks are observed at almost the same wavenumber values. The main difference is the absorbance value at these wavenumber.

In the area of triple bond region (wavenumber from 2000 to 2500  $\text{cm}^{-1}$ ), two main absorbance peaks were noted. At wavenumber of 2357  $\text{cm}^{-1}$ , a sharp absorbance peak is observed, while for adsorbent II this peak is much stronger. A second, much smaller peak in absorbance was recorded at a wavenumber of 2341  $\text{cm}^{-1}$ . This proves the presence of  $\text{C} \equiv \text{N}$  and  $\text{C} \equiv \text{C}$  triple bonds in both adsorbents [26].

In the area of double bonds (from 1500 to 2000  $\text{cm}^{-1}$ ), no significant peaks were noted for both tested adsorbents.

In contrast, in the fingerprint region (600 to 1500  $\text{cm}^{-1}$ ), quite a significant number of peaks were measured for both adsorbents. Moreover, again stronger peaks were recorded for sorbent II.

The wide peak was noticed at about 1078  $\text{cm}^{-1}$  and at 1039  $\text{cm}^{-1}$  what suggest the existence of C-O stretch [27], C-O-C stretch [28,29] and C-N stretch [30]. Moreover few peaks were noticed at wavenumber from 938 to 997 for both adsorbents what suggest existing the C-O-C group [31]. The peak at wavenumber 795  $\text{cm}^{-1}$  and 668  $\text{cm}^{-1}$  could be assigned to C-H group [31,32]. The absorbance peak 585  $\text{cm}^{-1}$  and 450  $\text{cm}^{-1}$  indicates that C-S stretch disulfates is present on the adsorbents' surface [26].

### 3.3. Effect of pH

During the study the effect of the value of pH on the effectiveness of the adsorption process were examined. On the basis of the conducted experiments, it can be concluded that the pH plays a key role in the efficiency of the adsorption process in the tested adsorbent-dye systems.

In the case of both dyes used in the study, the use of only a strongly acidic pH of the reaction enabled the adsorption process to occur. It was observed that only at pH 2, the removal of the dyes Acid Red 18 (2.4% and 0% for adsorbent I and adsorbent II, respectively) and Reactive Blue 81 (5.3% and 10.4% for adsorbent I and adsorbent II, respectively) was noted. The observed phenomenon may indicate that both adsorbents were characterized by a negative surface electric charge. As a result, the anions of the dye molecules and the negatively charged surface of the adsorbents repelled each other in the neutral and alkaline environment. Only the introduction of large amounts of H<sup>+</sup> ions into the reaction environment (by decreasing the reaction pH to 2) resulted in the protonation of the surface and the change of the electric charge of the adsorbents' surface to a positive one. This enabled the adsorption process to take place through the electrostatic attraction of the negatively charged dye molecules and the positively charged surface of both adsorbents [33–35].

On the basis of the research, it was also observed that in the case of both adsorbents, a greater degree of removal and a greater amount of adsorbed dye were noted for the dye Reactive Blue 81 in comparison to the dye Acid Red 18. In the case of adsorbent I, when the pH was 2.0, the amount of adsorbed dye per unit mass of adsorbent were equalled  $q=2.65$  mg/g and  $q=1.19$  mg/g for Reactive Blue 81 and Acid Red 18, respectively. In the case of adsorbent II (also when the pH of reaction was 2.0) only for dye Reactive Blue 81 adsorption process occurred and the  $q$  was 5.19 mg/g.

#### 4. CONCLUSIONS

Based on the studies, the following conclusions were drawn:

- the adsorbent produced by combusting the excessive activated sludge at 850 °C has a less extensive and undulating grain surface than the adsorbent obtained by combusting the excessive activated sludge at 850 °C and then subjected it to the oxidation process using Fenton's reagent;
- in the case of both adsorbents, a quite similar appearance of the infrared spectrum was obtained in the wavenumber range 400 to 3500 cm<sup>-1</sup>
- for both adsorbents, based on the presence of absorbance peaks in the FTIR spectrum, the following functional groups were identified: C≡C, C≡N, C-O-C, C-N, C-H and C-S;
- in the case of both adsorbents, a strongly acidic pH of the reaction is required for the adsorption process to take place effectively - this is due to the fact that the surface of the tested adsorbents has a negative surface charge and the introduction of large amounts of H<sup>+</sup> ions is required for the surface protonation phenomenon to take place. As a result, the surface of the adsorbents obtains a positive surface electrical charge, and then electrostatic attraction of the anions of the dyes may occur and the adsorption process may take place.

#### Acknowledgements

The studies were founded under the PBL project "Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza" at Silesian University of Technology in Poland

#### BIBLIOGRAPHY

- [1] Piotr Natkański, Procesy sorpcyjne, Zakład Technol. Chem. Uniw. Jagiellońskiego, (2010) 1–37.

- [2] J. Choma, M. Jaroniec, W. Burakiewicz-Mortka, M. Gwizdalski, Adsorpcja związków organicznych z roztworów wodnych na węglach aktywnych, *Ochr. Środowiska*, 1 (1995) 11–17.
- [3] H. Sultana, M. Usman, Z.H. Farooqi, Micellar flocculation for the treatment of synthetic dyestuff effluent: Kinetic, thermodynamic and mechanistic insights, *J. Mol. Liq.*, 344 (2021) 117964.
- [4] J. Kyzioł-Komosińska, M. Pająk, Usuwanie barwników z wód i ścieków metodą sorpcji na neogeńskich łąkach smektytowych, *Zabrze*, 2012.
- [5] A. Michniewicz, S. Ledakowicz, Odbarwianie wodnych roztworów wybranych barwników za pomocą kompleksu enzymatycznego lakazy z *Cerrena unicolor*, *Biotechnologia*, 4 (2003) 194–203.
- [6] I. Ostolska, *Natural low-cost sorbents*, University of Maria Curie-Skłodowska, 2018.
- [7] Sorbent - Rodzaje i Zastosowanie, [https://www.ekotu.pl/smartblog/15\\_sorbent-rodzaje-i-zastosowanie.html](https://www.ekotu.pl/smartblog/15_sorbent-rodzaje-i-zastosowanie.html), 2022.
- [8] M. Czubaszek, J. Choma, Badania adsorpcji wybranych barwników z roztworów wodnych na nanoporowatych materiałach węglowych w warunkach dynamicznych, *Ochr. Środowiska*, 40 (2018) 3–8.
- [9] L. Blahova, M. Mucha, Z. Navratilova, S. Budzyn, B. Tora, Industrial wastes as potential sorbents of heavy metals, *Inz. Miner.*, 19 (2018) 61–66.
- [10] I. Dasiewicz-Szparaga, Determination of dry mass of wastewater sludge , performed using microwave , and infrared radiation *Water quality, determination of suspended solids by means of filtration method* , (n.d.) 1–32.
- [11] E. Grabińska-Sota, *Lectures form the subject Mtehods in Environmental Protection*, Gliwice, n.d.
- [12] K. Paździor, L. Bilińska, Microscopic Analysis of Activated Sludge in Industrial Textile Wastewater Treatment Plant, *Autex Res. J.*, (2020) 1–7.
- [13] J. Singh, A. Chaudhary, V.K. Dhiman, A. Kumar, A. kanoungo, A. Goyal, Impact of dry sewage sludge on characteristics of concrete, *Mater. Today Proc.*, 52 (2022) 818–824.
- [14] Sewage sludge - Wikipedia, the free encyclopedia, [https://pl.wikipedia.org/wiki/Osad\\_ściekowy](https://pl.wikipedia.org/wiki/Osad_ściekowy), 2022.
- [15] Energy efficient drying of sewage sludge in: Dorset Group, [https://www.dorset.nu/green-machines/solutions/sludge/?gclid=Cj0KCQjwpcOTBhCZARIsAEAYLuUVK-jc2aYyXRv2cesTY\\_ups7gwk7XsiMi7yQfykGu6ovu\\_SA1Avp4aAICUEALw\\_wcB](https://www.dorset.nu/green-machines/solutions/sludge/?gclid=Cj0KCQjwpcOTBhCZARIsAEAYLuUVK-jc2aYyXRv2cesTY_ups7gwk7XsiMi7yQfykGu6ovu_SA1Avp4aAICUEALw_wcB), 2022 .
- [16] Dobre praktyki związane z gospodarką osadami ściekowymi, [https://zwik.szczecin.pl/uploads/dokumenty/PURE\\_dobre\\_praktyki\\_związane\\_z\\_gospodarką\\_osadową.pdf](https://zwik.szczecin.pl/uploads/dokumenty/PURE_dobre_praktyki_związane_z_gospodarką_osadową.pdf), 2022.
- [17] S.L. Atif Saleem, Jiahong Wang, Tongtong Sun, Faisal Sharaf, Muhammad Haris, Enhanced and selective adsorption of Copper ions from acidic conditions by diethylenetriaminepentaacetic acid-chitosan sewage sludge composite, *J. Environ. Chem. Eng.*, 8 (2020) 104430.
- [18] I.T. Cieplnej, Sorpcja fenolu z roztworów wodnych na konwencjonalnych i niekonwencjonalnych sorbentach, (2015) 7–10.
- [19] S. Rangabhashiyam, P.V. do. S. Lins, L.M.T. d. M. Oliveira, P. Sepulveda, J.O. Ighalo, A.U. Rajapaksha, L. Meili, Sewage sludge-derived biochar for the adsorptive removal of wastewater pollutants: A critical review, *Environ. Pollut.*, 293 (2022).
- [20] H. Li, J. Zhang, Y. Cao, Y. Wang, F. Li, C. Liu, Y. Song, J. Hu, Capture of elemental

- mercury from flue gas over a magnetic and sulfur-resistant sorbent prepared from Fe-containing sewage sludge activated with sulfuric acid, *Fuel*, 300 (2021) 120938.
- [21] B. Pieczykolan, I. Płonka, Wykorzystanie osadu nadmiernego jako sorbentu odpadowego do usuwania barwników z roztworów wodnych, *Proc. Ecolpole*, 12 (2018) 219–227.
- [22] J.S. Siqi Tong, Dan Chen, Ping Mao, Xinbai Jiang, Aiwu Sun, Zhixiang Xu, Xiaodong Liu, Synthesis of magnetic hydrochar from Fenton sludge and sewage sludge for enhanced anaerobic decolorization of azo dye AO7, *J. Hazard. Mater.*, 424 Part C (2022) 127622.
- [23] E. Kacan, Optimum BET surface areas for activated carbon produced from textile sewage sludges and its application as dye removal, *J. Environ. Manage.*, 166 (2016) 116–123.
- [24] Acid Red 18, <http://www.worlddyevariety.com/acid-dyes/acid-red-18.html>, 2022.
- [25] Reactive Blue 81, <http://www.worlddyevariety.com/reactive-dyes/reactive-blue-81.html>, 2022.
- [26] A.B.D. Nandiyanto, R. Oktiani, R. Ragadhita, How to read and interpret ftir spectroscopy of organic material, *Indones. J. Sci. Technol.*, 4 (2019) 97–118.
- [27] R.K. Xue YW, Gao B, Yao Y, Inyang M, Zhang M, Zimmerman AR, Hydrogen peroxide modification enhances the ability of biochar (hydrochar) produced from hydrothermal carbonization of peanut hull to remove aqueous heavy metals: batch and column tests, *Chem. Eng. J.*, 200 (2012) 673–680.
- [28] M.E. Saleh, A.H. Mahmoud, A.A. El-Refaey, Removal of cadmium from aqueous solution by biochars derived from peanut hull and wheat straw, *Adv. Environ. Biol.*, 8 (2014) 399–409.
- [29] L. Back, M. Josefsson, L. Stromquist, Land capability, recreational land-use and conservation strategies in a sensitive mountain environment: a method study from the Kiruna Mountains, Sweden, *UNGI Rapp. - Uppsala Univ. Naturgeografiska Institutionen*, 73 (1989) 307–319.
- [30] J. Silverstein, R., M., Webster, F., X., Kiemle, D., *Spektroskopowe Metody Identyfikacji Związków Organicznych*, PWN, Warszawa 2007.
- [31] S.G. Deephashree C. Lingegowda, J. Komal Kumar, A. G. Devi Prasad, Mahsa Zarei, Ftir Spectroscopic Studies on Cleome Gynandra – Comparative, *Rom. J. Biophys.*, 22 (2013) 137–143.
- [32] M. Nm, Research & Reviews : Journal of Pure and Adsorption and Kinetic Study on  $Mg^{2+}$  Removal from Waste Water using Rice Husk based Magnetic Biochar, 4 (2016) 102–111.
- [33] O. Gulnaz, A. Kaya, F. Matyar, B. Arikan, Sorption of basic dyes from aqueous solution by activated sludge, *J. Hazard. Mater.*, 108 (2004) 183–188.
- [34] V.K. Garg, R. Gupta, A.B. Yadav, R. Kumar, Dye removal from aqueous solution by adsorption on treated sawdust, *Bioresour. Technol.*, 89 (2003) 121–124.
- [35] C. Namasivayam, D. Prabha, M. Kumutha, Removal of direct red and acid brilliant blue by adsorption on to banana pith, *Bioresour. Technol.*, 64 (1998) 77–79.





## Rainwater - physicochemical, microbiological and toxicological characteristics

P. Cichy <sup>a</sup>, R. Kupny <sup>a</sup>, J. Rurańska <sup>a</sup>, K. Dudzisz <sup>a</sup>, P. Stuchlik <sup>b</sup>, M. Jędrzejczyk <sup>b</sup>, R. Kryst <sup>b</sup>, D. Pokoj <sup>b</sup>, M. Bambynek <sup>c</sup>, E. Puszczalo <sup>d</sup>, B. Pieczykolan <sup>e</sup>, A. Marszałek <sup>e</sup>, M. Sroka <sup>f</sup>

<sup>a</sup> Students of Silesian University of Technology, Faculty of Chemistry  
email: piotcic184@student.polsl.pl; romakup885@student.polsl.pl;  
julirur110@student.polsl.pl; katadud228@student.polsl.pl

<sup>b</sup> Students of Silesian University of Technology, Faculty of Energy and Environmental Engineering  
email: patrstu979@student.polsl.pl; martjed038@student.polsl.pl; rafakry874@student.polsl.pl;  
domipok608@student.polsl.pl

<sup>c</sup> Student of Silesian University of Technology, Faculty of Automatic Control, Electronics and Computer Science  
email: martbam617@student.polsl.pl

<sup>d</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Energy and Environmental Engineering, Department of Air Protection  
email: ewa.puszczalo@polsl.pl

<sup>e</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Energy and Environmental Engineering, Department of Water and Wastewater Engineering  
email: barbara.pieczykolan@polsl.pl; anna.marszalek@polsl.pl

<sup>f</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials  
email: marek.sroka@polsl.pl

**Abstract:** The aim of the research was to compare the rainwater coming from the roof of a single-family house with the water coming from the motorway surface. Currently, attention is paid to collecting rainwater. This study assessed the quality of rainwater obtained from the roof and the highway. Physical, chemical and microbiological properties included: pH, conductivity, color, chemical oxygen demand (COD), total organic carbon (TOC), N-NH<sub>4</sub><sup>-</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, phenol, metals such as iron, zinc, copper, nickel, lead and cadmium, the number of *Coliform bacteria*, *Escherichia Coli*, *Enterococci*. The harvested rainwater generally met sewage water standards, exceptions were the concentrations of zinc (>5 mg/L) and lead (0.54 mg/L) in the case of highway water. Their increased concentrations also influenced the toxicity of this sample. In addition to the previously mentioned, the presence of *Coliform bacteria* should also be taken into account when planning water treatment methods.

**Keywords:** rainwater, physicochemical characteristics, microbiological characteristics, *Vibrio fischerii*,

## 1. INTRODUCTION

Collecting rainwater is very important because the water supplies and water safety are considered to be critical issues. The main concerns are caused by the development of the cities and climate change [1].

Precipitation is the primary source of water in the city and the beginning of many positive processes occurring in its space. It cleans the air, moderates the microclimate, and improves living conditions for residents. Thanks to it, greenery and small water ecosystems can function in the highly changed environment of the city, shaping a healthy living environment for people. In turn, well-planned green spaces prevent flooding and urban drought by providing a place to safely collect rainwater [2].

Managing rainwater is at the same time one of the basic challenges for most modern cities, whose development is constantly densifying. Excess water, on the surface tightly covered with "gray" infrastructure (streets, sidewalks, parking lots, buildings, city squares, paved and degraded soil), cannot seep. In traditional water management, they were prevented by combined sewer and storm water systems. However, in practice often exacerbate the problem. An alternative to traditional management is integrated rainwater management (rainwater and snowmelt), based on techniques of on-site rainwater management [3].

In Poland, about 70 percent of rainwater is irretrievably lost, because the canalisation systems are discharged into rivers and then seas. Therefore, it is so important to change the approach to the issue of rainwater and strive to reduce its surface runoff [4].

One of the answers to this problem is collecting rainwater from the rooftops. It can be an easy way to reduce the freshwater consumption e.g., in domestic gardens. The main problem might be the water contamination. This type of water might be potential cause of diseases because of the birds' fecal contamination [5]. Depending on the material type of the roof there might be different concentration of pollutants especially the heavy metals [6].

In case of rainwater collected from the streets, parking lots and highways the main source of pollutants is connected to traffic [7]. Among the analysed substances the most described are chemical oxygen demand, and total organic carbon, heavy metals such as Zn, Pb and Cu [8, 9]. In most cases, rainwater from parking lots, streets and highways contain higher levels of the heavy metals than other types of rainwater e.g., roof rainwater [10].

## 2. METHODOLOGY

### 2.1. Subject of study

The subject of the research was rainwater collected in March from the roof of a single-family house (RW1) located in the city of Ruda Śląska and water from the catchment area on highway in Gliwice (RW2). The dust content in the air during this period was  $33.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [11], and the amount of rainfall was from 33.9 to 54.6 mm [12].

The roof was made of steel tiles. The rainwater collection system in single-family house has been equipped with a concrete rainwater tank and the Atlas Filtri FA BX filter, which removes

mechanical impurities such as sand, rust, silt, corrosion particles, turbidity, sediments, and some sparingly soluble iron compounds. The roof was made of steel tiles.

Fig. 1. shows the catchment area of rainwater from the A4 highway.



Fig. 1. The catchment area of rainwater from the A4 highway

## 2.2. Physicochemical characteristics of rainwater

The treatment efficiency was evaluated by monitoring of typical quality parameters (color, turbidity, COD, TOC, conductivity, pH). Color and turbidity measurements were performed with a UV-Vis Spectroquant® Pharo 300 (Merck, Kenilworth, NJ, USA). COD, nitrogen, phosphate, ammonium concentrations were determined spectrophotometrically with a Merck test kits. TOC was measured using a TOC-L series analyser (Shimadzu, Kyoto, Prefektura Kyoto, Japan). pH and conductivity were monitored by multifunctional analyzer CX-461 (Elmetron, Zabrze, Poland).

## 2.2. Microbiological characteristics

Microbiological analysis including Coliforms bacteria, Total number of microorganisms at  $22 \pm 2^\circ\text{C}$  after 72 hours, E. coli, and Enterococci was conducted by external accredited lab according to ISO methods.

### 2.3. Toxicity test

The next stage of the research was to determine the acute toxicity of rainwater in marine bacteria *Vibrio fischeri*. Toxicity was assessed based on the results of the Microtox® test. The degree of toxicity was assessed based on the change in the intensity of the light emitted by the bacteria. The experiment was performed according to the MicrotoxOmni WET (Whole Effluent Toxicity) system.

## 3. RESULTS

### 3.1. Physicochemical characteristics

The physicochemical analysis of rainwater is summarized in Table 1.

Table 1. The physicochemical analysis of rainwater

| Parameter                       | Unit   | RW1   | RW2   | Regulation<br>Minister Of Maritime<br>and Inland Navigation<br>Dz.U.2019.1311 |
|---------------------------------|--------|-------|-------|---|
| pH                              | -      | 7.412 | 7.815 | 6.5-9.0   |
| Conductivity                    | µS/cm  | 210   | 5260  | -   |
| Color                           | mgPt/L | 9     | 23    | -   |
| COD                             | mg/L   | 150   | 107   | 125   |
| TOC                             | mg/L   | 0.69  | 7.84  | 30  |
| N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | mg/L   | 4.4   | 1.8   | 10  |
| N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | mg/L   | 3.9   | 3.8   | 30  |
| P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | mg/L   | 0.9   | 1.5   | 2.0   |
| Iron                            | mg/L   | 0.12  | 0.19  | 10  |
| Zinc                            | mg/L   | 0     | 5.0   | 2.0   |
| Copper                          | mg/L   | 0.24  | 0.24  | 0.5   |
| Nickel                          | mg/L   | 0.26  | 0.41  | 0.5   |
| Lead                            | mg/L   | 0.32  | 0.54  | 0.5   |
| Cadmium                         | mg/L   | 0     | 0     | -   |
| Phenol                          | mg/L   | 0.61  | 0.72  | 0.1   |

Figures 2, 3 and 4 show the differences in the concentrations of individual pollutants in rainwater from the roof and from the street surface.

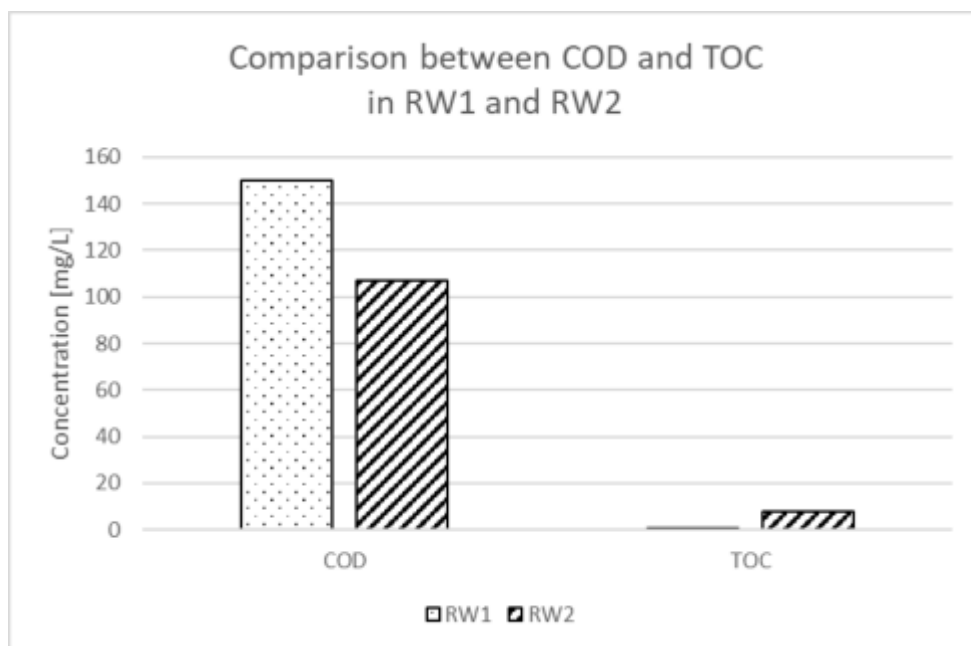


Fig. 2 Comparison between COD and TOC in RW1 and RW2

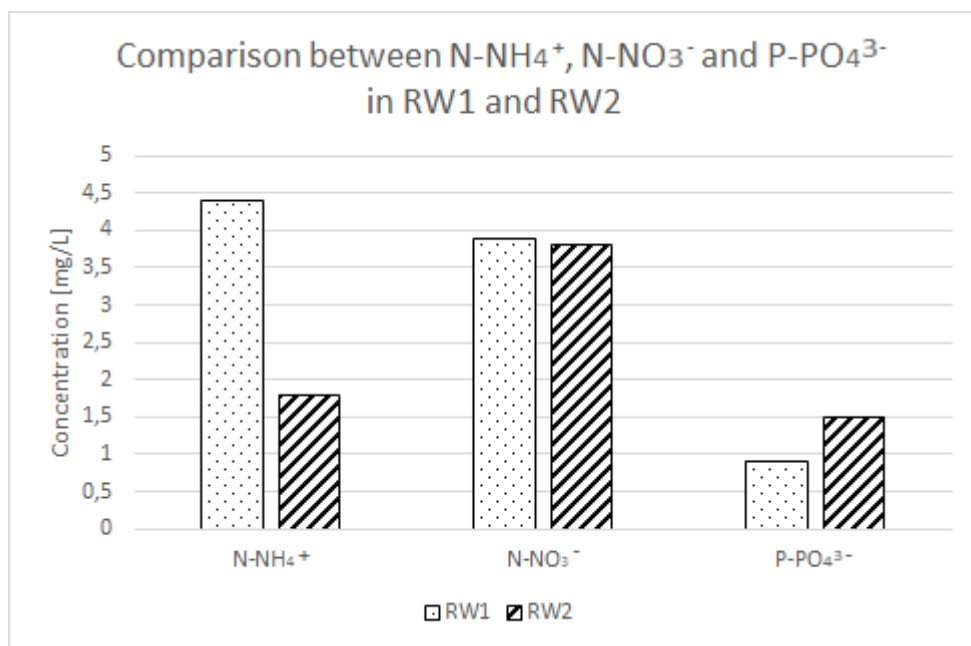


Fig. 3 Comparison between N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> in RW1 and RW2

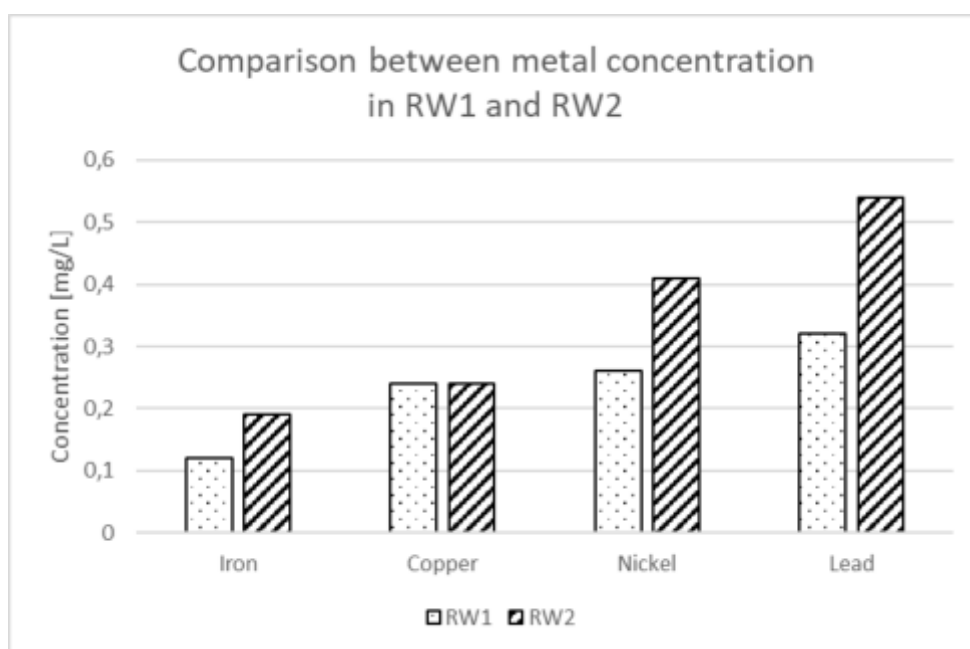


Fig. 4 Comparison between metal concentration in RW1 and RW2

Substances particularly harmful to the aquatic environment and the conditions to be met when discharging sewage into waters or soil, as well as when discharging rainwater or meltwater into waters or into water facilities are specified in the Regulation Minister Of Maritime and Inland Navigation of July 12, 2019 [13]. On the basis of the obtained results, it was found that rainwater from the street surface should be pretreated before discharge to the natural receiver due to the high concentration of zinc, amounting to 5 mg / L, and the concentration of lead at the level of 0.54 mg / L, exceeding the permitted standards. On the other hand, in the case of rainwater from the roof, an overestimated value of the COD index was observed, which was 150 mg / L. Both waters also had a high concentration of phenol index values. Taking into account the concentration of biogenic compounds, low values were obtained, namely in the water from the roof  $\text{N-NH}_4^-$  4.4 mg/L,  $\text{N-NO}_3^-$  3.9 mg/L,  $\text{P-PO}_4^{3-}$  0.9 mg/L, in the water from the highway -  $\text{N-NH}_4^-$  1.8 mg/L,  $\text{N-NO}_3^-$  3.8 mg / L,  $\text{P-PO}_4^{3-}$  1.5mg/L. Differences in color concentration and specific conductivity were also observed. The water from the highway was 2.5 times the color of the water from the roof. On the other hand, the water content from the roof was 210  $\mu\text{S} / \text{cm}$ , and the water from the highway was 5260  $\mu\text{S} / \text{cm}$ . This may be due to the fact that the water from the roof was filtered with a filter, which removes mechanical impurities such as sand, rust, silt, corrosion particles, turbidity, sediments, and some sparingly soluble iron compounds. However, in the case of water from the highway, it may contain traffic pollution, i.e. abrasion of rubber, tires and asphalt, and exhaust fumes.

### 3.2. Microbiological analysis

Immediately after collecting the rainwater samples, microbiological analyzes were carried out and the results are presented in the table 2.

Table. 2 Microbiological analysis of rainwater

| Parameter   | Unit      | Results |               |
|---|-----------|---------|---------------|
|   |           | RW 1    | RW2           |
| <i>Coliform bacteria</i>                            | CFU/100mL | >200    | 19 ± [11; 32] |
| <i>Escherichia Coli</i>                             | CFU/100mL | 0       | 0             |
| <i>Enterococci</i>                                  | CFU/100mL | 0       | 0             |
| Total number of microorganisms at 22±2 °C after 72h | CFU/1mL   | >300    | >300          |

Notes: The number after the given result after the symbol ± represents the expanded uncertainty calculated for the coverage factor  $k = 2$ , which corresponds to a confidence interval of approximately 95%. For microbiology, the confidence interval of the obtained result was given in accordance with PKN-ISO/TS 19036:2011. The sign ">" indicates that the test result is above the laboratory's upper measuring range.

The number of *Coliform bacteria* is visibly higher in RW1 than in RW2. There were no *Escherichia Coli* and *Enterococci* in both rainwaters. The total number of microorganisms 22±2 °C after 72h was above the laboratory's upper measuring range. There are no norms defining the amount of the microorganisms in the rainwater.

### 3.3. Toxicity test

In the studies, toxicity tests were also carried out with the use of *Vibrio fischeri* bacteria. The results are presented in the table 3.

Table.3.

| Type of rainwater | Toxicity effect    |                     |
|-------------------|--------------------|---------------------|
|                   | Contact time 5 min | Contact time 15 min |
| RW1               | 0                  | 0                   |
| RW2               | 27.52%             | 16.26%              |

The toxic effect of rainwater is expressed as the percentage of inhibition of luminescence after 5 minutes and 15 minutes of incubation. The RW1 sample showed no toxicity at both 5 and 15 minutes. The RW2 sample showed a toxicity level of 27.52% for a contact time of 5 minutes, and after 10 minutes, the toxicity decreased to the level of 16.26%, which is more than 1.5 times. There are no norms defining the toxicity of the rainwater.

## 4. SUMMARY

Based on the research, the following conclusions were drawn: Both RW1 and RW2 have similar physicochemical characteristics.

The main difference between RW1 and RW2 was the concentration of lead and zinc. Both concentrations were greater in the RW2. The reason of the higher level of lead is that until recently lead compounds e.g., tetraethyllead have been used in fuels. The zinc concentration was high because abrasion of tire materials.

The number of *Coliform bacteria* is visibly higher in RW1 than in RW2. *Coliform bacteria* are often considered as indicator of fecal contamination in roof-harvested rainwater. [5] The

water from the rooftop might be contaminated with feces of birds, mammals, reptiles or insects. However, coliform not always indicate fecal origination. They can come from vegetation or soil. [14] It could explain the presence of *Coliform bacteria* in the RW2 because it is easy to contaminate an open rainwater tank with e.g., parts of leaves or dust.

There were no *Escherichia Coli* and *Enterococci* in both rainwaters. It could be connected to the dry season. It was observed that *Escherichia Coli* and *Enterococci* are more likely to be detected in the rainwater during wet season [15].

The concentrations of metals, including heavy metals [16] (especially copper [17]) induce luminescence inhibition of *Vibrio fischeri* at the levels measured in the samples. In this study heavy metals appear alongside other compounds, including organic compounds, which could explain reduced toxicity of the RW1. One of the main significant differences between rainwater types was the zinc concentration, which for RW1 was 0 mg/L and for RW2 >5 mg/L. It was this parameter that might have had the greatest impact on the differences in toxicity between both types of rainwater. Slight changes in zinc concentration - at constant lead [18] or copper [19] concentrations - lead to increased toxicity.

## REFERENCES

- [1] Kim, R-H.; Lee, S.; Lee, J-H.; Kim, Y-M.; Suh, J-Y (2005). Developing Technologies for Rainwater Utilization in Urbanized Area. *Environmental Technology*, 26(4), 401–410. doi:10.1080/09593332608618545
- [2] Wagner, I., Krauze, K., Zalewski, M., 2013. Błękitne aspekty zielonej infrastruktury. *Zrównoważony Rozwój — Zastosowania*, 4, 145–155
- [3] Wagner, I., Krauze, K., Zalewski, M., 2014, , Jak bezpiecznie zatrzymać wodę opadową w mieście? *Narzędzia techniczne, Zrównoważony Rozwój — Zastosowania*, 5, 75-93
- [4] <https://www.nik.gov.pl/aktualnosci/wody-opadowe-i-roztopowe.html>
- [5] Hamilton, K., Reyneke, B., Waso, M. et al. A global review of the microbiological quality and potential health risks associated with roof-harvested rainwater tanks. *Clean Water* 2, 7 (2019). doi:10.1038/s41545-019-0030-5
- [6] Zdeb, M., Zamorska, J., Papciak, D., Słyś, D. (2020). The quality of rainwater collected from roofs and the possibility of its economic use. *Resources*, 9(2), 12. <https://doi.org/10.3390/resources9020012>
- [7] Göbel, P., Dierkes, C., & Coldewey, W. G. (2007). Storm water runoff concentration matrix for urban areas. *Journal of Contaminant Hydrology*, 91(1-2), 26–42. doi:10.1016/j.jconhyd.2006.08.008
- [8] Eriksson, E., Baun, A., Scholes, L., Ledin, A., Ahlman, S., Revitt, M., Noutsopoulos, C., & Mikkelsen, P. S. (2007). Selected stormwater priority pollutants: a European perspective. *Science of the Total Environment*, 383, 41-51. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.05.028>
- [9] Kayhanian, M. (2012). Trend and concentrations of legacy lead (Pb) in highway runoff. *Environmental Pollution*, 160, 169–177. doi:10.1016/j.envpol.2011.09.009
- [10] Ball, J.E., (2002). Stormwater Quality at Centennial Park. University of New South Wales, School of Civil and Environmental Engineering, Water Research Laboratory, Sydney, Australia.
- [11] <https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/archives>



- [12] <https://www.imgw.pl/wydarzenia/imgw-pib-eksperymentalna-prognoza-dlugoterminowa-temperatury-i-opadu-na-marzec-czerwiec>
- [13] Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 12 lipca 2019 r. w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego oraz warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu do wód lub do ziemi ścieków, a także przy odprowadzaniu wód opadowych lub roztopowych do wód lub do urządzeń wodnych
- [14] Ahmed, W.; Goonetilleke, A.; Gardner, T. (2010). Implications of faecal indicator bacteria for the microbiological assessment of roof-harvested rainwater quality in southeast Queensland, Australia. *Canadian Journal of Microbiology*, 56(6), 471–479. doi:10.1139/W10-037
- [15] Hamilton, Kerry A.; Ahmed, Warish; Palmer, Andrew; Smith, Kylie; Toze, Simon; Haas, Charles N. (2017). Seasonal Assessment of Opportunistic Premise Plumbing Pathogens in Roof-Harvested Rainwater Tanks. *Environmental Science & Technology*, 51(3), 1742–1753. doi:10.1021/acs.est.6b04814
- [16] Hsieh, C.-Y., Tsai, M.-H., Ryan, D. K., & Pancorbo, O. C. (2004). Toxicity of the 13 priority pollutant metals to *Vibrio fischeri* in the Microtox® chronic toxicity test. *Science of The Total Environment*, 320(1), 37–50. doi:10.1016/s0048-9697(03)00451-0
- [17] Utgikar, V. P., Chaudhary, N., Koeniger, A., Tabak, H. H., Haines, J. R., & Govind, R. (2004). Toxicity of metals and metal mixtures: analysis of concentration and time dependence for zinc and copper. *Water Research*, 38(17), 3651–3658. doi:10.1016/j.watres.2004.05.022
- [18] Tsiroidis, V., Petala, M., Samaras, P., Hadjispyrou, S., Sakellaropoulos, G., & Kungolos, A. (2006). Interactive toxic effects of heavy metals and humic acids on *Vibrio fischeri*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 63 (1), 158–167. doi:10.1016/j.ecoenv.2005.04.005
- [19] Yang, Xuepeng & Ji, Yan & Wang, Fangfang & Xu, Jia & Liu, Xiangzhen & Ma, Ke & Hu, Xiangmei & Ye, Jianbin. (2016). Comparison of organics and heavy metals acute toxicities to *Vibrio fischeri*. *Journal of the Serbian Chemical Society*. 81. 11-11. 10.2298/JSC151124011Y.

## Interdyscyplinarność laserowej obróbki powierzchniowej w kontekście zagadnień technologii materiałowych oraz budowy maszyn

P. Cincio <sup>a</sup>, K. Gawęda <sup>a</sup>, P. Janiak <sup>a</sup>, J. Kierepka <sup>a</sup>, M. Paluch <sup>a</sup>, K. Samek <sup>a</sup>, M. Bonek <sup>b</sup>, O. Polishchuk <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Student/ka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: patrjan233@student.polsl.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: mirosław.bonek@polsl.pl

<sup>c</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Engineering Mechanics, Khmelnytskyi, Ukraine

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono laserową obróbkę powierzchniową jako wieloaspektową i złożoną dziedzinę nauki. Omówiono jej kluczowy wkład w kształtowanie współczesnych metod obróbki materiałów, kładąc nacisk na technologie przyrostowe, które cieszą się rosnącą popularnością. Przybliżono zagadnienia automatyzacji i mechanizacji procesów laserowej obróbki powierzchniowej, szczególną uwagę zwracając na ich innowacyjne zastosowania. Scharakteryzowano nowoczesne metody analizy i symulacji przebiegu procesów obróbki powierzchniowej, w aspekcie metod numerycznych i metody elementów skończonych.

**Abstract:** The paper presents laser surface treatment as a multifaceted and complex field of science. Its key contribution to the shaping of modern methods of material processing was discussed, paying attention to additive technologies, which are becoming more and more popular. The issues of automation and mechanization of laser surface treatment processes are discussed, paying particular attention to innovative applications. Modern methods of analysis and simulation of the course of surface treatment processes are characterized in terms of numerical methods and the finite element method.

**Słowa kluczowe:** laser, obróbka powierzchni, automatyzacja, mechanizacja, technologie materiałowe

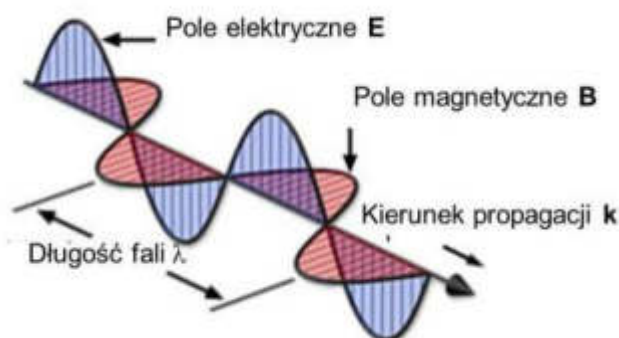
### 1. WSTĘP

Technologie laserowe stanowią nieodzowny element współczesnego świata. Trudno jest wskazać dziedzinę przemysłu, która obecnie nie czerpie z szerokiego spektrum możliwości, jakie oferują lasery. W skali historycznego rozwoju przemysłu laser jest relatywnie nowym wynalazkiem, którego stworzenie umożliwiło poznanie tajemnic budowy atomu w latach 20 XX wieku. Charakter cząstek elementarnych oraz założenia teorii dualizmu korpuskularno-falowego stanowiły obiecujące podwaliny do stworzenia urządzenia, które wykorzystywałoby

wymuszoną emisję promieniowania elektromagnetycznego, w celu stworzenia wysokoenergetycznej wiązki światła monochromatycznego. Efekty mozolnych doświadczeń uzyskano w roku 1960, kiedy Theodore Maiman zbudował i z sukcesem uruchomił pierwszy laser, którego ośrodkiem czynnym był kryształ korundu domieszkowany chromem – rubin. Jednak dopiero opracowane w latach 80-tych lasery dużej mocy pozwoliły na używanie ich do celów komercyjnych. Chcąc sprostać rosnącym oczekiwaniom konsumentów i utrzymać konkurencyjną pozycję na rynku, wiele przedsiębiorstw skłania się ku inwestycji w nowoczesne urządzenia umożliwiające szybką, wydajną i przede wszystkim wysoce precyzyjną obróbkę laserową.

## 2. BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA LASERA

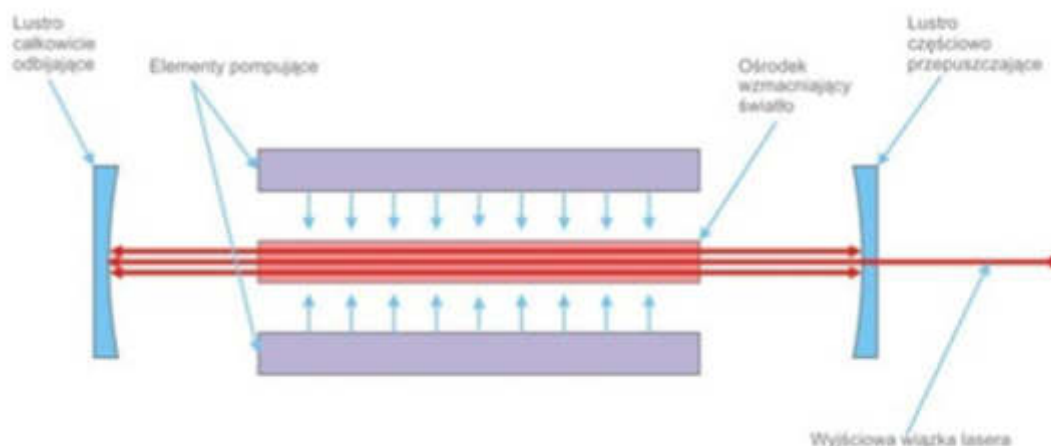
Laser to urządzenie, które wykorzystuje zjawisko emisji wymuszonej, dzięki czemu emituje wiązkę promieniowania elektromagnetycznego. Zakres długości fal emitowanych przez laser odpowiada podczerwieni, światłu widzialnemu i ultrafioletowemu [1].



Rysunek 1 Sposób rozchodzenia się fali elektromagnetycznej [2]

*Figure 1 The way of propagation of an electromagnetic wave [2]*

Każdy laser składa się rezonatora optycznego, zewnętrznego układu pompującego oraz wzbudzonego ośrodka czynnego i działa dzięki zjawisku emisji wymuszonej. Ośrodek aktywny to materia, taka jak np. zbiór jonów, molekuł, czy atomów, która wykazuje zdolności do wzmacniania fali elektromagnetycznej. Taki ośrodek może wytworzyć materiał półprzewodnikowy. Z kolei działanie układu pompującego wzbudza ośrodek aktywny do wyższych stanów energetycznych. Poziomy energetyczne określa się za pomocą rozkładu Boltzmanna ( przy założeniu, że ośrodek aktywny jest w stanie równowagi termodynamicznej) [3]. Rezonator optyczny jest układem, pełniącym funkcję zawężenia spektrum widmowego promieniowania i ujednoczeniu go, ukierunkowania promieniowania i zapewnienia niewielkiej rozbieżności kątowej wiązki, zapewnienia dodatniego sprzężenia zwrotnego względem układu pompującego, co pozwala na generowanie promieniowania. Układ chłodzący zapewnia odprowadzenia nadmiaru ciepła, które wydziela się podczas pracy lasera z ośrodka czynnego. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem jest instalowanie wymienników ciepła dookoła rezonatora, lub stały przepływ gazu laserowego [1,5]. Poniższy schemat ideowy w sposób uproszczony przedstawia budowę lasera [4]:



Rysunek 2 Ideowy schemat budowy lasera [4]

Figure 2 A schematic diagram of a laser construction [4]

Obróbka z użyciem laserów prężnie się rozwija, ewoluując w coraz nowsze zastosowania lecz wciąż możliwe jest wyróżnienie klasycznych podziałów laserów ze względu na różne, podstawowe aspekty [5]:

- Podział ze względu na charakter pracy:
  - lasery ciągłej pracy - układ pompujący zapewnia ciągłe wzbudzenie ośrodka aktywnego,
  - lasery impulsowe - aktywne medium jest wzbudzone skokowo,
  - lasery udarowe - charakteryzuje je nadzwyczajnie krótki czas trwania impulsu mierzonego zazwyczaj w nanosekundach lub pikosekundach.
- Podział ze względu na moc:
  - lasery dużej mocy,
  - lasery średniej mocy,
  - lasery małej mocy,
- Podział ze względu na rodzaj ośrodka czynnego:
  - lasery gazowe - wzbudzenie zostaje zainicjowane za pośrednictwem elektrycznych wyładowań w ośrodku czynnym charakterystycznym dla tego rodzaju lasera, czyli  $\text{He}+\text{N}_2+\text{CO}_2$ ,
  - lasery na ciele stałym - podstawą działania lasera na ciele stałym jest element z materiału krystalicznego, mianowicie granatu itrowo-glinowego ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ),
  - półprzewodnikowe (diodowe) - bazują na złączu p-n i są one elementem czynnym w urządzeniu. Wzbudzenie następuje w skutek oddziaływania prądu elektrycznego.
- Podział w zależności od widma promieniowania, w których pracują:
  - lasery pracujące w podczerwieni,
  - lasery pracujące w części widzialnej,
  - lasery pracujące w nadfiolecie.

Kluczowymi dla procesu laserowej obróbki powierzchni są parametry pracy lasera oraz materiałów dodatkowych, które są niezbędne do prawidłowej i wydajnej obróbki. Zestawiono je i scharakteryzowano w Tabeli 1 [3, 5].

Tabela 1 Charakterystyka kluczowych parametrów pracy lasera [3, 5]  
*Table 1 Characteristics of the key operating parameters of the laser [3, 5]*

| <b>Parametr</b>                    | <b>Charakterystyka</b>  |
|------------------------------------|---|
| Długość i średnica wiązki lasera   | Mają bezpośredni wpływ na głębokość penetracji lasera. Im dłuższa wiązka tym łatwiej obrabiać grubsze materiały.  |
| Gęstość mocy źródła promieniowania | Ten parametr ściśle zależy od rodzaju i grubości obrabianego materiału, jednocześnie umożliwia zapewnienie wysokiej jakości obróbkę bez konieczności stosowania maksymalnej mocy lasera.            |
| Prędkość obróbki                   | Jest ściśle zależna od mocy urządzenia i skomplikowania danego detalu, ulegając istotnemu zmniejszeniu w miarę wzrostu rozwinięcia powierzchni elementu obrabianego.                                |
| Ciśnienie gazu roboczego           | Dobierany jest na podstawie rodzaju i grubości materiału obrabianego, należy podkreślić fakt unikania stosowania gazów aktywnych, które niekorzystnie wpływają na własności obrabianej powierzchni. |
| Rodzaj gazu dodatkowego            | Wywiera bezpośredni wpływ na prędkość obróbki laserowej.  |

### 3. TECHNOLOGIE LASEROWEJ OBRÓBKII POWIERZCHNIOWEJ W ASPEKCIE PROCESÓW MATERIAŁOWYCH

Na przestrzeni ostatnich lat znacznie wzrosło zainteresowanie technologiami wykorzystującymi lasery do przeprowadzania procesów materiałowych takich jak: przetapianie, stopowanie, obróbka cieplna, napawanie czy technologie przyrostowe. Zostały one krótko scharakteryzowane w Tabeli 2 [6, 7]. Ze względu na duży potencjał i atrakcyjność stosowania technologii laserowych w przemyśle, ich rozwój przebiega dynamicznie a ulepszenia sprawiają, że procesy te są coraz bardziej wydajne. [6]. Przy powierzchniowej obróbce laserowej na przykład podczas stopowania czy hartowania z przetapianiem ważnym aspektem jest zadbanie o zachowanie geometrii powierzchni wyrobu oraz odpowiedniej chropowatości. Kolejnym parametrem wymagającym uwagi są powstające w strefie oddziaływania lasera naprężenia mogące prowadzić do uszkodzeń w materiale. Aby zniwelować wpływ wysokiej temperatury stosowana jest obróbka mechaniczna warstwy wierzchniej, najczęściej przez szlifowanie. Niestety to rozwiązanie sprawia, że uzyskana dzięki wpływowi lasera warstwa może zmienić swoje własności mechaniczne oraz przybiera ona nierówną grubość [8].

Tabela 2 Charakterystyka procesów przemysłowych realizowanych z wykorzystaniem lasera [6, 8]

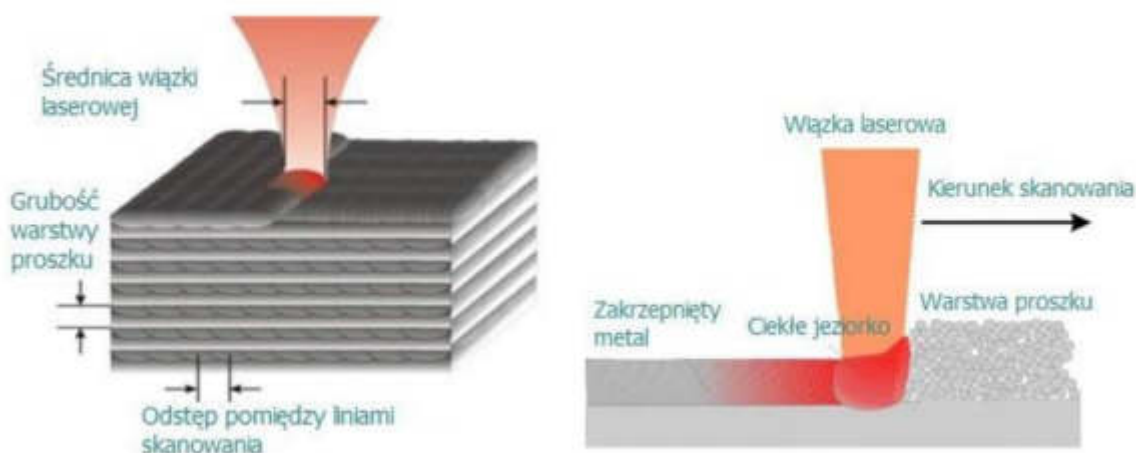
Table 2 Characteristics of industrial processes carried out with the use of a laser [6, 8]

| Nazwa procesu                     | Charakterystyka procesu   |
|-----------------------------------|---|
| Laserowa obróbka cieplna          | Stosowanie wysokiej temperatury nagrzewania i szybkości chłodzenia większej od krytycznej umożliwia polepszenie własności mechanicznych poprzez uzyskiwanie roztworów stałych silnie przesyconych, o drobnoziarnistej strukturze.   |
| Laserowe stopowanie               | Wzbogacanie warstwy wierzchniej w pierwiastki chemiczne, które dostarczane są w formie taśm i folii. Uzyskuje się w ten sposób warstwę wierzchnią o odmiennym składzie chemicznym i własnościach w stosunku do materiału rodzimego. Wygenerowane zmiany prowadzą do polepszenia własności antykorozyjnych, mechanicznych i trybologicznych. |
| Laserowe natapianie               | Określane również jako platerowanie lub napawanie, stosowane powszechnie w celu regeneracji urządzeń i maszyn, a także poprawienia dokładności wymiarowo-kształtowej konkretnych elementów. Polega na stopieniu masywnej części materiału wierzchniego i cienkiej warstwy podłoża.  |
| Laserowe wtapianie                | W toku procesu dochodzi do stopienia osnowy materiału w skutek wysokoenergetycznego oddziaływania lasera. Ma to na celu dostarczenie do struktury cząstek wzmacniających.   |
| Laserowe przetapianie powierzchni | Krótki czas procesu powoduje, że niewielka część energii przenika w głąb materiału, powodując powstanie znacznego gradientu temperaturowego między warstwami. Sprzyja to szybkiemu krzepnięciu i umożliwia uzyskanie struktury drobnoziarnistej warstwy wierzchniej, co bezpośrednio przyczynia się do poprawy odporności na ścieranie.     |

W czasie laserowego przetapiania warstwy zewnętrznej materiału dochodzi do powstawania plazmy, która pomaga w ograniczeniu strefy wpływu wysokiej temperatury na materiał oraz aktywnie działa na przetopioną powierzchnię. Plazma pełni ważną rolę podczas procesów laserowego przetapiania, ponieważ podnosi ciśnienie oraz miesza materiał w jeziorku ciekłym. Po procesie przetapiania na powierzchni materiału powstaje krzywizna, podczas gdy lejkowate zagłębienie wywołane wiązką lasera pod wpływem działających sił hydrostatycznych cieczy

zostaje zaburzone doprowadzając do powstania wypłytki znajdującej się na brzegu przetopienia [6, 7].

Technologie przyrostowe z użyciem lasera, najczęściej stosowane są do spiekania oraz topienia proszków metali. Najczęściej spotykanymi laserowymi technologiami przyrostowymi są SLS (Selective Laser Sintering) oraz SLM (Selective Laser Melting). Zasadnicza różnica pomiędzy tymi metodami wynika z własności uzyskanych wyrobów ponieważ porowatość detali wytworzonych w technologii SLM jest znikoma a ich gęstość może dochodzić nawet do 100%, natomiast wyroby wytworzone metodą SLS cechują się znacznie wyższą porowatością oraz zauważalnie niższymi własnościami wytrzymałościowymi. Przyrostowe wytwarzanie z użyciem lasera polega na wprowadzeniu na stół cienkiej warstwy sproszkowanego metalu oraz jej spiekaniu lub topieniu. Zabieg ten powtarzany jest wielokrotnie, dzięki czemu warstwa po warstwie wytwarzany jest detal. Dobierając odpowiedni proszek, metodę oraz zastosowane parametry możemy uzyskać pożądaną strukturę oraz własności wytwarzanego detalu [6-9].



Rysunek 3 Schemat i zasada działania urządzenia do wytwarzania technologii przyrostowego spiekania proszków [10]

Figure 3 Scheme and principle of operation of the device for the production of the incremental powder sintering technology [10]

Laserowe metody wytwarzania przyrostowego świetnie sprawdzają się do produkcji elementów o skomplikowanych kształtach, wysoce funkcjonalnych prototypów, elementów, których ilość nie jest wystarczająca do produkcji seryjnej oraz detali wymagających personalizacji jak protezy czy implanty. Obserwowany jest znaczny wzrost udziału technologii przyrostowych z użyciem lasera w produkcji form wtryskowych czy w wytwórstwie narzędzi. Technologie te znajdują szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu ze względu na duże możliwości dostosowania procesu względem oczekiwanych wyników. Jednym z głównych ograniczeń laserowych technologii wytwarzania przyrostowego jest grubość spiekanej lub topionej warstwy, które są ściśle zależne od gradacji zastosowanego proszku. Jest to parametr niezwykle istotny, ponieważ zastosowany proszek oraz co za tym idzie grubość warstwy, determinuje takie parametry jak chropowatość uzyskanej powierzchni, własności wytrzymałościowe elementu oraz czas i koszt produkcji. Najcieńsze uzyskiwane warstwy mają grubość ok.  $20\mu\text{m}$ , natomiast najgrubsze dochodzą do  $150\mu\text{m}$ . Te pierwsze charakteryzują się znacznie niższą chropowatością oraz lepszymi własnościami mechanicznymi, natomiast proszki o grubej gradacji lepiej nadają się do prototypowania elementów oraz komponentów

niewymagających tak dobrych właściwości, ponieważ produkcja wytwarzanych z nich detali pochłania znacznie mniej czasu oraz generuje niższe koszty [6-10]. Po za doborom odpowiedniego proszku, niezbędne jest zastosowanie adekwatnych parametrów procesu. Większość z nich jest ściśle związana z zastosowanym laserem oraz jego pracą. Odpowiednia moc lasera pozwala uzyskać dostateczny oraz regularny przetop materiału. Czas z jakim wiązka oddziałuje w punkcie jest silnie zależny od mocy lasera i wraz z jej wzrostem skracany jest czas [10].

#### 4. CECHY TECHNOLOGII CVD/PVD W ZESTAWIENIU Z LASEROWĄ OBRÓBKĄ POWIERZCHNI

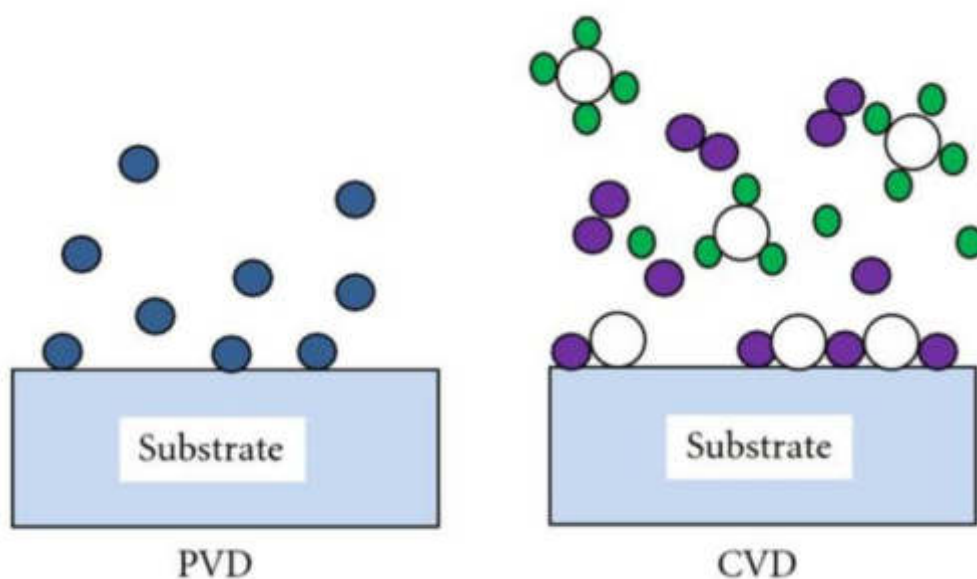
Wydłużanie czasu eksploatacji oraz zwiększanie trwałości wytwarzanych elementów może odbywać się przez poprawę własności warstwy wierzchniej przygotowanego detalu. Obserwowany jest duży rozwój technologii zajmujących się tego typu obróbką z wykorzystaniem bardzo zróżnicowanych technologii modyfikujących powierzchnie lub zapewniającymi jej ochronę. Jedynymi z cieszącymi się największą popularnością są cienkie warstwy nanoszone metodą CVD (ang. *Chemical Vapour Deposition*) oraz PVD (ang. *Physical Vapour Deposition*) [6].

Uzyskiwanie powłoki metodą CVD polega na nanoszeniu warstwy azotków lub węglików metali, zawartych w atmosferze procesowej. Przygotowana odpowiednio komora jest nagrzewana nawet do 1100°C oraz uzyskiwane jest ciśnienie w przedziale od  $1.35 \cdot 10^3$  Pa do  $1 \cdot 10^5$  Pa. Takie warunki sprawiają, że zawarte w atmosferze związki metali reagują z materiałem podłoża lub innym pierwiastkiem składowym atmosfery, prowadząc do powstania cienkiej, równej warstwy na całej powierzchni elementu. Czynnikiem aktywującym elementy atmosfery może być wysoka temperatura ale też plazma. Procesy gdzie aktywatorem jest temperatura dzielimy na warstwy osadzone pod ciśnieniem atmosferycznym APCVD (ang. *Atmospheric Pressure CVD*) oraz na te osadzone pod obniżonym ciśnieniem LPCVD (ang. *Low Pressure CVD*). Kolejnym typem technologii CVD jest nanoszenie warstwy w obecności wyładowania jarzeniowego PACVD (ang. *Plasma Assised CVD*). Taki proces pozwala na obniżenie temperatury w jakiej nanoszona jest powłoka, jednocześnie zachowując dobrą jakość warstwy oraz wysoką wydajność. Podstawowym czynnikiem ograniczającym zastosowanie technologii nanoszenia powłok CVD jest wysoka temperatura procesowa, która wyklucza nanoszenie warstw na narzędzia ze stali szybko tnącej oraz elementy narażone na obciążenia dynamiczne. Głównymi grupami materiałów, które pokrywa się powłokami CVD są materiały odporne na działanie wysokich temperatur takie jak ceramika czy węgliki spiekane [6,11,12].

Metoda PVD polega osadzaniu powłoki z fazy gazowej wykorzystując zjawiska fizyczne takie jak rozpylanie katodowe w próżni czy odparowanie metali lub ich stopów. W procesach tych zawsze ma miejsce krystalizacja par metali lub faz z plazmy. Nanoszenie powłok PVD zazwyczaj odbywa się w trzech krokach [6-11]:

- Uzyskiwanie par nanoszonego materiału
- Transport par na materiał podłoża
- Kondensacja par nanoszonego materiału na podłożu i powstawanie powłoki





Rysunek 4 Schematyczne porównanie metody PVD oraz CVD [13]  
 Figure 4 Schematic comparison of the PVD and CVD methods [13]

Jedną z kluczowych zalet technologii PVD jest niska temperatura procesu, ponieważ pokrywany element może być zimny lub podgrzany do temperatury nie wyższej niż 500°C. Taki stan rzeczy pozwala na pokrywanie stali po procesach hartowania i odpuszczania bez istotnych zmian w strukturze materiału oraz spadku własności wytrzymałościowych. Temperatury podłoża, ciśnienie gazu czy energia jonów to parametry procesu których zmiana tak jak skład chemiczny czy mikrostruktura i topografia materiału podłoża ma ogromny wpływ na własności uzyskanej powłoki. Równie ważnym czynnikiem wpływającym na jakość uzyskanej warstwy jest odpowiednie przygotowanie i oczyszczenie powierzchni, ponieważ połączenie materiału z powłoką ma charakter adhezyjny, a uzyskiwane warstwy są bardzo cienkie. Z tego powodu detal przed nałożeniem powłoki przechodzi dwuetapowy proces oczyszczania składający się z chemicznego oczyszczenia zgrubnego oraz trawienia jonowego [6,11]. W Tabeli 3. porównano różne techniki osadzania powłok. Zachowano oryginalne nazewnictwo i skróty z języka angielskiego, ze względu na ich powszechne stosowanie w środowisku przemysłowym i akademickim [11-14].

Tabela 3 Porównanie różnych technik osadzania powłok [11-14]  
 Table 3 Comparison of different deposition techniques [11-14]

| Metoda | Technika osadzania | Charakterystyka   | Zastosowanie                     |
|--------|--------------------|---|----------------------------------|
| PVD    | MS                 | Szybkie tempo osadzania, technika uboga w lit, duża segregacja składu chemicznego.                        | Katody, anody, elektrolity stałe |
|        | PLD                | Niska temperatura osadzania, niewielka segregacja składu chemicznego, niska koherencja uzyskanej powłoki. |                                  |
|        | Vacuum Evaporation | Prosty w użyciu sprzęt, wysoki wskaźnik szybkości osadzania, słaba adhezja powłoki do                     |                                  |

|     |                     |   |                                  |
|-----|---------------------|---|----------------------------------|
|     |                     | materiału rodzimego oraz niska powtarzalność metody.  |                                  |
|     | Ion-beam Sputtering | Powolny wskaźnik szybkości osadzania, dobra jakość uzyskanej powłoki, niska adhezja powłoki do materiału rodzimego. | Elektrolity stałe                |
| CVD | PECVD               | Niska temperatura osadzania, dobra jakość uzyskanej powłoki, dobra adhezja powłoki do materiału rodzimego.          | Katody                           |
|     | LCVD                | Wysoki wskaźnik szybkości osadzania, dobra adhezja powłoki do materiału rodzimego.                                  | Katody, anody, elektrolity stałe |
|     | LPCVD               | Dobra koherencja uzyskanej powłoki.   |                                  |
|     | MOCVD               | Niski wskaźnik szybkości osadzania, niska temperatura osadzania, niska jakość uzyskanej powłoki.                    | Elektrolity stałe                |
|     | ALD                 | Powolny wskaźnik szybkości osadzania, dobra jakość i koherencja uzyskanej powłoki.                                  | Katody, anody, elektrolity stałe |

## 5. AUTOMATYZACJA I MECHANIZACJA PROCESÓW OBRÓBKI LASEROWEJ

Jedną z najbardziej podstawowych operacji obróbki metali i niemetalu jest cięcie. Zwykle jest ono pierwszą operacją technologiczną w ciągu procesu. Pierwotnie stosowano metody cięcia mechanicznego, a następnie w miarę postępu rozwoju przemysłu skierowano się ku cięciu plazmą, tlenem lub strumieniem wody. Wszystkie te procesy ustępują dokładnością (do 250 $\mu$ m) i wydajnością cięciu laserowemu. Skupiona wiązka wysokoenergetyczna powoduje mniejszą ekspozycję materiału na wysoką temperaturę i mniejszą akumulację ciepła, co zmniejsza strefę wpływu wysokiej temperatury i nie powoduje pogorszenia własności mechanicznych w tym obszarze. Najczęściej stosuje się lasery gazowe CO<sub>2</sub> o mocy do 40 kW oraz lasery stałe Nd:YAG o mocy do 6 kW. Za stosowaniem laserów CO<sub>2</sub> przemawia koszt – są korzystniejsze cenowo w przeliczeniu na 1W. Umożliwiają one również uzyskanie dużej mocy wyjściowej, niemniej istotną wadą jest pozycjonowanie wiązki. Z kolei lasery Nd:YAG mają nieco ograniczoną moc, ale bazując na nowoczesnych technologiach światłowodowych uzyskują większą prędkość obróbki oraz elastyczność pozycjonowania [15, 16].

Rozwiązania stosowane w zautomatyzowanych centrach obróbczych bazują na wykorzystaniu wyżej opisanych laserów. Mechanizmy urządzeń do cięcia laserowego na płaszczyźnie cechuje bardzo duża precyzja, umożliwiającą wycinanie elementów z dokładnością  $\pm 0,03$  mm przy prędkości cięcia 20 m/min. Istotnym jest fakt, że zrobotyzowane centra obróbcze są całkowicie sterowane numerycznie, co gwarantuje pełną powtarzalność wycinanych elementów, przy zachowanych parametrach procesu. Zaprogramowanie automatycznego procesu cięcia eliminuje również straty materiałowe oraz jałowe przejścia głowicy laserowej, co znacząco przekłada się na wzrost wydajności. Źródła literaturowe donoszą o szeroko zakrojonych pracach nad metodami sztucznej inteligencji w aspekcie uczenia automatów laserowych reagowania na zaburzenia w produkcji. Za stosowaniem zrobotyzowanych stanowisk do cięcia metali przemawia wiele argumentów, takich jak szybkie przystosowanie robotów do wykonywania nowych operacji na nowych produktach oraz elastyczność, która umożliwia wprowadzenie do produkcji nawet małych partii. Produkty,

które są wykonywane na zrobotyzowanym stanowisku ściśle według zaprogramowanej ścieżki są wysoce powtarzalne i cechują się wysokim poziomem jakości. Ponadto programy nie wymagają każdorazowego wpisywania do maszyny – szeroki zakres metod archiwizacji oprogramowania ogranicza czas na przygotowanie produkcji. Warto zwrócić uwagę na aspekt redukcji niebezpiecznych warunków pracy dla personelu obsługującego maszyny, jednakże jest to kwestia kontrowersyjna, bo prowadzi w bezpośredni sposób również do redukcji stanowisk, w celu zredukowania kosztów personalnych. [15, 16]. Przykład centrum obróbkowego przedstawiono na Rys. 5 [17].



Rysunek 5 Laserowe centrum obróbkowe sterowane numerycznie firmy FANUC [17]  
*Figure 5 FANUC numerically controlled laser machining center [17]*

Metody laserowej obróbki powierzchni stanowią ekonomiczną i prośrodowiskową alternatywę dla klasycznych sposobów kształtowania chropowatości warstw wierzchnich. Szczególną uwagę należy zwrócić na zautomatyzowane polerowanie laserowe. Części, które wykonywane są klasycznymi drogami obróbki najczęściej posiadają wysoką chropowatość powierzchni. Istnieją sektory przemysłowe, dla których niezwykle istotna jest dokładność wymiarowo-kształtowa elementów. Z tego względu jest to metoda coraz częściej stosowana w sektorach motoryzacji i lotnictwa. W porównaniu z powszechnie znanymi metodami konwencjonalnej mechanicznej obróbki powierzchni laserowe polerowanie, jako technologia bezkontaktowa, prezentuje szereg superlatyw. Przede wszystkim jest dedykowana skomplikowanym, rozwiniętym powierzchniom i detalom o niewielkich gabarytach, których obróbka sprawia trudność konwencjonalnym narzędziom. Ponadto powtarzalność, elastyczność i pełna kontrola nad procesem umożliwiają generowanie powierzchni o różnych teksturach i gradacjach, dzięki czemu można wykonywać określone zabiegi w miejscach szczególnie narażonych na zużycie trybologiczne [18].

Innowacyjność polerowania laserowego oparta jest na nieco odmiennym mechanizmie obróbki powierzchni. W toku procesu występuje przetapianie, a nie ablacja (w porównaniu do metod konwencjonalnych). Metoda opiera się na ścisłym skupieniu wysokoenergetycznej wiązki lasera wyłącznie w miejscach wymagających obróbki, co niweluje negatywne skutki ekspozycji materiału na ciepło. Wiązka lasera stapia wystające wierzchołki powierzchni, które

wypełniają ubytki, co w efekcie umożliwia uzyskanie gładkiej powierzchni [18]. Na Rys. 6 przedstawiono przykład centrum obróbkowego przeznaczonego do polerowania laserowego [19].

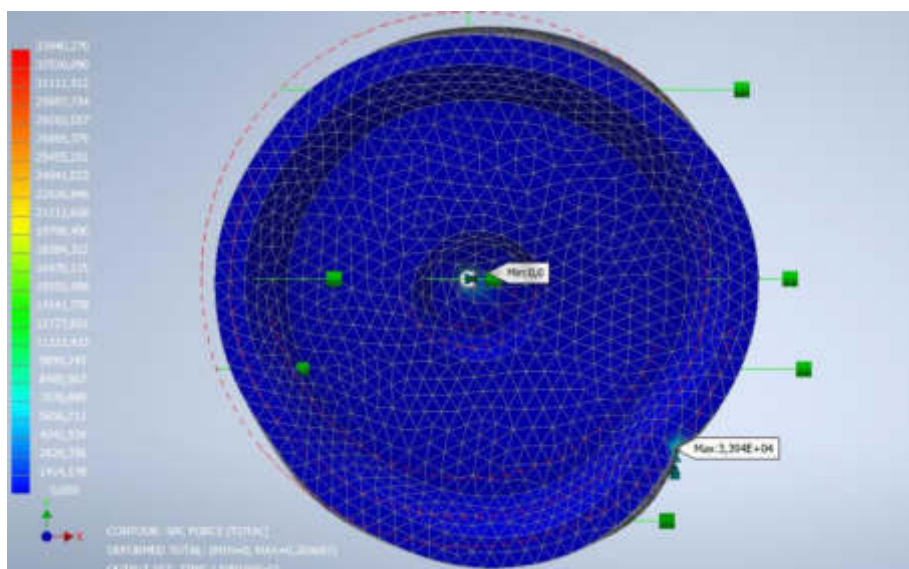


Rysunek 6 Centrum obróbkowe sterowane numerycznie firmy SYLAS przeznaczone do polerowania laserowego [19]

*Figure 6 SYLAS numerically controlled positioning center for laser polishing [19].*

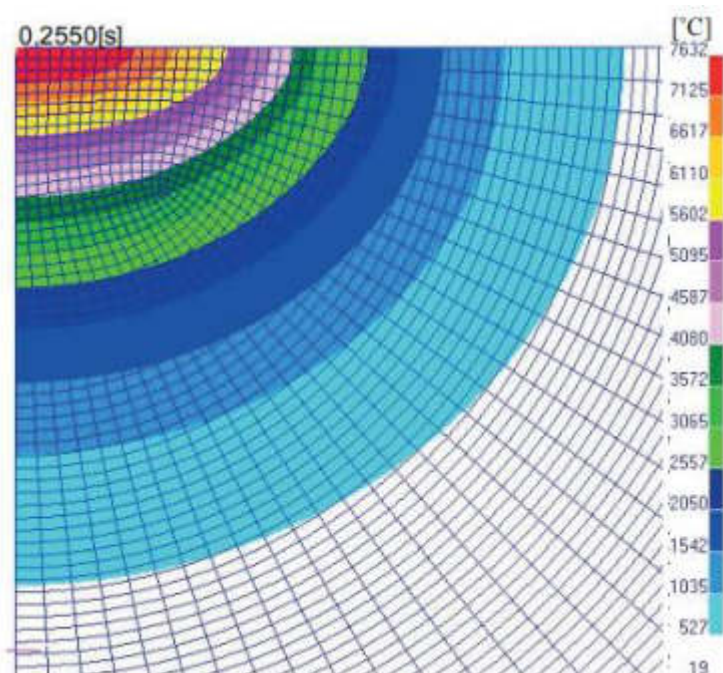
## **5. METODA ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH W LASEROWEJ OBRÓBCE POWIERZCHNI**

Metoda elementów skończonych jest jedną z najpowszechniej stosowanych metod numerycznych w inżynierskich obliczeniach za pomocą programów komputerowych. Umożliwia ona wyznaczanie przemieszczeń, naprężeń, odkształceń, reakcji podporowych oraz wiele innych wielkości w układach, gdzie nierzadko pojawia się skomplikowana geometria i różnorokie własności materiałowe. Obliczanie obciążeń elementów może być realizowane w przypadku obciążeń dynamicznych, jak i statycznych. Istotą rozwiązania numerycznego jest dyskretyzacja konkretnego modelu na skończoną liczbę elementów, za pomocą tzw. siatki dyskretyzacji. Zabieg ten pozwala na uzyskanie informacji o zachowaniu się całego układu po połączeniu rozpatrywanych parametrów pojedynczych elementów w jedną całość. Obliczenia realizowane są w 2D jak i 3D. Metoda elementów skończonych znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach inżynierii takich jak: wytrzymałość materiałów, termodynamika, mechanika płynów [20, 21].



Rysunek 7. Analiza MES zdyskretyzowanego elementu układu jezdnego pojazdu UTO  
*Figure 7. MES analysis of the discretized chassis component of a personal transport device*

Oddziaływanie na materiał sił zewnętrznych lub procesów cieplnych to zjawiska, w których narzędziem używanym do oceny zmian stanu materiału są metody numeryczne. Dzięki metodzie elementów skończonych jesteśmy w stanie wyciągnąć istotne informacje o stanie materiału w trakcie trwania procesu cieplnego, jak i po jego zakończeniu. Pomimo ograniczeń wynikających m.in. z absorpcji energii laserowej przez materiał, niedokładności wyników, końcowe rezultaty mogą być uzyskane w sposób minimalizujący lub całkowicie niwelujący błędy. W przeciwieństwie do metod analitycznych, metody numeryczne pozwalają zaoszczędzić cenne nakłady pracy oraz ułatwiają uzyskiwanie wyników [22]. Dokładność obliczeń numerycznych jest warunkowana poprzez wprowadzanie parametrów materiałowych z uwzględnieniem zmian jakie w nich zachodzą podczas oddziaływania temperaturowego oraz oddziaływania czynników zewnętrznych. Istotą stosowania metody elementów skończonych w zagadnieniach procesów cieplnych jest dokładne określenie warunków brzegowych. Towarzyszące procesowi obróbki laserowej oddziaływanie energii wiązki, które wywołuje zmiany stanów materii w trakcie procesu, jest trudne do określenia metodami pomiarowymi, z tego względu poddaje się je analizie MES. Szybkość tych zmian cechuje na tyle krótki czas, że ich efekty wyznaczane są na drodze doświadczalnej [23].



Rysunek 8. Rozkład temperatury w badanej próbce podczas ciepłego oddziaływania laserowego [23]

*Figure 8. Temperature distribution in examined sample during heat laser influence [23]*

## 6. PODSUMOWANIE

Obserwując tendencje światowego i krajowego przemysłu można zauważyć stale rosnący udział laserowych technik obróbki powierzchni, których coraz nowsze zastosowania stanowią o ich uzasadnionej wszechstronności. Laser jest wynalazkiem innowacyjnym, co opiera się głównie na szerokim spektrum możliwości elastycznej manipulacji parametrami procesu, w celu uzyskania oczekiwanych wyników. Dokładność, powtarzalność i wydajność są nieporównywalne z konwencjonalnymi metodami kształtowania powierzchni materiałów. Aspekty te stanowią obiecujący fundament rozwoju przemysłowego laserowej obróbki powierzchniowej.

## PODZIĘKOWANIE

Praca powstała w wyniku realizacji projektu w ramach kształcenia zorientowanego projektowo - PBL, w konkursie VII w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza, Politechnika Śląska.

## BIBLIOGRAFIA

1. J.A. Stratton, Electromagnetic theory, Wiley, New Jersey, 2007

2. M. Ślusarczyk, Fizyka – Fale elektromagnetyczne dostęp 16.05.2022 <http://fizykaslusarczyk.htw.pl/>
3. A. Kujawski, P. Szczepański, Lasery Podstawy fizyczne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1999
4. C. Rocznik, Zastosowanie lasera w technologiach spawalniczych, Regionalna Izba Gospodarcza, ul. 1-go Sierpnia 26 b, Stalowa Wola, dostęp: 24.05.2022
5. A. Czupryński, A. Rzeźnikiewicz, Specjalne technologie spawalnicze w ćwiczeniach laboratoryjnych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2020.
6. L.A. Dobrzański, A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich, Open Access Library, Volume 5, 2011.
7. Kusiński J. Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej, Wydawnictwo Naukowe Akapit, Kraków 2000.
8. Radziejowska J. Laserowa modyfikacja właściwości warstwy wierzchniej wspomaganą nagniataniem, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polska Akademia Nauk, Warszawa, 2011.
9. A. Mazurkiewicz, B. Nędzi. Ocena jakości wykonania wybranego elementu z proszków metali metodą laserowego wytwarzania przyrostowego, Instytut Naukowo-Wydawniczy SPATIUM, 17 (12), 2016, 1204-1211.
10. A. Stwora, G. Skrabalak. Wpływ parametrów technologicznych procesu selektywnego topienia laserowego na wybrane właściwości elementów wykonanych z proszków stopu AlSi10Mg. Mechanik, 89 (3), 2016, 206-208.
11. L.A. Dobrzański, Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2003
12. L.A. Dobrzański, K. Pakuła, Struktura i własności skrawne ceramiki narzędziowej Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> pokrywanej powłokami PVD i CVD, Foundry Engineering, 6 (21), 155-164
13. X.P. Liang, F.H. Tan, F. Wei, J. Du. Research progress of all solid-state thin film lithium Battery, Earth and Environmental Science, 2019, 218
14. S. Wolf, R. N. Tauber, Silicon Processing for the VLSI Era: Process Technology, vol. 1, Lattice Press, Sunset Beach, Calif, USA, 1986
15. B. Ciecierska, R. Kluz. Obróbka laserowa powierzchni z wykorzystaniem robota przemysłowego, Technologia i Automatyzacja Montażu, 3, 2014, 205-208.
16. J. Barczyk, M. Kłosowiak, Robotyzacja cięcia laserowego, Pomiary Automatyka Robotyka, 6, 2005
17. Folder reklamowy firmy FANUC Robotics Ltd. dostęp: 16.05.2022
18. A. Caggiano, R. Teti, V. Alfieri, F. Caiazzo. Automated laser polishing for surface finish enhancement of additive manufactured components for the automotive industry. Production Engineering (2021) 15:109–117
19. Folder reklamowy firmy SYLAS Laser systems dostęp: 16.05.2022
20. J. Ormezowski, Analiza dynamiczna mechanizmu hamującego, Archiwum Motoryzacji, Politechnika Łódzka, Łódź, 2010, s. 27 – 28.
21. <http://imio.polsl.pl/Dopobrania/MES.pdf> dostęp: 14.05.2022
22. J. Szargut. Modelowanie numeryczne pól temperatury. WNT, Warszawa (1992)
23. A. Bień. Numeryczna analiza procesu obróbki laserowej w aspekcie badań materiałowych, Uniwersytet Warmińsko Mazurski, Olsztyn, 2015



13 czerwca 2022  
Gliwice - Wisła

KATEDRA MATERIAŁÓW INŻYNIERSKICH I BIOMEDYCZNYCH  
WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY  
POLITECHNIKA ŚLĄSKA

## MIĘDZYNARODOWA STUDENCKA KONFERENCJA NAUKOWA

### **Badanie struktury i własności tribologicznych warstw napawanych łukowo spoiwem zapewniającym stopiwo na bazie żeliwa chromowego**

R. Czarnecki <sup>a</sup>, M. Szulc, A. Balon, K. Kubica, M. Burek, A. Makosz, A. Czupryński, M. Żuk, M. Pacholarz

<sup>a</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Spawalnictwa  
email: rafacza490@student.polsl.pl,

**Streszczenie:** W artykule opisano własności tribologiczne warstw napawanych stopiwo zapewniającym żeliwo chromowe, stosowanych na rolki mielące młynów przemysłowych. Badania mikroskopowe pozwoliły określić struktury powstałe w wyniku napawania łukowego drutami proszkowymi samoosłonowymi. Przeprowadzone badania służyły porównaniu warstw trudnościeralnych wykonanych drutami o podobnym składzie chemicznym.

**Abstract:** The article describes the tribological properties of the layers welded with a weld metal providing chromium cast iron, used for grinding rolls of industrial mills. Microscopic research allowed to determine the structures formed as a result of arc surfacing with self-shielding flux-cored wires. The research served to compare the wear-resistant layers made with wires of a similar chemical composition.

**Słowa kluczowe:** napawanie, tribologia, żeliwo chromowe, FCAW, struktura

#### **1. WSTĘP**

Zastosowanie trudnościeralnych warstw napawanych na elementy mielące młynów przemysłowych pozwala na rzadszą ich wymianę, co przyczynia się do redukcji kosztów związanych z ich wymianą oraz przestojami produkcyjnymi. Skład chemiczny dobierany jest w zależności od środowiska w jakim eksploatowana jest napoina, co związane jest z materiałem na który oddziałuje i obciążeniami na jakie będzie narażona. Czynniki związane z masą materiałów ściernych, ich kształt oraz abrazyjność w dużym stopniu wpływa na tempo zużycia materiałów, co wymusza regulacje jej składu chemicznego w celu zapewnienia odpowiedniej trwałości warstwy napawanej. Ciśnienie oraz temperatura panująca w przestrzeniach roboczych młynów przemysłowych zmieniają się podczas procesu mielenia, co dodatkowo wpływa na tempo zużycia elementów mielących. Trwałość tych elementów można poprawić stosując warstwy napawane, których pożądaną cechą jest niski udział materiału rodzimego w napoinie. Warstwa napawana o niskim udziale materiału podłoża pozwoli na uzyskanie napoiny o składzie chemicznym i własnościach w większym stopniu zbliżonym do deklarowanego przez producenta drutu. Elementy narażone na zużycie ściernie pracujące w środowisku o podwyższonej



temperaturze lub temperaturze otoczenia powinno chronić się poprzez stosowanie warstw trudnościeralnych. W tym przypadku zaleca się zastosowanie napawania łukowego drutem proszkowym samoosłonowym zapewniającym stopiwo w postaci żeliwa chromowego. Pozwoli to na uzyskanie struktur w postaci węglików chromu. Najczęściej stosowane druty w swoim składzie zawierają od 4 do 5% C oraz od 20 do 35% Cr. Należy natomiast pamiętać o ograniczeniu stosowania tych warstw do środowiska narażonego na niskie obciążenia udarowe [1,2]. Powstałe węgliki chromu charakteryzują się wysoką twardością i odpornością na ścieranie i zużycie adhezyjne. Wielkość odporności będzie wzrastała wraz ze wzrostem zawartości węgla chromu w stopiwie. Jest ona uzależniona od zawartości węgla i chromu w stopie żelaza. Wzrost tych pierwiastków będzie powodował spadek własności plastycznych napoiny co może prowadzić do powstawania pęknięć powierzchniowych. Zjawisko to można ograniczyć poprzez regulację zawartości krzemu i manganu [3]. Węgliki chromu zawarte w napoinie charakteryzują się dużymi objętościami, przez co zwiększana jest powierzchnia styku z materiałem ścieranym. W przypadku gdy napoina będzie pracowała przy wyższych obciążeniach udarowych, może nastąpić pękanie i odprysk dużych węglików chromu. Do takiego zjawiska może dojść w środowisku pracy kruszarek i czerpaków. W przypadku wystąpienia węglików wtórnych, wydzielających się między pierwotnymi węglkami chromu można poprawić odporność na ścieranie napoin przy większych obciążeniach. Spowodowane jest to zmniejszeniem powierzchni styku z materiałem ściernym. Dodatkowo poprawiona zostanie odporność na zużycie adhezyjne w wyższych temperaturach [3,4].

## **2. BADANIA WŁASNE**

### **2.1 Cel badań**

Celem przeprowadzonych badań było określenie własności tribologicznych wykonanych warstw napawanych stosowanych na rolki mielące młynów przemysłowych oraz sprawdzenie struktury materiału za pomocą badań mikroskopowych. Odporność na ścieranie typu metal minerał określono zgodnie z normą ASTM G65-04. Zbadano również twardość wierzchniej części napoiny metodą Rockwella C oraz sprawdzono mikrotwardość na przekroju poprzecznym próbki przy wykorzystaniu metody Vickersa.

#### **2.1.1 Materiał wykorzystywany do badań**

W procesie napawania łukowego na zautomatyzowanym urządzeniu wykonano dwie próbki o oznaczeniu „AM” oraz „BM” przy zastosowaniu tych samych parametrach napawania przedstawionych w Tabeli 1. Podłożem na którym wykonano trzy warstwy napoin była stal konstrukcyjna S355J2, której skład chemiczny podano w Tabeli 2. W przypadku próbki o oznaczeniu „AM” materiałem dodatkowym był drut proszkowy samoosłonowy o średnicy 2,4 mm firmy Oerlikon gatunek Fluxodur 62-0. Deklarowany przez producenta skład chemiczny drutu proszkowego przedstawiono w Tabeli 3. [6]. Podczas wykonywania próbki o oznaczeniu „BM” wykorzystano drut proszkowy samoosłonowy COREWELD A62 o średnicy 2,4 mm, którego skład chemiczny podano w Tabeli 4. [7]. W przypadku obu materiałów dodatkowych producenci zapewniają powstanie stopiwa w postaci żeliwa wysokochromowego o wysokiej odporności na ścieranie oraz twardości sięgającej od 59 do 62 HRC.

Tabela 1. Parametry napawania

Table 1. Surfacing parameters

| Natężenie prądu [A] | Napięcie łuku [V] | Prędkość napawania [m/min] | Temperatura międzysciegowa [°C] | Rodzaj i biegunowość prądu | Średnica drutu [mm] |
|---------------------|-------------------|----------------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------|
| 330                 | 28                | 0,5                        | 250                             | DC +                       | 2,4                 |

Tabela 2. Skład chemiczny stali S355J2 [5]

Table 2. Chemical composition of S355J2 steel [5]

| Skład chemiczny %wag. |     |         |          |        |       |       |        |        |        |
|-----------------------|-----|---------|----------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|
| C                     | Mn  | Si      | P        | S      | C     | Ni    | Al     | Cu     | Fe     |
| 0,2                   | 1,5 | 0,2-0,5 | max 0,04 | ≤ 0,04 | ≤ 0,3 | ≤ 0,3 | ≤ 0,02 | ≤ 0,03 | reszta |

Tabela 3. Skład chemiczny drutu proszkowego samoosłonowego Fluxodur 62-0, %wag. [6]

Table 3. Chemical composition of Fluxodur 62-0 self-shielding flux-cored wire, % wt. [6]

| Skład chemiczny %wag. |    |     |    |
|-----------------------|----|-----|----|
| C                     | Mn | Si  | Cr |
| 5                     | 2  | 1,1 | 27 |

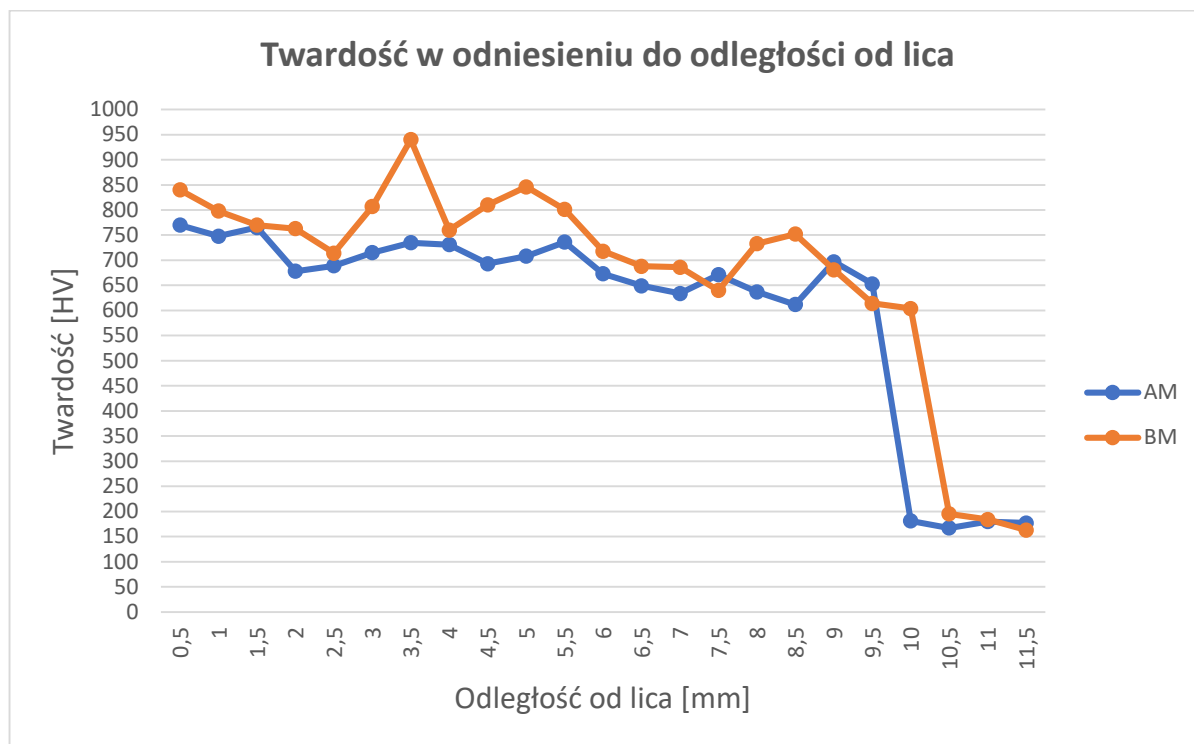
Tabela 4. Skład chemiczny drutu proszkowego samoosłonowego COREWELD A62 [7]

Table 4. Chemical composition of COREWELD A62 self-shielding flux cored wire [7]

| Skład chemiczny %wag. |     |     |    |   |
|-----------------------|-----|-----|----|---|
| C                     | Mn  | Si  | Cr | B |
| 5,5                   | 1,2 | 1,2 | 26 | + |

## 2.2 Badanie twardości

W celu określenia zmian twardości napoiny w zależności od odległości od jej lica, przeprowadzono pomiar twardości metodą Vickersa. Na przekroju poprzecznym próbki wykonano 23 pomiary pod obciążeniem 1 [kg] i czasie obciążania 10 [s]. Punkty pomiarowe były oddalone od siebie o odległość 0,5 [mm] i zorientowane w połowie szerokości napoiny. Badanie wykonano stosując wgłębnik w postaci diamentowego ostrosłupa o podstawie kwadratu i kącie wierzchołkowym wynoszącym 136°. Wyniki badania przedstawiono na Rys.1. Następnie określono twardość bezpośrednio na powierzchni lica napoiny przy pomocy metody Rockwella. Na przygotowanych próbkach przedstawionych na Rys.2 wykonano 7 pomiarów przy użyciu diamentowego stożka, stosując obciążenie wstępne 98 [N] i całkowitą siłę obciążającą 1471 [N]. Określono wartości twardości napoiny w skali HRC. Wyniki pomiarów przedstawiono w Tabeli 5.



Rys. 1. Zmiana twardości względem odległości od lica napoiiny

Figure 1. Change in hardness in relation to the distance from the padding weld face



Rys. 2. Rozmieszczenie punktów pomiarowych badania twardości metodą Rockwella próbek: a) AM, b) BM

Figure 2. Distribution of measuring points for testing the hardness using the Rockwell method of samples: a) AM, b) BM

Tabela 5. Wyniki pomiarów twardości pod powierzchnią lica

Table 5. Results of hardness measurements under the surface of the face

| Nr punktu pomiarowego | Oznaczenie próbki   |                     |
|-----------------------|---------------------|---------------------|
|                       | AM                  | BM                  |
|                       | Wynik pomiaru [HRC] | Wynik pomiaru [HRC] |
| 1.                    | 61                  | 62                  |
| 2.                    | 60                  | 62                  |
| 3.                    | 59                  | 54                  |
| 4.                    | 59                  | 53                  |
| 5.                    | 56                  | 61                  |
| 6.                    | 58                  | 61,5                |
| 7.                    | 60,5                | 63                  |
| $\bar{x}$             | 59,07               | 59,5                |

### 2.3 Badanie odporności na ścieranie

Odporność na ścieranie typu metal-minerał przygotowanych warstw napawanych przeprowadzono zgodnie z normą ASTM G65-04. Przed przystąpieniem do badania sprawdzono masę próbek oraz określono gęstości napoin ważąc jej fragmenty na powietrzu i w wodzie destylowanej za pomocą wagi laboratoryjnej RADWAG WAX 60/220 o dokładności do 0,0001 [g]. Wyniki pomiarów gęstości napoin przedstawiono w Tabeli 6. Przygotowane próbki umieszczono w urządzeniu do pomiaru odporności na ścieranie, w którym koło cierne wykonało 6000 obrotów, przy natężeniu przepływu materiału ciernego w postaci piasku wynoszącym 335 [g/min] i docisku próbki do koła ciernego siłą 130 [N]. W celu określenia względnej odporności na ścieranie obliczono objętościowy ubytek masy zgodnie ze wzorem (1). Wyniki badań odporności na ścieranie przedstawiono w Tabeli 7. Natomiast na Rys.3. przedstawiono próbki po przeprowadzeniu badania. Względną odporność na ścieranie odniesiono do odporności na ścieranie stali Hardox 400 [8].

$$\text{Objętościowy ubytek masy [mm}^3] = \frac{\text{ubytek masy [g]}}{\text{gęstość [\frac{g}{\text{cm}^3}] * 1000}} \quad (1)$$

Tabela 6. Wyniki pomiaru gęstości napoin

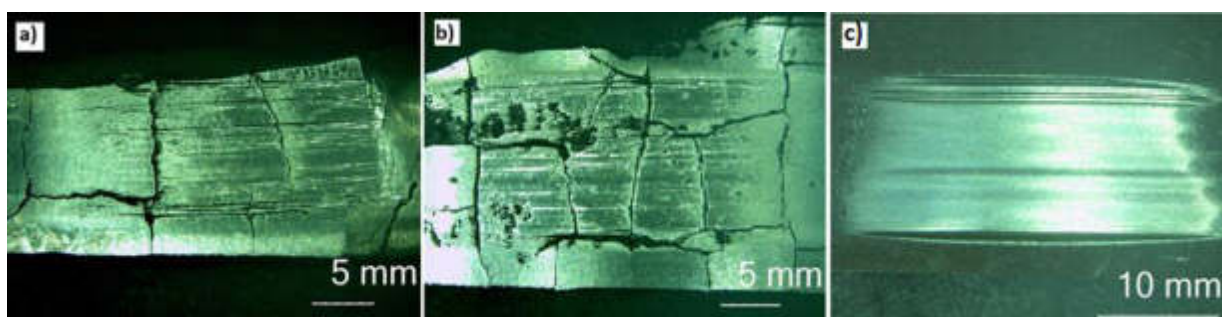
Table 6. The results of measuring the density of padding welds

| Oznaczenie próbki | Masa próbki ważonej na powietrzu [g] | Masa próbki ważonej w cieczy [g] | Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ] |
|-------------------|--------------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| AM                | 2,0867                               | 1,8020                           | 7,3142                       |
| BM                | 2,0777                               | 1,7927                           | 7,2842                       |

Tabela 7. Wyniki badań odporności na ścieranie typu metal-minerał

Table 7. Results of metal-mineral abrasion resistance test

| Oznaczenie próbki | Numer próbki | Masa przed testem [g] | Masa po teście [g] | Ubytek masy [g] | Średni ubytek masy [g] | Gęstość warstwy [g/cm <sup>3</sup> ] | Ubytek objętościowy [mm <sup>3</sup> ] | Względna odporność na ścieranie |
|-------------------|--------------|-----------------------|--------------------|-----------------|------------------------|--------------------------------------|--|---------------------------------|
| AM                | 1            | 173,2785              | 173,0938           | 0,1847          | 0,1666                 | 7,3142                               | 22,7844                                | 8,3369                          |
|                   | 2            | 144,4376              | 144,2890           | 0,1486          |                        |                                      |  |                                 |
| BM                | 1            | 164,5687              | 164,4174           | 0,1513          | 0,14345                | 7,2842                               | 19,6933                                | 9,6455                          |
|                   | 2            | 171,5733              | 171,4377           | 0,1356          |                        |                                      |  |                                 |
| Hardox 400        | 1            | 62,2260               | 60,7526            | 1,4737          | 1,4744                 | 7,7620                               | 189,9510                               | 1,00                            |
|                   | 2            | 60,7526               | 59,2773            | 1,4753          |                        |                                      |  |                                 |

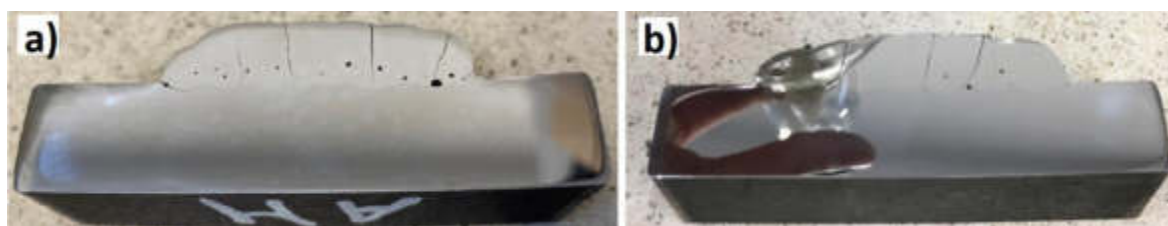


Rys. 3. Powierzchnia po procesie ścierania próbek o oznaczeniu: a) AM, b) BM, c) Hardox400

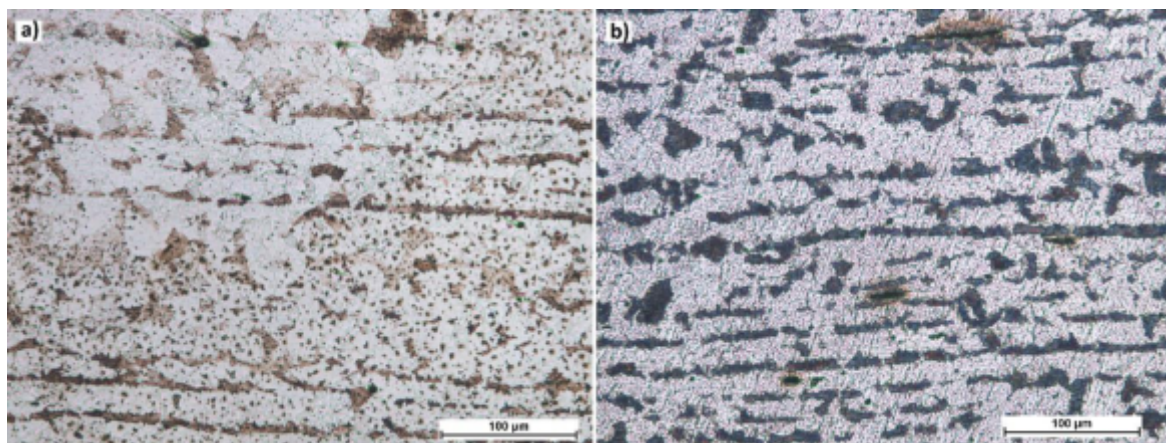
Figure 3. The surface after the abrasion process of samples marked as: a) AM, b) BM, c) hardox400

## 2.4 Badanie mikroskopowe

Odpowiednio przygotowane na szlifierko-polerce zgłady metalograficzne przedstawione na Rys.4. wytrawiono w wodzie królewskiej w celu umożliwienia obserwacji napoin. Obserwacje dokonano na mikroskopie świetlnym przy powiększeniu obrazu x200. Uzyskane wyniki pozwoliły na analizę w charakterystycznych miejscach próbki takich jak materiał rodzimy, strefa wpływu ciepła, linia wtopienia napoiny oraz środkowa i górna część napoiny. Na Rys.5. zaobserwowano ferrytyczno-perlityczną strukturę materiału rodzimego z pasmowym ułożeniem ziaren perlitu świadczącym o walcowaniu materiału. W obszarze SWC przedstawionej na Rys.6. zaobserwowano powstawanie pęknięć i pęcherzy oraz zmiany ilości i ułożenia ziaren perlitu. W obszarach linii wtopienia napoiny można zaobserwować struktury dendrytyczne skierowane do wyraźnej linii wtopienia co pokazano na Rys.7. Obserwacja środkowej i górnej części napoiny (Rys.8 i 9) pozwoliła na identyfikację powstałych węglików chromu o zróżnicowanym kształcie wielkości i ułożeniu, charakteryzujących się wysoką twardością i odpornością na ścieranie.

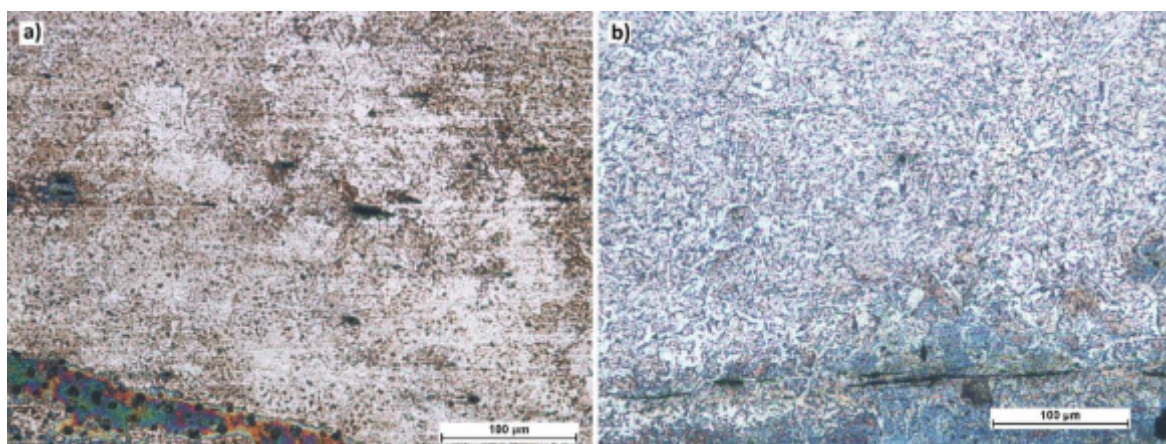


Rys. 4. Przygotowane zglądy metalograficzne  
*Figure 4. Prepared metallographic microsection*



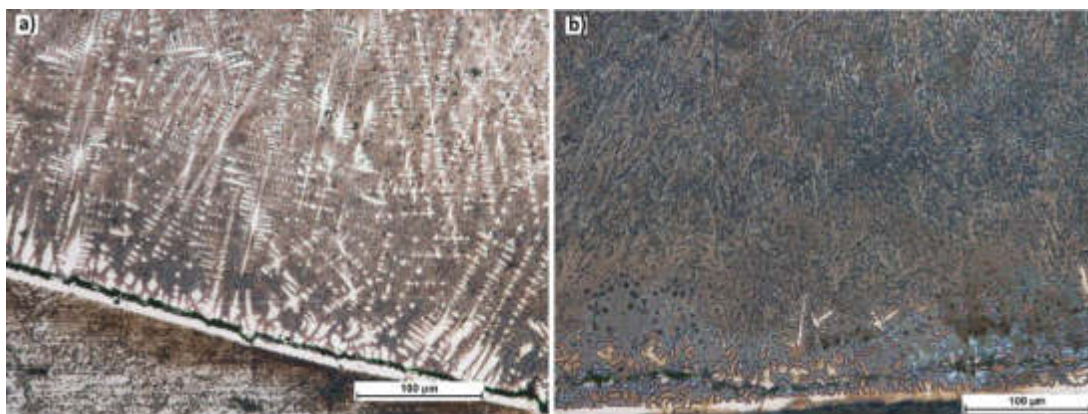
Rys. 5. Zdjęcie mikroskopowe materiału rodzimego przy powiększeniu x200, dla próbki:  
a) AM, b) BM

*Figure 5. Microscopic photo of the native material at x200 magnification, for the sample:  
a) AM, b) BM*



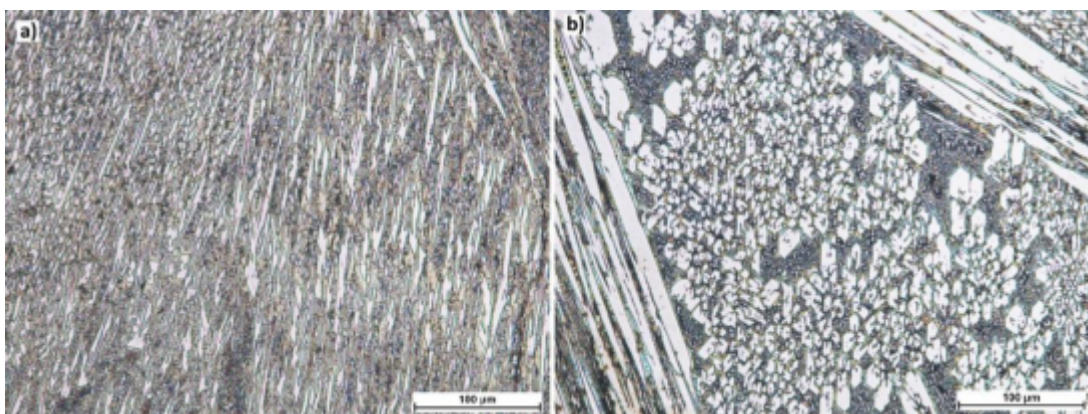
Rys. 6. Zdjęcie mikroskopowe SWC przy powiększeniu x200, dla próbki:  
a) AM, b) BM

*Figure 6. A microscopic photo of the SWC at x200 magnification, for the sample:  
a) AM, b) BM*



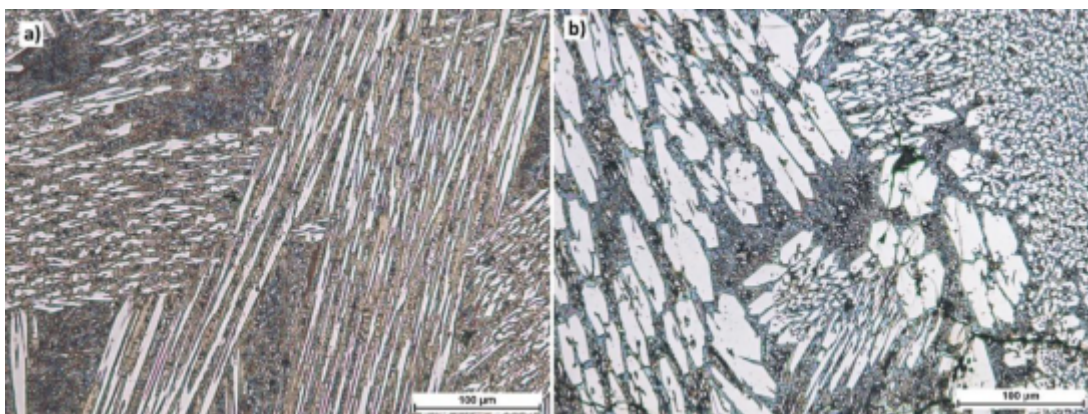
Rys. 7. Zdjęcie mikroskopowe linii wtopienia przy powiększeniu x200, dla próbki: a) AM, b) BM

Figure 7. Microscopic photo of the fusion line at x200 magnification, for the sample: a) AM, b) BM



Rys. 8. Zdjęcie mikroskopowe napoiny przy powiększeniu x200, dla próbki: a) AM, b) BM

Figure 8. Microscopic photo of the padding weld at x200 magnification, for the sample: a) AM, b) BM



Rys. 9. Zdjęcie mikroskopowe górnej części napoiny przy powiększeniu x200, dla próbki: a) AM, b) BM

Figure 9. A microscopic photo of the upper part of the padding weld at x200 magnification, for the sample: a) AM, b) BM

### 3. Podsumowanie

Warstwy napawane łukowo drutem proszkowym samoosłoniętym zapewniającym stopiwo na bazie żeliwa chromowego posiadały liczne pęknięcia świadczące o wysokiej jej twardości. Zarówno badania twardości Rockwella jak i Vickersa potwierdziły te przypuszczenia. Próbką o oznaczeniu BM charakteryzowała się wyższą średnią twardością pod powierzchnią lica osiągając wartość na poziomie 59,5 HRC, natomiast próbka o oznaczeniu AM uzyskała nieco niższą wartość osiągając 59,07 HRC. Wartości te potwierdzają zgodność z danymi deklarowanymi przez producenta drutu proszkowego do napawania. W przypadku pomiaru twardości na przekroju poprzecznym próbki metodą Vickersa widoczny jest spadek twardości względem odległości od lica napoiny, co może świadczyć o mniejszym udziale materiału rodzimego w napoinie. Niski udział materiału podłoża w napoinie jest pożądaną cechą w przypadku warstw trudnościeralnych ze względu na ograniczenie zubożenia ich własności tribologicznych. Odporność na ścieranie typu metal-minerał badanych warstw napawanych wykazały zadowalające wyniki osiągając niemal 9-krotnie większą odporność na ścieranie względem płyt trudnościeralnych ze stali Hardox 400. Zauważyć też można różnice w mechanizmie zużycia materiału. Płyta trudnościeralna uplastyczniała się i ścierała równomiernie, natomiast na powierzchni badanych napoin widoczne były wyraźne zarysowania powstałe w wyniku mikroskrawania. Obserwacje mikrostruktury obu próbek wykazały wystąpienie węglików chromu różnej wielkości i rozmieszczeniu charakteryzujących się wysoką twardością i odpornością na ścieranie. Podsumowując, osiągnięto odpowiednio twardą i odporną na ścieranie powłokę którą z powodzeniem można wykorzystać do rolek mielących młynów przemysłowych. Natomiast ze względu na dużą ilość węglików chromu w stosunku do osnowy, podczas dużych obciążeń udarowych może dochodzić do pęknięć napoiny przyczyniających się do szybszego zużycia warstw napawanych, co wymusza ograniczenie tych warstw do środowiska o mniejszym narażeniu na oddziaływanie czynników dynamicznych.

### 4. Wnioski

- Najwyższymi wartościami twardości charakteryzowały się obszary bezpośrednio pod licem napoiny, ze względu na niski udział materiału rodzimego w napoinie. Pomiaru wykonane w niższych warstwach wykazały spadek twardości spowodowany zwiększeniem udziału materiału podłoża w napoinie.
- Zmiany wartości twardości w skali HV w osi wzdłużnej próbki świadczą o obecności różnych faz krystalicznych charakteryzujących się różnymi twardościami, co potwierdzają obserwacje mikroskopowe. W oparciu o te wyniki napoinę można zakwalifikować jako warstwę trudnościeralną o wysokiej twardości.
- Pęknięcia powstałe w napoinie spowodowane są jej wysoką twardością oraz brakiem warstwy buforowej. Dodatkowym czynnikiem może być brak podgrzania materiału przed procesem napawania. W celu eliminacji ryzyka powstania pęknięć, zalecane jest stosowanie warstwy buforowej.
- W zależności od twardości warstwy napawanej mogą wystąpić różne mechanizmy zużycia, pod wpływem oddziaływania tego samego czynnika ściernego. Materiałem o najwyższej odporności na ścieranie typu metal-minerał była próbka BM, która została wykonana drutem COREWELD A62. Napoina charakteryzowała się ponad 9,64-krotnie większą odpornością



na ścieranie w odniesieniu do stali Hardox 400, a próbka AM ponad 8,33 krotnie większą odpornością na ścieranie typu metal-minerał w odniesieniu do próbki ze stali Hardox 400.

## LITERATURA

1. Hejwowski T. Nowoczesne powłoki nakładane cieplnie odporna na zużycie ściernie i erozyjne. Lublin: Politechnika Lubelska ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin, 2013. ISBN: 978-83-63569-56-3
2. Pilarczyk J. red: Poradnik inżyniera. Spawalnictwo, tom 2, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
3. Kimpel A.: Napawanie i natryskiwanie cieplne [Hardfacing and thermal spraying], Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000
4. Womersley D.: Hardfacing: not merely a reclamation process. Surface Engineering. 1995. Vol. 11.
5. [https://multistal.pl/upload/KARTY\\_KATALOGOWE\\_2/Gatunek\\_Stali\\_18G2A.pdf](https://multistal.pl/upload/KARTY_KATALOGOWE_2/Gatunek_Stali_18G2A.pdf)
6. <http://weldingpartner.pl/wp-content/uploads/2017/03/FLUXODUR-62-O.pdf>
7. <https://www.metalweld.pl/coreweld-a62>
8. Czupryński A.; Kik T.; Melcer M. Porównanie odporności na zużycie ściernie płyt trudnościeralnych. Welding Technology Review, 2018, 90.5: 28-36.

Badania zostały wykonane w ramach projektu badawczego: Indywidualne Programy Studiów realizowane w formie Project Base Learning w ramach projektu: „Politechnika Śląska jako centrum nowoczesnego kształcenia opartego o badania i innowacje” - 7ed, pt.: „Badanie własności kompozytowych i metalowych warstw napawanych stosowanych na elementy mielące młynów pionowych i poziomych”, który był współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego.



Rzeczpospolita  
Polska

Unia Europejska  
Europejski Fundusz Społeczny



**Politechnika Śląska jako Centrum Nowoczesnego Kształcenia  
opartego o badania i innowacje**

**POWR-03.05.00-00-Z098/17-00**

Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego

## Wpływ malowania proszkowego farbą poliestrową aluminiowo-miedzianego wymiennika krzyżowo-prądowego na jego efektywność wymiany ciepła

B. Czechowski <sup>c</sup>, P. Drejka <sup>b</sup>, M. Rejek <sup>a</sup>, K. Smolaga <sup>c</sup>, M. Tlon <sup>a</sup>, P. Zdybel <sup>b</sup>, K. Jaszcz <sup>b</sup>, J. Mazurkiewicz <sup>a</sup>, A. Ryfa <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Studenci Kierunku Inżynieria Materiałowa oraz Kierunku Mechanika i Budowa Maszyn, email: janusz.mazurkiewicz@polsl.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Chemiczny, Katedra Fizykochemii i Technologii Polimerów, Studenci Kierunku Technologia Chemiczna, email: katarzyna.jaszcz@polsl.pl

<sup>c</sup> Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Katedra Techniki Ciepłej, Studenci Kierunku Energetyka, email: arkadiusz.ryfa@polsl.pl

**Streszczenie:** W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań dotyczące wpływu farby na ilość oddanego ciepła przez krzyżowo-prądowe wymienniki ciepła. Badanie było prowadzone podczas realizacji VII edycji projektu *Indywidualne Programy Studiów* realizowane w formie Project Based Learning pt: *Ocena metodyki przygotowania powierzchni elementów ocynkowanych galwanicznie oraz aluminiowych do technologii malowania proszkowego elementów stosowanych w pompach ciepła.*

**Abstract:** The following article presents the research results on the effect of paint coating on the amount of heat given off by the cross-current heat exchangers. The research was conducted during the project "Individual Study Programs implemented in the form of Project Based Learning entitled: *Assessment of the methodology of surface preparation of galvanized and aluminum elements for the powder coating technology of elements used in heat pumps.*

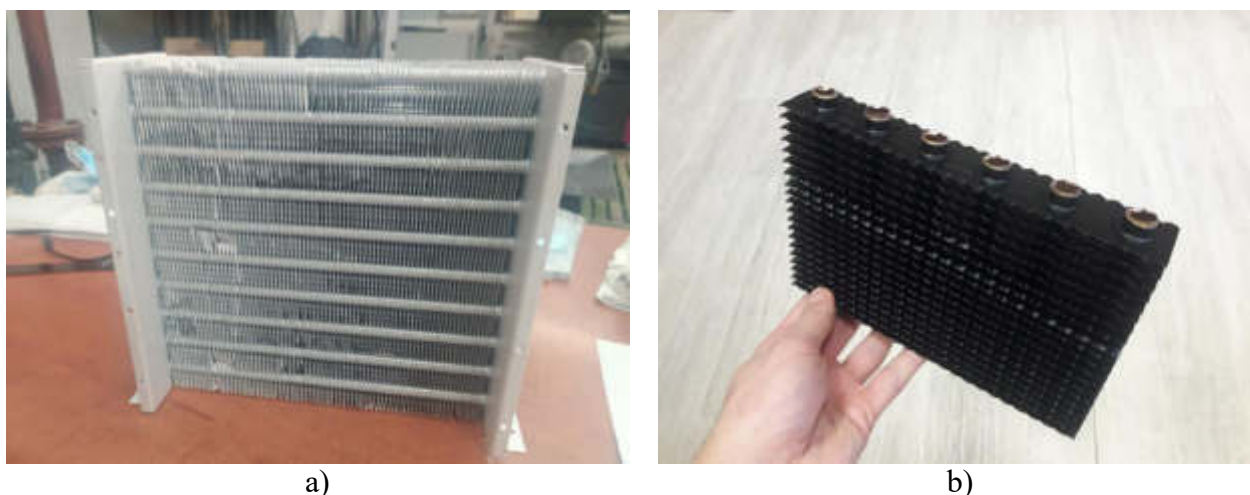
**Słowa kluczowe:** malowanie proszkowe, farba poliestrowa, wymienniki ciepła, przepływ ciepła, wymiana ciepła w wymiennikach, symulacja CFD

## WSTĘP

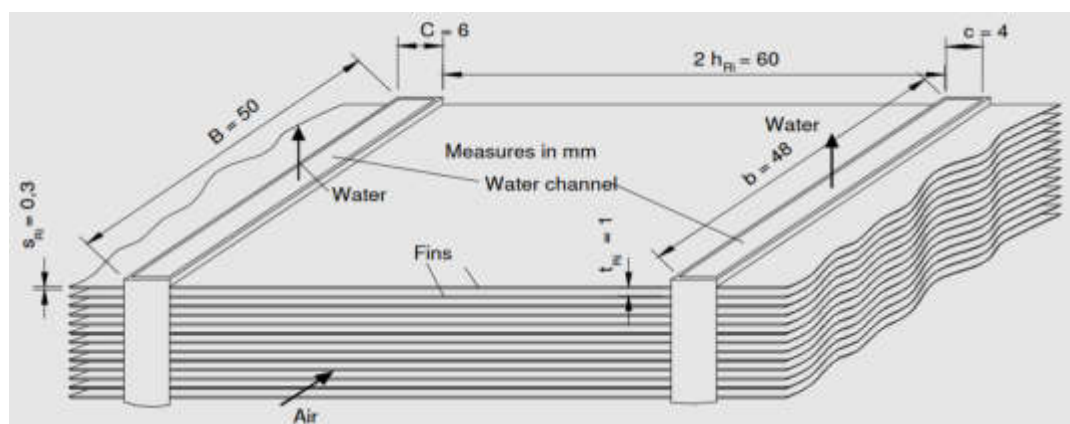
Krzyżowo-prądowe wymienniki ciepła

Wymienniki ciepła [1] są to urządzenia, w których podczas kontaktu przynajmniej dwóch czynników, gazów lub cieczy (bądź jednego i drugiego) następuje przekazywanie energii z ciała o wyższej temperaturze do ciała o niższej temperaturze. Mają one różną budowę i są dostosowywane do aktualnych potrzeb klienta. Wymiennik, który był poddany analizie ma budowę krzyżowo-prądową. Oznacza to, że czynniki przepływają względem siebie prostopadle. Zakłada się także, że w czystym prądzie krzyżowym płyn nie miesza się, jest on

przeznaczony za pomocą żeber oddających ciepło, zwanych lamelkami. Ciepło do lamelki jest doprowadzane za pomocą przyłączonych miedzianych rurek, w których płynie gorący czynnik.



Rysunek 1. Przykładowe wymienniki ciepła produkowane przez specjalistyczną Firmę



Rysunek 2. Przypadek krzyżowego wymiennika ciepła z książki *Heat Transfer: Basic and Practice* Thomasa Wetzla oraz Petera von Bockha [2]

Pokrycie wymiennika farbą proszkową poliestrową

Aluminium, z którego zrobione są lamelki w wymienniku, posiada wysoki współczynnik przewodzenia ciepła wynoszący około  $200 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Pokrywając wymiennik farbą, posiadającą ten współczynnik na poziomie  $0,23 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  [3] wpłyniemy na ilość oddawanego ciepła. Możemy wstępnie założyć, że farba zachowa się jak izolator, gdyż różnica w wartościach współczynnika przewodzenia ciepła jest zdecydowana. Należy jednak wziąć pod uwagę, że w oddawaniu ciepła kluczowy jest stosunek obwodu do pola przekroju lamelki. Po nałożeniu farby wzrośnie jej przekrój, ale także i obwód, jest więc istotne jak zmieni się ich stosunek.

Symulując przepływ powietrza przez fragment takiej lamelki możemy uzyskać odpowiedź jak pokrycie farbą wpłynie na oddawane ciepło, a w zawiązku z tym na efektywność wymiennika.

## MODEL ANALITYCZNY

Przed rozpoczęciem symulacji należy przyjrzeć się modelowi analitycznemu oraz m.in. powierzchni oddającej ciepło i podstawowym wzorom teoretycznym na ciepło oddane przez żebro [4]. Lamelka niepokryta farbą posiada wymiary 35 mm x 35 mm x 0,16 mm, a rura, która przez nią przechodzi ma średnicę 13 mm. Oznacza to, że powierzchnia boczna i fragment powierzchni czołowej, która oddaje ciepło wynosi około 2190 mm<sup>2</sup>. Jeśli taką lamelkę pokryjemy farbą o grubości 0,1 mm powierzchnia oddająca ciepło wzrośnie do 2211 mm<sup>2</sup>. Jest to niewielki wzrost, ale jednak dalej wzrost.

Jeśli nastąpił wzrost powierzchni po użyciu farby, to w tym wypadku musiał nastąpić spadek wypadkowego współczynnika przewodzenia ciepła. Jeśli zastosowaliśmy materiały o dwóch różnych współczynnikach to nie można do obliczeń przyjąć tylko jednego z nich. Należy wtedy wyliczyć wartość wypadkową zgodnie ze wzorem:

$$\lambda_w = \frac{\lambda_1 V_1 + \lambda_2 V_2}{V} \quad (1)$$

gdzie:

$\lambda_1, \lambda_2$  – współczynniki przewodzenia ciepła dla żebra i farby

$V_1$  – objętość lamelki

$V_2$  – objętość farby

$V$  – całkowita objętość

Wypadkowy współczynnik przewodzenia ciepła dla naszego przypadku wynosi wtedy około 90 W/(m·K). Jak łatwo zauważyć jest to wartość o ponad połowę mniejsza niż współczynnik czystego aluminium. Jest to kolejna ważna zmienna przy obliczaniu oddanego ciepła.

$$\dot{Q} = \vartheta_0 \cdot A_w \cdot \lambda \cdot m \cdot \psi \quad (2)$$

Pierwszym oznaczeniem jest nadwyżka temperatury na początku żebra, dla obu przypadków jest ona taka sama więc ona nie ma wpływu na różnicę.

Ostatnie oznaczenie odnosi się do funkcji Bessela. Tam głównymi zmiennymi są promień żebra (także jest stały) i współczynnik temperaturowy, który jest przedstawiony poniżej.

Współczynnik temperaturowy –  $m$ . Jest on definiowany wg wzoru dla żebra okrągłego:

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha}{\delta\lambda}} \quad (3)$$

gdzie:

$\alpha$  – współczynnik wnikania ciepła, [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$\delta$  – grubość żebra, [m]

$\lambda$  – współczynnik przewodzenia ciepła, [W/(m·K)]

Można powiedzieć, że jest to jedna z trzech głównych zmiennych, która ma wpływ na wynik końcowy, gdyż zawiera grubość żebra (która się zmienia w zależności czy jest ono pomalowane czy nie) oraz współczynniki przewodzenia i wnikania ciepła.

Ostatnią zmienną jest  $A_w$ , czyli pole powierzchni żebra przy podstawie. Tutaj bardzo duży wpływ ma grubość farby i lamelki, gdyż to od tych parametrów zależy o ile będzie wzrastać pole powierzchni. Jest to więc zmienna, która ma największy wpływ na wynik końcowy.

Tabela 1. Przyrost/spadek wartości zmiennej

|   | Lamelka<br>niepomalowana | Lamelka<br>pomalowana | Przyrost/spadek |
|---|--------------------------|-----------------------|-----------------|
| $A_w, \text{mm}^2$                          | 6,53                     | 14,7                  | + 125%          |
| $\lambda, \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | 200                      | 90                    | - 55%           |
| $m, 1/\text{K}$                             | 25                       | 24,85                 | - 0,6 %         |

Analizując poszczególne zmienne, otrzymujemy informacje co wpłynęło na ostateczny wynik. Chociaż spadek współczynnika przewodzenia ciepła był duży i wynosił 55% to i tak nie miał takiego wpływu jak pole powierzchni żebra przy podstawie, gdzie przyrost wyniósł 125%. Dzięki temu widzimy więc co wpływa na wynik końcowy oraz wiemy, że pokrycie farbą ma wpływ na ilość oddanego ciepła. Aby jednak potwierdzić słuszność modelu analitycznego należy przeprowadzić symulację CFD.

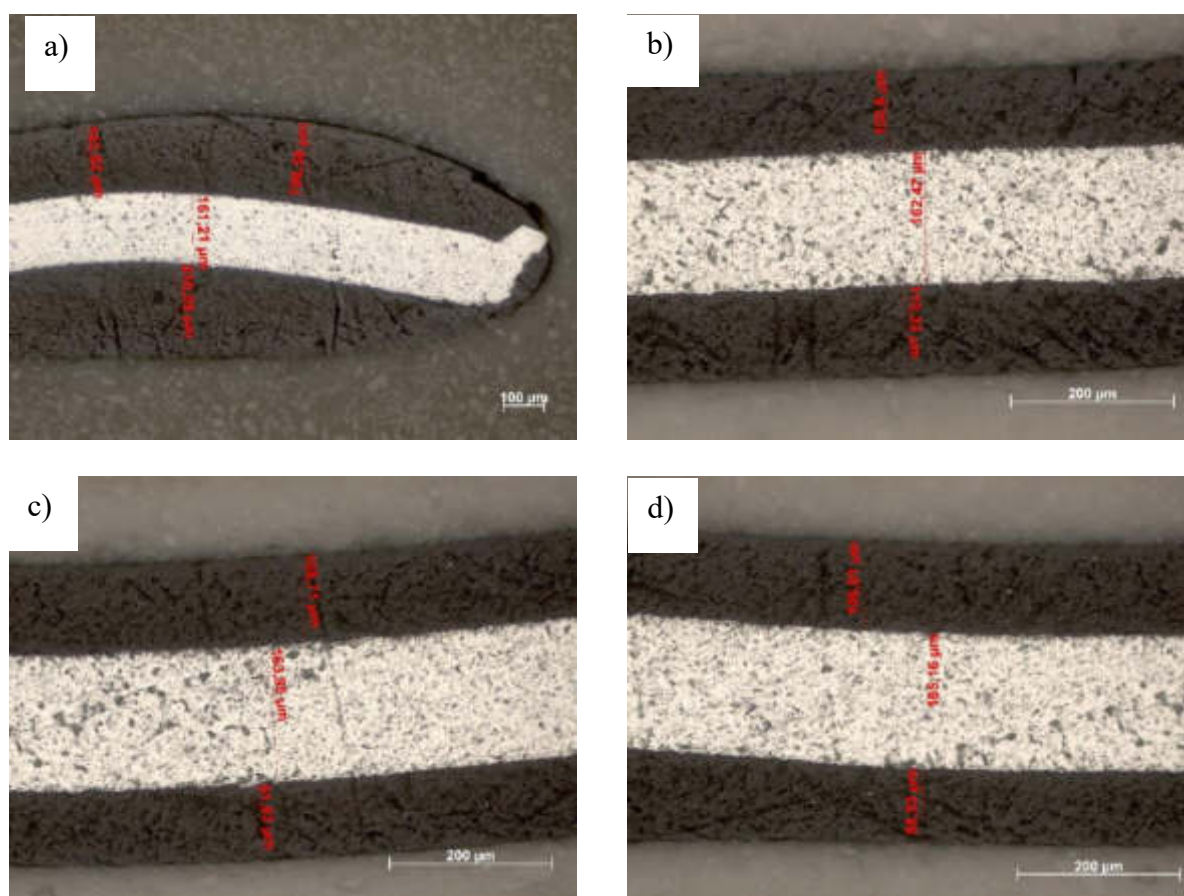
## SYMULACJA CFD

Symulacja jest przeprowadzana w programie Ansys Fluent. Program pozwala na szybkie wykonanie obliczeń i uzyskanie odpowiedzi na zadane pytania. Cała praca odbywa się w kilku krokach. Najpierw potrzebne jest uzyskanie odpowiednich wymiarów geometrii, którą trzeba zamodelować. Następnie trzeba taką geometrie zbudować oraz rozłożyć na niej siatkę. Tak przygotowany model umieszcza się w programie Fluent i po ustawieniu odpowiednich warunków można uruchomić symulację.

### Badanie grubości powłok

Aby przyjąć rzeczywiste dane do planowanej symulacji przepływu ciepła konieczne było przeprowadzanie badań morfologii i grubości farby naniesionej na aluminiowe żebra wymiennika. W celu oceny grubości powłok poliestrowych wykonano przekroje poprzeczne wybranych reprezentatywnych fragmentów wymiennika. Należy podkreślić, że grubość warstwy farby będzie miała wpływ na wyniki obliczeń. Założono w tezie niniejszej pracy, że malowanie proszkowe wymienników prowadzi będzie do zmniejszenia ich efektywności cieplnej przez zmniejszenie ilości ciepła przekazanej do otoczenia.

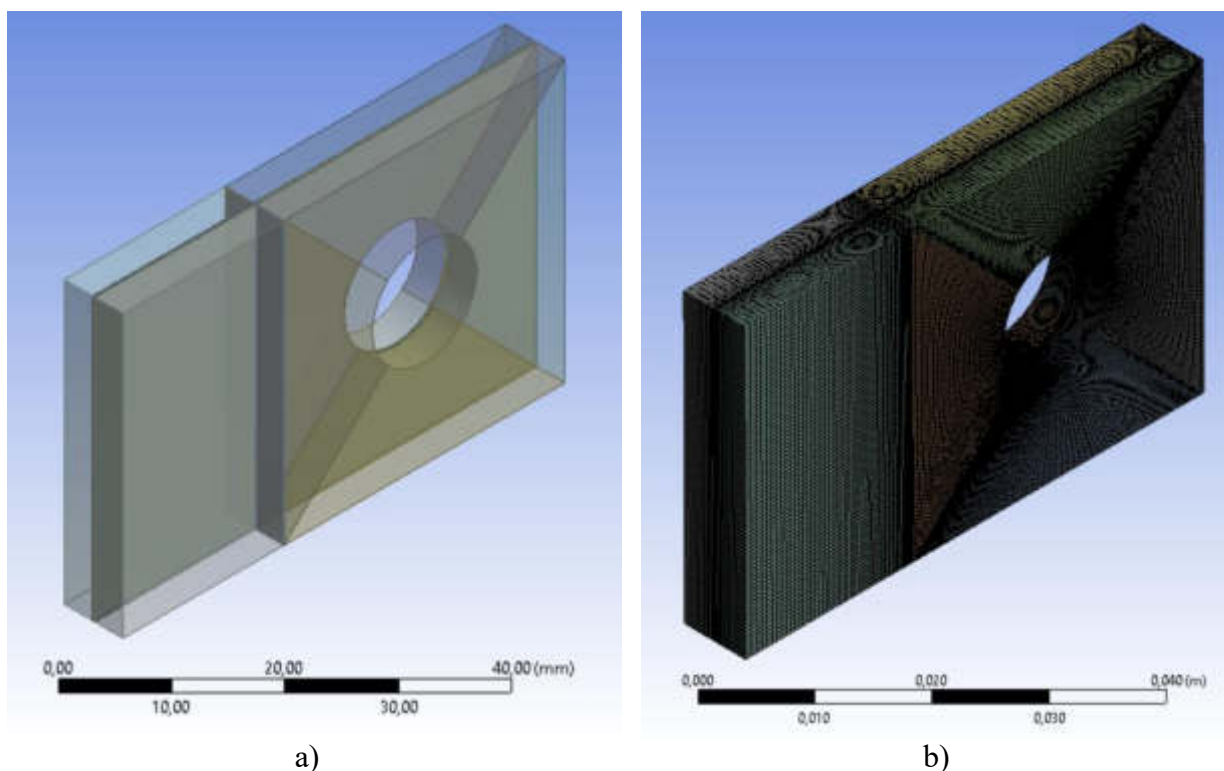
W tym przypadku do badań grubości i morfologii powłok proszkowych wykorzystano mikroskop metalograficzny Axioobserver firmy Zeiss, a obserwacje prowadzono przy powiększeniach 50, 200, 500 i 1000x. Uzyskane wartości uśredniono i wykorzystano do przygotowania modelu.



Rysunek 3. Struktura przekroju pomalowanego czarną poliestrową farbą proszkową żebra wymiennika wraz z pomiarami grubości (grubość żebra ok. 150  $\mu\text{m}$ ), a) 100x, b) – d) 200x

#### Geometria i siatka modelu

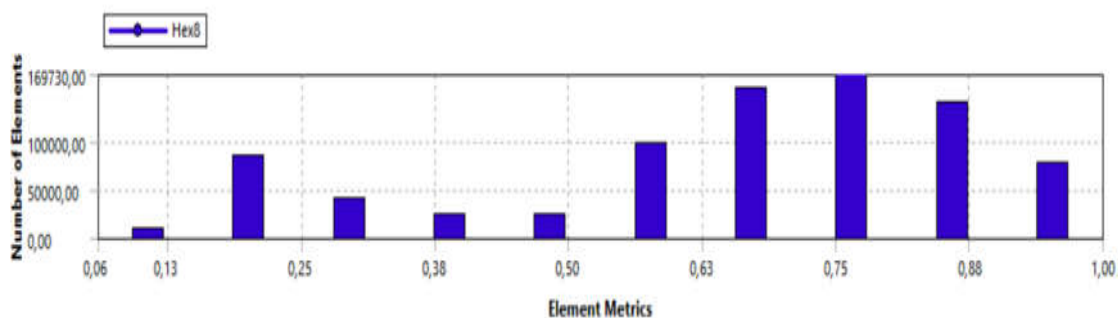
Fragment lamelki objęty badaniem posiada wymiary 35 mm x 35 mm, oraz grubość 0,16 mm. Farba z każdej strony ma grubość 0,1 mm. Wokół lamelki utworzono geometrię odpowiedzialną za powietrze w czasie symulacji. Jest to bardzo ważne, gdyż ciepło z żebra uchodzi do otoczenia, a tę wartość potrzebujemy do końcowego rezultatu i porównania, czy farba wpływa na wymianę ciepła.



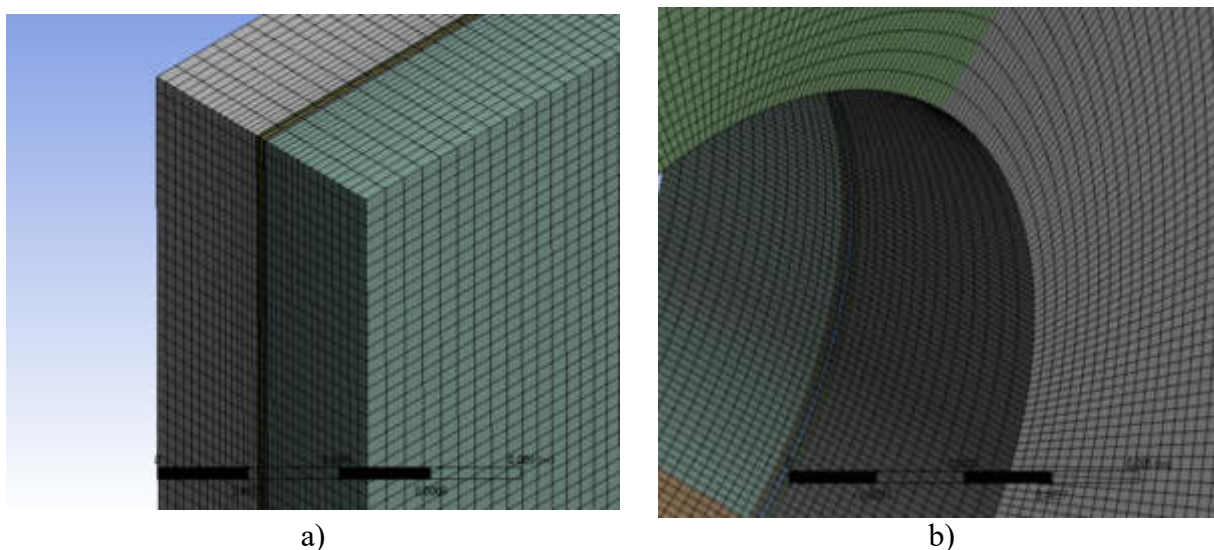
Rysunek 4. a) Geometria przyjętego modelu wymiennika, b) Siatka numeryczna.

Siatka w przybliżeniu dzieli całą geometrię na prostopadłościany lub figury bardzo do nich podobne. Czym lepszą jakością posiada siatka tym obliczenia zostaną przeprowadzone szybciej. W stworzonym modelu powstało około 850 tysięcy elementów. Ich większa liczba pozwala na bardziej dokładne zobaczenie jak rozchodzą się poszczególne wartości na powierzchni.

Nie jest jednak możliwe aby siatka była w każdym miejscu idealna. W miejscach, w których występują zaokrąglenia elementy nie przypominają prostopadłościaków, a przy bardzo cienkich bryłach lamelki i farby nie występują odpowiednie proporcje. Należy jednak dążyć do tego aby jak najwięcej elementów posiadało wysoką jakość.



Rysunek 5. Rozkład ilości elementów siatki wg ich jakości.



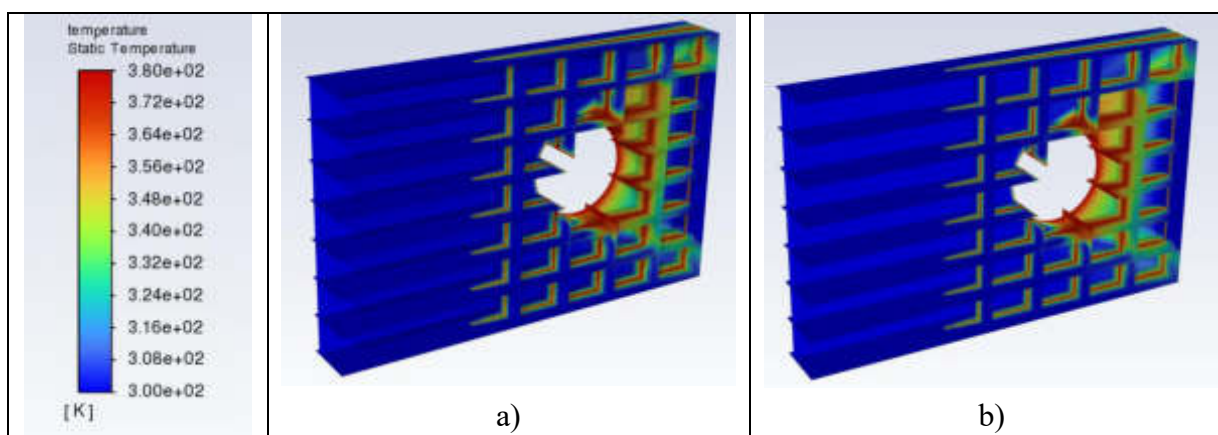
Rysunek 6. Zbliżenia na siatkę, a) Wlot powietrza, b) Ściana brzegowa łącząca lamelkę z rurą.

#### Ustawienia i warunki brzegowe

Ważnym elementem obliczeń jest poprawne ustawienie modelu oraz zadanie odpowiednich warunków brzegowych. Najważniejsze ustawienia to:

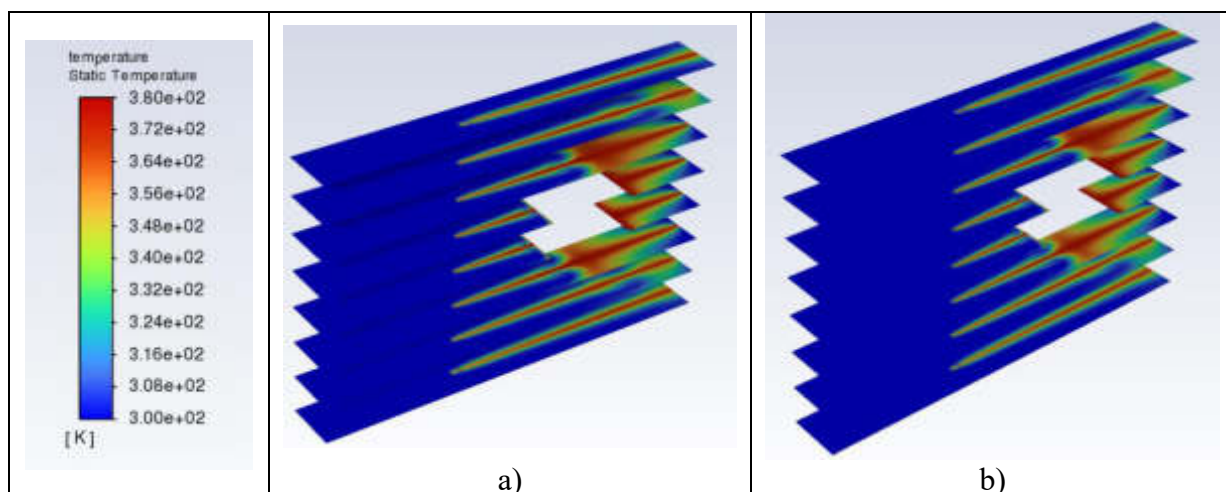
- 1) Temperatura rury, przez którą przepływa gorący czynnik oddający ciepło, to 380 K.
- 2) Prędkość wlotowa do modelu na przedniej ścianie wynosi 2 m/s.
- 3) Powierzchnie górne i dolne powietrza, a także powierzchnie tylne powietrza zostały ustawione jako wylot ciśnienia.
- 4) Przyspieszenie ziemskie na wartość  $-9,81 \text{ m/s}^2$  oraz włączone jest równanie energii.
- 5) Materiały mają przypisane odpowiednie współczynniki przewodzenia ciepła

#### Wyniki graficzne



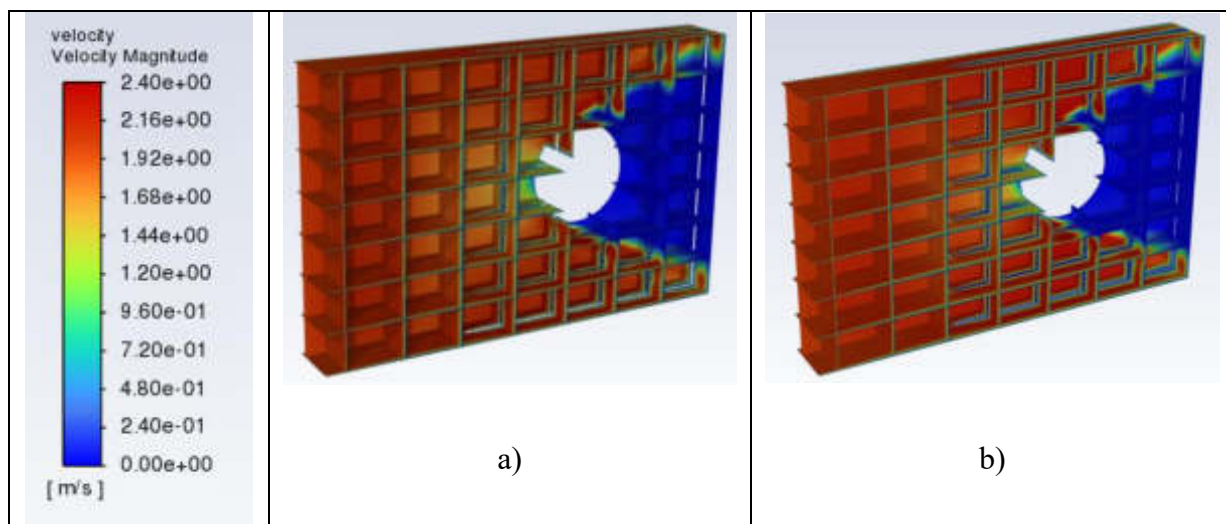
Rysunek 7. Rozkład temperatury na wszystkich płaszczyznach wymiennika, a) Lamelka pomalowana, b) Lamelka niepomalowana.



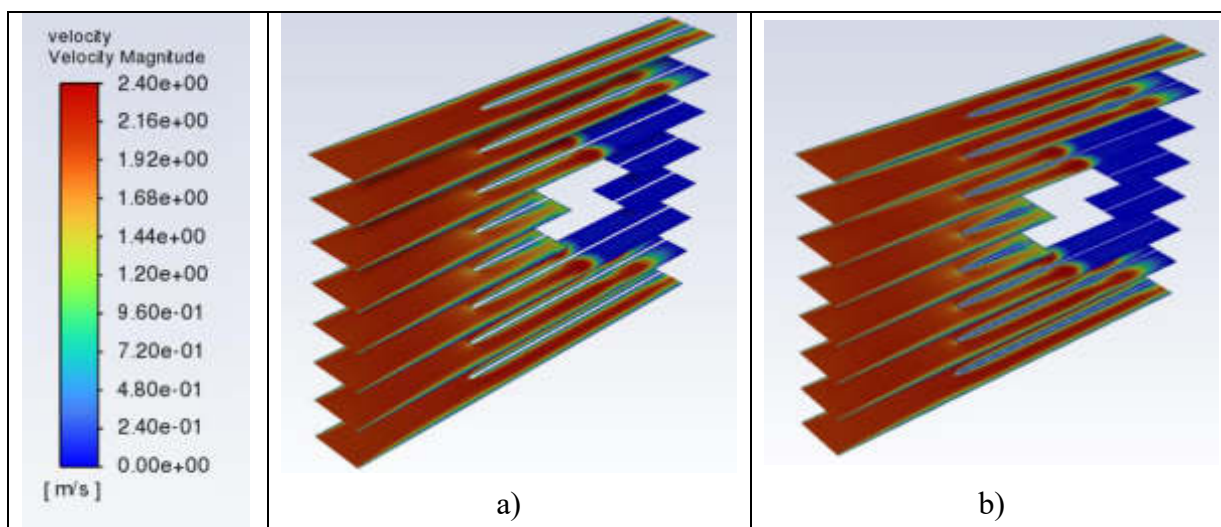


Rysunek 8. Rozkład temperatury na płaszczyznach poziomych, a) Lamelka pomalowana, b) Lamelka niepomalowana.

Jak widać na powyższych grafikach, różnice w polu temperatury pomiędzy pomalowanym, a niepomalowanym zębem są prawie niewidoczne. Aby zaobserwować jakiegokolwiek zmiany trzeba by było użyć zdecydowanego powiększenia danej grafiki. Możemy jednak zaobserwować, że za rurką, patrząc wzdłuż kierunku przepływu powietrza, wzrasta temperatura otoczenia. Oznacza to, że w miejscu w którym nie ma ciągłego przepływu powietrza (rurka wstrzymuje przepływ bezpośrednio za nią) i występuje zdecydowanie słabsza konwekcja wymuszona temperatura otoczenia jest zdecydowanie większa niż w kanale przelotowym. Możemy więc stwierdzić, że czym wyższa prędkość zimnego powietrza, tym szybciej otoczenie będzie wychładzane.



Rysunek 9. Rozkład prędkości przepływu powietrza na wszystkich płaszczyznach, a) Lamelka pomalowana, b) Lamelka niepomalowana.



Rysunek 10. Rozkład prędkości na płaszczyznach poziomych, a) Lamelka pomalowana, b) Lamelka niepomalowana.

W powyższych grafikach dotyczących prędkości, różnice są ponownie bardzo małe. Ciężko jest zaobserwować jakiegokolwiek większe zmiany w zależności od rodzaju symulacji. Wyniki graficzne pokazują nam jednak, jak bardzo rurka potrafi wyhamować ruch powietrza. Zaraz za nią pojawia się duży obszar, w niebieskim kolorze, pokazujący, że powietrze nie posiada tam żadnej prędkości lub jest ona minimalna. Z tego powodu jeśli w wymienniku występuje więcej rzędów rurek to są one ułożone naprzemiennie, a nie jedna za drugą. Jest to spowodowane chęcią uzyskania jak największej prędkości przepływu na końcu kanału wylotowego.

#### Wyniki obliczeń modelu CFD

Tabela 2. Wyniki obliczeń modelu CFD

| Parametr                           | Lamelka pomalowana | Lamelka niepomalowana |
|------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| Średnia temperatura powierzchni, K | 366,75             | 368,78                |
| Oddane ciepło, W                   | 3,96               | 3,6                   |

Jak widać na wynikach w tabeli lamelka pomalowana oddaje więcej ciepła niż lamelka niepomalowana. Różnica między tymi dwiema wersjami wynosi prawie 0,4 W, co stanowi około 10% całkowitego strumienia ciepła. Można powiedzieć, że jest to zaskakujący rezultat. Znając wartości współczynników przewodzenia ciepła, zakładano że farba zadziała jak izolator i spowoduje spadek ilości oddanego ciepła. Wyniki symulacji wskazują jednak inaczej i oznacza to, że w momencie gdy pomalujemy wymiennik, w czasie przepływu wymuszonego, odda on więcej ciepła niż ten sam wymiennik, tylko nie pomalowany.

## PODSUMOWANIE

Wynik badań może cały czas zaskakiwać. Podczas symulacji użyto już dokładnych parametrów materiałów oraz zastosowano grubość lamelki i warstwy farby po zmierzeniu jej wcześniej na mikroskopie. Ważne jest, aby ponownie podkreślić, że wymiary te są uśrednione i zaokrąglone. Jak można było zauważyć na zdjęciach mikroskopowych, farba nie pokrywa lamelki w każdym miejscu tak samo. Występują czasami spore rozbieżności w tej wartości. Należy też zaznaczyć, że sama lamelka nie jest idealnie prosta i występują na niej różne zagięcia, które powstają w procesie technologicznym.

Po stworzeniu geometrii i wygenerowaniu siatki, można było przejść do ostatniego, najważniejszego etapu badań, czyli symulacji. Istotną zmienną, która została wprowadzona, była prędkość powietrza na wlocie. Zastosowanie tego parametru miało urzeczywistnić całą symulację, gdyż w rzeczywistości za wymiennikiem znajduje się wentylator, jeśli jest on używany w klimatyzatorach lub bezpośrednio pada na niego strumień powietrza, jeśli taki wymiennik służy jako chłodnica samochodowa.

Tak jak wspomniano wcześniej wyniki graficzne nie pozwalają nam jednoznacznie stwierdzić, która wersja lamelki oddaje więcej ciepła. Grafiki są bardzo podobne do siebie i być może na większym powiększeniu udałoby się znaleźć odpowiedź na to pytanie

Ostatecznie więc należy patrzeć na wyniki liczbowe symulacji. Te wskazały, że lamelka pokryta farbą oddaje więcej ciepła. Dla naszego przypadku jest to około 0,36 W różnicy. Może wydawać się, że jest to mała różnica, jeśli jednak weźmiemy pod uwagę, że w jednym takim wymienniku (Rysunek 1a.) może być około 120 takich fragmentów, da nam to w sumie 43,2 W więcej oddanego ciepła. Dla naszego przypadku można więc powiedzieć, że pomalowanie lamelki wymiennika poprawi jego efektywność.

Należy jednak pamiętać, że jeśli budowa wymiennika będzie inna to różnica ta nie będzie cały czas taka sama. W wymiennikach, gdzie lamelki są bliżej siebie pomalowany jest tylko ich fragment. Środek w takim przypadku najczęściej jest bez pokrycia. Tak samo, jeśli zwiększymy prędkość dopływu powietrza na wlocie. Możemy wtedy z pewnością założyć, że nastąpi wzrost oddanego ciepła.

Podsumowując ogólnie całe badanie i jego proces można stwierdzić, że pomalowanie wymiennika farbą będzie miało minimalny, bądź znikomy wzrost oddanego ciepła.

## BIBLIOGRAFIA

1. E. Kostowski, „Przepływ Ciepła”, wyd. 2, 2005, str. 344–347, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
2. P. von Böckh, T. Wetzel, „Heat Transfer: Basics and Practise”, 2012, str. 233, Berlin, Springer
3. N. Rylko, *Obliczanie efektywnej przewodności cieplnej kompozytów włóknistych w przypadku nieustalonego przepływu ciepła*, „Kompozyty”, 2005, tom 5, nr 4, str. 96–99, Częstochowa, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej
4. E. Kostowski, „Zbiór zadań z przepływu ciepła”, wyd. 10, 2011, str. 31–35, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej

## Badania powłoki TiO<sub>2</sub> uzyskanej metodą MSPVD na podłożu ze stali austenitycznej AISI 316L

A. Duda <sup>1a</sup>, M. Rejek <sup>1d</sup>, P. Falkowska <sup>1b</sup>, M. Olszowska <sup>1c</sup>, Ł. Reiman <sup>2</sup>, M. Staszuk <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny

email: <sup>a</sup>alekdud935@student.polsl.pl,

<sup>b</sup>paulfal458@student.polsl.pl,

<sup>c</sup>magdols407@student.polsl.pl, <sup>d</sup>monirej772@student.polsl.pl

<sup>2</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Laboratorium Badań Materiałów

email: lukasz.reimann@polsl.pl

<sup>3</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email: marcin.staszuk@polsl.pl

**Streszczenie:** W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań powłok PVD nanoszonych metodą rozpylania magnetronowego (MSPVD) na podłożu ze stali odpornej na korozję AISI 316L. Przeprowadzono analizę struktury i morfologii podłoża oraz badanych powłok za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) oraz za pomocą mikroskopu sił atomowych (AFM). Wykonano badanie własności fizykochemiczne metodą potencjodynamiczną określając odporność materiału na korozję oraz dokonano obserwację powierzchni powstałych uszkodzeń. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że naniesiona powłoka TiO<sub>2</sub> na stal nierdzewną 316L, umożliwiła poprawę odporności korozyjnej materiału. Najlepszą odporność wykazała próbka, której czas nanoszenia wynosił 150 minut. Ponadto zrealizowano badanie własności tribologicznych, które wykazały, iż zastosowana powłoka zwiększyła odporność na zużycie ściernie.

**Abstract:** This work presents the results of tests of PVD coatings deposited by magnetron deposition of coatings (MSPVD) on stainless steels. The results obtained could compare the properties of the uncoated 316L stainless steel substrate material and the TiO<sub>2</sub> coated material. The structure and morphology of the substrate and the coating were analyzed using scanning electron microscopy and atomic force microscopy. The physical and chemical properties of the material were determined by potentiodynamic method and the corrosion resistance of the material was observed. Moreover, a study showing the improvement of tribological properties of the coated materials was carried out.

**Słowa kluczowe:** TiO<sub>2</sub>, tlenek tytanu, PVD, metoda MSPVD, stal 316, tribologia, odporność na korozję, morfologia

## 1. WSTĘP

Stale nierdzewne są popularną grupą materiałów metalowych stosowanych w przemyśle. Stale te ze względu na bardzo dobrą odporność korozyjną i dobre właściwości mechaniczne znalazły zastosowanie w inżynierii biomedycznej, przestrzeni publicznej i przemyśle spożywczym. Największą popularnością wśród naukowców oraz przedsiębiorców cechuje się stal 316L ze względu na dobrą biokompatybilność, która umożliwia jej zastosowanie w przemyśle biomedycznym (np. na implanty) [1].

Stal 316L zalicza się do grupy stali nierdzewnych o niskim stężeniu węgla (<0,03% C) oraz wysokiej zawartości Cr (16-18%) i Ni (10-14%), poprawiających odporność na wysokotemperaturowe utlenianie oraz korozję naprężeniową. Materiał ten zawiera również Mo (2-3%), który zwiększa wytrzymałość na pełzanie i przeciwdziała kruchości odpuszczania [2].

Tlenek tytanu  $TiO_2$  jest popularnym biomateriałem, stosowanym jako powłoka materiałów biomedycznych do polepszenia własności biokompatybilności i sterylności implantów medycznych, narzędzi chirurgicznych i sprzętu klinicznego [3,4].  $TiO_2$  jest również głównym materiałem do produkcji powierzchni superhydrofobowych ze względu na nietoksyczność, stabilność chemiczną w środowisku otoczenia oraz niewielki koszt [5,6]. Ponadto  $TiO_2$  znajduje zastosowania w takich dziedzinach jak fotowoltaika, optyka oraz tlenek ten stosuje się do wytwarzania powłok przeciwzuzyciowych oraz struktur elektrochromowych.  $TiO_2$  może również służyć do wytwarzania powłok dekoracyjnych w jubilerstwie, motoryzacji oraz architekturze [7].

Technologia PVD umożliwia osadzanie większości metali i ich związków na materiałach w celu utworzenia cienkich powłok o niskim obciążeniu termicznym podłoża [8]. Powłoki te charakteryzują się dobrą przyczepnością do podłoża. W przeciwieństwie do powłok osadzanych zanurzeniowo bądź chemicznie, technologia PVD umożliwia wytworzenie powłoki o ustalonym składzie z wysoką czystością wytworzenia, dostosowując tym samym mikrostrukturę i własności mechaniczne oraz tribologiczne powłoki [9].

Powłoki osadzone fizycznie z fazy gazowej (PVD) to przykłady popularnego procesu modyfikacji powierzchni stosowane w przemyśle biomedycznym [10]. Fizyczne osadzanie z fazy gazowej wzbudziło w ostatnich latach znaczne zainteresowanie, ze względu na możliwość osadzania gęsto usieciociowanych i zwartych powłok, co prowadzi do lepszych właściwości chemicznych i mechanicznych. Ta technika pozwala uzyskać szeroką gamę powłok o wysokiej odporności na zużycie i środki chemiczne, przy stosunkowo niskich kosztach i dzięki łatwemu procesowi osadzania [11].

Celem niniejszej pracy jest zbadanie wpływu warunków osadzania powłoki  $TiO_2$  z zastosowaniem metody rozpylania magnetronowego MS-PVD na podłożu ze stali austenitycznej 316L na strukturę i własności pokrytych materiałów.

## 2. MATERIAŁ DO BADAŃ

Materiałem do badań w niniejszej pracy była stal nierdzewna 316L, na którą naniesiono jednowarstwową powłokę  $TiO_2$  z podwarstwą czystego tytanu metodą MSPVD. Próbki o średnicy 14 mm i wysokości ok. 5 mm wyszlifowano na tarczach o gradacji od 500 do 1200 oraz wypolerowano z użyciem zawiesiny diamentowej o wielkości ziarna 1  $\mu m$ . Na koniec próbki wypłukano w płuczce ultradźwiękowej oraz poddano suszeniu podmuchem sprężonego powietrza.

Proces osadzania powłok przeprowadzono na urządzeniu Kurt J Lesker PVD 75. W procesie zastosowano argon i tlen jako gazy procesowe. Jednym z parametrów była temperatura osadzania wynosząca 100°C. Moc magnetronu wynosiła 200 W, a polaryzacja podłoża BIAS -140 V. W pierwszej kolejności osadzono podwarstwę czystego tytanu w czasie 1 minuty. Następnie osadzono warstwę tlenku tytanu w dwóch wariantach czasowych: przez 90 minut i 150 minut. Grubości powłok są zależne od czasu jej nanoszenia.

W czasie badań zastosowano następujący sposób oznaczenia próbek: 0St – próbka niepowlekanego stalowego podłoża, P90St – próbka z naniesioną powłoką TiO<sub>2</sub> przez 90 minut na stal 316L oraz P150St – próbka z naniesioną powłoką TiO<sub>2</sub> przez 150 minut na stal 316L.

### **3. METODYKA BADAŃ**

#### **3.1. Badania podłoża**

Do zbadania podłoża wykorzystano mikroskop metalograficzny ZEISS Axio Observer Z1m. Na przygotowanych uprzednio zglądach metalograficznych dokonano analizy struktury stali 316L. Przygotowanie powierzchni próbek samego podłoża przeznaczonych do późniejszej analizy mikroskopowej polegało na wykonaniu zglądów metalograficznych. Zainkludowany materiał poddano szlifowaniu stopniowo zmniejszając ziarnistość tarcz oraz polerowaniu na tarczach polerskich. Na koniec próbki ze stali 316L zostały wytrawione stosując wodę królewską.

#### **3.2. Badanie z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego**

Skaningowy mikroskop elektronowy Zeiss Supra 35 został wykorzystany w celu zbadania składu chemicznego, do obserwacji morfologii nałożonej powłoki TiO<sub>2</sub> na stal 316L, a także obserwacji uszkodzeń powstałych po badaniu korozji i tribologii. Do obrazowania badanych powierzchni wykorzystano detekcję elektronów wtórnych (SE).

#### **3.3. Badania topografii powierzchni powłok PVD**

Korzystając z mikroskopu sił atomowych AFM dokonano badania topografii powierzchni powłok PVD w trybie bezkontaktowym z zastosowaniem mikroskopu AFM firmy Park Systems XE-100. Badany obszar wynosił 1×1 μm.

#### **3.4. Badania odporności korozyjnej próbek**

Do badań odporności na korozję materiału zastosowano metodę elektrochemiczną – potencjodynamiczną. Stanowisko pomiarowe składało się z układu trójelektrodowego: próbki stanowiącej elektrodę badaną, elektrodę odniesienia oraz elektrodę pomocniczą wykonaną ze stali nierdzewnej mającej na celu wymuszenia w układzie przepływ prądu. Próbkę umieszczono w 150 ml roztworu NaCl 3,5% w temperaturze pokojowej. W pierwszej kolejności wyznaczono potencjał obwodu otwartego w warunkach bezprądowych, a następnie zarejestrowano krzywe polaryzacji próbki.

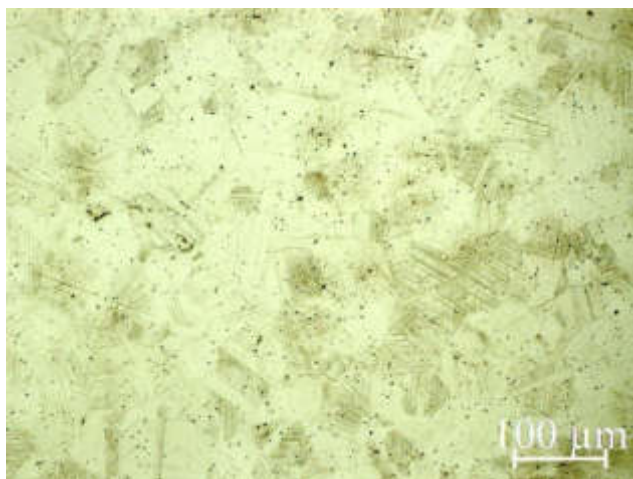
### 3.5. Badania tribologiczne

Badania odporności na zużycie wykonano na tribometrze firmy CSM Instruments w trybie ball-on-disc w temperaturze pokojowej. Jako przeciwpróbki zastosowano kulki WC-Co o średnicy 6 mm. Do przeprowadzenia badań wykorzystano takie parametry jak: średnica wytarcia wynosząca 5 mm, prędkość obrotowa 0,5 cm/s oraz siła  $F = 0,5$  N. Współczynnik tarcia rejestrowano w funkcji maksymalnej liczby cykli równej 500.

## 4. WYNIKI BADAŃ

### 4.1. Badania struktury podłoża

W pierwszej kolejności zbadano wykorzystane podłoże z zastosowaniem mikroskopu świetlnego. Celem badań mikroskopowych było ujawnienie mikrostruktury oraz wad stali 316L. Otrzymana struktura austenityczna przedstawiona jest na Rys. 1.

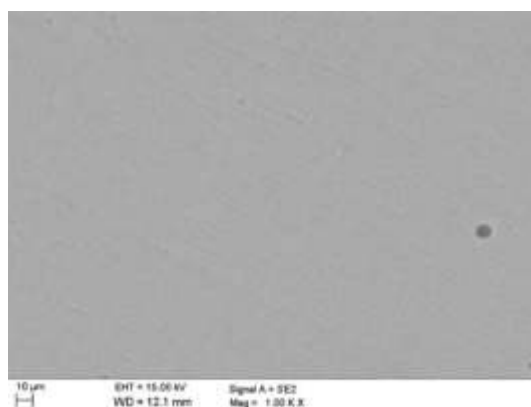


Rysunek 1. Podłoże próbki ze stali 316L, pow. 200X.

*Figure 1: 316L steel specimen substrate, mag. 200X.*

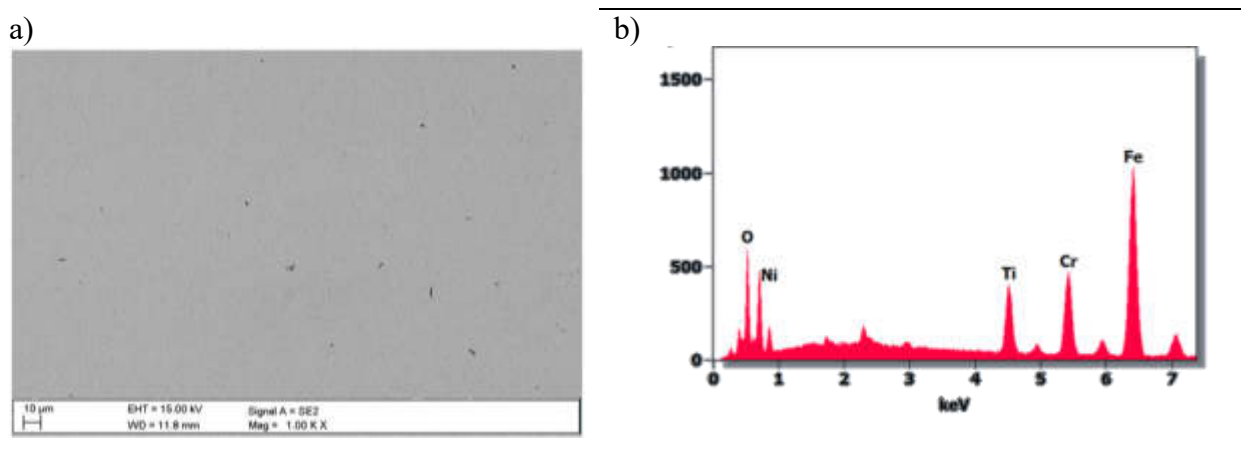
### 4.2. Badania z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego SEM

W celu analizy topografii powierzchni wykonano badania z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego. Wyniki badań przedstawiono na Rys. 2. Powłoka  $TiO_2$  na podłożu z stali 316L nałożona techniką MSPVD posiada nieporowatą i zwartą strukturę. Na powierzchni można dostrzec niewielkie wydzielania z podłoża, które są dostrzegalne ze względu na cienką powłokę. Dodatkowo widoczne są rysy na powierzchni powstałe podczas szlifowania i polerowania.



Rysunek 2. Topografia próbki stali 316L z naniesioną powłoką  $TiO_2$ .  
 Figure 2: Topography of 316L steel sample with  $TiO_2$  coating applied.

Analiza EDS składu chemicznego powłoki  $TiO_2$  z podwarstwą czystego tytanu metodą MSPVD potwierdziła obecność tytanu oraz tlenu. Dodatkowo na spektrogramie (Rys. 3b.) stwierdzono refleksy od pierwiastków Cr, Fe, Ni i Mo, które są głównym składnikiem podłoża. Ujawnienie ich wynika z niewielkiej grubości powłok, która jest mniejsza niż głębokość emisji charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego.

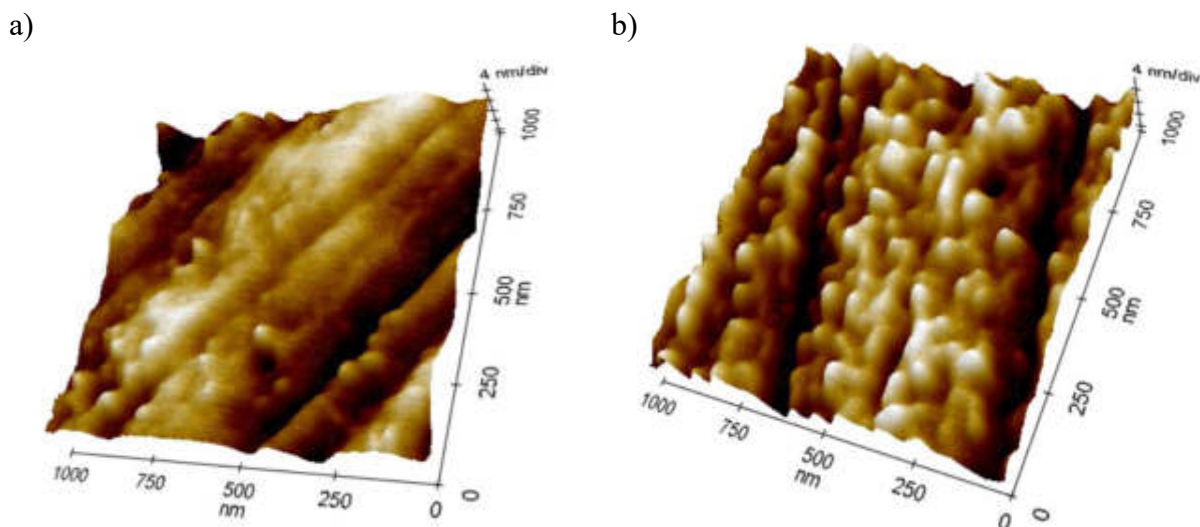


Rysunek 3. Morfologia powierzchni próbki powłoki  $TiO_2$  na podłożu ze stali 316L a) obraz SEM b) wykres widma EDS dla obszaru przedstawionego na zdjęciu (a).  
 Figure 3: Surface morphology of  $TiO_2$  coating sample on 316L steel substrate (a) SEM image and (b) EDS spectrum plot for the area shown in image (a).

#### 4.3. Badania morfologii próbki na mikroskopie AFM

Za pomocą mikroskopu sił atomowych AFM zbadano topografię powierzchni próbek napylnych magnetroneowo. Widoczne na rysunku 4 wyniki wykazują różnicę chropowatości powłok w zależności od czasu. Dla powłoki, której czas nanoszenia trwał 90 minut zaobserwowano mniejszą chropowatość i rozwinięcie powierzchni niż w przypadku powłoki napylanej przez 150 minut. Druga badana powłoka wykazała większą chropowatość, a nierówności sięgają 4 nm wysokości.





Rysunek 4. Morfologia badanych powłok  $\text{TiO}_2$  na podłożu z stali 316L dla dwóch użytych czasów nanoszenia: a) 90 minut, b) 150 minut. Badany obszar powierzchni próbki miał wymiary  $1 \times 1 \mu\text{m}$  dla obu przypadków.

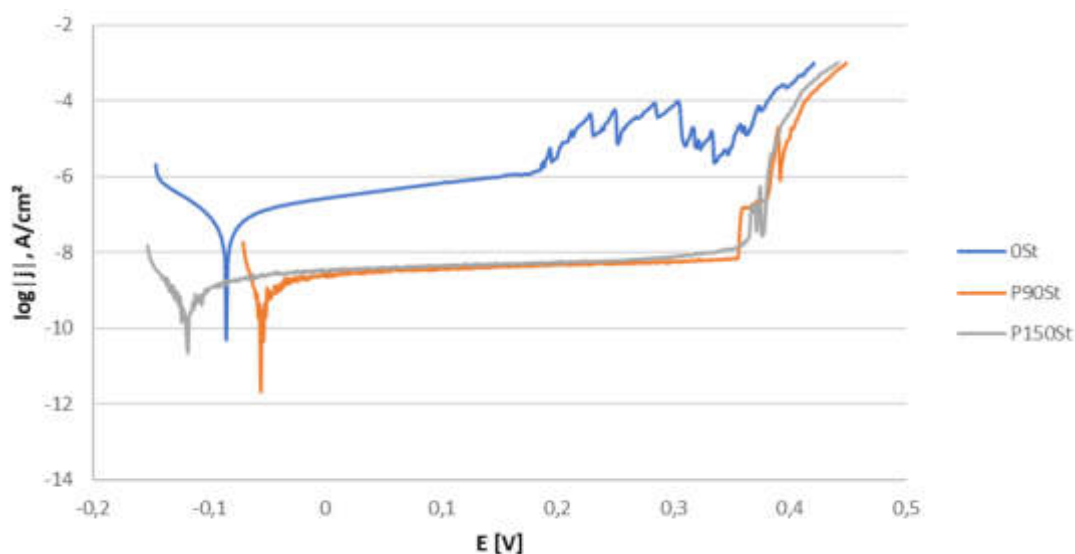
Figure 4: Morphology of the tested  $\text{TiO}_2$  coatings on 316L steel substrate for the two application times used: a) 90 minutes, b) 150 minutes. The tested area of the sample surface was  $1 \times 1 \mu\text{m}$  for both cases.

#### 4.4. Badanie odporności korozyjnej

Badając odporność na korozję próbki podłoża oraz próbek z powłoką otrzymano m.in krzywe polaryzacji świadczące o zachowaniu korozyjnego materiału. Za pomocą metody Tafela uzyskano wartości potencjału korozyjnego ( $E_{\text{kor}}$ ), gęstości prądu korozyjnego ( $I_{\text{kor}}$ ) oraz opór polaryzacji ( $R_p$ ). Wyniki badań odporności na korozję metodą potencjodynamiczną dla badanych materiałów umieszczono w Tabeli 1.

W ocenie odporności powierzchni na korozję analizuje się szczególnie gęstość prądu korozji, potencjał korozyjny oraz opór polaryzacyjny. Im gęstość prądu korozji jest mniejsza tym odporność na korozję wzrasta. W przypadku porównywania  $E_{\text{kor}}$  i  $R_p$  im wartości są większe tym materiał charakteryzuje się lepszą odpornością korozyjną.

Na podstawie uzyskanych wyników można zauważyć, że samo podłoże ma największą podatność na korozję wżerową w badanym roztworze. Nałożenie powłoki pozwoliło zwiększyć odporność powierzchni na korozję. Porównując wyniki dla dwóch wariantów czasowych nakładania powłoki, można dostrzec, że w przypadku zastosowania czasu 150 minut wartość  $I_{\text{kor}}$  wynosiła  $0,983 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$  i była najmniejsza. Dla powłoki P90St wartość prądu korozyjnego była większa równa  $1,70 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$  zatem była jednocześnie najmniej odporna na korozję z obu badanych powłok. Dodatkowo opór polaryzacji, dla próbki P150St jest najwyższy i wynosi  $9,49 \times 10^6 \Omega \times \text{cm}^2$  co również potwierdza lepszą odporność tej powłoki. Na podstawie wyników badań z gęstości prądu korozyjnego i oporu polaryzacyjnego stwierdzono, że powłoka P150St wykazuje mniejszą podatność na korozję wżerową, zatem charakteryzuje się największą odpornością na korozję.



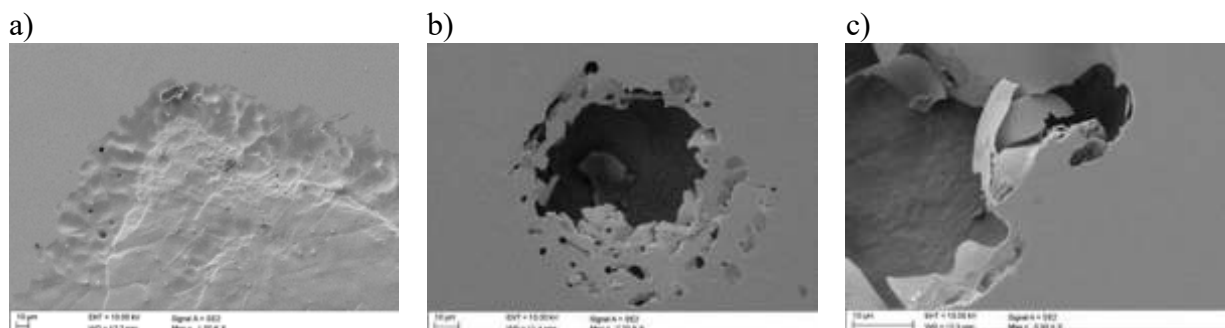
Rysunek 5. Krzywe polaryzacji dla stali 316L samego podłoża oraz dla powłoki  $\text{TiO}_2$  dla różnych wariantów czasowych.

Figure 5: Polarization curves for 316L steel substrate alone and for  $\text{TiO}_2$  coating for different time variants.

Tabela 1. Zestawieni wyników otrzymanych parametrów korozji z analizy Tafela dla badanych próbek.  
Table 1: Summary of the results of corrosion parameters obtained from Tafel analysis for the samples.

|        | $I_{kor}$ [ $\text{A}/\text{cm}^2$ ] | $E_{kor}$ [V]          | $R_p$ [ $\Omega \times \text{cm}^2$ ] |
|--------|--------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| 0St    | $83,3 \times 10^{-9}$                | $-9,29 \times 10^{-2}$ | $0,207 \times 10^6$                   |
| P90St  | $1,70 \times 10^{-9}$                | $-6,33 \times 10^{-2}$ | $2,36 \times 10^6$                    |
| P150St | $0,983 \times 10^{-9}$               | $-13,2 \times 10^{-2}$ | $9,49 \times 10^6$                    |

Badania mikroskopowe SEM pozwoliły na zaobserwowanie wżerów i uszkodzeń powstałych na skutek badań elektrochemicznych. Potwierdzono, że głównym mechanizmem korozji była korozja wżerowa. Zauważono, że powierzchnie próbek z nałożonymi powłokami wykazały większą odporność na korozję w odniesieniu do podłoża niepokrytego. Pomiar wżerów wykazały, że dla pierwszego wariantu czasowego wielkości wżerów były mniejsze niż dla 150 minut. Zdjęcia powstałych uszkodzeń można zaobserwować na Rys. 5.

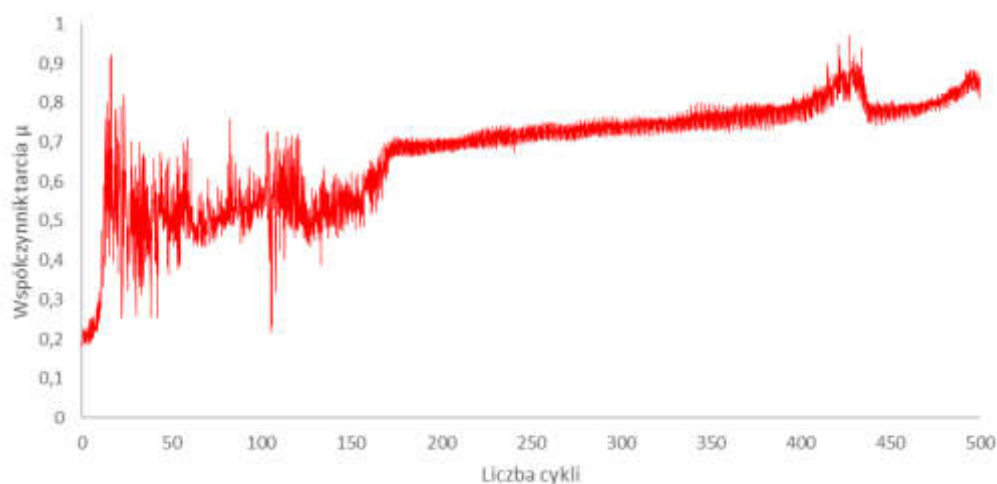


Rysunek 6. Obraz SEM morfologii po badaniu elektrochemicznym dla a) podłoża, b) dla powłoki  $\text{TiO}_2$  nanoszonej w czasie 90 minut, c) dla powłoki  $\text{TiO}_2$  nanoszonej w czasie 150 minut.

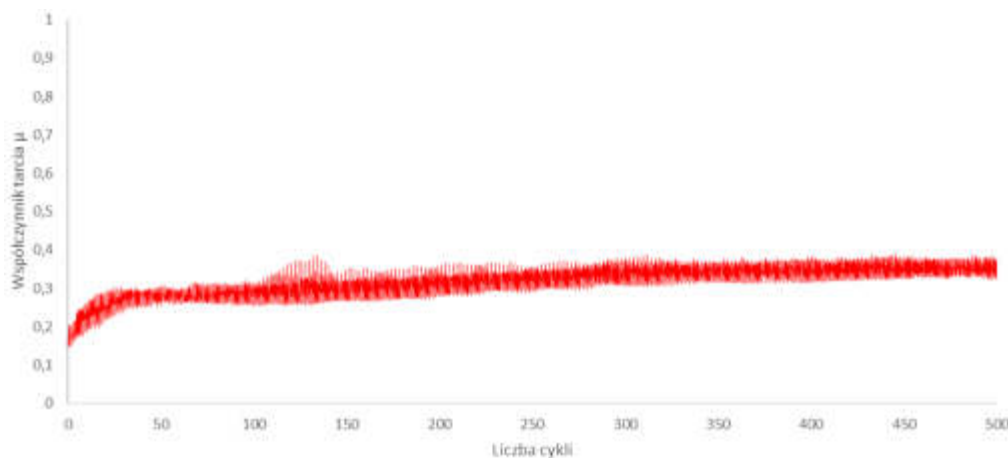
Figure 6: SEM image of morphology after electrochemical testing for (a) substrate, (b) for  $\text{TiO}_2$  coating applied at 90 minutes, (c) for  $\text{TiO}_2$  coating applied at 150 minutes.

#### 4.5. Badania tribologiczne

Wyniki badań odporności powierzchni za zużycie ściernie przedstawiono w postaci wykresów zależności współczynnika tarcia od liczby cykli (Rys. 7, 8). Zmiany współczynnika tarcia ustalono w zakresie 0-500 cykli. W przypadku badania podłoża, niepowlekanego materiału można zauważyć, że przy początkowych ok 170 cyklach wartości są bardzo zróżnicowane, skokowe sięgające  $0,8 \mu$ , następnie dochodzi do stabilizacji i współczynnik tarcia mieści się w granicach  $0,7-0,8 \mu$ . Otrzymane wartości są zgodne z danymi literaturowymi dla współczynnika tarcia stal – węgliku spiekane. Porównując otrzymane wyniki dla próbki z powłoką  $TiO_2$  osadzonych w czasie 150 minut, współczynnik tarcia zachowuje się stabilnie, a wartości oscylują się w zakresie  $0,2-0,3 \mu$ . Analizując wyniki próbki niepokrytej oraz próbki pokrytej wywnioskować można, że powłoka  $TiO_2$  obniżyła współczynnik tarcia, co wpływa na poprawę warunków kontaktu trybologicznego i odporność powierzchni na ścieranie w założonych warunkach testu

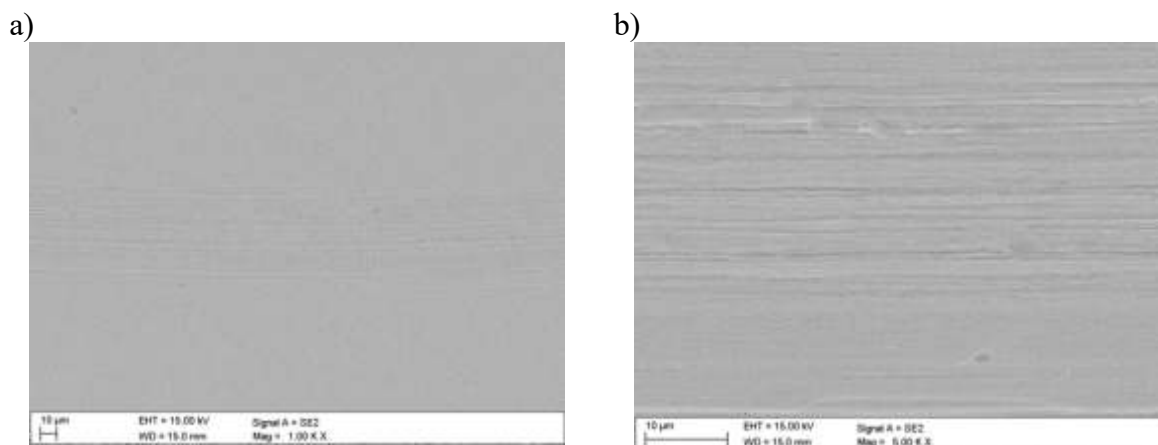


Rysunek 7 . Współczynnik tarcia w funkcji liczby cykli dla niepowlekanego stopu stali 316L.  
*Figure 7: Coefficient of friction as a function of number of cycles for uncoated 316L steel alloy.*

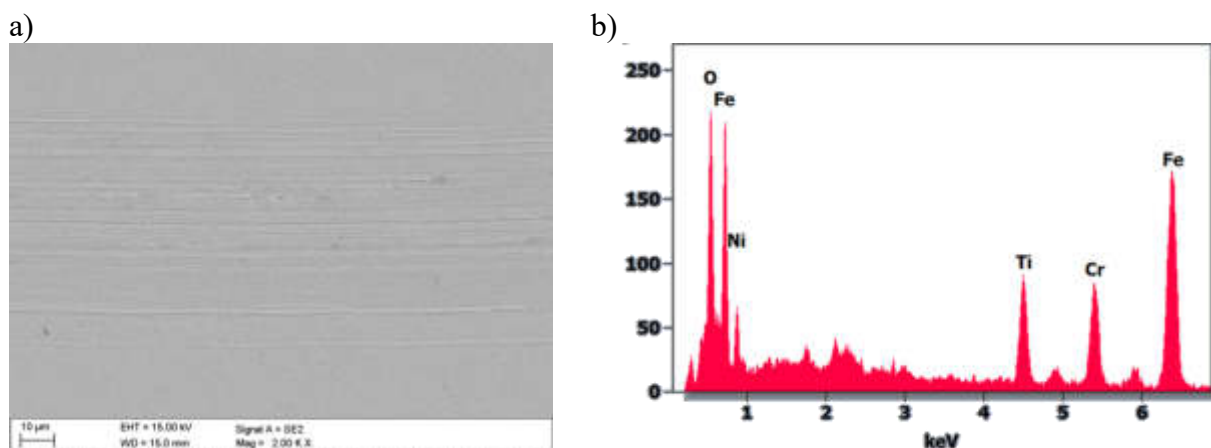


Rysunek 8. Współczynnik tarcia w funkcji liczby 500 cykli dla powłoki  $TiO_2$  osadzonej na stali 316L.  
*Figure 8: Coefficient of friction as a function of 500 cycles for  $TiO_2$  coating deposited on 316L steel.*

Dodatkowo wyniki badań tribologicznych obejmują również obserwacje mikroskopowe ścieżek zużycia. Na podstawie obserwacji wytarcia próbki P150St można stwierdzić, że powłoka  $TiO_2$  nie została przetarta do podłoża. Szerokość śladów ścieżek ścierania wyniosła ok.  $67 \mu m$ . Wykonano również analizę EDS potwierdzającą obecność tytanu należącego do powłoki. Występujące również refleksy od innych pierwiastków pochodzących z podłoża (Fe, Cr, Ni), a ich obecność na spektrum EDS świadczy o niskiej grubości badanej powłoki, mniejszej od głębokości ucieczki charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego.



Rysunek 9. Przykładowe obrazy SEM profilów wytarcia próbki ze stali 316L z powłoką  $TiO_2$ .  
Figure 9: Example SEM images of wipe profiles of a  $TiO_2$ -coated 316L steel sample.



Rysunek 10. Analiza EDS powierzchni próbki powłoki  $TiO_2$  po zbadaniu odporności na ścieranie a) obraz SEM oraz b) wykres widma EDS dla pierwszego obszaru przedstawionego na zdjęciu (a).  
Figure 10: EDS analysis of the  $TiO_2$  coating sample surface after abrasion resistance testing (a) SEM image and (b) EDS spectrum plot for the first area shown in image (a).

## 5. PODSUMOWANIE

Stale nierdzewne charakteryzują się bardzo dobrą odpornością korozyjną i dobrymi właściwościami mechanicznymi, m.in. wytrzymałością na rozciąganie w granicach 530-680 MPa oraz twardością w granicach 140-200 HV [12]. Dodatkowo stal 316L zyskała zainteresowanie naukowców i inżynierów ze względu na możliwość zastosowania jej w inżynierii biomedycznej. Zastosowanie coraz to nowszych technologii wytwarzania bądź powłok zwiększających biokompatybilność z organizmem ludzkim, stal 316L jest przedmiotem wielu nowoczesnych badań i publikacji.

Modyfikacja warstwy wierzchniej materiału poprzez nałożenie powłoki poprawiła jej odporność korozyjną oraz odporność na zużycie ściernie, co widoczne jest na przykładzie zrealizowanych badań.

Wykonanie badań odporności na korozję próbek podłoża oraz próbek z naniesioną powłoką, pozwoliło uzyskać krzywe polaryzacji, informujące o zachowaniu korodującego materiału. Na podstawie metody Tafela zinterpretowano oraz przeanalizowano wartości potencjału korozyjnego. W porównaniu do bioaktywnych powłok ceramicznych nakładanych na stal 316L, powłoka  $TiO_2$  wykazała się lepszą odpornością korozyjną. [13]

Podsumowując wykonane badania stwierdzono, że próbka napylna przez 150 minut wykazała lepsze własności niż próbka napylna w czasie 90 minut. Próbka napylna w dłuższym czasie uzyskała lepsze własności odporności na zużycie ściernie oraz wysoką odpornością korozyjną.

## 6. WNIOSKI

Na podstawie wykonanych badań sformułowano następujące wnioski:

- Z wykazanej różnicy w topografii powierzchni próbek napylnych magnetronowo stwierdzono, że powierzchnia napylna przez 150 minut wykazała większą chropowatość oraz bardziej rozwiniętą powierzchnię.
- Najwyższą odporność na korozję wykazał materiał z powłoką  $TiO_2$  napylny przez 150 minut. Niższa wartość prądu korozyjnego wykazała znaczną poprawę odporności na korozję materiału z powłoką  $TiO_2$  niż niepowlekaną próbkę. Zastosowanie dłuższego czasu pozwoliło na otrzymanie większej odporności w porównaniu z powłoką nanoszoną przez 90 minut.
- Osadzenie powłoki tlenku tytanu spowodowało zmniejszenie wartości współczynnika tarcia, co umożliwiło wpłynęło na poprawę odporności na ścieranie powierzchni. Materiał niepowlekaną charakteryzował się trzykrotnie większym współczynnikiem tarcia niż materiał, na który naniesiono powłokę, co wiąże się z mniejszą odpornością na ścieranie.

## PODZIĘKOWANIE

Niniejsze opracowanie powstało w ramach działań Studenckiego Koła Naukowego Badań Materiałów Inżynierskich „AtForce” działającego przy Katedrze Materiałów inżynierskich i Biomedycznych na wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

## LITERATURA

1. S. M. Emarati, M. Mozammel, „Efficient one-step fabrication of superhydrophobic nano-TiO<sub>2</sub>/TMPSi ceramic composite coating with enhanced corrosion resistance on 316L”, *Ceramics International*, Volume 46, Issue 2, 2020, Pages 1652-1661, ISSN 0272-8842, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.137>.
2. P. Wiśniewski, R. Sitek, D. Moszczyńska, J. Ciftci, J. Mizera „Microstructure and Mechanical Properties of Austenitic 316L Steel Samples Obtained by Selective Laser Melting”, *Frontier of Applied Plasma Technology*, Vol.13 No.1 January 2020
3. H.-f. WANG, X.-f. SHU, X.-y. LI, T. Bin „Photocatalytic activities of N doped TiO<sub>2</sub> coatings on 316L stainless steel by plasma surface alloying technique” *Trans. Nonferrous Metals Soc. China*, 22 (2012), pp. s120-s126
4. M. Jackson, W. Ahmed „Titanium Dioxide Coatings in Medical Device Applications, Surface Engineered Surgical Tools and Medical Devices” Springer New York (2007), pp. 49-63.
5. J. Lee, G. Jang, Y. Jun „Investigation and evaluation of structural color of TiO<sub>2</sub> coating on stainless steel” *Ceram. Int.*, 38 (2012), pp. S661-S664
6. H. Yaghoubi, N. Taghavinia, E.K. Alamdari „Self-cleaning TiO<sub>2</sub> coating on polycarbonate: surface treatment, photocatalytic and nanomechanical properties” *Surf. Coat. Technol.*, 204 (2010), pp. 1562-1568
7. L. Skowronski, A.A. Wachowiak, K. Zdunek, M. Trzcinski, M.K. Naparty, „TiO<sub>2</sub>-based decorative coatings deposited on the AISI 316L stainless steel and glass using an industrial scale magnetron”, *Thin Solid Films*, Volume 627, 2017, Pages 1-8, ISSN 0040-6090, <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.01.039>.
8. G. Bräuer, B. Szyszka, M. Vergöhl, R. Bandorf, „Magnetron sputtering – Milestones of 30 years”, *Vacuum*, Volume 84, Issue 12, 2010, Pages 1354-1359, ISSN 0042-207X, <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.12.014>.
9. W. Tillmann, L. Hagen, D. Stangier, N. F. Lopes Dias, J. Görtz, M. D. Kensity, „Lapping and polishing of additively manufactured 316L substrates and their effects on the microstructural evolution and adhesion of PVD CrAlN coatings”, *Surface and Coatings Technology*, Volume 428, 2021, 127905, ISSN 0257-8972, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127905>.
10. Aravind Vadiraj, M. Kamaraj, „Characterization of fretting fatigue damage of PVD TiN coated biomedical titanium alloys”, *Surface and Coatings Technology*, Volume 200, Issues 14–15, 2006, Pages 4538-4542, ISSN 0257-8972, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.03.036>.
11. S.A. Naghibi, K. Raeissi, M.H. Fathi, „Corrosion and tribocorrosion behavior of Ti/TiN PVD coating on 316L stainless steel substrate in Ringer's solution”, *Materials Chemistry and Physics*, Volume 148, Issue 3, 2014, Pages 614-623, ISSN 0254-0584, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.08.025>
12. M. Kłonica, “Analysis of geometric features of the surface 316L steel after different machining tools”, *Journal of Technology and Exploitation in Mechanical Engineering*, Vol. 2, no. 1, pp. 73–79, 2016, ISSN: 2451-148X (Online) DOI: 10.35784
13. P.P. Singh, K. Dixit, N. Sinha, “A sol-gel based bioactive glass coating on laser textured 316L stainless steel substrate for enhanced biocompatibility and anti-corrosion properties”, *Ceramics International*, 2022, ISSN 0272-8842, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.03.144>.

## Analiza rozkładu naprężeń oraz deformacji popychacza dźwigniowego w układzie rozrządu silnika spalinowego

A. Dziwis <sup>a</sup>, M. Bonek <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: amaddzi601@student.polsl.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: mirosław.bonek@polsl.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono analizę MES rozkładu naprężeń, odkształceń wraz z obrazem deformacji popychacza dźwigniowego silnika spalinowego pracującego w normalnych warunkach eksploatacyjnych. Do analizy geometrii popychacza wykorzystano program Solid Works. Symulacja komputerowa pozwoliła na określenie obszarów które narażone są na szczególną deformację w wyniku eksploatacji w warunkach użytkowania.

**Abstract:** This work shows FEM analysis of stress and deformation with combustion engine rocker arm issue in normal exploitation conditions. Simulation results were compared in terms of materials application. Solid Works program was used for geometry analysis. FEM simulation has supported definition of areas that are exposed to deformation as a result of exploitation.

**Słowa kluczowe:** popychacz, dźwigniowy, MES, rozrząd, deformacja, naprężenia.

### 1. WPROWADZENIE

Popychacz dźwigniowy (Rys. 1) to element układu rozrządu w silnikach spalinowych. Jego zadaniem jest transformacja ruchu obrotowego wałka rozrządu, poprzez krzywkę, na ruch liniowy w celu otwarcia bądź zamknięcia zaworu (dolotowego lub wylotowego). Wyróżnia się kilka rodzajów popychaczy [1]:

- popychacze szklankowe,
- popychacze dźwigniowe pośredni ustalony w kadłubie silnika,
- popychacze dźwigniowe ustalone na kompensatorze hydraulicznym



Rys. 1. Popychacze zaworowe ze sprężynami zaworowymi[2].

Fig. 1. Rocker arms with valve springs[2].

Istnienie kilku rodzajów popychaczy zaworowych wynika z różnych konstrukcji silników spalinowych (DOHC, OHV, SOHC). Umieszczenie tych elementów zależy również od tego, ile jednostka posiada cylindrów oraz ile zaworów przypada na jeden cylinder. Przykładowo jednostka w układzie DOHC, Zetec-E (1992-1998) o pojemności 1.8l posiada 4 cylindry (R4) oraz 16 zaworów (4 na cylinder, 2 dolotowe, 2 wydechowe). Układ 16V wymaga zastosowania dwóch wałków rozrządu, sprawia to, że pod pokrywą zaworową znajduje się 16 popychaczy (duża ilość) a budowa typu DOHC (Double Over-Head Camshaft) wyklucza zastosowanie lasek popychaczy (gdyż wałki z krzywkami znajdują się w głowicy) [4]. Dostyc popularne popychacze szklankowe są proste w budowie i oddziałują na nie bezpośrednio krzywka na wałku rozrządu. Popychacze dźwigniowe mogą być ustalone w kadłubie silnika lub na kompensatorze hydraulicznym. Różnica polega głównie na umiejscowieniu oraz sposobie transformacji ruchu obrotowego w liniowy. W pierwszym rodzaju, popychacz w zasadzie tylko transformuje wektor siły, ponieważ charakter ruchu został zmieniony przez łaskę popychacza która ma styczność z krzywkami.

W drugim typie, popychacz przenosi ruch z krzywki na zawór, gdyż ustalony jest (zazwyczaj) bezpośrednio pod wałkiem rozrządu. Istotnym problemem w eksploatacji popychaczy są warunki pracy silnika, które często są nieprawidłowe z racji złego użytkowania pojazdu. Zużycie ścierne występuje przede wszystkim na powierzchni styku popychacza z zaworem oraz krzywki z popychaczem. Możliwość pęknięcia korpusu popychacza występuje głównie wtedy, gdy luzy zaworowe są niewyregulowane (co również powoduje zużycie ścierne) oraz w przypadku zerwania ciągu rozrządu. Zerwanie paska klinowego powoduje rozszynchronizowanie się układu rozrządu oraz napędowego (wał korbowy, tłoki). W przypadku silnika kolizyjnego, czyli takiego, gdzie maksymalny zasięg ruchów tłoka pokrywa się z maksymalnym otwarciem zaworów, gdy dojdzie do zerwania ciągu rozrządu, tłoki zderzają się z zaworami, co powoduje ich zniszczenie. W wyniku kolizji zawory są wpychane do środka, co może spowodować zniszczenie popychacza. Omówienie takiego przypadku poważnej awarii,



ma na celu tylko pokazanie, że układ rozrządczy musi być dokładnie zsynchronizowany, co wymaga, by każdy element utrzymywał przez określony czas spójność wymiarową oraz kształtową. W żadnym przypadku popychacze nie są zaprojektowane, by wytrzymywać takie ogromne obciążenia, jak w przypadku zerwania paska rozrządu [6].

## 2. ZAŁOŻENIA MODELOWE

Badanym elementem jest korpus popychacza dźwigniowego bez rolki naciskowej (zaworowej) oraz gniazda pod laskę. Przyjęto obciążenie 454,8 N na miejsce mocowania gniazda laski. Wartość ta jest wynikiem współczynnika sprężystości oraz przemieszczenia podczas ściskania ( $29,6 \text{ N/mm} \times 8,62 \text{ mm} = 255,2 \text{ N}$ ) oraz obciążenia gniazda poprzez posuw laski popychacza (199,6 N) co daje finalnie 454,8 N. W warunkach otoczenia przyjęto temperaturę pokojową. Wartości te zostały wyznaczone eksperymentalnie i przyjęte do porównania [1].

## 3. WYMAGANIA PROJEKTOWE ELEMENTU

Popychacz zaworowy podczas eksploatacji musi spełniać pewne wymagania, by wytrzymywać cykle pracy w różnych warunkach eksploatacji (Tab.1). Dodatkowo element ten pracuje w dość szerokim spektrum cieplnym, czego skutkiem jest nieznaczna zmiana

wymiarów i geometrii. Między innymi dlatego po danym okresie eksploatacji wymagane jest regulowanie luzów zaworowych by uniknąć niepotrzebnych obciążeń, co może objawiać się nadmiernym stukaniem pod pokrywą silnika podczas jego pracy. Jest to o tyle ważne, iż element ten odpowiada za prawidłową synchronizację silnika podczas pracy, jego rozregulowanie skutkuje całkowitym zatrzymaniem pracy jednostki [5].

Tabela 1. Parametry popychacza w silniku napędzanym olejem napędowym

Table 1. Parameters of rocker arm in diesel engine

|   | Nazwa                       | Wartość             |
|---|-----------------------------|---------------------|
| 1 | Temperatura pracy           | -30 – 100°C         |
| 2 | Twardość                    | 70 HB               |
| 3 | Wytrzymałość na rozciąganie | 300 mm <sup>2</sup> |

## 4. DOBÓR MATERIAŁÓW

Stopy aluminium cechują się dobrą przewodnością cieplną, małą gęstością co wpływa na wykorzystanie w masywnych konstrukcjach, są odporne na wiele środowisk korozyjnych oraz dużą plastycznością. Stopy aluminium są często stosowane jako odlewy (bloki silników, korpusy urządzeń), zazwyczaj tam, gdzie ważna jest redukcja masy (automotive).

AA380.0-F jest to stop odlewniczy wykorzystywany do produkcji elementów maszyn. Jest bardzo pożądany ze względu na łatwość obróbki maszynowej (frezowanie, toczenie). Posiada odpowiednie parametry materiałowe które pozwalają na użycie go w układach ruchomych, działających pod obciążeniem o wysokim stopniu odpowiedzialności (Tabela 2,3).

Tabela 2. Składy stopu AA380.0-F

Table 2. AA380.0-F alloy composition

|       |   |             | Cu          | Si          | Mg    | Zn    | Fe          | Mn          | Ni    | Sn    | Pb    | Ti    | Al |
|-------|---|-------------|-------------|-------------|-------|-------|-------------|-------------|-------|-------|-------|-------|----|
| Type8 | 1 | ALDC<br>8.1 | 3.0-<br>5.0 | 5.0-<br>7.0 | <0.3  | <1.8  | <0.9        | 0.2-<br>0.6 | <0.3  | <0.1  | <0.2  | <0.2  | x  |
|       | 2 | ALDC<br>8.2 | 3.0-<br>5.0 | 5.0-<br>7.0 | <0.03 | <0.03 | 0.3-<br>0.6 | 0.2-<br>0.6 | <0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.03 | x  |

Tabela 3 Własności stopu AA380.0-F

Table 3. AA380.0-F properties

| Własność                         | Wartość | Jednostki         |
|----------------------------------|---------|-------------------|
| Wsp. sprężystości                | 2000    | N/mm <sup>2</sup> |
| Wsp. Poissona                    | 0.33    | n.d               |
| Wsp. Naprężenia ścinającego      | 195     | N/mm <sup>2</sup> |
| Masa właściwa                    | 2760    | Kg/m <sup>3</sup> |
| Wytrzymałość na rozciąganie      | 318     | N/mm <sup>2</sup> |
| Granica plastyczności            | 159     | N/mm <sup>2</sup> |
| Współczynnik przewodzenia ciepła | 109     | W/(m*K)           |
| Ciepło właściwe                  | 1386    | J/(kg*K)          |

Stop C45 należy do rodzaju stali jakościowych, które przeznaczone są do ulepszenia i hartowania. Wykorzystywany jest w średnio obciążonych elementach maszyn jak: wały, tarcze, śruby, noże, dźwignie, piasty kół, wirniki. Hartowanie powierzchniowe pozwala uzyskać twardość rzędu 55 HRC (Tabela 4,5).

Tabela 4 Skład stopu C45

Table 4. C45 alloy composition

| C        | Mn      | Si      | P     | S     | Cr    | Ni    | Mo    | Cu    |
|----------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.42-0.5 | 0.5-0.8 | 0.1-0.4 | <0.04 | <0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.01 | <0.03 |

Tabela 5 Własności stopu C45

Table 5. C45 alloy properties

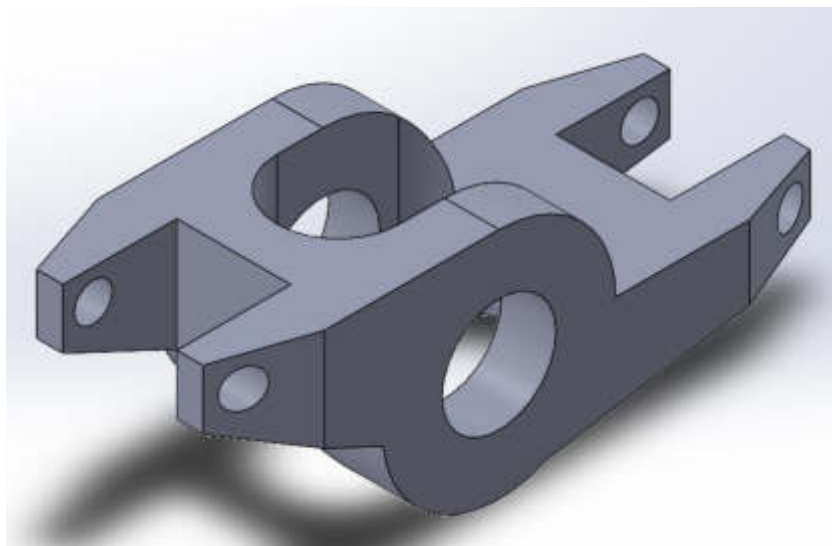
| Własność                    | Wartość | Jednostki         |
|-----------------------------|---------|-------------------|
| Wsp. sprężystości           | 210000  | N/mm <sup>2</sup> |
| Wsp. Poissona               | 0.28    | n.d               |
| Wsp. Naprężenia ścinającego | 79000   | N/mm <sup>2</sup> |
| Masa właściwa               | 7800    | Kg/m <sup>3</sup> |

|                                  |     |                   |
|----------------------------------|-----|-------------------|
| Wytrzymałość na rozciąganie      | 750 | N/mm <sup>2</sup> |
| Granica plastyczności            | 580 | N/mm <sup>2</sup> |
| Współczynnik przewodzenia ciepła | 14  | W/(m*K)           |
| Ciepło właściwe                  | 440 | J/(kg*K)          |

## 5. MODEL CAD

W celu przeprowadzenia symulacji naprężeń wykonano trzy modele popychacza (Rys. 2):

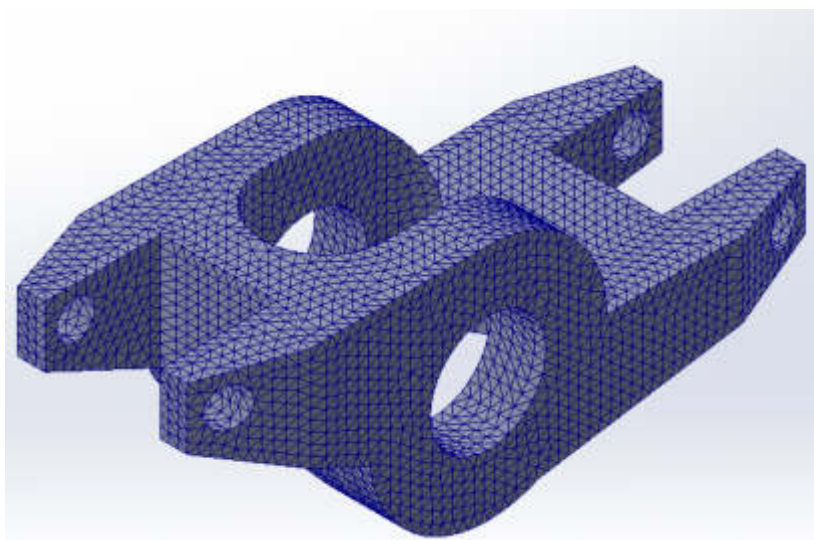
- I – stop AA380.0-F z ostrymi krawędziami;
- II – stop AA380.0-F z wyoblonymi krawędziami;
- III – stop C45 z wyoblonymi krawędziami.



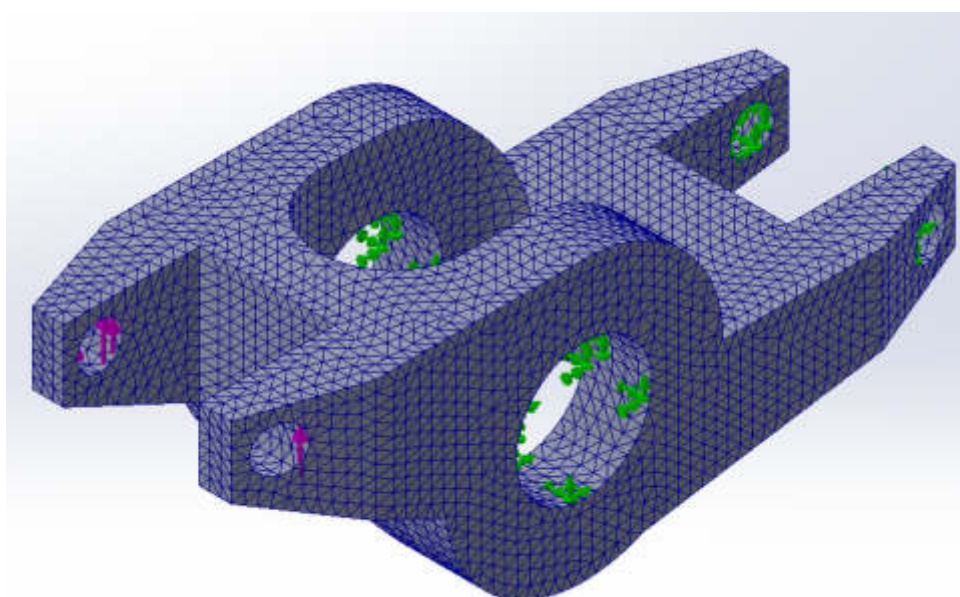
Rys.2 Model popychacza z ostrymi krawędziami  
*Figure 2 Rocker arm models with sharp edges*

## 6. WARUNKI BRZEGOWE

Po wykonaniu modeli geometrycznych naniesiono na nie siatkę elementów skończonych (Rys. 3) oraz założono warunki brzegowe, tj. odebranie stopni swobody w miejscach mocowania oraz przyłożenie sił mających odzwierciedlać warunki pracy elementu. Przyłożona siła miała wartość 450 N (Rys. 4)



Rys. 3 Model z nałożoną siatką elementów skończonych

*Fig. 3 Model with finite element mesh*

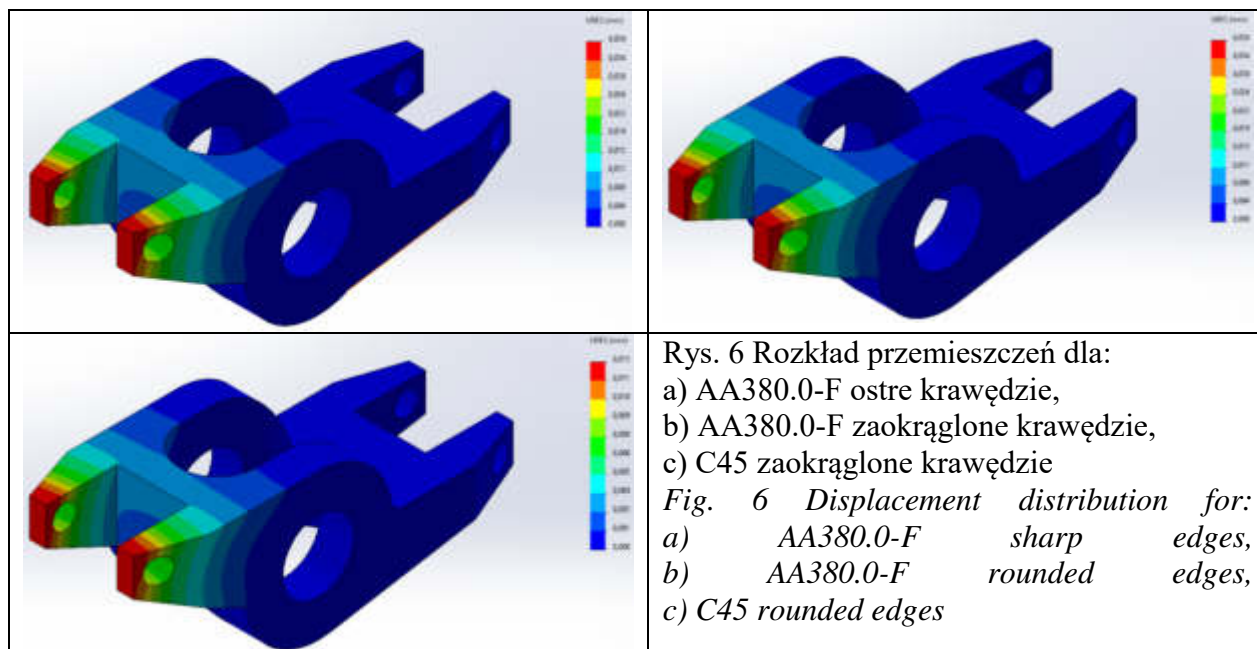
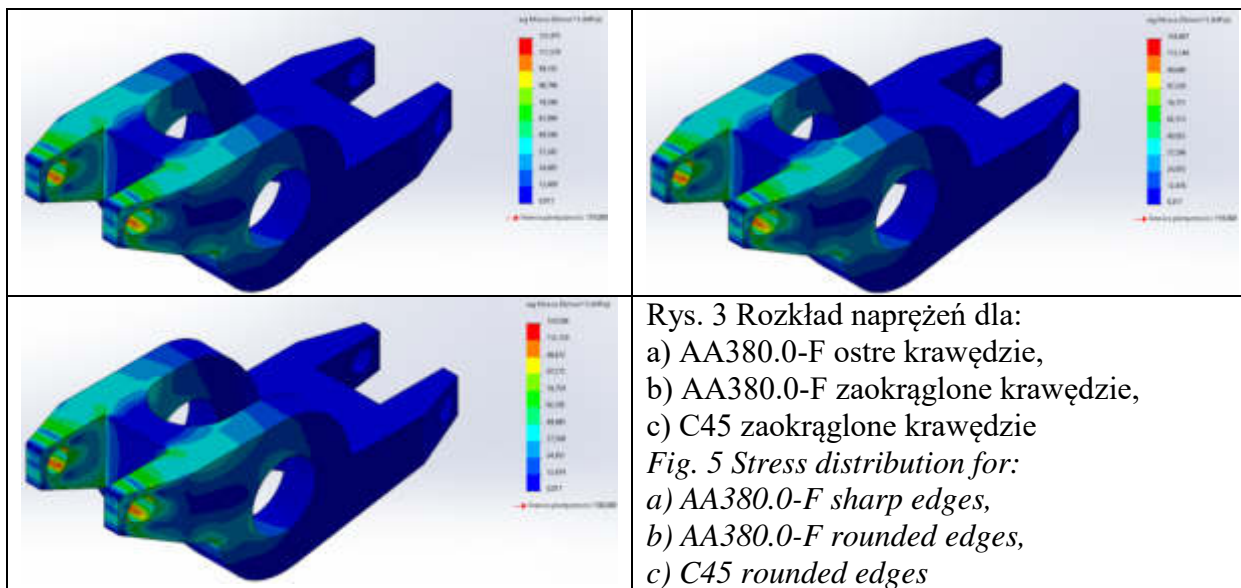
Rys. 2 Model geometryczny z nałożonymi warunkami brzegowymi

*Fig. 4 Geometric model with boundary conditions*

## 7. ANALIZA WYNIKÓW

Otrzymane wyniki naprężeń, przemieszczeń i odkształceń występujących w popychaczu zaworów silnika spalinowego przedstawiono na rysunkach 5-7. Największą wartość naprężeni otrzymano dla popychacza wykonanego ze stopu aluminium AA380.0-F o zaokrąglonych krawędziach których wartość wynosiła 124,607 MPa (Rys. 5). W przypadku przemieszczeń najniższe wartości otrzymano dla popychacza o zaokrąglonych krawędziach wykonanego ze stali C45 (Rys. 6), dla tego popychacza otrzymano również najniższe wartości odkształceń

(Rys.7). Maksymalne wartości otrzymanych wyników symulacji komputerowej zestawiono w tabeli 6.



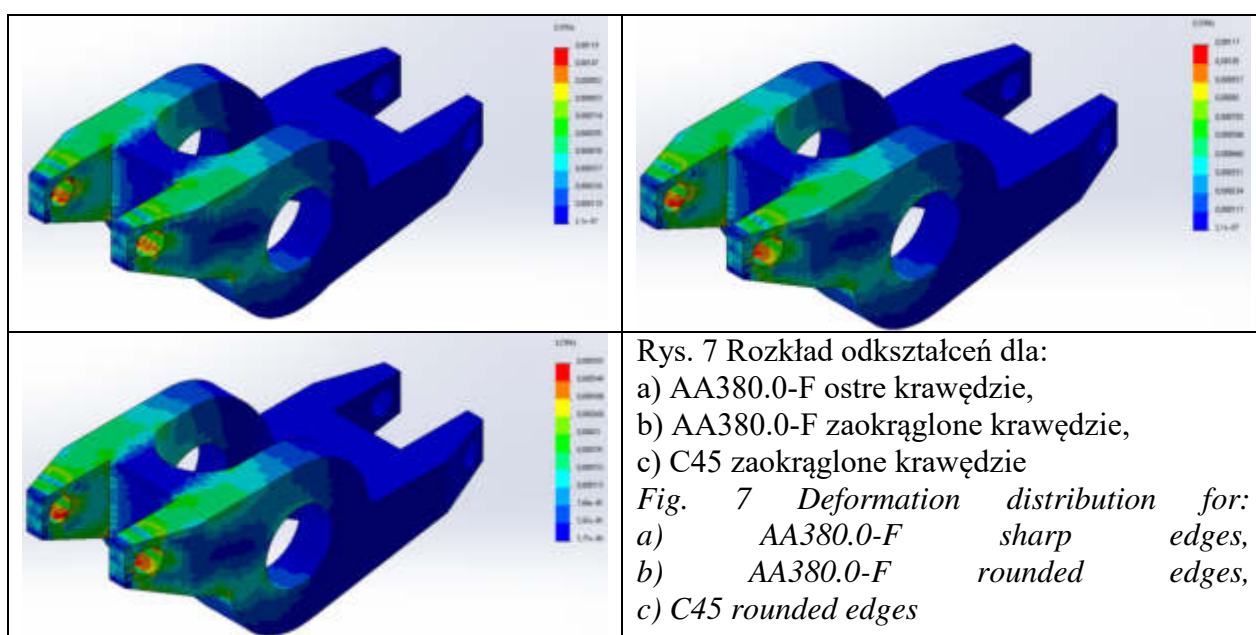


Tabela 6 Zestawienie najwyższych wartości otrzymanych dla poszczególnych modeli

Table 6 List of maximum values of stress, displacement and deformation for each model

| Model                           | Naprężenie [MPa] | Przemieszczenie [mm] | Odkształcenie |
|---------------------------------|------------------|----------------------|---------------|
| AA380.0-F ostre krawędzie       | 123,975          | 0,038                | 0,00119       |
| AA380.0-F zaokrąglone krawędzie | 124,607          | 0,038                | 0,00117       |
| C45 zaokrąglone krawędzie       | 124,586          | 0,013                | 0,000383      |

## 8. PODSUMOWANIE

Na podstawie symulacji komputerowej stwierdzono, że:

- Najsłabszym miejscem zamodelowanego popychacza jest obszar mocowania czaszy łaski popychacza,
- Zastosowanie zaokrągleń w przypadku popychaczy wykonanych ze stopów aluminium nie spowodowało znaczących zmian w rozkładzie naprężeń, przemieszczeń i odkształceń,
- Zastosowanie stali C45 zmniejsza wartości przemieszczeń i odkształceń w popychaczu w porównaniu z zastosowaniem stopu aluminium AA380.0-F,
- Zastosowane materiały nie miały znaczącego wpływu na wartości naprężeń występujących w popychaczu.

## LITERATURA

1. M. Bernhard, S. Dobrzyński E., Loth, „Silniki samochodowe”, WKŁ, Warszawa, 1980.
2. <http://pks.olawa.pl/stacja-obslugi-pojazdow/>

3. [workshop-manuals.com/ford/focus\\_1999\\_08.1998-12.2004/mechanical\\_repairs/3\\_powertrain/303\\_engine/303-01b\\_engine\\_1.6l\\_zetec-e\\_\(zetec\)-1.8l\\_zetec-e\\_\(zetec\)-2.0l\\_zetec-e\\_\(zetec\)/specifications/](http://workshop-manuals.com/ford/focus_1999_08.1998-12.2004/mechanical_repairs/3_powertrain/303_engine/303-01b_engine_1.6l_zetec-e_(zetec)-1.8l_zetec-e_(zetec)-2.0l_zetec-e_(zetec)/specifications/)
4. [zssplus.pl/publikacje/publikacje39.htm](http://zssplus.pl/publikacje/publikacje39.htm)
5. F. Rawski, „Mechanik silników spalinowych”. WSiP, Warszawa 1992
6. T. Rychter, „Mechanik pojazdów samochodowych”, WSiP, Warszawa 2006.



## **Analiza rozkładu naprężeń, przemieszczeń oraz odkształcenia w uchwycie narciarskim.**

R. Dziwis <sup>a</sup>, W. Kwaśny <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email: matekul207@student.polsl.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych,

email: waldemar.kwasny@polsl.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono analizę MES rozkładu naprężeń, przemieszczeń oraz odkształcenia powstałe w wyniku obciążenia uchwytu narciarskiego w zależności od zastosowanego materiału takiego jak: stal nierdzewna, polimer, stop aluminium. Analizę przeprowadzono przy użyciu oprogramowania SOLIDWORKS. Określono miejsca o najwyższej wartości naprężeń i przemieszczeń oraz wartość siły krytycznej przy której następuje odkształcenie elementu.

**Abstract:** The work shows a MES analysis of Huber - Mises stresses, displacement and buckling deformation developed during applying forces on a ski holder. Analysis was created for three types on materials an aluminium alloy, polymer and stainless steel. Analysis was created with SOLIDWORKS software. Places of maximum values of stress and displacement were defined as well as the force that causes the buckling deformation.



**Słowa kluczowe:** uchwyt narciarski, MES, rozkład naprężeń, rozkład przemieszczeń, deformacja przy wyboczeniu

### **1. WPROWADZENIE**

Z reguły wyjazd w góry oznacza kilkaset kilometrów drogi pokonywanej obciążonym po sam dach samochodem. Bagaże o niestandardowych wymiarach mogą przysporzyć nam trochę problemów, dlatego przed skrupulatnym zaplanowaniem kilkugodzinnej trasy należy zadbać o odpowiednie zapakowanie sprzętu w szczególności narciarskiego (Rys 1, 2). Przewożąc sprzęt narciarski w kabinie samochodu przy gwałtowniejszym hamowaniu narty mogą zranić pasażerów albo po prostu zniszczyć elementy kokpitu, a nawet wybić szybę. Ponadto, za granicą, np. w Austrii, jesteśmy narażeni na mandat za niebezpieczne przewożenie sprzętu. Najwygodniejszym i najbezpieczniejszym sposobem przewożenia narty oraz desek snowboardowych jest box dachowy. Niestety jest to bardzo kosztowny wydatek, dlatego wielu



amatorów białego szaleństwa decyduje się dużo niższy zakup, czyli specjalne uchwyty do przewozu nart albo snowboardu [1].

|   |  |
|---|--|
|    |          |
| <p>Rys. 1. Uchwyt narciarski zamontowany na dachu samochodu [2].<br/> <i>Fig.1 A ski holder mounted on the roof of the car [2].</i></p> | <p>Rys. 2. Uchwyty narciarskiego [3].<br/> <i>Fig.2 Picture of the ski holder [3].</i></p> |

## 2. ZAŁOŻENIA MODELOWE

Analizowanym elementem uchwyty narciarskiego jest korpus, w który są wkładane narty. Jest to przekrój prostokąta o wymiarach 145cm x 90 cm. Głównym założeniem jest przewóz nart oraz desek snowboardowych, dlatego na samym początku zostały założone dwa czynniki:

- ciężar nart,
- siła działającego wiatru na przemieszczający się pojazd.

Należy również pamiętać o mocowaniu uchwyty, tak aby podczas podróży nie ześlizgnął się lub nie został zdmuchnięty przez wiatr.

Analizowany element musi spełnić szereg kryteriów, aby mógł być wykorzystywany do przewozu sprzętu narciarskiego. Najważniejsze kryteria i własności zaprezentowane zostały w tablicy 1.

Tablica 1. Założenia, które musi spełnić projektowany element

Table 1. Assumptions that need to be fulfilled by the designed element

| Nazwa                          | Wartość   |
|--------------------------------|---|
| Wytrzymałość na rozciąganie    | 300 - 600 MPa   |
| Wytrzymałość na ściskanie      | 100 - 200 MPa   |
| Odporność na korozję           | Korozja atmosferyczna w temperaturze -25-50°C przy wilgotności 50-70% |
| Twardość                       | 40 - 100 HB   |
| Pojemność nart klasycznych     | 4 pary  |
| Pojemność nart carvingowych    | 4 pary  |
| Pojemność desek snowboardowych | 2 szt   |

### 3. DOBÓR MATERIAŁÓW

#### Stale nierdzewne austenityczne

Stale nierdzewne austenityczne stanowią najlepszy wybór z szerokiego zakresu stali odpornych na korozję ze względu na najwyższe wskaźniki odporności na korozję atmosferyczną, w wodzie morskiej a także w środowisku wielu kwasów i roztworów alkalicznych [4]. Skład chemiczny austenitycznych stali nierdzewnych przedstawiono w tabeli 2. A jej własności w tabeli 3. Obróbka cieplna stali nierdzewnych austenitycznych polega na przesycaaniu poprzez wygrzanie w temperaturach 1000°C–1200°C i chłodzeniu w wodzie. Stal uzyskuje strukturę austenityczną bez wydzielenia węglików rozmieszczających się głównie na granicach ziaren. Zapobiega to zubożeniu w chrom stref przy granicach ziaren, a tym samym korozji międzykrystalicznej [5].

**Tabela 2. Skład chemiczny wybranych austenitycznych stali nierdzewnych [5].**

*Table 2. Chemical composition of selected austenitic stainless steels [5].*

| %masy<br>Oznaczenie | C     | Si   | Mn   | P      | S      | N     | Cr            | Ni           |
|---------------------|-------|------|------|--------|--------|-------|---------------|--------------|
| X5CrNi18-10         | <0,07 | <1,0 | <2,0 | <0,045 | <0,015 | <0,11 | 17,5-<br>19,5 | 8,0-<br>10,5 |
| X2CrNi18-10         | <0,03 | <1,0 | <2,0 | <0,045 | <0,015 | <0,11 | 17-<br>19,5   | 8,5-<br>11,5 |

**Tabela 3. Wybrane własności stali nierdzewnych austenitycznych [5].**

*Table 3. Selected properties of austenitic stainless steels [5].*

| Własność<br>Oznaczenie | Re<br>[MPa] | Rm[MPa] | A[%]  | Twardość<br>[HB] | Gęstość[g/c<br>m3] | Moduł<br>Younga[GPa] |
|------------------------|-------------|---------|-------|------------------|--------------------|----------------------|
| X5CrNi18-10            | 230         | 540-750 | 45    | 215              | 7,9                | 200                  |
| X2CrNi18-10            | 270         | 550-760 | 30-40 | 230              | 7,9                | 190                  |

#### Stopy aluminium

Stopy aluminium to kolejne stopy metali zdające się spełniać kryterium materiału bardzo dobrego do wykonania osłony silnika motocykla. Współczesne stopy nie ustępują własnościami stalom charakteryzując się przy tym niemal trzykrotnie mniejszą gęstością. Odporne są także na korozję i niejako same zatrzymują proces utleniania pokrywając się szczelną warstwą tlenku glinu w procesie pasywacji zatrzymując propagację tego niekorzystnego zjawiska. Stopy aluminium charakteryzują się także niezdolnością do iskrzenia i niepalnością co z punktu widzenia bezpieczeństwa jest istotną własnością.

Stopy aluminium używane w szeroko rozumianym przemyśle możemy podzielić na stopy odlewnicze oraz stopy aluminium do obróbki plastycznej [4].

Odlewnicze stopy aluminium są stopami w których udział pierwiastków stopowych wynosi od 5 - 25%. Są to głównie stopy wieloskładnikowe zawierające najczęściej pierwiastki takie jak krzem, miedź, magnez, cynk i nikiel [4].

Stopy aluminium do obróbki plastycznej są stopami zawierającymi do 5% pierwiastków stopowych takich jak miedź, magnez, tytan, mangan, cynk i lit [4].

Stopy aluminium możemy sklasyfikować także na podstawie głównego składnika stopowego a nie tylko technologii wytwarzania. Zgodnie z tym kryterium wyróżniamy [4]:

## Materiały polimerowe

Materiały polimerowe charakteryzują się o mniejszą gęstością niż metale, ok.  $1,035 \text{ g/cm}^3$ . Są także dużo łatwiejsze w formowaniu (nie istnieje praktycznie żadne ograniczenie kształtu). W przemyśle motoryzacyjnym polimery są z dużym powodzeniem stosowane na elementy karoserii samochodów, motocykli czy innych pojazdów. Wadą większości materiałów polimerowych jest relatywnie niska temperatura topnienia i degradacji a także wysoki koszt (w przypadku ABS ok. 9500 zł/tona) zależny nierzadko od cen ropy naftowej. Charakteryzują się także znacznie niższą wytrzymałością niż metale czy kompozyty [6]. Własności materiałów polimerowych zestawiono w tabeli 4.

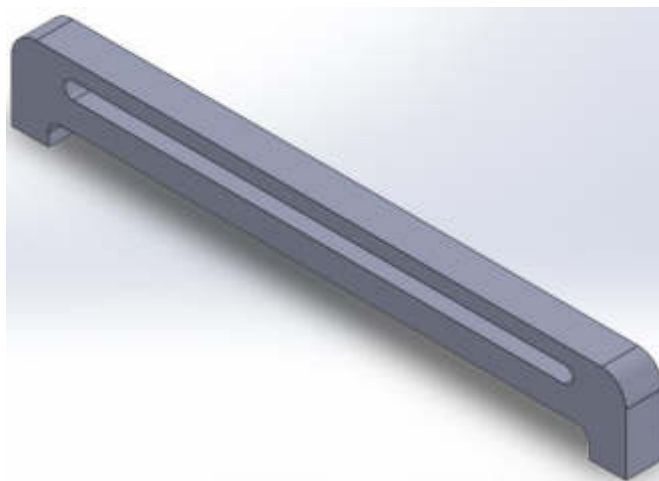
Tabela 4. Własności materiałów polimerowych [6].

Table 4. Properties of polymeric materials [6].

| Własność<br>Materiał | Gęstość<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | Re<br>[MPa] | A<br>[%] | Twardość<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Moduł<br>Younga<br>[MPa] | Udarność<br>[KJ/m <sup>2</sup> ] | Temp.<br>mięknienia<br>[°C] |
|----------------------|---------------------------------|-------------|----------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| ABS                  | 1,035                           | Min.<br>40  |          | 87                               | 1600                     | 42                               | 94                          |
| PPH                  | 0,91                            | 30          | 8        | 66                               | 1150                     | 50                               | 150                         |
| PC                   | 1,2                             | 65          | <6<br>0  | 110                              | 2300                     | -                                | 120                         |

## 4. MODEL GEOMETRYCZNY CAD

W celu przeprowadzenia analizy wytrzymałościowej i doboru optymalnego materiału na uchwyt narciarski wykonano model geometryczny przy użyciu oprogramowania SOLIDWORKS. Zamodelowany uchwyt został przedstawiony na rysunku 3.



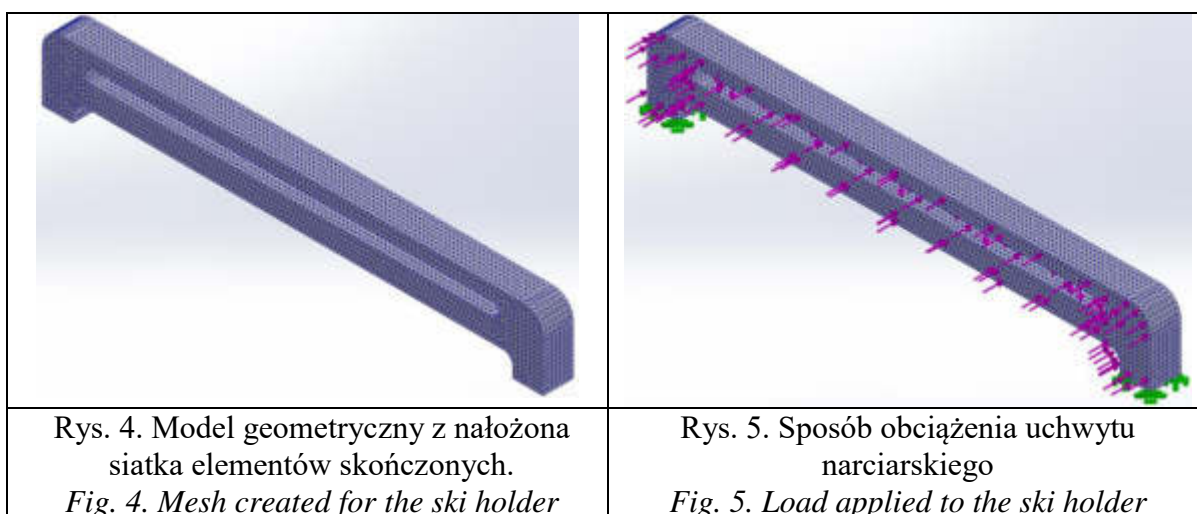
Rys. 3. Model CAD uchwytu narciarskiego

Fig. 3 CAD model of an ski holder

## 5. WARUNKI BRZEGOWE

W symulacji komputerowej przyjęto następujące warunki brzegowe (Rys. 5):

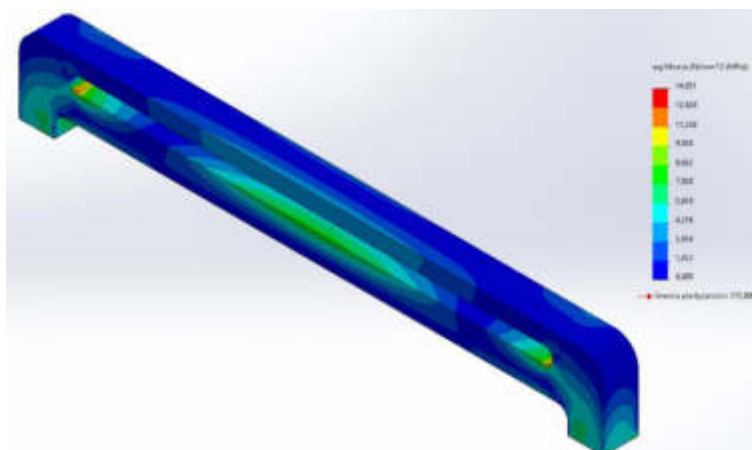
- w miejscach mocowania uchwytu do samochodu zostały odebrane wszystkie stopnie swobody
- w miejscu mocowania sprzętu narciarskiego przyłożono siłę 150 N działającą pionowo w dół;
- na płaszczyznę czołową przyłożono siłę 200N działającą w kierunku prostopadłym do powierzchni w celu imitacji siły wiatru;
- na model geometryczny uchwytu narciarskiego nałożono siatkę elementów skończonych (Rys. 4)



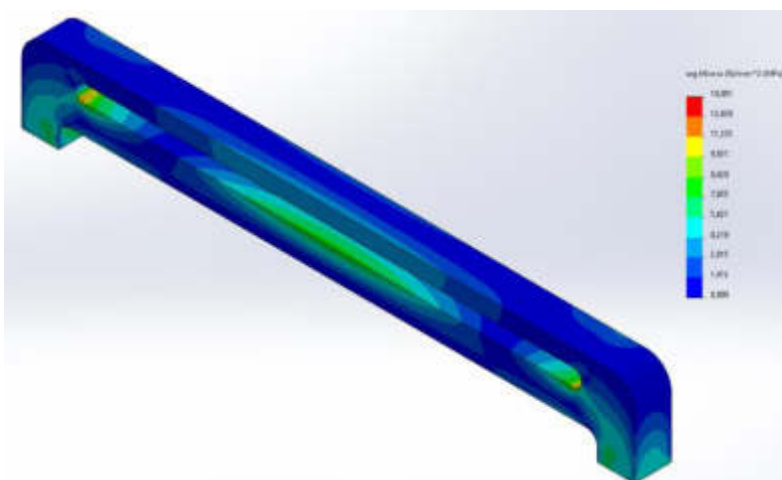
## 6. ANALIZA WYNIKÓW

### 6.1. Wyniki analizy numerycznej naprężeń

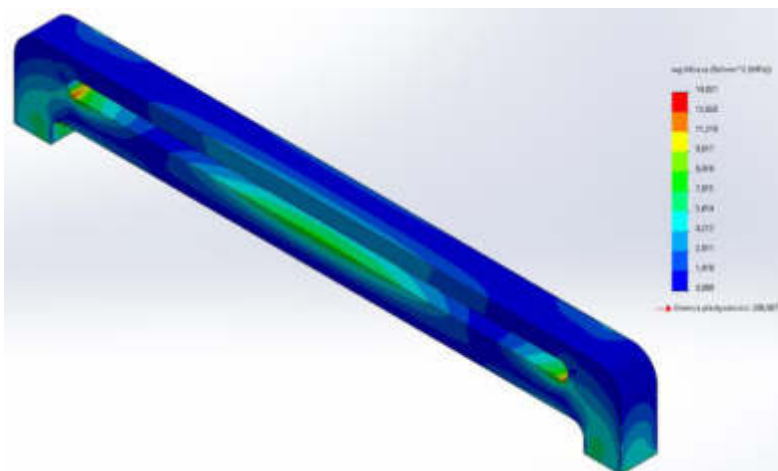
Analizę wykonano w oparciu o hipotezę Hubera-Misesa. Po obciążeniu elementu otrzymano wykresy naprężeń, których wartości wyrażono w MPa. Na rysunkach 6-8 przedstawiono rozkład naprężeń powstających podczas zadanego obciążenia. Na podstawie wyniku symulacji komputerowych stwierdzono, że największe naprężenia dla wszystkich analizowanych materiałów występują w miejscu połączenia podstawy bagażnika z ruchomą częścią górną bagażnika. W przypadku obciążania stopu aluminium wartość maksymalnych naprężeń wynosi 29556 Pa. Dla materiału ABS wartość maksymalna naprężeń wynosi 300773 Pa. Analiza stali 304 wykazała, że maksymalne naprężenia wynoszą 293017 Pa. Z wartości zawartych w tabelach 3, 5 i 7 wynika, że uwzględniając współczynnik bezpieczeństwa równy 1,2 w analizowanych koncepcjach warunek wytrzymałościowy  $\sigma_{red} < \sigma_{max}$  został spełniony, a otrzymane wyniki dają podstawy do uznania, iż każdy z analizowanych materiałów może być wykorzystany do wykonania elementu bagażnika dachowego.



Rysunek 6. Rozkład naprężeń zredukowanych wg. Hubera-Misesa dla stopu aluminium  
*Figure 6. Distribution of Huber-Mises stresses for aluminium alloy*



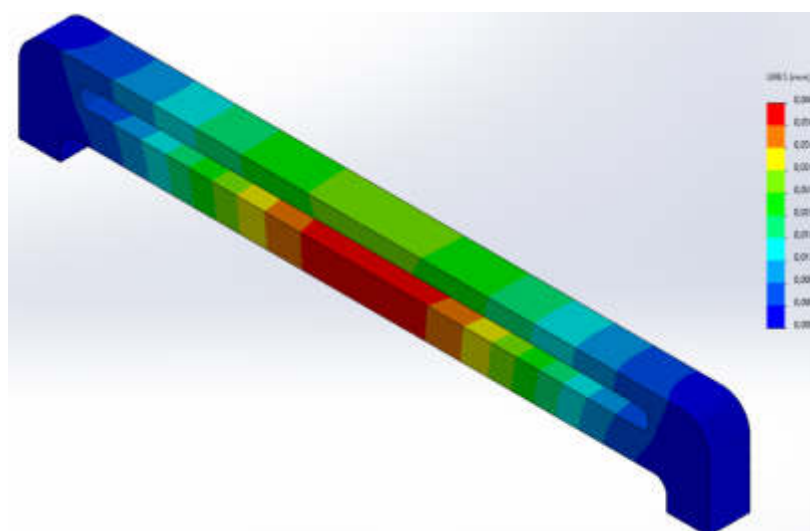
Rysunek 7. Rozkład naprężeń zredukowanych wg. Hubera-Misesa dla materiału ABS  
*Figure 7. Distribution of Huber-Mises stresses for ABS*



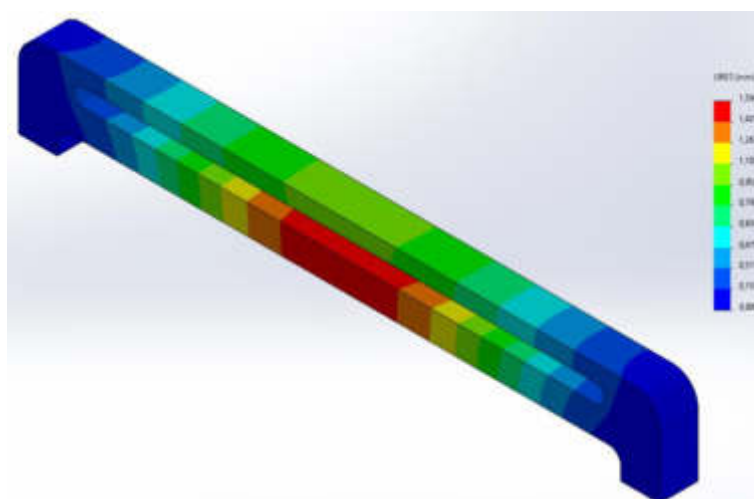
Rysunek 8. Rozkład naprężeń zredukowanych wg. Hubera-Misesa dla stali AISI 304  
*Figure 8. Distribution of Huber-Mises stresses for steel 304*

## 6.2. Wyniki analizy numerycznej przemieszczeń

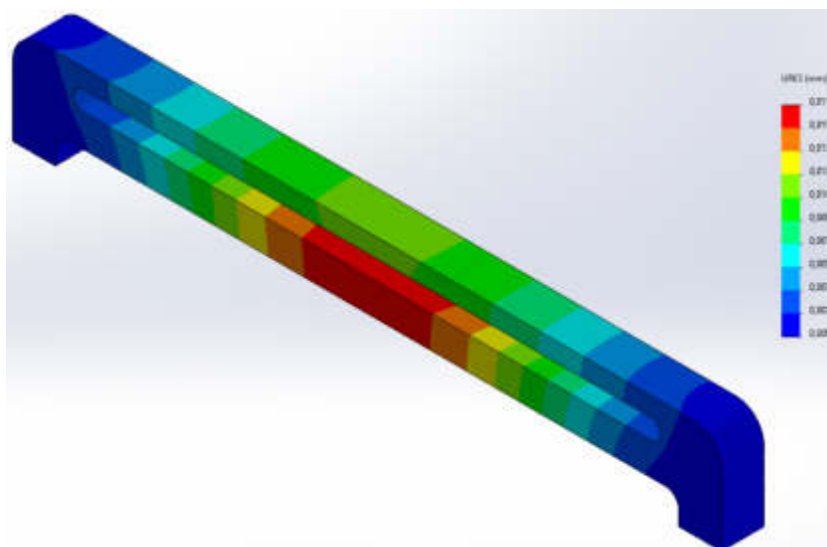
Kolejną przeprowadzoną symulacją było określenie wielkości przemieszczenia pod zadaniem obciążeniem i wygenerowanie wykresów przemieszczeń konstrukcji, które przedstawiono na rysunkach 9-11. W wyniku działania sił mogłoby dojść do niewielkiej zmiany geometrii modelu. Największe przemieszczenie w każdym przypadku wystąpiło w połowie długości górnego ramienia bagażnika i wyniosło kolejno dla stopu aluminium 0,0019 mm, dla ABS 0,057 mm oraz dla stali AISI 304 0,0007 mm. Przemieszczenia te są jednak niewielkie i przy takich wymiarach konstrukcji byłyby praktycznie niewidoczne gołym okiem.



Rysunek 9. Rozkład przemieszczeń dla stopu aluminium  
*Figure 9. Displacement distribution for aluminium alloy*



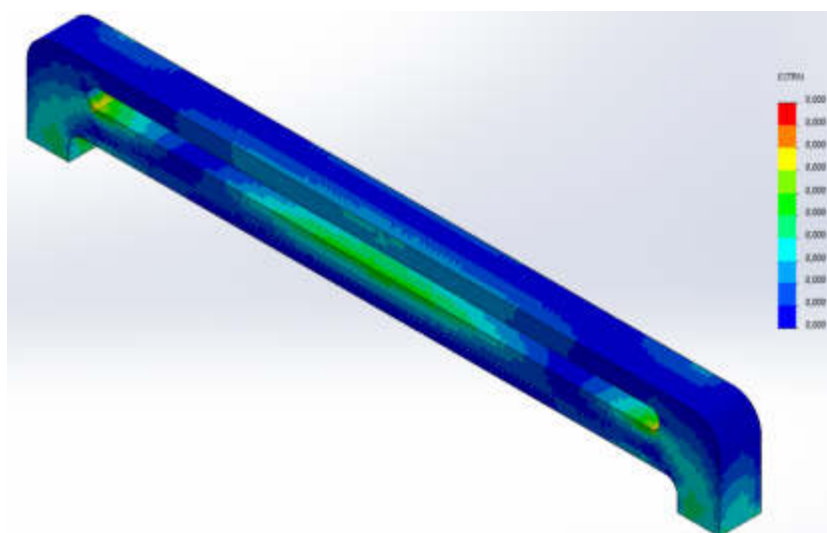
Rysunek 10. Rozkład przemieszczeń dla materiału ABS  
*Figure 10. Displacement distribution for ABS*



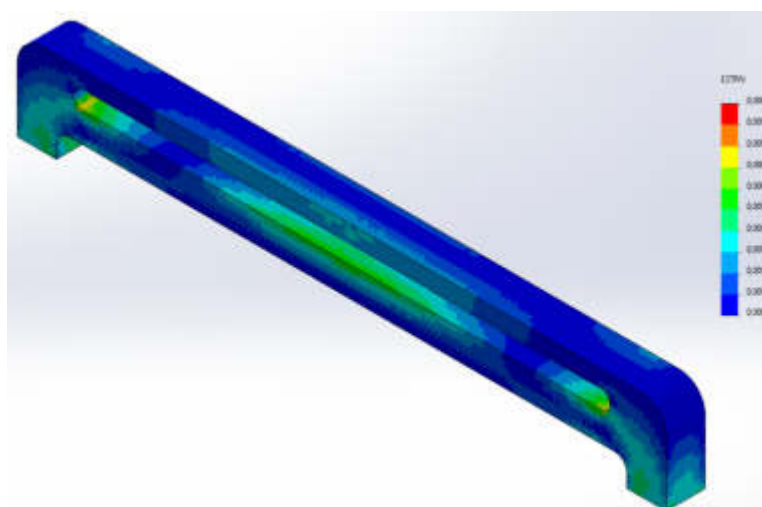
Rys. 11 Rozkład przemieszczeń dla stali AISI 304  
*Fig. 11 Displacement distribution for steel 304*

### 6.3. Wyniki analizy numerycznej odkształcenia równoważnego

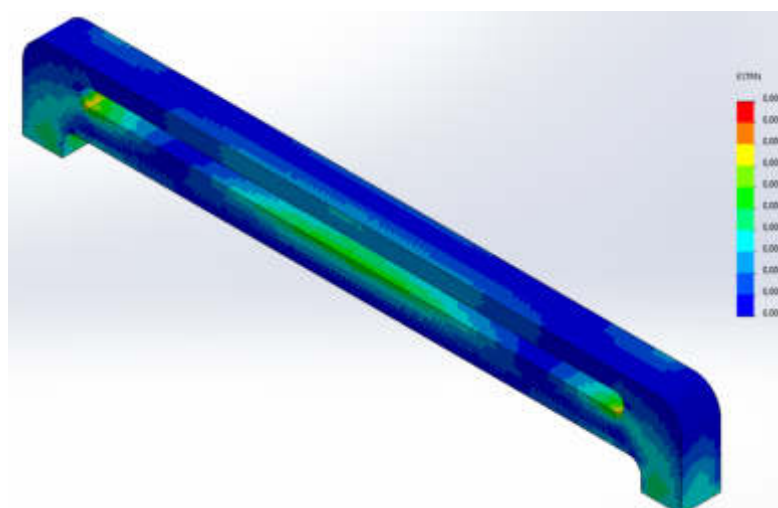
W celu określenia siły krytycznej powodującej odkształcenie przeprowadzono kolejne symulacje. Na rysunkach 12-14 przedstawiono odkształcenie równoważne reprezentowane przez największą siłę potrzebną do odkształcenia w danej osi (układzie odniesienia). Dzięki wykonanej analizie określono wartości odkształceń dla aluminium, ABS oraz stali AISI 304.



Rysunek 12. Odkształcenie równoważne dla stopu aluminium  
*Figure 12. Buckling deformation for aluminium alloy*



Rysunek 13. Odkształcenie równoważne dla ABS  
 Figure 13. Buckling deformation for ABS



Rysunek 14. Odkształcenie równoważne dla stali AISI 304  
 Figure 14. Buckling deformation for steel 304

Wyniki wykonanych symulacji rozkładu naprężeń, przemieszczeń oraz odkształcenia równoważnego przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Zestawienie wyników w przeprowadzonych symulacjach komputerowych  
 Table 5. Results obtained in the conducted researches

|                                 | Stop aluminium | ABS    | Stal AISI 304 |
|---------------------------------|----------------|--------|---------------|
| Maksymalne naprężenia [MPa]     | 14,031         | 14,041 | 14,021        |
| Maksymalne przemieszczenia [mm] | 0,040          | 1,584  | 0,017         |
| Odkształcenie                   | 0,000          | 0,006  | 0,000         |



## 7. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono symulacje komputerową rozkładu naprężeń, przemieszczeń oraz odkształcenia dla bagażnika dachowego. W celu wykonania symulacji wykorzystano program SOLIDWORKS.

Otrzymane wyniki analizy wytrzymałościowej świadczą o tym, że każdy z analizowanych materiałów nadaje się do zastosowania na element bagażnika narciarskiego. Biorąc pod uwagę masę elementów najkorzystniejszym materiałem do wykonania tego przedmiotu będzie polimer który przy najniższej masie prezentował wytrzymałość, która nawet w połowie nie osiągnęła zakładanych warunków.

Największe naprężenia uzyskano dla materiału ABS. Warto zauważyć jednak że różnice między poszczególnymi materiałami są niewielkie a żadne nie przekraczają granicy wytrzymałości wybranych materiałów.

Największe przemieszczenie wykazuje model wykonany z materiału ABS. Mimo że jest ono aż osiemdziesięciokrotnie większe niż w przypadku stali są to nadal wartości mikrometryczne.

Największą siłę niezbędną do uzyskania odkształcenia uzyskano dla stali AISI 304 (co wynika z najwyższej wartości modułu Younga), jednakże dla żadnego materiału nie zostały osiągnięte graniczne wartości siły odkształcającej.

Największą masą charakteryzuje się element wykonany ze stali, polimer powoli stworzyć przedmiot ponad siedmiokrotnie lżejszy.

## LITERATURA

1. <https://moto.trojmiasto.pl/Jak-bezpiecznie-przewozic-sprzet-narciarski-n98942.html>
2. <https://www.moje-auto.pl/blog/porady/jaki-bagaznik-na-narty>
3. <https://amio.pl/bagaznik-dachowy-na-narty-snowboard-amio-krotki-57/3-5679-6630>
4. L.A. Dobrzański, Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, WNT, 2002.
5. L.A. Dobrzański, *Metaloznawstwo z podstawami nauki o materiałach*, Wyd.3 zm. i rozsz. – Warszawa : Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, cop. 1996
6. H. Leda, Kompozyty polimerowe z włókien ciągłych, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000

## Symulacja komputerowa elementów konstrukcyjnych nadwozia samochodowego

A. Dziwis, W. Mikołajko, M. Marcinkowski, Ł. Lomania, A. Śliwa, M. Sroka

<sup>a</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: agata.sliwa@polsl.pl, marek.sroka@polsl.pl

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia wyniki symulacji komputerowej wykonanej w programie Solidworks. Celem niniejszej pracy była analiza wpływu grubości profilu rozpórki samochodowej, która montowana jest pod maską pomiędzy górnymi mocowaniami amortyzatorów na wytrzymałość całego elementu na rozciąganie oraz ściskanie, ponadto rozpórka została wykonana z trzech różnych materiałów inżynierskich: stal konstrukcyjna S355J0, stop aluminium 3.3315 oraz stal nierdzewną 316L.

**Abstract:** The article presents the results of a computer simulation obtained in Solidworks. The subject was a car strut which is mounted under the bonnet between the upper shock absorber mounts. The aim of this paper was to analyse the influence of the profile thickness on the tensile and compressive strength of the whole element and to compare three types of materials.

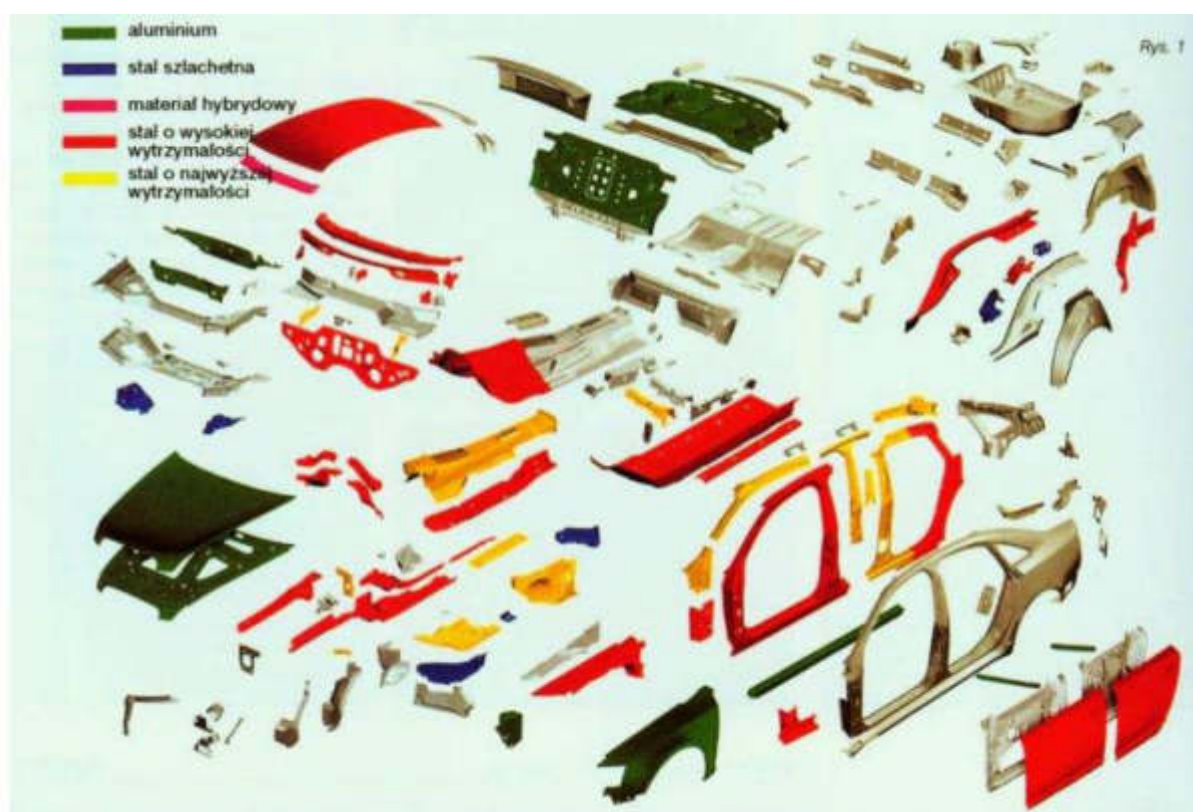
**Słowa kluczowe:** MES, CAD, Solidworks, symulacja komputerowa, automotive.

### 1. WSTĘP

Samochód osobowy z zewnątrz otoczony jest przestrzenną konstrukcją o danych kształtach, wymiarach oraz wyposażeniu ogólnie zwaną karoserią. Zadaniem tej konstrukcji jest zapewnienie bezpieczeństwa użytkownikowi. Karoseria wraz z szybami tworzą razem konstrukcję wytrzymałą na skręcanie oraz zginanie, dodatkowo jest elementem do którego mocowane są wszelkie elementy układu napędowego, zawieszenia, układu kierowania. Do właściwości jakie powinno spełniać nadwozie należą [1]:

- ochrona użytkowników,
- spełnienie wymogów sztywności,
- posiadać odpowiednie wyposażenie,
- estetyka,
- ergonomia[2,3].

Konstrukcja samochodu jest bardzo złożona i każdy element jest ściśle odpowiedzialny za wiele zadań, co powoduje konieczność użycia różnorodnych materiałów spełniających z góry określone założenia (Rys. 1).



Rys. 1. Elementy nadwozia z wyszczególnionymi materiałami, które są używane do ich produkcji [4].

*Fig. 1. Body parts with the materials that are used for their manufacture [4].*

Nadwozie może zostać podzielone na trzy odrębne grupy, do których należą:

- nadwozie nieniosące – jest ono osadzone na ramie, które przenosi wszystkie obciążenia ze strony podwozia,
- nadwozie półniosące – które połączone jest z ramą,
- nadwozie samonośne – jest to sztywna konstrukcja mająca za zadanie przenoszenie wszystkich obciążeń od strony podwozia[5].

Drażek rozporowy, usztywnienie lub wzmocnienie wieżyczki poprzecznej (STB) to element zawieszenia samochodowego montowany na podwoziu monocoque lub unibody, zapewniający dodatkową sztywność pomiędzy wieżami poprzecznymi.

W zawieszeniu z rozpórką MacPhersona, w którym sprężyna i amortyzator są połączone w jednym zespole zawieszenia, zastępującym także górny wahacz, całe pionowe obciążenie zawieszenia jest przenoszone na górną część wieżyczki poprzecznej pojazdu, w przeciwieństwie do zawieszenia z podwójnymi wahaczami, w którym sprężyna i amortyzator mogą przenosić obciążenie oddzielnie. Ogólnie rzecz biorąc, wieża podłużnicowa w podwoziu typu monocoque jest wzmocnioną częścią wewnętrznej studzienki koła i niekoniecznie jest bezpośrednio połączona z głównymi szynami podwozia. Z tego powodu w wieżach podporowych występuje nieodłączne ugięcie względem szyn podwozia.

Belka rozporowa ma na celu zmniejszenie tego ugięcia poprzez połączenie ze sobą dwóch wież rozporowych (Rys. 2.). Dzięki temu podczas pokonywania zakrętów obciążenie jest przenoszone z każdej z wież, co wiąże obie wieże razem i zmniejsza ugięcie podwozia. Aby skutecznie realizować ten cel (zwłaszcza w zawieszeniach MacPherson), drażek musi być

sztynny na całej swojej długości. Wielu producentów montuje usztywnienia rozpórki w modelach wyczynowych jako wyposażenie standardowe lub opcjonalne[6].



Rys. 2. Drażek rozporowy samochodu osobowego[7].

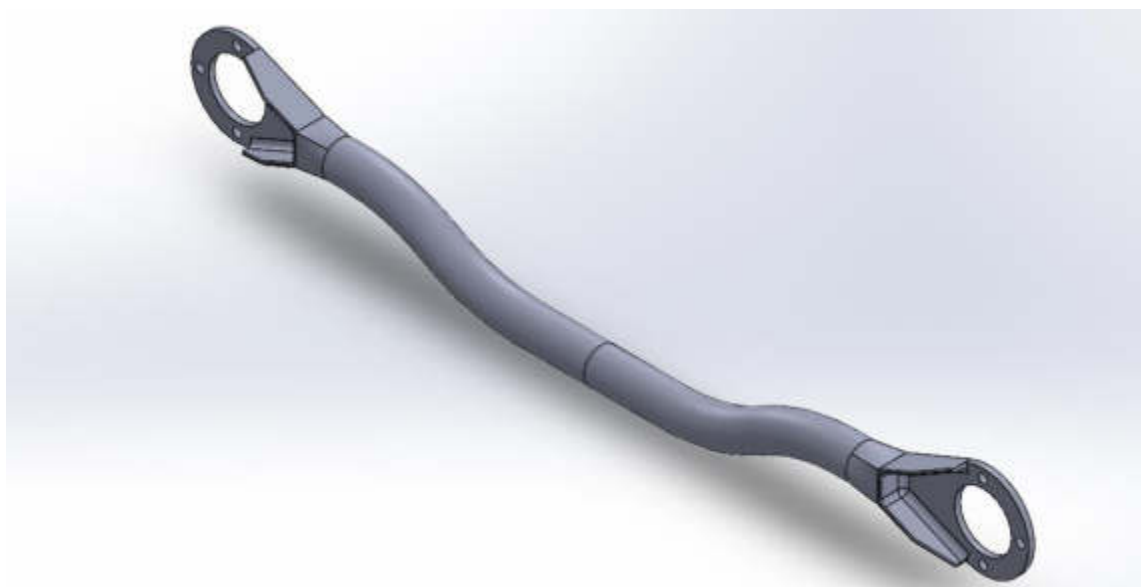
*Fig. 2: The strut rod of a car[7].*

## 2. ZAŁOŻENIA MODELOWE

Początkowym etapem pracy było zamodelowanie drążka rozporowego w programie Solidworks (rys. 3), następnie w celu przeprowadzenia symulacji ściskania oraz rozciągania zastosowano następujące warunki brzegowe:

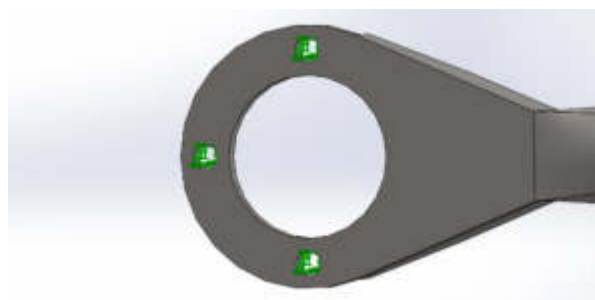
- umocowania nieruchome w miejscu otworów na śruby montażowe (rys. 4),
- przyłożona siła – rozciąganie (rys.5), ściskanie (rys. 6), wartość przyłożonej siły 10000[N]

W celu wykonania analizy numerycznej wpływu grubości profilu na wytrzymałość, ustalono trzy grubości: 10, 7,5, 5 mm. Zmieniany profil pokazano na rysunku nr 7. Drażek rozporowy został wykonany z trzech różnych materiałów inżynierskich stal konstrukcyjna S355J0 (tab. 1), stop aluminium 3.3315 ( tab. 2 ) oraz stal nierdzewną 316L ( tab. 3 ).



Rys. 3. Zaprojektowany model drążka samochodowego.

*Fig. 3. Designed model of a car strut.*



Rys. 4. Miejsce umocowania nieruchomego.

*Fig. 4. Fixed anchorage point.*



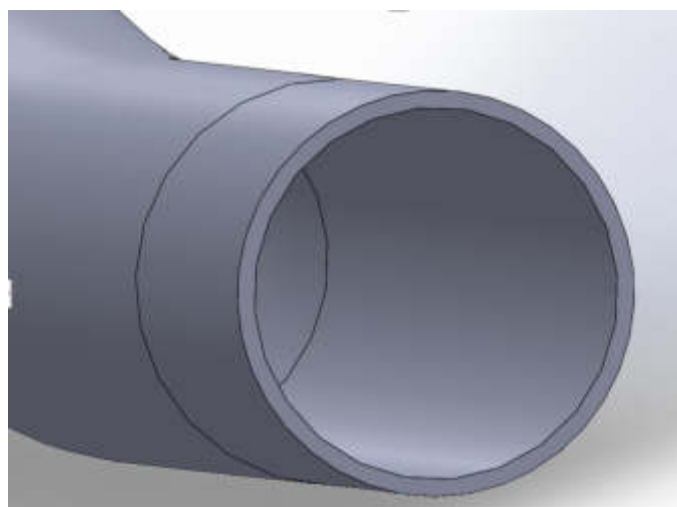
Rys. 5. Miejsce przyłożenia sił rozciągających.

*Fig. 5. Place of tensile force application.*



Rys. 6. Miejsce przyłożenia sił ściskających.

*Fig. 6. Place of tensile force application.*



Rys. 7. Profil drążka rozporowego.

*Fig. 7. Profile of the strut bar.*

Tabela 1. Własności wytrzymałościowe stali konstrukcyjnej S355J0[8].

Table 1. Strength properties of the construction steel S355J0[8].

| Własność                              | Wartość   | Jednostka         |
|---------------------------------------|-----------|-------------------|
| Współczynnik sprężystości             | 7e+10     | N/m <sup>2</sup>  |
| Współczynnik Poissona                 | 0.3897    | n.d.              |
| Współczynnik naprężenia ścinającego   | 2.7e+10   | N/m <sup>2</sup>  |
| Masa właściwa                         | 2700      | kg/m <sup>3</sup> |
| Wytrzymałość na rozciąganie           | 220000000 | N/m <sup>2</sup>  |
| Wytrzymałość na ściskanie             |           | N/m <sup>2</sup>  |
| Granica plastyczności                 | 200000000 | N/m <sup>2</sup>  |
| Współczynnik rozszerzalności cieplnej | 2.4e-05   | /K                |
| Współczynnik przewodzenia ciepła      | 204       | W/(m·K)           |
| Ciepło właściwe                       | 940       | J/(kg·K)          |
| Stosunek tłumienia materiału          |           | n.d.              |

Tabela 2. Własności wytrzymałościowe stopu aluminium 3.3315[8].

Table 2 Strength properties of aluminium alloy 3.3315[8].

| Własność                              | Wartość   | Jednostka         |
|---------------------------------------|-----------|-------------------|
| Współczynnik sprężystości             | 7e+10     | N/m <sup>2</sup>  |
| Współczynnik Poissona                 | 0.3897    | n.d.              |
| Współczynnik naprężenia ścinającego   | 2.7e+10   | N/m <sup>2</sup>  |
| Masa właściwa                         | 2700      | kg/m <sup>3</sup> |
| Wytrzymałość na rozciąganie           | 220000000 | N/m <sup>2</sup>  |
| Wytrzymałość na ściskanie             |           | N/m <sup>2</sup>  |
| Granica plastyczności                 | 200000000 | N/m <sup>2</sup>  |
| Współczynnik rozszerzalności cieplnej | 2.4e-05   | /K                |
| Współczynnik przewodzenia ciepła      | 204       | W/(m·K)           |
| Ciepło właściwe                       | 940       | J/(kg·K)          |
| Stosunek tłumienia materiału          |           | n.d.              |

Tabela 3. Własności wytrzymałościowe stali nierdzewnej 316L[8].

Table 3. Strength properties of 316L stainless steel[8].

| Własność                              | Wartość   | Jednostka         |
|---------------------------------------|-----------|-------------------|
| Współczynnik sprężystości             | 2e+11     | N/m <sup>2</sup>  |
| Współczynnik Poissona                 | 0.265     | n.d.              |
| Współczynnik naprężenia ścinającego   | 8.2e+10   | N/m <sup>2</sup>  |
| Masa właściwa                         | 8027      | kg/m <sup>3</sup> |
| Wytrzymałość na rozciąganie           | 485000000 | N/m <sup>2</sup>  |
| Wytrzymałość na ściskanie             |           | N/m <sup>2</sup>  |
| Granica plastyczności                 | 170000000 | N/m <sup>2</sup>  |
| Współczynnik rozszerzalności cieplnej | 1.65e-05  | /K                |
| Współczynnik przewodzenia ciepła      | 14.6      | W/(m·K)           |
| Ciepło właściwe                       | 450       | J/(kg·K)          |
| Stosunek tłumienia materiału          |           | n.d.              |

### 3. WYNIKI SYMULACJI KOMPUTEROWEJ

Symulacje komputerową naprężeń i przemieszczeń przeprowadzono celem analizy:

- wpływu grubości profilu na wytrzymałość.

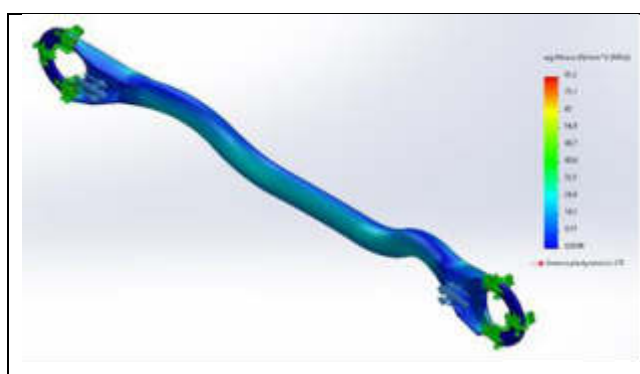
Na rysunku 8-11 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji komputerowej dla drążka rozporowego o grubości 10 mm i masie 12,1 kg.

- wpływu materiału na wytrzymałość

Na rysunku 12-15 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji komputerowej dla drążka rozporowego wykonanego ze stali konstrukcyjnej S355J0 i masie 3,11 kg.

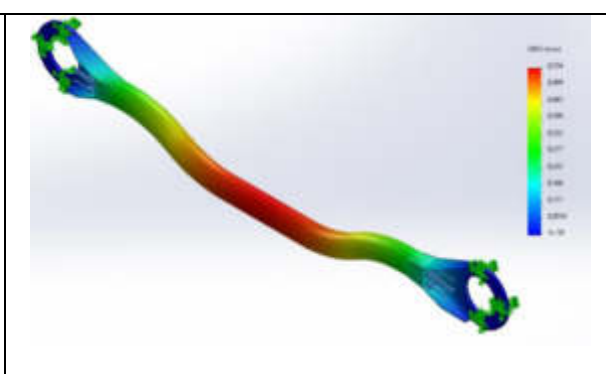
#### BADANIE WPŁYWU GRUBOŚCI PROFILU NA WYTRZYMAŁOŚĆ

Grubość profilu 10[mm], masa modelu - 12,1 [Kg]



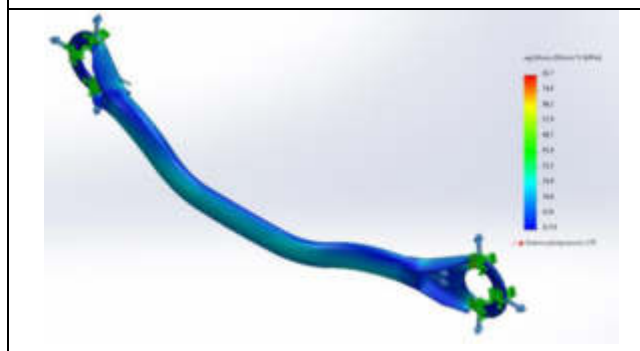
Rys. 8. Wynik naprężenia powstałego w wyniku działania siły ściskającej.

Fig. 8. The result of the stress produced by the compressive force.



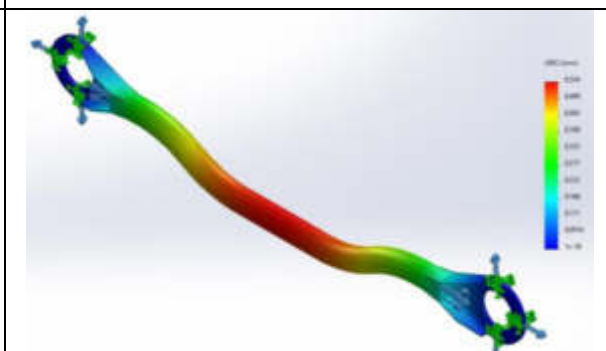
Rys. 9. Wynik przemieszczenia powstałego w wyniku działania siły ściskającej.

Fig. 9. The result of a displacement created by a compressive force.



Rys. 10. Wynik naprężenia powstałego w wyniku działania siły rozciągającej.

Fig. 10. Result of the stress produced by the tensile force.







Rys. 11. Wynik przemieszczenia powstałego w wyniku działania siły rozciągającej.

Fig. 11. Result of the displacement produced by the tensile force.

**BADANIE WPLYWU MATERIAŁU NA WYTRZYMAŁOŚĆ**

Stal konstrukcyjna S355J0, masa modelu: 3,111 [Kg]

|  |   |
|--|---|
|   |   |
| <p>Rys. 12. Wynik naprężenia powstałego w wyniku działania siły ściskającej.<br/>Fig. 12. The result of the stress produced by the compressive force</p> | <p>Rys. 13. Wynik przemieszczenia powstałego w wyniku działania siły ściskającej.<br/>Fig. 13. The result of a displacement created by a compressive force.</p> |
|    |    |
| <p>Rys. 14. Wynik naprężenia powstałego w wyniku działania siły rozciągającej.<br/>Fig. 14. Result of the stress produced by the tensile force</p>       | <p>Rys. 15. Wynik przemieszczenia powstałego w wyniku działania siły rozciągającej.<br/>Fig. 15. Result of the displacement produced by the tensile force</p>   |

Wyniki symulacji komputerowej zestawiono w tabelach 4-8, zgodnie z przeprowadzonymi symulacjami na ściskania oraz rozciągania. Wpływ grubości profilu na wytrzymałość prezentują tabele 4 i 5 oraz wpływ materiału na wytrzymałość tabele 6 i 7

Tabela 4. Wyniki wpływu grubości profilu na ściskanie.

Table 4. Results of the effect of profile thickness on compression.

| Grubość profilu [mm] | Masa [Kg] | Max naprężenie [MPa] | Max przemieszczenie [mm] |
|----------------------|-----------|----------------------|--------------------------|
| 10                   | 12,098    | 81,2                 | 0,554                    |
| 7,5                  | 10,640    | 92,9                 | 0,68                     |
| 5                    | 9,111     | 114                  | 0,896                    |



Tabela 5. Wyniki wpływu grubości profilu na rozciąganie.

*Table 5. Results of the effect of profile thickness on tensile strength.*

| Grubość profilu [mm] | Masa [Kg] | Max naprężenie [MPa] | Max przemieszczenie [mm] |
|----------------------|-----------|----------------------|--------------------------|
| 10                   | 12,098    | 82,7                 | 0,554                    |
| 7,5                  | 10,640    | 94,3                 | 0,68                     |
| 5                    | 9,111     | 115                  | 0,896                    |

Tabela 6. Wyniki wpływu materiału na ściskanie.

*Table 6.*

| Materiał           | Masa [Kg] | Max naprężenie [MPa] | Max przemieszczenie [mm] |
|--------------------|-----------|----------------------|--------------------------|
| Stal konstrukcyjna | 9,111     | 114                  | 0,896                    |
| Stop aluminium     | 3,154     | 111                  | 2,66                     |
| Stal nierdzewna    | 9,376     | 114                  | 0,941                    |

Tabela 7. Wyniki wpływu materiału na rozciąganie.

*Table 7.*

| Materiał           | Masa [Kg]    | Max naprężenie [MPa] | Max przemieszczenie [mm] |
|--------------------|--------------|----------------------|--------------------------|
| Stal konstrukcyjna | 9,111        | 115                  | 0,896                    |
| Stop aluminium     | 3,154        | 112                  | 2,66                     |
| Stal nierdzewna    | <b>9,376</b> | 116                  | 0,941                    |

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Z otrzymanych wyników można wywnioskować, że zmniejszenie grubości profilu wpływa na zmniejszenie masy elementu co jest ważnym aspektem w przemyśle motoryzacyjnym, w którym to obniżenie masy pojazdu wpływa na zmniejszenie spalania paliwa, a co za tym idzie obniżenie emisji spalin. Wraz z spadkiem grubości profilu oraz masy całego elementu wzrasta maksymalne naprężenie. Ta sama zasada zauważalna jest w przypadku przemieszczeń, zauważalny jest znaczny ich wzrost wraz z zmniejszeniem się grubości profilu. Zauważono również, że w każdym przypadku przyłożona siła nie spowodowała przekroczenia granicy plastyczności. W drugiej części pracy związanej z badaniem wpływu materiału można stwierdzić, że maksymalne naprężenia występujące we wszystkich materiałach są o podobnej wartości, jedyną różnicą zauważalną jest zwiększone przemieszczenie w przypadku modelu wykonanego z stopu aluminium, ponadto model wykonany z tego stopu cechuje się około trzykrotnie niższą masą.

Wnioski:

- obniżenie grubości elementu wpływa na wzrost naprężeń występujących w drążku rozporowym,
- obniżenie grubości wpływa na wzrost przemieszczeń występujących w drążku rozporowym,

- obniżenie grubości profilu pozwala na obniżenie masy drążka przy czym nie przekroczona zostaje granica plastyczności,
- zastosowanie lekkiego stopu aluminium pozwala na zredukowanie masy drążka przy czym zachowując wymaganą wytrzymałość.

## **LITERATURA**

1. „Wpływ technologii odbudowy powypadkowej karoserii samochodowej na bezpieczeństwo użytkownika pojazdu” Wiesław Szada-Borzyszkowski.
2. Abramek K. F., Uzdowski M., Woodburn E., “Podstawy obsługi i napraw”, WKiŁ, Warszawa, 2009.
3. Kozłowski M, “Budowa i eksploatacja pojazdów”, Wrocław, 1997
4. 12. Wielgołowski W.: Nowe blachy w nadwoziu, Auto Moto Serwis 10/2005
5. “Skrypt do szkolenia z ratownictwa technicznego realizowanego przez ksrg w zakresie podstawowym”
6. [https://en.wikipedia.org/wiki/Strut\\_bar](https://en.wikipedia.org/wiki/Strut_bar). Dostęp z dnia 01.05.2022
7. <https://autokult.pl/35223,rozporka-zawieszenia-czym-jest-i-czy-warto-ja-stosowac>. Dostęp z dnia 01.05.2022
8. Baza danych programu Solidworks.

## Włókna aramidowe – polimerowe złoto

P. Falkowska <sup>a</sup>, W. Oleś <sup>b</sup>, A.J. Nowak <sup>c</sup>

<sup>a</sup>Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny  
email: paulfal458@student.polsl.pl

<sup>b</sup>Uniwersytet Śląski

email: woless@0365.us.edu.pl

<sup>c</sup>Politechnika Śląska Wydział Mechaniczny Technologiczny, Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych, ul Towarowa 7a, 44-100 Gliwice;  
e-mail: agnieszka.j.nowak@polsl.pl

**Streszczenie:** W artykule opisano charakterystykę i budowę włókien aramidowych na podstawie aktualnej literatury. Skoncentrowano się na ich pochodzeniu oraz zastosowaniu.

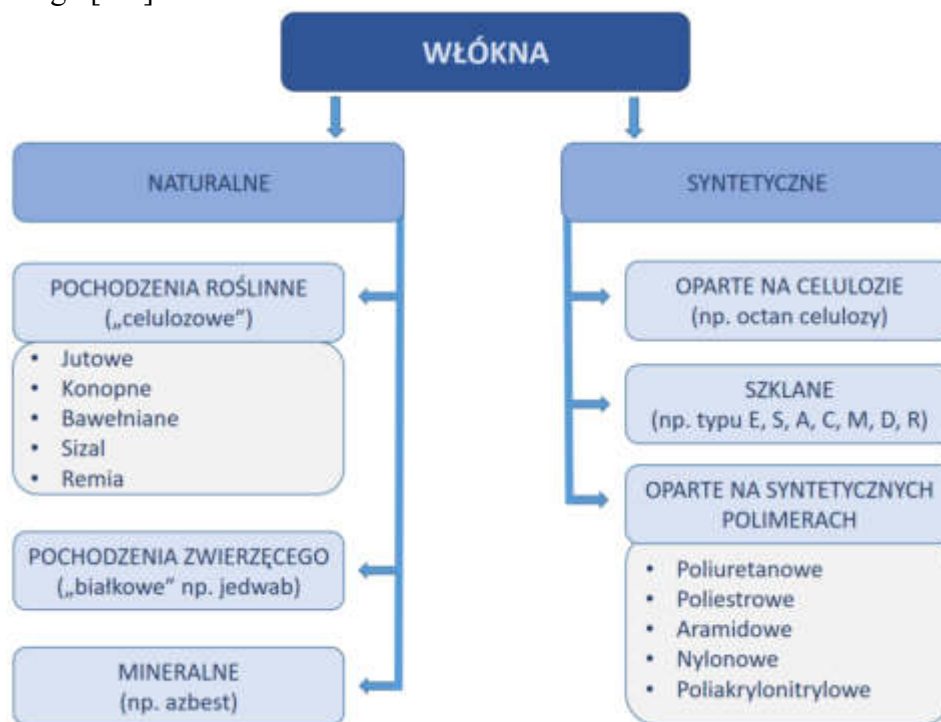
**Abstract:** The article describes the characteristics and structure of aramid fibers based on the current literature. The focus is on their origin and application.

**Słowa kluczowe:** włókna aramidowe, aramid, zastosowanie.

### 1. WSTĘP

Włókna stanowią podstawową jednostkę struktury wielu materiałów inżynierskich, w zależności od wymaganych własności użytkowych można wyróżnić włókna naturalne i syntetyczne (Rys. 1), natomiast spośród nich te o specyficznych, unikatowych własnościach. Na szczególną uwagę zasługują włókna aramidowe należące do grupy poliamidów aromatycznych powszechnie stosowanych w technice od wielu lat. Materiały te charakteryzują się wysoką wytrzymałością mechaniczną na zerwanie, małym wydłużeniem i niewielką masą. Znalazły one szerokie zastosowanie w produkcji wyrobów przenoszących wysokie obciążenia mechaniczne, odpornych na zużycie i do wytwarzania środków chemicznych. Włókna aramidowe to rodzaj włókna syntetycznego, które zawiera co najmniej 85% wiązań amidowych pomiędzy dwoma pierścieniami aromatycznymi. Włókno aramidowe w postaci tkaniny charakteryzuje się wysoką odpornością na uderzenia. W przeciwieństwie do innych materiałów nie pęka, lecz amortyzuje siłę uderzenia. Jeden z najlżejszych rodzajów materiału aramidowego zwany Kevlarem znalazł zastosowanie w procesie wytwórczym kompozytów. Poprzez zastosowanie takiego materiału zmniejsza się masę wytworzonego ostatecznie produktu, a odporność na uderzenie wzrasta. Porównując ze sobą włókna aramidowe i włókna węglowe zauważalnym jest, że aramidy są lżejsze o około 20% (gęstość włókna aramidowego 1.45 g/cm<sup>3</sup>, a gęstość włókna węglowego 1,8 g/cm<sup>3</sup>). Charakteryzują się one także dużą odpornością na przecięcia, wysoką wytrzymałością właściwą i wysokim modułem właściwym, co oznacza,

odpowiednio stosunki modułu sprężystości, jak i wytrzymałości na rozciąganie do ciężaru właściwego materiału i włókna. Większa wartość tych wskaźników przekłada się na wyższą efektywność włókna. Z kolei gładka powierzchnia zewnętrzna włókien aramidowych, przekłada się na słabą adhezję – brak silnego połączenia składowych materiału kompozytowego [1-4].



Rysunek 1. Podział włókien

Figure 1. Fiber division

## 2. WŁÓKNA ARAMIDOWE W INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ

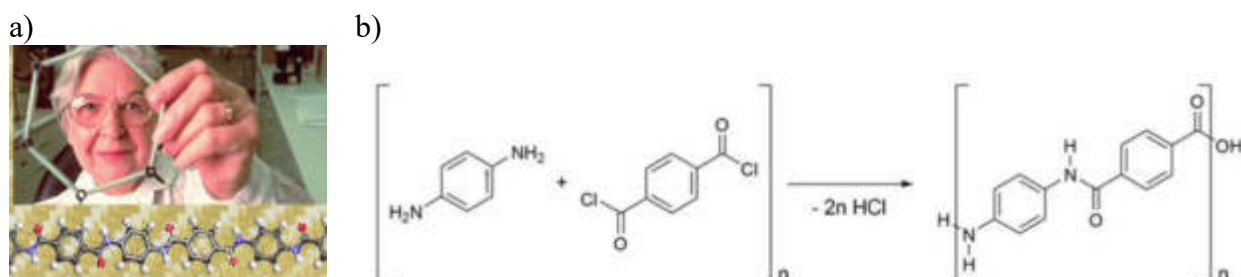
### 2.1 Historia

Nazwa aramid pochodzi z języka angielskiego *Aramid* i jest skrótem pełnej anglojęzycznej nazwy *aromatic polyamid*. Materiał aramidowy został opracowany i opatentowany przez firmę DuPont. Wynalezienie aramidu przypisuje się pracującej w owej firmie polskiej chemiczce urodzonej w stanach Stephanie Kwolek. W skład zespołu, w którym pracowała Kwolek wchodziłi jeszcze Herbert Blades, Paul W. Morgan, and Joseph L. Rivers Jr (Rys. 2) [5, 6].

W wyniku prowadzonych przez siebie badań, Stephanie Kwolek otrzymała próbki, w których wytworzyła się faza ciekłokrystaliczna uważana za skutek nieprawidłowości podczas syntezy. Badaczka poddała jednak próbkę dalszym badaniom. Otrzymana mętna próbka spotkała się z niechęcią innych badaczy, ponieważ istniało ryzyko, że cząsteczki roztworu zatkają dyszę przędzalniczą. Niezniechęcona badaczka w toku dalszych prowadzonych badań i analiz udowodniła, że ułożone w uporządkowany sposób włókna wykazywały ponad 9 razy większą sztywność w stosunku do innych polimerów [6, 9].

Włókna aramidowe w postaci materiału zostały zgłoszone przez firmę DuPont do biura patentowego w 1971 roku, a do sprzedaży zostały wprowadzone w 1973 roku pod charakterystyczną nazwą Kevlar. W późniejszym czasie wielu producentów rozpoczęło

produkcję aramidów z wykorzystaniem zmodyfikowanych parametrów produkcji, ale wciąż spełniających swoje podstawowe właściwości takie jak lekkość i wysoka wytrzymałość.



Rysunek 2. Poglądowe zdjęcia: a) Stephanie Kwolek; b) Synteza Kevlaru w reakcji monomerów para-fenylenodiaminy oraz chlorku tereftaloilu [7, 8]

Figure 2. Illustrative photos: a) Stephanie Kwolek; b) Kevlar synthesis by reaction of para-phenylenediamine monomers and terephthaloyl chloride [7, 8]

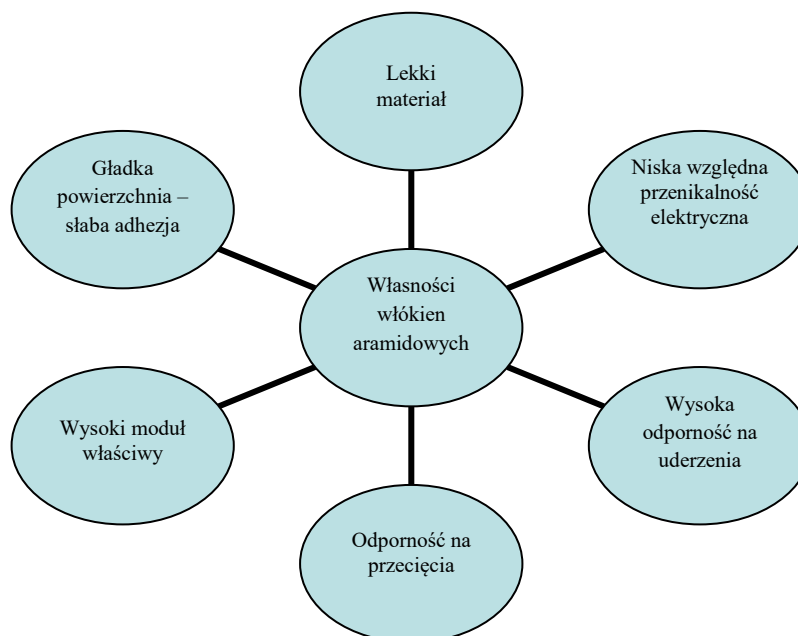
Wiele firm znajdujących się na rynku stosuje odmienne nazewnictwo na materiał aramidowy. Poza nazwami Kevlar i Nomex, stosowanymi przez amerykańską firmę DuPont możemy spotkać także inne nazwy. Japońska firma Teijin stosuje nazwy Tachora i Twaron. Materiał koreańskiej firmy Toray nosi nazwę Arawin a firmy Heraclon – Kolon, z kolei chińskie materiały noszą nazwę New Star firmy Yantai Tayho i X-Fiber firmy SRO Group. Na europejskim rynku możemy zauważyć także Kermel francuskiej firmy Kermel [2].

Przez swoje niezwykle właściwości włókna aramidowe wykorzystywane są do różnego rodzaju kompozytów. Zastosowanie aramidów najczęściej ma na celu zwiększenie wytrzymałości konstrukcyjnej. W połączeniu z różnymi materiałami uzyskujemy kompozyty cechujące się właściwościami zastosowanych w procesie ich produkcji materiałów. Przykładem takowych kompozytów mogą być kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami aramidowymi AFRP (*Aramid Fibre Reinforced Plastic*) lub kompozyty hybrydowe aluminiowo-polimerowe wzmocnione włóknami aramidowymi ARALL (*Aramid Aluminium Laminate*) [5].

## 2.2 Budowa i własności

W dzisiejszych czasach włókna aramidowe pozyskuje się na drodze niskotemperaturowego procesu polikondensacji monomerów para-fenylenodiaminy (z ang. *para-phenylenediamine*, PPD) oraz chlorku tereftaloilu (z ang. *terephthaloyl chloride*, TCL). Chlorek tereftaloilu wykorzystywany jest w produkcji różnego rodzaju kopolimerów, odpowiada on za właściwości wytrzymałościowe, stabilność temperaturową, chemo- i ognioodporność (Rys. 3 i Tab. 1). Natomiast para-fenylenodiaminy to substancje bardzo agresywne i silnie uczulające. Obecnie amina aromatyczna wykorzystywana jest do chemicznego farbowania tkanin czy futer. Podczas produkcji Kevlaru powstaje produkt uboczny w postaci kwasu chlorowodorowego, a wykorzystywany w procesie kwas siarkowy i związane z jego wprowadzaniem operacje czynią omawiany proces technologiczny wysoce kosztownym. Ewentualna eliminacja tego kwasu z procesu jest nie możliwa ze względu na otrzymanie polimeru (nierozpuszczalnego w wodzie) podczas procesu syntezy operacji przędzenia. Niezwykła wytrzymałość Kevlaru wynika z układu następujących po sobie ugrupowań aromatycznych i wiązań amidowych tworzących przyległe, warstwowe, uporządkowane struktury o dużej sztywności (Rys. 4).

W budowie włókien aramidowych podstawowy monomer składa się z grupy fenylowej i amidowej [5, 8, 9].



Rysunek 2. Własności włókien aramidowych

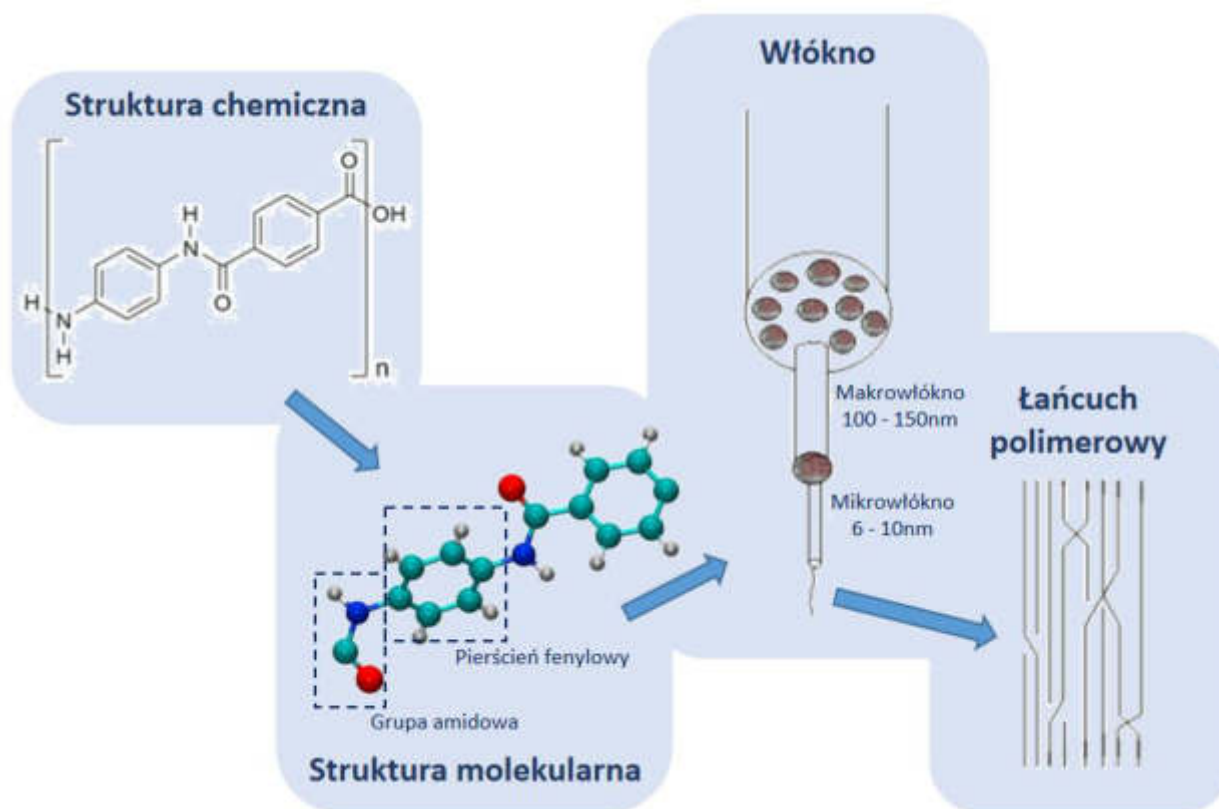
Figure 2. Properties of aramid fibers

Tablica 1. Własności włókna aramidowego 2200 1610 firmy DuPont [10]

Table 1. Properties of aramid fiber 2200 1610 by DuPont [10]

| WŁASNOŚCI WŁÓKNA ARAMIDOWEGO  |                              |                    |                                   |                              |                           |
|---|------------------------------|--------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Typ włókna  | Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ] | Moduł Younga [GPa] | Wytrzymałość na rozciąganie [MPa] | Wydłużenie przy zerwaniu [%] | Temperatura rozkładu [°C] |
| 2200  | 1,44                         | 105                | 3053                              | 2,70                         | 490                       |
| Skurcz w ciepłym powietrzu (15 min w temperaturze 190°C) => 0,1 [%] |                              |                    |                                   |                              |                           |
| Odporność cieplna (48h w temperaturze 200°C) => 90 [%]              |                              |                    |                                   |                              |                           |

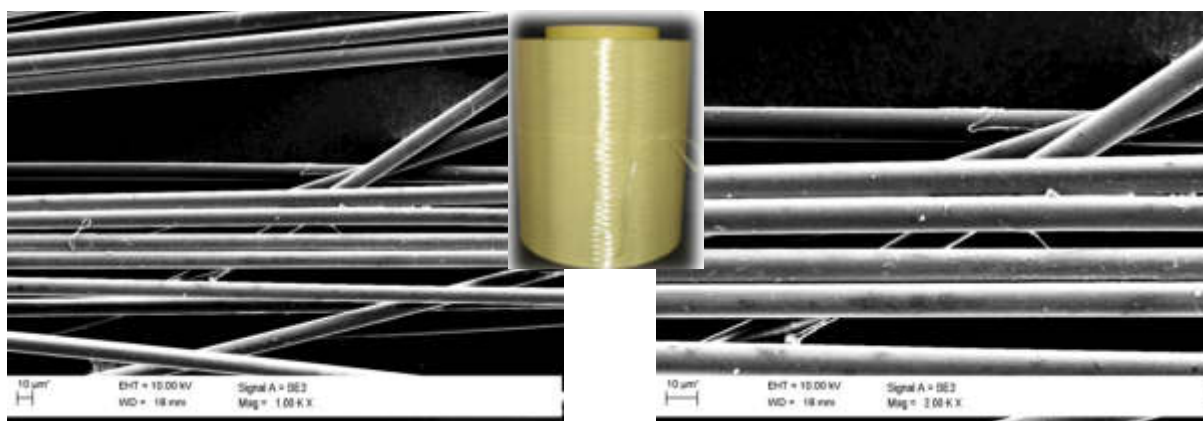
Bazująca na włóknach aramidowych – budowa Kevlaru składa się z grup amidowych oddzielonych parami grup fenylowych, grupy amidowe połączone są po przeciwnych stronach pierścieni fenylu. Włókno aramidowe charakteryzuje się niską gęstością w stosunku do włókien węglowych, czy stali, co przekłada się na ich lekkość i możliwości szerokiej aplikacji. Jest ono niepodatne na skurcz i charakteryzuje się dobrą wytrzymałością na rozciąganie, a podczas zerwania wydłużenie nie jest znaczne [5, 8, 9].



Rysunek 4. Struktura chemiczna i budowa włókna aramidowego [8]

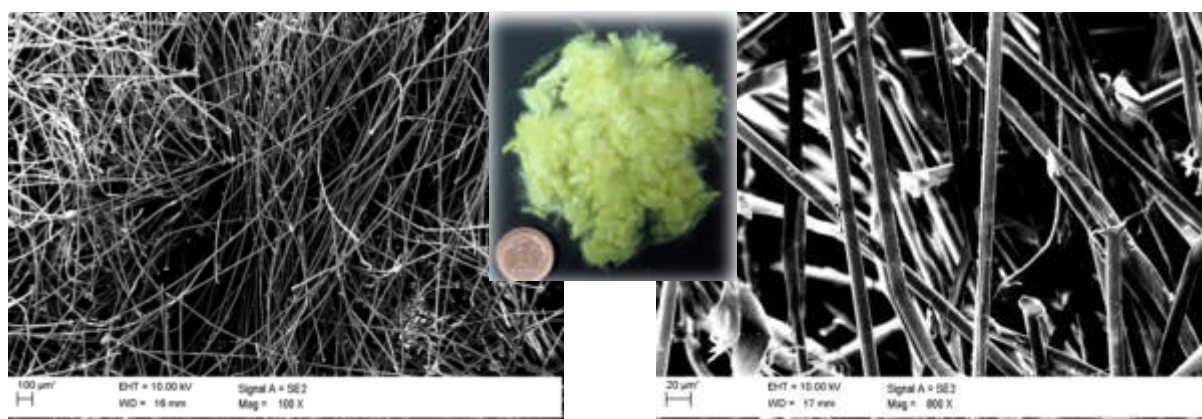
Figure 4. Chemical and fibrillar structure of aramid fiber [8]

Na rysunku 5 i 6 przedstawiono przykładowe zdjęcia włókien aramidowych w postaci ciągłej i ciętej. Obserwacje na mikroskopie skaningowym pozwoliła zobrazować budowę zewnętrzną i jakość poszczególnych włókien.



Rysunek 5. Struktura włókien aramidowych 2200 1610 w postaci ciągłej (aparat fotograficzny i skaningowy mikroskop elektronowy) [4]

Figure 5. Structure of aramid fibers 2200 1610 in continuous form (camera and scanning electron microscope) [4]

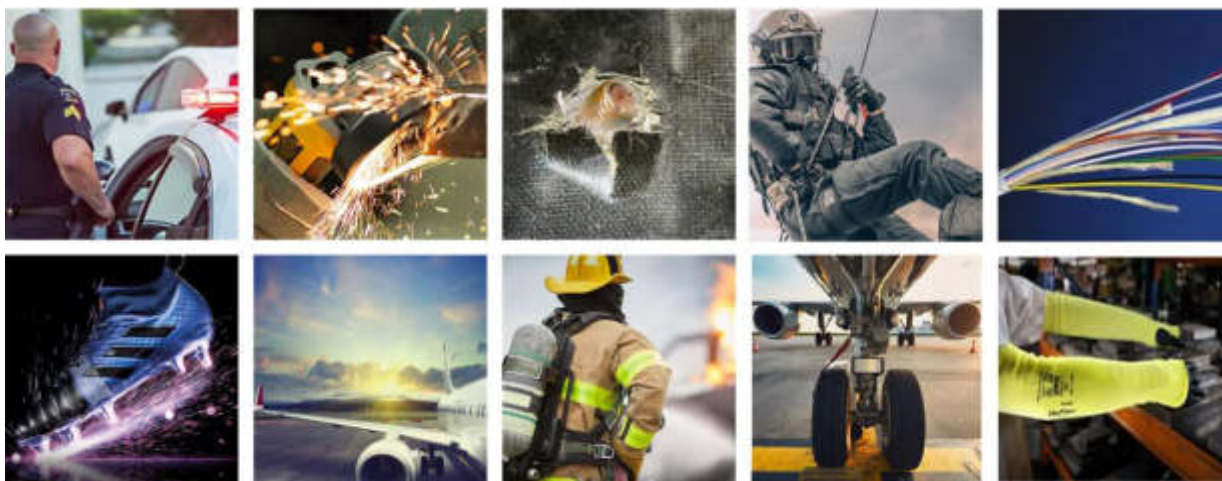


Rysunek 6. Struktura włókien aramidowych 2200 1610 w postaci ciętej (aparat fotograficzny i skaningowy mikroskop elektronowy) [4]

Figure 6. Structure of aramid fibers 2200 1610 in chopped form (camera and scanning electron microscope) [4]

### 2.3 Zastosowanie

Spektrum możliwości aplikacyjnych włókien aramidowych jest niemal nie ograniczone. Obecnie można wyróżnić prawie 10 klas włókien aramidowych zróżnicowanych pod względem własności wytrzymałościowych czy funkcjonalnych (Kevlar K-29, K49, K100, K119, K129, AP, XP, KM2). Poniżej przedstawiono główne trendy aplikacyjne tych nieprzeciętnych materiałów inżynierskich (Rys. 7) [8].



Rysunek 7. Trendy aplikacyjne włókien aramidowych [11]

Figure 7. Application trends of aramid fibers [11]

### Materiały konsumenckie

Włókna aramidowe coraz częściej pojawiają się w materiałach konsumenckich. Wykorzystywane są do produkcji etui ochronnych na telefon (z ang. *case*), przędzy, zszywek. Nawet znane marki korzystają z nich do ulepszenia swoich produktów sportowych, np. ulepszone są nimi korki piłkarskie [11].



## **Lotnictwo**

Włókna aramidowe wykorzystuje się również w lotnictwie. Swoje zastosowanie aramidy znalazły jako materiały służące do produkcji drzwi podwozia, wnętrza kabin samolotów i podłóg – w tym aspekcie są pomocne głównie ze względu na niską masę. Wykorzystuje się je także w oponach samolotów, które podczas startu poprzez gwałtowne zmiany temperatury i siłę tarcia wymagają odpowiedniej wytrzymałości i stabilności termicznej, którą zapewniają włókna aramidowe. Aramid służy również do zabezpieczania pierścieni ograniczających silnik, co pomaga w wyłapywaniu łopatek wentylatora lub uszkodzonych części wyrzucanych na zewnątrz przez siłę odśrodkową, dzięki czemu zapobiegają uszkodzeniu skrzydła lub kabiny [11].

## **Kable telekomunikacyjne i światłowodowe**

Włókna aramidowe znajdują tu zastosowanie z uwagi na swoje właściwości zapobiegające naprężeniu (kable nie mogą ulegać odkształceniu większemu niż 0,5%). Zapewniają małą kurczliwość cieplną i niski współczynnik rozszerzalności cieplnej. Dodatkowo dzięki własnościom dielektrycznym zapewniają ochronę przed wyładowaniami atmosferycznymi co pozwala na stosowanie kabli i przewodów poza budynkami [12].

## **Uszczelki i produkty cierne**

Z uwagi na odporność termiczną i chemiczną oraz wysoką odporność na zużycie, aramidy są idealnym materiałem wykorzystywanym do produkcjach wyrobów ciernych. Pulpa z włókna aramidowego wykorzystywana jest do produkcji okładzin hamulcowych. Poza tym ta sama pulpa wykorzystywana jest również do produkcji płyt uszczelniających. Dzięki wysokiej wytrzymałości włókien zapewnione jest zachowanie odpowiedniego modułu Younga i uzyskuje się mniejsze pełzanie materiału uszczelniającego [12].

## **Liny**

Ciągłe włókna aramidowe wykorzystuje się także do produkcji lin, które swoją wytrzymałością przypominają stal. Główną cechą odróżniającą liny aramidowe od stalowych jest ich odporność na zjawisko korozji oraz dużo mniejsza waga. Dzięki tym cechom znajdują zastosowanie pod powierzchnią morza, np. na platformach wiertniczych czy linach cumowniczych obiektów pływających – statków, jachtów [12].

## **Środki ochrony osobistej**

Włókna aramidowe w głównej mierze wykorzystuje się do wyposażenia ochronnego. Począwszy od obuwia, skarpet czy spodni chroniących przed piłą tarczową m.in. stolarzy, aż do kamizelek kuloodpornych stosowanych przez policjantów i żołnierzy. Włókna aramidowe znajdują tutaj zastosowanie głównie ze względu na wysoką wytrzymałość i trudność ich przecięcia. Ważnym aspektem jest także amortyzacja uderzeń – dzięki odporności na pęknięcie podczas strzału z broni pocisk zatrzymuje się na materiale a nie przebija go [12].

## PODSUMOWANIE

Włókna aramidowe i ich zastosowanie to wciąż dynamicznie rozwijający się temat badawczy w świecie nauki, który poprzez ciągły rozwój i liczne eksperymenty mogą przynieść w przyszłości szereg nowych zaskakujących zastosowań. Z dnia na dzień pojawiają się nowe perspektywy rozwoju przemysłu, z uwagi na unikatowe własności włókien aramidowych i kompozytów na ich bazie wielu współczesnych inżynierów realizuje innowacyjne projekty badawcze i/lub wdrożeniowe z ich udziałem. Najbardziej aktualnym kierunkiem rozwoju tej gałęzi inżynierii materiałowej są poszycia pojazdów samochodowych i lotniczych, którymi głównymi celami (w kontekście materiałów) są wysoka wytrzymałość i niska masa. Tematyka ta jest w dynamicznym rozwoju a badania z nią związane są ciągle poszerzane. Należy zastanowić się nad kolejnymi możliwościami zastosowania włókien aramidowych w innych sferach przemysłu, życia codziennego czy szeroko pojętej medycyny.

### *Uwagi ogólne:*

*Niniejsze opracowanie powstało dzięki realizacji projektu PBL pt. „Analiza materiałowa nowo opracowanych wielowarstwowych kompozytów węglowo-aramidowych na poszycia pojazdów wyścigowych” realizowanego w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza. Zarządzenie nr 55/2020 Rektora Politechniki Śląskiej. Prace były realizowane przez członków Studenckiego Koła Naukowego Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych i Kompozytów „HEAD TO HEAD” działającego przy Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych na wydziale Mechanicznym Technologicznym.*

## LITERATURA

1. B. Zhang, L. Jia, M. Tian i inni: Surface and interface modification of aramid fiber and its reinforcement for polymer composites: A review; 2021.
2. [dexcraft.pl/blog/technologie-kompozytow/kompozyty-z-kevlaru-aramidu/](https://dexcraft.pl/blog/technologie-kompozytow/kompozyty-z-kevlaru-aramidu/) (dostęp dnia 13.05.2022)
3. B. Zhang, X. Shao, M. Tian i inni: Mussel-inspired environmentally friendly dipping system for aramid fiber and its interfacial adhesive mechanism with rubber; 2022.
4. A.J. Nowak, Praca doktorska pt.: „Struktura i własności nowo opracowanego materiału kompozytowego na wewnątrzustrojowe protezy przelyku”; Politechnika Śląska Gliwice 2011
5. R. Bielawski: Badanie i modelowanie połączeń nitowych w lotniczych strukturach kompozytowych; 2016.
6. [sciencehistory.org/historical-profile/stephanie-l-kwolek](https://sciencehistory.org/historical-profile/stephanie-l-kwolek) (dostęp dnia 13.05.2022)
7. [pl.pinterest.com/ember927/celebrity-great-women/](https://pl.pinterest.com/ember927/celebrity-great-women/) (dostęp dnia 13.05.2022)
8. [materialyinzynierskie.pl/wytrzymaaly-kevlar-wlokna-aramidowe/](https://materialyinzynierskie.pl/wytrzymaaly-kevlar-wlokna-aramidowe/) (dostęp dnia 13.05.2022)
9. Sarianna Palola, Jyrki Vuorinen, Jacques W. M. Noordermeer, Essi Sarlin: Development in Additive Methods in Aramid Fiber Surface Modification to Increase Fiber-Matrix Adhesion: A Review, *Coatings* 2020, 10, 556
10. Karty materiałowe firmy DuPont
11. [dupont.pl/brands/kevlar.html](https://dupont.pl/brands/kevlar.html) (dostęp dnia 13.05.2022)
12. [tworzywa.com.pl/Wiadomo%C5%9Bci/Kevlar-w-r%C3%B3znych-zastosowaniach-20999.html](https://tworzywa.com.pl/Wiadomo%C5%9Bci/Kevlar-w-r%C3%B3znych-zastosowaniach-20999.html) (dostęp dnia 13.05.2022)

## Wytwarzanie gradientowych materiałów polimerowych metodą FFF

P. Falkowska <sup>a</sup>, M. Olszowska <sup>a</sup>, M. Król <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials

email: paulfal458@student.polsl.pl, magdols407@student.polsl.pl,

<sup>b</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials, email: mariusz.krol@polsl.pl

**Streszczenie:** W pracy przybliżono tematykę materiałów gradientowych z uwzględnieniem ich metody wytwarzania tj. metodą druku FFF. Zaprojektowano i wytworzono materiał gradientowy z połączenia trzech materiałów: PLA, PET-G, Silk. Następnie zostały przeprowadzone badania twardości metodą Shore'a w celu określenia gradientu rozkładu twardości, a wyniki zostały zaprezentowane w postaci wykresów i tabel.

**Abstract:** This work introduces the subject of gradient materials with regard to their production method using the FFF printing method. Samples were printed from three materials: PLA, PET-G, Silk. Then, Shore hardness tests were carried out to prove the gradient of the property distribution, and the results were presented in the form of graphs and tables.

**Słowa kluczowe:** materiał gradientowy, technologia FFF, badania twardości metodą Shore'a

### 1. WSTĘP

Materiały gradientowe opisuje się jako materiały, które wzdłuż co najmniej jednego określonego kierunku charakteryzują się rozkładem własności [1].

Znanych jest wiele metod wytwarzania materiałów gradientowych, w tym druk 3D, jednak charakterystycznymi technikami są: SLM, SLS, PolyJET, MJS. Zauważono możliwość wytworzenia materiałów gradientowych metodą FFF. Charakteryzuje się ona wykorzystaniem do procesu druku cienkiej żyłki, nazywanej filamentem, która jest topiona podczas procesu wydruku i formowana do nowego kształtu z wykorzystaniem ruchomej głowicy [2].

Filamenty wykorzystywane do druku metodą FFF charakteryzują się różnymi własnościami, a ich ilość wzrasta cały czas. Część z nich to:

- PLA – jest to poliaktyd charakteryzujący się biodegradowalnością. Jest podstawowym filamentem najczęściej wykorzystywanym przez osoby rozpoczynające swoje działania z drukiem w tej technologii. Jest stosunkowo tanim materiałem i łatwym w wydruku. Często wykorzystywany jest do wydruków kolekcjonerskich, czy prototypów [3].



Rysunek 1. Gotowy wydruk z filamentu PLA [4]

*Figure 1. Application of PLA*

- PET-G – materiał, który łączy własności PLA i ABS. Jest dosyć wytrzymały, ale nie stwarza problemów podczas wydruku. Wydruki z PET-G nie pękają pod naciskiem jak w przypadku PLA, a lekko się odkształcają. Dodatkowo nadają się do pracy w podwyższonych temperaturach, są bardziej odporne chemicznie niż PLA oraz dużo bardziej odporne na działanie światła UV. [5]



Rysunek 2. Gotowy wydruk z filamentu PET-G [4]

*Figure 2. Application of PET-G*

- SILK – materiał, który jest połączeniem PET-G z PLA. Jest trudniejszy w wydruku. Charakteryzuje się wysokim połyskiem materiału i wyższą temperaturą wydruku niż PLA. Filament ten ze względu na swój połysk ma bardzo dobre własności dekoracyjne. Nie należy do popularnych materiałów. [6]



Rysunek 3. Gotowy wydruk z filamentu Silk[4]

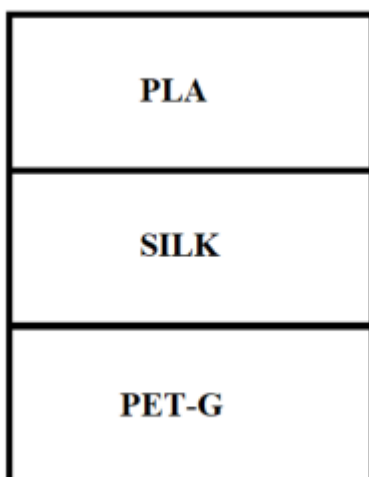
*Figure 3. Application of SILK*

## 2. PRZEBIEG BADAŃ

W celu wytworzenia materiału gradientowego metodą FFF wybrano trzy materiały:

- PLA
- PET-G
- SILK.

Materiały zostały wybrane ze względu na cel prowadzonych badań, czyli wytworzenie gradientowego przejścia pomiędzy poszczególnymi warstwami wydruku. Filament SILK, który jest materiałem pośrednim pomiędzy PLA a PET-G (stanowi ich mieszaninę) został wytypowany w tym celu.



Rysunek 4. Ustalony schemat rozkładu materiałów

*Figure 4. Established material distribution scheme*

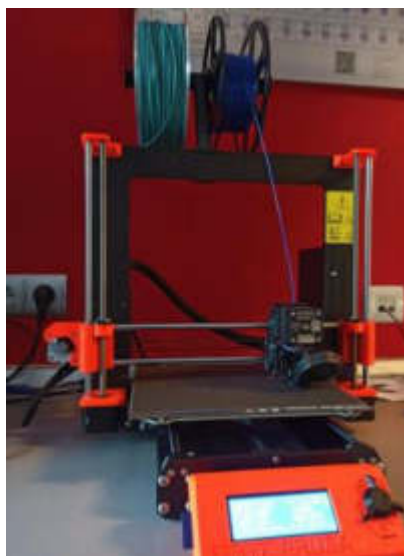
Wybrane materiały charakteryzują się następującymi temperaturami druku:

Tablica 1. Temperatury wydruku dla materiałów

*Table 1. Print temperatures for materials*

| PLA   | PET-G     | SILK      |
|---|-----------|-----------|
| 200-235°C                                   | 220-250°C | 225-245°C |
| Ustalona średnia temperatura wydruku: 235°C |           |           |

Proces wydruku przeprowadzono na drukarce FDM Prusa MK3S+ z wykorzystaniem kleju zwiększającego adhezję firmy Devil Design. Temperatura stołu podczas wydruku wynosiła 75°C, zastosowano dyszę o średnicy 0,4mm. Wysokość pierwszej warstwy wynosiła 0,2mm, a następnych 0,15mm.



Rysunek 5. Drukarka 3D zastosowana w badaniu

*Figure 5. 3D printer used in research*

W celu przeprowadzanie badań twardości metodą Shore'a przygotowano próbkę o odpowiednich wymiarach 42x6x60.



Rysunek 6. Model próbki

*Figure 6. Sample model*

Po ustaleniu odpowiednich parametrów i stworzeniu pliku gcode ,w programie PrusaSlicer w wersji 2.4.1, rozpoczęto proces wydruku.

a)



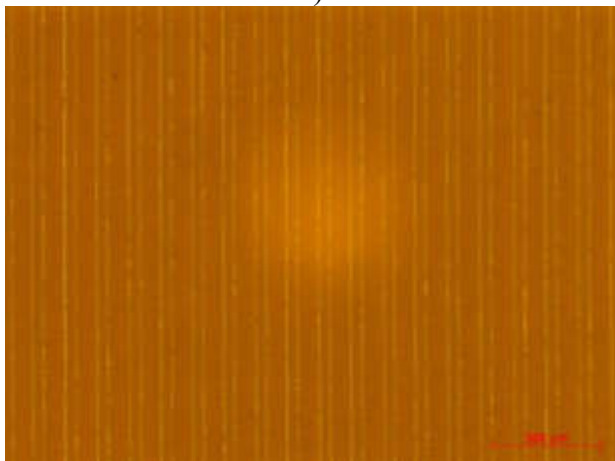
b)



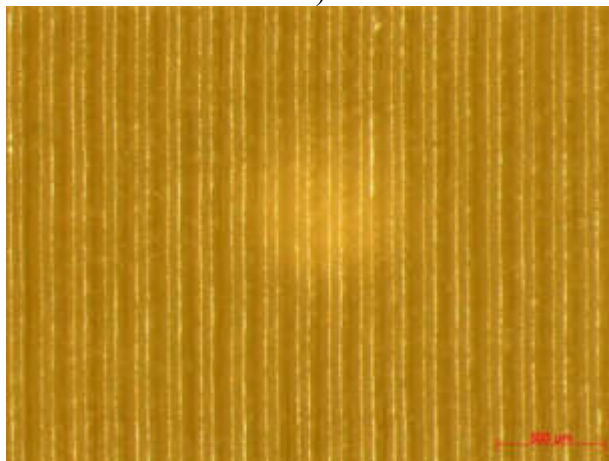
Rysunek 7. a) Drukowanie próbki, b) gotowa próbka  
*Figure 7. a) Printing the sample, b) finished sample*

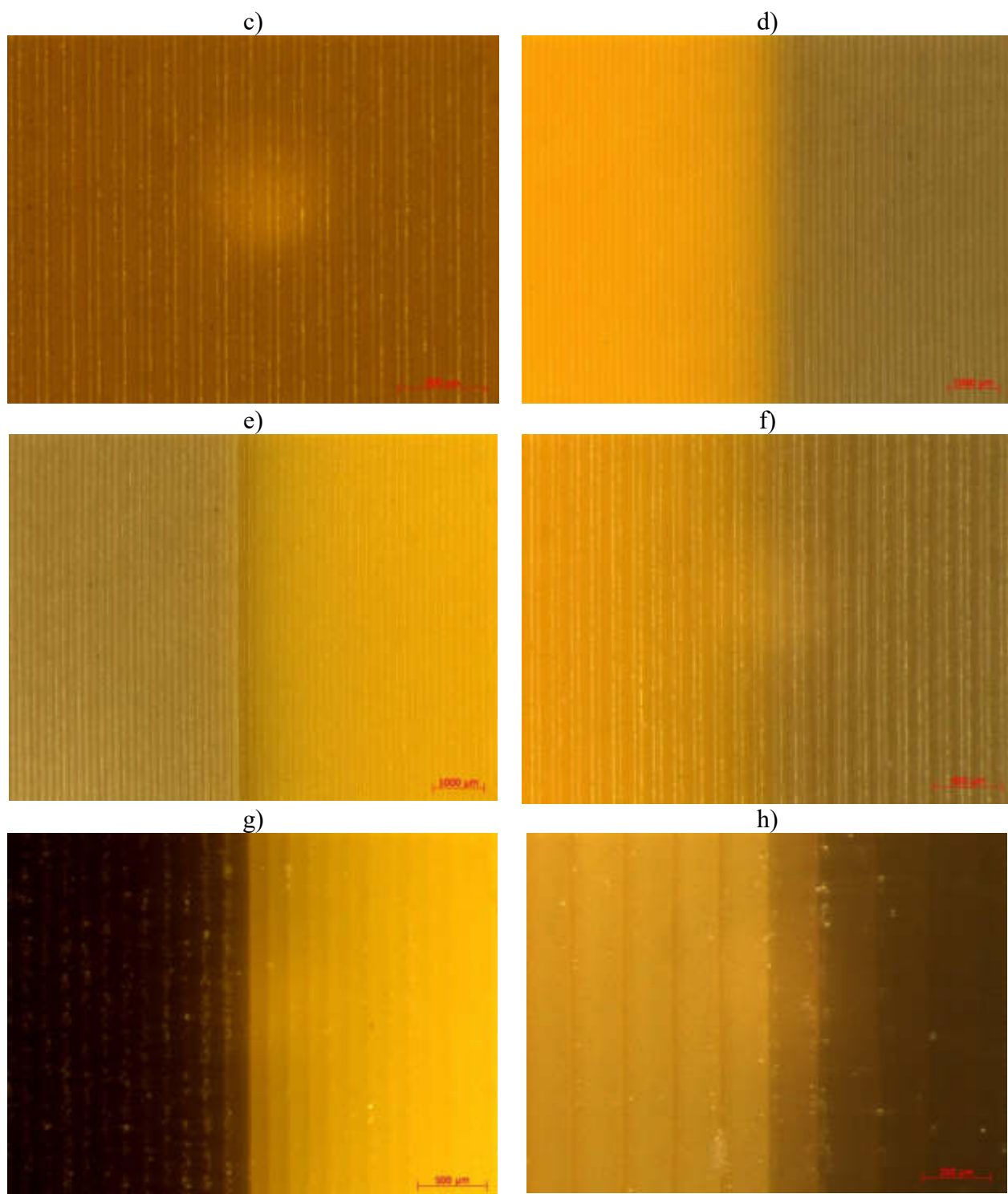
Wykonano zdjęcia przygotowanych próbek z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego. Zdjęcia miały za zadanie przedstawienia jakości połączenia poszczególnych warstw.

a)

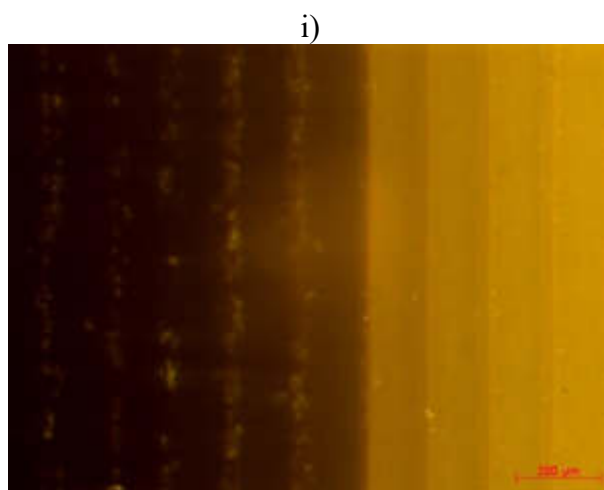


b)









Rysunek 8. a) Warstwa PLA pow.50x, b) warstwa SILK pow.50x, c) warstwa PET-G pow.50x, d) połączenie PLAxSilk pow.15x, e) połączenie PET-GxSILK pow.15x, f) połączenie PLAxSILK pow.40x, g) połączenie PET-GxSILK pow.40x, h) połączenie PLAxSILK pow.100x, i) połączenie PET-GxSILK pow.100x.

*Figure 8. a) PLA layer pow.50x, b) SILK layer pow.50x, c) PET-G layer pow50x, d) PLAxSILK combination pow.15x, e) PET-GxSILK combination pow.15x, f) PLAxSILK combination pow.40x, g) PET-GxSILK combination pow.40x, h) PLAxSILK combination pow.100x, i) PET-GxSILK combination pow.100x*

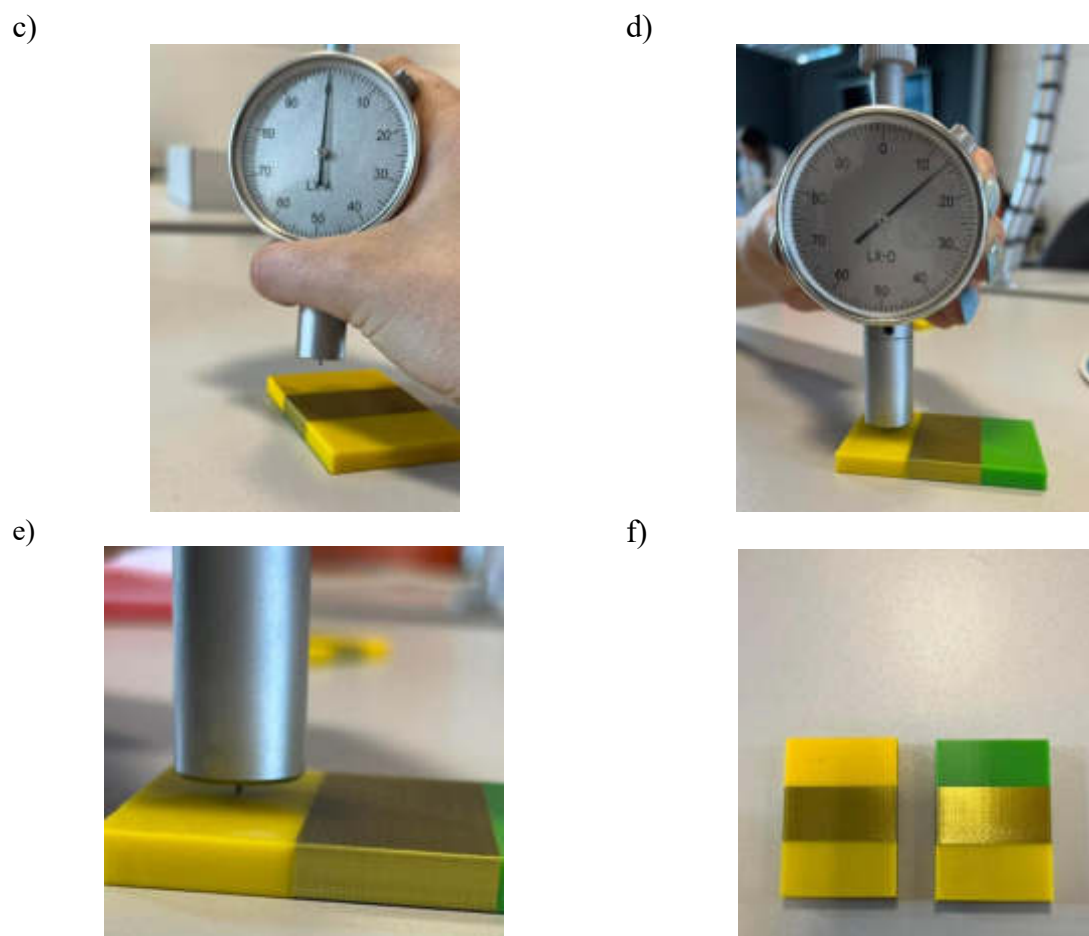
Przygotowano dwie próbki i przeprowadzono na nich pomiar twardości Shore'a. Na każdym typie materiału przeprowadzono 5 pomiarów. Rozpoczęto od twardościomierza Shore'a A, ale po pierwszej próbie testowej zmieniono twardościomierz na Shore'a D.

a)



b)





Rysunek 9. a) Twardościomierz Shore'a A, b) wzorniki, c) pierwsza próba, d) Twardościomierz Shore'a D, e) badanie, f) próbki po badaniach.

Figure 9. a) Shore A hardness tester, b) templates, c) first test, d) Shore D hardness tester, e) testing, f) samples after testing.

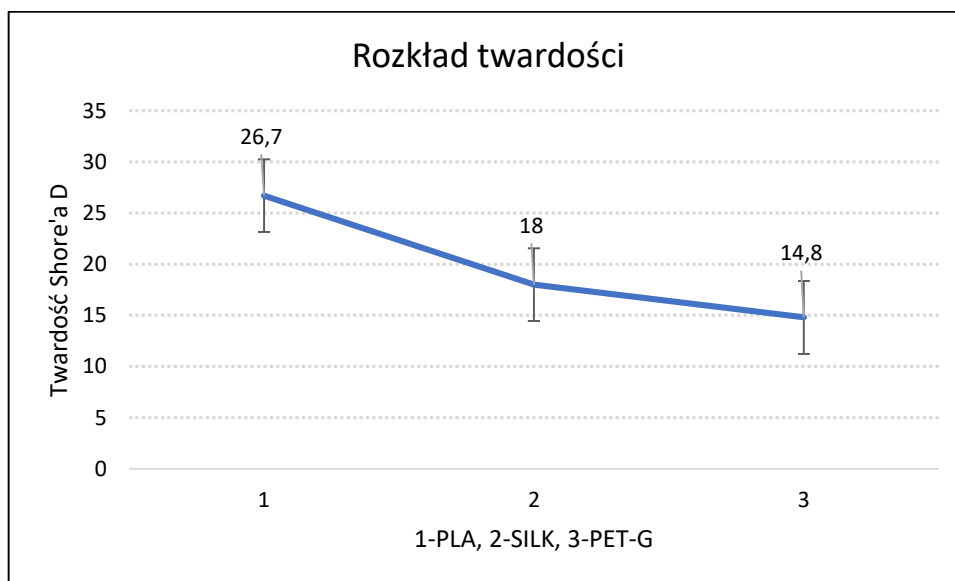
### 3. WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań zgromadzono i zaprezentowano w Tablica 2.

Tablica 2. Wyniki badań twardościomierzem Shore'a

Table 2. Shore durometer test results

| Materiał/Próba | PLA         |             | PET-G     |             | SILK      |           |
|----------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-----------|
|                | Próbka I    | Próbka II   | Próbka I  | Próbka II   | Próbka I  | Próbka II |
| 1.             | 27          | 25          | 15        | 15          | 18        | 19        |
| 2.             | 25          | 26          | 15        | 15          | 17        | 19        |
| 3.             | 26          | 27          | 14        | 14          | 19        | 18        |
| 4.             | 29          | 26          | 16        | 15          | 18        | 16        |
| 5.             | 31          | 25          | 15        | 14          | 18        | 18        |
| <b>Średnia</b> | <b>27,6</b> | <b>25,8</b> | <b>15</b> | <b>14,6</b> | <b>18</b> | <b>18</b> |



Rysunek 10. Gradient rozkładu twardości materiału  
*Figure 10. Material hardness distribution gradient*

#### 4. WNIOSKI

Utworzenie materiału gradientowego metodą FFF jest możliwe. Badania twardości wykazały, że połączenie trzech filamentów PLA, SILK i PET-G gwarantuje uzyskanie gradientu rozkładu twardości, który w przyszłości może zostać wykorzystany w szerszym zastosowaniu. Na wykonanym komponencie otrzymano zmienną twardość w zakresie od 26 do 14.8 Shore'a D.

#### PODZIĘKOWANIE

Podziękowanie dla firmy Devil Design z siedzibą w Mikołowie za przekazanie próbek materiału niezbędnego do utworzenia materiału wykorzystywanego do badań.

Niniejsze opracowanie powstało w ramach działań Studenckiego Koła Naukowego „GYROID” działającego przy Katedrze Materiałów inżynierskich i Biomedycznych na wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

Praca powstała w wyniku realizacji projektu w ramach kształcenia zorientowanego projektowo-PBL, w konkursie VII w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza, Politechnika Śląska.

#### LITERATURA

1. [pg.gda.pl/mech/kim/ziel/11](http://pg.gda.pl/mech/kim/ziel/11) Materiały specjalne III.pdf (dostęp dnia 09.05.2022)
2. [omni3d.com/pl/blog/na-czym-polega-druk-3d-w-technologii-fff/](http://omni3d.com/pl/blog/na-czym-polega-druk-3d-w-technologii-fff/) (dostęp dnia 09.05.2022)
3. [zadar.pl/pla-czyli-co-laczy-kwas-mlekowy-filamenty-i-drukarki-3d](http://zadar.pl/pla-czyli-co-laczy-kwas-mlekowy-filamenty-i-drukarki-3d) (dostęp dnia 09.05.2022)
4. [instagram.com/devil\\_design\\_/](https://www.instagram.com/devil_design/) (dostęp dnia 09.05.2022)
5. [get3d.pl/2020/05/13/jak-drukowac-z-petg/](http://get3d.pl/2020/05/13/jak-drukowac-z-petg/) (dostęp dnia 09.05.2022)
6. [devildesign.com/download/SILK\\_-\\_karta\\_produkty.pdf](http://devildesign.com/download/SILK_-_karta_produkty.pdf) (dostęp dnia 09.05.2022)

## Proces reklamacji a zadowolenie klienta

N. Gawel<sup>a</sup>, A. Kania<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Studentka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email: n.gawel@op.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email: aneta.kania@polsl.pl

**Streszczenie:** W artykule omówiono satysfakcję klienta z procesu reklamacji. Przeprowadzono analizę i ocenę zadowolenia klientów z jakości ich obsługi, z wykorzystaniem wskaźnika CSI, na przykładzie wybranego przedsiębiorstwa usługowego.

**Abstract:** The article discusses a customer satisfaction with the complaint process. Analysis and evaluation of customer satisfaction with the quality of customer service using the CSI indicator on the example of the selected service company was presented.

**Słowa kluczowe:** proces reklamacji, zadowolenie klienta, wskaźnik CSI

### 1. WSTĘP

Na satysfakcję klienta wpływa wiele różnych czynników, przede wszystkim jakość produktu/usługi, ale również relacje między konsumentem, a pracownikiem przedsiębiorstwa, itd. Im jakość danego wyrobu jest wyższa dla klienta, tym bardziej jest on zadowolony ze świadczonych usług i chętniej zakupuje kolejne produkty/usługi firmy. W przypadku braku zadowolenia konsumenta, składane jest zgłoszenie reklamacyjne. Reklamacja stanowi ważne źródło informacji, z których można wnioskować, na jakim etapie procesu dochodzi do produkowania wadliwych wyrobów, pozwala również na wdrożenie działań naprawczych, które przyczynią się do zmniejszenia liczby reklamacji. Konsument ma prawo do złożenia reklamacji, kiedy produkt nie jest zgodny z jego wymaganiami. Do podstawowych przyczyn powstawania niezgodności można zaliczyć m.in. niekompletność produktu, brak oczekiwanych cech, określonych wcześniej w umowie, brak użyteczności produktu oraz brak możliwości spełnienia przez produkt wcześniej założonych funkcji [1,2]. Reklamacje dotyczyć mogą zarówno wyrobów nowych, jak i używanych, posiadających gwarancję. Należy nadmienić, że każde przedsiębiorstwo posiada swój własny system zarządzania reklamacjami.

W praktyce wyróżnić można wiele metod badania zadowolenia zarówno klientów, jak i pracowników. Do metod tych zalicza się m.in. badania ankietowe, system skarg i sugestii, technikę zdarzeń krytycznych, metodę Servqual, wskaźniki CSI (Customer Satisfaction Index), a także NPS (Net Promoter Score). Za pomocą wskaźnika CSI można dokładnie zbadać zadowolenie klientów dotyczące danego obszaru pracy przedsiębiorstwa, np. zadowolenia z otrzymanego produktu bądź też sposobu rozpatrzenia reklamacji. Procedura badania satysfakcji klientów tym wskaźnikiem zwykle składa się z [3,4]:

- wstępnego podziału klientów,
- określenia parametrów (cech) jakościowych,
- opracowania kwestionariusza ankietowego,
- badania ankietowego,
- analizy wyników, obliczenia wskaźnika CSI,
- utworzenia mapy jakości, i
- interpretacji wyników.

## 2. BADANIE ZADOWOLENIA KLIENTÓW Z PROCESU REKLAMACJI W PRZEDSIĘBIORSTWIE USŁUGOWYM

Badanie zadowolenia klientów z procesu reklamacji przeprowadzono w przedsiębiorstwie X, które zajmuje się doborem oraz dostawą elementów instalacji przemysłowych, m.in. zaworów, pomp, rur, zasuw, kołnierzy, kształtek, wymienników, a także napędów. W tym celu, na początku opracowano kwestionariusz ankietowy, zgodny z założeniami wskaźnika Customer Satisfaction Index (Tabela 1). W przypadku „zadowolenia” przyjęto następującą skalę ocen: **1** – bardzo niezadowolony, **2** – niezadowolony, **3** – neutralny, **4** – zadowolony, **5** – bardzo zadowolony. Natomiast dla „znaczenia” wyznaczono skalę: **1** – bardzo małe, **2** – małe, **3** – przeciętne, **4** – duże, i **5** – bardzo duże.

Tabela 1. Uproszczony kwestionariusz ankietowy badania satysfakcji klientów z procesu reklamacji w przedsiębiorstwie X

*Table 1. A simplified questionnaire survey of customer satisfaction with the complaint process in the enterprise X*

| Zadowolenie |   |   |   |   | Badane parametry                        | Znaczenie |   |   |   |   |
|-------------|---|---|---|---|---|-----------|---|---|---|---|
| 1           | 2 | 3 | 4 | 5 |   | 1         | 2 | 3 | 4 | 5 |
|             |   |   |   |   | Czas reakcji na zgłoszoną reklamację    |           |   |   |   |   |
|             |   |   |   |   | Szybkość rozpatrzenia reklamacji        |           |   |   |   |   |
|             |   |   |   |   | Jakość obsługi – kontakt z pracownikami |           |   |   |   |   |
|             |   |   |   |   | Działania naprawcze – ich rodzaje       |           |   |   |   |   |
|             |   |   |   |   | Śledzenie etapu reklamacji              |           |   |   |   |   |
|             |   |   |   |   | Wyniki reklamacji                       |           |   |   |   |   |

Następnie przeprowadzono charakterystykę poszczególnych parametrów zawartych w ankiecie. Czas reakcji na zgłoszoną reklamację jest czasem od momentu zgłoszenia

reklamacji do podjęcia pierwszych działań oraz poinformowania klienta o sposobie rozpatrzenia reklamacji. Szybkość rozpatrzenia reklamacji to czas do momentu uznania bądź nie uznania reklamacji. Jakość obsługi obejmuje: kontakt pracownika z klientem, przekazywanie informacji dotyczących reklamacji oraz bieżące informowanie klienta o działaniach producenta. Sposób rozwiązania reklamacji jest zależny od miejsca wystąpienia niezgodności. Wyróżnia się dwa rodzaje działań naprawczych: dostarczenie wadliwego produktu do producenta oraz wyjazd serwisu do wadliwego produktu. Parametr – śledzenie etapu reklamacji umożliwia weryfikację postępu prowadzenia kolejnych etapów reklamacji do momentu jej zakończenia. A wynikiem reklamacji jest rozwiązanie zaistniałego problemu poprzez zastosowanie wybranego działania naprawczego.

Proces ankietyzacji obejmował 6 klientów, którzy złożyli reklamacje w okresie od grudnia 2020 r. do stycznia 2021 r. Odpowiedzi ankietowanych przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie odpowiedzi ankietowanych dotyczących zadowolenia z procesu reklamacji po wprowadzonych zmianach

Table 2. Statement of respondents' answers regarding satisfaction with the complaint process after the changes

| Średnia ocena kryterium $o_i$ (zadowolenie) | Zadowolenie |   |   |   |   | Badane parametry                            | Znaczenie |   |   |   |   | Średnia waga, $w_i$ (znaczenie) |
|---|-------------|---|---|---|---|---|-----------|---|---|---|---|---------------------------------|
|   | 1           | 2 | 3 | 4 | 5 |   | 1         | 2 | 3 | 4 | 5 |                                 |
| 4,83  |             |   |   | 1 | 5 | Czas reakcji na zgłoszoną reklamację – 1    |           |   |   | 5 | 1 | 4,16                            |
| 4,66  |             |   |   | 2 | 4 | Szybkość rozpatrzenia reklamacji – 2        |           |   |   | 4 | 2 | 4,33                            |
| 2,83  |             | 2 | 3 | 1 |   | Jakość obsługi – kontakt z pracownikami – 3 |           |   |   | 3 | 3 | 4,50                            |
| 4,66  |             |   |   | 2 | 4 | Działania naprawcze – ich rodzaje – 4       |           |   |   | 5 | 1 | 4,16                            |
| 2,33  |             | 1 | 2 | 3 |   | Śledzenie etapu reklamacji – 5              |           |   |   | 3 | 3 | 4,50                            |
| 3,16  |             | 1 | 3 | 2 |   | Wyniki reklamacji – 6                       |           |   |   | 1 | 5 | 4,83                            |

Następnie przeprowadzono konieczne obliczenia do wyznaczenia wskaźnika CSI przy pomocy wzorów 1-4. Wyniki zamieszczono w tabeli 3.

W celu wyznaczenia procentowego wskaźnika zadowolenia konsumenta należy najpierw skorzystać ze wzoru na wagę względną czynnika (1) [4]:

$$w_{iw} = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (1)$$

gdzie:

$w_{iw}$  – waga względną czynnika,

$i$  – kryterium uwzględnione w ankiecie,

$N$  – liczba respondentów,

$w_i$  – średnia waga czynnika.

Następnie należy obliczyć średni wynik CSI dla każdego czynnika, korzystając ze wzoru (2) [4]:

$$CSI = \sum_{i=1}^N w_{iw} \cdot c_i \quad (2)$$

gdzie:

CSI – średni wynik wskaźnika,

$c_i$  – średnia ocena czynnika.

Kolejno, określa się maksymalny wskaźnik CSI za pomocą wzoru (3) [4]:

$$CSI_{max} = \sum_{i=1}^N w_{iw} \cdot c_{i max} \quad (3)$$

gdzie:

$CSI_{max}$  – największy możliwy do uzyskania wynik,

$c_{i max}$  – największa możliwa ocena kryterium.

Ostatecznie należy określić % wskaźnik CSI, za pomocą wzoru (4) [4]:

$$CSI_{\%} = \frac{CSI}{CSI_{max}} \cdot 100\% \quad (4)$$

gdzie:

$CSI_{\%}$  – wartość wskaźnika w procentach.

Tabela 3. Zestawienie wyników otrzymanych na podstawie odpowiedzi ankietowanych

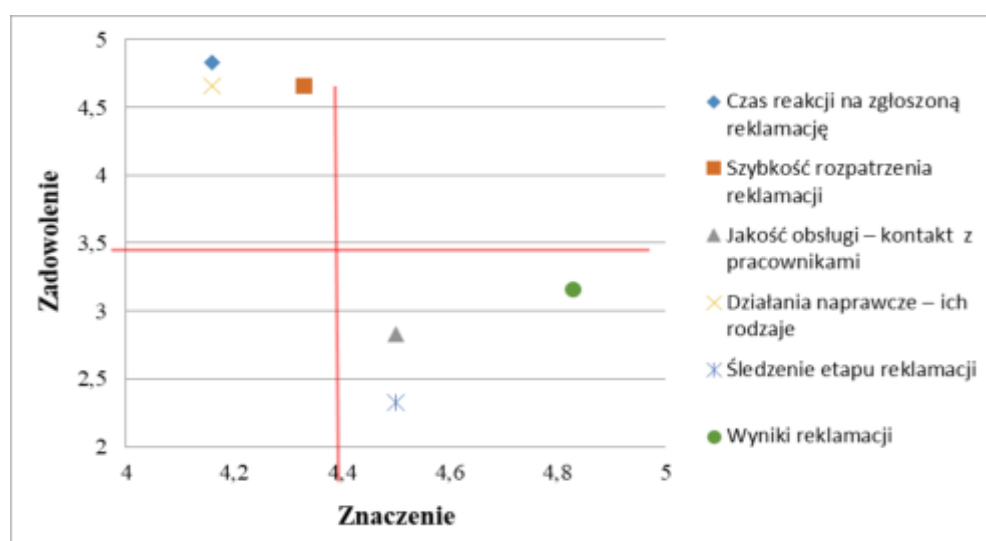
Table 3. Summary of results obtained on the basis of respondents' answers

| Badane parametry | Ocena kryterium, $o_i$ | Waga kryterium, $w_i$ | Waga względna kryterium, $w_{iw}$ | Wskaźnik CSI | Wskaźnik $CSI_{max}$ | Wskaźnik CSI, % |
|------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|--------------|----------------------|-----------------|
| 1                | 4,83                   | 4,16                  | 0,157                             | 0,759        | 0,785                | 96,6            |
| 2                | 4,66                   | 4,33                  | 0,164                             | 0,762        | 0,818                | 93,2            |
| 3                | 2,83                   | 4,50                  | 0,170                             | 0,481        | 0,850                | 56,6            |
| 4                | 4,66                   | 4,16                  | 0,157                             | 0,732        | 0,785                | 93,2            |
| 5                | 2,33                   | 4,50                  | 0,170                             | 0,396        | 0,850                | 46,6            |
| 6                | 3,16                   | 4,83                  | 0,182                             | 0,576        | 0,912                | 63,2            |
|                  | <b>Suma</b>            | <b>26,48</b>          | <b>CSI</b>                        | <b>3,706</b> | <b>5</b>             | <b>74,12</b>    |

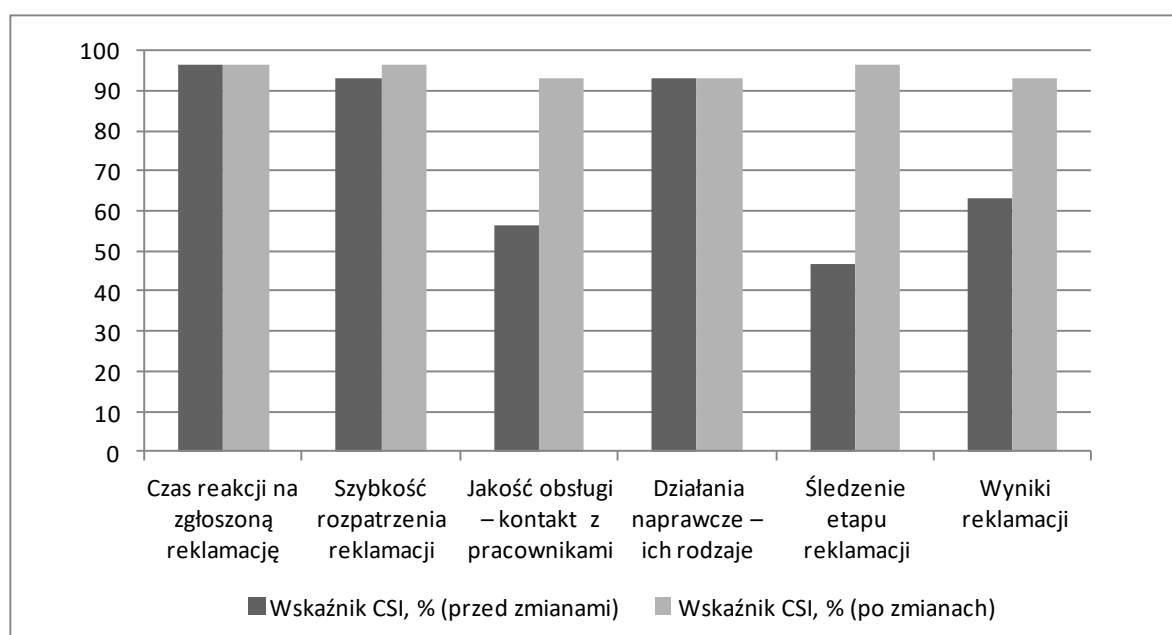
Z zebranych danych wynika, iż ogólny wskaźnik zadowolenia kształtuje się na poziomie 74%. Oznacza to, że klient nie jest do końca zadowolony z procesu reklamacji. W celu wyznaczenia parametrów wymagających natychmiastowej poprawy, opracowano mapę jakości (Rysunek 1). Wynika z niej, że parametrami istotnymi są: jakość obsługi – kontakt z pracownikami, śledzenie etapu reklamacji oraz wyniki reklamacji.

Wśród działań naprawczych wprowadzono różnorodne środki motywacji pracowników z działu obsługi klienta. Rozszerzono także działalność systemu wewnętrznego przedsiębiorstwa, w celu łatwego śledzenia etapu reklamacji oraz opracowano procedurę dotyczącą informowania o możliwych kosztach powstałych w wyniku nieuznania reklamacji.

Po wprowadzeniu zmian ponownie przeprowadzono proces ankietyzacji. Na rysunku 2 przedstawiono zestawienie wartości wskaźnika CSI dotyczących zadowolenia klientów z procesu reklamacji w przedsiębiorstwie X przed zmianami, jak i po wprowadzonych zmianach.



Rysunek 1. Mapa jakości dla wyników ankiet  
 Figure 1. Quality map for the questionnaire results



Rysunek 2. Zestawienie wartości wskaźnika CSI dotyczących zadowolenia klientów z procesu reklamacji przed i po wprowadzonych zmianach  
 Figure 2. Summary of the CSI indicator values for the customer satisfaction with the complaint process before and after the changes introducing

### 3. PODSUMOWANIE

Jakość produktu dotyczy także jakości usług, gdyż produktem można nazwać zarówno wyrób, jak i usługę świadczoną przez dane przedsiębiorstwo. Jakość usług jest stale monitorowana przez konsumentów. Wyrażają oni swoje zadowolenie na podstawie uzyskanych produktów, a także procesu ich dostarczenia. W przypadku niespełnienia



stawianych wymagań, klient jest niezadowolony, a wyrazem braku satysfakcji konsumenta z danego wyrobu jest zgłoszenie reklamacji.

W pracy przeprowadzono analizę i ocenę poziomu zadowolenia klientów ze świadczonych usług przez przedsiębiorstwo X. Ocenę zadowolenia klientów z procesu reklamacji realizowano przy pomocy wskaźnika CSI. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że kilka istotnych obszarów funkcjonowania systemu zarządzania reklamacjami wymaga natychmiastowej poprawy. W tym celu wprowadzono działania naprawcze, m.in. ewidencję reklamacji w systemie SIMPLE.ERP oraz informowanie klientów o możliwości naliczenia opłat w przypadku nieuznania reklamacji. Ostatecznie zaobserwowano, że wprowadzone działania naprawcze korzystnie wpłynęły na zadowolenie klientów, gdyż wskaźnik CSI wzrósł z wartości 74,12 do 94,87%.

## LITERATURA

1. J. Barlow, C. Moller, Reklamacja, czyli prezent. Strategia korzystania z informacji od klienta, PWN, Warszawa, 2001.
2. A. Juszcak, B. Białecka, Proces reklamacji jako narzędzie wspomagające proces produkcji, Zeszyty Naukowe: Organizacja i Zarządzanie 63a (2012) 33-49.
3. R. Wolniak, B. Skotnicka-Zasadzień, Wybrane metody badania satysfakcji klienta i oceny dostawców w organizacjach, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2008.
4. R. Wolniak, B. Skotnicka-Zasadzień, Wykorzystanie metody Servqual do badania jakości usług w administracji samorządowej, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2009.

## **Influence of artificial aging on the mechanical strength of multilayer LDPE foil made with recyclates.**

T. Gliński<sup>a</sup>, M. Bilewicz<sup>b</sup>, T. Tański<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Total-Chem. Sp. z o.o., Węglowa 13, 44-240 Żory, Poland

<sup>b</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials, Gliwice, Poland, email: t.glinski@total-chem.pl

**Abstract:** The article presents the results of strength tests of a three-layer film made of polyethylene with the addition of regranulates RPE and mineral filler CaCO<sub>3</sub>. As part of the research, materials with various levels of RPE and CaCO<sub>3</sub> filling were prepared. In order to simulate the external conditions, the film samples were placed in the accelerated aging chamber, the strength tests were carried out before and after the aging process. In all of the foil after the artificial aging process no visible ones were detected. For samples containing a high content of RPE regranulate, 60% and 45%, an improvement in mechanical properties was found after artificial aging.

**Keywords:** LDPE, multilayer film, regranulate, artificial aging CaCO<sub>3</sub> filler

### **1. INTRODUCTION**

The potential of plastics and components made thereof has meant that they are now used in virtually every industry. Therefore, the requirements for them are differentiated, i.e. regarding mechanical properties, resistance to external factors or service life. Subjecting plastic products to the impact of various external factors (steam, UV radiation, microorganisms, air, etc.), can lead to deterioration or loss of their original functional properties (increase in brittleness, appearance of micro-cracks, color change, etc.). Under the influence of the impact of these factors, reactions that make up the process of aging take place in the polymeric material, namely: depolymerization, destruction, degradation (chemical, thermal, biological, mechanical, photochemical), as well as crosslinking and oxidation (thermo-oxidation). These processes directly affect the quality and service life (lifespan) of the polymeric materials. Changes in properties in products made from polymeric plastics can occur during processing, storage and use. Therefore, it is important to have knowledge of how long and under what conditions plastic products can be stored and used with minimal deterioration of their properties. [15, 17, 20, 23]

At present, an important aspect of the production of polymeric materials is the need to use in their manufacture so-called recyclates, i.e. materials of post-recycled origin, which have reduced properties compared to those of virgin materials. Therefore, it seems particularly

important to verify the effect of external conditions on the properties of such products. Products made from virgin materials can be protected against the negative impact of external conditions on their properties by using appropriately selected processing technology and stabilizing additives (antioxidants, photostabilizers, UV stabilizers). This is much more difficult in the case of recycled materials, which can be reprocessed (recycled) many times by which they are not as homogeneous and robust as virgin plastics. [15, 17, 18]

Film made of polyethylene is a widely used packaging material, accounting for 40.5% of processed plastics in the EU in 2020. Films are usually part of a larger system that includes the packaging, labeling, protection and storage stages of finished products. Due to the prevalence of polyethylene packaging, which is used worldwide, it is necessary to replace, at least partially, virgin plastic with recycled plastic [1, 5, 6].

Nowadays, when the recycling of plastic products is increasingly important due to established EU and national regulations, it is also necessary to take interest in the problem of aging of plastics repeatedly recycled [2, 6, 9].

The purpose of this article is to determine the changes in the mechanical properties of polyethylene film, produced with an assumed percentage of recycled material, subjected to the process of artificial aging.

## 2. MATERIAL AND TECHNOLOGIES

For the purpose of the study, polyethylene films were prepared by the free blowing method on a 3-layer laboratory line of Labtech Engineering Co., Ltd. Model LF-250 with a screw diameter of 20 [mm] and a ratio of  $L/d = 30$ . The distribution of layers A-B-C was assumed in the proportion of 20-60-20 %.

Layers arrangement [Figure 1].

Extruder A - 20% - outer layer cladding

Extruder B - 60% - middle layer core

Extruder C - 20% - outer layer cladding

The thickness of the prepared films is 0.11 mm.

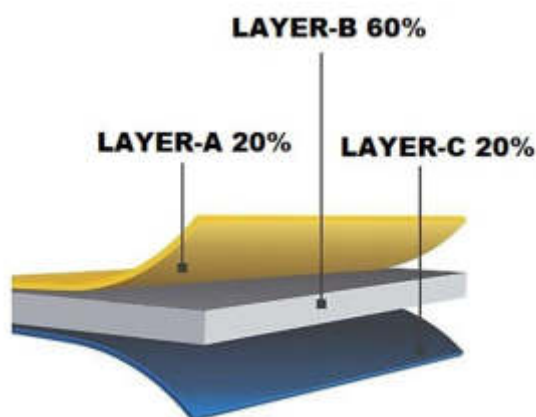


Figure 1 Layout of 3-layer foil. [5]

The base for the preparation of mixtures was the recipe [Table 1], currently used at Total-Chem Sp. z o.o., for the production of films of the FFS (forming, filling and sealing ) type. The

original formula includes only materials of virgin origin. The film made according to this formula has been used at Total-Chem for many years as the primary packaging film used on automated packaging lines.

Five blends were prepared for the experiment. One reference E.I.1 and four blends E.IV.1, E.IV.2, E.IV.3, E.IV.4, which were developed on the basis of preliminary strength tests of films made with core modification with CaCO<sub>3</sub> mineral filler alone in the range of 20%, 30%, 40%, and separately films with "B" layer modified with different amounts of RPE regranulate in the range of 25%, 45%, 60%. By means of preliminaries, the following four formulations were selected:

- E.I.1 - reference blend made according to the original Total-Chem recipe [Table 1].
  - E.IV.1 - layer B- 20% CaCO<sub>3</sub> mineral filler + 60% LDPE regranulate +20% LDPE granulate
  - E.IV.2 - layer B- 30% CaCO<sub>3</sub> mineral filler + 25% LDPE regranulate +45% LDPE granulate
  - E.IV.3 - layer B- 30% CaCO<sub>3</sub> mineral filler + 60% LDPE regranulate +10% LDPE granulate
  - E.IV.4 - layer B- 40% CaCO<sub>3</sub> mineral filler + 45% LDPE regranulate +15% LDPE granulate
- According to the standard, samples were taken from a location where there was no visible damage to the film, and then conditioned at 23<sub>±0,2</sub>°C and relative humidity of 50<sub>±5</sub>%, for 72h.

Table 1 The recipe for use in the production of FFS foil at Total-Chem Sp. z o.o. [own materials]

| 3-LAYER FOIL (COEX) |          |                        |                      |           |             |
|---------------------|----------|------------------------|----------------------|-----------|-------------|
| NAME                | PRODUCER | SYMBOL                 | DENSITY              | MFI       | DOSAGE      |
|                     |          |                        | [g/cm <sup>3</sup> ] | [g/10min] | [%]         |
| <b>EXTRUDER A</b>   |          |                        |                      |           |             |
| LDPE GRANULATE      | SABIC    | 2100NOW                | 0,921                | 0,3       | 30%         |
| mLLDPE GRANULATE    | DOW      | ELITE5400GS            | 0,916                | 1         | 60%         |
| PIGMENT             | GCP      | POLI-CH WHITTE 172 XQN | 2,04                 | >2,0      | 5%          |
| ANTIBLOK            | GCP      | POLI-CH AB 5S          | 0,94                 | >2,0      | 3%          |
| STABILIZER UV       | GCP      | POLI-CH UV22H          | 0,96                 | >2,0      | 2%          |
|                     |          |                        |                      |           | <b>100%</b> |
| <b>EXTRUDER B</b>   |          |                        |                      |           |             |
| LDPE GRANULATE      | SABIC    | 2100NOW                | 0,921                | 0,3       | 95%         |
| PIGMENT             | GCP      | POLI-CH WHITTE 172 XQN | 2,04                 | >2,0      | 3%          |
| STABILIZER UV       | GCP      | POLI-CH UV22H          | 0,96                 | >2,0      | 2%          |
|                     |          |                        |                      |           | <b>100%</b> |
| <b>EXTRUDER C</b>   |          |                        |                      |           |             |
| LDPE GRANULATE      | SABIC    | 2100NOW                | 0,921                | 0,3       | 30%         |
| mLLDPE GRANULATE    | DOW      | ELITE5400GS            | 0,916                | 1         | 60%         |
| PIGMENT             | GCP      | POLI-CH WHITTE 172 XQN | 2,04                 | >2,0      | 5%          |
| ANTIBLOK            | GCP      | POLI-CH AB 5S          | 0,94                 | >2,0      | 3%          |
| STABILIZER UV       | GCP      | POLI-CH UV22H          | 0,96                 | >2,0      | 2%          |
|                     |          |                        |                      |           | <b>100%</b> |

The effects of exposure of the tested materials, after the artificial aging process, were validated visually to confirm the occurrence of any surface microcracks or other visible changes of the tested samples.

The visual inspection concerned the determination of:

- color changes,
- chalking (appearance of a powdery layer on the surface due to polymer degradation),
- changes in shape and dimension

Surface cracks were checked using a magnifying glass with 10x magnification. The evaluation was done according to the table below [Table 2]

*Table 2 Table of visual evaluation of samples after artificial aging [15]*

| GRADE | RATING   |
|-------|--|
| 0     | No microcracks or scratches                      |
| 1     | Fine and flat scratches                          |
| 2     | Moderately extensive and medium-deep microcracks |
| 3     | Extensive and deep microcracks                   |

### 3. RESEARCH TECHNIQUES

#### 3.1. Tensile strength testing

One source of information about the mechanical properties of plastics is the static tensile test. Tensile strength is determined by the chemical bonding forces in the polymer chains, as well as intermolecular forces, or cohesion forces that counteract the movement of macromolecules. Intermolecular forces depend on the average molecular weight and the chemical nature of the individual polymers [19, 21]. Tensile strength also depends directly on the degree of crystallinity of the polymer [20].

For the study, paddle-shaped samples were prepared from  $6_{\pm 0,4}$  mm x 115 mm from the film before and after artificial aging. Five samples were prepared from each recipe. Before testing, the samples were conditioned for 20h at  $23_{\pm 0,2}$ °C and relative humidity of  $50_{\pm 5}$ %.

The static tensile test was conducted in accordance with PN-EN 12311-2:2013-07 method B at a speed of 500mm/min on a Shimadzu AG-Xplus 50 kN testing machine. A minimum of 5 samples were tested in each series. The test was carried out under standardized conditions, i.e., at temperature of  $23_{\pm 0,2}$ °C and humidity of  $50_{\pm 2}$ %, defined by PN-EN ISO 291:2010 [7, 8, 15].

#### 3.2. Artificial aging

The conditions provided by Q-LAB's QUV accelerated aging test chamber reproduce damage caused by sunlight, rain and dew. In a matter of days or weeks, the QUV UV tester can cause damage in a material that, under natural conditions, can appear after several months or even years of exposure. To simulate atmospheric conditions, the material was exposed to alternating cycles of UV light and humidity at a temperature of  $60_{\pm 3}$  °C. In addition, the chamber allows simulation of the characteristics of natural sunlight and artificial radiation using special fluorescent UV lamps in the UVA, UVB and UVC parts of the spectrum, according to EN ISO 4892-3, in the wavelength range of  $\lambda \geq 300$  nm and simulates dew and rain conditions with possible moisture condensation and water spray.



Figure 2 Q-LAB QUV accelerated aging test chamber [9]

Test procedure: The test was performed without interruption, in repeated cycles [Figure 3].

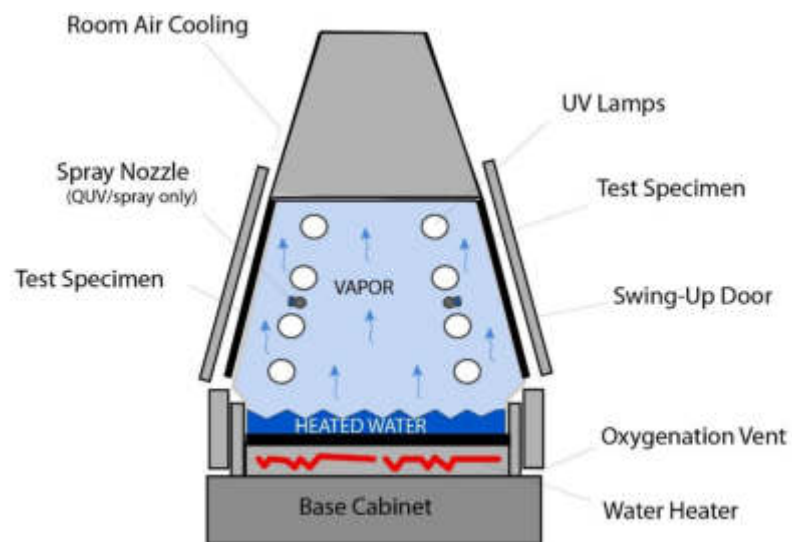


Figure 3. Operation diagram of the Q-LAB QUV accelerated aging test chamber [9]

The duration of the exposure cycle was 360 min and consisted of a dry period of 300 min, during which the samples were exposed to UV fluorescent lamps with an average irradiance of  $45 \pm 5 \text{ W/m}^2$ , followed by a sprinkling (wet) period of 60 min. No irradiation was applied during the wet period. According to EN ISO 4892-3, the temperature of the black standard (BST) during the dry period was  $60 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ . The relative humidity during the dry period was  $10 \pm 5\%$ . Demineralized water with a flow rate of  $10 \pm 3 \text{ liters/min/m}^2$  was used for water spraying. Total test time of 336 h, i.e., 2 weeks.

## 4. RESULTS AND FINDINGS

### 4.1 Resistance to artificial aging by prolonged exposure to UV light

All films placed in the aging chamber were visually evaluated. The results of the evaluation are shown in the table below [Table 3].

Table 3 Results of tests of samples after artificial aging

| Property tested                        | Research method.                               | Sample test results:  |   |   |   |   |
|--|--|---|---|---|---|---|
|  |  | E.I.1   | E.IV.1  | E.IV.2  | E.IV.3  | E.IV.4  |
| Defects visible after artificial aging | PN-EN 1297:2006 (336h/60° C/ dry + wet period) | The sample did not change its color, shape and dimensions.<br>Cracks: Grade 0 - no cracks and no scratches. | The sample did not change its color, shape and dimensions.<br>Cracks: Grade 0 - no cracks and no scratches. | The sample did not change its color, shape and dimensions.<br>Cracks: Grade 0 - no cracks and no scratches. | The sample did not change its color, shape and dimensions.<br>Cracks: Grade 0 - no cracks and no scratches. | The sample did not change its color, shape and dimensions.<br>Cracks: Grade 0 - no cracks and no scratches. |

It was confirmed that in all analyzed samples, no visible defects were detected after the artificial aging process. The samples were qualified for the second stage of strength testing.

### 4.2 Strength testing

The following tables show the tensile stress for the samples without artificial aging [Table 4] and after artificial aging [Table 5].

Table 4 Mechanical properties in tension along the extrusion direction test before artificial aging - tensile stress, [N / mm<sup>2</sup>]

| Property tested  | Research method.               | Sample test results: |        |        |        |        |
|--|--------------------------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|
|  |                                | E.I.1                | E.IV.1 | E.IV.2 | E.IV.3 | E.IV.4 |
| Tensile stress, N / mm <sup>2</sup> along before aging | PN EN 12311-2:2013-07 Method B | 19,1                 | 16     | 17,5   | 14,2   | 12,4   |
|  |                                | 19,3                 | 15,1   | 17,5   | 13,8   | 12,9   |
|  |                                | 19,9                 | 15     | 14,5   | 12,5   | 14,2   |
|  |                                | 17,5                 | 16,7   | 13,7   | 13,6   | 14,9   |
|  |                                | 15,6                 | 20,1   | 18     | 12,7   | 13,1   |
| average value, N/mm <sup>2</sup>                       |                                | 18,28                | 16,58  | 16,24  | 13,36  | 13,5   |
| standard deviation, N/mm <sup>2</sup>                  |                                | 1,7                  | 2,1    | 2,0    | 0,7    | 1,0    |

Table 5 Mechanical properties in tension along the extrusion direction, test after artificial aging - tensile stress, [N/mm<sup>2</sup>]

| Property tested                                     | Research method.                  | Sample test results: |        |        |        |        |
|---|-----------------------------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|
|   |                                   | E.I.1                | E.IV.1 | E.IV.2 | E.IV.3 | E.IV.4 |
| Tensile stress, N/mm <sup>2</sup> along after aging | PN EN 12311-2:2013-07<br>Metoda B | 18,2                 | 15,9   | 17,1   | 14,6   | 14,3   |
|   |                                   | 16,9                 | 17     | 16,6   | 16,6   | 14,7   |
|   |                                   | 18,6                 | 14,5   | 15,4   | 16,8   | 14,4   |
|   |                                   | 18,9                 | 14,8   | 16,2   | 14,1   | 19,6   |
|   |                                   | 19,6                 | 16,3   | 13     | 14,5   | 15,4   |
| average value, N/mm <sup>2</sup>                    |                                   | 18,44                | 15,7   | 15,66  | 15,32  | 15,68  |
| standard deviation, N/mm <sup>2</sup>               |                                   | 1,0                  | 1,0    | 1,6    | 1,3    | 2,2    |

The following tables show the percentage elongation at break for the films before artificial aging [Table 6] and after artificial aging [Table 7].

Table 6 Plastic properties when stretching along the extrusion direction, test before artificial aging - elongation at break [%]

| Property tested                                 | Research method.                  | Sample test results: |        |        |        |        |
|---|-----------------------------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|
|   |                                   | E.I.1                | E.IV.1 | E.IV.2 | E.IV.3 | E.IV.4 |
| Elongation at break,% longitudinal before aging | PN EN 12311-2:2013-07<br>Metoda B | 207,1                | 194,8  | 218,4  | 212,9  | 211,9  |
|   |                                   | 194,8                | 206,1  | 199,8  | 198,2  | 220,4  |
|   |                                   | 221,1                | 209,3  | 170,8  | 154,7  | 214,1  |
|   |                                   | 213,8                | 240,7  | 159,8  | 195,9  | 225,5  |
|   |                                   | 174,8                | 304,5  | 249,2  | 176,9  | 208,1  |
| average value, N/mm <sup>2</sup>                |                                   | 202,32               | 231,08 | 199,6  | 187,72 | 216    |
| standard deviation, N/mm <sup>2</sup>           |                                   | 18,2                 | 44,4   | 36,1   | 22,5   | 6,9    |

Table 6 Plastic properties when tensile along the extrusion direction, test after artificial aging - elongation at break [%]

| Property tested                                | Research method.                  | Sample test results: |        |        |        |        |
|--|-----------------------------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|
|  |                                   | E.I.1                | E.IV.1 | E.IV.2 | E.IV.3 | E.IV.4 |
| Elongation at break,% longitudinal after aging | PN EN 12311-2:2013-07<br>Metoda B | 174,5                | 237    | 195,7  | 221,3  | 260,5  |
|  |                                   | 164,8                | 220,8  | 207,1  | 222,3  | 202,3  |
|  |                                   | 178                  | 213,3  | 207,1  | 233,4  | 204    |
|  |                                   | 198,6                | 207,9  | 206,6  | 194,7  | 279,1  |
|  |                                   | 201,8                | 233,6  | 142,2  | 208,6  | 233,4  |
| average value, N/mm <sup>2</sup>               |                                   | 183,54               | 222,52 | 191,74 | 216,06 | 235,86 |
| standard deviation, N/mm <sup>2</sup>          |                                   | 16,0                 | 12,6   | 28,1   | 14,8   | 34,0   |

The graph below shows a comparison of the average tensile stresses before and after aging [Figure 4]. It was proved that for the reference sample E.I.1, the average value was practically unchanged and took a value of about 18 N/mm<sup>2</sup>. For samples E.IV.1 and E.IV.2, the stress value decreased by 3.5 and 5.3%, respectively, while for samples E.IV.3 AND E.IV.4 it



increased by 14.67 and 16.15%, respectively, compared to the values obtained for samples not artificially aged.

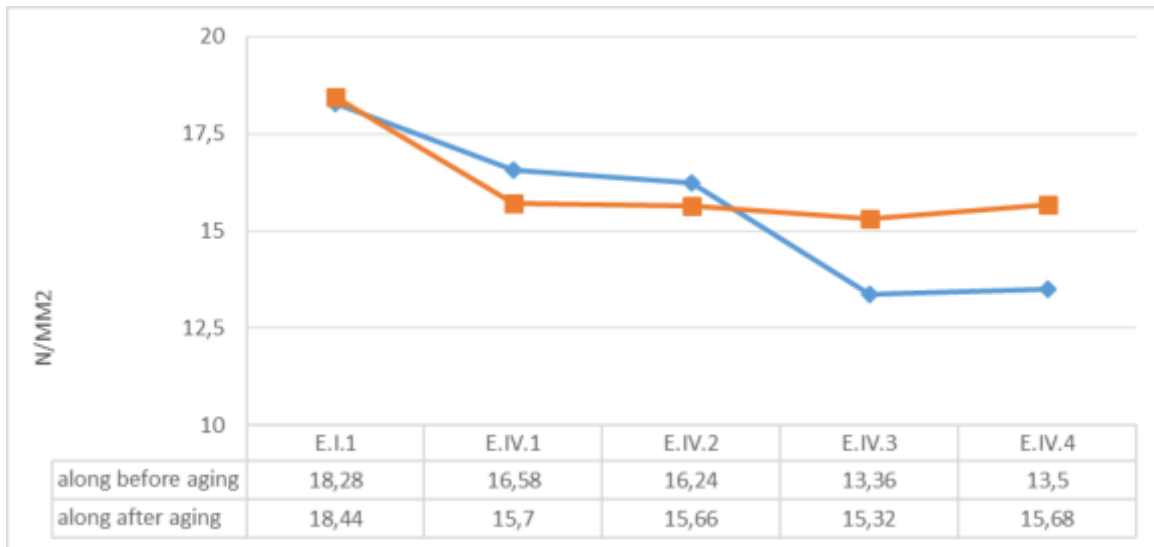


Figure 4 Mean tensile stress [N / mm<sup>2</sup>] - comparison of the graphs before and after aging

The next graph shows a comparison of the average percentage elongation at break before and after aging [Figure 5]. For the reference sample E.I.1, the elongation value is 9.28% lower compared to the value of the sample before aging. For E.IV.1 and E.IV.2 samples, the stress value decreased by about 3.8%, while for samples E.IV.3 and E.IV.4 it is higher than before artificial aging by 15.09 and 9.19%, respectively.

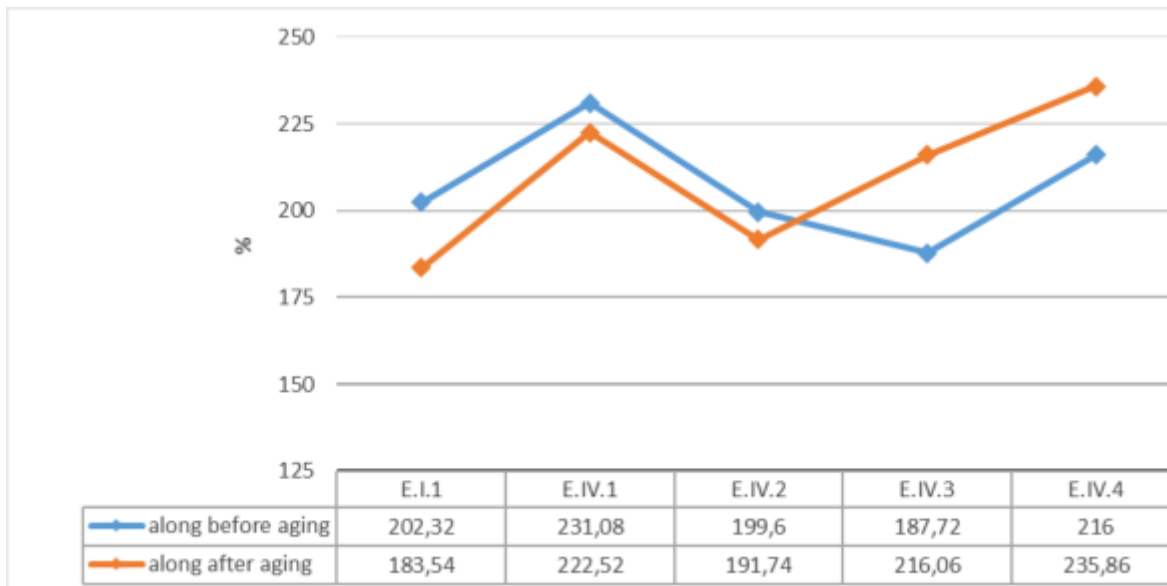


Figure 5 Average elongation at break [%] - comparison of the graphs before and after aging

### 4.3 Conclusions

The tests performed allow us to conclude that the film produced with recycled RPE polymer and CaCO<sub>3</sub>-based mineral filler additive, after the artificial aging test, are characterized by the absence of visible surface defects, i.e. micro-cracks or scratches, color change, chalking or change in dimension or shape. Strength tests, which consisted of evaluating the average tensile stress and elongation at break of the films before and after aging, were a complementary examination to the materials science analysis. The findings for all developed compounds are within the acceptable service tolerance for flexible packaging. The results of the strength tests confirmed that the E.IV.3 blend (containing 30% CaCO<sub>3</sub> filler and 60% PE regranulate) and the E.IV.4 blend (containing 40% CaCO<sub>3</sub> filler and 45% PE regranulate) showed an improvement in average tensile stress by 14.67% and 16.15%, respectively, after the artificial aging process, and an increase in average percentage elongation at break by 15.09% and 9.19%, respectively. This improvement may be due to the so-called secondary crystallization of the polymer, which is a much slower process than primary crystallization, occurring at temperatures below the melting point of the polymer. It covers the spaces between the spherulites (formed in primary crystallization) and leads to an increase in the proportion of the crystalline phase in the sample. Studies have confirmed that aging can lead to an improvement or stabilization of mechanical and plastic properties under static tensile testing along the extrusion direction of the film. Familiarizing oneself with this type of process and learning its characteristics can be crucial, especially for plastics that have recycled materials in their composition.

### REFERENCES

1. Plastics Europe Market Research Group (PEMRG) oraz Conversio Market & Strategy GmbH - <https://plasticseurope.org/pl/resources/market-data/>
2. Ekoprojektowanie opakowań Poradnik przedsiębiorcy – Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości, 2019
3. J. Rabek, Polimery – otrzymywanie, metody badawcze, zastosowanie, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013
4. I. Hyla, Tworzywa sztuczne. Własności – Przetwórstwo – Zastosowanie, Gliwice 2004
5. Bilewicz M., Tański T., Gliński T., Viana J., Structure of N-Layer Film Obtained by Developed Blow Molding Process, Solid State Phenomena Vol 326 (2021) 1662-9779 pp 101-107
6. Stasiak J. Kierunki rozwoju linii do wytłaczania z rozdmuchiwaniem folii, w tym z rozdmuchiwaniem dwustopniowym, 2005
7. PN-EN ISO 291:2010 Tworzywa sztuczne – Znormalizowane warunki klimatyczne kondycjonowania i badania
8. PN-EN ISO 527-3:2019-01 Tworzywa sztuczne - Oznaczanie właściwości przy rozciąganiu - Część 3: Warunki badań folii i płyt
9. <https://www.q-lab.com/pl-pl/products/quv-weathering-tester/quv>
10. Żarczyński A., Dmowska A., Napelniacze mieszanek gumowych, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1970
11. Sikora R., Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych, Wydawnictwo Edukacyjne Zofii Dobkowskiej, Warszawa 1993
12. Szlezyngier W., Brzozowski Z.K., Tworzywa sztuczne, tom I, Wydawnictwo Oświatowe FOSZE, Rzeszów 2012.

13. Szlezyngier W., Brzozowski Z. K., Tworzywa sztuczne, tom II, Wydawnictwo Oświatowe FOSZE, Rzeszów 2012.
14. Szlezyngier W., Brzozowski Z. K., Tworzywa sztuczne, tom III, Wydawnictwo Oświatowe FOSZE, Rzeszów 2012.
15. PN-EN 1297:2006
16. Michalska-Požoga Iwona, Wpływ procesu starzenia na właściwości mechaniczne PE-LD poddanego wielokrotnej recyrkulacji w układzie ślimakowym i ślimakowo-tarczowym, Przetwórstwo Tworzyw 2 (marzec – kwiecień) 2014
17. Michalska-Požoga Iwona, Proces starzenia a właściwości fizykochemiczne LDPE po wielokrotnym wytlaczaniu, Przetwórstwo Tworzyw 3/(141) maj – czerwiec 2011
18. Glišński, T., Tański, T., and Bilewicz, M. 2021. Przemysłowe technologie rozdmuchu materiałów polimerowych. LAB - Laboratoria, Aparatura, Badania 4, 28–31.
19. Kellar K., Ciesielska D., Fizykochemia polimerów – wybrane zagadnienia, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej Poznań, 1997.
20. Żuchowska D., Polimery konstrukcyjne, WNT, Warszawa 2002.
21. Broniewski T., Kapko J., P<sup>3</sup>aczek W., Thomalla J., Metody badań i ocena w<sup>3</sup>acęciwoęci tworzyw sztucznych, WNT, Warszawa 2000.
22. D Sobków, J Barton, K Czaja, M Sudoł, B Mazoń, Badania odporności materiałów na działanie czynników środowiska naturalnego CHEMIK 2014, 68, 4, 347–354
23. Michalska-Požoga: Warunki starzenia tworzyw polimerowych. Materiały konferencyjne XIV Profesorskich Warsztatów Naukowych, Politechnika Rzeszowska, Krasieczyn 2009, str. 99-102.



13 czerwca 2022  
Gliwice - Wisła

KATEDRA MATERIAŁÓW INŻYNIERSKICH I BIOMEDYCZNYCH  
WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY  
POLITECHNIKA ŚLĄSKA

## MIĘDZYNARODOWA STUDENCKA KONFERENCJA NAUKOWA

### **Influence of calcium carbonate $\text{CaCO}_3$ addition on the tensile strength of the LDPE multilayer film**

T. Gliński<sup>a</sup>, M. Bilewicz<sup>b</sup>, T. Tański<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Total-Chem. Sp. z o.o., Węglowa 13, 44-240 Żory, Poland

<sup>a</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials, Gliwice, Poland  
email: t.glinski@total-chem.pl

**Abstract:** The article presents the influence of calcium carbonate on the mechanical properties of polyethylene (PE) film made on a three-layer laboratory line by the method of blown film extrusion. Humidity was measured with the FMX Hydro Tracer reactor, oxidation induction time with a DSC-100 scanning calorimeter and the grain size of the  $\text{CaCO}_3$  filler under a microscope was checked. The tensile strength of films prepared with different  $\text{CaCO}_3$  content was tested.

**Keywords:** LDPE, film blown film extrusion, chalk filler,  $\text{CaCO}_3$

## **1. INTRODUCTION**

Polyethylene (PE) film due to its properties has been used in many areas of industry. Products created in the extrusion blown film process are mainly used in the packaging industry, construction and agriculture. Due to the very good processing and functional properties, the most commonly used plastics include high and low density polyethylene. [6, 9, 10].

PE film is a widely used packaging material, accounting for 40.5% of processed plastics in the EU in 2020. The diagram below shows data on production from virgin materials - it does not include recycled raw materials [Figure 1] [1].

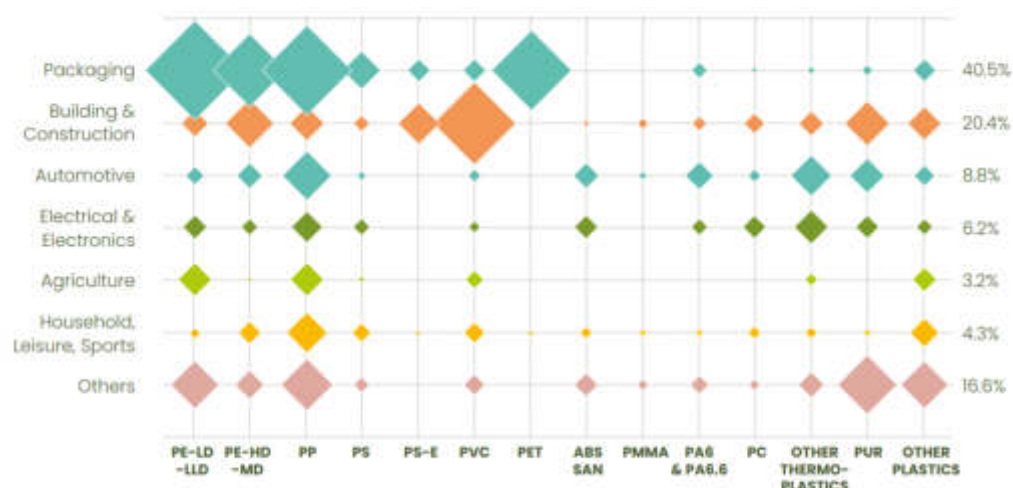


Figure 1 Consumption of primary plastics by type and application. [1]

The promoted production lines are usually equipped with multi-extruder systems connected to an integrated head, allowing the production of multilayer films and equipped with precise dosing systems for production and control of operating parameters, allow for precise design of properties of various film layers. In addition, blown film extrusion production on multi-layer lines allows the use of input materials with different properties and structure. Thanks to such solutions, it is possible to obtain materials with better and functional properties on production lines, as well as to modify plastics with masterbatches, i.e. ready-made material mixtures in the form of granules[3, 4, 5].

## 2. MATERIAL AND TECHNOLOGIES

For the purposes of the research, a polyethylene film was prepared by blowing method on a 3-layer laboratory line of Labtech Engineering Co. Ltd. Model LF-250 with a screw diameter of 20 [mm] and a ratio of  $L/d = 30$ . The distribution of A-B-C layers in the proportion of 25%-50%-25% was assumed. As the base material, granules in LDPE type Sabic 2200 H0 with the properties presented in the table below were used. [Table 1]

Table 1 Basic properties of LDPE SABIC 2200 H0 polyethylene

| PROPERTY  | VALUE | UNIT              |
|---|-------|-------------------|
| Density   | 922   | kg/m <sup>3</sup> |
| Melt Flow Index, MFR (190°C, 2,16kg)              | 0,33  | dg/min            |
| Tensile strength in the longitudinal direction    | 27    | MPa               |
| Elongation at break in the longitudinal direction | 200   | %                 |
| Vicat softening point                             | 98    | C°                |

The properties of the film were marked on a sleeve film with a thickness of 50  $\mu\text{m}$ , embossed at a material mass temperature of 200°C and a blowing rate of 1:3. LDPE Sabic 2200 H0 has high mechanical strength, which is why it is ideal for the production of high-strength transport bags, shrink film for shrinking pallets and many other applications with a recommended film thickness of 70 - 220  $\mu\text{m}$ .

The filler - mineral masterbatch from Wandaa (Germany) – WD-FM 801 properties presented in the table below. [Table 2]

Table 2 Basic properties of the filler WD-FM 801

| PROPERTY                           | VALUE     | JUNIT           |
|------------------------------------|-----------|-----------------|
| Density                            | 1,90-1,95 | $\text{g/cm}^3$ |
| Average particle size ( $D_{50}$ ) | 2         | $\mu$           |
| Calcium carbonate content          | 82        | %               |
| Polymer content                    | 18        | %               |
| Humidity                           | <0,08     | %               |

The WD-FM 801 filler is based on very finely ground calcium carbonate  $\text{CaCO}_3$  with excellent dispersion in the LLDPE matrix. WD-FM 801 is recyclable.



Figure 2 On the left, LDPE SABIC 2200 H0 granules, on the right, filler  $\text{CaCO}_3$  WD-FM 801 [own materials]

The modification of the film consisted in filling the middle layer "B" with a mixture of polymer and chalk filler in variable quantities, leaving in the A and C layer 100% of Sabic 2200 H0 polyethylene.

Prepared by four films with a thickness of 110  $\mu\text{m}$  with different filling in layer "B" mineral filler based on  $\text{CaCO}_3$ . The summary is presented in the table below [Table 3]

Table 3 Degree of filling the layer "B" with  $\text{CaCO}_3$  filler for individual mixtures

| DOSAGE % | SYMBOL  |
|----------|---------|
| 0%       | E.I.1   |
| 20%      | E.III.1 |
| 40%      | E.III.2 |
| 60%      | E.III.3 |

The production was carried out under constant technological conditions - the rotary load of the screws, the temperatures and the extruder zones.

### 3. RESEARCH TECHNIQUES

#### 3.1 Tensile strength test

The static tensile test was carried out in accordance with PN-EN ISO 527-3:2019-01 at a speed of 500mm/min on a Zwick/Roell Z020 testing machine. A minimum of 5 samples were tested from each batch. The test was carried out under standardized conditions, i.e. at a temperature of  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  and at a humidity of  $50\% \pm 2\%$ , specified by the PN-EN ISO 291:2010 standard [7, 8].

The samples were taken from undamaged film, conditioned at  $23_{\pm 0.2}^{\circ}\text{C}$  and a relative humidity of  $50_{\pm 5}\%$ . For 24 h.

#### 3.2. Tests of the chalk filler WD-FM 801

Moisture measurement: with moisture content in the sample was determined using FMX HydroTracer equipment at  $160^{\circ}\text{C}$ .

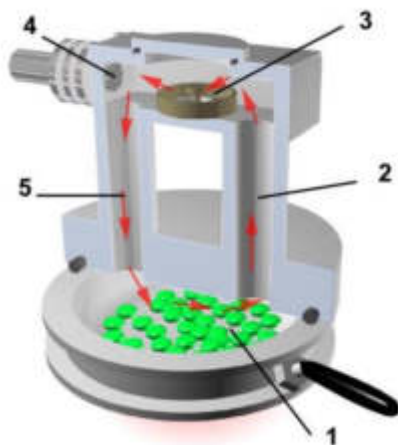


Figure 3 Cutaway view of the reactor FMX HydroTracer [17]

Measurement principle:

1. The test material is weighed and placed on a heated tray to evaporate the water
2. Water vapor rises to the top of the reactor
3. Water vapor reacts with reagent (calcium hydride) according to the equation
 
$$\text{CaH}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + 2 \text{H}_2$$
4. Sensor measures hydrogen concentration
5. Cooled, dried gas re-enters the lower part of the reactor

ASTM D3895 oxidation induction time of the ICU: made for a DSC-100 scanning calorimeter. Oxidation time is obtained after heating the sample to  $210^{\circ}\text{C}$  for 90 minutes in an oxidizing atmosphere ( $\text{O}_2$ , rate 20ml/min). [17]

The grain size of the filler WD-FM 801 was verified using the FEI QUANTA 650 FEG ESEM scanning electron microscope.

## 4. RESULTS AND CONCLUSIONS

### 4.1. Tensile strength test

Test performed for the reference film E. I.1 and for other prepared films in the direction of the crossbars to the direction of extrusion.

The diagrams [Figure 4] show tensile diagrams for a minimum of 5 samples for each of the prepared films.

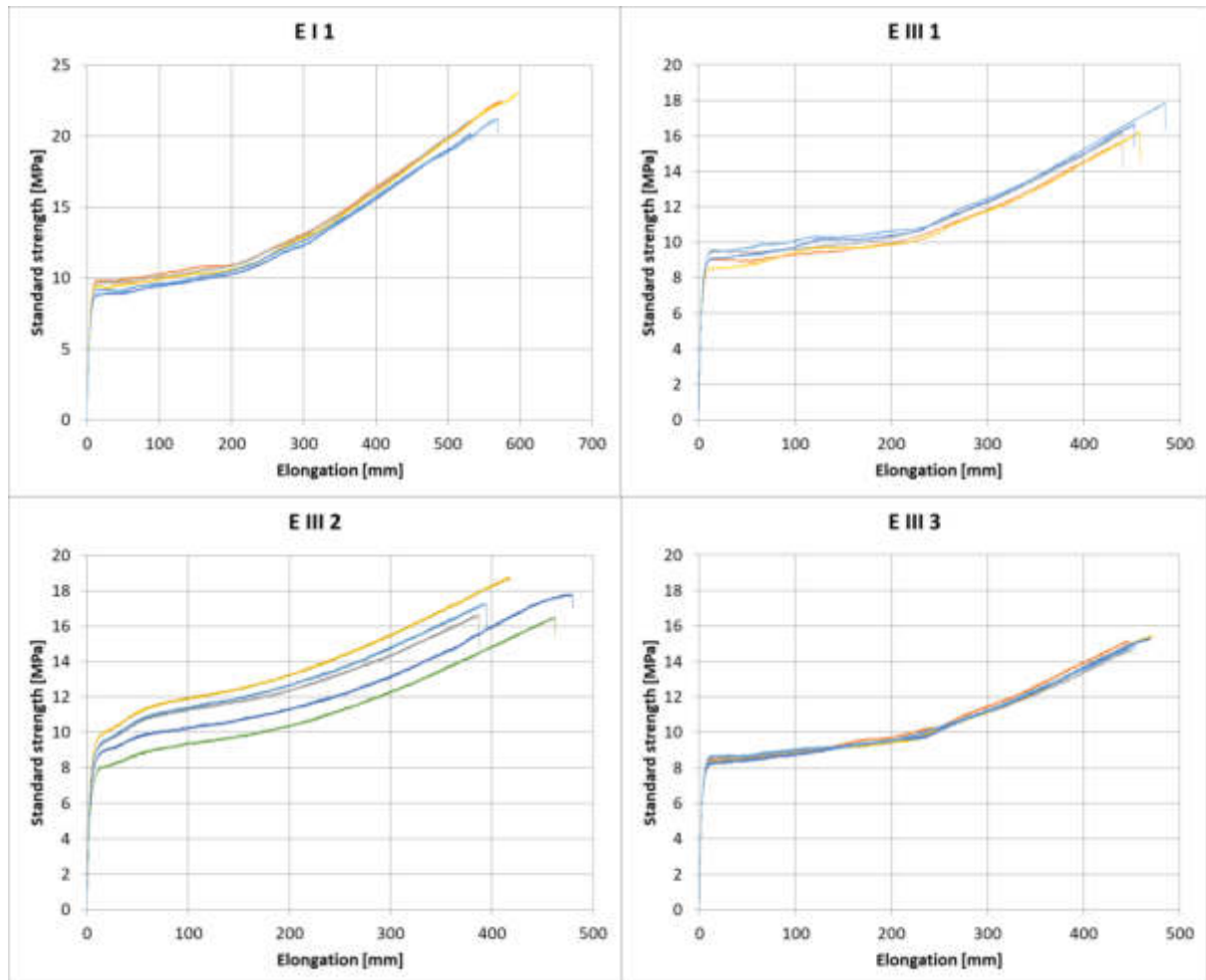


Figure 4 Graph of the static tensile test for specimen E.I.1, E.III.1, E.III.2, E.III.3

The results of the static tensile test are shown in table [4] and in diagram [Figure 5]



Table 4 Summary of average results of a static tensile test.

| <b>E.I.1</b>   | <b>E.III.1</b>  | <b>E.III.2</b>  | <b>E.III.3</b>  |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $R_m$          | $R_m$           | $R_m$           | $R_m$           |
| MPa            | MPa             | MPa             | MPa             |
| <b>21,3346</b> | <b>16,53315</b> | <b>17,37845</b> | <b>15,13677</b> |

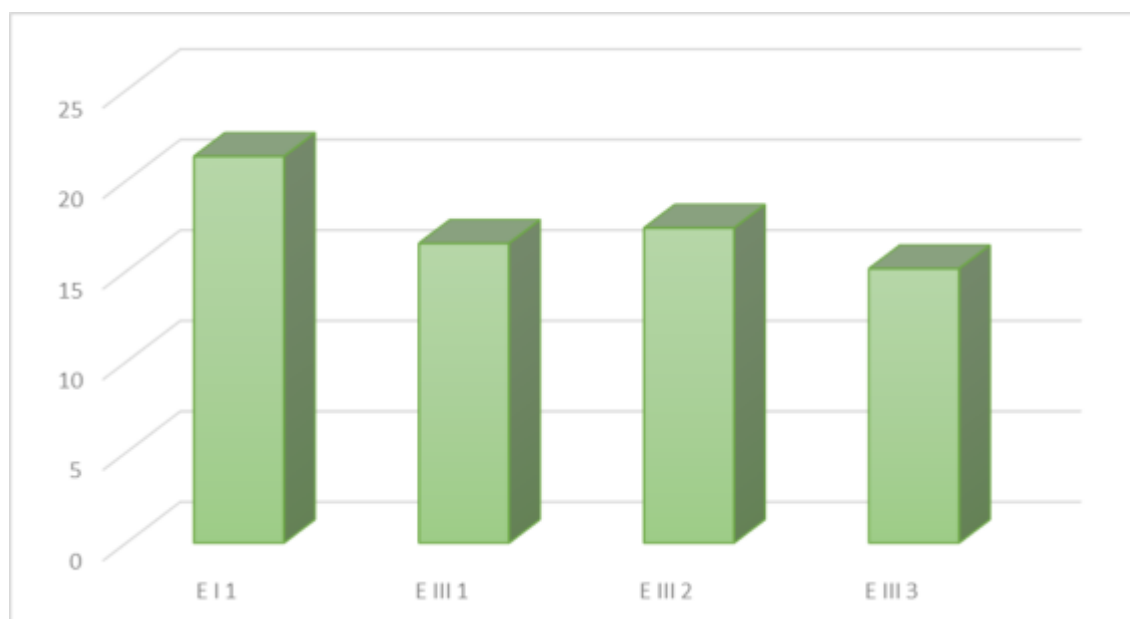


Figure 5 Summary of average results of a static tensile test.

#### 4.2. Properties of Ca CO<sub>3</sub> filler

The results of the tests carried out: humidity measurement, ICU oxidation time and verification of grain size are summarized in the table [Table 5]. Figure [Figure 6] shows the SEM image of the WD-FM 801 filler taken with the FEI QUANTA 650 FEG ESEM microscope at x70 magnification [Figure 7] shows the SEM image of the WD-FM 801 filler at x 1500 magnification, on which the grain sizes are marked.

Table 5 Test results for WD-FM 801 filler

| <b>PROPERTY</b>                 | <b>VALUE</b> | <b>UNIT</b> |
|---------------------------------|--------------|-------------|
| <b>Oxidation induction time</b> | 0,20         | Min         |
| <b>Maximum particle size</b>    | 28,15        | μ           |
| <b>Humidity</b>                 | 0,09         | %           |

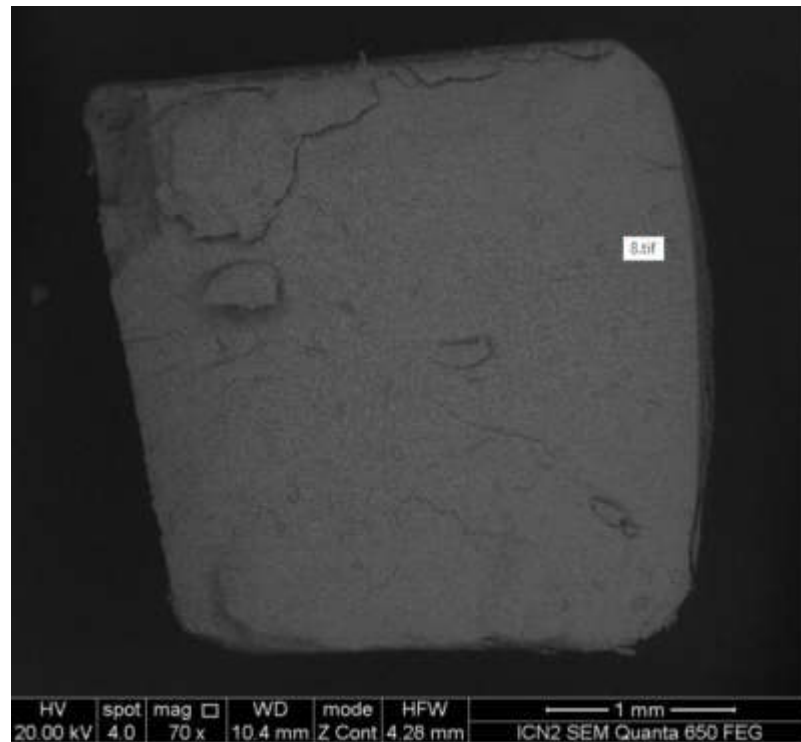


Figure 6 SEM photo of WD-FM 801 filler magnification x70

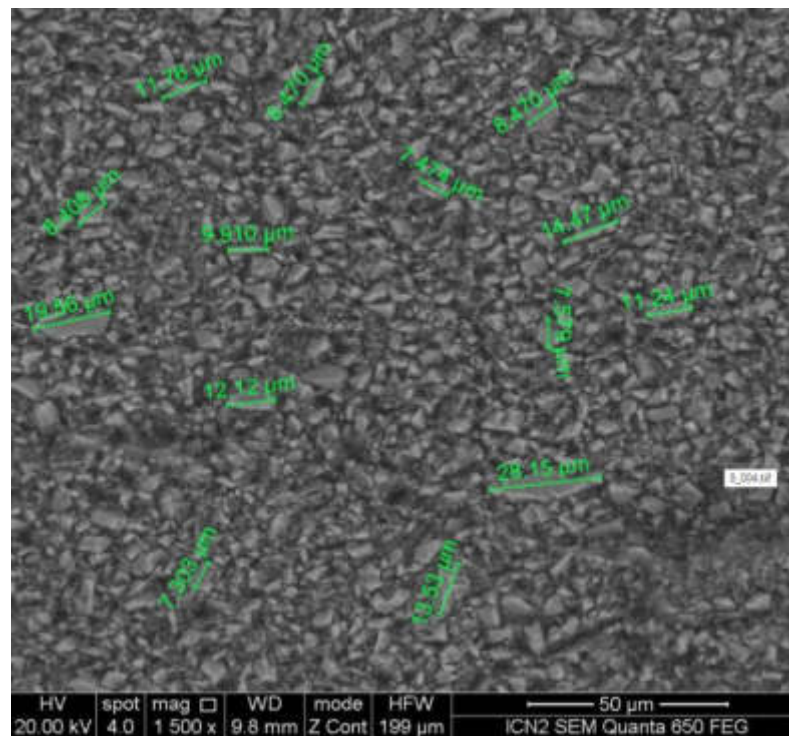


Figure 7 SEM photo of WD-FM 801 filler magnification x1500

### 4.3 Conclusions

The examination and observations allow us to conclude that with an increase in the amount of WD-FM 801 filler in the prepared mixtures, tensile strength may decrease for foil: E.III.1 by 22.50%, E.III.2 by 18.54%, E.III.1 by 29.05%,.

Verification of the chalk filler showed large differences in grain size. The manufacturer declared an average particle size of 2  $\mu\text{m}$  in the SEM x1500 image, grains in the range of 7.703 – 28.15  $\mu\text{m}$  can be seen. Most grains have a diameter of more than 2  $\mu\text{m}$ . It can be concluded that the grain size of  $\text{CaCO}_3$  has a negative effect on the tensile strength of the film in the transverse direction for extrusion. Grains larger than 10  $\mu\text{m}$  can have a particularly negative impact. Tests shall be carried out on a  $\text{CaCO}_3$  filler with a lower grain size.

### REFERENCES

1. Plastics Europe Market Research Group (PEMRG) Conversio Market & Strategy GmbH - <https://plasticseurope.org/pl/resources/market-data/>
2. Ekoprojektowanie opakowań Poradnik przedsiębiorcy – Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości, 2019
3. J. Rabek, Polimery – otrzymywanie, metody badawcze, zastosowanie, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013
4. I. Hyla, Tworzywa sztuczne. Własności – Przetwórstwo – Zastosowanie, Gliwice 2004
5. Bilewicz M., Tański T., Gliński T., Viana J., Structure of N-Layer Film Obtained by Developed Blow Molding Process, Solid State Phenomena Vol 326 (2021) 1662-9779 pp 101-107
6. Stasiak J. Kierunki rozwoju linii do wytłaczania z rozdmuchiwaniem folii, w tym z rozdmuchiwaniem dwustopniowym, 2005
7. PN-EN ISO 291:2010 Tworzywa sztuczne – Znormalizowane warunki klimatyczne kondycjonowania i badania
8. PN-EN ISO 527-3:2019-01 Tworzywa sztuczne - Oznaczanie właściwości przy rozciąganiu - Część 3: Warunki badań folii i płyt
9. Łoziński J., Tworzywa sztuczne wzmacniane włóknem szklanym, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1962.
10. Żarczyński A., Dmowska A., Napelnicze mieszanek gumowych, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1970
11. Sikora R., Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych, Wydawnictwo Edukacyjne Zofii Dobkowskiej, Warszawa 1993
12. Szlezyngier W., Brzozowski Z.K., Tworzywa sztuczne, tom I, Wydawnictwo Oświatowe FOSZE, Rzeszów 2012.
13. Szlezyngier W., Brzozowski Z. K., Tworzywa sztuczne, tom II, Wydawnictwo Oświatowe FOSZE, Rzeszów 2012.
14. [http://www.folia.com.pl/index.php?go=aktualnosci&&id\\_aktualnosci=97](http://www.folia.com.pl/index.php?go=aktualnosci&&id_aktualnosci=97)
15. Michalska-Požoga Iwona, Wpływ procesu starzenia na właściwości mechaniczne PE-LD poddanego wielokrotnej recyrkulacji w układzie ślimakowym i ślimakowo-tarczowym, Przetwórstwo Tworzyw 2 (marzec – kwiecień) 2014
16. Michalska-Požoga Iwona, Proces starzenia a właściwości fizykochemiczne LDPE po wielokrotnym wytłaczaniu, Przetwórstwo Tworzyw 3/(141) maj – czerwiec 2011
17. [http://www.artec-appareils-essais.eu/content/artec/producten/pdf/hydrotracer-moisture-meter-plastics\\_5.pdf](http://www.artec-appareils-essais.eu/content/artec/producten/pdf/hydrotracer-moisture-meter-plastics_5.pdf)

## Wysokonapełniony kompozytowy filament do zastosowania w technologii druku 3D

M. Gocki <sup>a</sup>, G. Matuła <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Doktorant Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych, ul Towarowa 7a, 44-100 Gliwice; e-mail: [michal.gocki@polsl.pl](mailto:michal.gocki@polsl.pl)

<sup>b</sup> Politechnika Śląska Wydział Mechaniczny Technologiczny, Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych, ul Towarowa 7a, 44-100 Gliwice; e-mail: [grzegorz.matula@polsl.pl](mailto:grzegorz.matula@polsl.pl)

**Streszczenie:** W artykule opisano wytworzenie filamentu kompozytowego do druku 3D, który dzięki obróbce chemicznej i cieplnej zostaje przekształcony w metaliczny materiał porowaty wykonany z proszku żelaza. W artykule został przedstawiony opis procedury wytworzenia filamentu oraz warunki dalszych operacji przetwarzania wytworzonego materiału. Ponadto badania pozwoliły na analizę ilościową oraz jakościową wytworzonego materiału kompozytowego.

**Abstract:** The article describes the production of a composite filament for 3D printing, which is transformed into a metallic porous material made of iron powder by various chemical and temperature operations. The article presents a description of the filament manufacturing procedure and the conditions for further processing of the produced material. In addition, the research allowed for a quantitative and qualitative analysis of the composite material produced.

**Słowa kluczowe:** filament, materiał kompozytowy, materiały porowate, druk 3D.

### 1. WSTĘP

Materiały kompozytowe zawierające tworzywa polimerowe oraz wysoką zawartość proszków metali coraz częściej są wykorzystywane w prototypowaniu gotowych elementów. Takie materiały są wykorzystywane w nowej technologii druku 3D o nazwie MFDM (z ang. Metal fused deposition modeling). Ta technologia nawiązuje do popularnej technologii FDM, czyli nakładania materiału warstwa po warstwie w celu utworzeniu modelu 3D. Jednak w metodzie MFDM wykorzystuje się filamenty wysokonapełnione proszkami metali lub ceramicznymi oraz przeprowadza się dodatkową obróbkę końcową. W celu otrzymania finalnego elementu należy przeprowadzić proces degradacji chemicznej, cieplnej oraz proces spiekania wysokotemperaturowego [1, 2].

Popularne drukowanie bezpośrednio z proszku metalowego odbywa się techniką selektywnego topienia laserem (SLM). Drukarki tego typu charakteryzują się bardzo wysoką

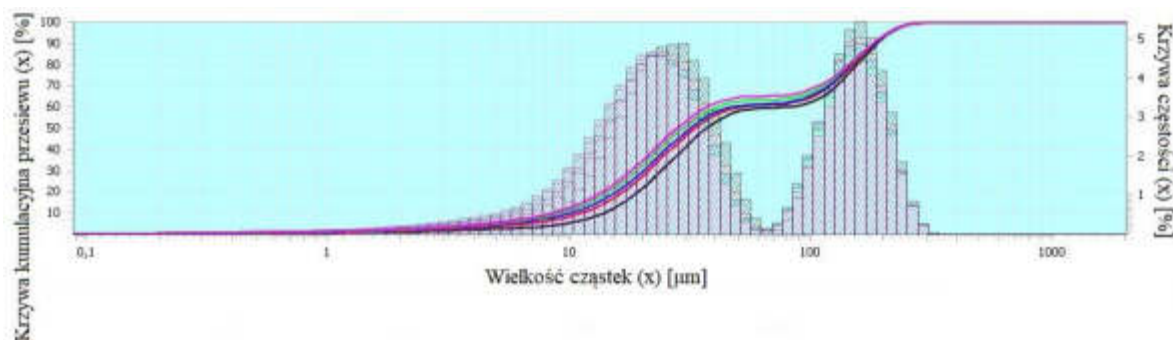
ceną, rzędu kilkudziesięciu tysięcy złotych. Technologia druku MFDM jest alternatywną metodą ponieważ również pozwala na wytwarzanie modeli 3D metodą przyrostową, jednak cena takiego typu drukarki jest wielokrotnie niższa [3, 4].

Niniejsze badania są pierwszym etapem wytworzenia innowacyjnych materiałów kompozytowych do zastosowań użytkowych. Celem badań jest opracowanie materiału kompozytowego zawierającego proszki metali oraz dostosowanego do technologii MFDM. Przedstawione wyniki badań pozwalają ocenić, że dobrany skład ilościowy i jakościowy wytworzonej gęstwy polimerowo-proszkowej jest poprawny i należy kontynuować ten kierunek badań.

## 2. METODYKA I MATERIAŁY DO BADAŃ

W badaniach zastosowano takie polimery jak polimetakrylan metylu (PMMA) (Aldrich), poli(etylen-co-octan winylu) (EVA) (Versalis) oraz polietylen wysokiej gęstości (HDPE) (Bralen). Dodatkowo wykorzystano aceton ( $C_3H_6O$ ) (Chempur, czysty) w roli rozpuszczalnika poli(metakrylanumetylu). Jako napelniacz zastosowano proszek żelaza.

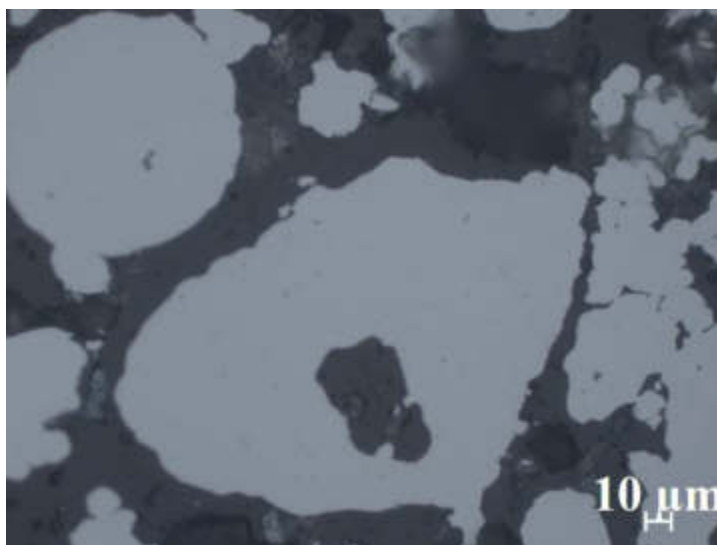
Wielkość cząstek proszku żelaza zbadano przy użyciu laserowego miernika wielkości cząstek Analysette 22 NanoTec plus.



Rysunek 1. Krzywa kumulacyjna przesiewu oraz krzywa częstości dla pięciu pomiarów wielkości cząstek proszku żelaza.

*Figure 1. Screening cumulative curve and frequency curve for five particle size measurements of iron powder.*

Na podstawie pięciu pomiarów możemy stwierdzić, że wykorzystany proszek zawiera dwie główne frakcje o najczęściej występującej wielkości 25  $\mu m$  oraz 106  $\mu m$ . Ponadto w badaniach proszek żelaza został poddany analizie mikroskopowej przy użyciu mikroskopu świetlnego firmy Zeiss.



Rysunek 2. Struktura proszku żelaza obserwowana na mikroskopie świetlnym Zeiss, powiększenie 500x.

*Figure 2. Structural structure observed situation on the microscope with Zeiss magnification, 500x.*

Do wytworzenia filamentu wykorzystano gniotownik oraz mikro-wytlaczarkę firmy Zamak Mercator. Materiał wytworzono w temperaturze 180°C przez 30 min przy prędkości obrotowej ślimaków 20 obr./min gniotownika Zamak Mercator, a następnie wytłoczono materiał w mikro-wtryskarce firmy Zamak Mercator przy temperaturze stref ciepłych ślimaków wynoszącej 185°C oraz prędkości obrotowej ślimaków 10 obr./min. W dalszej części do degradacji cieplnej oraz spiekania zostały użyte piece rurowe firmy Czylok o maksymalnej temperaturze odpowiednio 500 i 1500°C.

### 3. PRZEBIEG BADAŃ

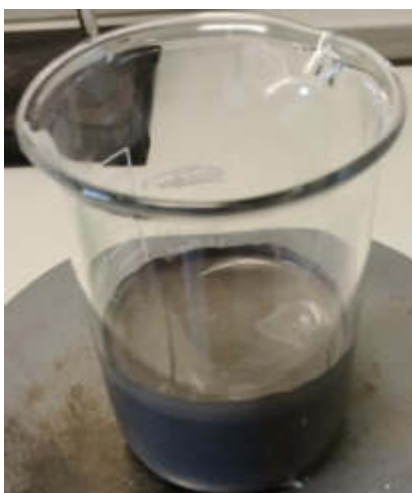
W pierwszym etapie dobrano udziały procentowe wszystkich składników gęstwy polimerowo-proszkowej, następnie odważoną ilość polimetakrylanu rozpuszczono w odpowiedniej ilości acetonu. Aby przyspieszyć proces rozpuszczania polimeru zastosowano mieszadło magnetyczne. Proces mieszania trwał 6h w temperaturze pokojowej (25°C). W kolejnym etapie odpowiednia ilość proszku żelaza została wsypana do mieszaniny polimeru oraz rozpuszczalnika. Po dokładnym wymieszaniu proszku oraz roztworu rozpuszczonego polimeru jednofazową mieszaninę wylano na gumową tackę. Gęstwą polimerowo-metalową należało poddać odparowaniu rozpuszczalnika przez 24h. Następnie do rozgrzanego gniotownika (180°C) dodano odważony kopolimer EVA oraz polimer HDPE. Po tym jak masa polimerowa została wymieszana w gniotowniku dodano przygotowaną wcześniej gęstwą polimerowo-metaliczną. Po dokładnym wymieszaniu wszystkich składników w czasie 30-minut, przygotowany materiał przeniesiono do wytlaczarki, w której wytłoczono filament o średnicy ok. 2mm. Próbkę zostały uformowane ręcznie na metalowym podłożu podgrzanym do temperatury 175°C. Do badań wytworzono cztery próbki o dwóch różnych składach ilościowych poszczególnych składników. Udziały objętościowe składników przedstawiono w poniższej tablicy.

Tablica 1 Udziały składników poszczególnych materiałów.

Table 1. Contribution of components of individual materials.

| Składnik | Udział składnika [%] |    |
|----------|----------------------|----|
|          | A                    | B  |
| PMMA     | 15                   | 15 |
| EVA      | 25                   | 30 |
| HDPE     | 10                   | 5  |
| Żelazo   | 50                   | 50 |

W celu otrzymania materiału metalowego w końcowej fazie procesu wytwarzania należy przed spiekaniem usunąć polimerowe lepiszcze. Dlatego w kolejnym etapie przeprowadzono degradację materiału polimerowego znajdującego się w uformowanej ręcznie próbce. Z obu materiałów zostały przygotowane dwie próbki. Próbki A1 i B1 zostały poddane degradacji chemicznej oraz termicznej, natomiast próbki A2 i B2 zostały poddane wyłącznie degradacji termicznej. Degradacja chemiczna była prowadzona w środowisku acetonu przez 72h, natomiast degradację cieplną prowadzono w temperaturze 450°C w atmosferze azotu. Spiekanie wysokotemperaturowe przeprowadzono w temperaturze 1400°C w piecu rurowym w atmosferze gazu ochronnego N<sub>2</sub>-5%H<sub>2</sub>. Proces spiekania w stanie stałym powinien być prowadzony w temperaturze równej 0,7-0,8 temperatury topnienia proszku w skali bezwzględnej. W wyniku spiekania wysokotemperaturowego następuje zmniejszenie powierzchni cząstek poprzez ich sferoidyzację, tworzenie tzw. szyjek między cząstkami, wygładzenie powierzchni oraz zmniejszenie ilości porów [5-10].



Rysunek 3. Gęstwa zawierająca PMMA oraz proszek żelaza.

Figure 3. Thicknesses containing PMMA and iron powder.

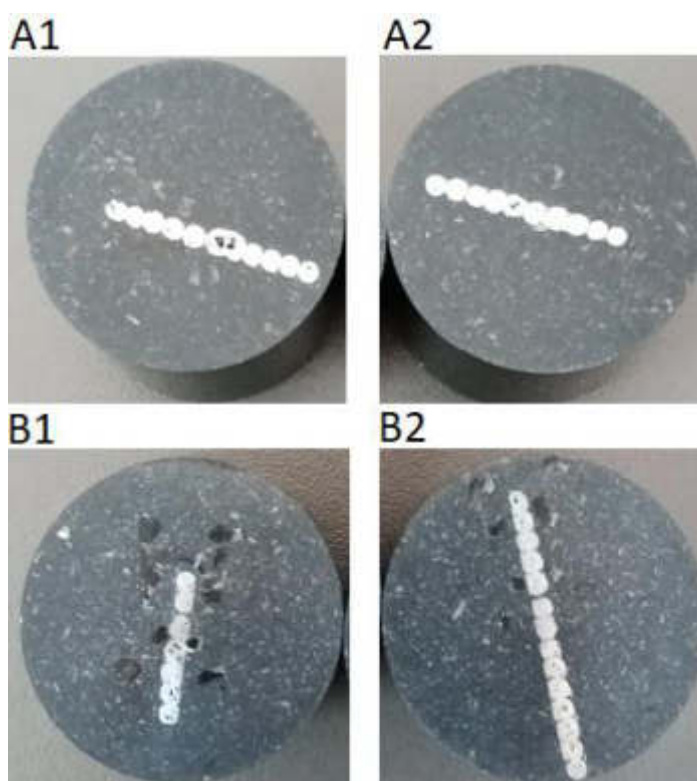


Rysunek 4. Filament wysokonapełniony wytłoczony w mikro wytłaczarce firmy Zamak-Mercator.

*Figure 4. High-filled filament pressed in a Zamak-Mercator micro-extruder.*

#### 4. WYNIKI BADAŃ

W wyniku niniejszych badań eksperymentalnych wytworzono porowate próbki żelaza uzyskane ostatecznie w procesie spiekania. Powstałe próbki przecięto oraz zainkludowano w żywicy termoplastycznej w celu wykonania badań strukturalnych materiału.



Rysunek 5. Widok zainkludowanych próbek, A1 - materiał o składzie A po degradacji chemicznej oraz termicznej, A2 - materiał o składzie A po degradacji termicznej, B1 - materiał o składzie B po degradacji chemicznej oraz termicznej, B2 - materiał o składzie B po degradacji termicznej.

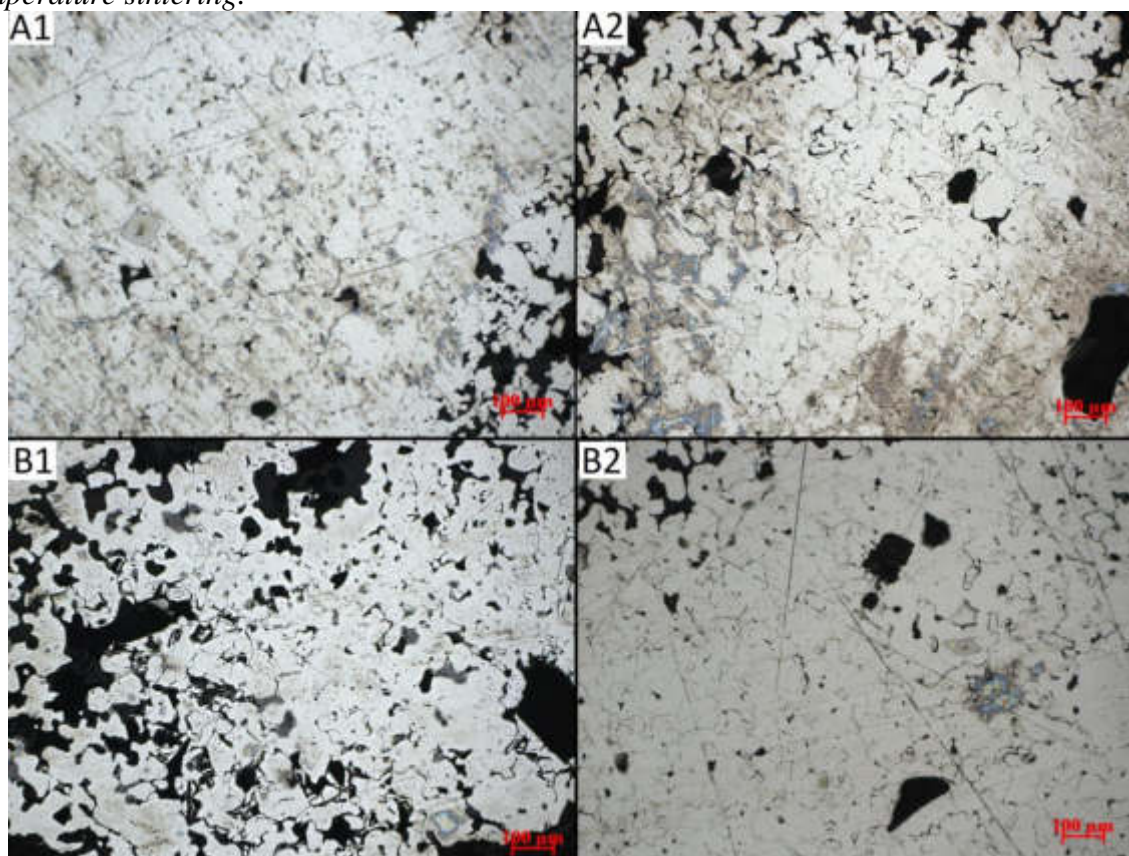
*Figure 5. Photos of the enclosed samples, A1 - material with composition A after chemical and thermal degradation, A2 - material with composition A after thermal degradation, B1 - material with composition B after chemical and thermal degradation, B2 - material with composition B after thermal degradation.*





Rysunek 6. Próbkę z filamentu A po degradacji chemicznej i termicznej oraz po spiekaniu wysokotemperaturowym.

Figure 6. Sample of filament A after chemical and thermal degradation and after high-temperature sintering.



Rysunek 7. Struktura badanych próbek obserwowanych na mikroskopie świetlnym firmy Zeiss, powiększenie 100x, A1 - materiał o składzie A po degradacji chemicznej oraz termicznej, A2 - materiał o składzie A po degradacji termicznej, B1 - materiał o składzie B po degradacji chemicznej oraz termicznej, B2 - materiał o składzie B po degradacji termicznej.

Figure 7. Photos of samples on the Zeiss light microscope, approx. 100x, A1 - material with composition A after chemical and thermal degradation, A2 - material with composition A after thermal degradation, B1 - material with composition B after chemical and thermal degradation, B2 - material composition B after thermal degradation.

## 5. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

W procesie wytwarzania materiału kompozytowego, a następnie etapu degradacji i spiekania wysokotemperaturowego możliwe jest wytworzenie porowatego materiału metalowego o zadanym wcześniej kształcie. Próbki zawierające większą ilość polietylenu wysokiej gęstości (10%) po procesie degradacji termicznej posiadają większą stabilność swojego kształtu niż próbki o mniejszej ilości tego polimeru (5%). Wynika to z wysokiej, końcowej temperatury degradacji polimeru szkieletowego jakim jest HDPE wynoszącej ok. 500°C. Większa ilość tego polimeru gwarantuje większą stabilność kształtu elementów spiekanych [10, 11].

Przy pomocy mikroskopu świetlnego firmy Zeiss wykonano analizę mikroskopową próbek w przybliżeniu 100-krotnym. Na ich podstawie możemy stwierdzić, że niezależnie od składu lepiszcza, warunków degradacji oraz warunków spiekania w badanym materiale występują pory. Prawdopodobnie wynika to z niejednorodności materiału oraz niewystarczającej homogenizacji gęstwy polimerowo-metalicznej. Kolejnym wnioskiem z niniejszych badań jest to, że pory w materiale występują w największej ilości w rdzeniu filamentu. Wynika to z faktu, że degradacja cieplna zachodzi od powierzchni materiału w kierunku jego rdzenia, co powoduje wydzielanie się nadmiernej ilości gazów w rdzeniu filamentu i tworzeniu pęcherzy gazowych widocznych w postaci dużych porów o rozmiarze przekraczającym 100µm. Jako przyczynę powstania dużej ilości małych porów możemy podać wielkość cząstek proszku żelaza. Proszek żelaza zawiera w swojej strukturze cząstki o średniej wielkości 25 µm oraz 106 µm co przedstawiono na rysunku 1 i 2. Materiał taki jest przeznaczony generalnie do prasowania w matrycy zamkniętej, w której po zasypaniu małe cząstki lokują się w przestrzeniach pomiędzy dużymi, a dodatkowo cały zbiór cząstek jest odkształcony plastycznie i zagęszczony podczas prasowania. W przypadku wytwarzania filamentu nie dochodzi do odkształcenia plastycznego i zagęszczenia proszku podczas formowania. Stąd porowatość takiego spieku będzie wyższa w stosunku do spiekanej wypraski. Niewątpliwie sukcesem przedstawionych badań jest poprawny dobór składników polimerowych lepiszcza, które umożliwiają prowadzenie degradacji rozpuszczalnikowej oraz cieplnej, co jest istotną operacją przed końcowym spiekaniem.

Dynamicznie rozwijająca się technologia MFDM wymaga kontynuacji przedstawionych badań wstępnych, w których planuje się w pierwszym etapie zastosować analizę sitową proszku żelaza w celu wyodrębnienia jego mniejszych frakcji, a w dalszej części zastosować proszek sferyczny o lepszej zwilżalności.

## LITERATURA

1. Królikowski M. A., Krawczyk M. B., Obróbka skrawaniem oraz techniki przyrostowe jako integralne etapy procesu wytwarzania hybrydowego z metali w Przemśle 4.0, *Mechanik*, nr 8, 2018, tom 91, str. 769-771.
2. Bałaga D., Kalita M., Siegmund M., Zastosowanie technologii druku 3D do szybkiego prototypowania dysz zraszających, *Maszyny górniczy*, nr 3, 2017.
3. Caban J., Szala M., Kęsik J., Wykorzystanie druku 3D w zastosowaniach automotive, *Autobusy*, nr 6, 2017, str. 573-579.
4. Michta D., Kaczmarska B., Gierulski W., Uniwersalność druku 3D w technologii FDM.

5. Venkatram S., Kim C., Chandrasekaran A., Critical Assessment of the Hildebrand and Hansen Solubility Parameters for Polymers, *J. Chem. Inf. Model.* Nr 59, tom 10, 2019, str. 4188–4194.
6. Krevelen D.W., *Properties of Polymers*, Elsevier, 2009.
7. Mark J., *Physical properties of Polymers Handbook*, wydanie drugie, Springer.
8. Kosmalska D., Kaczmarek H., Malinowski R., Postępy w badaniach degradacji termicznej materiałów polimerowych, *Polimery*, nr 5, tom 64, Maj 2019, str. 317-392.
9. Liu Q., Song S. L., Xi G.X., Catalytic effects of sulfates on thermal degradation of waste poly(methyl methacrylate), *Thermochimica acta*, nr 435, 2005, str. 64-67.
10. Nowacki J., *Spiekanie metali i kompozyty z osnową metaliczną*, 2005, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa.
11. Raji M., Essabir H., Rodrigue D., Morphological, thermal, mechanical, and rheological properties of high density polyethylene reinforced with Illite clay, *Polymer Composites*, nr 5, tom 39, 2016, str. 1522-1533.
12. Mackiewicz E., Wejrzanowski T., Adamczyk-Cieślak B., Polymer–Nickel Composite Filaments for 3D Printing of Open Porous Materials, *Materials*, nr 15, 2022.
13. Paciorek J., *Materiały porowate – Właściwości i zastosowania*, Technika, didaktika technických a přírodovědných předmětů.

## Polimeryzacja chemiczna polipirolu – synteza i badania spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera (FTIR)

M. Gocki <sup>a</sup>, A.J. Nowak <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Doktorant Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych, ul Towarowa 7a, 44-100 Gliwice; e-mail: [michal.gocki@polsl.pl](mailto:michal.gocki@polsl.pl)

<sup>b</sup> Politechnika Śląska Wydział Mechaniczny Technologiczny, Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych, ul Towarowa 7a, 44-100 Gliwice; e-mail: [agnieszka.j.nowak@polsl.pl](mailto:agnieszka.j.nowak@polsl.pl)

**Streszczenie:** W artykule opisano proces chemicznej polimeryzacji pirolu oraz analizę FT-IR powstałych produktów. Widma spektroskopowe wytworzonych substancji porównano z badaniami opublikowanymi w renomowanych czasopismach naukowych. Ponadto artykuł przybliży zagadnienia z zakresu fizykochemii polimerów przewodzących.

**Abstract:** The article describes the process of chemical pyrrole polymerization and the FT-IR analysis of the resulting products. The spectroscopic spectra of the produced substances were compared with the studies published in renowned scientific journals. In addition, the article introduces the issues of the physicochemistry of conductive polymers.

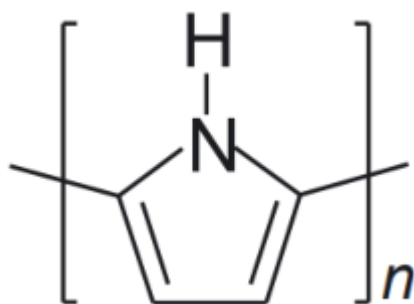
**Słowa kluczowe:** polimery przewodzące, badania materiałowe, elektrochemia, spektroskopia IR.

### 1. WSTĘP

W literaturze naukowej polipirol (PPy) pierwszy raz został wspomniany w 1919 roku. W tym czasie włoscy chemicy A. Angeli i A. Pieroni przeprowadzili syntezę tak zwanej czerni pirolowej. W swojej budowie zawiera ona heterocykliczny układ pirolu. Monomer ten składa się z atomu azotu oraz układu zdelokalizowanych elektronów (Rys. 1). W wyniku elektropolimeryzacji pirolu wytwarza się filmy polimerowe, które posiadają różną barwę w zależności od struktury chemicznej. Filmy wykonane z domieszkowanego polimeru są niebieskie lub czarne w zależności od stopnia polimeryzacji, natomiast filmy wykonane z czystego polimeru są barwy żółtej. Omawiany polimer uzyskuje przewodność elektryczną dopiero po reakcji utleniania (domieszkowania). Jego przewodnictwo elektryczne zależy od warunków i odczynników użytych do procesu utleniania i przeważnie oscyluje pomiędzy 2-100 simens'a na centymetr (S/cm). W celu pozyskania wyższej przewodności materiał domieszkuje się związki organiczne takie jak grupa toluenosulfonylowa [1].

Tradycyjne tworzywa polimerowe charakteryzują się zerowym lub niskim przewodnictwem elektrycznym ze względu na hybrydyzację sp<sup>3</sup> węgla w łańcuchu głównym.

Polimery tego typu stosuje się do produkcji opakowań, części samochodowych, folii, kształtek technicznych, pojemników na żywność oraz farb i lakierów. Istnieje również druga grupa polimerów, która posiada właściwości elektroprzewodzące. Badania nad tą grupą polimerów zostały rozpoczęte w drugiej połowie lat 70 XX wieku. Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid i Hideki Shirakawa wykazali, że niektóre polimery posiadają zdolność do przewodzenia elektrycznego. Za to odkrycie zostali laureatami nagrody Nobla z dziedziny chemii w 2000-nym roku. W swoich badaniach wykazali, że poliacetylen (PAN) domieszkowany jodem wykazuje wysokie wartości przewodnictwa elektrycznego.



Rysunek 1. Wzór strukturalny polipirrolu.

*Figure 1. Structural formula of polypyrrole.*

W elektrochemii występują trzy rodzaje mechanizmów przewodzenia prądu w polimerach. Pierwszy z nich to mechanizm elektronowy. Przewodnictwo elektronowe występuje w polimerach skoniugowanych na skutek przejścia elektronów w pasmach elektronowych. Drugi mechanizm to tzw. przewodnictwo jonowe - występuje w polimerach zawierających w swojej budowie grupy atomów, które po przejściu w formę jonową pozwalają na przewodzenie ładunków elektrycznych. Ostatni mechanizm określany jest mianem przewodnictwa redoksoowego i dotyczy polimerów zawierających w swojej strukturze grupy funkcyjne reagujące ze sobą w reakcjach redukcji i utleniania, które umożliwiają przewodzenie prądu [2-5].

Mechanizm przewodnictwa elektronowego występuje w polimerach, które posiadają w łańcuchu głównym układ wiązań podwójnych. Takimi polimerami są poliacetylen, polianilina, politiofen, polipirrol, poli(3,4-etylenodioksytiofen) oraz polifenylen. Wiązania sprzężone występujące w tych polimerach pozwalają na intensywny transport zdelokalizowanych elektronów w strukturze polimeru. Przewodnictwo prądu za pomocą mechanizmu elektronowego w materiałach polimerowych można porównać z przewodnictwem metali. Wartość przewodnictwa elektrycznego zarówno w polimerach przewodzących jak i w metalach wzrasta wprost proporcjonalnie do zmniejszania się odległości pasma walencyjnego oraz pasma przewodnictwa, a gdy oba pasma zachodzą na siebie przewodnictwo elektryczne jest największe. Przerwa energetyczna między tymi pasmami musi być na tyle niewielka aby pozwoliła na przeskok elektronu [2, 5].

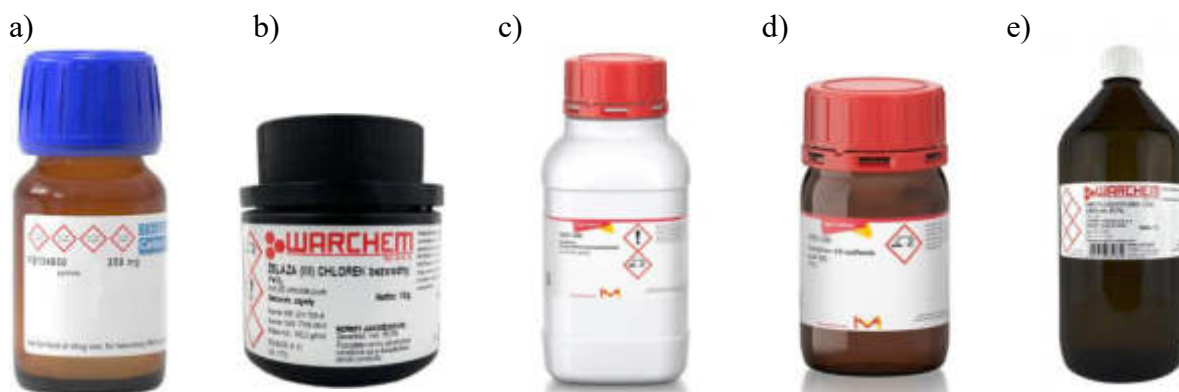
Większość czystych polimerów skoniugowanych jest półprzewodnikami, w celu poprawy ich przewodności – wzrost wartości przewodnictwa elektrycznego, stosuje się ich domieszkowanie. Proces ten polega na odpowiednim dodawaniu lub usuwaniu elektronów z układu. Wyróżnia się dwa rodzaje domieszkowania. Pierwsze nazywane jest p-domieszkowaniem, natomiast drugie n-domieszkowaniem. W domieszkowaniu typu p

występuje kationorodnik. Jego obecność wynika z faktu, że ładunek dodatni jest kompensowany anionem domieszkowanym. W domieszkowaniu typu n w wyniku połączenia ładunku ujemnego oraz kationu domieszkującego powstaje anionorodnik. Polimerami p-domieszkowymi są polianilina i polipirol, natomiast politiofen występuje w obu wyżej wymienionych formach [5, 6].

Celem pracy była synteza polimeru przewodzącego (polipirolu) metodą polimeryzacji chemicznej. Dodatkowo w celu weryfikacji jakościowej pozyskanych materiałów wykonano badania spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera FTIR (z ang. *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*).

## 2. MATERIAŁY DO BADAŃ

Do wykonania polimeryzacji pirolu wykorzystano następujące odczynniki - pirol (BioSystems, extra pure, 99%), chlorek żelaza (III) (Warchem, pure), sól sodowa kwasu dodecylobenzeno sulfonowego (Sigma-Aldrich, pure), kwas kamforosulfonowy (Sigma-Aldrich, pure, 99%) oraz metanol (Warchem, 99%, pure). Chlorek żelaza zastosowano jako inicjator polimeryzacji, metanol zastosowano jako środowisko reakcji natomiast sól sodowa kwasu dodecylobenzosulfonowego oraz kwas kamforosulfonowy pełniły rolę związków domieszkowych (Rys. 2).



Rysunek 2. Wykorzystane odczynniki chemiczne: a) Pirol, czysty, 99%; b) Chlorek żelaza (III) bezwodny, czysty; c) Sól sodowa kwasu dodecylobenzosulfonowego, czysty; d) Kwas kamforosulfonowy, czysty; e) Metanol, czysty.

*Figure 2. Chemical reagents used: Pyrrole, pure, 99%; b) Iron (III) chloride anhydrous, pure; c) Sodium dodecylbenzenesulfonic acid, pure; d) Camphorsulfonic acid, pure; e) Methanol, pure.*

## 3. METODYKA

W ramach badań wykonano, metodą chemicznej polimeryzacji w warunkach laboratoryjnych trzy warianty syntezy polipirolu. Pierwszą zrealizowano w obecności pirolu i chlorku żelaza, drugą przy udziale pirolu, chlorku żelaza (III) oraz soli sodowej kwasu dodecylobenzeno sulfonowego, natomiast w trzeciej syntezie brał udział pirol, chlorek żelaza (III) oraz kwasu kamforosulfonowego.

Etapy syntezy polipirołu i przygotowanie próbek do badań spektroskopii w podczerwieni FTIR (z ang. *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) przedstawiono na rysunku 3. Pierwszy etap syntezy polipirołu polegał na wykonaniu łaźni lodowej (mieszanina woda/lód) oraz umieszczeniu w niej naczyń, w którym będzie prowadzona reakcja. Do naczynia laboratoryjnego wprowadzono 100ml rozpuszczalnika (metanol) oraz substraty reakcji. W pierwszej syntezie jako substraty reakcji wprowadzono 2,5 g pirolu, 14 g chlorku żelaza (III) ( $\text{FeCl}_3$ ), w drugiej syntezie do wymienionych substratów dodano 6,3 g soli sodowej kwasu dodecylobenzeno sulfonowego, natomiast podczas trzeciej syntezy do substratów pierwszej syntezy dodano 4,3 g kwasu kamforosulfonowego.

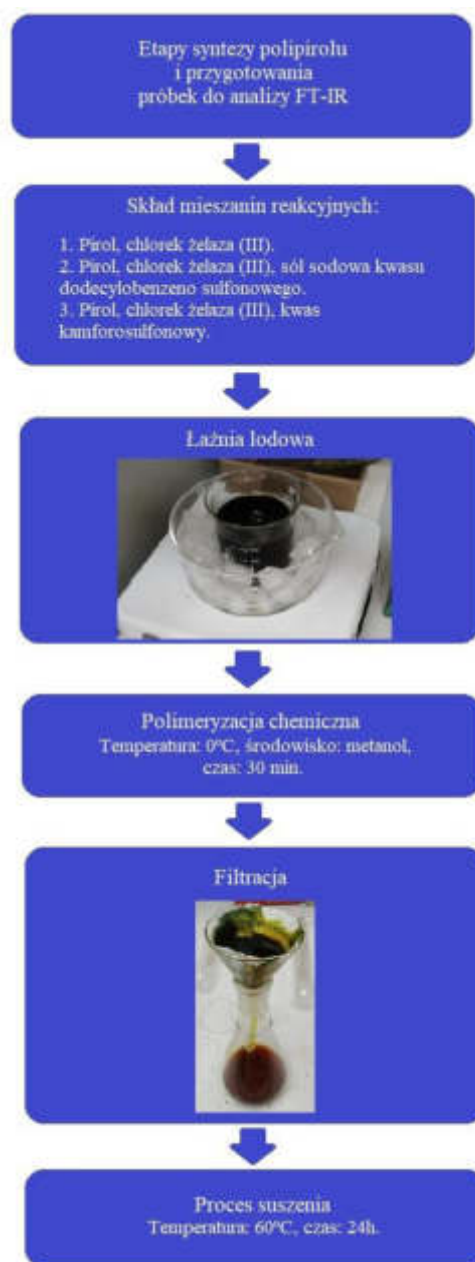


Figure 3. Stages of polypyrrole synthesis and sample preparation for FT-IR analysis.

Polimeryzację chemiczną prowadzono przez 30 minut, po zakończeniu polimeryzacji mieszaninę reakcyjną przeniesiono na lejek z sączkiem w celu filtracji zsyntezowanego polimeru. Po wykonaniu filtracji osad (polimer) na sączku poddano procesowi suszenia. Proces ten przeprowadzono w temperaturze 60°C przez 24h. Po procesie suszenia każdy z polimerów został rozdrobniony przy pomocy moździerza ręcznego. Gdy wszystkie próbki zostały wysuszone, przygotowany materiał poddano analizie FTIR.

Badania spektroskopii w podczerwieni FTIR wykonano w celu ustalenia stabilności strukturalnej poszczególnych składowych oraz nowo opracowanego materiału polimerowego. Badano zależność między strukturą chemiczną otrzymanego polipirolu, a składem mieszaniny reakcyjnej podczas polimeryzacji tego związku. Do badań użyto aparatu Analizator FTIR, Perkin Elmer Two (Rys. 4) zaopatrzonego w przystawkę UATR z kryształem diamentu. Widma zbierano w zakresie 3750  $\text{cm}^{-1}$  i 500  $\text{cm}^{-1}$  z rozdzielczością 4 $\text{cm}^{-1}$  wykonując 16 skany. Do analizy uzyskanych widm wykorzystano oprogramowanie AfterMath.



Rysunek 4. Analizator FTIR, Perkin Elmer Two.

Figure 4. FTIR analyzer, Perkin Elmer Two.

#### 4. ANALIZA WIDM FTIR

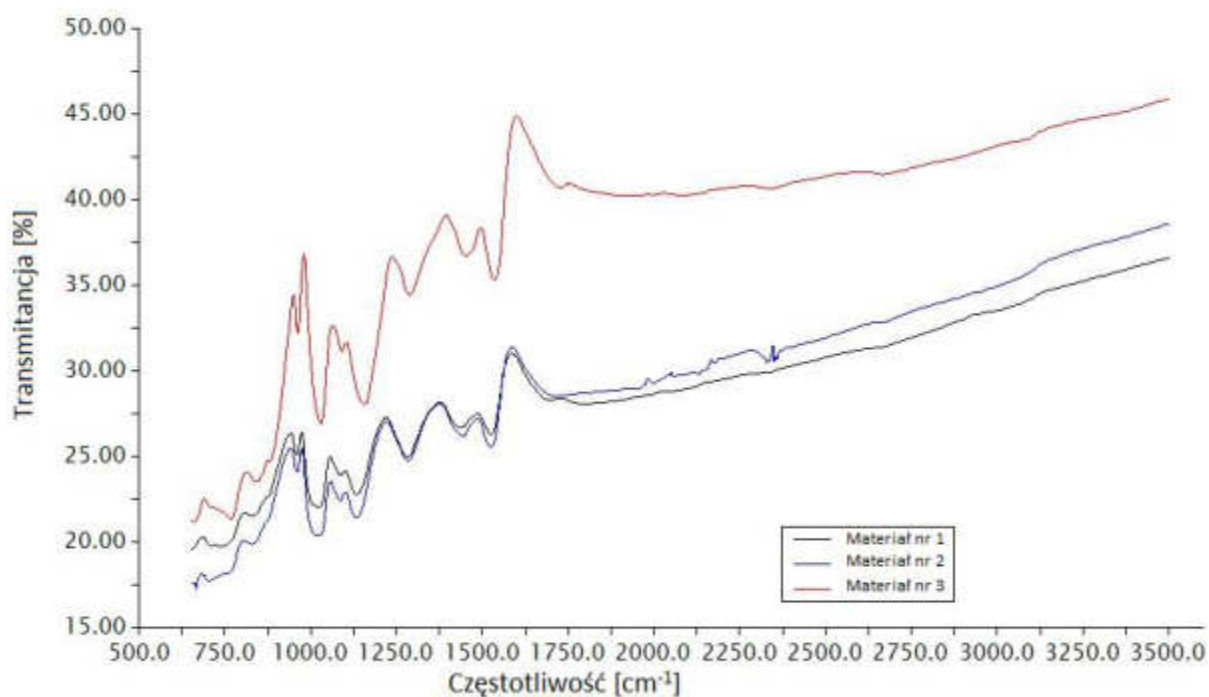
Materiały polimerowe przygotowane w trzech wariantach syntezy przeanalizowano na spektrometrze FTIR. Widma FTIR (Tab. 1 i Rys. 5) ujawniły charakterystyczne piki odpowiadające za poszczególne struktury w badanym polimerze. Pik przy wartości około 788  $\text{cm}^{-1}$  odpowiada za wiązanie pomiędzy atomem węgla a atomem azotu w strukturze pirolu. Występowanie pików przy wartości 1030  $\text{cm}^{-1}$  świadczy o odkształceniu cząsteczki w płaszczyźnie wiązań węgiel – wodór oraz azot wodór. Wartość piku 1291  $\text{cm}^{-1}$  odpowiada za odkształcenie wiązań pomiędzy wodorem a węglem, natomiast piki o częstotliwości 1540  $\text{cm}^{-1}$  oraz 1467  $\text{cm}^{-1}$  odpowiadają za drganie pierścienia aromatycznego zawartego w cząsteczce pirolu. Piki o częstotliwości 1640  $\text{cm}^{-1}$  odpowiadają za charakterystyczne podwójne wiązania pomiędzy atomami węgla. Każdy z wytworzonych polimerów posiada piki w okolicach wymienionych wcześniej liczb falowych (częstotliwościach). Ponadto widma dla każdego z materiałów zostały zarejestrowane przy odmiennej transmitancji [7, 8].



Tabela 1. Wartości pików absorpcji dla widm polipirolu.

Table 1. The values of the absorption peaks for the polypyrrole spectra.

| Piki absorpcji polipirolu [ $\text{cm}^{-1}$ ] |               |               |               |
|--|---------------|---------------|---------------|
| Z literatury [7,8]                             | Materiał nr 1 | Materiał nr 2 | Materiał nr 3 |
| 788  | 776           | 755           | 768           |
| 962  | 960           | 960           | 962           |
| 1036   | 1024          | 1027          | 1031          |
| 1166   | 1135          | 1135          | 1159          |
| 1291   | 1281          | 1284          | 1288          |
| 1540; 1467                                     | 1526; 1440    | 1528; 1446    | 1536; 1453    |
| 1640   | 1690          | -             | -             |



Rysunek 5. Widma FTIR badanych materiałów

Figure 5. FTIR spectra of the tested materials.

## 5. PODSUMOWANIE

Spektroskopia FTIR służy do otrzymywania widm oscylacyjnych, które pozwalają na ustaleniu rodzaju grup funkcyjnych znajdujących się w badanym związku. Metoda ta pozwala zarówno na analizę struktury cząsteczek jak i ich oddziaływania z otoczeniem. Analiza FTIR ma ogromne znaczenie w przemyśle farmaceutycznym, chemicznym oraz polimerowym. Bardzo często jest wykorzystywana do analizy produktu polimeryzacji chemicznej. Widma pozyskane dla trzech wykonanych wariantów syntezy polipirolu w warunkach laboratoryjnych zawierających zarówno czysty polipirol oraz polimer z domieszkami, ujawniły zgodność wytworzonych związków chemicznych z danymi

zamieszczonymi w literaturze. Poszczególne piki na wykresach otrzymanych widm FTIR pokrywały się z tymi zamieszczonymi i omawianymi w innych artykułach naukowych poświęconych syntezie polipirolu.

*Uwagi ogólne:*

*Niniejsze badania zostały zrealizowane w trakcie realizacji pracy dyplomowej z zakresu zastosowania polimerów przewodzących w urządzeniach do magazynowania energii na Katedrze Fizykochemii i Technologii Polimerów Wydziału Chemicznego Politechniki Śląskiej.*

## LITERATURA

1. Seth C., Early history of polypyrrole: The first conducting organic polymer, *Bulletin for the History of Chemistry*, nr 1, tom 40, 2015, str. 40-55.
2. Świżewska M., Polimery elektroprzewodzące – materiały XXI wieku, Nanonet.pl
3. Penczek S., *Chemia polimerów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2002.
4. Jaszcz K., *Technologia Polimerów II, Wykłady*, Katedra Fizykochemii i Technologii
5. *Tworzyw Sztucznych*, Wydział Chemiczny, Politechnika Śląska.
6. Lelek-Borkowska U., Polimery przewodzące prąd elektryczny, *Open AGH E-Podręczniki*
7. Shown I., Ganguly A.: Conducting polymer-based flexible supercapacitor, *Energy Science and Engineering*, 2014.
8. Bahraeian S., Abron K., Pourjafarian F., Study on Synthesis of Poly pyrrole via Chemical Polymerization Method, *Advanced Materials Research*, tom 795, 2013, str. 707-710.
9. Chitte H. K., Bhat N. V., Walunj V. E., Synthesis of Polypyrrole Using Ferric Chloride (FeCl<sub>3</sub>) as Oxidant Together with Some Dopants for Use in Gas Sensors, *Journal of Sensor Technology*, nr 1, 2011, str. 47-56.

## Przygotowanie modelu 3D do procesu wytwarzania techniką addytywną

T. Janczak <sup>b</sup>, E. Jonda <sup>a</sup>, A. Kiljan <sup>a</sup>, Ł. Grabowski <sup>c</sup>, M. Sobek <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, e-mail: anna.kiljan@polsl.pl

<sup>b</sup> Student, Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Mechanika i Budowa Maszyn.

<sup>c</sup> Dream Solutions spółka cywilna; ul. Bojkowska 35a, 44-100 Gliwice.

**Streszczenie:** Celem pracy jest przedstawienie technik druku 3D, jego zalet i wad oraz wybranych narzędzi służących do projektowania cyfrowych modeli trójwymiarowych oraz procesu ich wytwarzania za pomocą technologii przyrostowych.

**Abstract:** The aim of this article is present 3D printing technique, advantages and disadvantages of this method, selected tools for designing digital 3D models and the process of manufacturing by additive technologies.

**Słowa kluczowe:** technologie przyrostowe, druk 3D, przygotowanie modelu, oprogramowanie graficzne.

### 1. WSTĘP

W dobie szybkiego rozwoju nie tylko przemysłu, ale również wielu innych branż, takich jak: budownictwo, motoryzacja, medycyna, druk 3D zaspokaja potrzeby związane z wczesnym etapem powstawania gotowego produktu. Prototypowanie za pośrednictwem technologii addytywnych pozwala wytworzyć element oraz zbadać go pod kątem spełnienia wymagań stawianych przez odbiorcę, m.in.. własności mechanicznych, jakości oraz estetyki wykonania zanim trafi on do produkcji masowej.

Dostęp do drukarek 3D staje się coraz bardziej powszechny, co sprzyja rozwojowi tej technologii i pozwala na wykorzystywanie jej w coraz to bardziej nowatorskich projektach. W przeciwieństwie do klasycznych metod wytwarzania, jakimi są na przykład: wtryskiwanie, czy obróbka skrawaniem, technika przyrostowa charakteryzuje się niskim zużyciem materiału oraz brakiem wytwarzania odpadów poprodukcyjnych, takich jak m.in. wióry. Przekłada się to nie tylko na zmniejszenie kosztów produkcyjnych, ale także wpływa pozytywnie na aspekt ekologiczny [opracowanie własne].

## 2. TECHNIKA DRUKU 3D

Metoda drukowania przestrzennego opiera się na geometrii wirtualnej modelu 3D opracowanej w środowisku komputerowym. Druk w technologii przyrostowej polega na nakładaniu materiału etapami tworząc tym samym kolejne warstwy obiektu rzeczywistego. Wykorzystuje się do tego proces topienia materiału budulcowego, utwardzanie cieczy oraz spiekanie proszków. Materiałami używanymi w technikach addytywnych są między innymi: proszki metali, tworzywa sztuczne, włókna węglowe, drewno, materiały pochodzenia organicznego oraz żywice. Warstwa tworzona jest przy wykorzystaniu maszyn sterowanych numerycznie, które interpretują kod, jaki został wygenerowany za pośrednictwem narzędzi komputerowych na podstawie modelu trójwymiarowego. Parametrem definiującym dokładność maszyny jest na przykład grubość warstwy, z jaką materiał układany jest na stole [1,2].

## 3. ZALETY I WADY DRUKU 3D

Druk 3D staje się coraz bardziej popularny, mimo że o pierwszych urządzeniach tego typu można już było usłyszeć 30 lat temu. Dzisiejsze technologie cyfrowe umożliwiają drukowanie z dużą dokładnością używając różnego typu materiałów. Technika druku 3D rozwija się bardzo szybko, lecz jak każde nowatorskie rozwiązanie oprócz tego, że ma wiele zalet posiada także wady (Tabela 1) [3].

Tabela 1. Zalety i wady druku 3D [3,4]

Table 1. Advantages and disadvantages of 3D printing [3,4]

| ZALETY   | WADY  |
|--|---|
| Sam proces drukowania jest bezobsługowy  | Wysoki hałas emitowany podczas procesu drukowania   |
| Możliwość drukowania elementów ruchomych   | Uplastycznianie, spiekanie czy utwardzanie materiału, z którego drukowany jest model powoduje uwalnianie się niebezpiecznych dla zdrowia substancji lotnych |
| Możliwość wykonywania modeli bez wypełnienia ich wnętrza                           | Uszkodzenia drukarki lub błędy programu podczas drukowania wymagają rozpoczęcia procesu od nowa   |
| Możliwość wykonania pojedynczego elementu bez angażowania całej linii produkcyjnej | Długi czas drukowania dużych lub skomplikowanych przedmiotów  |
| Szeroka gama materiałów, z których można wykonywać druk 3D                         | Niektóre metody drukowania 3D wymagają dodatkowej obróbki wykańczającej po procesie   |

#### 4. MODELOWANIE 3D

Każdy model drukowany za pośrednictwem technologii addytywnych na samym początku musi zostać zaprojektowany (Rysunek 3). Jednym z programów dedykowanych do projektowania wspomaganego komputerowo jest oprogramowanie CAD (ang. Computer Aided Design), które służy do cyfrowego modelowania geometrycznych cech elementu. Umożliwia tworzenie dokumentacji rysunkowej, a także wizualizacji gotowego produktu, co pozwala na szybkie i ekonomiczne prototypowanie przed rozpoczęciem procesu wytwarzania [5].

W dobie Internetu dostęp do gotowych modeli został znacznie uproszczony. Można bez opłat pobrać je i wydrukować na odpowiedniej drukarce 3D. W obecnych czasach projektowanie prostych elementów nie wymaga specjalistycznej wiedzy dotyczącej obsługi skomplikowanych narzędzi informatycznych. Istnieje wiele programów i aplikacji, które w intuicyjny sposób pozwalają na utworzenie modelu trójwymiarowego. Przykładem jest proste w obsłudze oprogramowanie dla początkujących Autodesk Tinkercad. Kolejnym bardziej zaawansowanym, bezpłatnym oprogramowaniem jest Autodeks Fusion 360, które dedykowane jest hobbystom i może posłużyć również do działań w bardziej wymagających projektach [6].

Ostatnią grupą oprogramowań są te w pełni profesjonalne, które zawierają szeroką gamę narzędzi i oferują wiele możliwości, takich jak na przykład: modelowanie parametryczne, modelowanie zespołów, tworzenie rysunków, tworzenie dokumentacji produkcji, symulowanie ruchu, analiza naprężeń itp. [7].

Do najbardziej popularnych, profesjonalnych programów wykorzystywanych w projektowaniu elementów 3D są [opracowanie własne]:

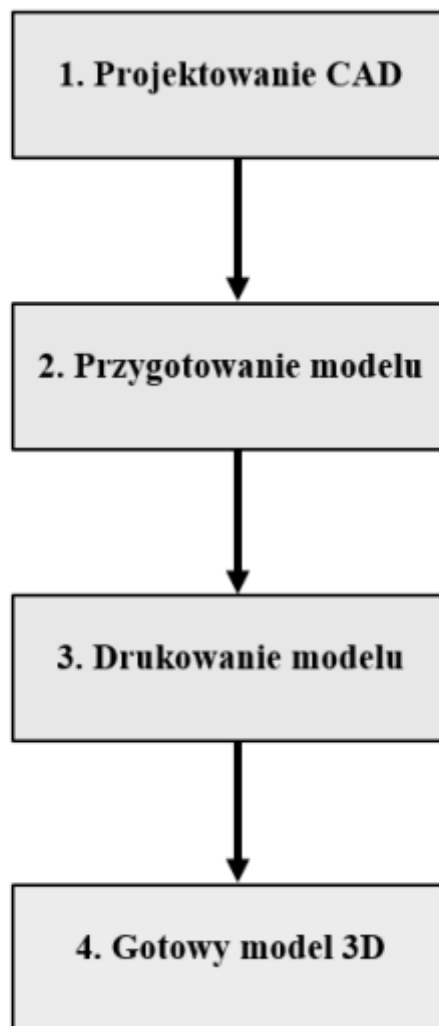
- Autodesk Inventor,
- Siemens NX,
- SolidWorks,
- Solid Edge,
- Catia.

Na Rysunku 1 przedstawiono poszczególne etapy tworzenia elementów trójwymiarowych, począwszy od modelowania komputerowego, kończąc na druku gotowego elementu.

- Krok 1 - polega na wykonaniu w środowisku komputerowym trójwymiarowego modelu przedstawiającego ostateczny kształt produktu.
- Krok 2 - polega na przygotowaniu trójwymiarowego modelu z wykorzystaniem oprogramowania typu CAD. Na tym etapie za pomocą oprogramowania typu slicer ustala się parametry, z jakimi drukowany będzie element. Są to (dla techniki FDM) temperatura dyszy, czyli elementu, który odpowiedzialny jest za zmianę stanu skupienia materiału ze stałego w płynny, temperatura stołu, na którym drukowany jest model, dokładność poszczególnych warstw, ustalenie podpór rodzaj oraz gęstość wypełnienia wnętrza modelu. Program umożliwia

także przeprowadzenie wizualizacji procesu drukowania przed jego rozpoczęciem, co pozwala na naniesienie ewentualnych poprawek.

- Krok 3 - polega na „załadowaniu” gotowego programu w języku maszynowym do pamięci drukarki i uruchomieniu procesu drukowania.
- Krok 4 - polega na oddzieleniu gotowego wydruku od drukarki i ewentualnemu wykonaniu obróbki wykańczającej.



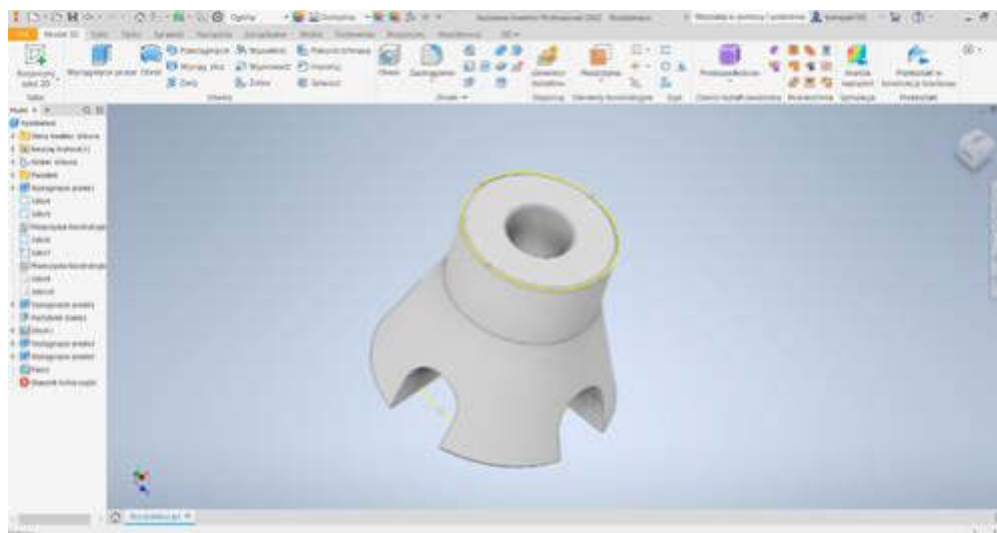
Rysunek 1. Geneza modelu 3D [Opracowanie własne]  
Figure 1. Genesis of the 3D model [Own elaboration]

## 5. PRZYGOTOWANIE WIRTUALNEGO MODELU 3D

Prace nad tworzeniem modelu wirtualnego rozpoczęto od pobrania wymiarów z rzeczywistego modelu bazowego (Rysunek 2) za pomocą suwmiarki cyfrowej, a następnie przystąpiono do pracy w środowisku Autodesk Inventor. Modelowanie odbywało się w etapach, które przedstawiono w Tabeli 2. Gotowy model wirtualny pokazano na rysunku 3.









Rysunek 2. Model wejściowy wykonany z Polietylenu  
*Figure 2. Input model made of Polyethylene*



Rysunek 3. Zrzut ekranu z programu Autodesk Inventor przedstawiający gotowy model  
*Figure 3. Autodesk Inventor screenshot of finished model*

Tabela 2. Etapy tworzenia modelu trójwymiarowego rozdzielacza

Table 2. Steps in creating a 3D model of the distributor

| Etap | Wizualizacja  | Opis  |
|------|---|---|
| 1    |    | Wyciągnięcie walca o średnicy 30 mm na wysokość 40 mm                             |
| 2    |    | Wyciągnięcie kolejnego walca o większej średnicy 45 mm                            |
| 3    |   | Pochylenie ściany walca o większej średnicy pod kątem 19°                         |
| 4    |  | Wykonanie otworu przelotowego o średnicy 12,5 mm wzdłuż głównej osi obrotu figury |
| 5    |  | Wyciągnięcie szczelin o promieniu 6,25 mm i szerokości 12,5 mm                    |
| 6    |  | Wykonanie fazowań 0,5 mm na krawędziach elementu                                  |

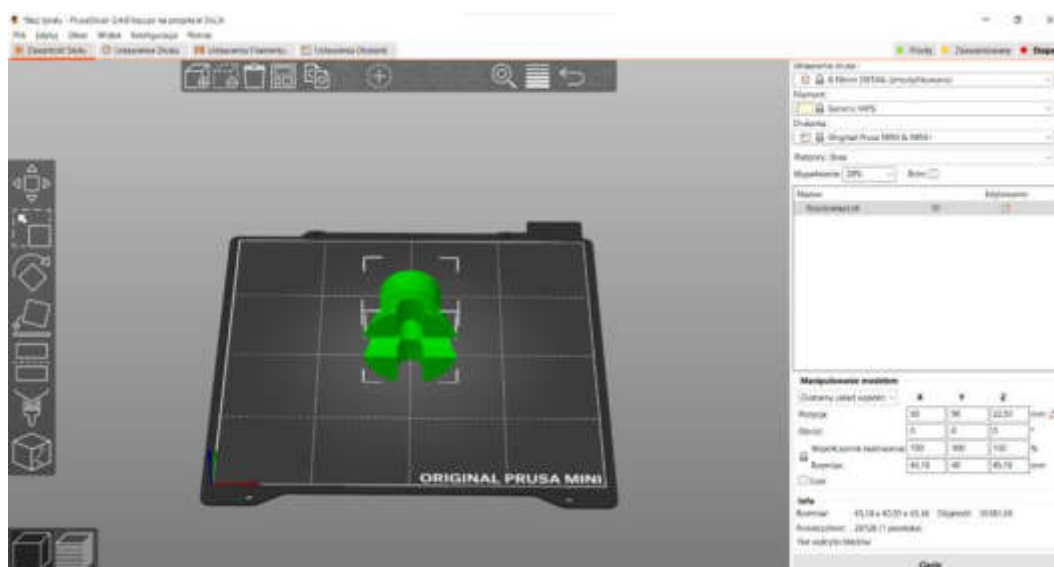


## 6. PRZYGOTOWANIE CYFROWEGO MODELU 3D PRZY UŻYCIU OPROGRAMOWANIA TYPU „SLICER” DO PROCESU DRUKOWANIA

W celu przygotowania cyfrowego modelu 3D wykonano następujące czynności:

**Krok 1:** Otwarcie pliku STL w środowisku Prusa Slicer (Rysunek 4).

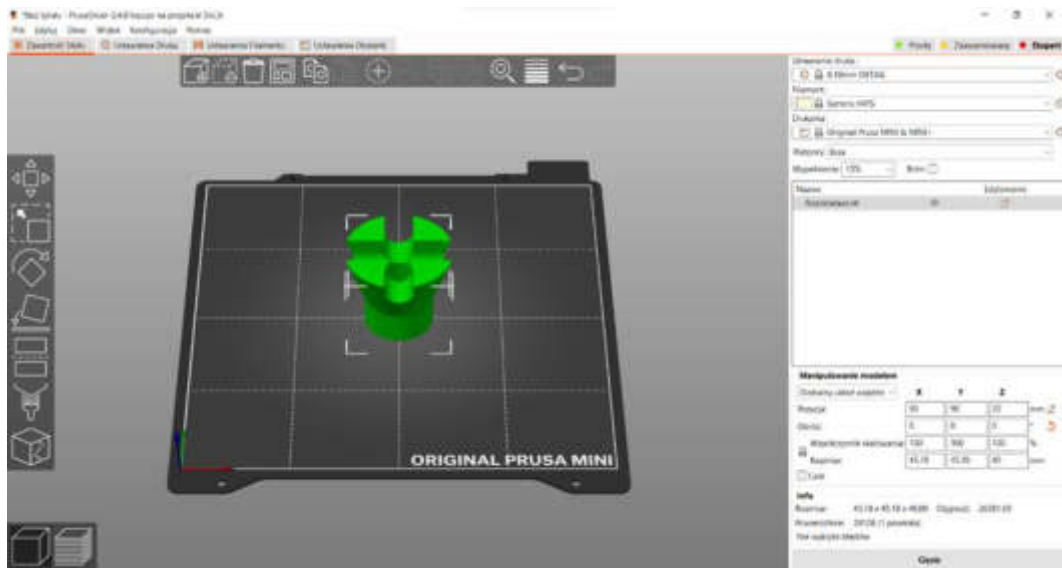
W tym kroku otwierane są pliki wyeksportowane z oprogramowania Autodesk Inventor, które będą drukowane.



Rysunek 4. Zrzut ekranu przedstawiający model otwarty za pomocą programu Prusa Slicer  
*Figure 4. Screenshot showing the model opened with Prusa Slicer*

**Krok 2:** Ustalenie pozycji modelu na stole drukarki (Rysunek 5).

Prawidłowe rozmieszczenie ma wpływ na jakość drukowanych elementów oraz czas trwania całego procesu.

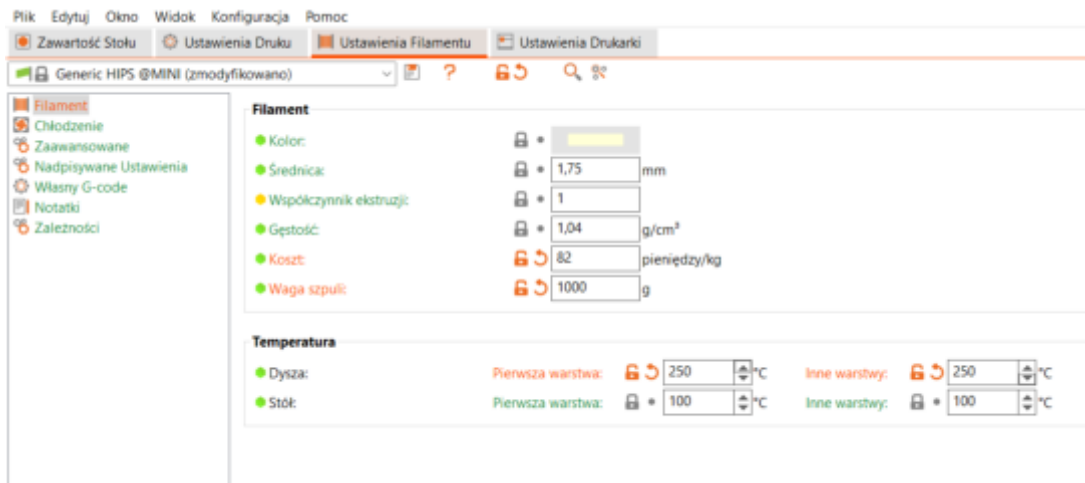


Rysunek 5. Zrzut ekranu przedstawiający model docelowo umiejscowiony na stole roboczym drukarki

Figure 5. Screenshot showing the model positioned on the printer workbench

**Krok 3:** Ustalenie parametrów druku: materiał, temperatura stołu oraz dyszy drukarki (Rysunek 6).

Temperatura dyszy decyduje o prawidłowym płynięciu materiału, co przekłada się na jakość wydruku. Podgrzanie powierzchni stołu roboczego wpływa na prawidłowe przywieranie materiału do podłoża. Uniemożliwia to odklejenie się modelu w trakcie druku, które mogłoby spowodować jego uszkodzenie.

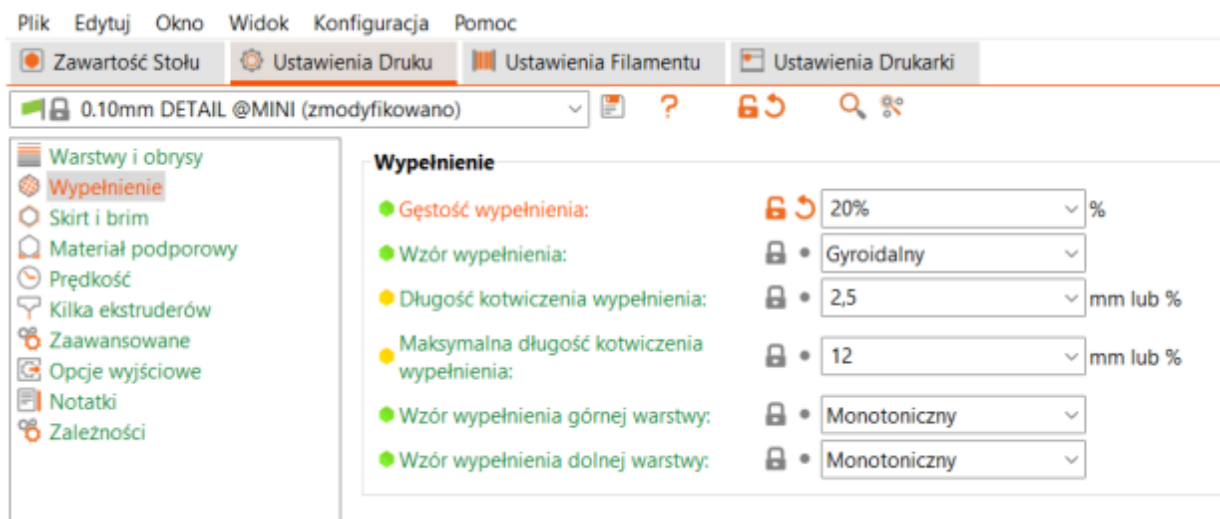


Rysunek 6. Zrzut ekranu przedstawiający okno dialogowe zawierające ustawienia materiału oraz temperatur dla procesu drukowania

Figure 6. Screenshot showing the dialog box with settings for material and temperature of printing process

**Krok 4:** Ustalenie parametrów druku: rodzaj i gęstość wypełnienia (Rysunek 7).

Rodzaj wypełnienia oraz jego gęstość wpływa na masę, czas procesu drukowania, jakość powierzchni ścian zewnętrznych i wytrzymałość mechaniczną próbki.

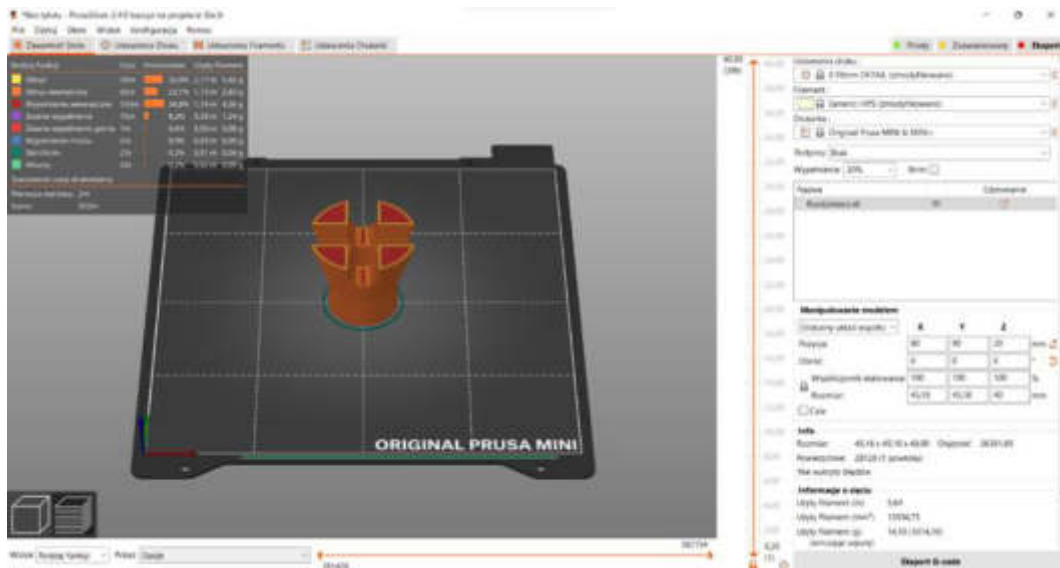


Rysunek 7. Zrzut ekranu przedstawiający okno dialogowe zawierające ustawienia rodzaju oraz gęstości wypełnienia modelu materiałem

*Figure 7. Screenshot of a dialog box containing settings for the type and density of material fill in the model*

**Krok 5:** Wykonanie „cięcia” modelu.

Po dokonaniu wyboru parametrów druku i prawidłowym rozmieszczeniu modelu na stole oprogramowanie wykonuje „cięcie” (Rysunek 8), czyli ustala między innymi wymagane podpory, liczbę warstw, czas druku oraz ilość zużytego materiału.

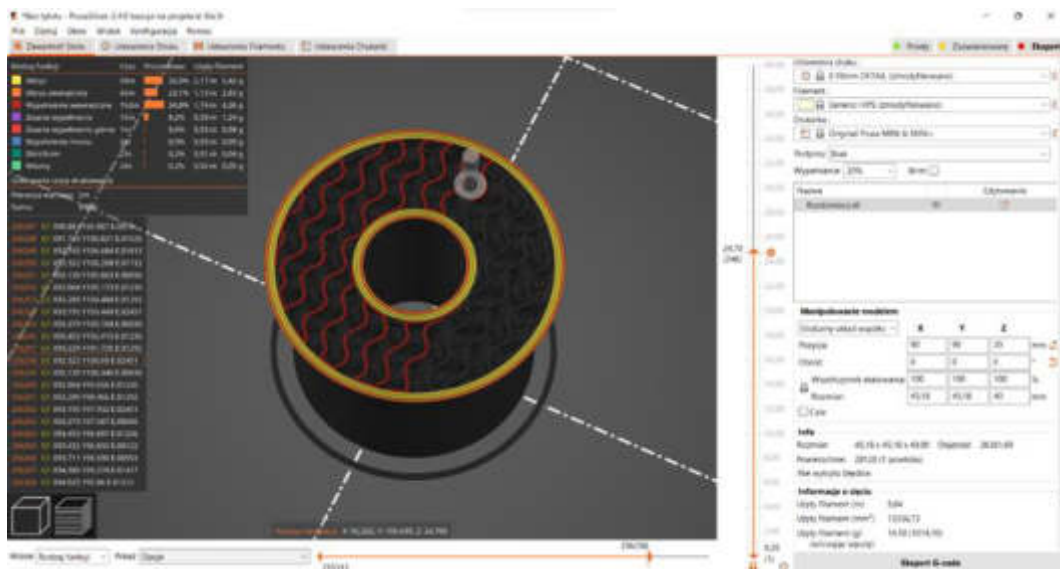


Rysunek 8. Zrzut ekranu przedstawiający model po wykonaniu "cięcia" modelu w programie Prusa Slicer

Figure 8. Screenshot showing the model after "cutting" in Prusa Slicer

#### Krok 6: Symulacja i analiza procesu druku.

Oprogramowanie umożliwia symulację i analizę procesu druku 3D przed rozpoczęciem go na prawdziwej drukarce, w celu naniesienia ewentualnych poprawek (Rysunek 9).



Rysunek 9. Zrzut ekranu przedstawiający symulację procesu drukowania modelu

Figure 9. Screenshot showing simulation of model printing process

**Krok 7:** Eksport języka maszynowego (G-code).

Po zakończeniu powyższych czynności plik z instrukcjami w języku maszynowym dla drukarki 3D zostaje wyeksportowany do pamięci przenośnej.

**7. PODSUMOWANIE**

Oprogramowanie komputerowe do tworzenia obiektów trójwymiarowych daje dużą swobodę i wiele możliwości na kreatywne wykorzystanie go do tworzenia elementów które wykorzystywane są dziś w wielu dziedzinach przemysłu, edukacji oraz gospodarstwach domowych. Mimo iż sam druk 3D znany jest człowiekowi od dziesiątek lat to właśnie teraz czyli w XXI wieku znacznie przyspieszył jego rozwój i zwiększyło się zainteresowanie technikami addytywnymi. Przedsiębiorcy coraz częściej po tego typu rozwiązania w celu zmniejszenia kosztów produkcji i prototypowania tym samym napędzając rozwój tych narzędzi.

**LITERATURA**

1. P. Siemiński, G. Budzik, Techniki przyrostowe. Druk 3D. Drukarki 3D; Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2015.
2. K. Cichoń, A. Brykalski; Zastosowanie drukarek 3D w przemyśle; Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie 2017.
3. <http://rel4tion.org/co-warto-wiedziec-o-druku-3d-pod-katem-wad-i-zalet> [DOSTĘP: 11.05.2022].
4. <http://3d.edu.pl/zalety-i-wady-drukowania-3d/> [DOSTĘP: 11.05.2022].
5. <https://www.autodesk.pl/products/inventor/overview> [DOSTĘP 06.05.2022].
6. O. Stríteský, Podstawy druku 3D z Josefem Prusą, Prusa Research a.s., Praga 2020.
- A. Jaskulski, Autodesk Inventor Professional 2021 PL / 2021+ / Fusion 360. Metodyka projektowania, Helion 2020.
7. Przedsiębiorstwo 4.0, 360°. Rekomendacje dobrych praktyk, publikacja AHK, Polsko-Niemiecka Izba Przemysłowo-Handlowa, 2021.
8. H. Dodziuk, Druk 3D/AM - Zastosowania oraz skutki społeczne i gospodarcze, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2019.
9. [https://3d-p.eu/wp-content/uploads/2018/08/IO3\\_3DP-courseware\\_PL.pdf](https://3d-p.eu/wp-content/uploads/2018/08/IO3_3DP-courseware_PL.pdf) [DOSTĘP: 11.05.2022].
10. Dornelles J essica de Assis, Ayala N´estor F., Frank Alejandro G., Smart Working in Industry 4.0: How digital technologies enhance manufacturing workers' activities, Computers & Industrial Engineering 163 (2022) 107804.
11. Z. Krzysiak, Modelowanie 3D w programie AutoCAD, Wydawnictwo Nauka i Technika, 2012.

## Analiza parametrów nowoczesnej technologii cięcia laserowego stali

P. Janiak <sup>a</sup>, J. Kierepka <sup>a</sup>, M. Paluch <sup>a</sup>, P. Cincio <sup>a</sup>, K. Gawęda <sup>a</sup>, K. Samek <sup>a</sup>, M. Bonek <sup>b</sup>,  
O. Polishchuk <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Student/ka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: patrjan233@student.polsl.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: mirosław.bonek@polsl.pl

<sup>c</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Engineering Mechanics, Khmelnytskyi, Ukraine

**Streszczenie:** W niniejszej pracy przybliżono ekonomiczne aspekty cięcia laserowego w kontekście symulowanych warunków produkcji seryjnej detalu wykonanego ze stali S235JR. Przedstawiono przegląd literaturowy dotyczący metod cięcia, ze szczególnym uwzględnieniem techniki cięcia laserowego. W ramach części badawczej pracy przeprowadzono analizę wielokryterialną o charakterze optymalizacji punktowej, która poddała ocenie wybrane kluczowe parametry procesu cięcia laserowego. Stwierdzono, że cięcie laserowe stanowi optymalną propozycję realizacji obróbki założonego detalu, co potwierdzono przeprowadzonymi badaniami metalograficznymi próbek poddanych różnym metodą cięcia.

**Abstract:** This paper presents the economic aspects of laser cutting in the context of simulated conditions of serial production of a detail made of S235JR steel. A literature review on cutting methods is presented, with particular emphasis on the laser cutting technique. As part of the research part of the work, a multi-criteria analysis of the point optimization character was carried out, which assessed selected key parameters of the laser cutting process. It was found that laser cutting is the optimal proposal for the implementation of machining of the assumed detail, which was confirmed by metallographic tests of samples subjected to various cutting methods.

**Słowa kluczowe:** laser, obróbka powierzchni, cięcie laserowe, technologie materiałowe

## 1. WSTĘP

### 1.1 Wprowadzenie do technologii laserowej obróbki powierzchni

Proces podczas którego występuje naruszenie spójności materiału nazywany jest cięciem. W procesie tym konieczne jest dostarczenie energii wystarczająco dużej by naruszyć ciągłość ciętego materiału. W zależności od oczekiwanych efektów możemy jedynie nacinać przedmiot lub stosować cięcie całkowite gdy oczekujemy rozdzielenia materiału na dwie części. We współczesnym przemyśle cięcie jest niezbędnym etapem wytwarzania wielu gotowych elementów oraz wstępnie ukształtowanych półfabrykatów, wykonywanych często ze stalowych blach. Metoda z jaką będziemy cieli materiał ma duży wpływ na jakość wytwarzanego

elementu, powierzchnie uzyskaną w miejscu cięcia oraz powtarzalność procesu. Aktualnie do głównych metod cięcia stosowanych w przemyśle zaliczamy cięcie strumieniem wody podczas którego ciągłość materiału naruszana jest przez strumień wody pod wysokim ciśnieniem, cięcie mechaniczne polegające na wytworzeniu odpowiedniego naprężenia w materiale przy użyciu poruszającego się narzędzia tnącego, cięcie plazmowe lub gazowe, w którym materiał jest topiony i utleniany przy użyciu plazmy i tlenu oraz cięcie laserowe, oparte na działaniu skupionej wiązki lasera o wysokiej mocy. Ze względu na wzrastające zapotrzebowanie przemysłu na wytwarzanie wysokiej jakości, powtarzalnych elementów, duży nacisk kładziony jest na poszukiwanie nowoczesnych technologii zapewniającej kształtowanie materiałów [1-3].

Cięcie laserowe jest jedną z technik zapewniającą wysoką jakość oraz powtarzalność. Laser jest źródłem spójnego, monochromatycznego promieniowania elektromagnetycznego. Zasada działania lasera w uogólnieniu polega na promieniowaniu ośrodka czynnego wymuszonemu poprzez doprowadzenie wymaganej energii. Cięcie przy użyciu wiązki laserowej polega na miejscowym stopieniu lub stopieniu i odparowaniu materiału poddawanemu obróbce wzdłuż jednoznacznie określonego toru przy użyciu wiązki promieniowania laserowego. Proces ten najczęściej jest zautomatyzowany i zrobotyzowany co znacząco poprawia dokładność cięcia. W wyniku wysokiej temperatury powstałej w czasie trwania procesu, ścianka powstałego przecięcia pokrywa się cienką warstwą ciekłego materiału, utrzymywanego siłami napięcia powierzchniowego oraz zjawiskiem kapilarnym [3,4].

Tabela 1. Charakterystyka zalet i wad cięcia laserowego [1].

Table 1. Characteristics of the advantages and disadvantages of a laser cutting [1].

| <b>Zalety:</b>                                 | <b>Wady:</b>   |
|--|--|
| Wysoka prędkość cięcia.                        | Możliwość cięcia materiałów nie grubszych niż 20mm.                  |
| Możliwość cięcia wielu rodzajów materiałów.    | Wysoki koszt zakupu maszyn.  |
| Niska strefa wpływu ciepła w ciętym materiale. | Promieniowanie elektromagnetyczne towarzyszące cięciu.               |
| Wysoka jakość ciętej krawędzi.                 | Szczególne wymagania odnoszące się do jakości powierzchni po cięciu. |
| Brak znacznych odkształceń w ciętym materiale. |  |
| Niewielkie straty materiału.                   |  |
| Możliwość automatyzacji i robotyzacji procesu. |  |
| Stosunkowo niska cena.                         |  |

Ważnym elementem w procesie cięcia wiązką laserową jest zastosowany gaz o działaniu aktywnym lub obojętnym. Ma on za zadanie wydmuchanie ze szczeliny ciekłego materiału oraz jego pary. Cięcie wiązką lasera jest skuteczne przy większości materiałów inżynierskich i jest stosowane do cięcia między innymi: metali, cermetali, materiałów ceramicznych, drewna czy tworzyw sztucznych [2,3].

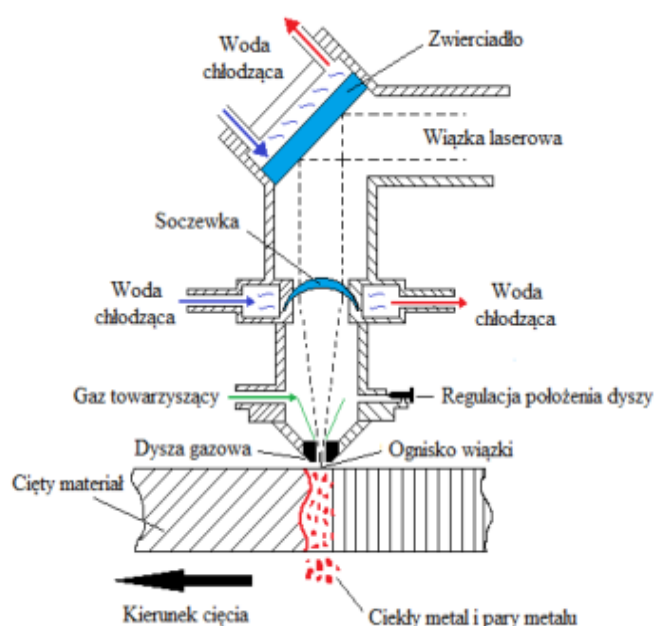
## 1.2 Charakterystyka cięcia laserowego

Cięciem laserowym nazywamy proces, w którym na materiał obrabiany działamy energią wiązki lasera. Wspomniana wiązka może mieć charakter ciągły lub uderowy (impulsowy). W zależności od rodzaju ciętego materiału oraz techniki cięcia, materiał stopiony w szczelinie może być wydmuchiwany, stopiony wraz z odparowaniem lub spalony. Obecnie cięcie laserowe manualne stosuje się bardzo rzadko, zatem najczęściej możemy napotkać ten rodzaj cięcia w zautomatyzowanym lub zrobotyzowanym procesie. Spektrum materiałów inżynierskich jakie możemy ciąć laserem jest bardzo szerokie, możemy do niego zaliczyć m.in. drewno, tworzywa sztuczne, ceramikę, metale oraz cermetale (materiał decyduje o stosowanej gęstości mocy lasera w granicach  $10^4 - 10^6$  [W/mm<sup>2</sup>]). Większą gęstość (od  $10^6$  do  $10^{11}$  [W/mm<sup>2</sup>]), stosuje się natomiast w procesie wybijania otworów za pomocą uderowej energii wiązki [5,6].

Jedną z najbardziej istotnych kwestii w procesie cięcia laserowego jest używanie gazu towarzyszącego, którego przepływ jest współosiowy z wiązką lasera. Gaz obojętny lub reaktywny z konkretnym materiałem ma za zadanie wydmuchać stopiony i odparowany materiał. Gazy używane do cięcia laserowego są następujące [5]:

- tlen, który jest wykorzystywany do cięcia blach ze stali niestopowej, jake i niskostopowej;
- azot, który swoje zastosowanie znajduje w procesach cięcia materiałów niemetalowych oraz stali narzędziowych.

Kolejnym kluczowym parametrem procesu jest polaryzacja wiązki lasera, która może mieć charakter liniowy, losowy, kołowy czy eliptyczny, a o tym decyduje konstrukcja lasera. Poszczególne charakterystyki widocznie wpływają na jakość cięcia ze względu na kierunek wiązki, przez co kołowa jest najlepszym rozwiązaniem, co wynika z jakości zachowanej w każdym możliwym kierunku. Na rysunku poniżej przedstawiono schemat budowy głowicy laserowej do cięcia [5-7].



Rysunek 1. Schemat budowy głowicy laserowej do cięcia [5]

Figure 1. Scheme of the laser head for cutting [5]



### 1.3 Charakterystyka cięcia plazmowego i cięcia mechanicznego

Cięcie plazmowe to proces klasyfikowany jako metoda cięcia gazowego (termicznego). Jako źródło ciepła występuje tu strumień plazmy, czyli zjonizowana materia o stanie skupienia przypominającym gaz. Składa się z występujących w niej zjonizowanych atomach oraz elektronach, jednak objętość, którą zajmuje plazma, jest elektrycznie obojętna. Sama plazma charakteryzuje się bardzo dobrym przewodnictwem prądu elektrycznego, ze względu na obecność elektronów swobodnych, a także dużej ilości jonów o różnym ładunku. Odwrotnie niż w przypadku metali, opór tego procesu maleje wraz ze wzrostem temperatury [8].

Metoda ta bazuje na topieniu i usuwaniu ciętego metalu ze szczeliny powstającej wskutek procesu. Za pośrednictwem energii kinetycznej, łuk elektryczny, który jarzy się pomiędzy elektrodą nietopliwą a przecinanym przedmiotem, skutkuje uzyskaniem dwóch odrębnych fragmentów materiału. Temperatura uzyskiwana w jądrze łuku plazmowego oscyluje w przedziale 10000-30000 K, a parametrami mającymi wpływ na jej wartości są: gaz plazmowy, natężenie, napięcie oraz stopień przewężenia. Transport ciepła do materiału zależy od warstwy ciekłego metalu na powierzchni cięcia. Jeśli jest ona zbyt gruba, oddziałuje na spadek przewodności cieplnej, co przekłada się na mniejsze prędkości cięcia. Parametr, który bezpośrednio odpowiada za sprawność procesu to napięcie łuku elektrycznego. Ustawiane jest na podstawie korelacji z natężeniem prądu podczas procesu precyzyjnej kalibracji. W przemyśle metoda ta jest najpowszechniej stosowana w ramach cięcia metali wysokostopowych, co zawdzięcza swojej wydajności oraz jakości przecinanych powierzchni po zakończonym procesie. Cięcie plazmowe może być wykonywane ręcznie, bądź podlegać automatyzacji i robotyzacji, w zależności od potrzeb [9,10].

Cięcie mechaniczne polega na zastosowaniu sztywnego narzędzia, które poruszając się ruchem prostopadłym do obrabianego metalu, jest odpowiedzialne za wywołanie naprężeń w przekroju ciętego przedmiotu. Następuje to wskutek kontaktu poprzez zetknięcie i mocne dociśnięcie wywołujące pęknięcie w miejscu przyłożenia narzędzia, co w efekcie daje rozdzielenie materiału. Zastosowanie tej metody jest ograniczone poprzez kształt elementów, które mają ulec przecięciu. Muszą one spełnić założenie uzyskania skupionego naprężenia w obrabianym przekroju. Podczas cięcia blach możliwe jest wystąpienie niepożądanych efektów, jakimi są odkształcenia, wśród których wyróżniamy odkształcenia sprężyste, sprężysto-plastyczne, plastyczne płynięcie, pęknięcie. Przebieg procesu rozpoczyna prostowanie potencjalnych nierówności, które mogą występować na powierzchni blachy. Następnie poprzez oddziaływanie stempla oraz płyty tnącej, powstaje moment zginający, który powoduje wygięcie materiału. Miejsca styku powierzchni ciętego materiału z narzędziami tnącymi są punktami newralgicznymi, gdzie dochodzi do powstania koncentracji naprężeń. Zgodnie z granicą wytrzymałości na rozciąganie, po jej przekroczeniu dochodzi do odkształceń sprężysto-plastycznych, co następnie skutkuje przerwaniem spójności materiału. Zjawisko to określa się mianem pęknięcia i jest pożądanym efektem metody cięcia mechanicznego, a zależy przede wszystkim od obrabianego materiału. Przykładem zastosowania tej metody jest cięcie arkuszy blach na pojedyncze kawałki z wykorzystaniem nożyc. Dla produkcji seryjnej charakterystycznej dla przemysłu, stosowane są różnego rodzaju wykrojniki, które mają na celu zwiększenie wydajności procesu cięcia, dzięki możliwości wykonywania kilku zabiegów podczas jednej operacji, co zawdzięcza swoją budowie [11,12].

## 2. MATERIAŁ DO BADAŃ I METODYKA BADAWCZA

### 2.1 Cel badań

W niniejszej pracy przybliżono ekonomiczne aspekty cięcia laserowego w kontekście symulowanych warunków produkcji seryjnej detalu wykonanego ze stali S235JR. Przyjęto założenia upraszczające, że detal nie cechuje się skomplikowaną i rozwiniętą powierzchnią. Analizie poddano cztery różne procesy cięcia: laserowe, plazmą, mechaniczne i wykrawanie. Scharakteryzowano założone materiały (stal S235JR), urządzenia tnące oraz ich parametry wejściowe i wyjściowe. W celu oszacowania wpływu zastosowanej metody na poziom jakościowy wyprodukowanych detail przeprowadzono analizę wielokryterialną (optymalizację punktową) wyłonionych uprzednio kluczowych czynników. Do wykorzystanych w optymalizacji punktowej kryteriów przeprowadzono badania metalograficzne, na podstawie których możliwe było prawidłowe ocenienie ich w stosunku do analizowanego wariantu wytwarzania.

### 2.2 Materiały i metody

Badane detale wykonano z konstrukcyjnej stali niestopowej S235JR. W Tabeli 2. przedstawiono jej skład chemiczny, a w Tabeli 3. własności mechaniczne [13]. Analizując załączone dane można stwierdzić, że jest to materiał tani i dobrze spawalny, jednakże cechuje się przeciętnymi własnościami mechanicznymi.

Tabela 2. Skład chemiczny stali S235JR [13].

Table 2. Chemical composition of S235JR steel [13].

| Stal   | Stężenie pierwiastków [% mas] |            |              |              |      |
|--------|-------------------------------|------------|--------------|--------------|------|
|        | C                             | Mn         | P            | S            | Cu   |
| S235JR | Max<br>0,17                   | Max<br>1,4 | Max<br>0,035 | max<br>0,035 | 0,55 |

Tabela 3. Podstawowe własności mechaniczne stali S235JR [13].

Table 3. Basic mechanical properties of S235JR steel [13].

| Stali  | Minimalne własności mechaniczne |                          |          |          |     |           |                             |
|--------|---------------------------------|--------------------------|----------|----------|-----|-----------|-----------------------------|
|        | R <sub>m</sub><br>[MPa]         | R <sub>eH</sub><br>[MPa] | A<br>[%] | Z<br>[%] | HV  | KV<br>[J] | KCV<br>[J/cm <sup>2</sup> ] |
| S235JR | 472                             | 380                      | 35       | 71,2     | 127 | 176,3     | 220                         |

Zastosowano cztery metody cięcia w celu wykonania kilku serii wyrobu. Wykorzystane urządzenia i parametry zestawiono w Tabeli 4.

Tabela 4. Charakterystyka zastosowanych metod cięcia.

Table 4. Characteristics of the cutting methods used.

| Metoda          | Urządzenie                                      | Parametry  |
|-----------------|---|--|
| Cięcie laserowe | Przecinarka laserowa<br>BLM GROUP model<br>LS 5 | Odległość dyszy od blachy: 0,7 [mm];<br>Zastosowany gaz: azot;<br>Ciśnienie gazu: 19 [bar];<br>Szybkość cięcia: 2500 [mm/min]; |

|  |  |  |
|--|--|--|
|  |  | Odległość ogniskowa -2,5 [mm];<br>Moc: 2000 [W].   |
| Cięcie plazmą                                  | Przecinarka plazmowa<br><i>HYPERFORMANCE<br/>PLASMA HPRI30XD</i> | Odsunięcie palnika od blachy: 1,5 [mm];<br>Zastosowany gaz plazmowy: tlen;<br>Zastosowany gaz osłonowy: tlen;<br>Przepływ gazu plazmowego: 92 [l/min];<br>Przepływ gazu osłonowego: 5 [l/min];<br>Napięcie łuku: 123 [V];<br>Szybkość cięcia: 1160 [mm/min]. |
| Cięcie mechaniczne<br>nożycami<br>gilotynowymi | Gilotyna<br>VIMERCATI CSI<br>3050x6                              | Szybkość cięcia: 85 [mm/s];<br>Moc: 7500 [W];<br>Zastosowany luz: 0,3 [mm];<br>Zastosowany nacisk: 18000 [kg].   |
| Wykrawanie                                     | Prasa mechaniczna<br>SANGIACOMO<br>PRESSE T 63R CE               | Szybkość cięcia: 15 [uderzenia/min]<br>Moc: 5500 [W];<br>Zastosowany luz: 0,3 [mm];<br>Zastosowany nacisk: 20000 [kg].   |

### 3. WYNIKI BADAŃ

Po wytworzeniu wyrobów ze stali S235JR każdą z założonych czterech metod cięcia przeanalizowano przeprowadzone procesy produkcyjne. Na podstawie obserwacji wyznaczono istotne cechy i parametry, które zestawiono w Tabeli 5.

Tabela 5. Zestawienie porównawcze cech i parametrów zastosowanych w procesach cięcia.

Table 5. Comparison of features and parameters used in cutting processes.

|   | Metoda<br>Cechy                     | Cięcie<br>laserowe | Cięcie<br>plazmą | Cięcie<br>nożycami | Wykrawanie         |
|---|-------------------------------------|--------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| 1 | Narzędzie tnące                     | wiązka laserowa    | strumień plazmy  | noże tnące         | wykrojnik          |
| 2 | Charakter cięcia                    | cięcie laserowe    | cięcie gazowe    | cięcie mechaniczne | cięcie mechaniczne |
| 3 | Strefa wpływu ciepła                | niewielka          | duża             | brak               | brak               |
| 4 | Oddziaływanie na warstwę wierzchnią | niewielkie         | duże             | niewielkie         | niewielkie         |
| 5 | Równoległość cięcia                 | duża               | średnia          | średnia            | duża               |
| 6 | Chropowatość powierzchni po         | dobra              | średnia          | średnia            | średnia            |

|    |                              |           |          |           |           |
|----|------------------------------|-----------|----------|-----------|-----------|
|    | cięciu                       |           |          |           |           |
| 7  | Dokładność wymiarowa         | dobra     | średnia  | średnia   | dobra     |
| 8  | Prędkość cięcia              | duża      | średnia  | mała      | duża      |
| 9  | Konieczność dalszej obróbki  | rzadko    | czasami  | rzadko    | rzadko    |
| 10 | Przybliżony czas jednostkowy | 3 sekundy | 8 sekund | 18 sekund | 4 sekundy |

Analizując powyższe wskaźniki i ich wpływ na proces produkcyjny zdecydowano o wybraniu 5 najbardziej krytycznych dla jakości uzyskiwanych wyrobów. Aby zweryfikować, która metoda cięcia najbardziej optymalnie realizuje założone kryteria przeprowadzono analizę wielokryterialną o charakterze optymalizacji punktowej, zgodną z poniższym schematem:

Tabela 6. Optymalizacja punktowa dla czterech badanych procesów cięcia.

Table 6. Point optimization for the four tested cutting processes.

|    | K1                       | K2  | K3  | K4  | K5  | $\Sigma k_n$ | W1          | W2          | W3          | W4          | $W_{max}$  |
|----|--------------------------|-----|-----|-----|-----|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| K1 | ×                        | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 1,6          | 2           | 2           | 1           | 1           | 3          |
| K2 | 0,5                      | ×   | 0,4 | 0,5 | 0,3 | 1,7          | 3           | 2           | 1           | 3           | 3          |
| K3 | 0,6                      | 0,6 | ×   | 0,6 | 0,5 | 2,3          | 3           | 2           | 1           | 3           | 3          |
| K4 | 0,7                      | 0,5 | 0,4 | ×   | 0,4 | 2            | 3           | 2           | 1           | 2           | 3          |
| K5 | 0,6                      | 0,7 | 0,5 | 0,6 | ×   | 2,4          | 2           | 2           | 2           | 2           | 3          |
|    | $\Sigma (k_n \cdot W_n)$ |     |     |     |     |              | 26          | 18,4        | 15,6        | 25,6        | 30         |
|    | $W_{\%}$                 |     |     |     |     |              | <b>86,7</b> | <b>66,7</b> | <b>41,3</b> | <b>74,7</b> | <b>100</b> |

Legenda:

Kryteria:

K1: Chropowatość powierzchni cięcia;

K2: Równoległość powierzchni cięcia;

K3: Dokładność wymiarowa;

K4: Prędkość cięcia;

K5: Konieczność dalszej obróbki.

Analizowane metody:

W1 – cięcie laserem

W2 – cięcie plazmą

W3 – cięcie nożycami gilotynowymi

W4 – wykrawanie

Ocena poprawności kryterium badanego:

1 – mała,

2 – średnia,

3 – duża.

$k_n$  – współczynniki obliczeniowe

$W_{max}$  - maksymalną wartość wagową jaką można przyznać do badanego stosunku kryterium do metody cięcia.

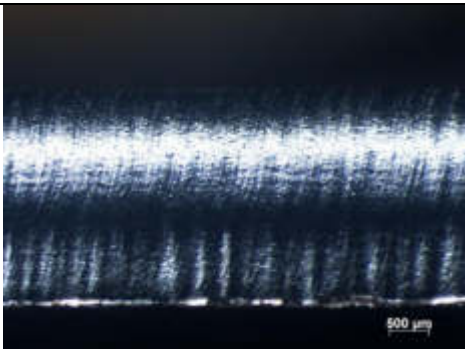
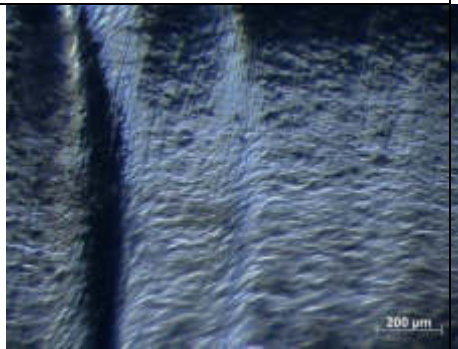
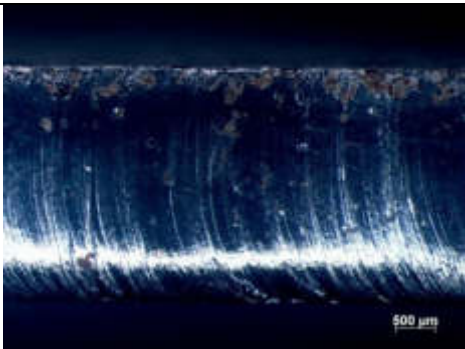
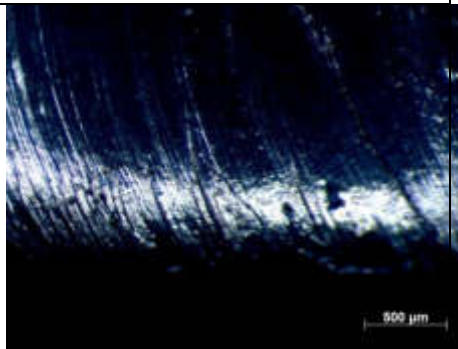
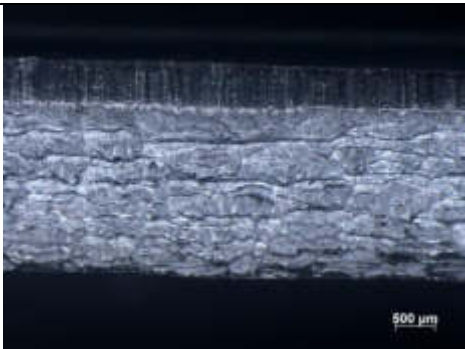
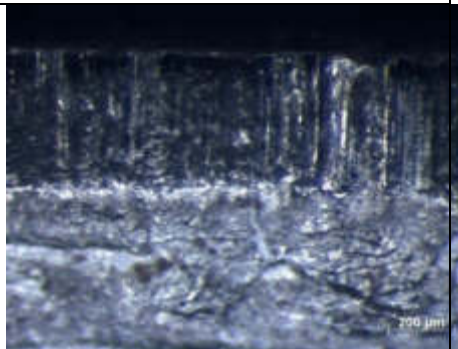
W toku przeprowadzonych obliczeń cięcie laserowe uzyskało najwyższą wartość 86,7%, następnie cięcie na wykrojnikach 74,7%, następnie cięcie plazmowe 66,7% oraz cięcie na nożycach gilotynowych 41,3%.

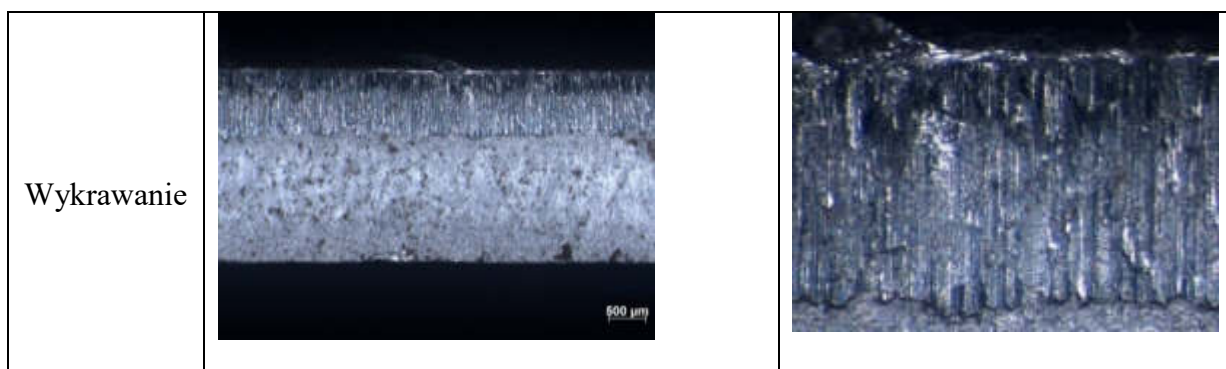
Aby przeprowadzona analiza wielokryterialna była wiarygodna przeprowadzono tok obliczeniowy uzupełniono o badania metalograficzne wyrobów. Sprawdzenie chropowatości powierzchni w miejscach cięcia przeprowadzono wykorzystując mikroskop świetlny

stereoskopowy SteREO Discovery wyprodukowany przez firmę Zeiss. Wyniki zestawiono w Tabeli 7.

Tabela 7. Makrostruktura powierzchni w miejscu cięcia elementu wykonanego ze stali S235JR w procesach cięcia.

Table 7. Surface macrostructure in the place of cutting an element made of S235JR steel in the cutting processes.

| Metoda procesu cięcia | Powiększenie 25x   | Powiększenie 100x  |
|-----------------------|--|--|
| Cięcie laserowe       |  <p>Micrograph showing the surface macrostructure of a laser-cut element at 25x magnification. The surface exhibits a fine, regular texture with a scale bar of 500 μm.</p>            |  <p>Micrograph showing the surface macrostructure of a laser-cut element at 100x magnification. The surface exhibits a fine, regular texture with a scale bar of 200 μm.</p>            |
| Cięcie plazmą         |  <p>Micrograph showing the surface macrostructure of a plasma-cut element at 25x magnification. The surface exhibits a rough, irregular texture with a scale bar of 500 μm.</p>       |  <p>Micrograph showing the surface macrostructure of a plasma-cut element at 100x magnification. The surface exhibits a rough, irregular texture with a scale bar of 500 μm.</p>       |
| Cięcie mechaniczne    |  <p>Micrograph showing the surface macrostructure of a mechanically cut element at 25x magnification. The surface exhibits a rough, irregular texture with a scale bar of 500 μm.</p> |  <p>Micrograph showing the surface macrostructure of a mechanically cut element at 100x magnification. The surface exhibits a rough, irregular texture with a scale bar of 200 μm.</p> |



#### 4. WNIOSKI

Przeprowadzenie analiz, obserwacji i obliczeń umożliwiło sformułowanie następujących konkluzji:

- Zastosowana analiza wielokryterialna o charakterze optymalizacji punktowej pozwoliła na skuteczne zestawienie założonych kryteriów i ich merytoryczną ocenę. Na jej podstawie oceniono, że najbardziej efektywną metodą produkcji założonego detalu jest technologia laserowa, która adekwatność do zastosowanych kryteriów spełniła w 86,7%. Metodą alternatywną może być również cięcie na wykrojnikach, które w przeprowadzonej optymalizacji uzyskało wynik 74,7 %. Pozostałe dwie metody: cięcie plazmowe i cięcie na nożycach gilotynowych uzyskały znacznie niższe wyniki, odpowiednio 66,7 % oraz 41,3 % co sprawia, że ich skuteczność w powyższym procesie jest dyskusyjna.
- Badania metalograficzne zglądów uzyskanych wyrobów potwierdziły wyniki uzyskane w toku analizy wielokryterialnej. Próbka po cięciu laserowym była wolna od wypływek i pęknięć. W jej obrazie były widoczne drobne deformacje, ale spełniały one zadane kryterium jakości. Z kolei próbka po cięciu plazmą cechowała się wyraźnymi naciekami na krawędzi powierzchni cięcia oraz początkowymi ogniskami korozji. Próbka wyrobu wytworzonego na nożycach gilotynowych posiadała wyraźnie widoczne pęknięcie, a także liczne nierówności i chropowatą powierzchnię. Próbka powstała po cięciu z użyciem wykrojników prezentowała podobne cechy, które uległy zwiększeniu ze względu na zjawisko plastycznego płynięcia.

#### 5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania miały na celu zweryfikowanie wpływu różnych metod cięcia na poziom jakości uzyskanego wyrobu oraz oszacowanie, która technika będzie optymalna. Analiza dostępnych źródeł literaturowych oraz uzyskanych wyników i obliczeń umożliwiła stwierdzenie, że technologie laserowe wiodą prym w aspekcie wytwarzania wyrobu przy jak najmniejszych stratach materiałowych i energetycznych.

## PODZIĘKOWANIE

Praca powstała w wyniku realizacji projektu w ramach kształcenia zorientowanego projektowo - PBL, w konkursie VII w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza, Politechnika Śląska.

## BIBLIOGRAFIA

1. Mazurkiewicz A. Technologie specjalne kształtowania materiałów, Politechnika Radomska, Radom 2009.
2. Kusiński J. Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej, Wydawnictwo Naukowe Akapit, Kraków, 2000.
3. Ziętek B. Lasery, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń 2009.
4. Dobrzański L.A. Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo: materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Gliwice, 2002.
5. Klimpel A. Technologie laserowe: spawanie, napawanie, stopowanie, obróbka cieplna i cięcie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
6. Klimpel A. Podstawy teoretyczne cięcia laserowego metali. Przegląd spawalnictwa, 2012/6
7. Kołodziejczak P. Rodzaje cięcia laserowego. Przegląd spawalnictwa, 2015/7
8. Pilarczyk J. Spawalnictwo 2, Wydawnictwo Naukowo-techniczne, Warszawa, 2005
9. Kordus. A. Plazma. Właściwości i zastosowania w technice, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1985.
10. Słania J., Krawczyk R., Cieśla D. Charakterystyka cięcia termicznego. Przegląd spawalnictwa, 2015/7.
11. Pater Z., Samołyk G. Podstawy technologii obróbki plastycznej metali, Politechnika Lubelska, Lublin 2013.
12. Erbel S., Kuczyński K., Marciniak Z. Obróbka plastyczna, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1981.
13. Norma PN-EN 10025-2:2019-1 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych -- Część 2: Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych niestopowych.



## Uszczelnianie barwnikowych ogniw fotowoltaicznych

A. Januła<sup>a</sup>, L. Poniewiera<sup>a</sup>, P. Pogorzelski<sup>a</sup>, M. Stachura<sup>a</sup>, J. Drygała<sup>b</sup>, B. Drygała<sup>b</sup>,  
M. Drewniak<sup>c</sup>, B. Grzegorzczak<sup>d</sup>, S. Lesz<sup>d</sup>, A. Drygała<sup>d</sup>

<sup>a</sup> student, Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 18a Konarskiego Str., 44-100 Gliwice, Poland

<sup>b</sup> uczeń Salezjańskiego Zespołu Szkół Publicznych im. św. Dominika Savio w Zabrze

<sup>c</sup> uczeń Zespołu Szkół Zawodowych nr 2 w Knurowie

<sup>d</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials, 18a Konarskiego Str., 44-100 Gliwice, Poland  
email: [aleksandra.drygala@polsl.pl](mailto:aleksandra.drygala@polsl.pl)

**Streszczenie:** W barwnikowych ogniw fotowoltaicznych istotnym problemem jest parowanie oraz wyciekanie ciekłego elektrolitu wypełniającego przestrzeń pomiędzy fotoanodą a przeciwelektrodą. W ramach niniejszej pracy analizie poddano jakość uszczelnienia elektrod barwnikowego ogniwa fotowoltaicznego z wykorzystaniem folii polimerowej oraz silikonu.

**Abstract:** A significant problem in the dye-sensitized solar cells (DSSCs) is the evaporation and leakage of the liquid electrolyte filling the space between the photoanode and the counter electrode. As part of this study, the quality of the polymer and silicone sealing of the DSSC electrodes was analyzed.

**Słowa kluczowe:** fotowoltaika, barwnikowe ogniwa fotowoltaiczne, uszczelnienie ogniw słonecznych, folia polimerowa, silikon

### 1. WSTĘP

Stale postępująca elektryfikacja na świecie oraz wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną powodują, że poszukiwane są coraz wydajniejsze formy jej pozyskiwania. Z drugiej strony obecna sytuacja klimatyczna zmusza do opracowywania i rozwoju nowych technologii produkcji energii elektrycznej ze źródeł nie wpływających na dalszą degradację środowiska naturalnego. Wiek XXI spowodował nagłą potrzebę odejścia od konwencjonalnych elektrowni napędzanych paliwami kopalnymi oraz popularyzację odnawialnych źródeł energii [1].

Jednym z najbardziej obiecujących źródeł energii odnawialnej jest energia promieniowania słonecznego. Podstawowym sposobem konwersji energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną jest zastosowanie ogniw fotowoltaicznych. Urządzenia te opierają swoją zasadę działania na efekcie fotowoltaicznym odkrytym już w 1839 roku, który polega na tym że fotony uderzające w powierzchnię fotoogniwa zderzają się z elektronami i przekazują im



swoją energię, przez co elektrony przenoszą się do pasma przewodnictwa i zmieniają własności elektryczne materiału. Pierwsze ogniwo fotowoltaiczne zostało opatentowane w 1941 r. [2, 3]. Na rosnące potrzeby rynku odpowiada wzrost udziału ogniw fotowoltaicznych w światowej produkcji energii elektrycznej. Zgodnie z przewidywaniami naukowców z Międzynarodowej Agencji Energii Odnawialnej (International Renewable Energy Agency), aby zrealizować cele przejęte w Porozumieniu Paryskim, do roku 2050, udział fotowoltaiki musi wzrosnąć 15-krotnie i odpowiadać za połowę całej produkcji energii elektrycznej (15 TW), w porównaniu z niespełną 1 TW w roku 2021 [4].

W przypadku barwnikowych ogniw fotowoltaicznych poza ich ograniczoną sprawnością, problemem jest parowanie oraz wyciekanie ciekłego elektrolitu. Szczególnie istotne staje się zatem właściwe uszczelnianie barwnikowych ogniw fotowoltaicznych. Uszczelnienie w barwnikowym ogniwie fotowoltaicznym stosuje się, aby zapewnić utrzymanie elektrolitu wewnątrz urządzenia. Wyciekanie elektrolitu prowadzi do spadku sprawności DSSC niejednokrotnie do zaprzestania ich pracy [5,6]. Najczęściej stosowanym uszczelniaczem są termoplastyczne polimery [7-9], które należą do materiałów termoplastycznych. Pozwalają one na uszczelnienie ogniw słonecznych przy zachowaniu stosunkowo niskich temperatur, czyli 120°C [7]. Poprawę stabilności w związku z ograniczeniem wyciekania elektrolitu zapewnia także uszczelnienie silikonowe wprowadzane do modułów fotowoltaicznych [10]. Do zabezpieczania fotoogniw wykorzystuje się także lutowania szkła, w której dodatkowy materiał nanoszony jest techniką sitodruku [7,10,11].

Uszczelniacz powinien zachowywać stabilność termiczną w podwyższonych temperaturach oraz chemiczną obojętność wobec materiałów zastosowanych w konstrukcji ogniwa. Nie powinien ulegać degradacji w wyniku kontaktu z powietrzem lub wilgocią oraz pod wpływem promieniowania UV. Ze względów technologicznych powinien nadawać się do stosowania na skalę masową [10]. W przypadku rozpuszczania składników uszczelniacza w elektrolicie może dochodzić do rozszczelnienia fotoogniwa, a tym samym do spadku jego wydajności [12].

W ramach niniejszej pracy zastosowano dwa rodzaje uszczelnienia (folią polimerową i uniwersalnie stosowanym silikonem) barwnikowego ogniwa fotowoltaicznego oraz ocenie poddano jakość połączenia elektroda-uszczelniacz-elektroda.

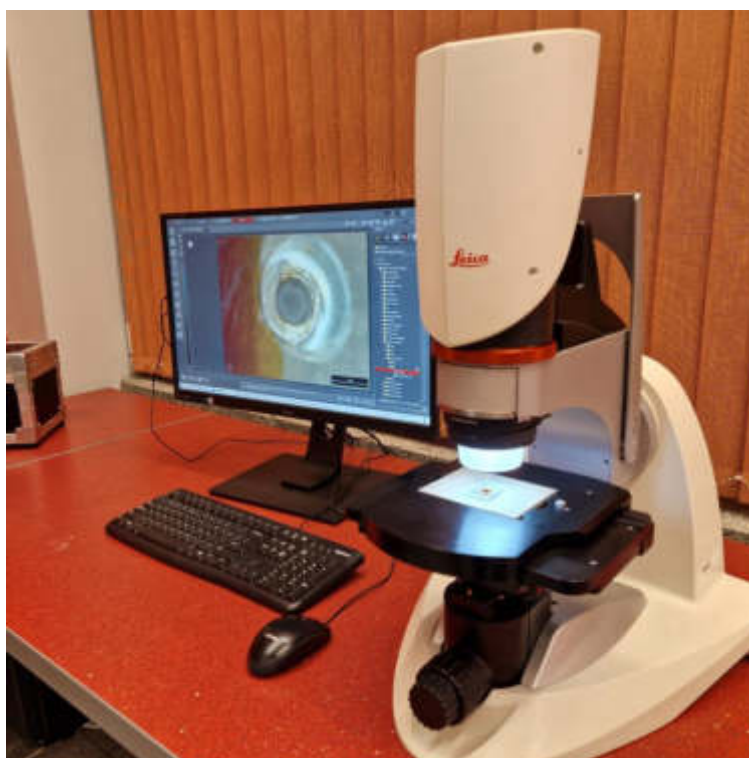
## 2. MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

Wytworzono dwa rodzaje barwnikowych ogniw fotowoltaicznych, które były uszczelnione:

- folią polimerową,
- silikonem.

Do uszczelnienia barwnikowego ogniwa fotowoltaicznego zastosowano folię polimerową Meltonix firmy Solaronix o grubości 25  $\mu\text{m}$ , którą wygrzewano w temperaturze 70°C, 90°C, 110°C. Ponadto dla porównania użyto ogólnodostępnego uniwersalnego silikonu TYTAN, którym zabezpieczano fotoogniwo w temperaturze pokojowej. Według informacji producenta jest to elastyczny i szybko utwardzający się produkt o wszechstronnym zastosowaniu. Jest on łatwy w użyciu, posiada bardzo dobrą przyczepność do szkła, ceramiki i glazury oraz bardzo dobre własności mechaniczne. Ponadto jest odporny na promieniowanie UV oraz zmienne warunki atmosferyczne. Odporność temperaturowa silikonu po utwardzeniu mieści się w zakresie -40°C÷100°C. Barwnikowe ogniwa fotowoltaiczne wytworzono zgodnie z opisem znajdującym się w artykule pt. „Wpływ efektu starzenia i uszczelniania na własności elektryczne barwnikowych ogniw fotowoltaicznych” niniejszego opracowania.

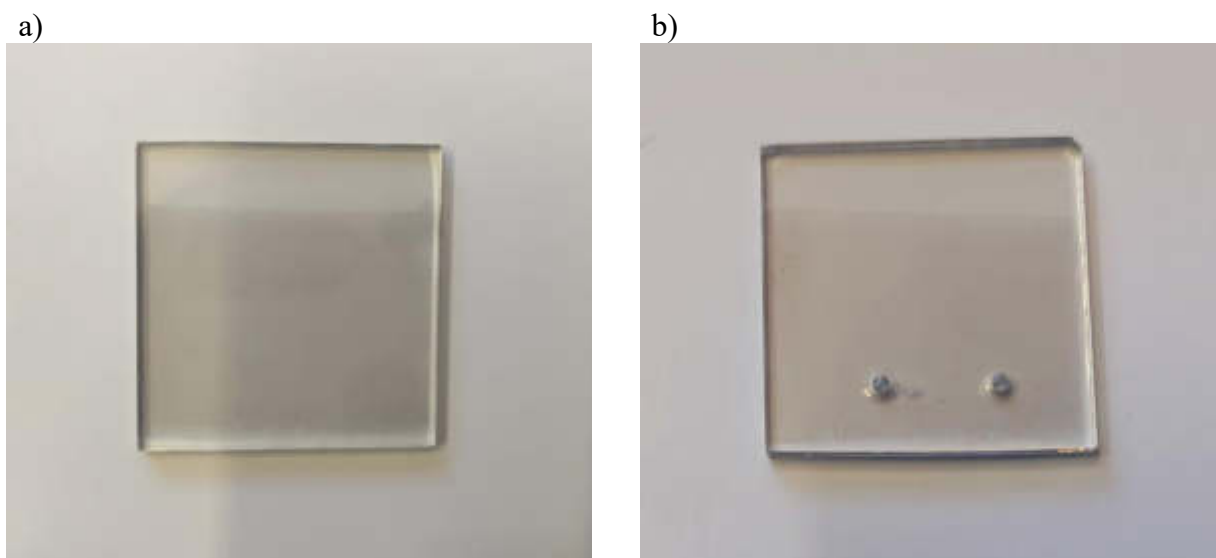
Jakość wykonanych uszczelnień oraz wybranych elementów DSSCs analizowano na podstawie obserwacji przy pomocy optycznego mikroskopu cyfrowego do obrazowania i analizy 2D i 3D Leica DVM6 A wyposażonego w kamerę cyfrową o rozdzielczości 10 Mpx (Rys. 1). Układ zoom mikroskopu jest pochylany na statywie, co w połączeniu z obrotowym stolikiem sprawia, że obserwacja próbki z każdej strony jest dużo łatwiejsza niż w standardowych mikroskopach. Sprawność wytworzonych DSSCs określono na podstawie zmierzonych charakterystyk prądowo-napięciowych przy użyciu systemu SS I V CT 02 firmy PV Test Solutions Tadeusz Żdanowicz wyposażonego w symulator promieniowania słonecznego. Pomiar wykonano przy natężeniu oświetlenia  $1000 \text{ W/m}^2$  i dla widma promieniowania słonecznego AM 1,5.



Rysunek 1. Mikroskop optyczny Leica DVM6 A z umieszczonym na stoliku DSSC  
*Figure 1. Leica DVM6 A optical microscope with DSSC placed on the stage*

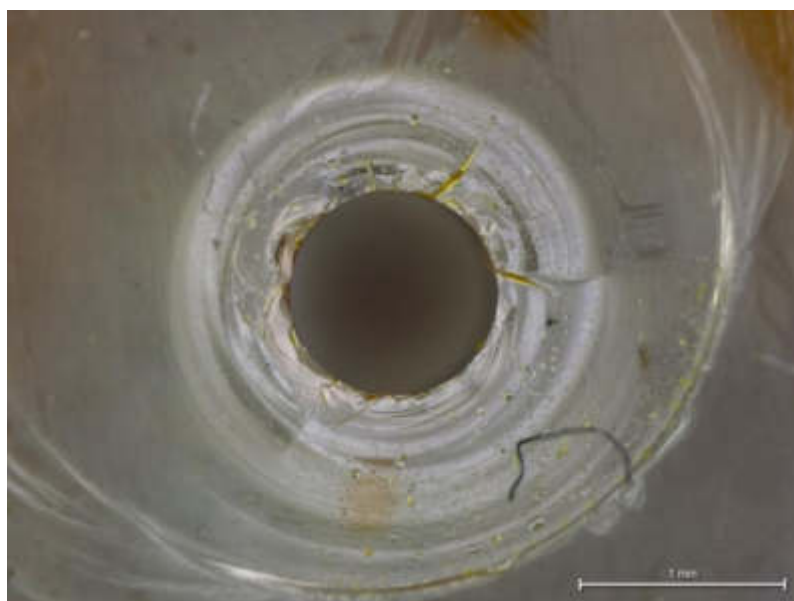
#### 4. WYNIKI BADAŃ

W ramach niniejszej pracy wykonano fotoogniwa w układzie zamkniętym (z uszczelnieniem). W celu wypełnienia elektrolitem uszczelnionego DSSCs w podłożach przeznaczonych na przeciwelektrodę nawiercano po dwa otwory (Rys. 2) przy użyciu wiertła z węglików spiekanych o średnicy 1 mm. Na podstawie obserwacji mikroskopowych stwierdzono, że średnica wywierconych otworów wynosi około 1 mm (Rys. 3). Ponadto okiem niezbrojonym zaobserwowano, że wraz ze zużyciem wiertła zwiększa się liczba defektów wokół obrabianej powierzchni.



Rysunek 2. Przeciwelektroda barwnikowego ogniwa fotowoltaicznego a) bez nawierconych otworów, b) z nawierconymi otworami

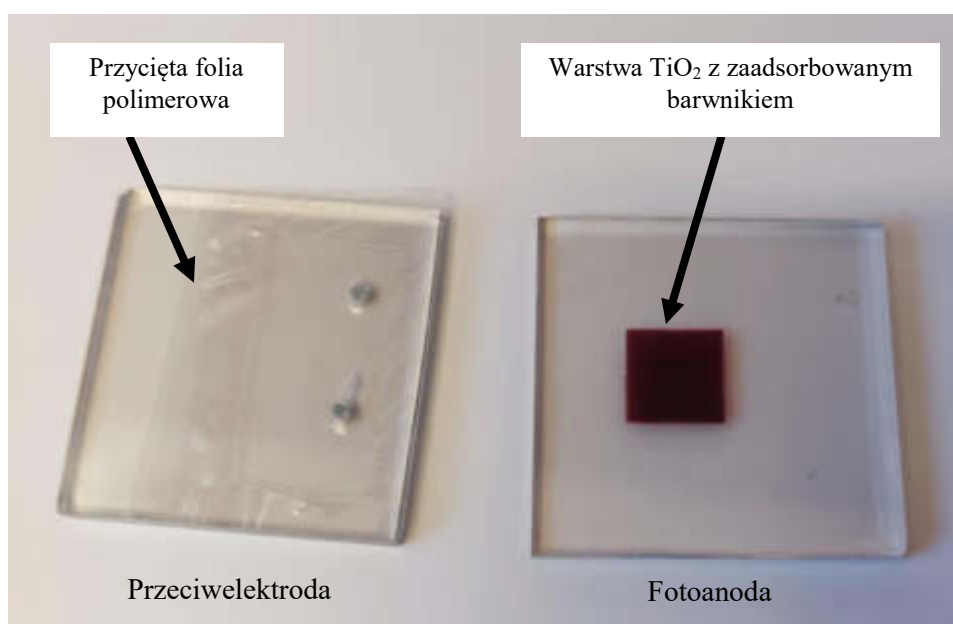
Figure 2. Counter electrode of dye-sensitized solar cell a) without drilled holes, b) with drilled holes



Rysunek 3. Nawiercony w podłożu szklanym otwór (mikroskop cyfrowy)

Figure 3. Hole drilled in the glass substrate (digital microscope)

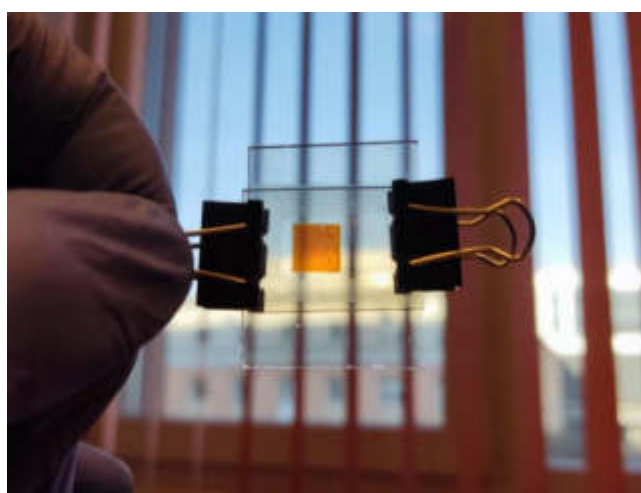
Folię polimerową Meltonix przycinano w kształcie prostokąta, a następnie w środku wykonano „okno”, tak aby zmieściła się w nim cała powierzchnia warstwy  $\text{TiO}_2$  z zaadsorbowanym barwnikiem znajdująca się na przeciwległej fotoanodzie DSSC (Rys. 4).



Rysunek 4. Wytworzona przeciwelektroda (z przyciętą folią polimerową) i fotoanoda barwnikowego ogniwa fotowoltaicznego

*Figure 4. Manufactured counter electrode (with cut polymer film) and photoanode of dye-sensitized solar cell*

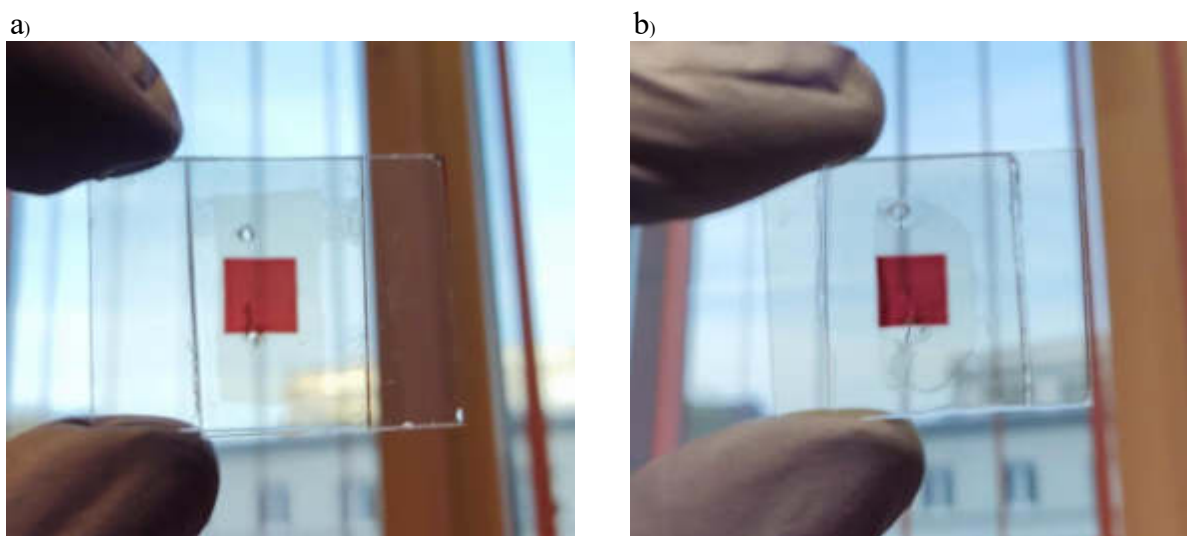
Następnie łączono przeciwelektrodę i fotoanodę, które unieruchomiono za pomocą metalowych klipsów (Rys. 5) i wygrzewano w piecu. Zastosowano różną temperaturę zgrzewania (70°C, 90°C, 110°C) folii polimerowej. W przypadku silikonu, cienką warstwę materiału naniesiono strzykawką dookoła warstwy aktywnej (TiO<sub>2</sub> z barwnikiem), którą następnie łączono z przeciwelektrodą.



Rysunek 5. Wytworzone barwnikowe ogniwo fotowoltaiczne uszczelnione folią polimerową przed zgrzewaniem umieszczone w metalowych klipsach

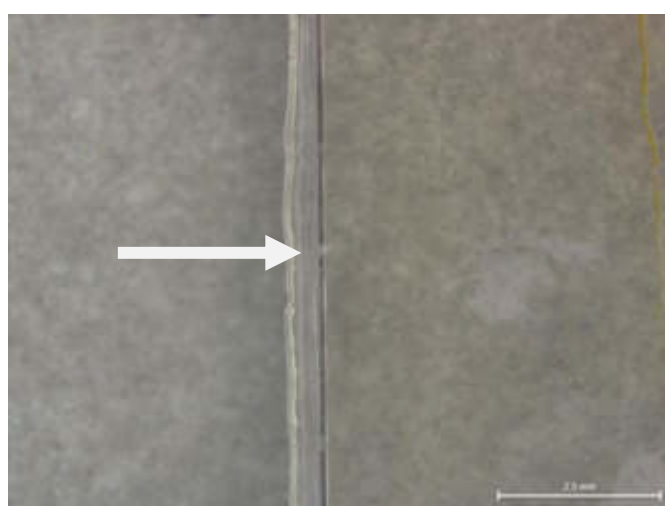
*Figure 5. Manufactured dye-sensitized solar cell sealed with a polymer film placed in metal clips before welding*

Na rysunku 6 przedstawiono wytworzone barwnikowe ogniwo fotowoltaiczne przed wypełnieniem elektrolitem uszczelnione folią polimerową oraz silikonem. Zaobserwowano, że zarówno folia polimerowa, jak i silikon są bezbarwne i przezroczyste. Stwierdzono, że przy łączeniu (ściskaniu) silikonu część materiału może zachodzić na warstwę aktywną, a dodatkowo wychodzi poza brzegi fotoogniwa (Rys. 7). Ponadto, metoda ta nie jest powtarzalna ze względu na trudność w równomiernym naniesieniu ilości materiału na powierzchnię. Po manualnej próbie rozdzielania elektrod stwierdzono, że utworzone złącza mają bardzo dobrą przyczepność do podłoża. Warto również pamiętać, o tym, że szybkość utwardzania silikonu to 2mm/24h.



Rysunek 6. Wytworzone barwnikowe ogniwo fotowoltaiczne przed wypełnieniem elektrolitem uszczelnione a) folią polimerową, b) silikonem

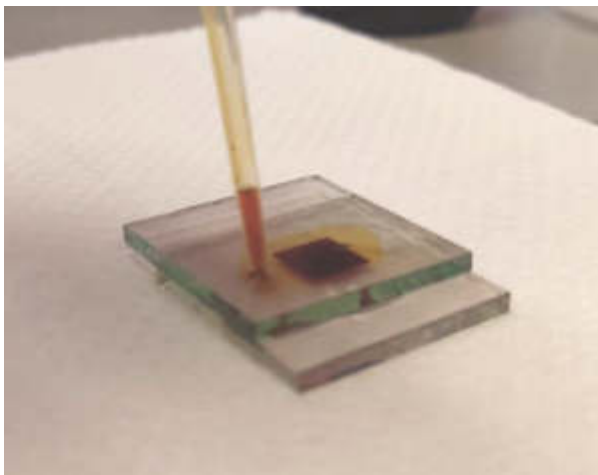
*Figure 6. Manufactured dye-sensitized solar cells sealed with a) polymer film, b) silicone in order to prevent liquid electrolyte leakage*



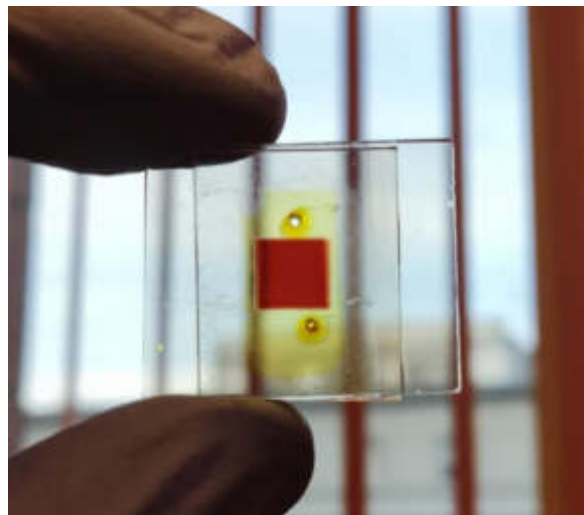
Rysunek 7. Uszczelnienie silikonem barwnikowego ogniwa fotowoltaicznego (mikroskop cyfrowy)

*Figure 7. Silicone sealing of the dye-sensitized solar cell (digital microscope)*

Elektrolit wpuszczano za pomocą pipety Pasteura (Rys. 8). Na rysunku 9 przedstawiono uszczelnione folią polimerową barwnikowe ogniwo fotowoltaiczne po wypełnieniu elektrolitem.

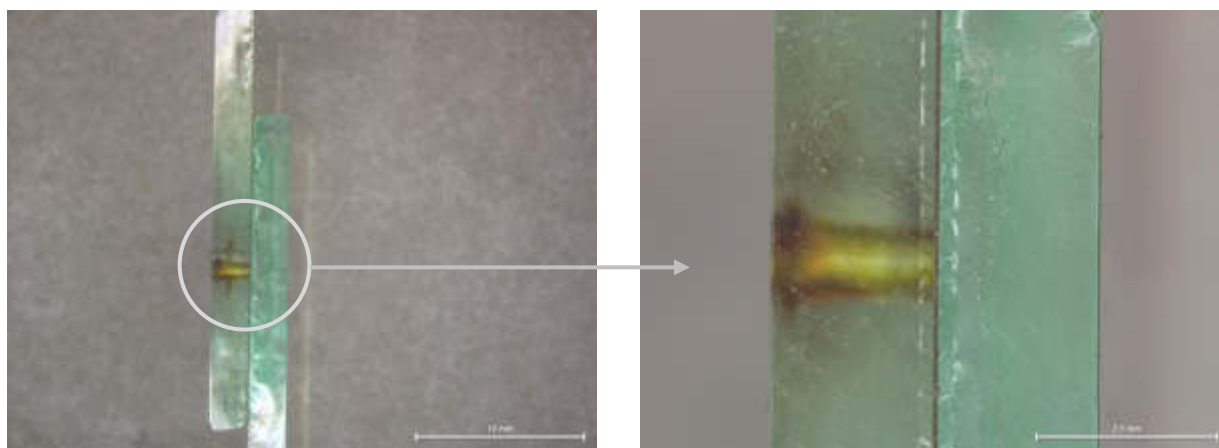


Rysunek 8. Wypełnianie elektrolitem uszczelnionego DSSC  
*Figure 8. Electrolyte filling of the sealed DSSC*

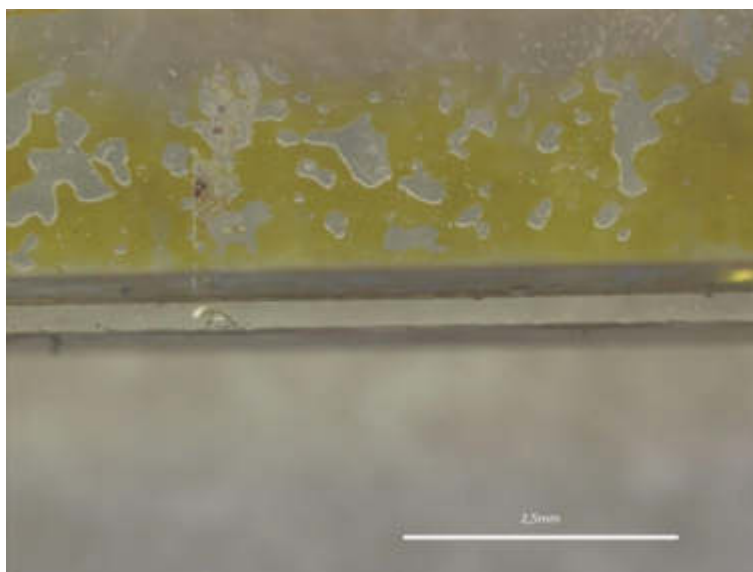


Rysunek 9. Uszczelnione folią polimerową DSSC po wypełnieniu elektrolitem  
*Figure 9. DSSC sealing with polymer foil after electrolyte filling*

Właściwe zabezpieczenie ogniwa słonecznego folią polimerową uzyskano w temperaturze 110°C (Rys. 10). W niższej temperaturze powstają pęcherze, w które po wypełnieniu układu fotowoltaicznego dostaje się elektrolit (Rys. 11).



Rysunek 10. Widok z boku uszczelnionego folią polimerową barwnikowego ogniwa fotowoltaicznego uszczelnionego w temperaturze 110°C  
*Figure 10. Side view of the dye-sensitized solar cells sealed with the polymer film, sealed temperature of 100°C*



Rysunek 11. Brzeg zabezpieczonego folią polimerową barwnikowego ogniwa fotowoltaicznego uszczelnionego w temperaturze 70°C

*Figure 11. The edge of the dye-sensitized solar cells protected with the polymer film, sealed temperature of 70 °C*

Uszczelnione folią polimerową oraz silikonem barwnikowe ogniwa fotowoltaiczne uzyskały sprawność odpowiednio 4,82 % oraz 4,65 %. Własności elektryczne wytworzonych DSSCs przedstawiono w artykule pt. „Wpływ efektu starzenia i uszczelniania na własności elektryczne barwnikowych ogniw fotowoltaicznych” niniejszego opracowania.

## 5. WNIOSKI

Barwnikowe ogniwa fotowoltaiczne (DSSC) należą do grupy ogniw trzeciej generacji, które naśladują występujący w przyrodzie mechanizm fotosyntezy. Obecnie trwają intensywne prace badawcze nad rozwojem technologii DSSC, mające na celu zwiększenie sprawności konwersji fotowoltaicznej. Wydajność fotoogniw jest uzależniona od zjawisk przebiegających na granicy faz pomiędzy półprzewodzącym tlenkiem metalu, barwnikiem, warstwą katalityczną oraz elektrolitem. Ze względu na to, że elektrolit zawiera lotne związki organiczne oraz rozpuszczalniki DSSCs muszą być bardzo dokładnie i precyzyjnie uszczelnione.

Na podstawie dokonanej analizy stwierdzono, że zarówno folia polimerowa, jak i silikon zapewniają przezroczystość oraz dobrą jakość połączenia elektroda-uszczelniacz-elektroda. Bezbarwne spoiwo zabezpiecza fotoogniwo przed wyciekaniem i odparowaniem elektrolitu jednocześnie chroniąc je przed wnikaniem wilgoci i powietrza. Dodatkową zaletą wykorzystania folii polimerowej jest jednolita grubość spoiwa na całej uszczelnianej powierzchni fotoogniwa. Właściwe zabezpieczenie fotoogniwa folią polimerową uzyskano dla temperatury łączenia 110°C. W przypadku użycia silikonu, pomimo łatwości w użyciu, występują trudności w równomiernym pokryciu wyznaczonej do uszczelnienia powierzchni. Zarówno folia polimerowa, jak silikon nie weszły w reakcję z zastosowanym w fotoogniwie elektrolitem.

## PODZIĘKOWANIA

Pracę zrealizowano w ramach kształcenia zorientowanego projektowo – PBL programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza w zakresie projektu pt.: „Wpływ efektu starzenia i uszczelniania na własności elektryczne barwnikowych ogniw fotowoltaicznych”.

## LITERATURA

1. A. Andualem, S. Demiss, Review on Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs). *Edelweiss Applied Science Technology* 2/1 (2018) 145–150
2. L. A. Dobrzański, M. Prokopiuk vel Prokopowicz, K. Lukaszewicz, A. Drygała, M. Szindler, Graphene oxide film as semi-transparent counter electrode for dye-sensitized solar cell. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 73/1 (2015) 13-20
3. A.A.F. Husain, W.Z.W. Hasan, S. Shafie, M.N. Hamidon, S.S. Pandey, A review of transparent solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94 (2018) 779-791
4. D. Gielen, R. Gorini, R. Leme, G. Prakash, N. Wagner, L. Janeiro, et al., World energy transitions outlook: 1.5° C pathway, The International Renewable Energy Agency (IRENA) 2021
5. K. Sharama, V. Sharama, S.S. Sharama, Dye-sensitized solar cell technology: Fundamentals and Current Status. *Nanoscale Research Letters* 13/381 (2018) 1-46
6. J. Yang, M. Min, Y. Yoo, W.J. Kim, S. Kim, H. Lee, Impermeable flexible liquid barrier film for encapsulation of DSSC metal electrodes, *Scientific Reports* 27422 (2016)
7. A. Agrawal, S. A. Siddiqui, A. Soni, G. D. Sharma, Advancements, frontiers and analysis of metal oxide semiconductor, dye, electrolyte and counter electrode of dye sensitized solar cell, *Solar Energy* 233 (2022) 278-407
8. R. Giovanetti, M. Zannotti, L. Alibabaei, S. Ferraro, Equilibrium and Kinetic Aspects in the Sensitization of Monolayer Transparent TiO<sub>2</sub> Thin Films with Porphyrin Dyes for DSSC Applications, *Internal Journal of Photoenergy* 2014 (2014) ID 834269, 1-9
9. L.T. Huang, M.C. Lin, M.L. Chang, R.R. Wang, H.C. Lin, Thin film /encapsulation of DSSCs on plastic substrate, *Thin Solid Films* 517/14 (2009) 4207-4210
10. J. Kang, J. Kim, H. Jang, J. Kim, Characteristic of DSSC Panels with Silicone Encapsulant, *Internal Journal of Photoenergy* ID 715427 (2015) 1-7
11. F. Ribeiro, J. Macaira, R. Cruz, J. Gabriel, L. Andrade, A. Mendes, Laser assisted glass frit sealing of dye-sensitized solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 96 (2002) 43-49
12. S. P. Mohanty, P. Bhargava, Impact of Electrolytes Based on Different Solvents on the Long Term Stability of Dye Sensitized Solar Cells, *Electrochimica Acta* 168 (2015) 111-115



## Wpływ chemicznej pasywacji na własności użytkowe stali austenitycznej

J. Jaworska, M. Kciuk<sup>a</sup>,

<sup>a</sup>Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych  
email: monika.kciuk@polsl.pl

**Streszczenie:** Największym zagrożeniem dla bezpieczeństwa konstrukcji i jej trwałości są postępujące procesy korozyjne. Stale nierdzewne, w porównaniu do innych metali konstrukcyjnych, zawierają znacznie większą ilość chromu, który powoduje, że materiał ma zdolność do przejścia w stan pasywny. W artykule przedstawiono wyniki badań odporności korozyjnej stali nierdzewnej 304 poddanej chemicznej pasywacji w roztworach kwasów azotowego oraz cytrynowego.

**Abstract:** The dangerous to the safety of the structure and its durability is the progress of corrosion processes. Stainless steels, compared to other structural metals, contain a much greater amount of chromium, which makes the material passive. The article presents the results of corrosion resistance tests of 304 stainless steel subjected to chemical passivation in solutions of nitric and citric acids.

**Słowa kluczowe:** pasywacja, stal nierdzewna, odporność korozyjna

### 1. WSTĘP

Dynamiczny rozwój inżynierii materiałowej skutkuje powstawaniem coraz to nowszych materiałów, jednakże to stal wciąż pozostaje najpowszechniej stosowanym materiałem konstrukcyjnym. Wynika to z jej łatwej dostępności, względnie niskich kosztów oraz powszechności technologii wytwarzania i przetwarzania stali [1-5].

Klasyfikując stale nierdzewne według struktury, wyróżnia się stale: ferrytyczne, martenzytyczne, martenzytyczno-ferrytyczne oraz kwasoodporne o strukturze: austenitycznej i austenistyczno-ferrytycznej. W porównaniu do innych gatunków, zawierają one znacznie większą ilość chromu, zapewniając tym samym zdolność materiału do wytworzenia warstwy pasywnej. Dodatek tego pierwiastka w ilości co najmniej 13% wpływa na zmianę potencjału chemicznego stopu (z wartości  $-0,5V$  do  $+0,2V$ ) [6-9].

Aktywny metal jest w stanie pasywnym, jeżeli wykazuje podwyższoną odporność korozyjną, dzięki tworzeniu na powierzchni warstewki, która jest stabilna w danym środowisku. Powstająca warstwa tlenków chromu pełni rolę izolatora pomiędzy materiałem ulegającym korozji, a otoczeniem [10-12]. Warstwy pasywne charakteryzują się grubością od kilku do kilkunastu mikrometrów, są nieporowate, wykazują dobrą szczelność, odporność chemiczną, a także dobre przewodnictwo elektronowe.

Stale nierdzewne można również poddawać pasywacji chemicznej poprzez zastosowanie silnego utleniacza. Najczęściej w tym celu używa się kwasu azotowego, jednak coraz częściej ze względów bezpieczeństwa i ochrony środowiska zastępuje się go innymi środkami. Zamiennikiem jest kwas cytrynowy, który mimo swoich słabszych właściwości utleniających daje satysfakcjonującą odporność korozyjną, a przede wszystkim nie jest środkiem toksycznym [1,12-13].

## 2. MATERIAŁ DO BADAŃ

Badania wykonano na próbkach ze stali austenitycznej 0H18N9 (1.4301) 304 o składzie chemicznym podanym w tablicy 1. W celu przeprowadzenia pasywacji sporządzono 10% roztwór kwasu azotowego i cytrynowego oraz 20% roztwór kwasu cytrynowego. Chemicznej pasywacji poddano po 3 próbki z każdego stanu oraz 3 próbki referencyjne ze stanu wyjściowego. Próbki pasywowano przez 30 minut w temperaturze pokojowej (20°C). Następnie materiał przepłukano w wodzie destylowanej oraz dokładnie osuszono sprężonym powietrzem. Na potrzeby badania przyjęto następujące oznaczenia:

- próbki pasywowane w 10% roztworze kwasu azotowego oznaczono kolejno: A-1, A-2, A-3,
- próbki pasywowane w 10% roztworze kwasu cytrynowego oznaczono kolejno: C-1,C-2,C-3,
- próbki pasywowane w 20% roztworze kwasu cytrynowego oznaczono kolejno: C-4,C-5,C-6,
- próbki referencyjne (stan wyjściowy): R-1, R-2, R-3.

Tablica 1. Skład chemiczny stali 0H18N9 (1.4301) 304

Table 1. Chemical composition of 0H18N9 (1.4301) 304 steel

| C    | Si  | Mn  | P     | S     | Cr        | Ni       | N    |
|------|-----|-----|-------|-------|-----------|----------|------|
| ≤ %  | ≤ % | ≤ % | ≤ %   | ≤ %   | %         | %        | ≤ %  |
| 0,07 | 1,0 | 2,0 | 0,045 | 0,015 | 17,5-19,5 | 8,0-10,5 | 0,11 |

## 3. PRZEBIEG BADAŃ

W celu zbadania odporności korozyjnej próbek poddanych pasywacji chemicznej zastosowano metodę potencjodynamiczną Tafela. Elektrochemiczne badania odporności na korozję wykonano w 3,5 % roztworze NaCl na potencjostacie- galwanostacie firmy ATLAS 0531 EU&IA. Powierzchnia badana wynosiła 34,2 mm<sup>2</sup>. W badaniach elektrodą odniesienia była nasycona elektroda chloro-srebrowa AgCl, natomiast elektrodą pomocniczą była elektroda stalowa.

## 4. WYNIKI BADAŃ

W tablicy 2 zestawiono uzyskane wyniki badań korozyjnych, zaś zmiany wartości potencjału w czasie oraz uzyskane krzywe polaryzacyjne Tafela przedstawiono rys. 2-5. Najwyższe wartości oporu polaryzacji w odniesieniu do elektrody AgCl oraz średnią najniższą wartość gęstości prądu korozyjnego, wykazano w przypadku próbek A, które pasywowano chemicznie w roztworze w kwasu azotowego (Rysunek 3.). W związku z tym próbki te są najbardziej odporne na korozję w środowisku jonów chlorkowych. Najgorszą odporność na korozję wykazują próbki referencyjne bez wytworzonej chemicznie warstwy pasywnej. Próbki

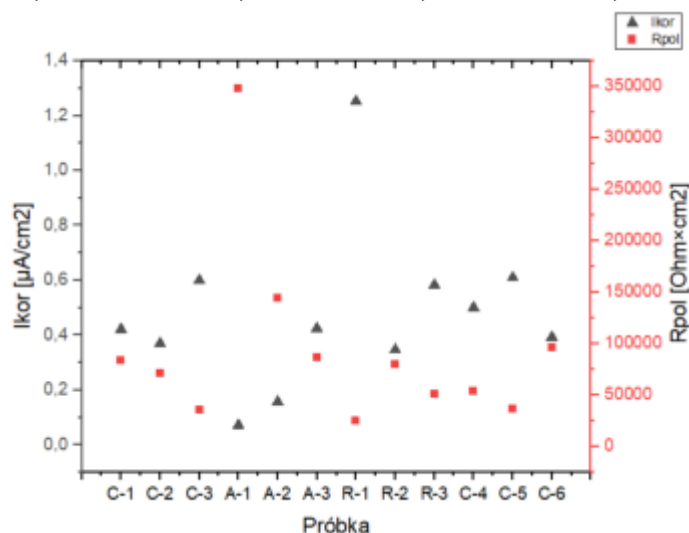
te uzyskały najsłabsze wyniki, tj. najniższy opór polaryzacji i najwyższą gęstość prądu (Rysunek 4.).

Najniższą średnią wartość potencjału korozyjnego uzyskano w przypadku próbek pasywowanych w roztworze kwasu cytrynowego 10% (-73mV), a najwyższą (wynoszącą -13mV) przy próbkach pasywowanych kwasem azotowym (Tablica 3.). Dla próbek pasywowanych w 20% kwasie cytrynowym jest to wartość -49,33 mV. Próbki pasywowane w kwasie azotowym, mimo najlepszych wyników odporności korozyjnej, wykazują największe odchylenie od średniej uzyskanego wyniku, a próbki C pasywowane w 20% roztworze najmniejszą.

Tablica 2. Uzyskane wyniki badań korozyjnych

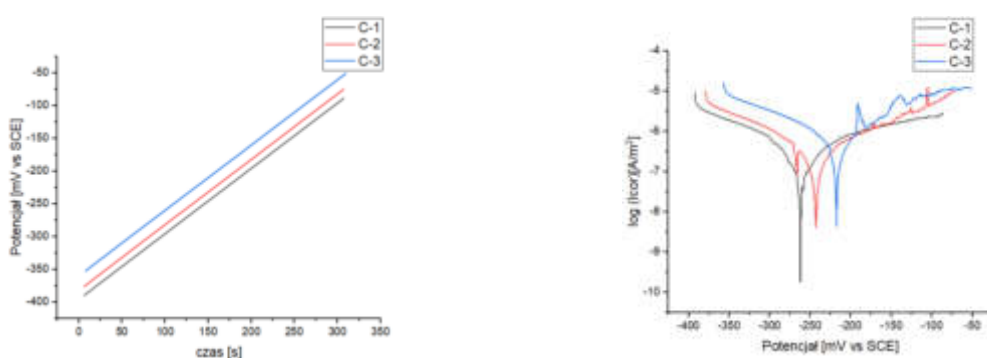
Table 2. Results of the corrosion tests

| Próbka | $I_{kor}$<br>[ $\mu A/cm^2$ ] | $B_a$ [mV] | $B_c$ [mV] | $E_{kor}$ [mV] | $R_{pol}$<br>[ $\Omega \times cm^2$ ] |
|--------|-------------------------------|------------|------------|----------------|---------------------------------------|
| C-1    | 0,422                         | 204,028    | 135,498    | -261,616       | 83612                                 |
| C-2    | 0,370                         | 116,737    | 127,062    | -234,986       | 71317                                 |
| C-3    | 0,600                         | 81,005     | 122,708    | -208,214       | 35302                                 |
| A-1    | 0,072                         | 164,404    | 89,983     | -150,422       | 348592                                |
| A-2    | 0,157                         | 125,854    | 89,574     | -192,055       | 144267                                |
| A-3    | 0,425                         | 300,280    | 118,154    | -240,111       | 86548                                 |
| R-1    | 1,253                         | 171,747    | 124,182    | -223,994       | 24982                                 |
| R-2    | 0,347                         | 153,940    | 109,073    | -190,742       | 79695                                 |
| R-3    | 0,583                         | 171,479    | 113,565    | -235,832       | 50833                                 |
| C-4    | 0,501                         | 126,640    | 125,432    | -184,846       | 53995                                 |
| C-5    | 0,610                         | 92,198     | 115,511    | -213,851       | 36509                                 |
| C-6    | 0,393                         | 253,310    | 133,574    | -253,313       | 96714                                 |



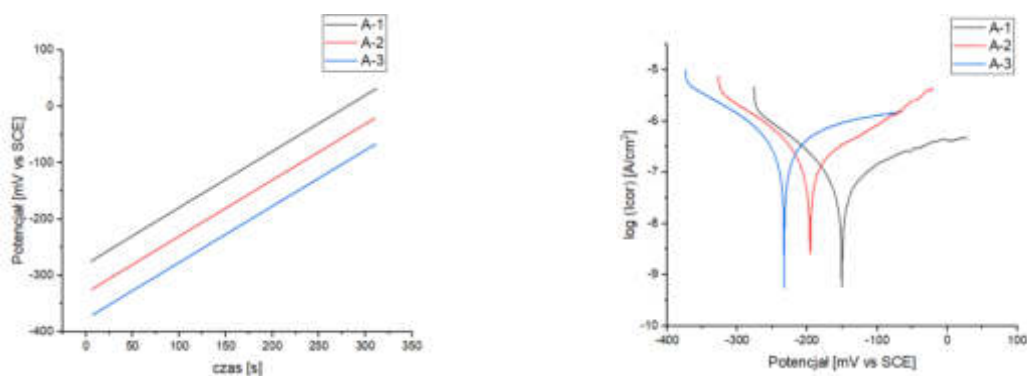
Rysunek 1. Wartości  $I_{kor}$  i  $R_{pol}$  w zależności od badanej próbki

Figure 1.  $I_{kor}$  and  $R_{pol}$  values of tested sample



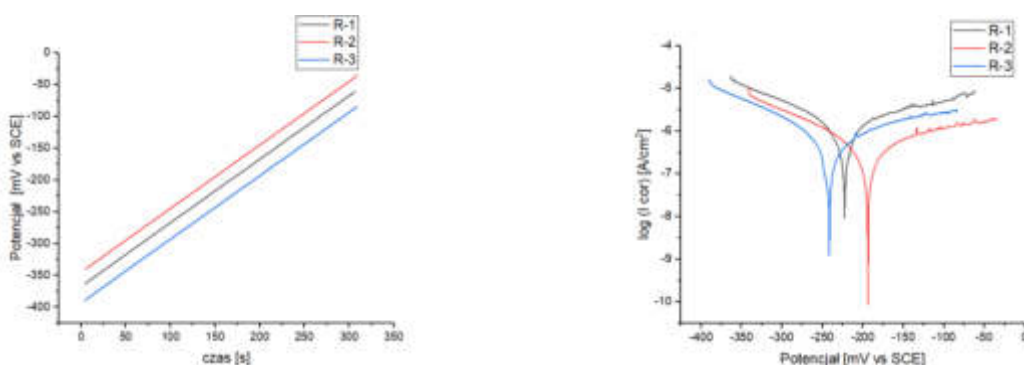
Rysunek 2. Wykresy zależności wartości potencjału od czasu oraz krzywe polaryzacji uzyskane dla próbek pasywowanych w kwasie cytrynowym

Figure 2. Graphs of the dependence of the potential value in time and polarization curves obtained for samples passivated in citric acid



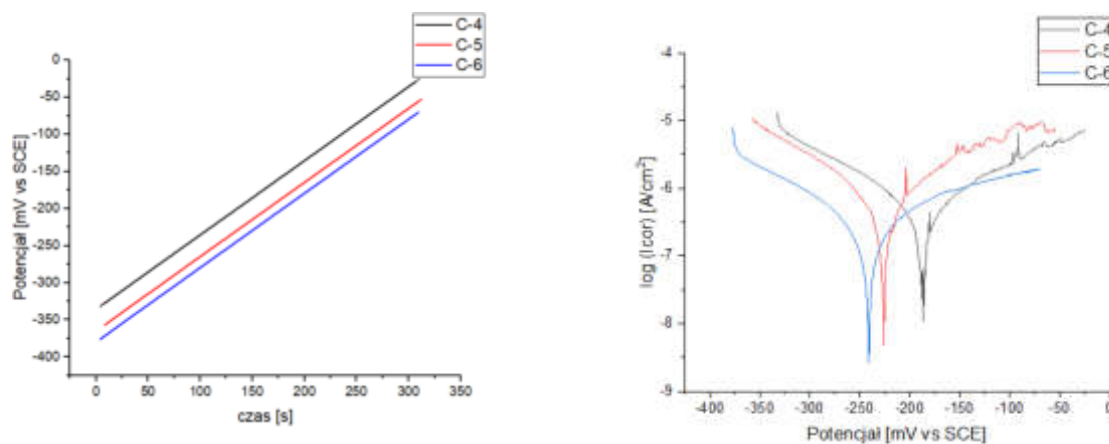
Rysunek 3. Wykresy zależności wartości potencjału od czasu oraz krzywe polaryzacji uzyskane dla próbek pasywowanych w kwasie azotowym

Figure 3. Graphs of the dependence of the potential value on time and polarization curves obtained for samples passivated in nitric acid



Rysunek 4. Wykresy zależności wartości potencjału od czasu oraz krzywe polaryzacji uzyskane dla próbek referencyjnych

Figure 4. Graphs of the dependence of the potential value in time and polarization curves obtained for the reference samples



Rysunek 5. Wykresy zależności wartości potencjału od czasu oraz krzywe polaryzacji uzyskane dla próbek pasywowanych w 20% kwasie cytrynowym

Figure 5. Graphs of the dependence of the potential value in time and polarization curves obtained for samples passivated in 20% citric acid

Tablica 3. Zestawienie wartości potencjału korozyjnego [mV] uzyskanych dla próbek w czasie badania

Table 3. Summary of the values of the corrosion potential [mV] of samples

| Próbka     | Ekor [mV] dla C | Ekor [mV] dla A | Ekor [mV] dla R | Ekor [mV] dla C 20% |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| 1          | -50             | 35              | -30             | -49                 |
| 2          | -75             | -15             | -55             | -54                 |
| 3          | -95             | -60             | -80             | -45                 |
| średnia    | -73,3333        | -13,3333        | -55             | -49,3333            |
| odchylenie | 18,40894        | 38,80149        | 20,41241        | 3,681787            |

## 5. PODSUMOWANIE

Najmniej odporne na korozję okazały się próbki referencyjne, bez wytworzonej chemicznie warstwy pasywnej. Stal pasywowana w roztworze 10% kwasu cytrynowego była mniej odporna na korozję niż ta, na której zastosowano silnej utleniający, ale za to bardziej szkodliwy kwas azotowy. Zwiększenie stężenia kwasu cytrynowego do 20% nie wpłynęło na poprawę odporności korozyjnej próbek. Wyniki dla próbek pasywowanych w 10% roztworze kwasu cytrynowego były nawet lepsze, niż dla pasywowanych w mocniejszym kwasie. Zastosowanie kwasu azotowego w celu pasywacji daje najlepsze efekty, lepsze niż kwas cytrynowy. Jednakże stosowanie kwasu  $\text{HNO}_3$  wiąże się z wysokimi kosztami utylizacji odpadów, ochrony operatorów oraz odpowiedniej aparatury. Zwiększenie stężenia kwasu cytrynowego nie wpływa na polepszenie wyników odporności korozyjnej. W celu osiągnięcia skuteczności podobnej do kwasu azotowego można spróbować zastosować podwyższenie temperatury roztworu lub wydłużenie czasu pasywacji chemicznej.

**LITERATURA**

1. J. Baszkiewicz, „Korozja materiałów”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej (2006)
2. B. Surowska, „Wybrane zagadnienia z korozji i ochrony przed korozją”, Lublin (2002)
3. <https://dss-interacciai.pl/stal/stale-odporne-na-korozje/> (16.05.2022)
4. S. Glasstone, „Podstawy elektrochemii”, PWN, Warszawa (1956)
5. C. E. Butzke „Winemaking Problems Solved” Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition (2010), s. 199-256
6. <https://www.ulbrich.com/blog/what-is-martensitic-stainless-steel-and-what-can-it-do-for-your-business/> (16.05.2022)
7. <https://www.eamachine.com/info/metallurgy-of-mo-in-stainless-steel-50234357.html> (16.05.2022)
8. A. Iversen, B. Leffler „Aqueous Corrosion of Stainless Steels”, Shreir's Corrosion (2010), s. 1802-1878
9. P. Lambert „Sustainability of metals and alloys in construction” Sustainability of Construction Materials, (wydanie drugie), Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering (2016), s. 105-128
10. <https://matmatch.com/learn/material/martensitic-stainless-steel> (16.05.2022)
11. B. Somerday, C. Marchi „Hydrogen containment materials Solid-State” Hydrogen Storage Materials and Chemistry, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials (2008) s. 51-81
12. L. Wang, S. Voyshnis, A. Seyeux, P. Marcus, „Ion transport mechanisms in the passive film formed on 304L stainless steel studied by ToF-SIMS with <sup>18</sup>O isotopic tracer”, Corrosion Science 173 (2020), s. 120-138
13. <https://www.icorr.org/iso12944-steel-structure-design-corrosion/> (16.05.2022)



## Aspekty materiałowe i technologiczne procesu przetapiania laserowego

M. Konieczny <sup>a</sup>, A. Wójtowicz <sup>a</sup>, K. Królikowska <sup>a</sup>, M. Laskowski <sup>a</sup>, P. Cisowski <sup>a</sup>,  
S. Jędrzejewski <sup>a</sup>, M. Bonek <sup>b</sup>, C. Meran <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Student/ka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: andrwoj101@student.polsl.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: mirosław.bonek@polsl.pl

<sup>c</sup> Pamukkale University, Department of Mechanical Engineering, Denizli, Turkey

**Streszczenie:** W niniejszym artykule zostaną omówione aspekty materiałowe i technologiczne procesu przetapiania laserowego warstwy wierzchniej materiałów metalowych. Zostanie poruszona tematyka związana z projektowaniem takiej metody obróbki, z materiałowymi skutkami jej oddziaływania na własności trybologiczne i wytrzymałościowe.

**Abstract:** This paper will discuss the material and technological aspects of the process of laser remelting of the surface layer of metallic materials. The topics related to the design of such a processing method, to the material effects of its influence on tribological and strength properties will be discussed.

**Słowa kluczowe:** laser, obróbka powierzchniowa, komputerowe wspomaganie procesu, powłoki PVD i CVD, metoda elementów skończonych

### 1. WSTĘP

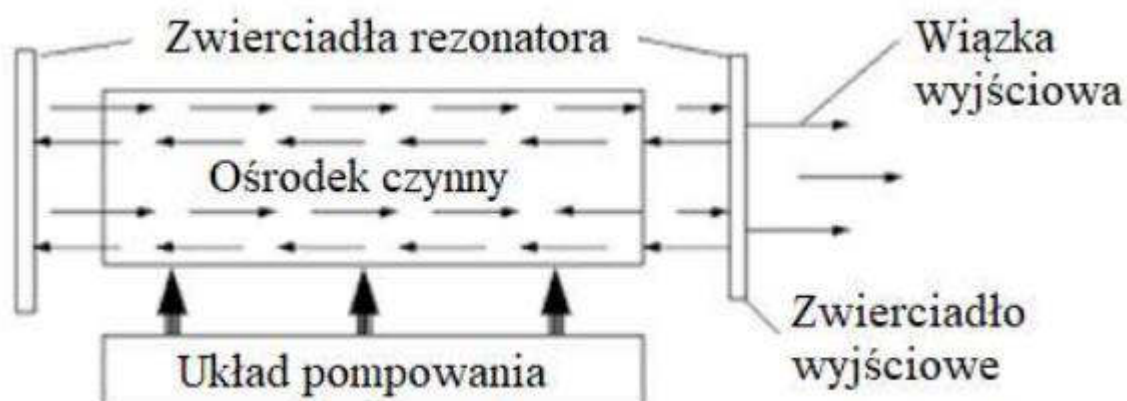
W dzisiejszych czasach przemysł stawia coraz to większe wymagania co do własności i wszechstronności materiałów wykorzystywanych w odpowiedzialnych konstrukcjach czy też elementów zapewniających trwałość podczas eksploatacji. Poddawane nieustannemu niszczeniu materiały ulegają najróżniejszym czynnikom. Od niektórych elementów wymaga się np. twardej i odpornej na ścieranie warstwy zewnętrznej, a plastycznego rdzenia. Od innych znowu wysokiej sztywności czy też dobrej spawalności. Wiele aspektów wyróżnia poszczególne gałęzie przemysłu, gdzie współczesna inżynieria wymaga bardzo dużej precyzji wykonania, obróbki i otrzymanych w wyniku przemian własności. W odpowiedzi na powyższe wspomniane wymagania, systemy jakościowe dążą do tego aby procesy wytwórcze materiałów były wspomagane za pośrednictwem bardzo dokładnych, odwzorowujących rzeczywiste warunki programów symulacyjnych aby zapewnić odpowiednie własności. Tak przeprowadzony proces wytwórczy czy projektowy zapewnia dużą dokładność i precyzję powstających materiałów i produktów końcowych.

Jedną z metod, która zyskuje popularność w ostatnich latach jest nadawanie własności produktowi końcowemu poprzez modyfikację warstwy wierzchniej materiału. Istnieje wiele możliwości ulepszania powierzchni m.in. hartowanie powierzchniowe, napawanie, natryskiwanie cieplne, nanoszenie powłok PVD czy CVD, przetapianie, stopowanie. Powyższe metody umożliwiają zapewnienie dużo lepszych własności warstwy wierzchniej w stosunku do materiału podłoża. Daje to sprzyjające ekonomiczne możliwości, ponieważ można na stosunkowo niedrogi materiał nanieść relatywnie niewiele droższego materiału zapewniając wystarczające własności eksploatacyjne.

## 2. BUDOWA I EKSPLOATACJA LASERA

Laser jest generatorem promieniowania optycznego, w którym występuje wzmacniacz optyczny wykorzystujący zjawisko emisji wymuszonej, układ sprzężenia zwrotnego oraz układ zasilający. Lasery mogą generować promieniowanie optyczne z zakresu widzialnego (tj. światło), ultrafioletowe oraz podczerwone. Generowanie promieniowania optycznego następuje gdy spełniony jest warunek amplitudy oraz fazy. Rolę układu sprzężenia zwrotnego posiada rezonator optyczny. Odpowiada on za właściwości źródła promieniowania takie jak duża koherencja czasowa i przestrzenna. Wzmacnianie promieniowania optycznego można wykonać również za pomocą m.in. wzmacniania parametrycznego [1].

Budowę lasera wyróżniają elementy takie jak ośrodek czynny, rezonator optyczny, układ pompujący. Ośrodek czynny to pewna materia (np. zbiór atomów, jonów, molekuł) posiadająca zdolność wzmacniania fali elektromagnetycznej, która może być również wytwarzana przez materiał półprzewodnikowy. Wzbudzony ośrodek czynny zlokalizowany jest między zwierciadłami składającymi się na rezonator optyczny. Wzmacnia on promieniowanie wzbudzonego ośrodka czynnego. Układ pompujący odpowiada za wzbudzenie ośrodka aktywnego do wyższych stanów energetycznych. Zakładając, że ośrodek aktywny jest w stanie równowagi termodynamicznej to poziom energetyczny określa się za pomocą rozkładu Boltzmanna. Taki przypadek ma do czynienia z proporcjonalnością odwrotną poziomów energetycznych do liczby atomów, które się na nim znajdują [2]. Uproszczony rysunek nr 1 wizualnie przedstawia budowę lasera.



Rysunek 1 Uproszczony schemat budowy lasera [3]

Figure 1 Simplified schematic of the laser structure [3]



Należy również pamiętać o układzie chłodzącym, ponieważ temperatura ośrodka czynnego podczas pracy lasera może wzrosnąć znacząco. Media chłodzące jakie najczęściej są wykorzystywane w tym celu to chłodzenie poprzez ciągły przepływ gazu laserowego oraz montowanie dookoła rezonatora wymienników ciepła. Ideą zastosowania tych rozwiązań jest sprawne odprowadzanie nadmiaru ciepła [4, 5].

Lasery dzieli się ze względu na moc, sposób pracy, długość fali, ośrodek czynny oraz zastosowania. Podział ze względu na ośrodek czynny:

- lasery gazowe (np. argonowy),
- lasery na ciele stałym (np. rubinowy),
- lasery na cieczy (np. barwnikowy),
- lasery półprzewodnikowe (np. bezzłazowe).

Ze względu na zastosowania wyróżniamy lasery:

- specjalne, wytwarzające ultrafiolet o możliwie jak najmniejszej długości fali (np. laser KrCl),
- wykorzystywane w medycynie (np. laser rubinowy).

Zależnie od widma promieniowania wyróżniamy lasery:

- w podczerwieni,
- w części widzialnej,
- w nadfiolecie.

Dodatkowo możemy wyróżnić podział ze względu na moc uzyskanej wiązki laserowej:

- lasery niskoenergetyczne (w medycynie: lasery biostymulacyjne),
- lasery średnioenergetyczne (w medycynie: lasery terapeutyczne),
- lasery wysokoenergetyczne (w medycynie: lasery chirurgiczne) [6].

Zastosowanie lasera w różnych dziedzinach stale rośnie. Wykorzystywane są one w medycynie jako lasery m.in. chirurgiczne, w przemyśle pod postacią laserowego cięcia metali, narzędzia znakującego produkty, urządzeń pomiarowych. Technologie militarne również wykorzystują potencjał zawarty

w laserach pod postacią broni energetycznej, jak i jako systemy naprowadzające. Drukarki laserowe również stają się coraz powszechniejsze i chętnie wykorzystywane w nowoczesnej poligrafii, natomiast same lasery można również spotkać w dziedzinach sztuki specjalizujących się w wizualnych atrakcjach z udziałem laserów. Dzięki szerokiej gamie laserów i ich rodzajów wiele dziedzin może wykorzystywać je na różne sposoby [6].

W przemyśle głównymi wadami technologii laserowej jest jej wysoki koszt oraz niemały koszt szkolenia celem zbudowania wykwalifikowanej grupy pracowników do obsługi maszyny. Dodatkowo, czasem występuje również ograniczenie materiałowe w postaci określonej grubości materiału. Pozytywnymi aspektami takiego rozwiązania jest fakt, że wykorzystując taką technologię można otrzymywać poprawnie wykonane detale z dokładnością nawet do 0,001mm. Jest to szybka

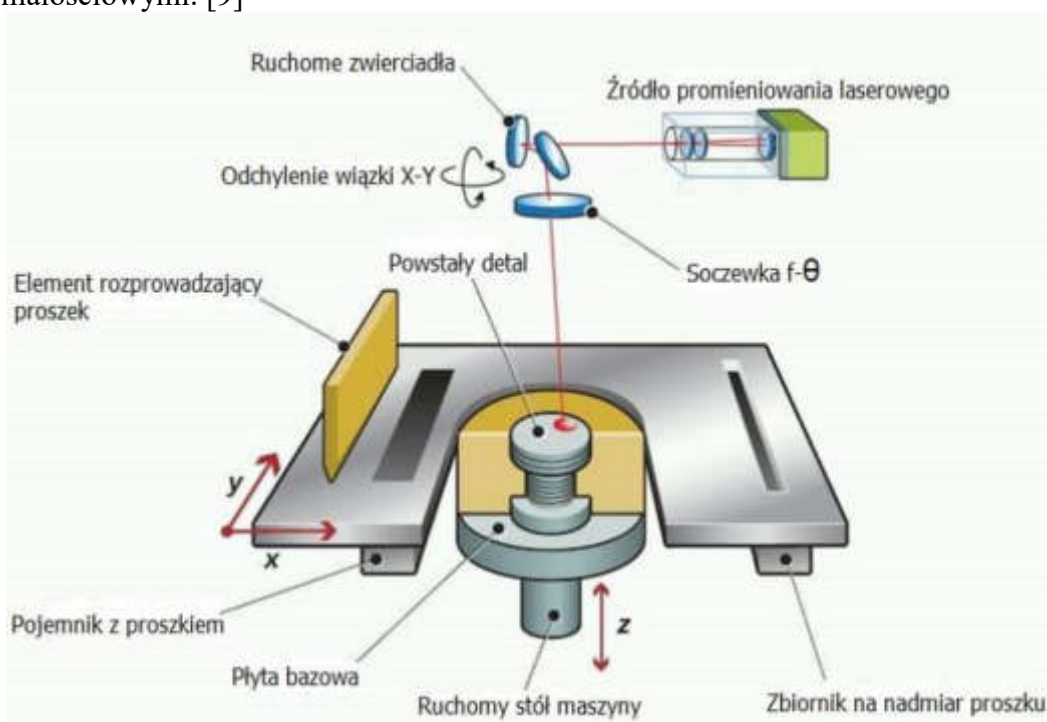
oraz precyzyjna opcja. Można ją w pełni zautomatyzować, dzięki czemu produkcja w praktyce zostanie polepszona wydajnościowo. Niska emisja hałasu zmniejsza również niebezpieczeństwo pracownika na stanowisku pracy. Przykładowe porównanie cięcia laserowego oraz cięcia metodą mechaniczną pokazuje kolejną zaletę wykorzystywania laserów w przemyśle – oszczędność wykorzystywanego surowca [1].

### 3. TECHNOLOGIE PROCESÓW ZWIĄZANYCH Z KSZTAŁTOWANIEM POPRZEZ LASEROWE PRZETAPIANIE STALI

Rozwój technik laserowych, a zwłaszcza opracowanych w latach 80-tych ubiegłego wieku laserów dużej mocy, pozwolił na wykorzystanie laserów jako narzędzi do wytwarzania ulepszonych warstw. Procesy modyfikacji warstw metali za pomocą wiązki laserowej – takie jak hartowanie, stopowanie, ablacja laserowa czy też natapianie i wtapiania wypierają powszechnie dotąd używane tradycyjne metody obróbki powierzchniowej [7]

Techniki laserowe pozwalają na modyfikację, ulepszenie lub zmianę struktury powierzchni badanego materiału poprzez poddanie powierzchni wierzchniej promieniowaniem laserowym o określonych właściwościach. Dają one możliwości do wykonywania dużej ilości bardzo dokładnych operacji technologicznych na trudno obrabialnych materiałach – wliczając w to materiały miękkie, kruche oraz o skomplikowanej strukturze, pozwalając na dokładność oraz wydajność przekraczającą w wysokim stopniu tradycyjne metody obróbki. [8]

Procesy technologii przyrostowych często korzystają z technologii laserowych podczas spiekania oraz topienia proszków metali dzięki możliwości dokładnego nagrzewania domyślnych elementów struktury, pozwalając na precyzyjne nałożenie materiału na powierzchnię wraz z o wiele mniejszym zużyciem materiału nakładanego. Najczęściej spotykanymi technologiami przyrostowymi korzystającymi z laserów w procesie są SLS (Selective Laser Sintering) oraz SLM (Selective Laser Melting). Technologie te różnią się właściwościami uzyskanych wyrobów, porowatością, gęstością oraz właściwościami wytrzymałościowymi. [9]

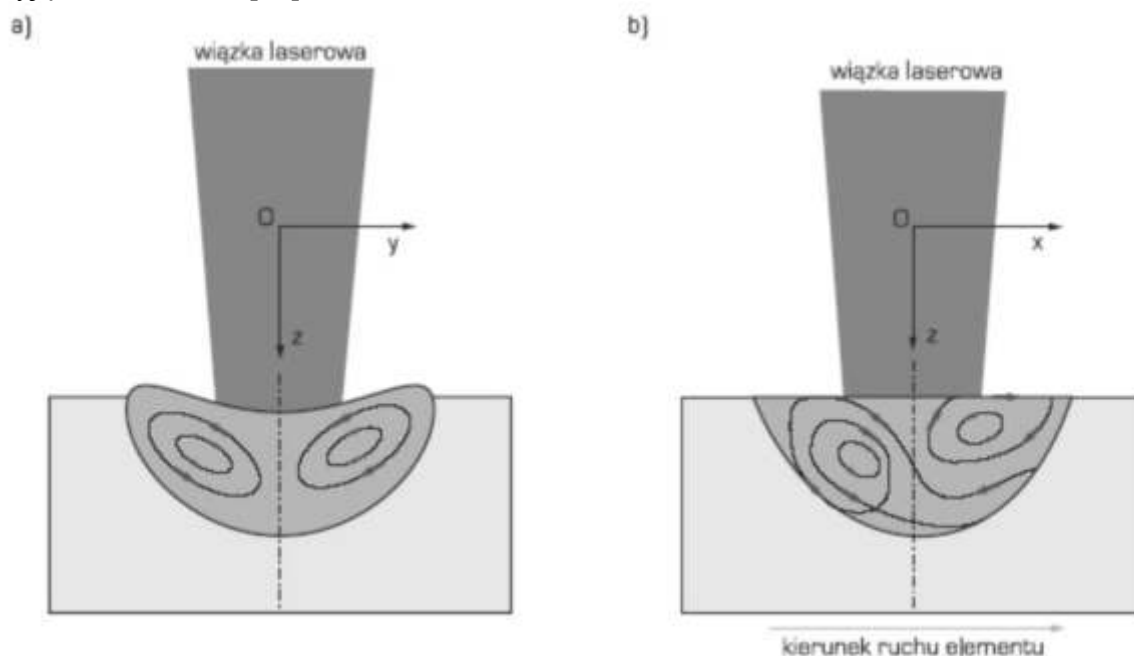


Rysunek 2 Schemat i zasada działania urządzenia do wytwarzania technologii przyrostowego spiekania proszków [9].

Figure 2 Schematic and principle of operation of the additive powder sintering technology manufacturing equipment

Wytwarzanie przyrostowe z użyciem lasera polega na nałożeniu na stół lub materiał cienkiej warstwy sproszkowanego metalu, który jest następnie poddany procesom spiekania lub topienia. Ten proces jest wielokrotnie powtarzany w wyniku każda warstwa spieczona lub stopionego proszku przyczynia się do nadawaniu detali wytwarzanemu przedmiotowi. Dzięki możliwości dobrania odpowiedniej metody, rodzaju proszku oraz zastosowanych parametrów możliwe jest uzyskanie pożądanych właściwości oraz struktury wytwarzanego przedmiotu.

Całkowitą zmianę struktury powierzchniowej materiału można z kolei uzyskać poprzez wykorzystanie procesów przetapiania laserowego, podczas których powierzchnia metalu jest poddawana działaniu lasera o wystarczająco dużej mocy, aby stopić wierzchnią warstwę materiału. Warstwa stopiona jest natychmiastowo poddawana hartowaniu poprzez oddziaływanie cieplne z resztą przedmiotu przez co powstające ziarna martenzytu są wyjątkowo drobne. [10]



Rysunek 3 Schemat ruchów konwekcyjnych w jeziorze laserowym: a) w przekroju prostopadłym  $zOy$  do kierunku ruchu próbki (lub wiązki), b) w przekroju równoległym  $zOx$  do kierunku ruchu próbki (lub wiązki)

Figure 3 Schematic of convective motion in the laser pond: a) in the cross section perpendicular  $zOy$  to the direction of sample (or beam) motion, b) in the cross section parallel  $zOx$  to the direction of sample (or beam) motion

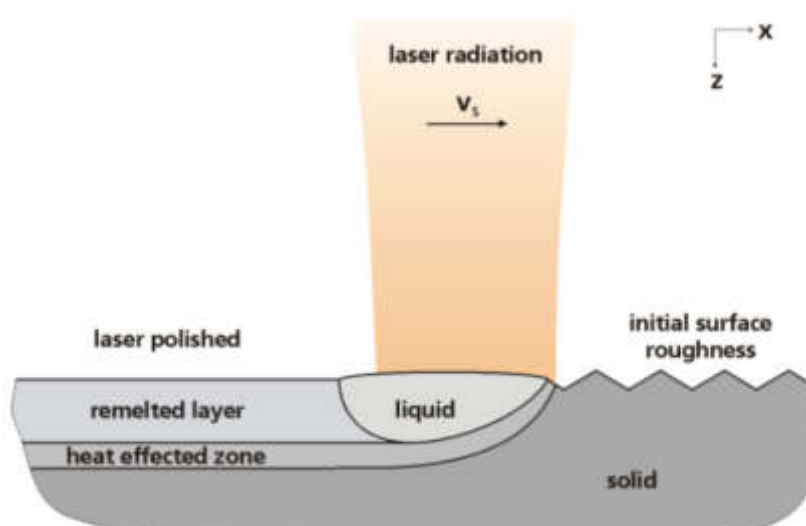
Przetopienie wyłącznie cienkiej warstwy wierzchniej wraz z poddaniem jej błyskawicznemu procesowi hartowania powoduje, że warstwa wierzchnia ma niską plastyczność, wysoką twardość oraz dużą nierówność powierzchni. Duża ilość czynników ma wpływ na jakość struktury zmienianej podczas procesu przetapiania, lecz prędkość posuwu lasera podczas procesu powoduje największe zmiany w warstwie wierzchniej. Przykładowe dane dotyczące wpływu prędkości przesuwu lasera na głębokość, szerokość oraz powierzchnię przetopionego materiału zostały przedstawione w Tabeli 1. [10,11].

Tabela 1. – Wartości eksperymentalne grubości i szerokości strefy przetopionej dla stali 0H18N9 uzyskane dla różnych parametrów obróbki laserowej [7]

Table 1. - Experimental values of the thickness and width of the remelted zone for the 0H18N9 steel obtained for various laser treatment parameters [7]

| $V_1$<br>[mm/min] | V oscylacji<br>[osc/min] | Amplituda<br>oscylacji<br>[mm] | Głębokość<br>przetopienia<br>[mm] | Szerokość<br>przetopienia<br>[mm] | Powierzchnia<br>[mm <sup>2</sup> ] |
|-------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 900               | Bez                      | -                              | 0.424                             | 1.452                             | 0.738                              |
| 360               | Bez                      | -                              | 0.605                             | 1.355                             | 0.820                              |
| 150               | Bez                      | -                              | 0.791                             | 1.742                             | 1.149                              |
| 900               | 930                      | 1.5                            | 0.194                             | 3.267                             | 0.634                              |
| 360               | 930                      | 1.5                            | 0.339                             | 3.225                             | 1.093                              |
| 150               | 930                      | 1.5                            | 0.531                             | 3.461                             | 1.838                              |
| 900               | 1000                     | 1.5                            | 0.065                             | 3.516                             | 0.229                              |
| 360               | 1000                     | 1.5                            | 0.411                             | 3.787                             | 1.557                              |
| 150               | 1000                     | 1.5                            | 0.545                             | 3.703                             | 2.018                              |

Jedną z nowych odmian technologii zmiany struktury powierzchni materiałów poprzez przetapianie jest technologia selektywnego polerowania laserem (Selective Laser Polishing) polegająca na – w przeciwieństwie do standardowego przetapiania – precyzyjnej aplikacji lasera na małej powierzchni (0.1 mm<sup>2</sup>) na wybranym materiale. Pozwala to na dokładnym przetopieniu metalu na głębokości mniejszej niż 25 mikronów i znacznym zmniejszeniu nierówności powierzchni w porównaniu do standardowego procesu przetapiania laserem. [12]



Rysunek 4 Schemat polerowania laserowego przez przetopienie cienkiej powierzchni warstwa z ciągłym promieniowaniem laserowym [12].

Figure 4 Schematic of laser polishing by melting a thin surface layer with continuous laser radiation [12].

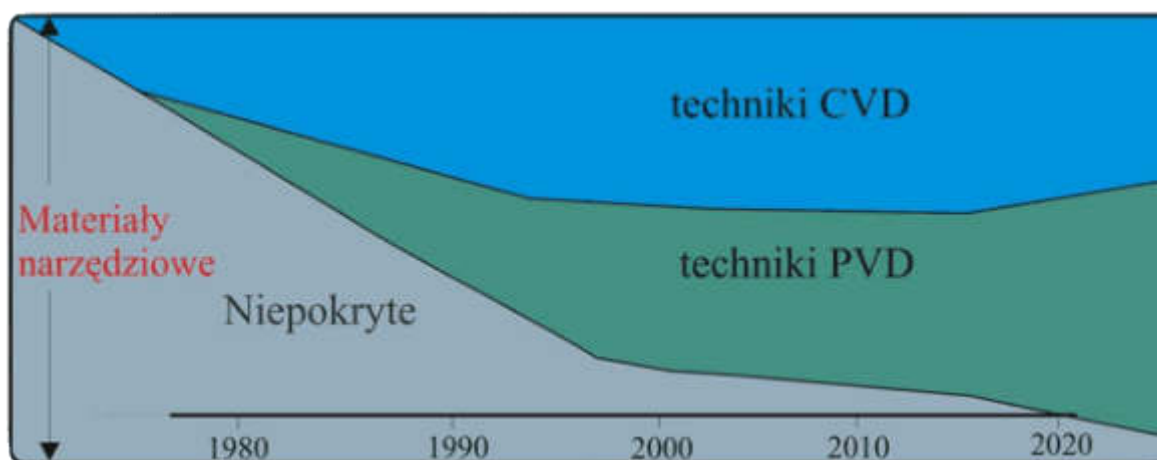
Ze względu na napięcie powierzchniowe stopionego materiału, chropowatość warstwy wierzchniej jest wygładzana podczas przetapiania. Dzięki temu powierzchnia ciekłego metalu została się bez pęknięć, porów lub ukrytych napięć i wad w strukturze materiału [13].

#### 4. WŁASNOŚCI WARSTWY WIERZCHNIEJ STALI PRZETOPIONEJ LASEROWO, A WŁASNOŚCI POWŁOK PVD I CVD

Laserowe przetapianie powierzchni jest procesem gwałtownym, zachodzi w bardzo krótkim czasie, gdzie niewielka część zaabsorbowanej energii cieplnej przenika w głąb materiału, na wskutek czego powstaje duży gradient temperatury pomiędzy ciekłą warstwą powierzchniową i pozostałą częścią materiału. Dzięki gradientowi temperatury zachodzi szybkie krzepnięcie. Tak przetopiona warstwa wierzchnia powoduje wysoką odporność na korozję oraz erozję a także dużą odporność na ścieranie bez zmiany składu chemicznego materiału z jednorodną chemicznie, drobnokrystaliczną warstwą wierzchnią [14-16].

Powłoki PVD znajdują zastosowanie nie tylko w budowie maszyn, ale także w mikroelektronice, biomedycynie, przemyśle motoryzacyjnym oraz budowlanym. W metodzie PVD nanoszona powłoka powstaje ze strumienia zjonizowanej plazmy skierowanej na podłoże, Nanoszenie powłoki przeprowadzane jest na zimnym lub podgrzanym do 200÷ 500°C podłożu. W technikach PVD zmiana parametrów procesu ma duży wpływ na strukturę powłoki. Podstawowe parametry procesu które wpływają na strukturę to; temperatura podłoża, energia jonów bombardujących, ciśnienie gazu, oraz cechy podłoża takie jak skład chemiczny, mikrostruktura, topografia, determinują nam własności mechaniczne powłoki. Najważniejszą własnością powłok wytwarzanych w procesach PVD jest adhezyjność czyli przyczepność powłoki do podłoża, jeżeli jest niewystarczająca cała funkcjonalność pokrycia może zostać utracona.

Metoda CVD polega na rozpyleniu substratów do nakładania powłoki które osadzają się na podłożu, gdzie zachodzą reakcje chemiczne, które pokrywają przedmiot cienką warstwą materiału. Jest to proces wysoko temperaturowy gdzie temperatury dochodzą nawet do 1100°C. W procesach CVD składniki atmosfery aktywowane mogą zostać: Ciepłnie (APCVD, LPCVD), Plazmą (PACVD) [17].



Rysunek 5 Prognoza rozwoju technik PVD i CVD [18]

Figure 5 A forecast for the development of PVD and CVD techniques [18]

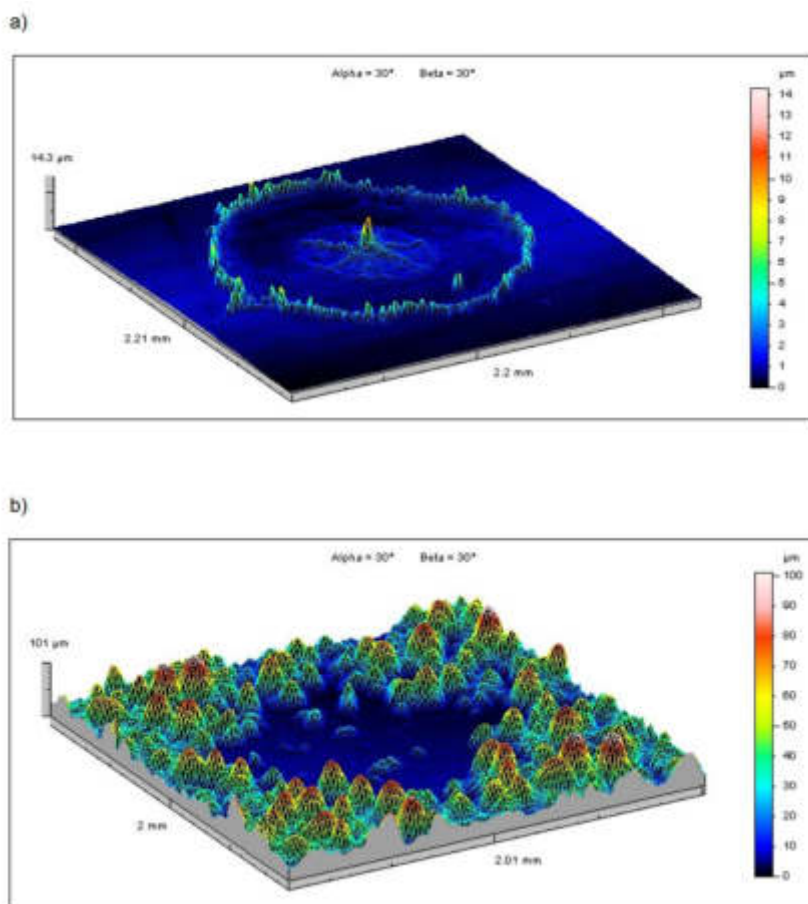
Własności warstw wierzchnich otrzymanych elementów za pomocą topienia laserowego i PVD/CVD są do siebie bardzo podobne, w obydwóch metodach otrzymujemy wysoką twardość na powierzchni oraz odporność na zużycie ściernie. Lecz jedna jak i druga metoda niesie ze sobą wady. Główną wadą metody CVD jest konieczność stosowania wysokich temperatur, niska wydajność lub brak możliwości ostatecznej korekty wymiarów, mimo kilku wad technologia CVD znalazła swoje zastosowanie w elektronice do osadzania materiałów półprzewodnikowych lub w warstwach na okulary [20].

Jeśli chodzi o PVD do wad można zaliczyć szybkość wytwarzania powłoki, jest bardzo powolna w porównaniu z innymi procesami osadzania powłok, proces PVD wykorzystuje skomplikowane urządzenia, których koszt jest bardzo wysoki, w przypadku podłoża o złożonej geometrii technika PVD jest ograniczona. Technologia PVD stosuje się do wytwarzania; powłok magnetycznych, powłok do celów dekoracyjnych lub w jubilerstwie, Powłoki o wysokiej twardości, odpornych na zużycie i korozję z materiałów kompozytowych, powłoki metaliczne nadające podłożu właściwości półprzewodnikowe których pierwotnie nie posiadało [21]. Obórki związane z przetapianiem powierzchni zazwyczaj prowadzą do powstawania naprężeń rozciągających, co wiąże się z nierównomiernym procesem grzania i chłodzenia obrabianej warstwy [15]. Złe dobranie parametrów procesu może również doprowadzić do wyparowania warstwy wierzchniej, dlatego dobranie parametrów jest niezwykle kluczowe. Najważniejsze jest jednak dobranie i dostosowanie odpowiedniej technologii do założonych przez nas celów wytwórczych, każda z technologii obróbki warstwy wierzchniej ma swoje mocne jak i słabe strony które powinny definiować nasz wybór.

## 5. MOŻLIWOŚCI ANALIZY MES W OBRÓBCE LASEROWEJ

Metody numeryczne są powszechnym narzędziem oceny zmian stanu materiału części maszyn pod wpływem sił zewnętrznych lub procesów cieplnych. Metoda elementów skończonych (MES) dostarcza cennych informacji o stanie materiału podczas procesu oraz o tym, jak zmieniają się właściwości po zakończeniu procesu. Metoda ma pewne ograniczenia ze względu na konieczność stosowania założeń, które są często funkcją stanu materiału w procesie lub są trudne do zmierzenia, np. absorpcja energii lasera podczas zmian stanu materii, co może prowadzić do uzyskania niedokładnych obliczeń. Ponadto do opisu numerycznego zjawiska przyjmuje się modele, które odzwierciedlają dane zjawisko w sposób przybliżony. Metody numeryczne związane z metodami analitycznymi są mniej pracochłonne, a nawet jeśli wprowadzają w błąd, to w większości przypadków metody te mogą zminimalizować lub nawet wyeliminować [22].

Dokładne wprowadzanie danych materiałowych, z uwzględnieniem ich zmian podczas zmian temperatury oraz pod wpływem innych czynników zewnętrznych, decyduje o dokładności obliczeń numerycznych. W szczególności ważnym czynnikiem wpływającym na poprawność wyników jest dokładne określenie warunków brzegowych. Obliczenia przy użyciu odpowiednich metod numerycznych można zweryfikować z wynikami uzyskanymi eksperymentalnie. Eksperymenty są również często podatne na błędy, ale za pomocą metod statystycznych można ten błąd oszacować i wyeliminować. Poprawić dokładność opisu danego zjawiska można m.in. poprzez właściwy dobór planu eksperymentu, liczby poziomów zmienności parametrów wejściowych, postaci funkcji opisującej obiekt badań, poprzez zastosowanie dobrze dobranego metodyki pomiaru, a także eliminację zmiennych wejściowych o nieistotnym znaczeniu dla przebiegu badanego zjawiska [23].



Rysunek 6 Przykładowa symulacja MES w obróbce laserowej [22]  
 Figure 6 Example of FEA simulation in laser machining [22].

Zastosowanie analizy MES pozwala uzyskać informacje o zmianach w mikrostrukturze materiału pod wpływem procesów interakcji wiązek laserowych. Wyniki uzyskane metodami numerycznymi mogą wyjaśnić zmiany zachodzące w materiale podczas tego procesu, a także wyjaśnić powstawanie mikrostruktury po ostygnięciu materiału. Proces i uzyskane wyniki można dokładniej zidentyfikować za pomocą obu metod – analitycznej jak i doświadczalnej.

Analiza MES świetnie sprawdza się w sytuacji, gdzie nie dysponujemy odpowiednią aparaturą badawczą. Wykonywanie badań za pomocą metody elementów w obróbce laserowej niesie za sobą wiele zalet [24]:

- krótszy czas rozwoju obiektu badanego,
- zmniejszona ilość prototypów (redukcja kosztów badań),
- analiza naprężeń termicznych podczas obróbki laserowej,
- otrzymanie informacji o ilości generowanego ciepła,
- informacje o wpływie temperatury na zachowanie się przedmiotu badanego

## 6. KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE PROJEKTOWANIA PROCESU OBRÓBKI LASEROWEJ

Dynamiczny rozwój technik komputerowych, spowodował upowszechnienie metod komputerowego wspomaganie procesów związanych praktycznie z każdym etapem cyklu „życia” wyrobu. Zdominowały one, nawet w niewielkich przedsiębiorstwach, proces projektowania CAD (Computer Aided Design) i zawierający się w nim proces inżynierskich obliczeń konstrukcyjnych CAE (Computer Aided Engineering) oraz procesy wytwarzania CAM (Computer Aided Manufacturing) tworzące system komputerowego wspomaganie wytwarzania CIM (Computer Integrated Manufacturing) [25]. Rys.7 przedstawia podstawowy podział systemów wspomaganie projektowanie procesu technologicznego.



Rysunek.7 Podział systemów wspomagających projektowanie [26]

Figure.7 Division of design aid systems [26]

### 6.1. CAD – SYSTEMY KOMPUTEROWEGO WSPOMAGANIA PROJEKTOWANIA

Projektując proces technologiczny przetapiania laserowego, zacząć należy od przygotowania modelu 3D który posłuży jako baza do planowania kolejnych operacji. Do tego celu wykorzystuje się programy CAD (Computer Aided Design). Pierwsze systemy komputerowego wspomaganie CAD powstały w latach 60-tych ubiegłego stulecia, początkowo w okresie rozwoju były nazywane systemami Computer Aided Drafting i służyły jedynie do tworzenia oraz modyfikacji rysunków dokumentacji konstrukcyjnej [27,28,29]. Na Rys.8 przedstawiono jeden z pierwszych programów CAD.

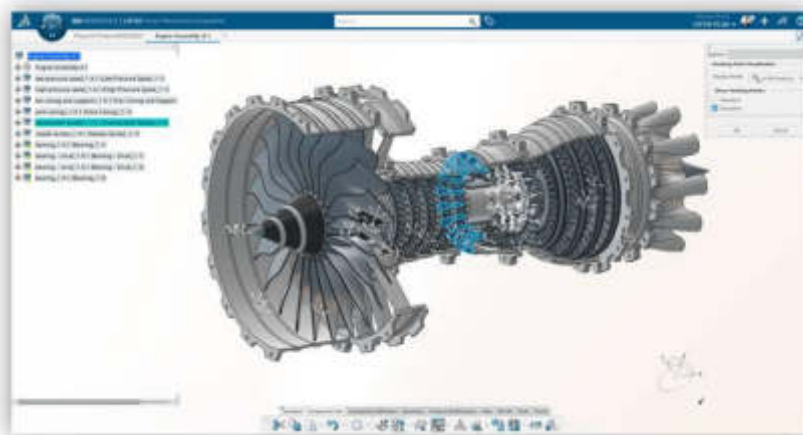


Rysunek.8 Pierwsze programy CAD [30]

Figure.8 First CAD programs [30]

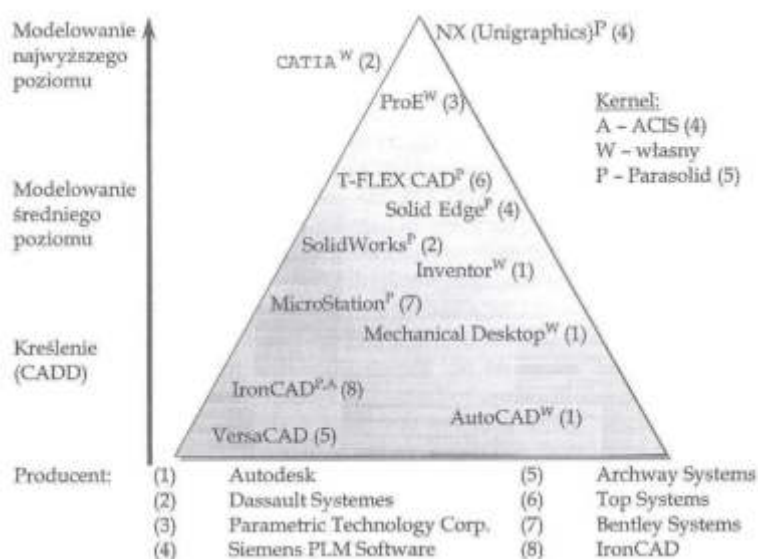


W kolejnych latach następowało rozwijanie systemów CAD w kierunku integracji geometrycznej i funkcjonalnej z systemami CAP, CAM i PPC za pośrednictwem standardów komunikacji sieciowej (tzw. otwartej struktury CIM). Na przełomie XX i XXI wieku, nastąpił dalszy rozwój systemów CAX w otwarte wielofunkcyjne systemy o rozproszonej strukturze danych w pełni zintegrowane z systemami EDM (Engineering Data Management) zarządzania danymi inżynierskimi i systemem PDM (Product Data Management) zarządzania danymi produktu [27]. Na Rys.9 przedstawiono możliwości nowoczesnych programów CAD.



Rysunek.9 Nowoczesne programy CAD [31].  
Figure.9. Modern CAD programs [31]

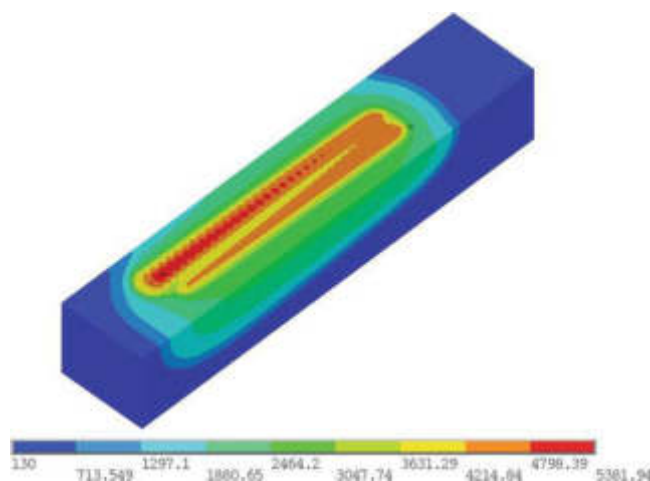
Programy CAD różnią się między sobą zakresem wspomaganiania prac inżynierskich oraz stopniem uniwersalności, które można podzielić na trzy grupy: (1) służące do kreślenia, (2) modelery średniego poziomu i (3) modelery najwyższego poziomu [32]. Klasyfikację programów CAX opartą na wyżej wymienionym podziale przedstawiono na Rys.10.



Rysunek.10 Klasyfikacja oprogramowania CAX [32]  
Figure.10 Classification of CAX software [32]

## 6.2. CAE – SYSTEMY KOMPUTEROWEGO WSPOMAGANIA PRAC INŻYNIERSKICH

Podczas planowania procesu obróbki laserowej konieczna jest analiza rozkładu ciepła w obrabianym materiale. Pozwala to na dokładne zaplanowanie całego procesu jeszcze na etapie projektowania. Stosowanie obliczeń analitycznych na podstawie znanych modeli jest jednak bardzo utrudnione, czasami wręcz niemożliwe. Wygodnym narzędziem w analizie elementów stały się komputerowe systemy obliczeniowe. Pozwalają one na prowadzenie obliczeń numerycznych dla elementów zbyt skomplikowanych dla obliczeń analitycznych. Wykorzystywanie numerycznych metody obliczeniowych w procesie planowania można zaliczyć do komputerowego wspomaganie prac inżynierskich – CAE (Computer Aided Engineering) [25]. Na Rys.11. przedstawiono przykładową symulację rozkładu temperatury podczas obróbki laserowej.



Rysunek.11 Przykładowa symulacja rozkładu temperatury podczas obróbki laserowej [33].  
Figure.11. Example simulation of temperature distribution during laser processing [33]

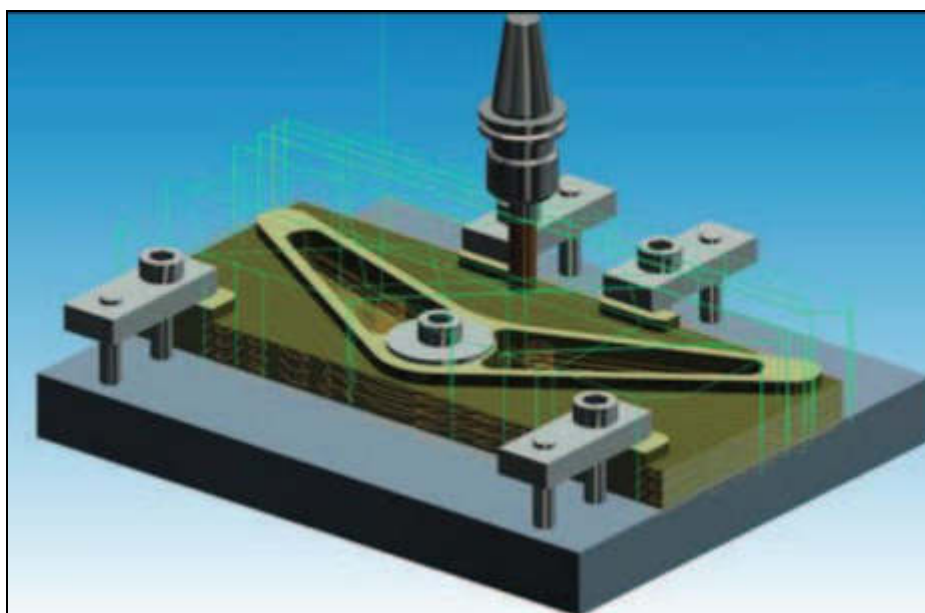
Oprogramowania wykorzystywane do analizy rozkładu ciepła wykorzystują różne metody rozwiązywania równań różniczkowych. Wyróżnia się:

- Metodę różnic skończonych (ang. Finite Differences Method)
- Metodę elementów skończonych (ang. Finite Element Method)
- Metodę objętości skończonej (ang. Finite Volume Method)

Metody te różnią się między sobą dość znacznie, natomiast ich wspólną cechą jest, że mogą zostać zdefiniowane w oparciu o dyskretyzację obszaru. Dyskretyzacja jest to podział obszaru na siatkę obliczeniową (siatkę dyskretyzacji) która jest bazą, w oparciu o którą konstruuje się dyskretny odpowiednik oryginalnego równania. W zależności od metody uzyskuje się różne sformułowania dyskretne, różne są też wymagania związane z dyskretyzacją – natomiast tym co łączy jest fakt, że dyskretyzacja oznacza podział obszaru obliczeniowego na ‘małe’ podobszary. Określenia ‘dyskretyzacja’, ‘dyskretny model’, ‘dyskretny rozwiązanie’ podkreślają fakt odejścia od oryginalnego równania oraz jego dokładnego rozwiązywania na rzecz wyznaczenia rozwiązania przybliżonego w skończonej liczbie punktów [34].

### 6.3. CAM – SYSTEMY KOMPUTEROWEGO WSPOMAGANIA WYTWARZANIA

Systemy komputerowego wspomagania wytwarzania – CAM (Computer Aided Manufacturing) stanowią najbardziej praktyczne zastosowanie w przygotowaniach procesu technologicznego [35]. Są one zwięźczeniem całej grupy technik CAE stosowanych w inżynierii. Można stwierdzić, że grupa CAM jest ostatnim informatycznym ogniwem pomiędzy ideą a obiektem rzeczywistym. Zadaniem systemów CAM jest integracja etapów projektowania i wytwarzania, polegająca na wyznaczeniu ruchu narzędzia (Rys.12) dla wskazanych powierzchni obrabianych dyskretnych modeli 3D, zbudowanych wcześniej w środowisku systemu CAD. Narzędzia z grupy CAM pozwalają na optymalną transformację komputerowych modeli wyrobów na instrukcje sterujące urządzeniami wytwórczymi. Systemy CAM mogą występować jako oprogramowanie samodzielne lub zintegrowane ze środowiskiem komputerowo wspomaganego projektowania (CAD) [36].



Rysunek 12 Przykład zastosowania systemu CAM do wyznaczenia ruchu narzędzia [37]  
Figure.12. Example of using a CAM system to determine tool motion [37]

## 7. PODSUMOWANIE

Wiele pozycji literaturowych dowodzi jak szeroki zakres działania posiada laserowa obróbka materiałów w szerokim znaczeniu przemysłowym. Obecnie wiele gałęzi przemysłu korzysta z udogodnień i możliwych metod opartych na laserowej obróbce powierzchni udoskonalając tą technologie m.in. za pomocą wymienionych i krótko scharakteryzowanych sposobów wspomaganie procesu. Komputerowe sposoby modernizacji i symulacji tego procesu pomagają na dużą oszczędność materiałową i czasową podczas konstruowania i pierwszych prób wykonania detalu. Jedną z możliwości takiego oprogramowania jest również pomoc w doborze odpowiednich parametrów procesu takich jak moc lasera, prędkość posuwu czy rodzaj stosowanej atmosfery ochronnej. Duża precyzja tej metody obróbki przemawia za tym, że współczesny przemysł znajduje bardzo wiele zastosowań i coraz to nowych modyfikacji dla modernizacji powierzchni za pomocą lasera, w dużym stopniu także przetapiania.

## PODZIĘKOWANIE

Praca powstała w wyniku realizacji projektu w ramach kształcenia zorientowanego projektowo - PBL, w konkursie VII w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza, Politechnika Śląska.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] J. Pluciński, „Lasery w medycynie”, Gdańsk, 2015.
- [2] Kujawski A., Szczepański P. „Lasery Podstawy fizyczne”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1999.
- [3] Cenian A., Zaremba E., Frankowski M., Materiały do kursu „Lasery w medycynie”, [http://www.implaser.pl/nasze\\_wyklady/fizyczne\\_podstawy/med\\_main.htm](http://www.implaser.pl/nasze_wyklady/fizyczne_podstawy/med_main.htm) dostęp: 13.05.22r.
- [4] Czupryński A., Rzeźnikiewicz A., „Specjalne technologie spawalnicze w ćwiczeniach laboratoryjnych”, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2020.
- [5] Startton J.A., „Electromagnetic theory”, Wiley, New Jersey, 2007.
- [6] Fidytek R., „Rodzaje laserów i ich zastosowanie”, [http://cami-antiaging.eu/STRONA%20W%20BUDOWIE%20-%20WWB/08%20-%20LASERY/01.-LASERY%20W%20TEORII/R.Fidytek\\_RodzajeLaser%C3%B3w\\_i\\_ich\\_Zastosowanie.pdf](http://cami-antiaging.eu/STRONA%20W%20BUDOWIE%20-%20WWB/08%20-%20LASERY/01.-LASERY%20W%20TEORII/R.Fidytek_RodzajeLaser%C3%B3w_i_ich_Zastosowanie.pdf) dostęp 13.05.2022r.
- [7] J. Radziejewska, Laserowa modyfikacja właściwości warstwy wierzchniej wspomagana nagniataniem, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa, 2011
- [8] L.A. Dobrzański, E. Jonda, A. Klimpiel, A. Lisiecki, Wpływ laserowego przetapiania i stopowania na strukturę i własności warstw wierzchnich stali X40CrMoV5-1
- [9] A. Mazurkiewicz, B. Nędzi, Ocena jakości wykonania wybranego elementu z proszków metali metodą laserowego wytwarzania przyrostowego, Instytut Naukowo-Wydawniczy „SPATIUM”, 2016
- [10] L.A. Dobrzański, A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich, Internarional OCSCO World Press, 2011
- [11] K. Radziejewska, W. Kalita, B. Nowicki, Laserowo-mechaniczna modyfikacja warstwy wierzchniej stali, Przegląd Mechaniczny, Tom 7-8, 2006
- [12] A. Temmler, Designing Surfaces by Laser Remelting, 2001
- [13] E. Willenborg, Polishing by laser radiation, Fraunhofer Institute for Laser Technology, 2003
- [14] L.A. Dobrzański, T. Tański, A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, M. Król, S. Malara, J. Domagała-Dubiel, Laserowa obróbka powierzchniowa stopów Mg-Al-Zn
- [15] J. Radziejewska, Laserowa modyfikacja właściwości warstwy wierzchniej wspomagana nagniataniem
- [16] <https://technolutions.pl/chemical-vapour-deposition-cvd/>
- [17] L.A. Dobrzański, Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2003.
- [18] W. Kwaśny, Prognozowanie własności powłok PVD i CVD na podstawie wielkości fraktalnych opisujących ich powierzchnie, Instytut Materiałów Inżynierskich I Biomedycznych Politechnika 2009

- [19] K. Bohusz, Badanie mikrostruktury powłok azotku chromu wytworzonych metodą PAMOCVD z zastosowaniem 2-etyloheksanianu chromu III, Politechnika Warszawska 2010
- [20] <http://zasoby.open.agh.edu.pl/~11sashot/stronae375.html?t=tw&h=cvd&v=>
- [21] <https://www.atriainnovation.com/en/physical-vapor-deposition-pvd/>
- [22] W. Napadek, K. Kosiuczenko, „Symulacja numeryczna laserowego umacniania udarowego stopu tytanu Ti-6Al-2Cr-2Mo” Prace instytutu elektrotechniki, zeszyt 237, 2008
- [23] Szargut J.: Modelowanie numeryczne pól temperatury. WNT, Warszawa (1992).
- [24] Bień A., Dacko A., Osiński J., Szot A.: Modelowanie numeryczne procesu laserowej obróbki. Przegląd Mechaniczny 6 (2004) 16÷19.
- [25] Capanidis, Dymitry, and Piotr Kowalewski. "Przegląd systemów wspomaganie procesów konstruowania i wytwarzania." Zeszyty Naukowe Dolnośląskiej Wyższej Szkoły Przedsiębiorczości i Techniki. Studia z Nauk Technicznych 1 (2012): 25-42.
- [26] <https://extrudesign.com/category/cad-cae-cam/> dostęp: 15.05.2022
- [27] Chlebus E., Techniki komputerowe CAx w inżynierii produkcji, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000
- [28] Stanisławski M., Historia komputerowych systemów wspomagających projektowanie, wytwarzanie i analizy inżynierskie, 2009
- [29] Stanisławski M., Komputerowe wspomaganie projektowania i analiz, CADblog.pl, t. 8, 7, 2009, s. 71–85
- [30] <https://yeswebim.wordpress.com/2015/01/15/history-of-computer-aided-design/> dostęp: 15.05.2022
- [31] <https://solidexpert.com/3dexperience/catia/> dostęp: 15.05.2022
- [32] Sydor M., Wprowadzenie do CAD. Podstawy komputerowo wspomaganego projektowania, PWN, Warszawa, 2009.
- [33] <https://www.intechopen.com/chapters/57728> dostęp: 15.05.2022
- [34] [https://home.agh.edu.pl/~zmsz/pl/pliki/os/OS\\_symulacja\\_przeplywu.pdf](https://home.agh.edu.pl/~zmsz/pl/pliki/os/OS_symulacja_przeplywu.pdf) dostęp: 15.05.2022
- [35] Miecielica M., Kaszkiel G., Komputerowe wspomaganie wytwarzania CAM, ZNI Nicom, Warszawa, 1999.
- [36] Skawiński P., Systemy CAM – narzędzia technologicznego przygotowania produkcji, „Mechanik”, 11, 2009, s. 953.
- [37] <https://it.edgecam.com/2009R2> dostęp: 15.05.2022

## Kształtowanie drobnokrystalicznej struktury stali narzędziowej poprzez laserowe przetapianie

M. Konieczny <sup>a</sup>, A. Wójtowicz <sup>a</sup>, K. Królikowska <sup>a</sup>, M. Laskowski <sup>a</sup>, P. Cisowski <sup>a</sup>,  
S. Jędrzejewski <sup>a</sup>, M. Bonek <sup>b</sup>, C. Meran <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Student/ka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: andrwoj101@student.polsl.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: mirosław.bonek@polsl.pl

<sup>c</sup> Pamukkale University, Department of Mechanical Engineering, Denizli, Turkey

**Streszczenie:** Niniejszy artykuł zawiera informacje na temat warstwy wierzchniej obrabianej za pomocą przetapiania laserowego. Wyniki badań przedstawiają strukturę powstałą podczas procesu, punktowe badanie składu chemicznego oraz pomiary twardości w funkcji odległości od powierzchni. Uzyskane rezultaty pozwalają na określenie własności eksploatacyjnych tworzonych w ten sposób warstw wierzchnich.

**Abstract:** This paper provides information on the surface layer processed by laser remelting. The results present the structure formed during the process, a spot chemical composition study and hardness measurements as a function of distance from the surface. The results obtained allow to determine the operating properties of the surface layers formed in this way.

**Słowa kluczowe:** przetapianie laserowe, obróbka powierzchniowa, twardość, laser HDPL, badania metalograficzne

### 1. WSTĘP

Początki używania stali przez człowieka sięgają aż 4000 lat temu, do początków epoki żelaza. Ze względu na swoje właściwości mechaniczne i fizyczne, wyparła ona używany wcześniej brąz jako materiał z którego wykonywano broń i narzędzia. Mimo tak długiej historii, sama technika otrzymywania stali zależała głównie od szczęścia kowala oraz jakości rudy żelaza wykorzystywanej do produkcji narzędzi. Dopiero w XVII wieku odkryto zależność między zawartością pierwiastków żelaza i węgla prowadzących do powstania stali w procesach odlewniczych, lecz możliwość produkcji na skalę przemysłową została wynaleziona dopiero w XIX wieku wraz z wynalezieniem procesu Bessemera, pozwalającego na produkcję taniej stali o wysokiej jakości [1].

W przeciągu dwustu lat od wynalezienie procesu Bessemera techniki produkcji i modyfikacji stali rozwinęły się prężnie, wiodąc do wykorzystania w przemyśle wielu różnych

rodzajów stali przystosowanych do specjalistycznych i ekstremalnych zastosowań, od budownictwa i architektury, poprzez przemysł zbrojeniowy aż po zastosowania w lotnictwie i przemyśle kosmicznym. Jednakże zapotrzebowanie na wysokiej jakości stal wykorzystywaną do produkcji narzędzi wzrosło wraz z rozwojem technologii, wiodąc do powstania stali narzędziowych o wyjątkowych właściwościach [2,3].

Ze względu na zapotrzebowanie na wysokiej jakości materiały, poprawa struktury i własności materiałów wykorzystywanych w przemyśle jest jednym z ważniejszych celów postępu technologicznego. Stal, ze względu na możliwość modyfikacji jej własności poprzez zmianę warunków wytwarzania, zmianę składu chemicznego oraz obróbkę cieplną i plastyczną jest jednym z najbardziej uniwersalnych i popularnych materiałów konstrukcyjnych wykorzystywanych w przemyśle. Mimo swojej uniwersalności, możliwości polepszenia własności stali narzędziowych przez metody konwencjonalne jest ograniczona.

Jednymi z nowych metod modyfikacji struktury stali, pozwalających na uzyskanie lepszych własności mechanicznych i fizycznych są techniki laserowe, polegające na wykorzystaniu własności fizycznych lasera, gdzie precyzyjne wiązki laserowe dostarczają energię w postaci ciepła w warstwę wierzchnią metalu, prowadząc do dokładnej i kontrolowanej zmiany struktur zgodnie z założeniami. Techniki te pozwalają na dokładną kontrolę nad głębokością, rozmiarem i stopniem kształtowanej zmiany w strukturze metali [2,4,5].

## 2. STAL HS6-5-2

W stalach narzędziowych szybko tnących (HS) wyróżnia się 3 główne pierwiastki: Wolfram, molibden, wanad. Dla przykładu nasza stal narzędziowa szybko tnąca HS6-5-2 posiada około 6% Wolframu (W), 5% molibdenu (Mo) i 2% wanadu (V) [6].

Tablica 1. Stężenie masowe pierwiastków w próbkach badanej stali HS6-5-2

Table 1. Mass concentration of elements in samples of the tested steel

| Oznaczenie     | Stężenie masowe pierwiastków, % |     |     |    |     |    |
|----------------|---------------------------------|-----|-----|----|-----|----|
|                | C                               | Cr  | W   | Mo | V   | Co |
| <b>HS6-5-2</b> | 0,84                            | 4,2 | 6,3 | 5  | 1,9 | -  |

HS6-5-2 jest stal szybko tnącą znaną również pod nazwą SW7M. Jest to stal o wysokiej wytrzymałości i właściwościach tnących, Dzięki zachowaniu twardości i kształtu, dobrej udarności i odporności na ścieranie, stal HS6-5-2 znalazła szerokie zastosowanie głównie jako narzędzia obróbki skrawaniem takie jak: ostrza, noże, wiertła, frezy, segmenty pił tarczowych [7,8].

### 2.1. OBRÓBKA CIEPLNA

Proces technologiczny obróbki cieplnej przedstawić można jako zbiór operacji, który ma na celu zmianę własności mechanicznych takich jak udarność czy twardość oraz fizycznych np. przewodnictwo cieplne i elektryczne metali oraz ich stopów. Proces obróbki stali składa się z nagrzewania, wygrzewania oraz chłodzenia. W zależności od parametrów zastosowanych przy zmianie struktury w stanie stałym można wyróżnić następujące rodzaje obróbki cieplnej:

➤ cieplną zwykłą

- ciepło – chemiczną
- ciepło – plastyczną
- ciepło – magnetyczną [9]

Poprzez obróbkę cieplną stali można otrzymać struktury takie jak:

- Martenzytyczna - przesycony roztwór stały węgla w żelazie  $\alpha$ , charakteryzuje się wysoką twardością i kruchością, dlatego poddaje się ją odpuszczaniu w celu usunięcia naprężeń.
- Bainityczna - mieszanina ferrytu nieco przesyconego węglem i mieszanina dyspersyjnych wydzieleni węglkowych, rozróżnia się bainit górny który powstaje w zakresie temperaturowym  $550^{\circ}\text{C}$  -  $350^{\circ}\text{C}$  oraz bainit dolny który powstaje w zakresie temperaturowy poniżej  $350^{\circ}\text{C}$ .
- Perlityczna - mieszanina ferrytu i cementytu, która powstaje z austenitu w wyniku przemiany eutektoidalnej w temperaturze  $727^{\circ}\text{C}$ , zawierająca dokładnie 0,77% węgla, w stalach perlit składa się z ułożonych naprzemiennie płytek ferrytu i cementytu, wyróżniamy perlit gruboziarnisty i drobnoziarnisty (troostyt).
- Ferrytyczna - roztwór stały jednego lub więcej pierwiastków w żelazie  $\alpha$  lub żelazie  $\delta$ , ferryt cechuje się niską zawartością węgla [10,11].

### 3. OBRÓBKA LASEROWA POWIERZCHNI

Jakość oraz struktura powierzchni materiału wpływa bardzo silnie na jego właściwości oraz funkcjonalność, szczególnie wpływając na odporność na zarysowanie oraz korozję, właściwości tribologiczne oraz ostatecznie walory wizualne materiału. Jedną z nowoczesnych technik modyfikacji struktury powierzchniowej materiałów jest aplikacja lasera o odpowiednio dobranym natężeniu wiązki do przetopienia cienkiej warstwy materiału celem ukształtowania nowej, lepszej struktury powierzchniowej [12,13].

Metoda ta cechuje się wyjątkowo wysoką dokładnością, porównywalnie niskimi kosztami i dużą elastycznością pod względem możliwych aplikacji. Podczas wykorzystywania obróbki laserowej do kształtowania struktury metalu istotnymi czynnikami są moc lasera, średnica i długość ogniska wiązki wraz z prędkością obróbką a także zastosowany rodzaj gazu osłonowego oraz jego ciśnienie. Dzięki swoim właściwościom, laserowa obróbka cieplna pozwala na znaczne ograniczenie strefy wpływu ciepła poprzez dostarczenie dużej ilości silnie skoncentrowanego ciepła w krótkim odstępie czasu [12].

#### 3.1. PRZETAPIANIE POWIERZCHNI LASEREM

Kształtowanie struktury powierzchni materiału poprzez laserowe przetapianie, w przeciwieństwie do polegających na usuwaniu materiału procesów trawienia fotochemicznego lub ablacji laserowej, skupia się na roztopieniu cienkiej warstwy metalu na samej powierzchni przedmiotu. Stopiona warstwa metalu formuje ciekłe jezioro w obszarze oddziaływania ciepła nadawanego powierzchni przez laser, które zachowuje swój oryginalny kształt dzięki napięciu powierzchniowym, a struktura jest kształtowana poprzez samoorganizację struktury pod wpływem kontrolowanej wiązki lasera [12,14].

W związku z krótkim czasem przekazywania ciepła przez laser, głębokość stopionej warstwy jest ograniczona, a ciepło nadane warstwie wierzchniej przez laser jest bardzo szybko przekazane w głąb metalu. Po stopieniu materiału zachodzi dynamiczne krzepnięcie, prowadzące do powstania struktury drobnych, równoosiowych kryształów, szczególnie w strefie środkowej przetopionego materiału [4,12].



#### 4. METODYKA BADAŃ

Spiekanie próbek ze stali, przeprowadzone zostało w piecu rurowym w atmosferze mieszaniny gazów ochronnych  $N_2-10\%H_2$  w temperaturze około  $1260^\circ$  przez 30 min. Szybkość nagrzewania wynosiła  $5^\circ C/min$ . Po procesie spiekania zostały przygotowane zglądy na poprzecznym przekroju próbek, aby ocenić strukturę w obszarze rowka. Następnym procesem było poddanie spiekanych próbek hartowaniu w temperaturze  $1220^\circ C$  oraz dwukrotnemu odpuszczaniu w temperaturze około  $570^\circ C$ . Zglądy do metalograficznych badań zostały przygotowane poprzez szlifowanie na wodnych papierach ściernych oraz polerowane mechanicznie na urządzeniu Struers. Mikrostruktura stali badana była na mikroskopie świetlnym MEFCA firmy LEICA w zakresie powiększeń od 25 do 1000 razy.

Na mikroskopie skaningowym Zeiss SUPRA 25 została wykonana powierzchniowa analiza składu pierwiastków stopowych. Została przeprowadzona ocena własności mechanicznych stali na podstawie pomiaru twardości metodą Rockwella. Pomiary dokonywane były na próbkach w wyjściowym stanie, a także przetopionych przy pomocy lasera. Na każdej z próbek dokonywane były 3 pomiary z której wyciągana była wartość średnia.

Na podstawie pomiaru twardości metodą Vickersa, została przeprowadzona ocena własności mechanicznych stali. Pomiary były dokonywane na próbkach w stanie wyjściowym, a także przetopionych przy pomocy lasera diodowego dużej mocy HPDL.

Do przetopienia stali HS6-5-2, został użyty laser diodowy dużej mocy HPDL Rofin DL 020. Jest to laser uniwersalny, o dużej mocy i można go stosować także do: spawania, napawania, a także do wzbogacania powierzchni. Parametry techniczne lasera HPDL Rofin DL 020, zostały przedstawione w Tabelicy 2.

Tablica 2. Dane techniczne lasera diodowego HDPL Rofin DL 020

Table 2. Technical data of the HDPL Rofin DL 020 diode laser

|   |             |
|---|-------------|
| Długość fali promieniowania laserowego, nm                              | $808 \pm 5$ |
| Moc wyjściowa wiązki laserowej (promieniowanie ciągłe), W               | 2500        |
| Zakres mocy, kW   | 0,7-2,0     |
| Długość ogniskowa wiązki laserowej, mm                                  | 82 / 32     |
| Wymiary ogniska wiązki laserowej, mm                                    | 1,8 x 6,8   |
| Zakres gęstości mocy w płaszczyźnie ogniska wiązki laserowej, $kW/cm^2$ | 0,8-36,5    |

#### 5. WYNIKI BADAŃ

Początkowe próby przetopienia stali wykazały wpływ parametrów na kształt lica ścięgu, szczególnie mocy laserowej wiązki. Lico przybrało kształt regularny, płaski, bez podtopień o zauważalnej gładkości. Zaobserwowane zostało oddziaływanie strumienia gazu osłonowego na ukształtowanie powierzchni poddanej działaniu lasera. Tablica 3 przedstawia otrzymane wyniki na podstawie przetapiania laserowego stali szybko tnącej HS6-5-2. Zdjęcia powierzchni dla danego materiału zostały zamieszczone na rys. 1 oraz rys. 2.

Tablica 3 Szerokości przetopienia w zależności od mocy lasera

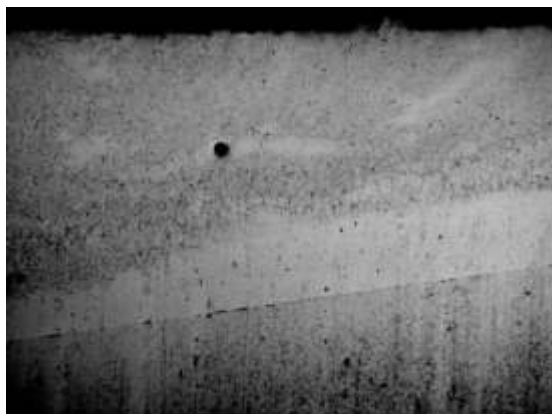
Table 3 Melt widths as a function of laser power

| Moc lasera [kW]                           | 1,7  | 2,0 |
|---|------|-----|
| Szerokość przetopienia stali HS6-5-2 [mm] | 7    | 7,3 |
|   | 7    | 7,2 |
|   | 7,1  | 7,3 |
| Średnia                                   | 7,03 | 7,3 |

Rysunek 1. Lico przetopienia stali HS6-5-2 dla gęstości mocy wiązki 1,7 kW; WC  
Figure 1 Melting face of HS6-5-2 steel for a beam power density of 1.7 kW; WCRysunek 2. Lico przetopienia stali HS6-5-2 dla gęstości mocy wiązki 2,0 kW; WC  
Figure 2 Melting face of HS6-5-2 steel for a beam power density of 2.0 kW; WC

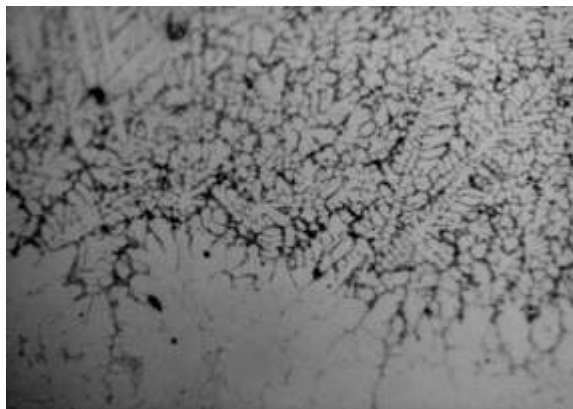
Badania metalograficzne wskazują na występowanie dwóch stref w wierzchniej warstwie badanej stali: strefa przetopiona oraz strefa wpływu ciepła. Parametry laserowej obróbki, takie jak moc wiązki lasera i prędkość skanowania, wpływają na grubość stref, wielkość obszaru, ukształtowanie dna przetopienia oraz wypukłość lica. Wpływ na nie mają silne ruchy konwekcyjne ciekłego metalu. Badania metalograficzne wykazały, że struktura krzepnącego materiału po procesie laserowego przetapiania charakteryzuje się występowaniem obszarów wyraźnie wskazujących swoją morfologią na związek z krystalizacją stali - niejednokrotne zmiany kierunku wzrostu kryształów (rys. 4). Tworzy to cechę charakterystyczną dla przetapiania laserowego. Na rys. 5 i 6 została ukazana struktura dendrytyczna, która powstała

podczas przetapiania laserowego warstwy wierzchniej próbki. Dendryty kierują się w stronę odprowadzania ciepła.



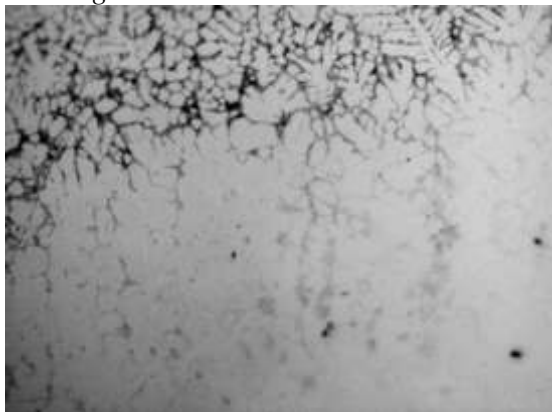
Rysunek 3. Warstwa wierzchnia stali HS6-5-2 po laserowym przetopieniu; gęstość mocy wiązki 1,7 kW, WC pow. 1000x

*Figure 3 Surface layer of HS6-5-2 steel after laser remelting; beam power density of 1.7 kW, WC of 1000x coating.*



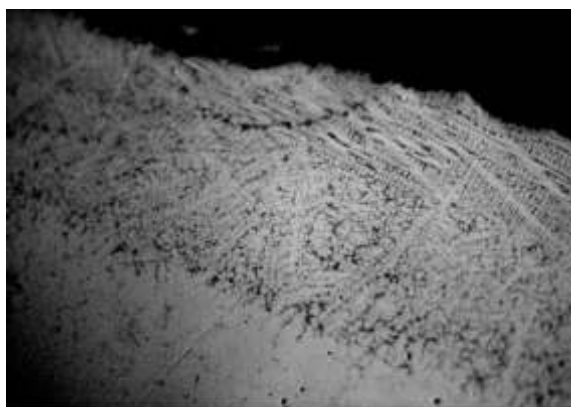
Rysunek 4. Granica strefy przetopionej warstwy wierzchniej stali HS6-5-2; gęstość mocy wiązki 1,7 kW, WC, pow. 1000x

*Figure 4 Boundary of the remelted zone of the surface layer of HS6-5-2 steel; 1.7 kW beam power density, WC, 1000x coating.*



Rysunek 5 Strefa przejściowa przetopionej warstwy wierzchniej stali HS6-5-2; gęstość mocy wiązki 1,7 kW, WC, pow. 1000x

*Figure 5 Transition zone of the remelted surface layer of HS6-5-2 steel; 1.7 kW beam power density, WC, 1000x coating.*



Rysunek 6 Brzeg przetopienia warstwy wierzchniej stali HS6-5-2 po laserowym przetopieniu; gęstość mocy wiązki 1,7 kW, WC, pow. 1000x

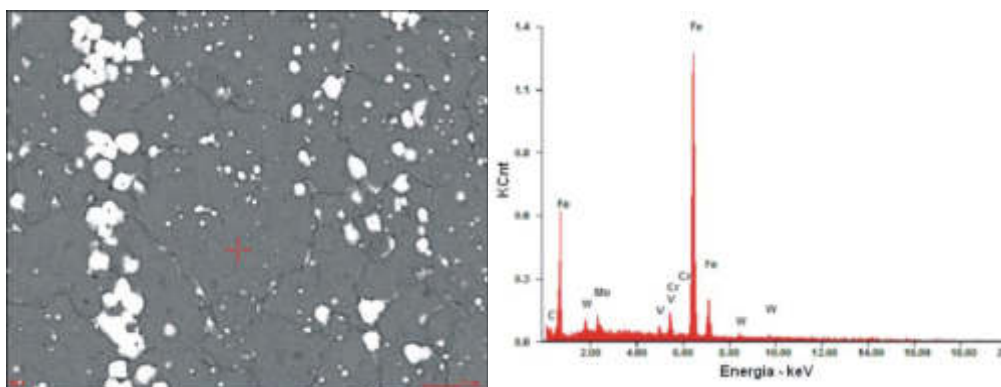
Figure 6 Melt edge of the surface layer of HS6-5-2 steel after laser remelting; 1.7 kW beam power density, WC, 1000x coating.

W celu określenia obecności pierwiastków warstwy wierzchniej będącej wynikiem procesu przetapiania oraz stopowania badanej stali szybko tnącej węglkiem wolframu, wykonano badania metodą rentgenowskiej mikroanalizy na poprzecznych zglądach utworzonej warstwy, na podstawie których sporządzono wykresy (rys.7-8). Wskazują one obecność pierwiastków takich jak C, W, Cr, V oraz Fe, równocześnie dostarczając informacje o ich masowych i atomowych stężeniach (tab. 4-5). Po stopowaniu obserwujemy wzrost ilości mieszanin faz w postaci eutektyk, jak i przyrost stężenia węgla wolframu w warstwie wierzchniej.

Tablica 4 Wyniki punktowej analizy składu chemicznego stali

Table 4 Results of spot analysis of chemical composition of steel

| Pierwiastek          | CK    | MoL  | VK   | CrK  | FeK   | WL   |
|----------------------|-------|------|------|------|-------|------|
| Stężenie masowe [%]  | 7,01  | 3,34 | 1,48 | 4,02 | 78,06 | 6,08 |
| Stężenie atomowe [%] | 27,08 | 1,61 | 1,35 | 3,58 | 64,84 | 1,53 |

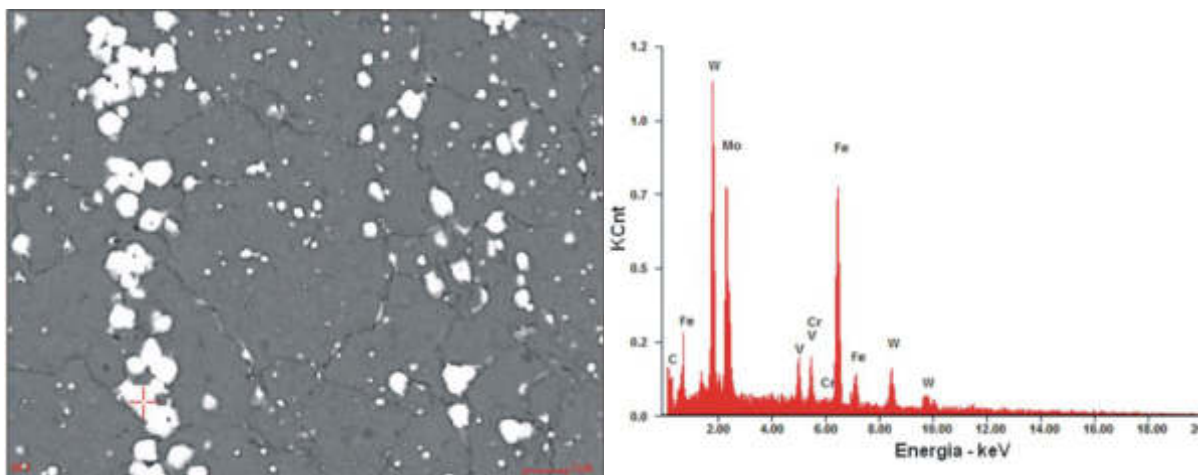


Rysunek 7 Stal szybko tnąca HS6-5-2 po standardowej obróbce cieplnej w temperaturze 1220oC z ujawnionymi cząstkami pierwotnymi; wykres natężenia w funkcji energii w próbce po laserowym przetopieniu przy mocy wiązki 1,7 kW

Figure 7 HS6-5-2 high-speed steel after standard heat treatment at 1220oC with revealed primary particles; intensity versus energy plot in the sample after laser remelting at 1.7 kW beam power.

Tablica 5 Wyniki punktowej analizy składu chemicznego stali  
 Table 5 Results of spot analysis of chemical composition of steel

| Pierwiastek          | CK    | MoL   | VK   | CrK  | FeK   | WL    |
|----------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| Stężenie masowe [%]  | 9,05  | 23    | 3,37 | 3,27 | 28,66 | 32,64 |
| Stężenie atomowe [%] | 41,56 | 13,22 | 3,65 | 3,47 | 28,3  | 9,79  |

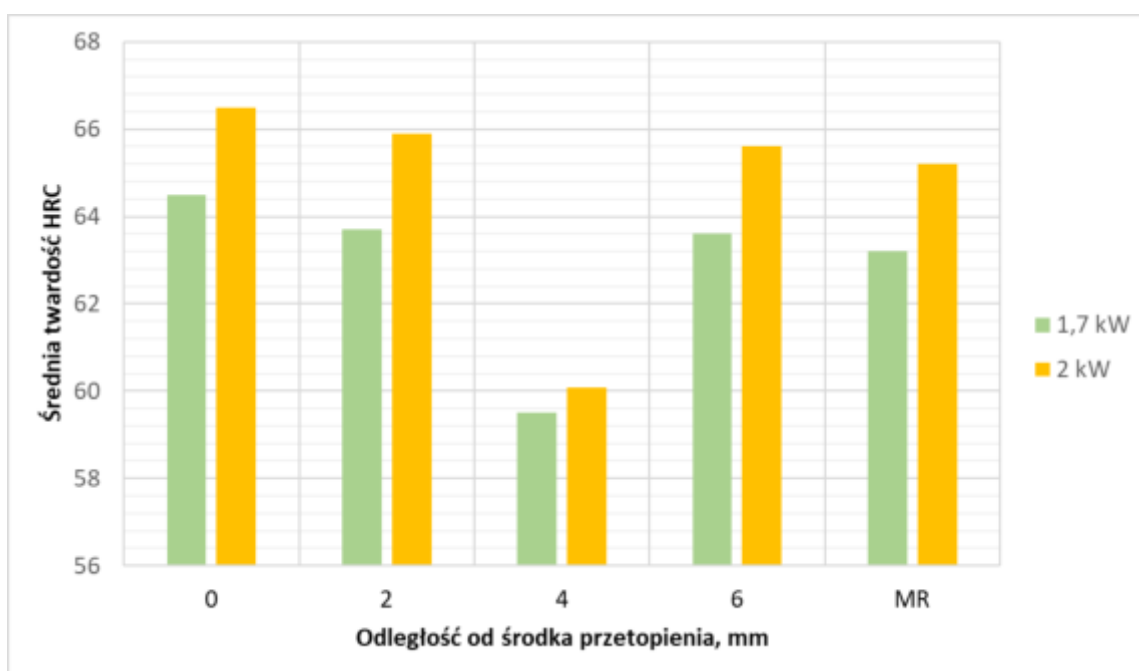


Rysunek 8 Stal szybko tnąca HS6-5-2 po standardowej obróbce cieplnej w temperaturze 1220oC z ujawnionymi cząstkami pierwotnymi; wykres natężenia w funkcji energii w próbce po laserowym przetapianiu przy mocy wiązki 1,7 kW.

Figure 8 HS6-5-2 high-speed steel after standard heat treatment at 1220oC with primary particles revealed; intensity versus energy plot in the sample after laser remelting at 1.7 kW beam power.

W przypadku stopowania proszkiem węgliku wolframu, którego temperatura topnienia jest znacznie wyższa od temperatury topnienia stali, następuje wtapianie nierozpuszczonych ziarn proszku węgliku wolframu w roztopione podłoże stalowe, przez co można zaobserwować wzrost stężenia węgliku podczas analizy punktowej składu chemicznego.

Zestawione wyniki badań twardości stali HS6-5-2 wskazują na wzrost twardości wierzchnich warstw pod wpływem uprzedniego standardowego procesu obróbki cieplnej oraz przetapianiu i stopowaniu węglikiem wolframu. Możliwe jest osiągnięcie twardości rzędu 66,5 HRC przy użyciu mocy wiązki lasera 2,0 kW (rys. 9).

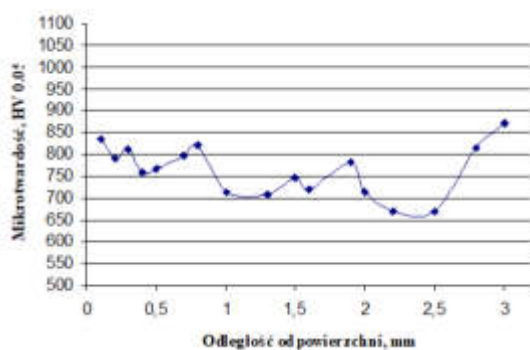


Rysunek 9 Wyniki pomiarów twardości próbki stali HS6-5-2 po przetopieniu laserem o mocy 1,7 kW oraz 2,0 kW i stopowaniu węglikiem wolframu

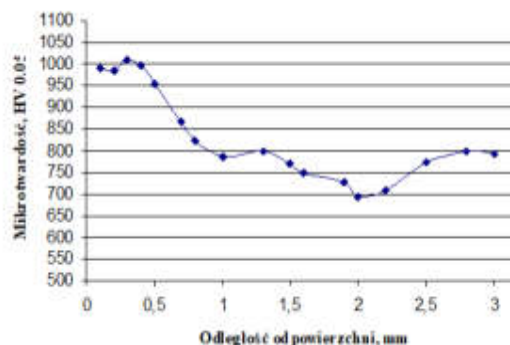
Figure 9 Hardness results of HS6-5-2 steel sample after 1.7 kW and 2.0 kW laser remelting and alloying with tungsten carbide

W celu dokładniejszej analizy własności obrabianego materiału wykonano badania mikrotwardości metodą Vickersa HV0,05, które lepiej ukazują zmiany własności warstwy wierzchniej. Badania wykonano zarówno po obróbce laserowej jak i po odpuszczaniu. Rysunek 10 przedstawia zmiany mikrotwardości warstwy wierzchniej po przetopieniu laserem o mocy 1,7kW, natomiast Rysunek 11 przedstawia zmiany mikrotwardości po przetopieniu laserem o mocy 2,0 kW.

a)



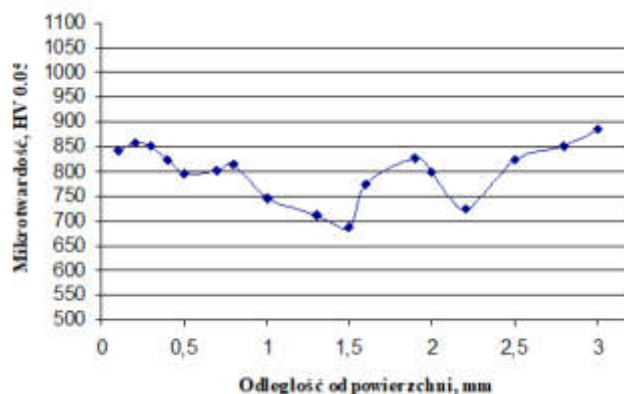
b)



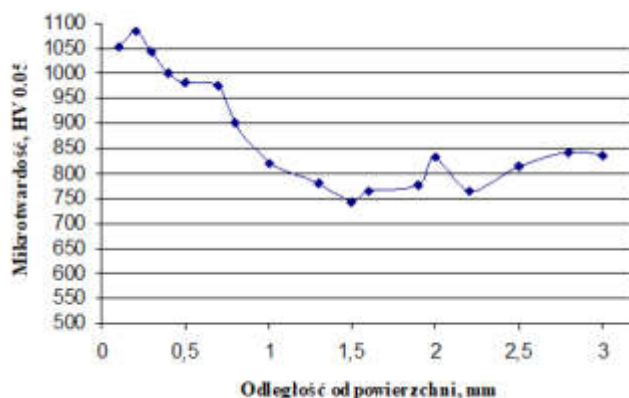
Rysunek 10 Zmiana mikrotwardości warstwy wierzchniej stali HS6-5-2: a) po przetopieniu laserem o mocy 1,7 kW i stopowaniu WC, przy stałej prędkości przetapiania 0,5 m/min, b) po odpuszczaniu

Figure 10 Change in microhardness of the surface layer of HS6-5-2 steel: a) after remelting with a 1.7 kW laser and WC alloying, at a constant remelting speed of 0.5 m/min, b) after tempering)

a)



b)



Rysunek 11 Zmiana mikrotwardości warstwy wierzchniej stali HS6-5-2: a) po przetopieniu laserem o mocy 2,0 kW i stopowaniu WC, przy stałej prędkości przetapiania 0,5 m/min, b) po odpuszczaniu

Figure 11 Change in microhardness of the surface layer of HS6-5-2 steel: a) after remelting with a 2.0 kW laser and WC alloying, at a constant remelting speed of 0.5 m/min, b) after tempering

## 10. WNIOSKI

Przy stopowaniu węglikiem wolframu badanej stali szybko tnącej można zaobserwować strefę przetopioną oraz strefę wpływu ciepła oraz strefy przejściowe. Struktura w strefie środkowej została rozdrobiona - powstały drobne, równoosiowe kryształy. Skutkuje to wzrostem twardości warstwy wierzchniej. Największą mikrotwardością odznaczają się wierzchnie warstwy stali szybko tnącej przetapiane przy mocy lasera 2,0 kW i stopowane węglikiem wolframu. Jest ona równa 1086 HV 0,05 (rys. 11). Na proces przetapiania wpływa między innymi moc lasera, prędkość skanowania, czy też oddziaływanie strumienia gazu osłonowego. Przy stałej prędkości skanowania wiązka lasera, zmiana mocy wiązki wpływa na wielkość obszaru, w którym występują zmiany strukturalne w warstwie wierzchniej stali.

## PODZIĘKOWANIE

Praca powstała w wyniku realizacji projektu w ramach kształcenia zorientowanego projektowo - PBL, w konkursie VII w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza, Politechnika Śląska.

## BIBLIOGRAFIA

1. J. Spoerl, A Brief History of Iron and Steel Production Saint Anselm College
2. Z. Królikowski, Stale konstrukcyjne, narzędziowe i specjalne: (zestawienie wg obowiązujących norm), Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1958
3. O. M. Becker, High-speed steel: the development, nature, treatment, and use of high-speed steels, together with some suggestions as to the problems involved in their use. McGraw-Hill book company, 1910
4. L.A. Dobrzański, A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich, Open Access Library, Volume 5, 2011.
5. L.A. Dobrzański, Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2003
6. <https://www.kronosedm.pl/stal-sw7m-1-3343>
7. <https://strefainzyniera.pl/arttykul/1232/oznaczanie-stali-wg-pnen>
8. <https://www.kronosedm.pl/stal-sw7m-1-3343>
9. <https://inzynierjakosci.pl/2021/10/obrobka-cieplna-wszystko-co-powinien-wiedziec-inzynier-jakosci/>
10. <https://darmet.com.pl/pl/blog-techniczny-darmet/2190-obrobka-cieplna-w-pigulce>
11. L. A. Dobrzański Podstawy Naoki o materiałach i metaloznawstwo, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2003
- A. Temmler, E. Willenborg, K. Wissenbach, Design Surfaces by Laser Remelting, Elsevier Ltd 2011
- A. Czupryński, A. Rzeźnikiewicz, Specjalne technologie spawalnicze w ćwiczeniach laboratoryjnych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2020
12. W. Shifeng, L. Shuai, W. Qingsong, C. Yana, Z. Sheng, S. Yusheng, Effect of molten pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melting parts, Journal of Materials, 2011



## Hałas i wibracje w przekładniach i kolumnach wspomaganych elektrycznie

A. Kowol <sup>ab</sup>, M. Czechowski <sup>b</sup>, I. Głąb <sup>b</sup>, W. Pilarczyk <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials

<sup>b</sup> Nexteer Automotive Poland z o o.

### Abstract:

The article describes the idea of electric power steering. The operation and types of electric power steering are also presented. The study also mentions standards and other documents that must be met by the system.

**Keywords:** noise, vibration, gear, steering gear, PEPS, CEPS

## 1. WPROWADZENIE

Samochód, wynalazek z XIX wieku, bez którego większość z nas nie wyobraża sobie życia. Pomimo, że główna funkcja się nie zmienia, czyli transport z punktu A do B, to użytkownicy posiadają coraz to większe wymagania dotyczące wygody, wyglądu, mocy, energooszczędności czy prowadzenia go.

Jednym z układów, który znacząco zmienił się na przestrzeni lat jest układ kierowniczy. Układ ten umożliwia kierowcy prowadzenie pojazdu i wpływa na możliwość zmiany trajektorii ruchu. Układ musi spełnić określone wymagania, które są związane m.in. z:

- ruchem – zmiana kierunku powinna odbywać się szybko, płynnie i przewidywalnie;
- kierownicą – siła jaką musi użyć powinna być niewielka, powodująca że sterowanie samochodem, nie wymagałoby nadmiernego wysiłku;
- jazdą po łuku – dobrze zaprojektowany kąt skrętu kół, nie powinien powodować poślizgu bocznego [1, 2].

Sprostanie coraz to nowym wymaganiom klientów stawia nie tylko wyzwanie przed dostawcami, ale również powoduje rozwój technologii. Jednym z rozwiązań jest stosowanie układów kierowniczych wspomaganych elektrycznie. Układ ten może znajdować się przy kierownicy, wtedy kolumna kierownicza posiada dodatkowe wspomaganie lub w części podwozia – jako przekładnia kierownicza.

## 2. WSPOMAGANIE ELEKTRYCZNE PRZEKŁADNI I KOLUMNY KIEROWNICZYCH

Pierwszy samochód posiadający wspomaganie elektryczne w układzie kierowniczym został wyprodukowany w 1988 roku i był nim Suzuki Cervo. Początkowo, wspomaganie to znalazło zastosowanie w małych samochodach klasy A i B – było to spowodowane ograniczeniami związanymi z maksymalną siłą wspomagania jaką można było wygenerować (5kN). Wprowadzenie rozwiązania do masowej produkcji zajęło kilkanaście lat. Było to możliwe dzięki postępom poczynionym w mechatronice, które spowodowały, że produkcja seryjna aktywnych układów była możliwa. Aktywny układ pozwala na dopasowanie przłożenia w przekładni do prędkości samochodu. Dzisiejsza przekładnia znajdująca się w samochodach segmentu C została przedstawiona na rysunku 1 [3].



Rysunek 1. Przekładnia kierownicza (z jednym zębniakiem) wspomagana elektrycznie firmy Nexteer [3]

Ważną rolę w elektrycznym wspomaganiu kierownicy odgrywają czujniki. Samochód musi posiadać czujnik kąta skrętu i czujnik momentu obrotowego przymocowane do kolumny kierownicy oraz czujnik prędkości pojazdu przymocowany do obudowy skrzyni biegów. W czasie jazdy każdy z nich monitoruje dany parametr np.

- czujnik momentu obrotowego – odbiera informację, jak mocno zostaje wychylona kierownica,
- czujnik kąta skrętu – na bieżąco monitoruje pozycję kierownicy.

Informacje, które rejestruje czujnik przesyła do jednostki sterującej silnika (płytki ECU). Po otrzymaniu danych, ECU przetwarza je i ocenia ile wspomagania jest nam aktualnie potrzebne. Największe wspomaganie można otrzymać od systemu, gdy prędkość wynosi około 20 km/h [4].

### 2.1. RODZAJE PRZEKŁADNI WSPOMAGANYCH ELEKTRYCZNIE

Obecnie można wyszczególnić następujące rodzaje układów kierowniczych wspomaganych elektrycznie:

- Ze względu na siłę przekazywaną na drążek kierowniczy:
  - o CEPS (Column Electric Power Steering), kolumna wspomagana elektrycznie. Typowe zastosowania w pojazdach segmentu A-B.



Rysunek 2. Kolumna kierownicza wspomagana elektrycznie [3]

- SPEPS (Single Pinion Electric Power Steering), przekładnia posiadające jeden zębnik. W układzie SPEPS jednostka wspomagająca jest zamieszczona na wale zębniaka. Siła jaka może zostać przekazana na drążek kierowniczy to około 11 kN. Typowe zastosowania w pojazdach segmentu A-B-C (rysunek 1).
- DPEPS (Dual Pionion Electric Power Steering), przekładnia z dwoma zębnikami. W układzie DEPS jednostka wspomagająca jest oddzielona od osi kierownicy, dając wiele możliwości konfiguracji instalacji systemu. Typowe zastosowania w pojazdach segmentu C-D.



Rysunek 3. Przekładnia kierownicza (z dwoma zębnikami) wspomagana elektrycznie [3]

- REPS (Rack Electric Power Steering), przekładnia kierownicza wspomagana elektrycznie jest odseparowana od osi kierownicy, dając dowolność w instalacji systemu. Typowe zastosowania w pojazdach typu full-size (SUVy z rynku amerykańskiego).



Rysunek 4. Przekładnia kierownicza typu REPS [3]

Elektryczne wspomaganie kierownicy powoduje doskonale wycucie układu kierowniczego, komfort kierowcy i doskonale prowadzenie. Siła wspomagania jest uzależniona od prędkości z jaką porusza się samochód. Im jest ona niższa, tym większa część oporu stawianego przez koła jest niwelowana przez elektryczny układ wspomagania. Spośród wielu zalet można wyróżnić: mniejszą szkodliwość dla środowiska naturalnego z powodu wyeliminowania elementów polimerowych tj. przewody czy płyn np. hydrauliczny, mniejszą masę oraz większą odporność na zużycie eksploatacyjne. Modułowa konstrukcja układu powoduje, że czas oraz koszty opracowania nowej przekładni, dla poszczególnych pojazdów, są mniejsze [4, 5].

- Ze względu na budowę wyróżnia się następujące typy przekładni:
  - o przekładnie zębatkowe (listwowe)
  - o przekładnie śrubowo-kulowe
  - o przekładnie ślimakowe [6].

## 2.2. Hałas i drgania w przekładniach i kolumnach kierowniczych

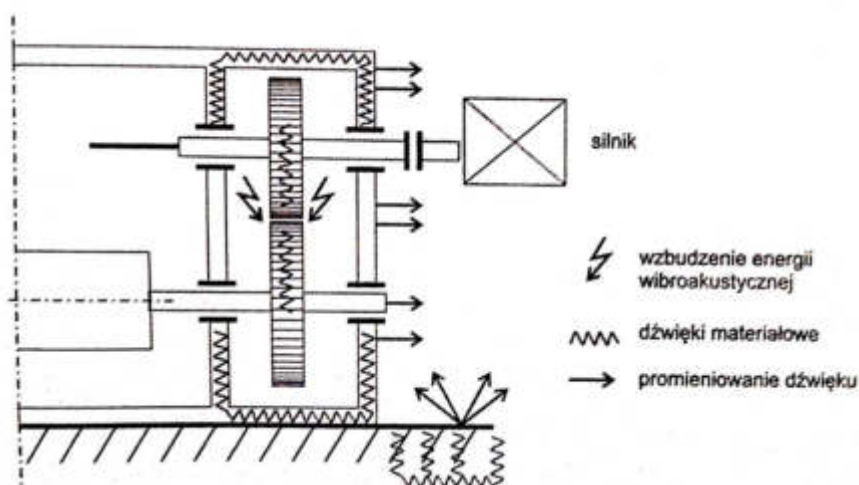
Coraz to wyższe oczekiwania użytkowników odnośnie komfortu używania samochodów powodują, że układy kierownicze powinny być ciche podczas jazdy. Niestety w wyniku wyeksploatowania niektórych elementów, pojawia się hałas generowany podczas pracy układu.

Typy hałasu, czyli niepożądanego dźwięku, w samochodzie można podzielić na trzy grupy: Buzz, Squeak i Rattle (BSR). Są one oparte na sygnaturze i częstotliwości dźwięków:

- pisk to zjawisko hałasu wywołane tarciem, które mieści się w zakresie częstotliwości od 200 Hz do 10 000 Hz;
- grzechotanie to zjawisko hałasu wywołanego uderzeniem, które mieści się w zakresie częstotliwości od 200 Hz do 2000 Hz;
- buzz to rodzaj grzechotki o wyższym zakresie częstotliwości (powyżej 2000 Hz).

Wewnątrz samochodu występuje spektrum częstotliwości i poziomu dB, który zgodnie z normą ISO 226:2003 ma zakres od 500 Hz do 4000 Hz to największy zakres czułości na człowieka (człowiek może łatwo odbierać zmianę poziomu hałasu o minimum 21 dB w zakresie od 40 do 80 dB).

Najczęstszym źródłem energii wibroakustycznej są połączenia mechaniczne – przekładnia zębata, łożyska oraz wszelkiego rodzaju uszkodzenia miejsc styku dwóch ciał stałych. Źródłem hałasu mogą być również połączenia przekładni czy kolumny z drążkami. Na rysunku 5 zostało przedstawione przykładowe miejsca wzbudzenia energii wibroakustycznej w przekładni, strzałkami został zaznaczony kierunek rozchodzenia się dźwięku [7, 8].



Rysunek 5. Powstanie i rozchodzenie się dźwięku w przekładni [7]

Wykrycie hałasu w układzie kierowniczym nie jest łatwym zadaniem do wykonania. Przekładnia i kolumna składają się z wielu części, które połączone są mechanicznie, układów i innych, a dodatkowo podczas montażu przykręcane do nich są wałki i drążki. Zagrożenie dla użytkownika może stanowić nieprawidłowa praca połączeń układu kierowniczego. Podczas problemów z pracą mechanizmu stabilizacji, możliwa jest nadsterowność, która powoduje ryzyko związane z wywróceniem się pojazdu w czasie pokonywania zakrętu. Wszelkie uszkodzenia mechanizmu stabilizacji mogą doprowadzić do jego oderwania bądź odchylenia [9].

Jedną z metod oceny hałasu jest poddanie jej testowi FDR - Field Data Replication. Test ten polega na odtworzeniu zarejestrowanych pomiarów przyspieszenia pola na wzbudniku drgań. Oprogramowanie wykonuje iteracyjne odtwarzanie historii w czasie w celu replikacji przebiegów, w tym wysokich przyspieszeń szczytowych. Dzięki FDR inżynier testowy może odtworzyć nagrany plik historii czasu jako odniesienie kontrolne. Replikując kształt fali ze środowiska terenowego, FDR obejmuje wyższe intensywności. Rezultatem jest replikacja 1:1. Test nie musi być losowy, ponieważ celem testu FDR jest odtworzenie dowolnego środowiska. Można rejestrować rzeczywiste warunki wibracji w środowisku produktu poprzez oprzyrządowanie akcelerometrów do produktu lub jego otoczenia, a następnie zbierać przyspieszenia in situ za pomocą szybkich rejestratorów. Korzystając z tych pomiarów w laboratorium można precyzyjnie odtworzyć zmierzone warunki naprężenia przyspieszenia i stworzyć test, który odwzorowuje rzeczywiste warunki terenowe. Ten prawdziwy test można również zwiększyć pod względem amplitudy, aby zastosować tę samą częstotliwość wibracji, ale na bardziej surowych poziomach, aby skrócić czas trwania testu [10, 11].

### 2.3. Bezpieczeństwo układów kierowniczych

Ogólnodostępność systemów EPS, które są skomplikowane mechatronicznie, powoduje że muszą spełnić wymagania bezpieczeństwa. Normy, które są szczególnie ważne to: IEC 61508 i ISO 26262. IEC 61508 (w Polsce PN-EN 61508-1:2010) to międzynarodowy standard rozwoju elektrotechniki, elektroniczne i programowalne systemy elektroniczne (E/E/PE) (Bosch 2002). Systemy mają znaczenie dla bezpieczeństwa, gdy ich awaria wskazuje na znaczne ryzyko dla osób lub środowiska. Systemy są uporządkowane według poziomów nienaruszalności bezpieczeństwa lub SIL. Zasięg sięga od SIL1 do SIL4, przy czym SIL4 stawia

najwyższe wymagania systemom a w przemyśle motoryzacyjnym najwyższą klasyfikacją jest SIL3 [2, 12].

ISO 26262 („Pojazdy drogowe — Bezpieczeństwo funkcjonalne”) jest standardem elektrycznym/elektronicznym, w którym zawarte są informacje o systemach istotnych dla bezpieczeństwa, zwłaszcza dla zakresu zastosowania w samochodach. Bezpieczeństwo samochodów musi być integralną częścią produktu. [2, 12].

### 3. PODSUMOWANIE

Komfort jazdy nie skupia się aktualnie tylko na wygodnych fotelach, klimatyzacji czy nawigacji, jest on związany z spokojem, który jest równoznaczny z brakiem hałasu, jaki można zaznać podczas podróży. Jedną z rzeczy, która od niedawna jest podstawowym wyposażeniem w samochodzie jest wspomagany układ kierowniczy. Dzięki zastosowaniu takiego rozwiązania, kierowanie samochodem jest lekkie i płynne, przykładając niewielką siłę na kierownicę. Wspomagane układy kierownicze ciągle zostają poprawiane i udoskonalane, tak by sprostać oczekiwaniom najbardziej wymagających klientów. Aktualnie większość samochodów wyposażona jest w elektryczne wspomaganie kierownicy, jednakże najnowsze artykuły, doniesienia z świata automotive wskazują, że przygotowywane zostaje nowe rozwiązanie, tzw. z ang. „Steer-by-wire”, polegające na zastąpieniu mechanicznego połączenia kolumny z przekładnią za pomocą elastycznego przewodu.

### LITERATURA

1. Gabrylewicz M., *Podwozia i nadwozia pojazdów samochodowych* cz. 2., Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2018.
2. Harrer M., Pfeffer P., *Steering Handbook*, Switzerland: Springer International Publishing, 2017.
3. <https://www.nexteer.com/electric-power-steering/pinion-assisted-eps/>
4. <https://dsauto.com.my/en/2019/02/13/electric-power-steering-rack/>
5. Automotive IQ. [Online] Els P., 03 2017. [Zacytowano: 27 12 2021.] <https://www.automotive-iq.com/chassis-systems/articles/electric-power-steering-systems-eps-have-never-been-safer>
6. <http://www.turbo-tec.eu/pl/zasada-dzialania-przekladni-kierowniczych/>
7. 017-28-1952 Published 07/10/2017; Utkarsh Sharma, Simson T. Wilson, Santosh Lalasure, and K. Rajakumar Mahindra & Mahindra, “*Quantitative Evaluation of Steering System Rattle Noise*”, SAE
8. Engel Z. Zawieska W. M., *Hałas i drgania w procesach pracy*, Warszawa: Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państwowy Instytut Badawczy, 2010
9. <https://www.trwaftermarket.com/pl/samochod-osobowy/uklad-kierowniczy-i-zawieszenie/regenerowane-zespoy-kierownicze/>
10. <https://www.elitetest.com/blog/2017-05/field-data-replication-fatigue-damage-spectrum-and-kurtosion>
11. <https://vibrationresearch.com/vibrationview/field-data-replication/>
12. Walkowiak J. *Układ kierowniczy*. [prezentacja] brak miejsca: AMP Polska, dostęp: 25.12.2021
13. <https://motofocus.pl/technika/15354/elektryczne-wspomaganie-ukladu-kierowniczego-eps-jak-to-dziala-cz-1>
14. <https://www.nexteer.com/electric-power-steering/>

## Analiza termiczna komory próżniowej wykonanej z różnych materiałów

D. Lazaj<sup>a</sup>, A. Sasiela<sup>a</sup>, A. Śliwa<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Student/ka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email: dawilaz301@student.polsl.pl, agnisas480@student.polsl.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych,

email: agata.sliwa@polsl.pl

**Streszczenie:** W niniejszym artykule przedstawiono symulację komputerową przeprowadzoną w programie Ansys. Symulacja dotyczyła analizy termicznej komory próżniowej dla trzech różnych materiałów:  $\mu$ -metal, standardowej stali nierdzewnej oraz stali kwasoodpornej 321 (gatunek 1H18N9T). Na podstawie wiedzy literaturowej zadano dwie temperatury grzania komory dla każdego materiału. Grzanie odbywało się poprzez taśmę grzejną, którą owinięta była komora. Celem symulacji było określenie naprężeń pojawiających się w materiale komory podczas grzania.

**Abstract:** This article presents a computer simulation carried out in the Ansys environment. The thermal analysis of a vacuum chamber made from three different materials was conducted. The chosen materials were stainless steel available directly in the Ansys, 321 steel, and  $\mu$ -metal. According to experimental knowledge, two cases of simulations different in temperatures were carried out for each of the materials. The heating (bake-out) of the chamber took place through a heating tape winded around the chamber. The purpose of this simulation was to obtain data about the materials' stress during the bake-out.

**Słowa kluczowe:** Symulacja komputerowa, symulacja termiczna, ANSYS, MES

### 1. WSTĘP

Komory próżniowe wykorzystywane są w nowoczesnym przemyśle i w nauce do różnorodnych celów (Rys.1). Komór używa się w przemysłowych procesach technologicznych, takich jak PVD (Physical Vapour Deposition) oraz CVD (Chemical Vapour Deposition)

oraz w tworzeniu i badaniu nowych materiałów oraz zaawansowanych struktur. Co więcej, obecnie na całym świecie podejmowane są działania związane z naporowywaniem i badaniem różnorodnych materiałów takich jak półprzewodniki organiczne i nieorganiczne czy też metale. Cienkie lub ultracienkie warstwy przykładowych półprzewodników organicznych naporowywane są w wyspecjalizowanych i odpowiednio odpompowanych komorach,

by następnie znaleźć zastosowanie w elementach optoelektronicznych, diodach, czujnikach lub ogniwach fotowoltaicznych. Aby naparować warstwę półprzewodnika organicznego lub innego materiału na wybrane podłoże w komorze próżniowej materiał naparowywany musi zostać wygrzany w specjalnym tygielku. Podczas grzania materiału w tygielku, w wyniku wzrostu temperatury w całej komorze następuje zjawisko desorpcji gazów i par ze ścianek komory próżniowej (ang. outgassing). Outgassing jest poważnym wyzwaniem dla czystości wykonywanych struktur, ponieważ cząsteczki gazów i par uwolnione ze ścianek w trakcie procesu naparowania mogą znacząco zanieczyszczać naparowywaną warstwę. Czynnością znacząco redukującą to zjawisko jest wygrzewanie komór próżniowych (ang. bake-out). Całą komorę wygrzewa się przed procesem by wymusić zjawisko outgassingu, a więc pozbyć się zanieczyszczenia z komory, ponieważ odgazowane cząsteczki zostają z niej bezpośrednio odpompowane [1,2]. Temperatura, w której może być wygrzewana komora zależy od materiału, z którego została wykonana i zastosowań, zwykle jest to temperatura około 200 °C [3], spotykane są także temperatury nawet dwukrotnie wyższe [4]. Komory wykonane z  $\mu$ -metalów nie mogą być wygrzewane w temperaturze wyższej niż 200 °C [10].

Znane są dwa sposoby przeprowadzania procesu wygrzewania komory:

- Zainstalowanie w pobliżu komory źródła ciepła, np. specjalnej płyty grzewczej i przykrycie całego układu specjalnym namiotem, który kumuluję ciepło w środku. Namioty wykonywane są w kompozytach zawierających włókna szklane.
- Komorę oplata się taśmą grzejną, która prawie bezpośrednio przylega do ścianek komory zapewniając w przybliżeniu równomiernie wygrzewanie komory



Rys. 1. Przykładowa aparatura próżniowa z wyspecjalizowanymi komorami próżniowymi [4]  
*Fig. 1. An example of vacuum apparatus with specialized vacuum chambers [4]*



Zazwyczaj komory wykonuje się z kilku rodzajów stali lub  $\mu$ -metal. Zazwyczaj używa się stali nierdzewnej 314 (gatunek 1.4841). Jest to stal austenityczna, która wykazuje dobre własności mechaniczne w wysokich temperaturach.

Komory można wykonać także ze stali 321 (znana także pod nazwą 1H18N9T, gatunek 1.4541). Jest to nierdzewna kwasoodporna stal chromowo-niklowo-tytanowa. Taka stal także posiada bardzo dobre własności wytrzymałościowe w wysokich temperaturach, np. umowna granica plastyczności  $R_{p0,2}$  równa się przy temperaturze 500 °C około 115 MPa, w normalnej temperaturze 20 °C granica plastyczności wynosi 190 MPa [11,12].

$\mu$ -metal to z kolei stop żelaza z niklem, jego skład jest następujący: 77% niklu, 16% żelaza, 5% miedzi i 2% chromu lub molibdenu.  $\mu$ -metal jest zdecydowanie droższy od stali, ale doskonale nadaje się do budowy komór, ponieważ ekranuje on pole magnetyczne wewnątrz komory (w zasadzie pole magnetyczne jest przekierowywane z tym samym skutkiem) [8,9].

## 2. ZAŁOŻENIA MODELOWE

Komorę wraz z nawiniętą wokół taśmą grzejną wykonano jako złożenie w programie Autodesk Inventor Professional 2022. Projekt komory bazował na komorach dostępnych na rynku 2, wykonywanych przez firmę Lesker. Parametry komory próżniowej zestawiono w tabeli 1.



Rys. 2. Model geometryczny komory próżniowej  
 Fig. 2. Geometry model of vacuum chamber

Tabela 1. Geometria komory próżniowej  
 Table 1. Vacuum chamber geometry

| Parametr                  | Wymiar [mm] |
|---------------------------|-------------|
| Promień zewnętrzny komory | 254         |
| Grubość ściany komory     | 3,175       |
| Wysokość cylindra         | 488,95      |
| Wysokość podstaw          | 9,525       |
| Bok przekroju taśmy       | 10          |

Następnie zdefiniowano materiały, z których zazwyczaj wykonuje się komory, tzn. typową stal nierdzewną dostępną w programie Ansys jako przybliżenie stali 314, nierdzewną kwasoodporną stal 321 (gatunek 1.4541) oraz  $\mu$ -metal. Parametry materiałów przedstawiono w tabeli 2.

Tabela. 2. Własności typowych materiałów komory próżniowej [5,6,7]  
Table 2. Properties of vacuum chamber's materials [5,6,7]

| Parametr materiałowy                          | Stal nierdzewna dostępna w programie Ansys | Stal 321 (gatunek 1.4541) | $\mu$ -metal |
|---|--|---------------------------|--------------|
| Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]                  | 7750                                       | 7900                      | 8700         |
| Współczynnik przewodnictwa cieplnego [W/m·°C] | 15,1                                       | 15                        | 19,0         |
| Ciepło właściwe [K/kg·°C]                     | 480  | 500                       | 460          |
| Współczynnik Poissona                         | 0,31                                       | 0,29                      | 0,29         |
| Moduł Younga [GPa]                            | 193  | 196-200                   | 255          |

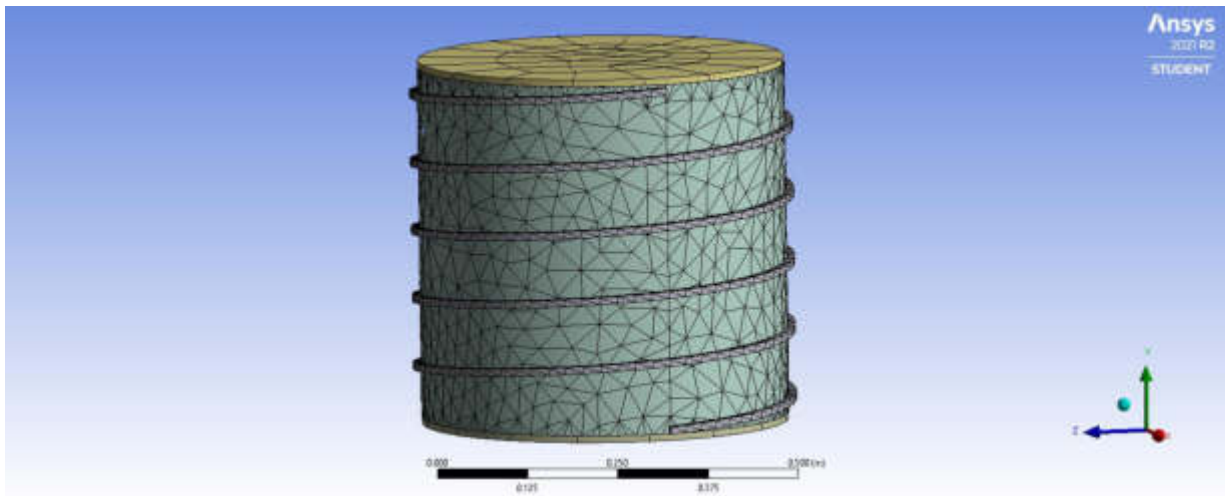
Materiałem zadanym na geometrię taśmy grzejnej w każdym przypadku była standardowa stal nierdzewna. Kolejne etapy projektu zostały przeprowadzone w programie Ansys 2021 R2 STUDENT.

### 3. SYMULACJA KOMPUTEROWA

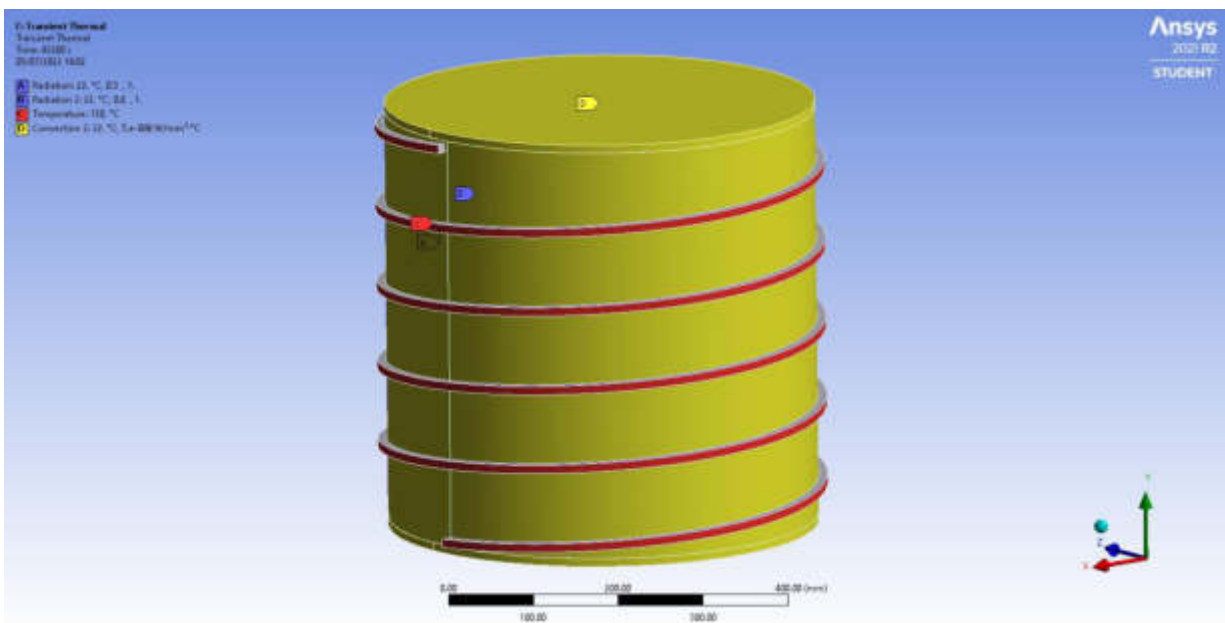
Model przedstawiony na rysunku 2 zaimportowano jako *geometry*, a parametry zestawione w tabeli 2 wykorzystano do deklaracji nowych materiałów w *engineering data*. Wykorzystano moduł *Transient Thermal* do przypisania odpowiednich materiałów na elementy modelu oraz do nadania na niego siatki elementów skończonych (rys. 3).

Dalej, wykonano zależną od czasu symulację rozchodzenia się temperatury w modelu (rys. 5-10) dla dwóch zadanych temperatur: 150 °C oraz 300 °C. Do warunków brzegowych zadanych na materiał należała temperatura na taśmie grzejnej, powierzchnie radiacyjne, aby umożliwić przepływ między taśmą i komorą oraz konwekcja na wszystkich powierzchniach komory, by zasymulować jej położenie w powietrzu (rys. 4).

Otrzymane wyniki zostały następnie wykorzystane w celu zbadania naprężeń (rys. 11-16) i odkształceń (rys. 17-22) w modelu w module *Static Structural*. Dolna powierzchnia komory została pozbawiona stopni swobody, aby zasymulować jej umocowanie do podłogi. Taśma grzejna również została pozbawiona stopni swobody, by ją unieruchomić i symulować jedynie naprężenia w modelu komory.

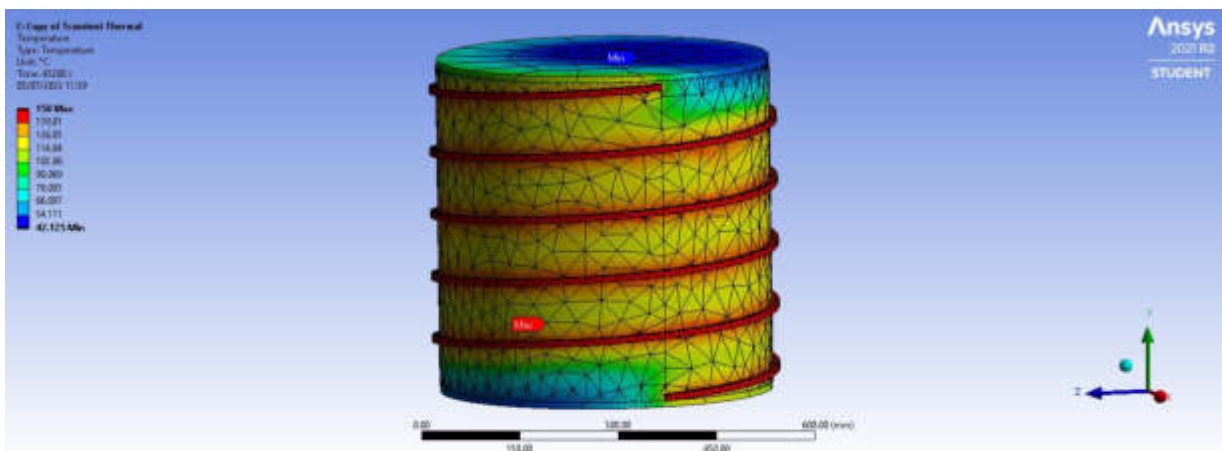


Rys. 3. Siatka elementów skończonych  
Fig. 3. Finite elements model

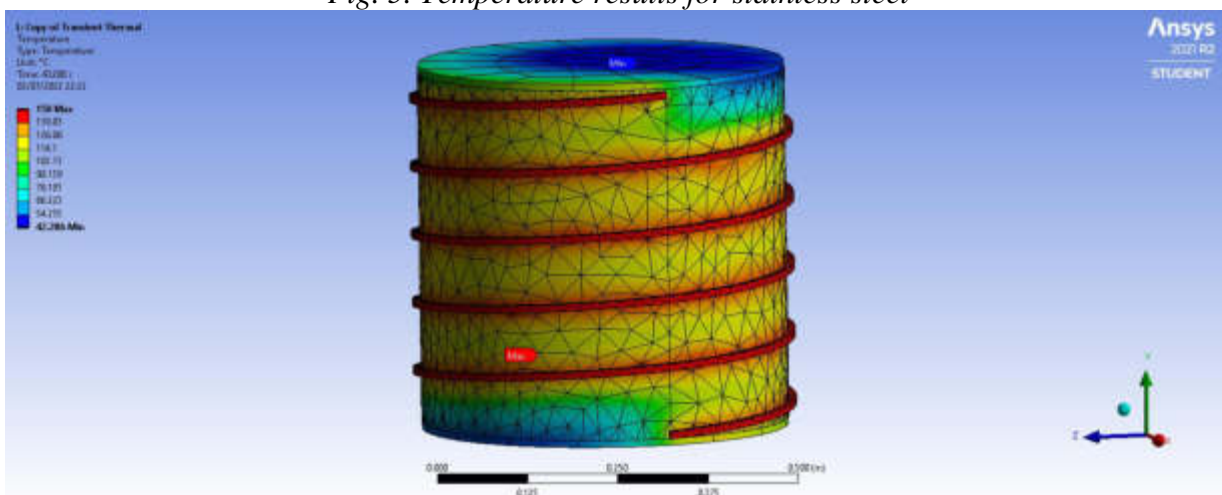


Rys. 4. Warunki brzegowe modułu Transient Thermal  
Fig. 4. Transient Thermal module boundary conditions

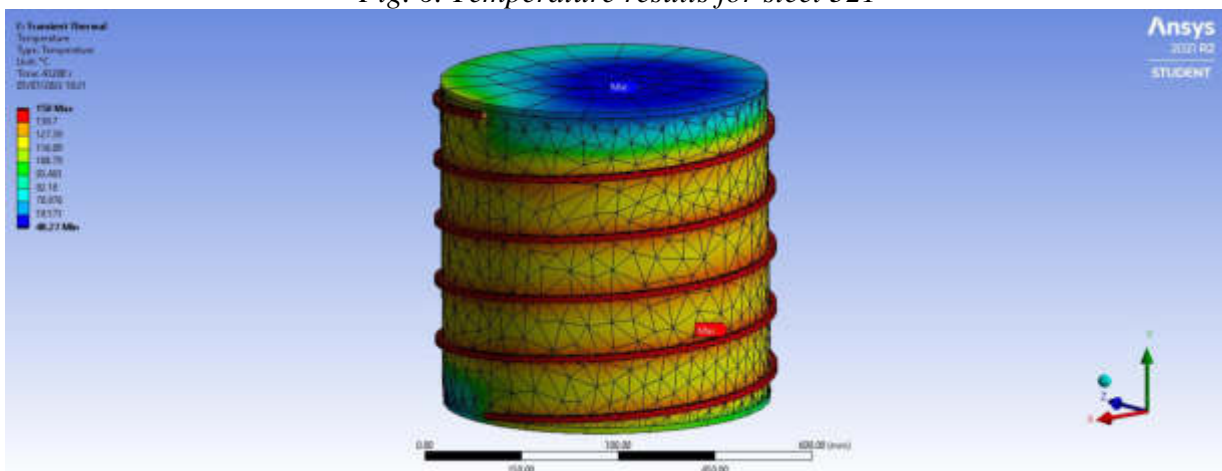
Wyniki symulacji rozkładu temperatury 150 °C:



Rys. 5. Wyniki temperaturowe dla stali nierdzewnej  
 Fig. 5. Temperature results for stainless steel

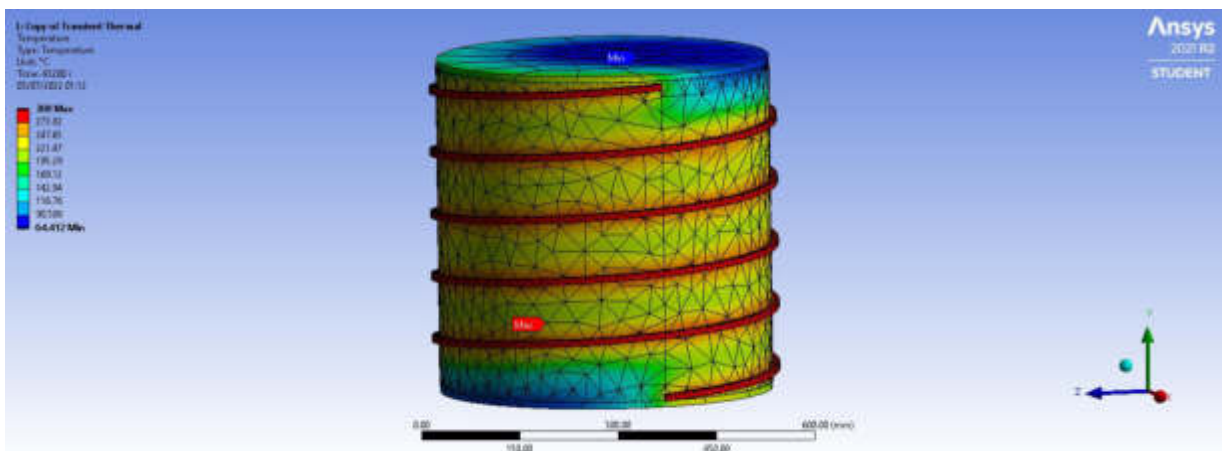


Rys. 6. Wyniki temperaturowe dla stali 321  
 Fig. 6. Temperature results for steel 321

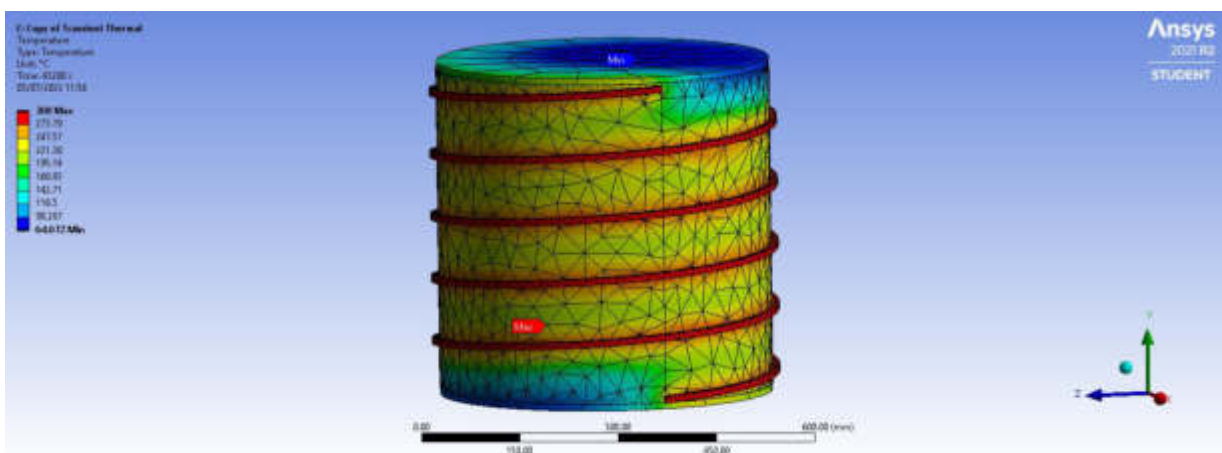


Rys. 7. Wyniki temperaturowe dla  $\mu$ -metal  
 Fig. 7. Temperature results for  $\mu$ -metal

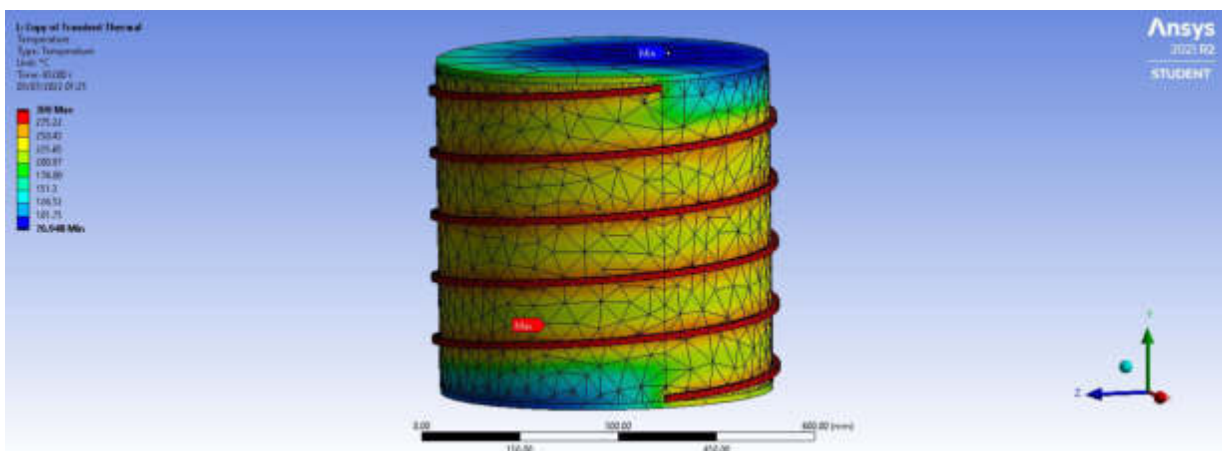
## Wyniki symulacji rozkładu temperatury 300 °C:



Rys. 8. Wyniki temperaturowe dla stali nierdzewnej  
Fig. 8. Temperature results for stainless steel

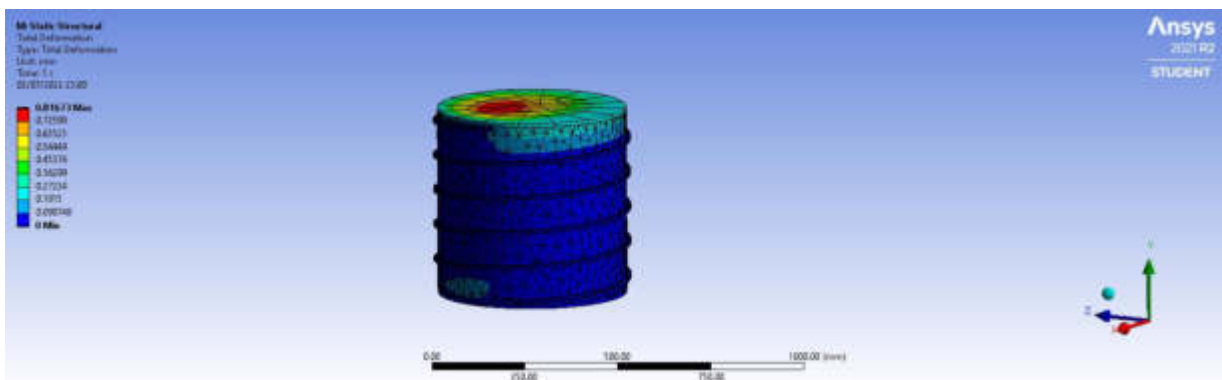


Rys. 9. Wyniki temperaturowe dla stali 321  
Fig. 9. Temperature results for steel 321

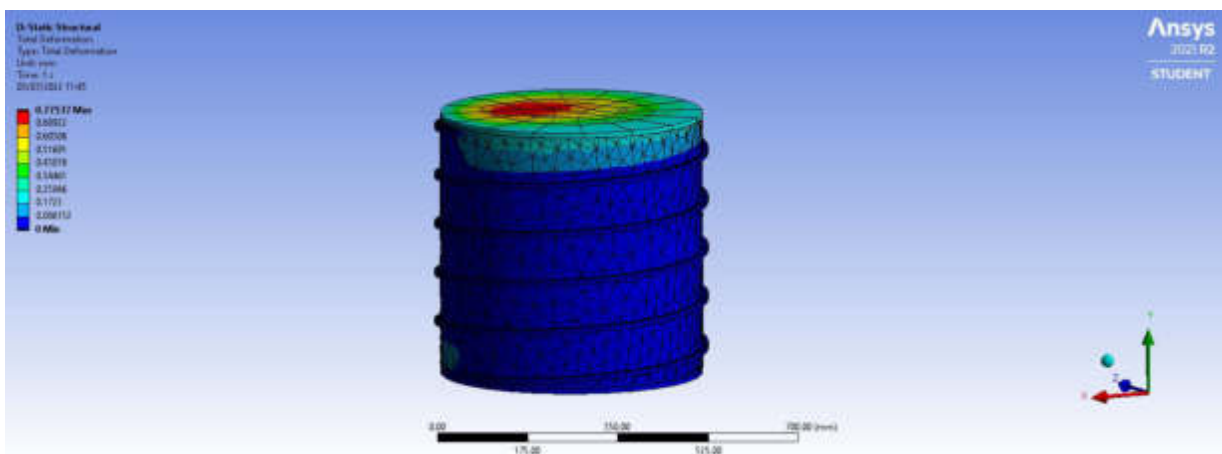


Rys. 10. Wyniki temperaturowe dla  $\mu$ -metal  
Fig. 10. Temperature results for  $\mu$ -metal

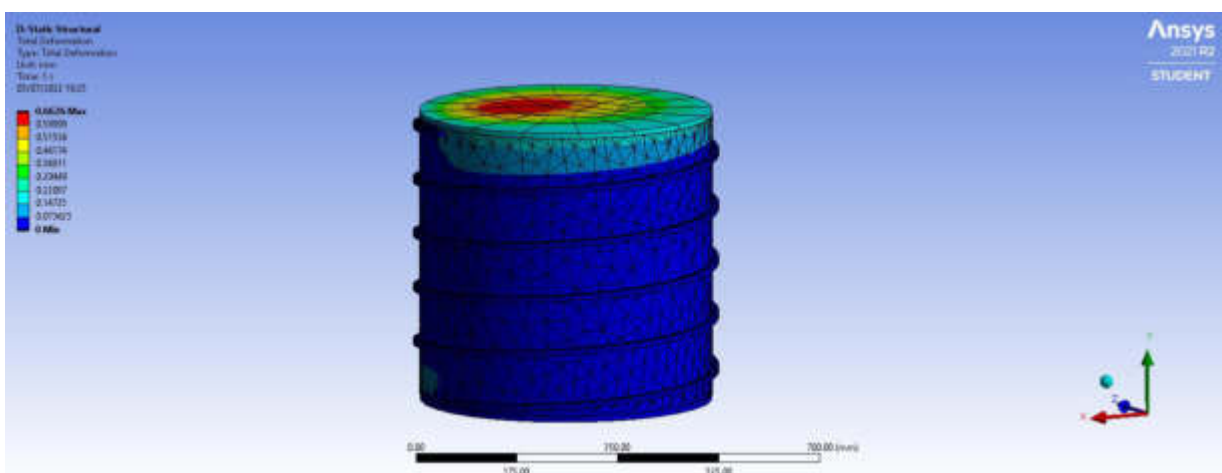
Wyniki symulacji odkształceń dla temperatury 150 °C:



Rys. 11. Wyniki odkształceń dla stali nierdzewnej  
 Fig. 11. Displacement results for stainless steel

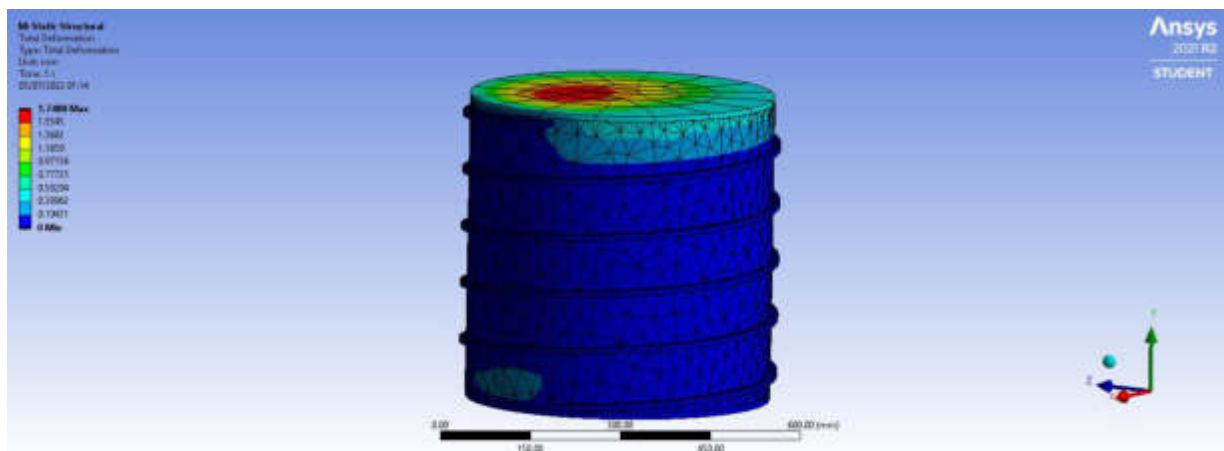


Rys. 12. Wyniki odkształceń dla stali 321  
 Fig. 12. Displacement results for steel 321

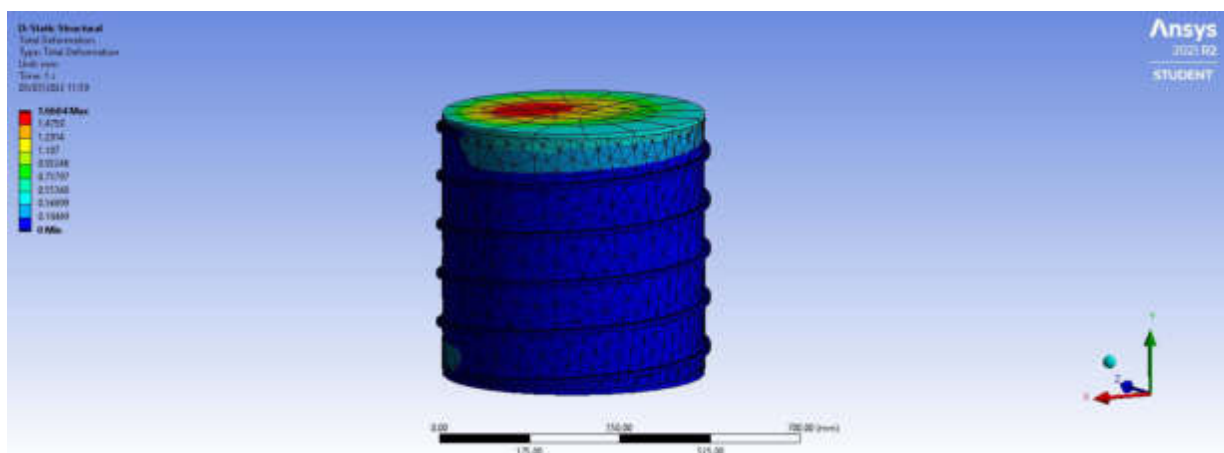


Rys. 13. Wyniki odkształceń dla  $\mu$ -metal  
 Fig. 13. Displacement results for  $\mu$ -metal

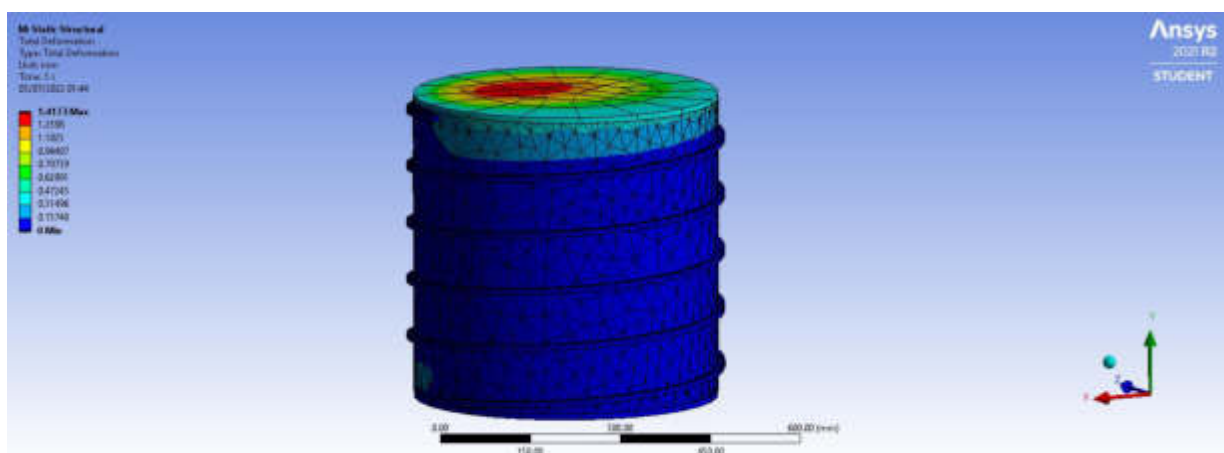
## Wyniki symulacji odkształceń dla temperatury 300 °C:



Rys. 14. Wyniki odkształceń dla stali nierdzewnej  
Fig. 14. Displacement results for stainless steel

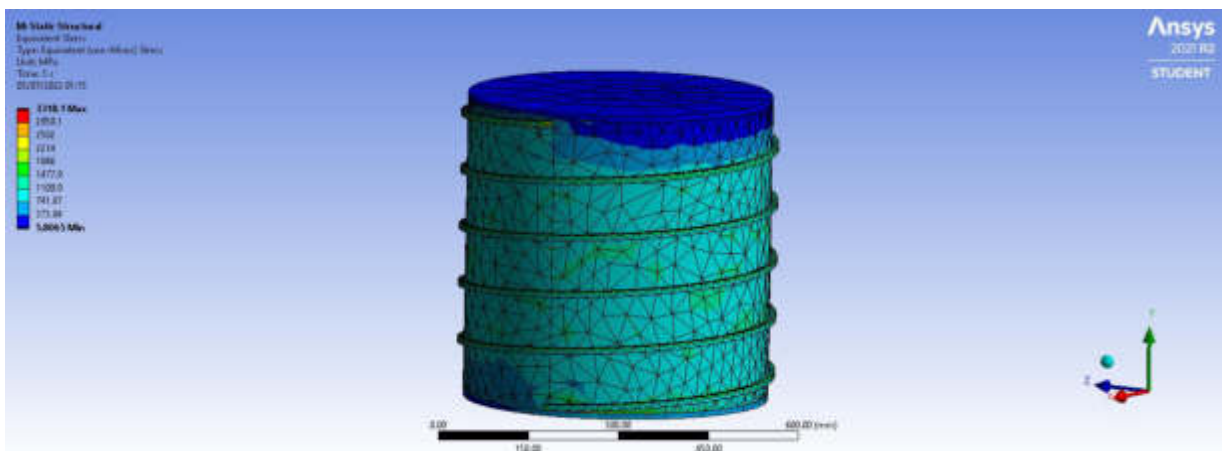


Rys. 15. Wyniki odkształceń dla stali 321  
Fig. 15. Displacement results for steel 321

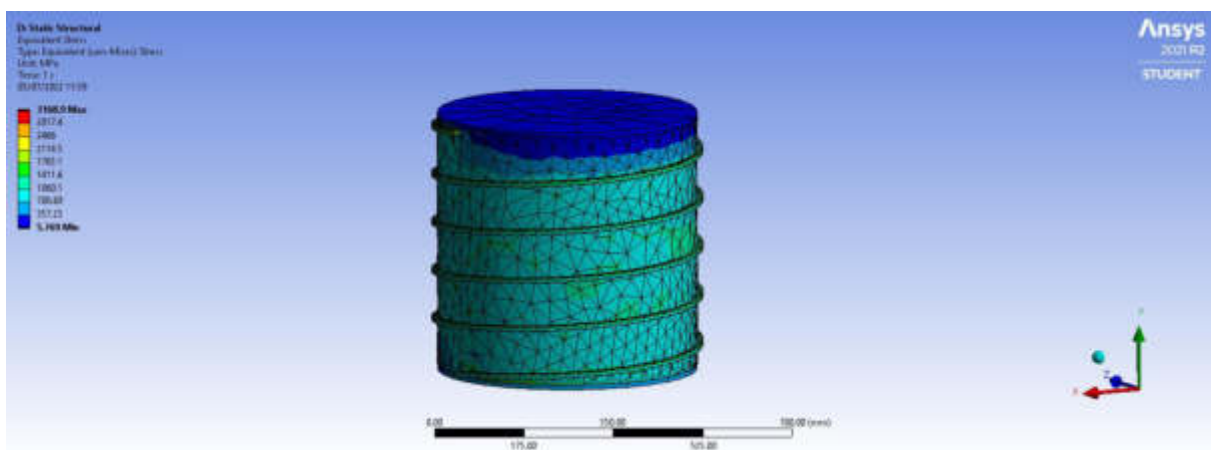


Rys. 16. Wyniki odkształceń dla  $\mu$ -metal  
Fig. 16. Displacement results for  $\mu$ -metal

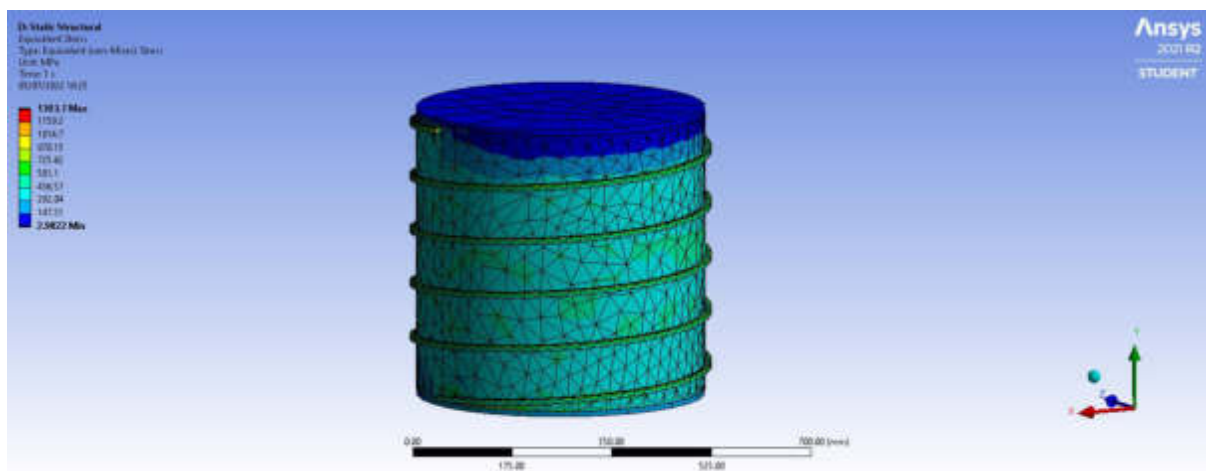
Wyniki symulacji naprężeń dla temperatury 150 °C:



Rys. 17. Wyniki naprężeń dla stali nierdzewnej  
 Fig. 17. Stress results for stainless steel



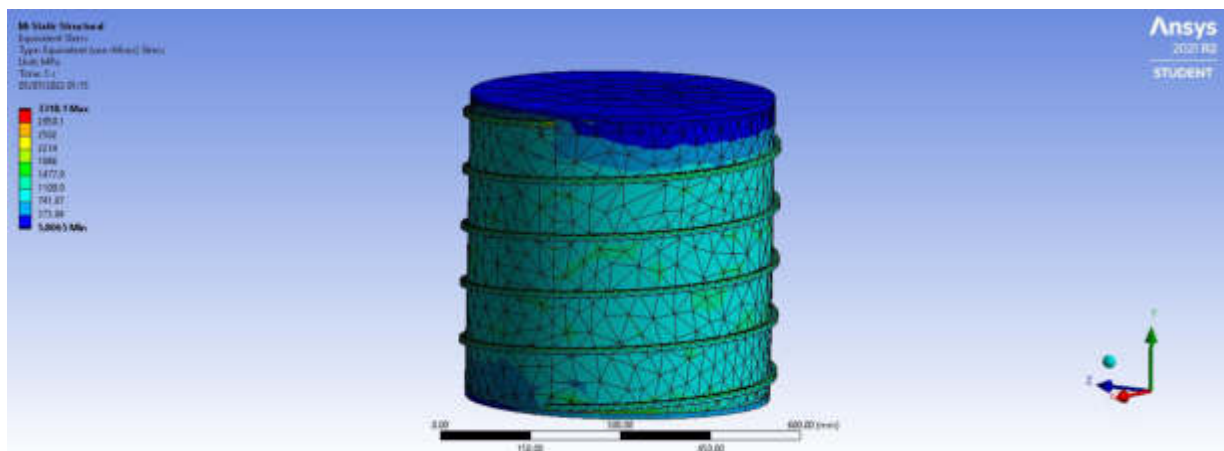
Rys. 18. Wyniki naprężeń dla stali 321  
 Fig. 18. Stress results for steel 321



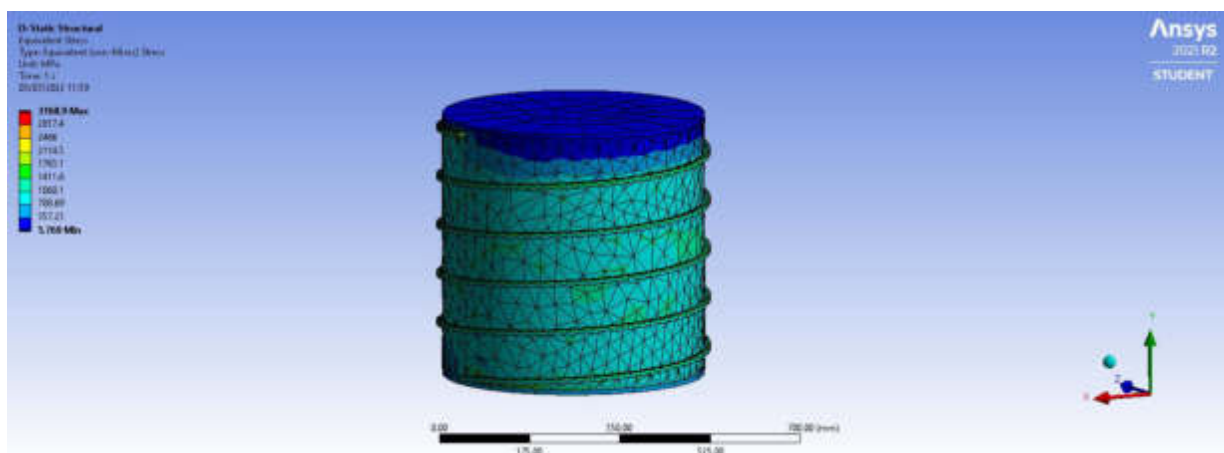
Rys. 19. Wyniki naprężeń dla  $\mu$ -metal  
 Fig. 19. Stress results for  $\mu$ -metal



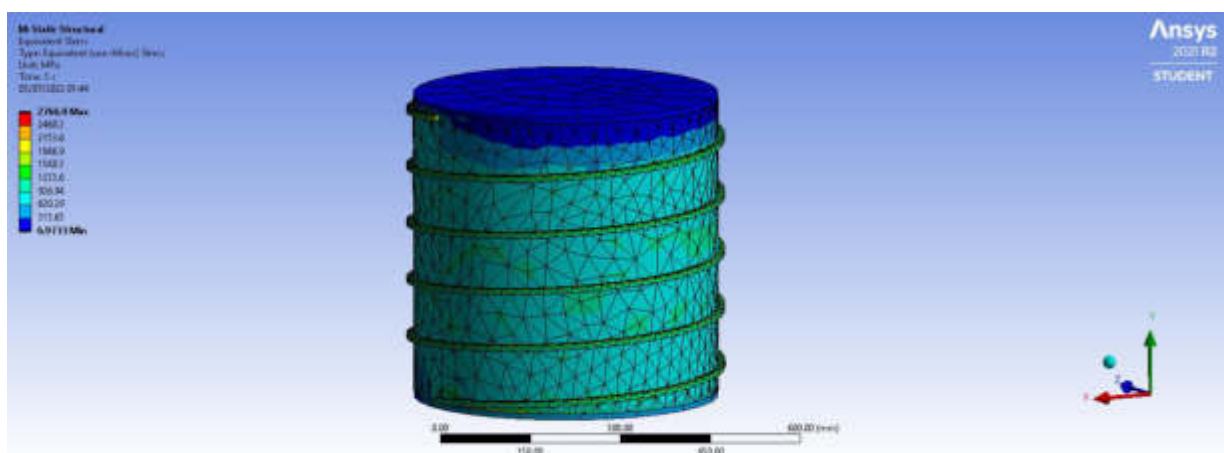
### Wyniki symulacji naprężeń dla temperatury 300 °C:



Rys. 20. Wyniki naprężeń dla stali nierdzewnej  
 Fig. 20. Stress results for stainless steel



Rys. 21. Wyniki naprężeń dla stali 321  
 Fig. 21. Stress results for steel 321



Rys. 22. Wyniki naprężeń dla  $\mu$ -metal  
 Fig. 22. Stress results for  $\mu$ -metal

Wyniki przeprowadzonych symulacji komputerowych zestawiono w tabeli 3, gdzie zestawiono końcowe osiągnięte temperatury minimalne i średnie oraz maksymalne uzyskane naprężenia oraz przemieszczenia dla wszystkich trzech modeli dla dwóch zadanych temperatur.

Tabela 3. Wyniki temperatur, naprężeń i przemieszczeń

Table 3. Temperature, stress, and displacement results

| Materiał                                   |        | Temperatura min. [°C] | Temperatura średnia [°C] | Przemieszczenie [mm] | Naprężenie [MPa] |
|--|--------|-----------------------|--------------------------|----------------------|------------------|
| Stal nierdzewna dostępna w programie Ansys | 150 °C | 42,287                | 125,09                   | 0,82                 | 1566,2           |
|  | 300 °C | 64,412                | 241,43                   | 1,74                 | 3318,1           |
| Stal 321 (gatunek 1.4541)                  | 150 °C | 42,126                | 125,05                   | 0,78                 | 1495,1           |
|  | 300 °C | 64,072                | 241,34                   | 1,66                 | 3168,9           |
| μ-metal                                    | 150 °C | 48,271                | 126,52                   | 0,66                 | 1303,7           |
|  | 300 °C | 76,95                 | 244,53                   | 1,42                 | 2766,9           |

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Symulacja komputerowa pozwoliła na uzyskanie informacji na temat rozchodzenia się temperatury w modelu oraz na temat naprężeń i przemieszczeń powstałych na skutek tej temperatury. Spośród trzech wybranych do porównania materiałów największe końcowe temperatury minimalne i średnie uzyskano dla μ-metalu. Ten materiał wykazał się również najmniejszymi przemieszczeniami i naprężeniami w tym porównaniu. Obydwie stale uzyskały podobne do siebie wyniki. Można jednak zauważyć, że stal nierdzewna zdefiniowana w programie Ansys pozwoliła uzyskać wyższe od stali 321 temperatury końcowe, kosztem większych przemieszczeń i naprężeń.

#### 5. WNIOSKI:

- Materiał z jakiego wykonana jest komora ma wpływ na rozchodzenie się w modelu temperatur i dalej na tempo wzrostu naprężeń i odkształceń.
- Materiał, dla którego osiągnięto największe temperatury końcowe nie jest tym, który charakteryzują największe naprężenia i przemieszczenia.
- Symulacja komputerowa pokazuje, że μ-metal idealnie nadaje się do szybkiego ogrzania komory zachowując przy tym niskie odkształcenia, które dalej mogłyby prowadzić do rozszczelnienia komory.
- Stal 321 pozwala na ogrzanie komory kosztem mniejszych odkształceń niż stal standardowa.
- Przeprowadzona analiza pozwoliła określić miejsca, w których gromadzą się największe naprężenia oraz przemieszczenia (szczytowa część komory).

**LITERATURA**

- [1] [https://www.lesker.com/newweb/technical\\_info/vacuumtech/outgas\\_00\\_basicconcept.cfm](https://www.lesker.com/newweb/technical_info/vacuumtech/outgas_00_basicconcept.cfm)
- [2] <https://www.vacuumscienceworld.com/blog/vacuum-bake-out>
- [3] <https://www.briskheat.com/applications/process-temperature-control-and-maintenance/vacuum-bake-out.html>
- [4] <https://www.mbe-komponenten.de/products/mbe-systems/organic-deposition-system.php>
- [5] <https://mumetal.co.uk/?p=101&fbclid=IwAR07B090SjGK-1VDuH6Iykm7TliS6-21asCumnV6Syx2rPuKfp0xrO3R7Q#:~:text=Mu%20Metal%20%C2%AE%20Mechanical%20properties%20at%20ambient%20temperature,Strength%3A%20700%20%5BMPa%5D%20Thermal%20Conductivity%3A%2019%20%5BW%2F%20%28m%2AK%29%5D>
- [6] <https://stalespecjalne.com.pl/oferta/stale-nierdzewne/1-4541.html>
- [7] <https://matmatch.com/materials/minfc6052-din-17440-grade-x6crniti18-10-quenched-q->
- [8] <http://www.mu-metal.com/faqs.html>
- [9] <https://en.wikipedia.org/wiki/Mu-metal>
- [10] Scientaomicron Magnetically Shielded UHV Chambers CUSTOM MADE CHAMBER-document z danymi technicznymi komory
- [11] <https://www.alfa-tech.com.pl/stale-wysokostopowe-o-specjalnych-wlasnoscjach-stal-kwasoodporna-1h18n9t>
- [12] <https://www.kronosedm.pl/stal-1h18n9t1-4541>

## Aspekty materiałowe i technologiczne w wytwarzaniu igieł gramofonowych

A. Ludwig<sup>a</sup>, A. Olszewska<sup>a</sup>, T. Słaboszewski<sup>a</sup>, W. Wanczura<sup>a</sup>, A. Woszczak<sup>a</sup>,  
A. Barczyńska<sup>b</sup>, B. Ziebowicz<sup>c</sup>, A. Ziębowicz<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Student/ka Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, SKN Materiałów Funkcjonalnych

<sup>b</sup> Studentka Wydział Inżynierii Biomedycznej, Politechnika Śląska

<sup>c</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

<sup>d</sup> Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Biomedycznej, Katedra Biomateriałów i Inżynierii Wytwarzania

**Streszczenie:** W artykule opisano najpopularniejsze rodzaje oraz najważniejsze różnice w budowie wkładek gramofonowych. Przedstawiony został także podstawowy podział igieł gramofonowych i pokrótce scharakteryzowano ich sposób działania. Przybliżono również ogólnie rysy historyczne, w celu czytelniejszego odbioru referatu. Skupiono się głównie na wyszczególnieniu, podziale i opisie typów szlifów stosowanych w igłach, które mają największe znaczenie dla przyszłych badań.

**Abstract:** The article describes the most popular types and the most important differences in the construction of phono cartridges. The basic classification of gramophone needles is also presented, and their mode of operation is briefly characterized. The historical features were also presented in order to make the presentation more readable. The main focus is on specifying, categorizing, and describing the types of cuts used in needles that are of greatest importance for future research.

**Słowa kluczowe:** gramofon, wkładka gramofonowa, igła gramofonowa, szlif igły

### 1. WSTĘP

Gramofon jest urządzeniem towarzyszącym w dzisiejszych czasach każdemu koneserowi dobrego muzycznego brzmienia. Dodatkową, wartą uwagi kwestią jest fakt, że ten wspaniały sprzęt posiada swojego pradziadka w postaci fonografu, który skonstruował jeden z najwybitniejszych wynalazców XIX i XX wieku Tomasa Edison. W ciągu minionych lat przeszedł on szereg transformacji doprowadzających do gramofonu znanego dzisiaj, którego jakość odtwarzania zachwyca nawet najwybredniejszych. Jest to urządzenie ponadczasowe! [1].

Ale co tak naprawdę wpływa bezpośrednio na fakt, że gramofon jest jednym z najlepszych, dostępnych w dzisiejszych czasach, odtwarzaczem dźwięku? Tutaj pojawia się ona - igła gramofonowa. Z czystym sumieniem można nazwać ją mózgiem gramofonu. To ona ma bezpośredni kontakt z rowkami płyty winylowej i przekazuje wydobyty dźwięk do dalszych części gramofonu. Pozornie może wydawać się to kwestią prozaiczną, natomiast temat igieł oraz to, jak duży wpływ mają one nie tylko na dźwięk, jest tutaj rzeczą szalenie złożoną i istotną dla sprawy.

Igła wraz z całym szeregiem elementów tworzy zespół, nazywany wkładką gramofonową. W tym momencie zaczyna się złożoność zadań, które musi ona wykonać, żeby można było cieszyć się odtwarzanym dźwiękiem. Najprościej rzecz ujmując, wkładka przekształca ruch mechaniczny w sygnał elektryczny [2], co również możemy określić jako proces wysoce złożony.

Firmy wytwarzające i wprowadzające na rynek wkładki gramofonowe przeprowadzały wiele badań, próbując stworzyć igłę doskonałą [3]. Nowe rodzaje szlifów wydłużyły żywotność igieł, tym samym pozwalając znacząco zwiększyć ich osiągi. Wyjaśnia to po części, jak ważną rolę w gramofonie odgrywa igła, przejmując nie tylko zadanie dobrego odebrania wibracji.

Przedmiotem niniejszej pracy jest przybliżenie udziału wkładki gramofonowej, jak również samej igły jako integralnej części całego układu tworzącego gramofon. Praca ta stanowi też wprowadzenie do części badawczej, której tematem jest porównanie trzech rodzajów szlifów igieł oraz ich wpływu na zużycie trybologiczne płyt winylowych oraz ich samych.

## 2. RODZAJE WKŁADEK GRAMOFONOWYCH

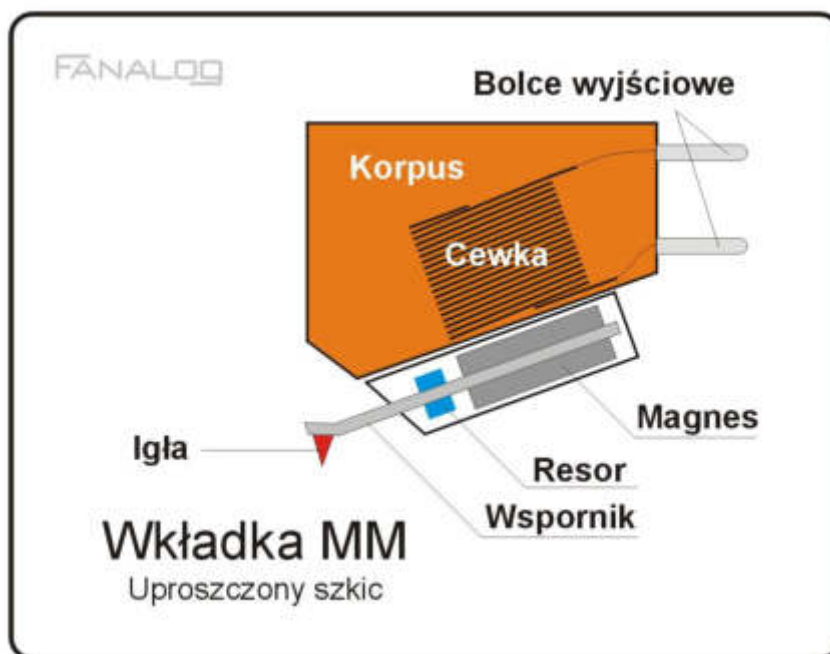
Wkładka gramofonowa jest niezwykle istotnym elementem wyposażenia gramofonu. Jej zadaniem jest zetknięcie się z powierzchnią płyty, odczytanie informacji zawartych w rowku i zamiana ich na sygnał elektryczny odtwarzający zapisany na winylu dźwięk. Od rodzaju dobranej wkładki zależy jakie brzmienie zostanie wydobyte z płyty.

Najogólniej mówiąc wkładka jest przetwornikiem elektromechanicznym, który zamienia ruch igły na sygnał elektryczny.

Wyróżnia się dwa najczęściej spotykane rodzaje wkładek gramofonowych – MM Moving Magnet (elektromagnetyczne) i MC Moving Coil (magnetoelektryczne). Najbardziej popularna wkładka MM na jednym końcu wspornika ma zamocowaną igłę, a z drugiej strony w pobliżu cewki znajduje się magnes. Mniej popularna jest wkładka magnetoelektryczna MC, w której cewka umieszczona jest na drgającym wsporniku, a magnes trwale przymocowany do korpusu [4]. Cewka przymocowana do drgającego wspornika generuje mniejszy prąd przez to, że musi być lżejsza niż w przypadku wkładki elektromagnetycznej.

W skrócie, różnica pomiędzy wkładkami MM a MC polega na tym, że w pierwszej elementem drgającym jest magnes, a cewki są na stałe przytwierdzone do wkładki (Rys. 1). We wkładce MC natomiast jest dokładnie na odwrót - mała cewka na końcu wspornika drga pomiędzy magnesami (Rys. 2). System drgający w przypadku wkładek magnetoelektrycznych jest dużo lżejszy niż w elektromagnetycznych, dzięki czemu możliwe jest dokładniejsze śledzenie rowka, większa częstotliwość drgań i możliwość przenoszenia większej ilości informacji [5]. Wkładki MC przez swoją lekkość uważane są za lepsze od MM, które historycznie powstały wcześniej.

Najważniejszym elementem każdego rodzaju wkładki jest oczywiście igła, bezpośrednio stykająca się z płytą, której zadaniem jest śledzenie rowka płyty gramofonowej. Jednak za jakość owego śledzenia odpowiada już profil igły, czyli innymi słowy jej szlif.



Rysunek 1. Schemat wkładki gramofonowej typu Moving Magnet [3, 4]  
Figure 1. Diagram of a Moving Magnet phono cartridge [3, 4]



Rysunek 2. Schemat wkładki gramofonowej typu Moving Coil [3, 4]  
Figure 2. Diagram of a Moving Coil phono cartridge [3, 4]

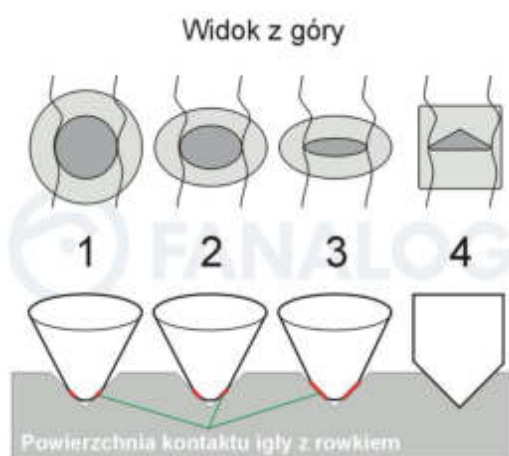
### 3. ASPEKTY TECHNOLOGICZNE IGIEŁ GRAMOFONOWYCH

Chcąc przybliżyć szczegóły związane z budową i działaniem igieł gramofonowych, warto przeanalizować aspekt historyczny, dotyczący etapów tworzenia kształtu igły, dopasowywania materiału oraz co najważniejsze poszukiwań najlepszych rozwiązań metodologicznych. Pierwsze igły, stosowane w najstarszych gramofonach, były wykonane w całości ze stali [6]. Rozwiązanie to jak widać nie przyjęło się, ponieważ już w niedługim czasie zaczęto produkować igły, w których szpilka wykonana była z szafiru. Szlif w starych typach igieł był uzależniony od rodzaju tłoczenia płyty, co za tym idzie, prędkości z jaką była ona odtwarzana [6].

Obecnie wymagania stawiane igłom są zdecydowanie wyższe i składa się na nie wiele czynników. Jedną z głównych i oczywistych kwestii jest bez wątpienia jakość odtwarzania muzyki z płyty winylowej. W zależności od rodzaju szlif, zmienia się obszar przylegania igły do rowka płyty. Wpływa to bezpośrednio na jakość drgań, które są odbierane i przekazywane do dalszej części układu wkładki gramofonowej a co za tym idzie na jakość odtwarzanego dźwięku. Wśród wymagań stawianym igłom gramofonowym jest również ich cena, która wielokrotnie jest czynnikiem decydującym przy wyborze odpowiedniej igły. Innymi ważnymi czynnikami są tolerancja na zabrudzenia płyt i nieprawidłowe ustawienie wkładki – między innymi nacisk na płytę oraz siła odśrodkowa [7]. Interesującym aspektem, będącym ściśle powiązaniem z tematem przyszłych badań jest również zużycie trybologiczne układu igła – płyta. Wpływa na nie rodzaj szlif oraz materiał, z którego wykonana jest igła.

Igły w kontekście materiałowym można podzielić na dwa rodzaje; nude i bonded. Szpile pierwszego typu wykonane są w całości z diamentu oraz ich masa jest mniejsza, dlatego też cena jest zdecydowanie wyższa od igieł typu bonded. Drugi rodzaj igieł, tak zwanych “klejonych” wykonany jest z metalu, na który nasadzona jest diamentowa nakładka. Wbrew pozorom, wykonanie igły typu bonded jest technologicznie prostsze niż wykonanie igły typu nude [7].

Wyróżniamy cztery podstawowe szlify w igłach gramofonowych: sferyczny, eliptyczny, contact – line oraz microline. Ostatni rodzaj szlif plasuje się najwyżej pod względem jakości odtwarzania oraz zużycia w trakcie użytkowania [3].



Rysunek 3. Schemat najpopularniejszych rodzajów szlifów: 1) szlif sferyczny, 2) szlif eliptyczny, 3) szlif contact – line, 4) szlif microline [4]

Figure 3. Diagram of the most popular types of cuts: 1) spherical cut, 2) elliptical cut, 3) contact-line cut, 4) microline cut [4]

### 3.1 Szlif sferyczny

Szlif sferyczny, czyli najprostszy rodzaj szlifowania wykorzystywany w niskobudżetowych wkładkach. Charakteryzuje się on tym, że kocówka igły jest mocno zaokrąglona, co ogranicza styk na poziomie rowek płyty - igła. Tego typu rozwiązanie sprawdza się w odtwarzaniu płyt, których jakość tłoczenia jest na zdecydowanie niższym poziomie. Sam proces wytwórczy igieł ze szlifem sferycznym jest znacznie mniej skomplikowany, co również ma wpływ na konkurencyjne ceny tej części. Według badań przeprowadzonych przez firmę Jico, czas pracy igieł to minimum 150 h [3]. Badania te nie dają jednak stuprocentowej dokładności, gdyż producent przyjął własny współczynnik zniekształceń i na tej bazie testował igłę. W praktyce ten czas znacznie się wydłuża.

### 3.2 Szlif eliptyczny

Drugim często używanym i zdecydowanie lepszym typem szlifowania, jest szlif eliptyczny. Jego budowa w porównaniu do szlifowania sferycznego jest bardziej podłużna, zapewnia to lepsze odbieranie dźwięku. Budowa pozwala na precyzyjniejsze dopasowanie się igły do rowka płyty i zwiększenie obszaru styku z tym aspekcie. Największą różnicę odczuwa się w stosunku do nowszych tłoczeń, gdzie rowki są znacznie mniejsze. Z tego powodu, w lepszych jakościowo płytach szlif sferyczny zastępowany jest przez szlif eliptyczny. Żywotność takiej igły jest dwukrotnie dłuższa w porównaniu do igieł ze szlifem sferycznym i wynosi minimalnie 250 h [3], co jednoznacznie stawia ją wyżej w rankingu.

### 3.3 Szlif contact – line

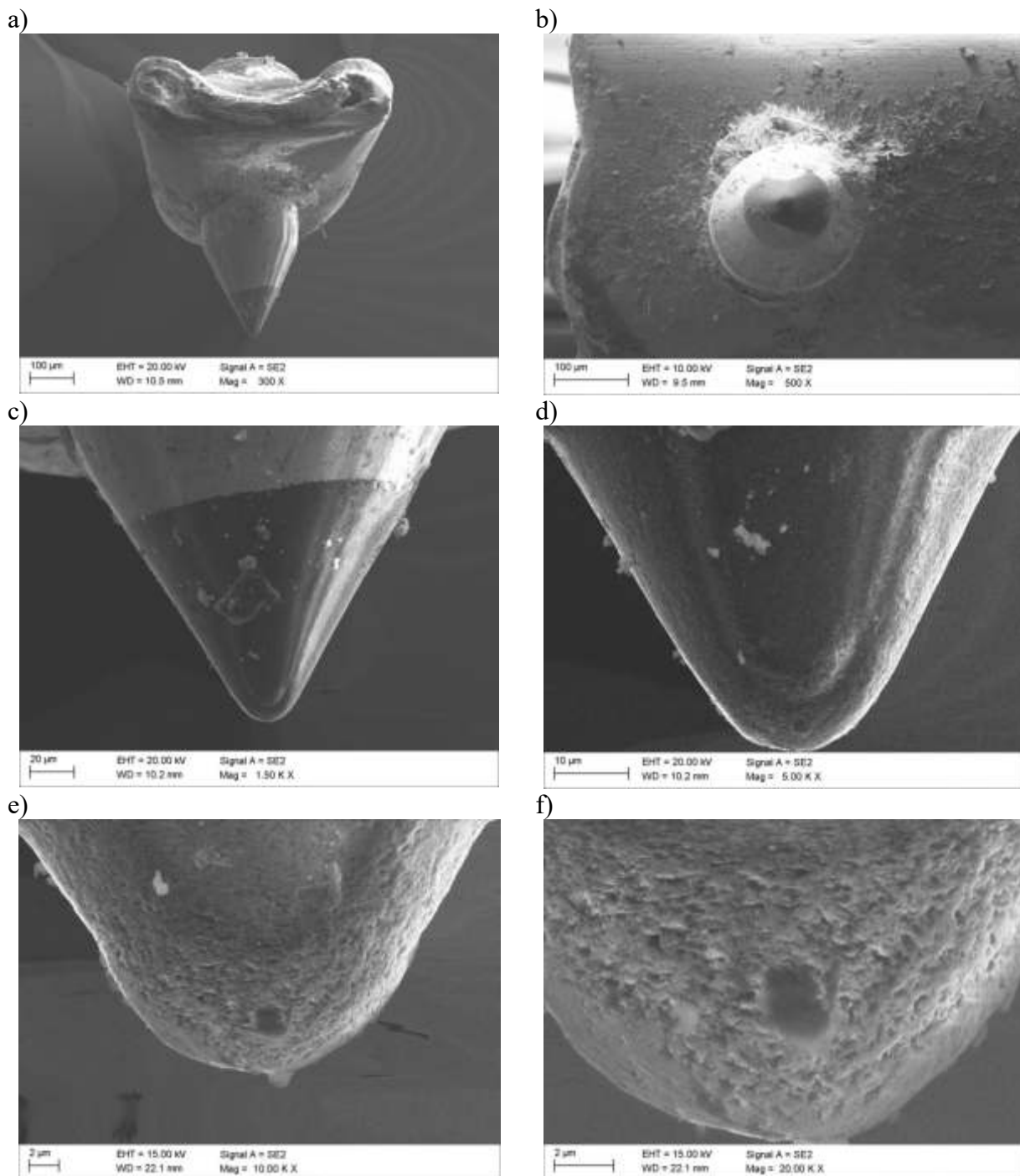
Do powstania szlifowania contact – line przyczyniło się wejście na rynek płyt z tłoczeniem kwadrofonicznym, które to mogą przenosić wysokie częstotliwości, znacząco poprawiając jakość wydobywanego dźwięku. Pomysłodawca i projektant tego szlifowania opracował go dla firmy JVC, stąd też nazwa pierwszego produktu firmy wykonanego w tym stylu nosi nazwę od jego twórcy - Shibata [3]. Z innych źródeł możemy dowiedzieć się, że pierwsze próby wprowadzenia na rynek takich igieł, miały miejsce już w latach 50-tych ubiegłego wieku [7]. Głównym celem procesu wytwórczego było znaczące wysmuklenie i wydłużenie igły oraz jak najdokładniejsze dopasowanie jej do rowka płyty. Jedną z zalet wynikającą z dużego dopasowania igły jest bez wątpienia fakt dobrego odbierania i odtwarzania tonów powyżej 35.000 Hz. Ten typ szlifowania charakteryzuje również mniejsze zużycie, zarówno igieł jak i płyt, spowodowane to jest wywarciem mniejszego nacisku igły na płytę. Badania przeprowadzone przez firmę Jico wykazały, że minimalny czas pracy takiej igły to około 400 godzin, natomiast ten czas w odniesieniu rzeczywistym jest zdecydowanie dłuższy [3].

### 3.4 Szlif microline

To rodzaj szlifowania, który najdokładniej odwzorowuje rowki płyty winylowej. Jest to najnowsze rozwiązanie technologiczne, znajdujące zastosowanie w bardzo zaawansowanych wkładkach gramofonowych. W procesie ponownie postarano się o zmniejszenie rozmiaru igły, a krzywizna w obrębie styku z rowkiem wynosi średnio 2/3 wartości, które są typowe dla szlifowania contact – line [7]. Prekursorem tego rozwiązania był szlif Van Den Hulla, powstały dzięki analizie komputerowej [3]. Dzięki dokładnemu dopasowaniu igły do wycięcia rowka mocno zredukowano zniekształcenia harmoniczne oraz szumy, wynikające z fizycznego kontaktu igły z płytą [3]. Ponownie udało się producentom przedłużyć żywotność igły, która w tym rodzaju szlifowania wynosi minimum 500 godzin. Stanowi to wyniki niemal pięciokrotnie lepszy w porównaniu do igieł z najprostszym typem szlifowania [3].



Na rysunku 3 przedstawiono obrazy igły gramofonowej o szlifie eliptycznym typu bonded wykonane przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego SEM Supra 25. Przy powiększeniach powyżej 5000x widać zużycie płyty w postaci wyrwy.



Rysunek 2. Igła gramofonowa: a) powiększenie 300x, b) powiększenie 500x, c) powiększenie 1500, d) powiększenie 5000x, e) powiększenie 10000x, f) powiększenie 20000x  
 Figure 2. Gramophone needle: a) magnification 300x, b) magnification 500x, c) magnification 1500x, d) magnification 5000x, e) magnification 10000x, f) magnification 20000x

#### **4. PODSUMOWANIE**

Przedstawiona powyżej krótka analiza igieł gramofonowych jako czynnika dźwiękotwórczego jest tylko wstępem do szerszych działań badawczych na polu analizy jakości brzmienia. Badania te obejmują obserwację stopnia zużycia rowków płyt gramofonowych w kontekście używanej igły, jej kształtu, materiału, z którego jest wykonana oraz zaawansowania technologicznego samego procesu utrwalania dźwięku na płycie. Efekty pracy pozwolą na precyzyjne określenie zależności pomiędzy technicznymi walorami igły a jakością płyty winylowej oraz przełożeniu tych zależności na perfekcyjny dźwięk.

Gramofony i płyty winylowe na dobre powróciły do łask miłośników muzyki. Tym źródłem dźwięku interesują się nie tylko ludzie dojrzały, którzy wychowywali się słuchając płyt winylowych ale i ludzie bardzo młodzi, także studenci, dla których jest to coś egzotycznego i nowego zarazem. Artykuł jest częścią projektu PBL „Ocena zużycia trybologicznego igły i płyty gramofonowej podczas ich eksploatacji oraz wpływ środków czyszczących na własności fizyczne płyty gramofonowej” realizowanego w ramach VII konkursu PBL na Politechnice Śląskiej.

#### **LITERATURA**

1. <https://iviter.pl/technologie-i-spoleczenstwo/gramofon-berlinera-vs-fonograf-edisona-pierwsza-wojna-formatow>
2. <https://thevinylfactory.com/features/the-complete-guide-to-turntable-cartridges/>
3. <https://rms.pl/baza-wiedzy/965-typy-szlifow-we-wkladkach-gramofonowych-sferyczny-eliptyczny-liniowy>
4. [https://voiceshop.pl/pl/n/20?fbclid=IwAR1c5BfHkjQ6yWoucasiQ3\\_xmEhK9ZnfXRhnEXTPZxuHWGF-dmGy-OAbGGg](https://voiceshop.pl/pl/n/20?fbclid=IwAR1c5BfHkjQ6yWoucasiQ3_xmEhK9ZnfXRhnEXTPZxuHWGF-dmGy-OAbGGg)
5. <https://www.psychosonda.pl/artykuly/rodzaje-wkladek-gramofonowych>
6. <https://pl.wikipedia.org/wiki/Gramofon>
7. <https://www.hifi.pl/porady/gramofony-igly.php>

## Experimental research of the quality of products obtained in the advanced process of assembling supplies of upper shoes

P. Maidan <sup>a</sup>, O. Polishchuk <sup>b</sup>, M. Bonek <sup>c</sup>, V. Danylchuk <sup>d</sup>, V. Barabash <sup>e</sup>

<sup>a</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: gugenot@i.ua.

<sup>b</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: opolishchuk71@gmail.com.

<sup>c</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials, Gliwice, Poland email: mirosław.bonek@polsl.pl.

<sup>d</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: vsevoloddanylchuk@gmail.com.

<sup>e</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: bodybyvlad43@gmail.com

**Abstract:** The article presents an experimental check of the quality of the product obtained in the technological process of assembling the blanks of the upper of the shoe in a flat form, based on the study of the strength of the obtained thread seam. When conducting experimental studies, the quality of the obtained product was determined by the following indicators: the strength of the seam, the number of needle punctures per 1 cm of stitch. The study of the process was carried out on an experimental setup, which allowed to model the processes occurring during the operation of the product. Processing of the experimental data allowed to obtain the regression equation for determining the tensile load for threaded joints in different materials of the upper of the shoe. To obtain a natural equation, the values of the coded factor X were substituted into the equation and the function of the dependence of the breaking load on the thickness of the needle and the number of punctures with this needle per 1 cm of stitch was obtained. The obtained discrepancies between analytical calculations and research results are due to the inevitable error of the experiment, as well as some inconsistencies in the mathematical model, due to the provisions adopted in the analytical study for simplification.

**Keywords:** shoe upper blanks, seam strength, pallet.

### 1. INTRODUCTION

In the automated production of footwear, in today's light industry, there are many complex issues related to the choice of the necessary technological process of manufacturing the upper

part of the shoe (UPS) with frequent changes in models and sizes of finished products according to trade requirements.

It is well known [1] that the production of UPS by traditional fastening of parts on sewing machines can be realized in two ways: sequential, when each subsequent part is alternately joined to the previous and parallel-sequential, during which all parts are sewn together.

Obviously, the first scheme, as more universal, involves the manual execution of all ancillary operations and is therefore less productive, which significantly increases the cost of production. In contrast, the second, more productive, and also allows you to stably produce high quality products due to the localization of the human factor. Although it should be recognized that these benefits become apparent only in mass production. In addition, the use of the second scheme necessarily requires the availability of automated equipment equipped with special equipment (pallets), which makes its use inefficient in the production of small series and, accordingly, not very acceptable for small businesses. At the same time, at the present stage of development of the footwear industry, small businesses have become the most common organizational structures in the industry. This is due to the fact that this type of production is more dynamic in terms of changing the range and has a number of other marketing advantages.

The sequence of the advanced process of assembling UPS is as follows: all the details of the top and the lining are fixed in a universal pallet and then the berets together with the lining are connected to the binding and the lining.

## 2. FORMULATION OF THE PROBLEM

The problem of improving the quality of footwear, as one of the most important factors determining its competitiveness in domestic and foreign markets, is extremely acute. But the structure of restructuring and modern transformation of footwear production has led to the replacement of powerful industries have small enterprises with different forms of ownership, technical equipment which does not meet the requirements of standards for testing prototypes of footwear [2].

It is known [2] that non-compliance of products with standards is determined by three indicators:

- linear dimensions;
- strength of the sole;
- strength of fastening of details of top of footwear.

We will dwell in more detail on the strength of fastening the details of the shoe upper, ie on the compliance of thread seams with regulatory requirements. This problem has been studied more than once by leading scientists [3-7], so it is not necessary to justify its necessity.

The task of this work is to compare the strength of the threaded seam obtained as a result of improving the process of automated assembly of UPS with the normative value [8].

## 3. PRESENTING MAIN MATERIAL

Theoretically, the tensile load of the punctured material is determined by the following formula [9]:

$$P_1 = P \cdot (1 - \alpha \cdot d \cdot n), \quad (1)$$

where  $P$  – breaking load of non-punctured material, N;

$\alpha$  – skin weakening factor, for calf skin – 0,2-0,3; chevrette – 0,25-0,35; grasser skin – 0,35-0,4 [6];

$n$  – the number of punctures per 1 cm of stitch;

$d$  – needle diameter, m.

Experimental studies were conducted on the leather of shoe uppers (half-skins) DSTU 2726-94, flesh cuts GOST 1838-83 and vinyl synthetic skin TC 17-21-360-85 obtained by JSC "Vzutex", as those that are most common in the footwear industry [10].

The experiment is one-factor, the only factor is the number of needle punctures per 1 cm of stitch. Experiment planning and experimental research were conducted using the free software "OptimizationModel&PlanningExperiment-02.041" [11]. To obtain an accurate model (optimization parameter), the regression equation was used:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < l \leq k} b_{il} x_i x_l + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2, \quad (2)$$

where  $b_0, b_{il}, b_{ii}$  – regression coefficients;

$x_i, x_l$  – variable factors.

Three groups of samples of different materials, sixteen samples each, were prepared for the experiment. The experiment was performed on samples of 45x25 mm according to GOST 9290-76 "Shoes. The method of determining the strength of the threaded seams of the connection of the details of the top" [12]. The research was carried out on a RT-250M bursting machine, to improve the operation of which a strain gauge connected to the computer via an analog-to-digital converter was built into the working mechanism.

Siemens SIWAREX WL 260 strain gauge SP-S AA series is installed - force-measuring strain gages (DST), with adhesive foil strain gages connected in a bridge circuit, designed to work in force-measuring systems to measure static or slowly varying forces and/or stretching), fig. 1.



Fig. 1 – General view of the sensor Siemens SIWAREX WL 260 SP-S AA

The change in resistance is very small (usually less than 0.1 ohm at a nominal resistance of 100 ohms) and is comparable in magnitude to the change in temperature. Therefore, four load cells are usually attached to the load cell, two of which receive the load (deformed), and two, located at an angle of 90°, are unloaded.

The connection of such strain gauges in the Wheatstone bridge (Fig. 2) allows to obtain an output signal that depends only on the load and does not depend on temperature.

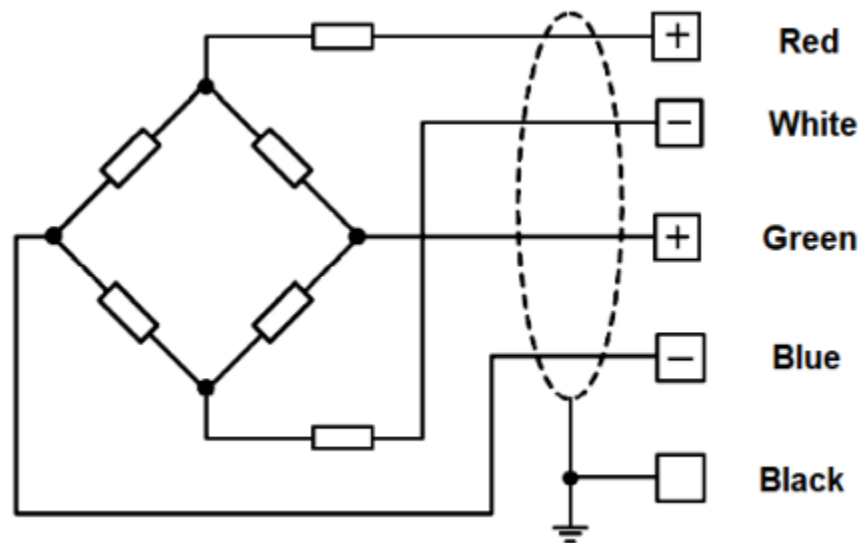


Fig. 2 – Wheatstone bridge connection diagram

When connecting strain gauges to the unified analog inputs of the controller, it is necessary to use an intermediate amplifier (Fig. 3).

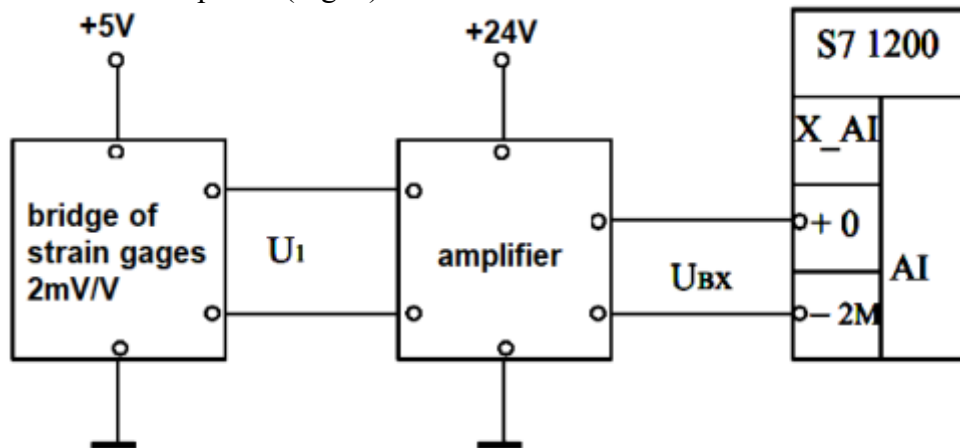


Fig. 3 – Electrical circuit of the intermediate amplifier

The measuring element is made of stainless steel, hermetically sealed and has a calibrated output signal. The weight sensor corresponds to IP68 degree of protection.

The signal obtained by bending the strain gauge is fed to the computer, where it was processed using Labview 8.5 (Fig. 4). Samples sewn in the middle, needle №100 (0.01 mm) with oval sharpening on the machine R718-01 company Siruba, thread 44-LH.

The block diagram, which will process the signal from the ADC in LabVIEW 8.5, consists of the input unit in ADC 1, program cycle 2, the element of multiplication of the input signal 3, the filter of the input signal 4, the element of the filtered signal before processing 5, signal subtraction element 6, digital zeroing controller 7, output signal multiplication element 8, digital calibration factor input controller 9, element numerical value of the output signal 10,

buttons to record values in table 11, reset tabular values 12, enable recording in file 13, save to another file 14, from the module for recording force values in file 15, data recording indicator in file 16, graphic output unit the output signal 17, table 18, the stop button 19 and the module for storing the values of the output signal in table 20.

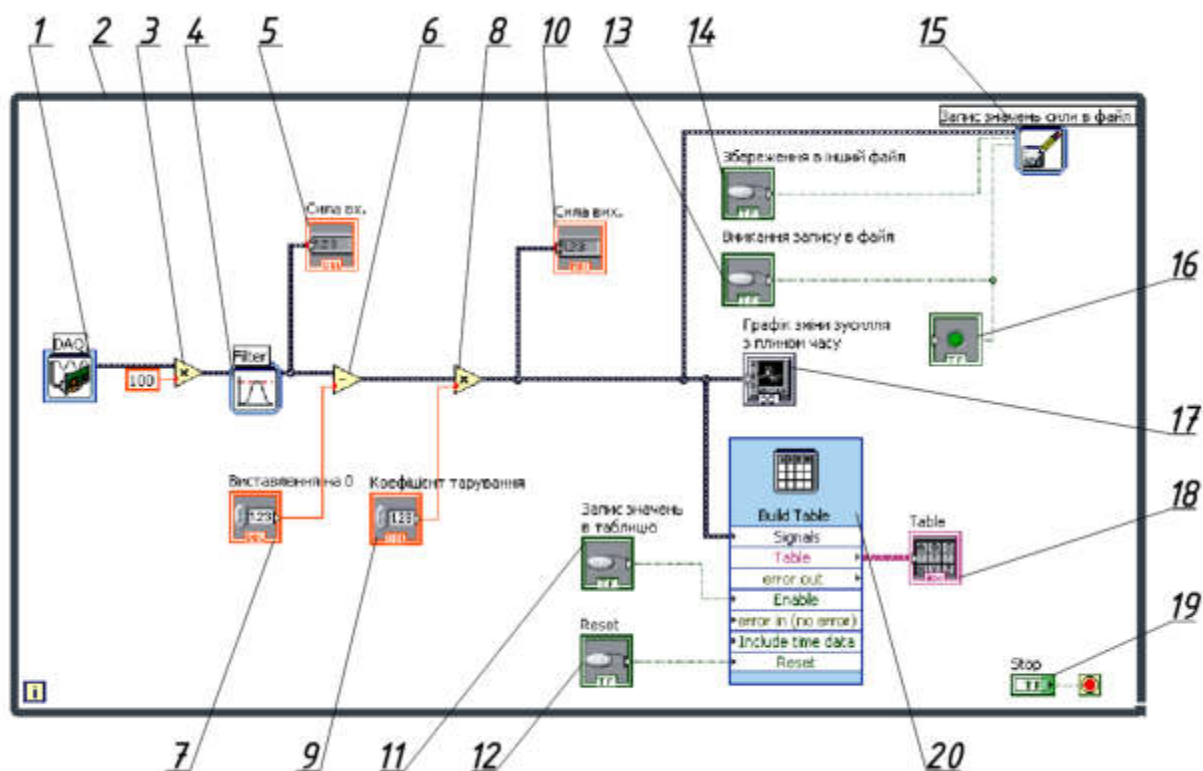


Fig. 4 – Block diagram of signal processing from the ADC in the program LabVIEW 8.5

#### 4. THE RESULT OF WORK

The research results are shown in the tables.

Table 1 – Numerical values of strength for the half-skin of leather material cattle skin DSTU 2726-94 with a single-row seam

| Stitch length, mm | Seam strength GOST 21463-87, N/cm | Experimental values of strength, N/cm | Theoretical strength calculations, N/cm | Experimental values of strength during pre-fixation of parts, N/cm |
|-------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|---|--|
| 1,5               | 90                                | 116,7                                 | 93,6                                    | 120  |
| 2                 | 90                                | 120                                   | 104,832                                 | 134,4  |
| 3                 | 90                                | 83,3                                  | 71,37                                   | 91,5   |
| 4                 | 90                                | 66,7                                  | 57,174                                  | 73,3   |

Table 2 – Numerical values of strength for the material flesh cut GOST 1838-83 with a single-row seam

| Stitch length, mm | Seam strength GOST 21463-87, N/cm | Experimental values of strength, N/cm | Theoretical strength calculations, N/cm | Experimental values of strength during pre-fixation of parts, N/cm |
|-------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|---|--|
| 1,5               | 75                                | 70,1                                  | 57,252                                  | 73,4   |
| 2                 | 75                                | 80                                    | 66,3                                    | 85   |
| 3                 | 75                                | 99,8                                  | 91,728                                  | 117,6  |
| 4                 | 75                                | 77,4                                  | 68,8                                    | 88,2   |

Table 3 – Numerical values of strength for the material of artificial leather (vinyl synthetic leather) TC 17-21-360-85 with a single-row seam

| Stitch length, mm | Seam strength GOST 21463-87, N/cm | Experimental values of strength, N/cm | Theoretical strength calculations, N/cm | Experimental values of strength during pre-fixation of parts, N/cm |
|-------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|---|--|
| 1,5               | 80                                | 75,6                                  | 61,152                                  | 78,4   |
| 2                 | 80                                | 84,3                                  | 68,324                                  | 87,6   |
| 3                 | 80                                | 87,8                                  | 69,75                                   | 89,43  |
| 4                 | 80                                | 77,1                                  | 60,863                                  | 78,03  |

Graphic interpretation of research results is given below in Fig. 5-7.

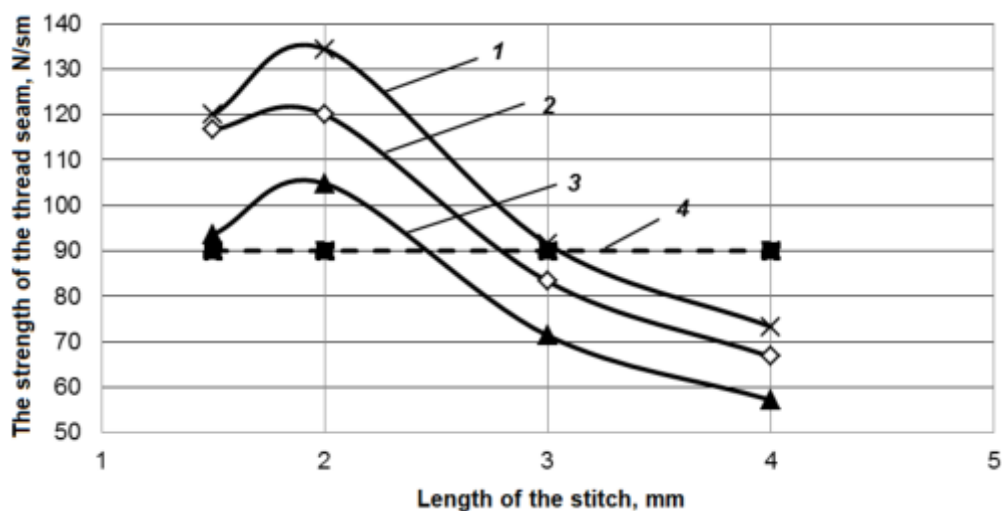


Fig. 5 – Graph of the dependence of the strength of the pierced material P on the length of the stitch for half-skin of cattle skin



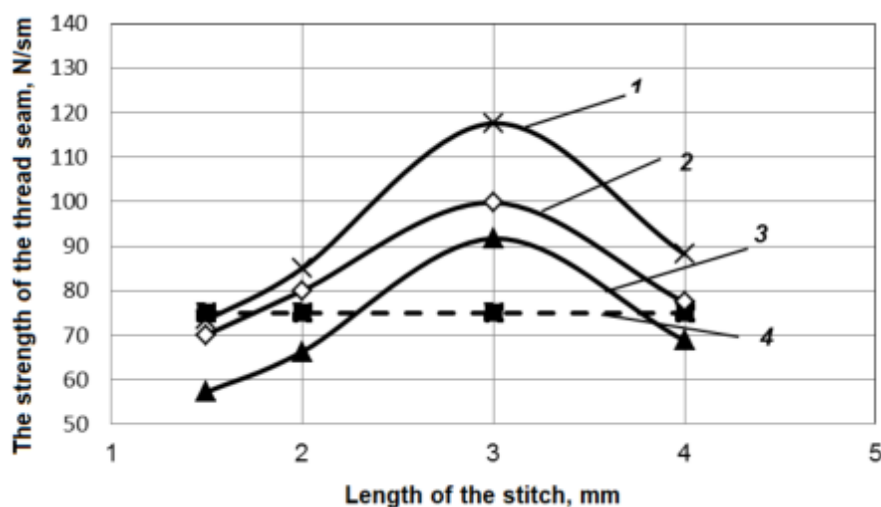


Fig. 6 – Graph of the dependence of the strength of the punctured material P on the length of the stitch for the material flesh cut

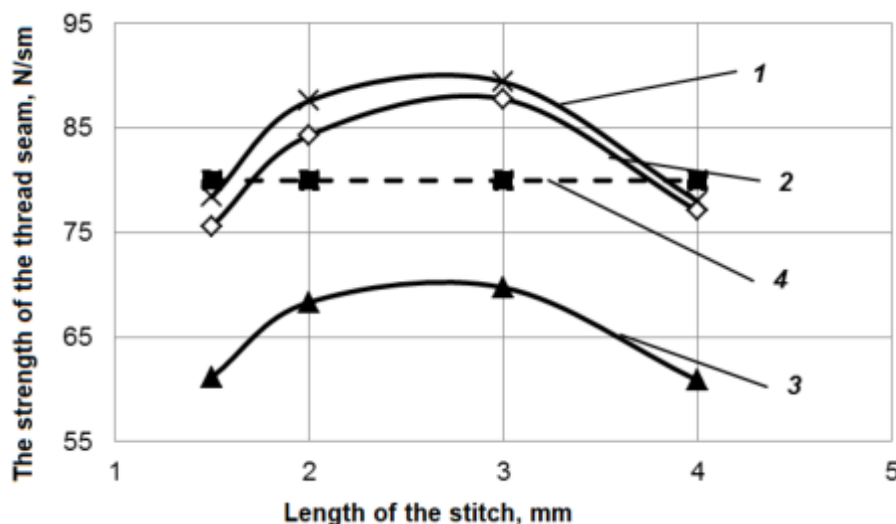


Fig. 7 – Graph of the dependence of the strength of the punctured material P on the stitch length for the material of artificial leather (vinyl synthetic leather)

Graphs 5-7 show a comparison of the results of experimental studies of the strength of a single-row weld for pre-fixed material in comparison with the normative values [13], calculated values and samples made in the usual way. The results show that in comparison with the samples made in the usual way, the strength increased by 10% for optimal stitch lengths. As the stitch length increased, the strength of the seam decreased and the specimens ruptured along the thread connection.

Experiments were performed for double-row seams with a stitch length of 2 mm.

For half-skin cattle received values  $P_{exc} = 133,36 H/cm$ , - normative  $P_{norm} = 115 H/cm$ .

For flesh cut  $P_{exc} = 103,33 H/cm$ , at normative  $P_{norm} = 85 H/cm$ .

For artificial leather  $P_{exc} = 98 H/cm$ ,  $P_{norm} = 90 H/cm$ .

For double-row joints, the strength increased by 8-13% compared to the normative values [13].

## 5. CONCLUSIONS

The quality of the product was assessed on the basis of the study of the strength of the seam obtained as a result of the improved assembly process. The research results showed that the strength of a single-row seam increased by approximately 10% for all types of material, for the optimal stitch length, double-row - in the range of 8-13%.

In turn, this will improve the quality of the product as a whole and increase the time of its possible operation.

## BIBLIOGRAPHY

1. Tonkovid L.A. Automation of assembly processes in shoe production / Tonkovid LA - K. : Technology, 1984. – 248 p.
2. T.M. Hrynevych Analysis of shoe test results for certification and ways to ensure its compliance with regulatory requirements / Hrynevych T.M., Stoyanov I.S. // Bulletin of the Podillya University of Technology. - 2003. – Pt. 1. № 5.– P. 52-57.
3. T.M. Hrynevych Prediction of strength of thread seams at fastening of details of top of footwear / Hrynevych T.M., Stoyanov I.S. // Bulletin of the Podillya University of Technology. – 2004. – № 2. – Pt 1. Vol. 1.– P. 233-238.
4. T.M. Hrynevych Algorithm for predicting the compliance of thread fastening of shoe uppers / Hrynevych T.M., Stoyanov I.S. // Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2005. – № 2. – Pt. 1. Vol. 2. – P. 80–83.
5. T.M. Hrynevych Experimental researches of process of weakening of top of footwear in the course of their thinning / Hrynevych T.M., Stoyanov I.S. // Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2006. – № 5. – P. 173–176.
6. T.M. Hrynevych Experimental studies of the process of weakening the upper of the shoe as a result of needle puncture / Hrynevych T.M., Stoyanov I.S. // Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2007. – № 3. – P. 255–259.
7. H.V. Horban Study of the effect of stiffness of shoe uppers on their weakening by needle punctures / Horban H.V., Stoyanov I.S. // Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2010. – № 2. – P. 237–240.
8. Shoemaker's Handbook / ed. D.S. Murvanidze. – [2nd ed. revised and extra]. – M. : Light industry, 1971. – Vol.1. – 390 p.
9. V.M. Tsvetkov Weakening of chrome leather materials with stitching / Tsvetkov V.M., Prilutskaya N.L. // Sat. Proceedings of TsNIIKP. – M. – L. : Gizlegprom. – 1935. – № 2.
10. The skin is always relevant - access mode to the article:  
<http://megasite.in.ua/110794-shkira-zavzhdi-aktualna.html>
11. Program for planning experimental research “OptimizationModel&PlanningExperiment-02.041” – Access mode:  
<http://mdop.sourceforge.net/>
12. Shoes. Method for determining the strength of thread seams for connecting upper parts : GOST 9290-76. – [Valid from 1977-07-01, expiration date removed]. – M. : IPK publishing house of standards, 1976. – 11 p.
13. Shoes. Strength standards : GOST 21463-87. – [Valid from 1989-01-01]. – M. : IPK publishing house of standards, 1987. – 12 p.

## The effects of different clay compositions and additives on injera baking pans' energy efficiency and impact resistance

Mengistu Jemberu Dagnaw<sup>a</sup>, Zbigniew Brytan<sup>b</sup>, Robsan Abebe Asefa<sup>c</sup>, Augustine Appiah<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, College of Engineering and Technology, Wollega University, Post Box No. 395, Nekemte, Ethiopia.

Email: mj9003783@student.polsl.pl / menjembe@gmail.com

<sup>b</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials.

Email: zbigniew.brytan@polsl.pl

<sup>c</sup> Department of Mechanical Engineering, College of Engineering and Technology, Wollega University, Post Box No. 395, Nekemte, Ethiopia.

Email: robyabebe12@gmail.com

<sup>d</sup> Laboratories of Materials Research, Faculty of Mechanical Engineering, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland.

Email: augustine.appiah@polsl.pl

**Abstract:** This research is aimed to develop and prepare an appropriate clay composition and additive for an energy efficient and impact resistant baking pan. An investigation was carried out to measure energy efficiency and impact-resistant baking pan formulations. Raw clay material samples were characterized by atomic absorption spectroscopy (AAS) and X-ray diffraction spectroscopy (XRD). The blended samples were tested for various properties, such as apparent porosity, cold crush strength, linear shrinkage, specific heat capacity, and conductivity. The blended samples show significantly improved thermal conductivity and strength compared to the pure samples. The results indicated that 10% of the bentonite additives have significantly improved mechanical strength and increased thermal conductivity by a factor of 2.5.

**Keywords:** Clay baking pan, thermal conductivity, mechanical strength, clay additives.

### 1. INTRODUCTION

Ethiopia has a long history of using traditional pottery for Injera baking, cooking, and making coffee. Pottery is the recommended and most suitable ingredient for cooking foods, as cooked foods are uniquely tastier than the preparation of other ingredients. The reason may be the mineral nature of clay, which can give the food a special taste, and the slow heating effect of the clay material. Clay and sand are traditionally mixed by hand. The mitad or baking pan is

not fitted with the proper template, resulting in uneven clay slabs. Another important topic is clay plate firing, which traditionally uses outdoor fire, which wastes a lot of energy. Mitad's electric heating design that is in use today dates back to the 1960s when Injera's electric baking began among high-income groups [1]. Ethiopian baking food is a traditional three-stone oven with 5% to 15% efficiency. The large amount of firewood used leads to deforestation, global warming, and polluted household air. To optimize Mitad's energy efficiency and baking quality, we conducted research and design experiments were conducted and introduced a new baking plate that gives more advantages of fuel efficiency. This result emphasizes that the energy efficiency of the Mitad is significantly higher than that of the electric Clay Mitads (up to 45% higher [2]). The author [3] developed a multi-fuel injera mitad suitable for energy-saving and relatively clean stoves in combination with biomass. The results emphasize the lower heat capacity of the metal compared to clay and the influence of the distinctive appearance of injera. Solar heat research and development for household energy consumption are well-developed and adopted. A prototype of direct steam baking was developed and tested. Experiments with these results have shown the potential and sustainability of solar energy for injera baking by including latent heat storage [4]. The author [5] attempts to design and optimize an improved biogas injera burner to compensate for the heat circulation throughout the baking pan. Baking the injera using the old-style three-stone oven method consumes a large amount of firewood (95% of the Ethiopian population still relies on traditional biomass fuels for cooking), and vigilance in various places. It leads to deforestation and global warming pollution [6]. The author [7] examines the conversion of urban energy and the introduction of new technologies as a way to relieve pressure on the city centre. The authors' findings will facilitate the use of electricity and the "mitad" assumption of electricity and the energy conversion of cities by raising the level of education and household income. This research has a 5 to 15% efficiency by using old-style clay stoves [8]. The experimental examination was performed to analyze and to prove the efficiency and performance characteristics of electric baking pans. Experiments and data processing were conducted to investigate ways to improve energy consumption costs and baking pan performance. Thermophysical properties were experimentally determined before, during and after combustion of the product [9]. The power consumption of the existing Electric Mitad (3.56 kW per stove) is estimated to consume about 60-70% of Ethiopia's hydroelectric network. The current load of daily baking matches the maximum load requirements, which overloads the distribution system [10]. New approaches have been investigated to make clay metals with excellent mechanical strength and energy efficiency from Ethiopian clay resources. In [11], the Ethiopian Energy Agency reported on the energy efficiency standards and labeling of the Electric injera mitad, discussing challenges and prospects. The traditional Mitad, Injera Baking, has taken more electricity. The stove is easy to use, with only three stones to put the pot on, and firewood is placed in the space between the stones. The furnace clearly has a high heat loss due to radiation and convection. According to the GIZ test report, it has a thermal efficiency of 9% to 17% depending on the application [12]. This study aims to investigate the effectiveness of the proposed system, which can also be used to bake bread and Indian chapatti. A new ceramic baking pan is made and used to bake injera. Preliminary studies of laboratory models show promising results from the proposed system [13]. In this article, the author [14] introduced a new technology that allows the bake of injera in an indirect solar cooker. K Type thermocouples are used to record temperature with 2.54 m<sup>2</sup> opening area of the parabolic dish used, coiled stainless steel heat exchanger, 10mm well-insulated stainless steel pipe, 3 gate valves and pressure relief valve. The finite difference approach is developed using MATLAB software to measure heat transfer [15]. Finally, the

researcher [16] proposed a break-even analysis of semiautomatic Injera machines. The analysis is based primarily on demographic variables such as residence, educational status, and availability of technology. The results show that the types of energy sources and preferences for energy technologies at the household level are highly dependent on the level of education of homeowners and the type of home they live in. 76.3%, 34.1%, and 22.5% of households living in condominiums, their own apartments, and rental housing use electricity to bake Injera. For instance, 76.3%, 34.1%, and 22.5% of households living in the condominium, own apartments, and rented houses, respectively, use electricity for Injera baking [17]. The current advanced injera backing pan usage, 34% of performance improvement, 48% and 50% of reduction of heating time and energy consumption [18]. The heat loss of the components of the biomass gasifier was calculated and it was found that the baking pan was responsible for 21% of the total heat loss [19]. The average thermal efficiencies of Mitad's improved and traditional electric baking are 87.51% and 52.91%, respectively [20]. Solar heat, gasification, and biogas as potential research areas in the future will contribute significantly to improving the health of people exposed to indoor air pollution [21].

## **2. MATERIALS AND METHODS**

### **2.1. Raw materials**

The raw material used for this work is native clay, brick clay; bentonite clay; kaolin clay; quartz; dolomite; feldspar; experimental supplies used were 200 mesh sieve. VWR hot plate, model DYLATHER M940007, Aluminium calorimeter; beakers; bucket; water; heat insulator; solid block; and hand-made pressing tool for experimentation purpose.

### **2.2. Instruments used**

The instruments used in this work were, RIGAKU X-ray diffractometer, model MiniFlex 300/600, Japan instrument; Atomic Absorption Spectroscopy, model Varian SpectrAA20 Plus, Japan instrument; Naberthem muffle furnace, model B103isoB150, German instrument; Thermocouple, model J-type, Iron vs Constantan (-200 °C to +1200 °C), sensitivity is 50 to 60 $\mu$ V/°C; Thermometer, model THL210050T, minimum and maximum reading (-10-110 °C), England instrument; mass balance, model KERN EMB 2000-2, with maximum capacity 2000 g and precision limit of 0.001g; triple beam balance, model KERN ABJ220-4NM, maximum capacity 220 g and a minimum of 10mg with a precision limit of 0.1mg; Caver hydraulic pressing machine; Voltmeter; and Stopwatch.

### **2.3. Material preparation procedure**

#### **2.3.1. Winning**

Collecting clay materials is called mining. The basic extraction methods available to extract clay are mechanical extraction and hand-digging. Due to the simplicity of the process and the associated low cost, this work was performed manually. Other clay and non-clay additives are from the Ethiopian Geological Survey collection.

#### **2.3.2. Clay Processing**

The production and purification process of all individual clay samples from bulk raw materials is based on a mechanical method by liquid phase synthesis, which is useful for producing homogeneous fine clay powders, co-precipitation process and hydrothermal synthesis.

### 2.3.3. Particle size analysis

Finely ground clay sample powder has a minimum particle size. Its dimensions are in the nanometre range. It is the measured sieve size, so the cumulative particle size is within about 0.02 to 75 $\mu$ m.

### 2.3.4. Phase and chemical Analysis

The prepared sample is administered at the XRD machine according to the DIFFRAC plus software package instructions. When the measurement is completed, the machine shows a peak pattern with  $2\theta$  versus intensity on the computer screen. The minerals had been analysed using AAS; Air acetylene flame was used for the analysis of each metal except Si and Al which required a nitrous oxide flame instead at a flame temperature of 22500 °C. The machine automatically controlled the fuel-oxidant gas ratio and deionized water was used as the blank. The result obtained in PPM was converted into percentage oxide [22].

### 2.3.4.5. Sintering process

The clay samples produced were mechanically activated by a sintering process. The compressed sample was transferred to a Naberthem muffle furnace and sintered for 2 hours at a heating rate of 8.3°C/min and an immersion time of 2 hours at 1000 °C.

Several researchers [23] prove that the physical property has gained good performance at the maximum sintering temperature, rather than at the lowest sintering temperature. Using this idea, the maximum sintering temperature selected for this work was 1000 °C. The pan sample was then cooled immediately after baking in the oven at 1°C / min to avoid sudden cracks. Cooling rates were achieved in Naberthem's muffle furnace to avoid sudden cooling, which could cause the sample to crack after firing.

## 3. CHARACTERIZATION OF SAMPLES

### 3.1. Linear Shrinkage Test

The prepared samples were measured by the amount of linear shrinkage to imply the amount of dimensional distortion of the sample during firing [24].

$$L_s = (D_1 - D_2) / D_1 \times 100\% \quad (1)$$

where,

LS = firing linear shrinkage, D1 = dried diameter in m, D2 = fired diameter in m

### 3.2. Apparent Porosity Test

The clay sample was suspended in distilled water for 30 minutes to sink and fill the water into apparent porosity of samples and weighed as weight W and recorded [25].

$$AP = (M - M_2) / (W - S) \times 100 \quad (2)$$

where: AP = apparent porosity in %,

W = Suspended weight in g;

M2 = sintered weight in g;

S = Soaked weight in g.

### 3.3. The cold crushing strength test

The weight pressure at which the crack was discovered on the clay sample was detected and the cold crushing strength was calculated as [26].

$$AP = (\text{Force(KN)}) / (\pi d r)^2 / 4 (m^2) \times 100 \quad (3)$$

Table 1. Chemical composition of clay material samples

| Composition                    | Native clay (%) | Brick clay (%) | Kaolin clay (%) | Bentonite clay (%) | Feldspar (%) | Dolomite (%) | Quartz (%) |
|--------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|--------------------|--------------|--------------|------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 85.06           | 82.70          | 47.7            | 61.93              | 65.7         | -            | 99.5       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.31            | 6.06           | 35              | 11.06              | 16.9         | -            | -          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.94            | 2.80           | 0.84            | 6.76               | 0.17         | -            | -          |
| CaO                            | 1.00            | <0.01          | 0.16            | 1.03               | 0.5          | 4.33         | -          |
| MgO                            | 0.42            | 0.20           | 0.10            | 2.56               | 0.7          | 40           | -          |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.18            | <0.01          | 0.47            | 1.68               | 2.0          | -            | -          |
| K <sub>2</sub> O               | 0.12            | <0.01          | 1.28            | 1.27               | 11.9         | -            | -          |
| MnO                            | 0.02            | 0.06           | 0.84            | 0.1                | -            | -            | -          |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.04            | 0.50           | 0.05            | 1.06               | -            | -            | -          |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.03            | 0.07           | 0.17            | ND                 | -            | -            | -          |
| H <sub>2</sub> O               | 1.06            | 1.26           | 0.84            | ND                 | -            | -            | -          |
| LOI                            | 3.80            | 4.94           | 13.60           | ND                 | 0.7          | -            | -          |

### 3.4. Specific Heat Capacity Test

It is the heat Q required to raise the temperature of the the mass of material by 1 degree is the heat capacity per unit mass of a substance [27].

$$c = \Delta Q / m \Delta T \quad (4)$$

### 3.5. Thermal Conductivity Test

From the experiment, all required parameters and thermal conductivity have been analysed [28].

$$k = \Delta Q / \Delta t \quad 1/A \quad x / \Delta T \quad (5)$$

## 4. RESULTS AND DISCUSSION

From Table 1, it is observed that high silica is present in 85.06% native clay and 82.70% brick clay. This proportion of silica (SiO<sub>2</sub>) present in clay is very important for thermal properties. High-silica samples have high thermal conductivity, which makes them inherently suitable for the manufacture of cookware. Aluminium oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) is present in minimal amounts, 5.31% in native clay and 6.06% in brick clay. Alumina is important in the manufacture of ceramics and bricks because it can produce molten metal when the pot is fired, increasing the strength of the product.

### 4.1. Qualitative XRD analysis

Phases with the same chemical composition can have very different diffraction patterns. This is because the diffraction peak is the fingerprint of each element. Use the position and relative intensity of the set of peaks to compare the experimental data with the reference patterns in the database. You can use the diffraction peak position to calculate the dimensions of the unit cell.

In Figure 1, the dimensions of the unit cell can be correlated with the interatomic distance. Any changes between atomic distances, such as temperature, substitution doping, and stress, are reflected in the change in the maximum position [29]

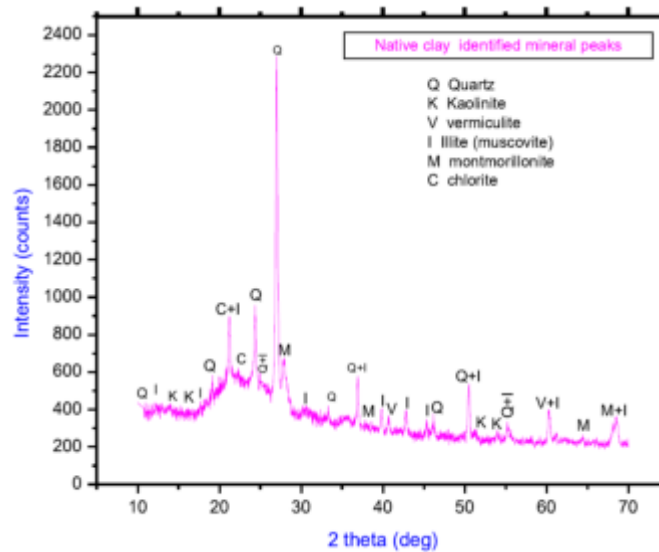


Figure 1. Native clay and brick clay

Thus, Figure 2 shows that clay deposits are known to be used in the production of both ceramics and bricks using XRD data analysis [30], with approximately the same diffraction peaks and is therefore very uneven. Individual components include kaolinite, montmorillonite, illite, chlorite and accompanying minerals such as clay-like feldspar, quartz, iron oxide and hydroxides, calcite and clay-like minerals found in organic substances. It can be identified as a typical ingredient.

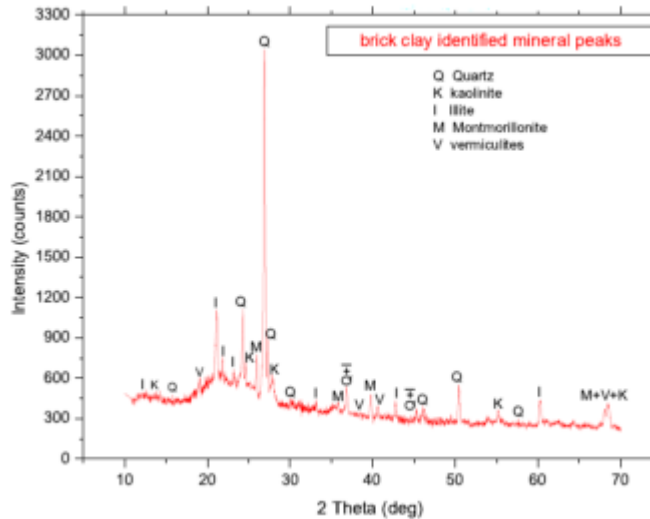


Figure 2. X-Ray diffraction data analysis

The figure above shows that the addition of 1% to 10% kaolin clay, feldspar, and quartz results in a very linear reduction in shrinkage compared to pure natural samples. These additives act as fluxing and sintering aids and are clay bodies during firing due to the formation of crystalline phases. During vitrification, they fill the space of the crystal size of the host clay or the additive matrix does not affect the sintering temperature. However, for samples containing a mixture of bentonite and dolomite, there is linear or (severe) shrinkage during firing, but no crack of the sample during the drying and firing process. The reason for bentonite



is that it has a very high cation exchange capacity and contains many organic ions that are vitrified below the sintering temperature, which can distort the diameter and thickness of the material. In addition, bentonite has more metal ions that contribute to the surface tension that attracts the matrix, or the bond network is higher, so the body of the material eventually shrinks. However, it has a highly compressed microstructure since then, improving its mechanical strength. The reason for the dolomite may be the sintering temperature of the decomposition, the chemical reaction, and the binding of all the components in the mixture.

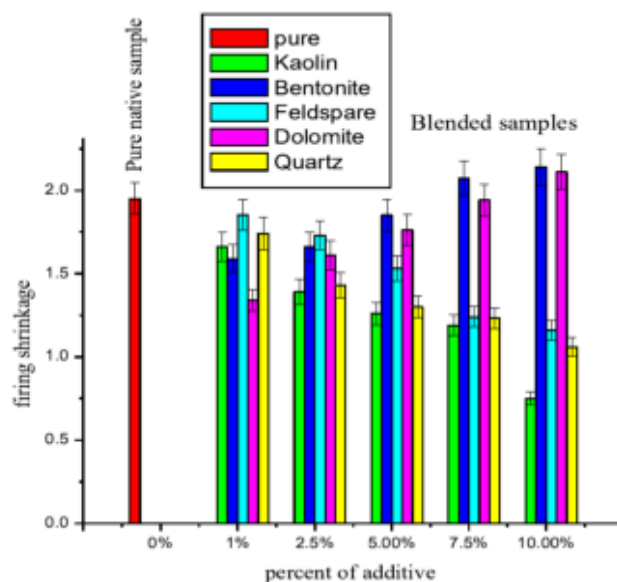


Figure 3. Firing shrinkage of Native clay samples at varied additive composition

Figure 3 and 4, shows that by addition of kaolin clay, feldspar and quartz from 1% to 10%, the shrinkage value highly decreases linearly when compared to the pure native sample, the reason is that these additive works as fluxing and sintering aids in the consolidation mechanism of the clay body during firing based on the formation of crystalline phases. They fill spaces of the host clay crystal size during vitrification, or the additive matrix is not affected by the sintering temperature. However, the bentonite and dolomite blended samples experience an increase in firing shrinkage linearly or (highly shrank), but show any crack in all samples during the drying and firing process. The reason for bentonite could be that the cation exchange capacity is very high, and it contains more organic ions that vitrified below the sintering temperature, resulting in distortional diameter and thickness of the material. Also, bentonite has more metallic ions contributing surface tension that pull the matrix together or bonding networks that are higher, so finally shrank the material body. However, it has had a highly compacted microstructure since then and improves mechanical strength. The reason for dolomite could be its sintering temperature of decomposition, chemical reaction, and bonding of all constituent elements in the blend.

Figure 5 and Figure 6 shows that, porosity is reduced. This porosity reduction is achieved by preparing ball-milled fine powder particles, pressing the device and sintering temperature. These things facilitate surface tension that pulls the solid particles together, giving the densification of the clay body. An improvement in porosity reduction is needed for both mechanical and thermal properties. This improvement in porosity reduction was due to iron oxide, alumina, and silica content, which forms a high bonding network through the matrix during firing.

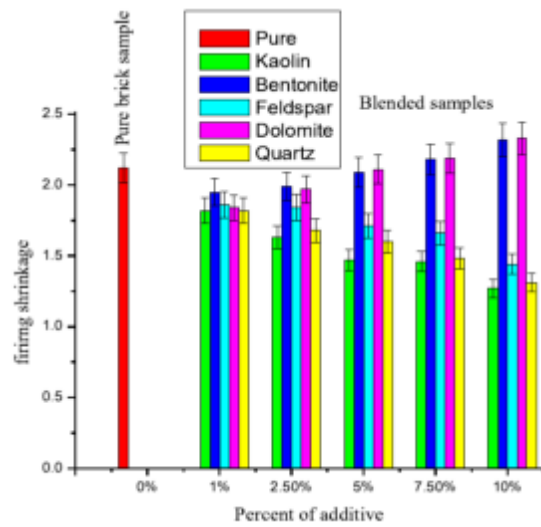


Figure 4. Firing shrinkage of brick clay samples at varied additive composition

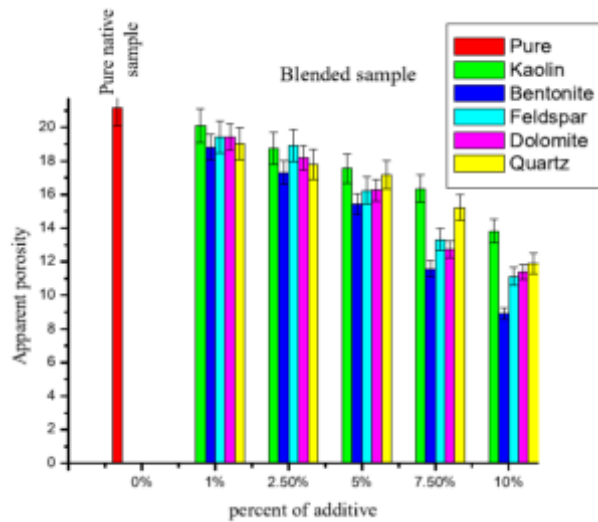


Figure 5. Porosity of Native clay samples in varied additive composition

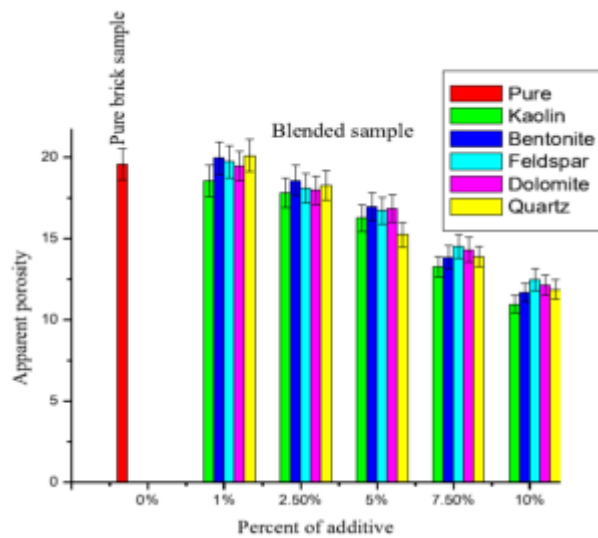


Figure 6. Porosity of brick clay samples at varied additive composition

Figures 7 and 8 shows that all the blended samples experience an increasing mechanical strength. This strength improvement comes from the individual elements of the additive and clay mineral composition. Both the clay minerals and the additive provide strong interatomic bonding force through the formation of the the crystalline phase of mullet during firing. The additives modify the reactivity of the clay minerals and lead to the formation of a mullite matrix. Based on Matrix Reinforcement Hypothesis, the difference in thermal expansion coefficients between the matrix and dispersed particles (such as quartz, feldspar, and dolomite) or crystalline phases formed during firing (such as mullite and cristobalite) produce strong compressive stresses on the glassy phase. Such induced "thermal" compressive stresses due to thermal expansion mismatch led to strength improvement [31]. The size of the clay powder contributed to the mechanical strength of the clay product because the smaller the particle sizes, the more the bonding of the structural clay. Porosity reduction and densification helps to have strong mechanical property. Higher cold crushing strength means that it can withstand handling, transportation, impact load, and abrasion more than the pure clay samples.

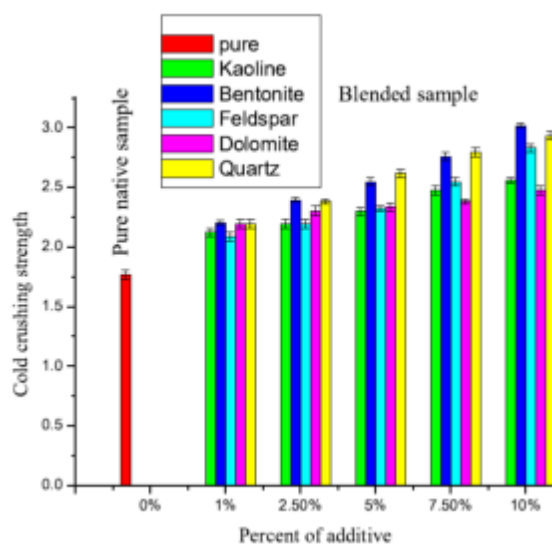


Figure 7. Cold crushing strength of native clay samples in varied additive composition

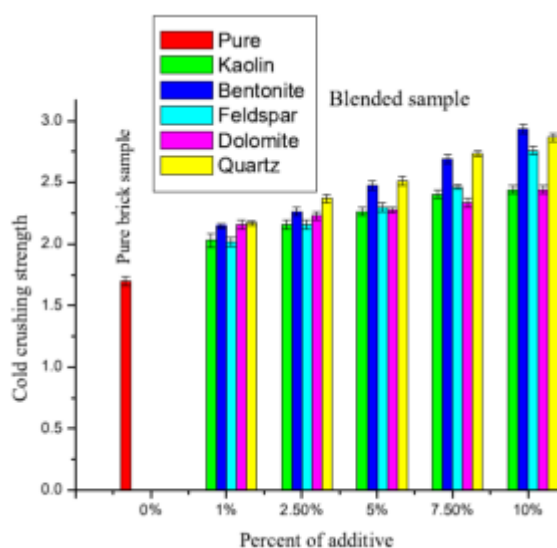


Figure 8. Cold crushing strength of brick clay samples at varied additive composition

Figures 9 and 10 show that thermal conductive of all samples are linearly increasing at varied additive composition. Since these new blended clay samples have mixed (ionically and covalently) bond materials, they exhibit moderate conductivities. Covalently bonded solids tend to have higher thermal conductivities compared to ionically bonded solids. Here, both bonds work together and give efficient thermal conductivity. Porosity reduction and densification helps the samples have good thermal conductivity property. The incorporation of highly thermally conductive minerals such as quartz, feldspar, dolomite, bentonite, and kaolin contributes to the thermal conductivity of the material.

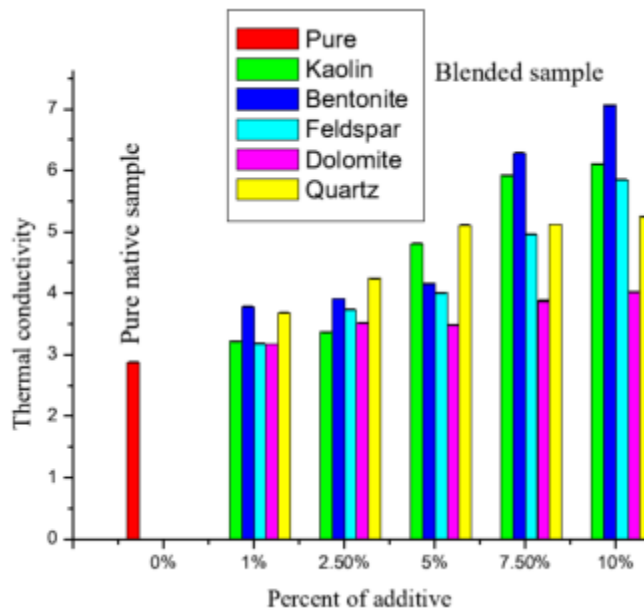


Figure 9. Thermal conductivity of Native clay samples at varied additive composition

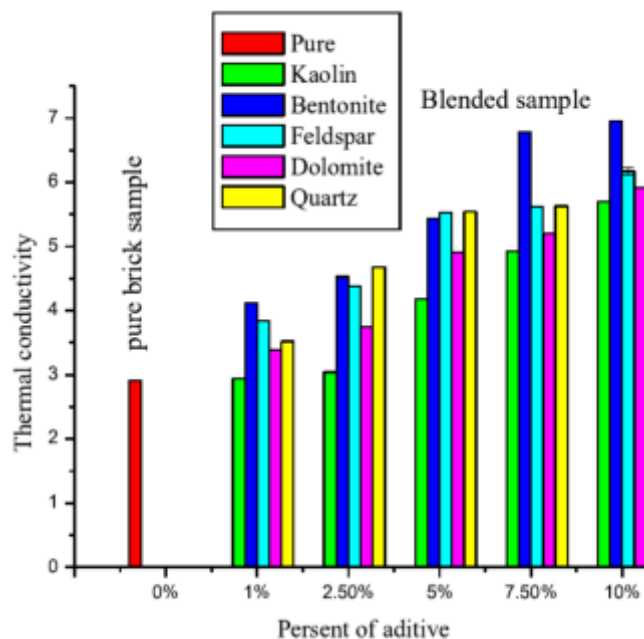


Figure 10. Thermal conductivity of brick clay samples at varied additive composition

## 5. CONCLUSION

This work investigates various clay composites used in Injera's baking molds to improve the thermal conductivity and mechanical strength of existing Mitad. Non-clay minerals (quartz, feldspar, and dolomite) were individually mixed with natural clay and brick clay and tested for improved thermal conductivity and mechanical strength. 10% of bentonite additives have significantly improved mechanical strength. Furthermore, 10% of the bentonite additive increased thermal conductivity by a factor of 2.5. The observed improvements in thermal conductivity and mechanical strength were due to the additive's higher metal oxide composition compared to that of natural clay. Some additives have improved the thermal conductivity and mechanical strength of clay pots, but they cannot replace clay for making bakeware from pure kaolin. Additionally, pure bentonite clay cracks, kaolin destroys burning, and bentonite cracks during the drying process. Improving thermal conductivity can affect the reduction of power consumption when baking Injera. Maintenance costs have also been reduced due to improved mechanical strength. In this new clay composite Injera baking pan, the quality of the baked Injera is expected to be acceptable to users, as the clay composition contains a variety of additional minerals that process and flavor the Injera.

## Acknowledgments

The authors would like to thank the faculties working in Materials Science and Engineering Department, Jimma University, Jimma, Ethiopia for providing support to complete the research. The authors confirm that no funding was received to carry out this study.

## BIBLIOGRAPHY

1. Ethiopian Energy Authority, Energy Efficiency Standards and Labeling. DANAS Electrical Engineering, 27-30 (2015).
2. R. Jones, J.C Diehl, L. Simons, M. Verwaal, The development of an energy efficient electric Mitad for baking injera in Ethiopia, International Conference on the domestic use of Energy (DUE), IEEE. 75-82(2017).
3. K. Pütz, J. Müller, Development of a multi fuel Mitad as stove extension for Injera Baking in Ethiopia, Development on the Margin, Tropentag. 5-7, 1-2 (2011).
4. AH. Tesfay, MB. Kahsay, OJ. Nydal, Solar Powered Heat Storage for Injera Baking in Ethiopia, Energy Procedia. 57, 1603-1612 (2014).
5. B. Mulugeta, S. Demissie, W. Nega, D. T, Design, optimization and CFD simulation of improved biogas burner for Injera baking in Ethiopia, International Journal of Engineering Research & Technology. 6 (1), 58-64 (2017).
6. M. Mengistu, G. Simane, B. Eshete, G. Workneh, T. S, Factors affecting households' decisions in biogas technology adoption, the case of Ofla and Mecha Districts, northern Ethiopia, Renewable Energy. 93 ,215-227(2016).
7. Z. Gebreegziabher, A. Mekonnen, M. Kassie, G. Köhlin, Urban energy transition and technology adoption: The case of Tigray, northern Ethiopia, Energy Economics. 34 (2), 410-418(2012).
8. Y. Alem, S. Hassen, G. Köhlin, Adoption and disadoption of electric cookstoves in urban Ethiopia: Evidence from panel data, Resource and Energy Economics. 38, 110-124(2014).
9. Tekele, Experimental investigation on performance characteristics and efficiency of electric injera baking pans ('Mitad')", PhD diss, Addis Ababa University (2012).
10. D. Sood, Injera Electric Baking: Energy Use Impacts in Addis Ababa Ethiopia, W.B.A. Region, World Bank Africa Region, Washington (2010).

11. G. Moges, Electric Injera Mitad Energy Efficiency Standards & Labelling, challenges and prospects, In Vienna Energy Forum. p. 35(2017).
12. N. Ejigu, A, Energy modelling in residential houses: A case study of single-family houses in Bahir Dar city, Ethiopia, Master of Science Thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management (2016).
13. AA. Hassen, DA. Amibe, OJ. Nydal, Performance investigation of solar powered Injera Baking oven for indoor cooking, In ISES solar world congress proceedings, Kassel, Germany. 186-196 (2011).
14. Tesfay, H. Kahsay, MB, OJ. Nydal, Design and development of solar thermal Injera baking: steam based direct baking, Energy Procedia. 57, 2946-2955(2014).
15. D. Goytom, Finite Difference Modelling of Solar Thermal Powered Injera Baking Oven, International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology. 3 (12), 2016.
16. AY. Ali, Design and Development of Semi-Automatic Injera Making Machine for Family Households in Ethiopia, Int. Res. Jour. of Eng. and Tech. 05 (10), 1465-1474 (2018).
17. MZ. Getie, M. Degefa, Assessment of trend and determinant factors for household energy utilization choice in urban areas of Ethiopia: Case of eastern Amhara, Journal of Energy Management and Technology. 4(1), 67-74 (2020).
18. D. Feleke Fanta, V. H Oquiño, Design and development of Electromagnetic Induction Injera Mitad (2019)
19. KD. Adem, DA. Ambie, MP. Arnavat, UB. Henriksen, J. Ahrenfeldt, T. P, Thomsen, first injera baking biomass gasifier stove to reduce indoor air pollution, and fuel use, Aims Energy. 7 (2), 227-245(2019).
20. B. Hiwot, Investigating the Performance Improvement of an Electric Injera Baking Mitad Using Copper Powder as Additive Material, PhD diss., ASTU, Ethiopia (2020).
21. M. Tadesse, The Developmental Patterns of Injera Baking Stoves: Review on the Efficiency, and Energy Consumption in Ethiopia, Int. Journal of Mech. Eng. 7 1), 7-16 (2020).
22. D C. Nwosu, CN. Ejikeme, P, E.M Ejikeme, Physio-Chemical Characterization of 'NGWO' White Clay for Industrial Use, Int J Multi Sci Eng. 4 (3), 11-14 (2013).
23. J. A Amkpa, A.E Aye, FE Omagu, Mechanical and physicochemical evaluation of alkali fireclay for refractory application, Trajectoria (Nauki= Path of Science. 3 (4), (2017).
24. N.J McKenzie, D.J Jacquier, AJ. Ringrose-Voase, A rapid method for estimating soil shrinkage, Soil Research. 32 (5), 931-938 (1994).
25. J. Hoppe Filho, C.S Rodrigues, L.S.O Ribeiro, P, MHF. Medeiros, Evaluation of sample drying methods to determine the apparent porosity and estimation of degree of hydration of Portland cement pastes, Journal of Building Pathology and Rehabilitation. 6 (1), 1-11 (2021).
26. J. Czechowski, A. Gerle, J. Podwórny, and E. Dahlem, Investigation of the testing parameters influencing the cold crushing strength testing results of refractory materials, Refract. World forum. 7, 105-112 (2015).
27. W. Guo, CJ. Lim, X. Bi, S. Sokhansanj, and S. Melin, Determination of effective thermal conductivity and specific heat capacity of wood pellets, Fuel. 103, 347-355 (2013).
28. K H. Kim, S E. Jeon, J K. Kim, and S. Yang, An experimental study on thermal conductivity of concrete, Cement and concrete research. 33 (3), 363-371(2003).
29. F. Hubert, L. Caner, A. Meunier, and B. Lanson, Advances in characterization of the soil clay mineralogy using X-ray diffraction: from decomposition to profile fitting, European Journal of Soil Science. 60, 1093-1105 (2009).
30. O, Gencel, Characteristics of fired clay bricks with pumice additive, Energy and Buildings. 102, 217-224 (2015).
31. WM. Carty, and U. Senapati, Porcelain-Raw Materials, Processing, Phase Evolution, and Mechanical Behaviour, J. Am. Ceram. Soc. 81 (1), 3- 20(1998).

## The Investigation of Usability of XLPE Wastes in Cable Filler Layer

C. Meran <sup>1</sup>, Ö. Eren <sup>2</sup>, M. Altin <sup>3</sup>, H.E. Kibar <sup>3</sup>, B. Aydemir <sup>3</sup>

<sup>1</sup>Pamukkale University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Denizli, Turkey, cmeran@pau.edu.tr

<sup>2</sup>Nexans Turkey Industry, R&D Center, Denizli, Turkey

<sup>3</sup>Student, Pamukkale University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Denizli, Turkey

**Abstract:** In this study, the usability of cross-linked polyethylene (XLPE) wastes formed during cable production in the cable filling layer was investigated. XLPE and bedding compound (BD) were mixed in different ratios and the tape was removed in the laboratory-type extruder. Using the sample preparation press, spoon samples were obtained from the mixtures in different ratios and the bands consisted entirely of BD material. Tensile tests of each spoon were carried out on a tensile machine. As a result of the tensile test, the mechanical properties of the spoons were examined and compared.

**Keywords:** Cable Filler, XLPE, Recycle, Extruder

### 1. Introduction

Today, there are studies carried out for the recycling and reuse of plastic waste in production. The issue of recycling is gaining more and more importance day by day. XLPE, which is a cross-linked polyethylene material, is among the materials with a high usage rate in cable production. The XLPE material used in cable production also generates a large amount of XLPE waste during the process. The resulting XLPE waste creates problems such as storage. Generally, this waste is stored for disposal. In some countries, it is disposed of by incineration. Within the scope of this study, it covers the investigation of the recycling of XLPE wastes to be used in the cable filling layer, by examining and conducting experiments.

### 2. XLPE and Cable Filler

XLPE is included in the thermoset material types. XLPE material is produced from pure polyethylene by applying various methods. The different chains of polyethylene linked together have crosslinks that help prevent it from melting and separating at high temperatures. It is in the group of non-recyclable materials because it has cross-links in its structure. However, research and studies carried out to recycle the XLPE product. Within the scope of this study, cable wastes consisting of XLPE are discussed. After XLPE was broken at micron scales, it

was mixed with filler additive at certain rates. The resulting mixture was used in the production of cable filling, and the recycling of XLPE wastes with this method was studied. Cross-linked polyethylene has many advantages over polymer types. Cross-linked polyethylene is stronger than other polyethylenes due to its bond structure. Cross-linked polyethylene is not easily affected by extreme temperatures compared to non-cross-linked polyethylene and is thermally stable [1]. The most widely used cross-linking method is cross-linking by silane grafting. This method is divided into two a one-stage method and a two-stage method. The difference between these two methods is that in a single-stage inoculation in the production line, in a two-stage the cable is inoculated during pre-production compound production.

Cable filler is the material that surrounds the conductors and is used in multi-core cables to shape the internal structure of the cable. The reason why it is widely used is to give a shape. When looking at the cables, they are generally circular in shape. Cable fillers also provide flexibility to the cables. Cable fillings can be shaped according to customer requests and needs. While fillers are required for some cables, not all types of cables contain fillers. When manufacturing cable, it is important to determine the purpose and function of the cable in order to evaluate whether padding is required and, if so, what material should be used. The main points that companies pay attention to in cable production are proficiency, safety, budget, and fill type (if required) [2]. When the above-mentioned items are examined and researched in detail, cable production can be started.

### 3. Material and Method

XLPE cable wastes in wedge form consisting of cable wastes from Nexans company are shown in Figure 1. Pre-breaking processes were carried out in the company of XLPE materials, which are in the form of wedges. The sample taken from the company was broken in the crusher with 4 mm sieve in Debak company. XLPE materials purchased from Nexans company.

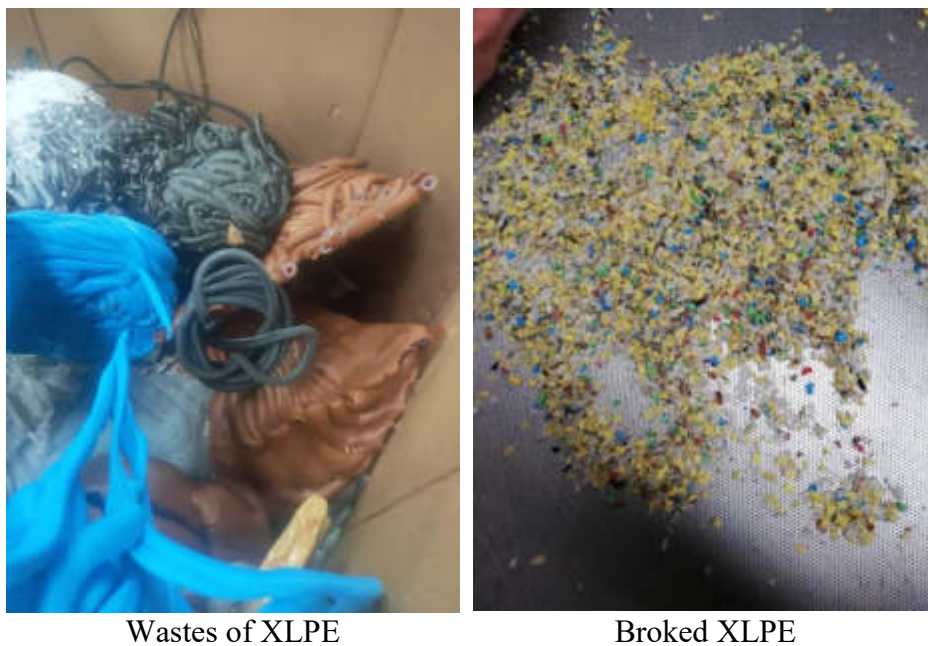


Figure 1: The view of XLPE wastes



As a result of the research, crushing processes could not be performed with the micronized crusher. For this reason, XLPE materials broken in mm dimensions were sieved by using sieves of 250 micron, 400 micron and 800 micron scales in the given scales and by applying force while the material was on the sieve. A total of 1 kg of XLPE material in micron scale was obtained from the XLPE materials in mm size, consisting of approximately 40 kg. The amount of material produced and the amount of material used in compound production;

- There is a product that comes out from 250 micron to 35 grams, from 400 microns to 165 grams, and from 800 microns to 800 grams.

for 800 microns;

- 5% XLPE (15 g) + 95% BD (285 g) = 100% blend (300 g)
- 10% XLPE (30 g) + 90% BD (270 g) = 100% blend (300 g)
- 15% XLPE (45 g) + 85% BD (255 g) = 100% blend (300 g)
- 20% XLPE (60 g) + 80% BD (240 g) = 100% blend (300 g)

for 400 microns;

- 5% XLPE (30 g) + 95% BD (270 g) = 100% blend (300 g)
- 10% XLPE (30 g) + 90% BD (270 g) = 100% blend (300 g)
- 15% XLPE (30 g) + 85% BD (270 g) = 100% blend (300 g)
- 20% XLPE (30 g) + 80% BD (270 g) = 100% blend (300 g)

for 250 microns;

- Blends of 10% XLPE (30 g) + 90% BD (270 g) = 100% blend (300 g) were prepared.

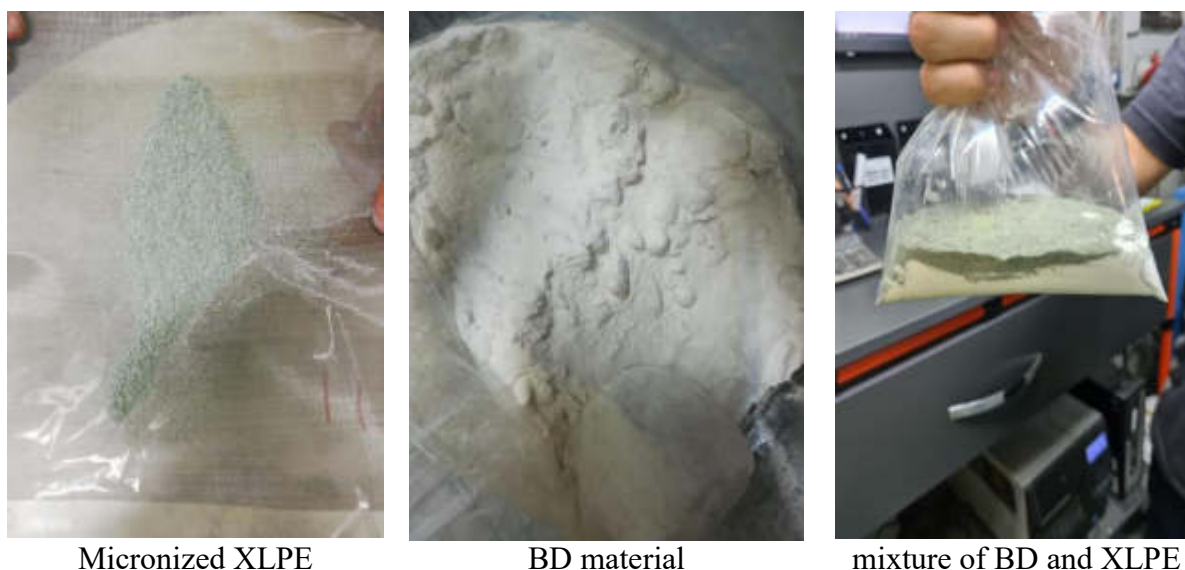


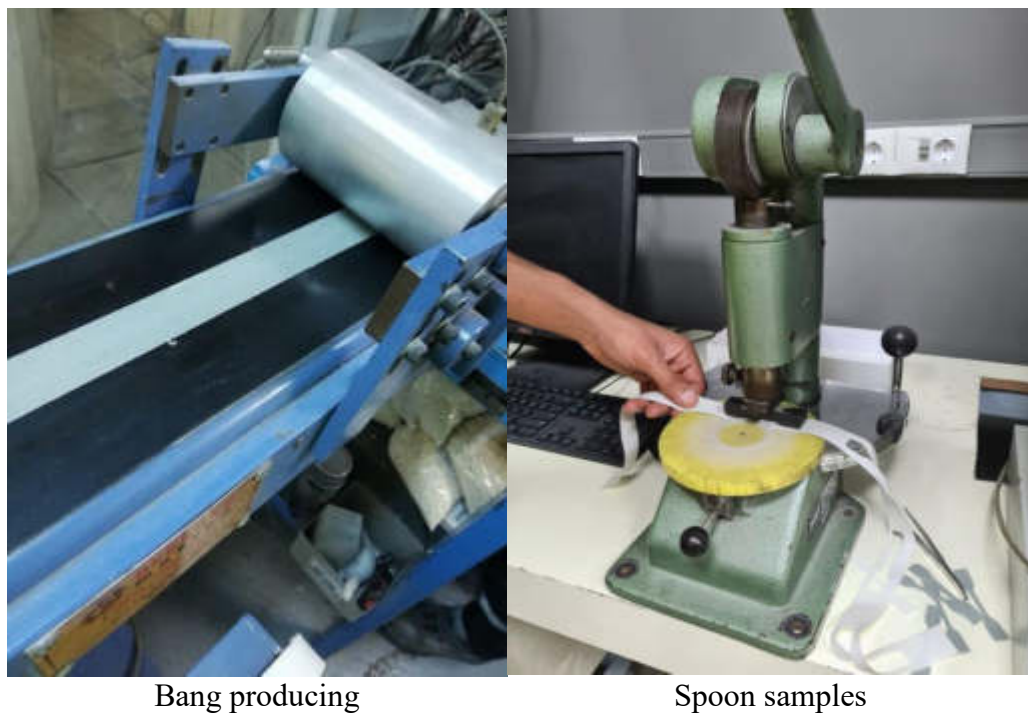
Figure 2: The production steps of BD and XLP mixture

As seen in Figure 2, the state of micron size XLPE waste before mixing with BD substance is given. The tapes were produced using the laboratory type extruder machine with the mixtures made. The extruder machine used is shown in Figure 3. A visual of the produced tapes is given in Figure 4.



Figure 3: Laboratory type extruder machine

After the compound was prepared, it turned into a ban from the extruder machine. The visual of the output of the tape form from the extruder machine is shown in Figure 5.



Bang producing

Spoon samples

Figure 5: Producing of ban in extruder and getting spoon samples

Spoon sample was removed from the bands. A tensile test was performed with this spoon sample. For comparison, the tensile test of the spoon consisting of BD only was performed. The press used to cut the spoon sample is given in **Figure 5**. Three of the spoon samples were taken for each micron value and the XLPE ratios it contains.

#### 4. Experiment Results

The tapes coming out of the extruder were handled one by one, and visual examinations were evaluated.

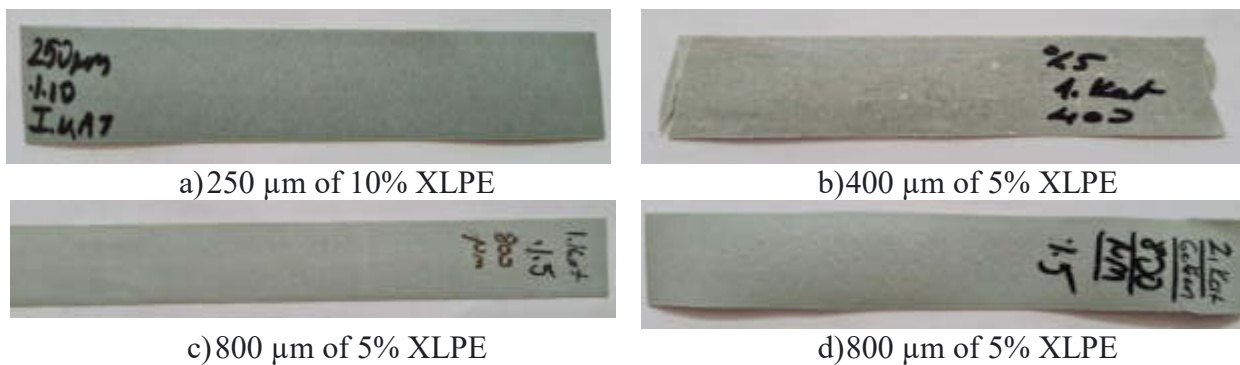


Figure 6: The view of produced tapes with different waste rates

The tape with the best surface quality and flexibility among the compounds produced is shown in Figure 6a. When we apply physical force, a material that breaks relatively more difficult than the others has emerged. A smooth surface appeared on this band. In the first band coming out of the extruder, the materials were not fully mixed and it was observed that there were white grains. Although the surface quality is not as good as 250 microns, a higher quality surface was obtained compared to other mixtures of 800 micron and 400 micron. The surface is flat and relatively smooth. The visual of the tape is shown in Figure 6b. No white BD grains were found in this band. Surface quality is good. The visual of the tape is shown in Figure 6c. The surface quality of the second band coming out of the extruder is worse than the first band coming out. Surface roughness has increased. The visual of the tape is shown in Figure 6d.

Three spoon samples were taken from each of the compounds produced in Nexans. In order to compare the obtained values, a spoon sample was extracted from the BD material used in the cable filler. It is shown in Figure 7. The tensile test results are given in Table 1.



Figure 7: Spoon Sample

Table 1: Tensile test result of all spoon samples produced

| Sample                | Average Particle Size ( $\mu\text{m}$ ) | XLPE Rate , % | Elongation (%) | Tensile Strength (MPa) |
|-----------------------|---|---------------|----------------|------------------------|
| Bedding Compound (BD) |   | 0             | 91             | 4,7                    |
| 1                     | 800                                     | 5             | 22             | 2,3                    |
| 2                     |   | 10            | 10             | 2,5                    |
| 3                     |   | 15            | 4              | 2,2                    |
| 4                     |   | 20            | 4,5            | 2,9                    |
| 5                     | 400                                     | 5             | 63             | 2,3                    |
| 6                     |   | 10            | 18             | 2                      |
| 7                     |   | 15            | 7              | 1,7                    |
| 8                     |   | 20            | 5,7            | 2,5                    |
| 9                     | 250                                     | 10            | 38             | 2,3                    |

Graphs were created in order to see the comparison of the mechanical properties of the samples taken from the produced tapes more clearly. The graph comparing the tensile strength of XLPE spoon samples with 800  $\mu\text{m}$  and 400  $\mu\text{m}$  grain sizes at certain ratios is shown in **Table 1**. According to results, when the use XLPE waste, the tensile strength is decreasing about 50%, elongation is decreasing about 70 % compared BD. The average particle size rarely affected on elongation of produced tape. When the waste particle size decreasing, the elongation is increasing.

## 5. General Evaluations

The waste particle were observed on the surface of the bands formed when the compound was passed through the extruder for the first time. Therefore, these bands were passed through the extruder a second time in order to obtain a homogeneous mixture. It was observed that the surface was smoother in the second passed bands. As the XLPE ratios in the tapes increased, the flexibility of the tapes decreased. As the XLPE ratios increased, the surfaces of the tapes became rough.

It was observed that 250 micron XLPE compound had the highest elongation at break. When the average mechanical properties of all XLPE compounds are compared; It was observed that the compound containing 800  $\mu\text{m}$  20% XLPE had the highest tensile strength (2,9 MPa). It was observed that the compound containing 400  $\mu\text{m}$  5% XLPE had the highest tensile elongation (62,4%).

## REFERENCES

Url 1 <https://www.kabloteldunyasi.com/xinda-silan-bazli-capraz-bagli-polietilen-xlpe-silan-kablo-uretim-metotlari/>

[2] Technical-user-guide-of-high-voltage-XLPE-cable-systems

## Autonomous Maintenance Application on Cable Armor Twisting Machine

C. Meran <sup>1</sup>, K. Ilhan <sup>2</sup>, U. Avci <sup>3</sup>, G. Guler <sup>3</sup>, Y. Susar <sup>3</sup>, B. Çalhan <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pamukkale University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Denizli, Turkey, cmeran@pau.edu.tr

<sup>2</sup>Nexans Turkey Industry, R&D Center, Denizli, Turkey

<sup>3</sup>Student, Pamukkale University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Denizli, Turkey

**Abstract:** For the machines to work at full capacity and without any problems, the machines must be regularly and completely maintained. Autonomous maintenance is aimed to reduce maintenance costs, detect malfunctions in advance, reduce the downtime rate, increasing machine efficiency, produce zero defect products, and produce more per unit time. In this study, an autonomous maintenance application, which is one of the eight steps of the TPM philosophy, has been applied to the cable armor-twisting machine.

**Keywords:** Autonomous maintenance, TPM, OEE, BDT, Cable armor-twisting

### 1. Introduction

As the expectation of customers on the product is constantly increasing in the world, this situation makes the production systems of the enterprises increasingly complex. The increasing complexity of production systems is among the factors that make it difficult to maintain a certain productivity standard. Malfunctions and other problems that occur in an enterprise while waiting for the planned production can upset the production plans. This situation is a nightmare for an enterprise, for this reason, maintenance activities in enterprises are of critical importance. Maintenance activities must be conducted consciously and in a planned manner for certain purposes (Genc, 2007).

To better understand autonomous maintenance, it is first necessary to talk about the TPM (Total Productive Maintenance) philosophy. TPM is a maintenance approach that requires the participation of all employees in daily production activities, foresees autonomous maintenance, prevents breakdowns, and maximizes equipment efficiency (Meran, 2021). TPM is productive maintenance by all employees with well-planned small group activities. TPM significantly improves efficiency and quality and reduces costs (Akyurek, 2006). TPM has eight main foundations. Autonomous maintenance is one of these main foundations.

Autonomous Maintenance is the daily maintenance, lubrication, part replacement, fault finding, repair, sensitivity control, et cetera that every operator is responsible for. defined as the sum of works. The work to be done on the machines is shared by the operators and maintainers. Some maintenance activities and lubrication are done by the machine operator, only the major maintenance work is left to the maintainer (Hitoshi Iwashita, 1983).

Workers need to be trained in autonomous maintenance practices and the development of operational maintenance skills. It is especially important that workers also believe in the goals of efficient use of the equipment and autonomous maintenance. Autonomous maintenance and other goals will be easier to achieve when a suitable work environment is created, and a trained and motivated workforce comes together by top management (Nakajima ve Shiroze, 1996).

## **2. What Is Autonomous Maintenance**

Autonomous maintenance, which is one of the eight steps of total productive maintenance, consists of techniques that enable production workers to participate in equipment maintenance, maintain the current condition of the equipment or prevent its deterioration. Autonomous maintenance is the direct involvement of the machine operator in predictive and preventive maintenance activities with five senses and regular checks. For example, overheating of the machine or regular lubrication operations. Allows the operator to take ownership of their machine and transfer certain maintenance activities over from the maintainer to the operator. Firstly, the operator becomes aware of the errors with some simple tasks, then it takes over the more advanced jobs with training, allowing the maintenance team to focus on more technical work. Autonomous maintenance is only the duty of the operator. Pre-treatments such as cleaning, lubrication, and tightening are the duty of the operator. The maintenance team's job is to look at bigger problems.

The main target is the zero approach in autonomous maintenance. Zero work accidents, zero machine failure, zero quality defects. All risky areas in the machine are reviewed with autonomous maintenance and listed and necessary prevention can be taken.

## **3. Application On Cable Armor Twisting Machine**

Our work consists of 2 stages. In the first stage, research and data acquisition on the subject were provided. In the second stage, evaluations were made on how to implement autonomous maintenance by evaluating all the collected data.

In the first phase of the project:

- All the machines in the armor twisting line were listed, and investigations were made on how the machines worked.
- The fault records of the machines were supplied from the company and analyzed by graphing.
- According to these reviews, the machines were ranked in order of priority.
- According to this order, the machines that will not be included in the autonomous maintenance scope and their fault records have been removed from the list.
- According to the last list, maintenance items that the operator can do have been created.
- The periods and methods of maintenance items were determined.

In the second phase of the project:

- As a result of the research and our meetings with the company officials, it was decided to follow the autonomous maintenance application on a panel to be placed on the machine line.
- The panel is designed in such a way that the operator can use it easily and contains the necessary information when in the necessary situation.
- The maintenance items divided into periods were placed in the center of the panel. (Such as daily maintenance checklist, weekly maintenance checklist, and monthly maintenance checklist.)
- Pockets in A4 size were prepared on the panel and filled with necessary materials.
- An autonomous maintenance file and a procedure file containing maintenance items that operators can use in case of need have been prepared and were added to the panel.
- A list of operators working on this line and the undertaking they signed were added to the panel.
- In order to see the results of autonomous maintenance, the performance indicators used by the company were added to the dashboard in the graphic form (Such as Overall Equipment Effectiveness and failure rate).
- In order to give feedback to the maintenance team, the graphic that will follow the frequently recurring faults and the table that feeds this graphic have been added to the panel.
- The control chart has been added to the panel for the team leader who controls the panel.

Autonomous maintenance tables are the table containing the maintenance items to be made by the operator. Thanks to these tables, the autonomous maintenance process is followed. The operators mark each item they control on the panel. If operators detect any failure or impropriety, they should report this to the maintenance department. There are daily maintenance, weekly maintenance, and monthly maintenance checklist in the autonomous maintenance panel.

There are 7 items on the daily maintenance checklist. The maintenance items in this table will be applied regularly every day throughout the year. Day means “gün” in Turkish. For this reason, the letter “G” is used, Figure 1.

| ARMOR TWISTING MACHINE DAILY AUTONOMOUS MAINTENANCE CHART |    |  |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |
|---|----|--|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|---|----|----|----|
| METHOD  | NO | PLACES TO DO MAINTENANCE               | 1 | 2 | 3 | - | - | - | - | - | 30 | 31 | - | 29 | 30 | 31 |
|   | G1 | SPARKTESTER CLEANING                   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |
|   | G2 | ROTARY ROLLER WORKING CHECK            |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |
|   | G3 | LIFT OIL LEAK CHECK                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |
|   | G4 | AIR PRESSURE INDICATOR CHECK           |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |
|   | G5 | PNEUMATIC SYSTEM AIR LEAK CHECK        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |
|   | G6 | ABNORMAL SOUND CHECK ON THE MACHINE    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |
|   | G7 | WIRE TRANSMITTER SYSTEM AIR LEAK CHECK |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |    |    |    |

Figure 1. Daily maintenance checklist

There are 12 items on the weekly maintenance checklist. These items will be applied once a week throughout the year. Week means “hafta” in Turkish. For this reason, the letter “H” is used, Figure 2.

| ARMOR TWISTING MACHINE WEEKLY AUTONOMOUS MAINTENANCE CHART |     |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|--|-----|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
| METHOD   | NO  | PLACES TO DO MAINTENANCE                  | 1 | 2 | 3 | -- | -- | -- | -- | 50 | 51 | 52 | 51 | 52 |  |
|  | H1  | COLLECTOR BELTS WEAR CHECK                |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|  | H2  | CATERPILLAR BELTS WEAR CHECK              |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|  | H3  | 1. WEAR CHECK OF TRANSMITTER BELTS        |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|  | H4  | 2. WEAR CHECK OF TRANSMITTER BELTS        |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|  | H5  | 3. WEAR CHECK OF TRANSMITTER BELTS        |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|  | H6  | 4. WEAR CHECK OF TRANSMITTER BELTS        |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|  | H7  | 1. CHECK OF THE TRANSMITTER BELT AXIS     |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|  | H8  | 2. CHECK OF THE TRANSMITTER BELT AXIS     |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|  | H9  | 3. CHECK OF THE TRANSMITTER BELT AXIS     |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|  | H10 | 4. CHECK OF THE TRANSMITTER BELT AXIS     |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|  | H11 | WORKING CHECK OF THE COLLECTOR WHEEL      |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|  | H12 | 1. WORKING CHECK OF THE TRANSMITTER WHEEL |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |

Figure 2. Weekly maintenance checklist

There are 9 items on the monthly maintenance checklist. These items will be applied once a month throughout the year. Month means “ay” in Turkish. For this reason, the letter “A” is used, Figure 3.



| ARMOR TWISTING MACHINE MONTHLY AUTONOMOUS MAINTENANCE CHART |    |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
|---|----|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| METHOD  | NO | PLACES TO DO MAINTENANCE                 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|   | A1 | WEAR CHECK OF TRANSMITTER BRAKE          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
|   | A2 | WEAR CHECK OF THE TRANSMITTER BRAKE PINS |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
|   | A3 | 1. WEAR CHECK OF THE TRANSMITTER PINHOLE |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
|   | A4 | 2. WEAR CHECK OF THE TRANSMITTER PINHOLE |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
|   | A5 | 3. WEAR CHECK OF THE TRANSMITTER PINHOLE |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
|   | A6 | 4. WEAR CHECK OF THE TRANSMITTER PINHOLE |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
|   | A7 | WEAR CHECK OF COLLECTOR PINHOLE          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
|   | A8 | COLLECTOR BRAKE WEAR CHECK               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
|   | A9 | COLLECTOR BRAKE PIN WEAR CHECK           |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |

Figure 3. Monthly maintenance checklist

Many points, which are only checked by the maintenance team or intervened only in case of failure, before autonomous maintenance is carried out, are followed at the intervals deemed necessary by including the operators in the maintenance management. In this way, many benefits such as early detection of malfunctions, prevention of errors in production, prolongation of machine life, and reduction of maintenance and repair costs are provided. Maintenance procedures have been prepared, explaining how operators should perform maintenance items so that they can implement autonomous maintenance without any problems, providing maintenance information, and showing equipment, estimated maintenance time, maintenance period, and method, Figure 4. The purpose of preparing maintenance procedures is that operators can easily perform maintenance independently of the maintenance team.

| KB 55-1 MAINTENANCE PROCEDURE   |              |                       |                             |
|---|--------------|-----------------------|-----------------------------|
| <b>EQUIPMENT NAME:</b>  | SPARK TESTER |                       | <b>REQUIRED TIME:</b> 2 min |
|   |              | SPARK TESTER CLEANING |                             |
| OPERATION SEQUENCE  |              |                       |                             |
| 1) The spark tester cover opens.<br>2) It is cleaned it an air gun.<br>3) It is checked by hand that it is sufficiently clean.<br>4) The cover is closed and it is checked that it is closed. |              |                       |                             |
|   |              |                       |                             |

Figure 4. Maintenance Procedure

An attempt was made to design the autonomous maintenance panel to be as easy to understand and helpful to the operator as possible. As a step towards this, a sketch of the armor-twisting line seen in Figure 5 has been added to the panel. Symbols of autonomous maintenance items were placed on the sketch. In this way, it has been ensured that the operator who will perform the maintenance can very easily determine which machine to do which maintenance.

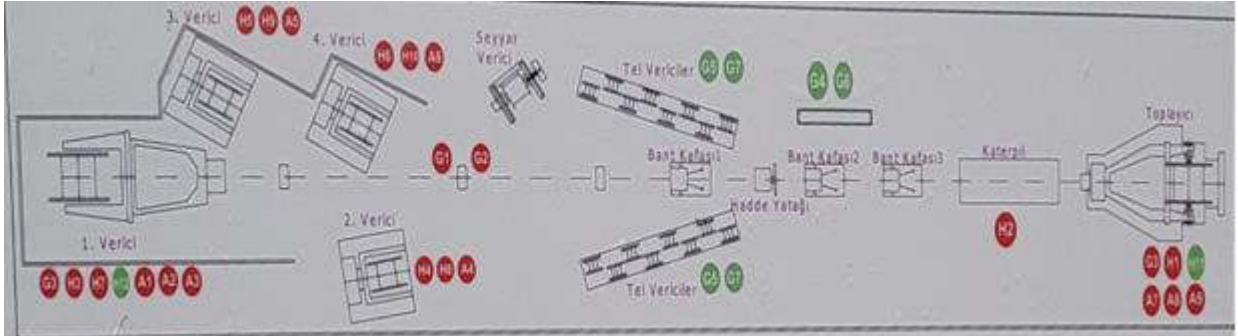


Figure 5. Maintenance map

Symbols of maintenance items and maintenance methods were affixed on the machines included in the scope of autonomous maintenance, as shown in Figure 6. In this way, the operator will frequently see the autonomous maintenance items and methods on the machine. It will minimize the problems that will cause loss of time, even if it is short-term, such as making mistakes during maintenance or forgetting the maintenance to be done.



Figure 6. Sticker

As seen in Figure 7, symbols with different meanings were used on the autonomous maintenance panel. These symbols are very important for the operator to learn the maintenance more easily, prevent complexity in the panel, and facilitate the work of the operator.

| SYMBOLS AND THEIR MEANINGS |  |       |  |
|----------------------------|--|-------|--|
| ✓                          | IF THERE ARE NO PROBLEMS, THE TICK MARK WILL BE USED.      | ●     | MAINTENANCE WILL BE DONE WHILE THE MACHINE IS WORKING. |
| ✗                          | IF THE PROBLEM IS DETECTED, THE CRUISE MARK WILL BE USED.  | ●     | MAINTENANCE WILL BE DONE WHILE THE MACHINE IS STOP.    |
| 👁️👁️                       | THE RELATED SUBSTANCE WILL BE INSPECTED BY EYES.           | G1 G2 | DAILY MAINTENANCE SYMBOL.                              |
| 👂                          | THE RELATED SUBSTANCE WILL BE SOUND CHECKED.               | H1 H2 | WEEKLY MAINTENANCE SYMBOL.                             |
| 🧼                          | THE RELATED SUBSTANCE WILL BE MANUALLY CHECKED OR CLEANED. | A1 A2 | MONTHLY MAINTENANCE SYMBOL.                            |

Figure 7. Symbols table

The autonomous maintenance board prepared is designed in a certain order so that everyone can easily understand and the panel explains the necessary information most simply. The left side of the panel has been prepared by filling in the files that will help the operators and the company officials. The middle section of the panel has been chosen as the area used by the operators and is reserved for easy tracking and inspection of autonomous maintenance items. The right part of the panel is divided into tables and graphs to provide feedback to the company's maintenance team and the achievements we want to achieve as a result of autonomous maintenance. As a result of all the efforts, the autonomous maintenance panel shown in Figure 8, became ready for use. Charts to regularly monitor the key performance indicators used by the company and tables to provide feedback are placed on the right side of the panel, and procedures and operator lists are on the left side of the panel.



Figure 8. Autonomous maintenance panel

#### **4. Conclusion**

In general, studies and all materials prepared were prepared and put into practice by the scope of autonomous care. As a result of these studies, it is aimed to intervene in the machine without any malfunction, increase the OEE value, decrease the BDT value, decrease the production costs, and increase the profitability as the autonomous maintenance stages are implemented over time. It is expected that by giving the necessary training, more competent operators will be trained, the operators will own their machines, the loss of time will be reduced by kaizen studies, autonomous maintenance practices will become as widespread as possible in the factory, and a much more efficient and healthier working environment will be created.

#### **REFERENCES**

1. Ahmet Genç, Toplam Verimli Bakım ve Uygulaması, Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, s 14, 2007
2. Cemal Meran, Bakım Tekniği ve Uygulamaları ders notları, Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, s 39, 2021
3. Emel Akyürek, Toplam Üretken Bakım Uygulamalarıyla Maliyet Düşürülmesinin Ölçülmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Müh. Anabilim Dalı, Endüstri Müh. Programı, s10, 2006.
4. Seichi Nakajima & Kunio Shiroze, Total Productive Maintenance New Implementation Program in Fabrication and Assembly Industries, USA, S 22, 1996
5. Hitoshi Iwashita, Japon Yönetimi Uluslararası Bakış Açıları, cilt 4, S :1, 1983.

## Usability of Recycled Cross-Linked Polyethylene in New Product

C. Meran <sup>1</sup>, Y. Sendur <sup>2</sup>, E. Cevrin, E. Metinel <sup>2</sup>, K. Ilhan <sup>3</sup>

<sup>1</sup>Pamukkale University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Denizli, Turkey, cmeran@pau.edu.tr

<sup>2</sup>Student, Pamukkale University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Denizli, Turkey

<sup>3</sup>Nexans Turkey Industry, R&D Center, Denizli, Turkey

**Abstract:** Plastic wastes are enormous damage to the Earth. Some of these plastic wastes are recyclable and some are not recyclable with known methods of recycling yet. Cable waste cross-linked polyethylene (XLPE) is not recyclable with the technology of our century. In this study, it was tried to produce a tartan ground surface, composite wooden-plastic panel, and the wedge of the block made of cable pulley using XLPE wastes.

**Keywords:** XLPE, plastic, wedge, recycling, thermoset, cable, composite

### 1. Introduction

A large amount of plastic waste is generated during cable production. If the plastic used is cross-linked polyethylene, the resulting waste cannot be recycled. In this case, wastes that are extremely dangerous in terms of environmental pollution and cause significant cost loss for the company to arise as given in Figure 1a. Although cable wastes can be roughly crushed to a size of a few mm, it is unlikely to be used for recycling in Figure 1b.



a) XLPE wastes of cables



b) Crushed XLPE wastes

Figure 1: The view of XLPE wastes

Few studies have been found in the literature on non-recyclable plastics. Zéhil (2019) aimed to test the unhardened and hardened properties of the mixture by preparing cement and water contents and mixtures for the recycling of cross-linked polyethylene. It was found that a decrease in the densities of the mixtures was observed due to the difference in specific gravity of XLPE with respect to aggregate. As a result, decreases were observed between 40%-53% and 21%-27% in the mechanical properties of the mixtures due to the weak mechanical properties of XLPE compared to aggregate. Shang et al. (2010), has studied how recycled polyethylene wax would exhibit properties with asphalt. As a result, it was observed that polyethylene had a viscosity-reducing effect on asphalt. In addition, the temperature sensitivity of the mixture gave bad results, but the sensitivity to temperature was removed with the addition of beeswax. Cruz et al. (2003) observed the dielectric coefficients of the samples formed by bonding high-density polyethylene with resin and various chemicals at the ratios of 0%, 25%, 50%, 75%, 100%. As a result, in this examination, it was observed that the dielectric coefficient decreased from 0% to 75%, but this ratio decreased slightly to 100%. Oguz (2011) worked on the characterization of scrap polyethylene and examined the effect of recycling on product properties. It was investigated the reusability of scrap polyethylene formed during the production of high-density polyethylene pipes by extrusion.

In this study, the convertibility of cable sheath waste cross-linked polyethylene into a new product by mixing with different resins at different rates after undergoing various crushing processes was investigated.

## **2. Plastics And Composites**

Plastics are materials obtained by chemical conversion of artificial or natural substances, the basis of which is macromolecular organic substances. Plastics have an important place in our daily life. In the course of time plastic material components over time, plastic materials have been reinforced to have superior properties. The fact that melting temperatures are lower than other material groups provides ease of workability to plastic materials. Plastics are generally divided into thermoplastics, thermosets, and elastomers according to their structure. Thermoplastics are known for their formability with temperature. Each time they are heated, their macromolecular structures weaken a little. They can be welded, melted, and dissolved with solvents. They absorb liquid (water). Thermosets, on the other hand, do not soften with heat and cannot be reshaped. Cross-linked polyethylene (XLPE), on the other hand, is a thermoset plastic. XLPE is used in the cover of medium and high voltage cables. It is not recyclable due to the cross-links in its structure. It does not soften with heat and cannot be reshaped. This study, it is aimed to produce a composite product using XLPE.

## **3. Material And Methods**

First of all, it was aimed to produce products with cross-linked polyethylene (XLPE) which is a recycling material within the scope of the project. The first study is like a study of tartan ground, the second study is a study of wooden-plastic composite and the last one is a wedge of a reel.

The most important feature of tartan floors is to protect the health of athletes and children. With its shock-absorbing feature, it prevents injuries in falls and accidents. They are flexible and

have a high coefficient of friction. Considering these properties, rubber shows similar properties to XLPE for this reason tartan ground studies have been carried out with XLPE. Then, a mold was used with a length of 400x400 mm and a depth of 20 mm. 3500 g XLPE and 350 g were mixed with a polyurethane binder. A temperature of 170 °C and heat treatment for 10 minutes was applied for activating the binder used.



a) Floor mold



b) Tartan machine



c) preparation of the mixture



d) casting



e) baking

Figure 2: The view of producing tartan

For the construction of a tartan track from XLPE, a formwork with dimensions of 200x200x20 mm was prepared. The mixture contents are XLPE+ polyurethane and XLPE+ binder. In the first experiment, 10% polyurethane binder was used at 3500 g XLPE. In addition, baking times of 2 hours and 4 hours and 165 °C were applied. Tartan floor production stages are shown in Figure 2.

In the second study, it was studied to produce wooden-plastic composite materials. The goal is to produce a new composite wood and to test this material for burning, surface abrasion, electrical insulation, tensile and bending. However, XLPE and MDF powder sawdust and

polyester resin were mixed as binders. Different experiments were carried out to compose the correct ratio. Experiment 1 data are shown in Table 1.

Table 1: Data for experiment 1

| <b>Experiment 1</b> | <b>Materials Used (g)</b> |      |                   |
|---------------------|---------------------------|------|-------------------|
| Sample Number       | MDF Powder<br>Sawdust     | XLPE | Resin (Polyester) |
| Sample 1            | 15                        | 30   | 30                |
| Sample 2            | 15                        | 30   | 40                |
| Sample 3            | 15                        | 30   | 55                |
| Sample 4            | 15                        | 30   | 75                |

450 g of MDF powder sawdust, 900 g of XLPE, and 1750 g of polyester resin were used as the optimal ratio. Data for experiment 2 are shown in Table 2.

Table 2: Data for experiment 2

| <b>Experiment 2</b> | <b>Materials Used (Grams)</b> |      |                   |
|---------------------|-------------------------------|------|-------------------|
| Sample Number       | MDF Powder<br>Sawdust         | XLPE | Resin (Polyester) |
| Sample 1            | 450                           | 900  | 1750              |

400 mm x 400 mm x 25 mm steel mold was produced for wooden composite.



a) preparation of the mixture



b) casting

Figure 3: Wood-plastic panel production stages

Wood-plastic panel production stages are shown in Figure 3. The sample was fixated to the universal vertical milling machine and processed. The processing of the plate is shown in Figure 4.





Figure 4: The view of machining of the produced plate

Because of XLPE is in a granule form and its physical properties are similar, it is aimed to apply rubber wedge made by breaking from automobile tires to create a new wedge of the reel with XLPE.

The third study, it was carried out for the production of wedges of reels with XLPE. Mixtures were prepared using double-component (A+B) polyurethane resin and XLPE. The reason for preparing various mixtures is to find the appropriate shore degree of hardness. The internal structure of the mixture formed with polyurethane binder resin takes about 10-15 min at room temperature. The completion time of the curing may vary due to reasons such as the thickness of the desired sample and the humidity in the environment. Casting the wedge is shown in Figure 5.



Figure 5: Casting the wedge

To measure the reactions of cross-linked polyethylene in the mixture, which is intended to be used as a new composite wedge for the first time, in the experiments to be performed, 4 different samples were created with different additives at different ratios as seen in Table 3. All products made as a result of experiment 3 are shown in Figure 6.

Table 3: The composition of samples

| Experiment 3 | Polyol (g) | Isocyanic (g) | Calcite(g) | Fiber(g) | XLPE (g) |
|--------------|------------|---------------|------------|----------|----------|
| Sample 1     | 50         | 50            | -          | -        | 35       |
| Sample 2     | 50         | 25            | -          | -        | 20       |
| Sample 3     | 50         | 40            | 5          | -        | 30       |
| Sample 4     | 50         | 40            | 5          | 5        | 30       |



Figure 6: All products made as a result of experiment 3

Mixtures were determined by making inferences from the samples produced. In Table 4, 4 different mixtures were prepared in the given proportions and transferred to the special production mold. They are kept at room temperature for that they can get form. In addition, it is aimed to minimize or even eliminate the gaps caused by XLPE and hardening reaction in the samples, as well as to examine the availability of various impurities. For these reasons, calcite and filaments were used as additives. Wedge production stages are shown in Figure 7.

Table 4: Composition of wedge production

| Experiment 4 | Polyol (g) | Isocyanic (g) | Calcite(g) | Fiber(g) | XLPE (g) |
|--------------|------------|---------------|------------|----------|----------|
| Sample 1     | 500        | 400           | -          | -        | 200      |
| Sample 2     | 500        | 400           | -          | 50       | 200      |
| Sample 3     | 500        | 400           | 50         | -        | 400      |
| Sample 4     | 500        | 400           | 50         | -        | 300      |



Figure 7: The wedge production stages.

The mixtures poured into the mold were waited for 10 minutes for curing. Mixtures have smoothly taken the form of mold. After adding the curing, the manufactured wedges were

removed from the molds without any problems has also been transferred. The wedges produced are shown in Figure 8.

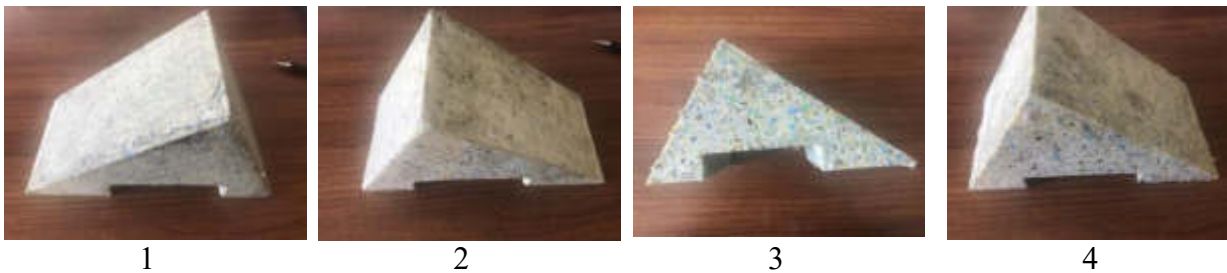


Figure 8: The wedges produced are given in Table 4.

No adverse events were encountered during the experiment and the experiments were carried out successfully. Afterward, the hardness measurement test was carried out. These experiments will be explained in the conclusion and comment section.

#### 4. Results And Discussion

In this study, the applied tartan floor cannot be simulated realistically, similar to the binder. Since this situation will be taken into account, the obtained and firing cannot be returned. The first test of tartan runway production failed. In the 2nd Tartan floor study, two different resins were tried polyurethane as a binder and as a binder. The rate used was 20% and the baking time was tested as 60 min, 120 min, and 360 min. It was concluded that the optimum baking time was 60 min. It has been observed that increasing the baking time has no effect on the product. If a comparison is made between the polyurethane and binder used, it has been observed that the polyurethane is more durable and the granules are more attached to each other. On the other hand, the flexibility of the product in which the binder is used is very high and it has been observed that the adhesion between the granules is much less. The produced tartan floor is shown in Figure 9.



Figure 9: Produced tartan floor

In addition, the experiment was carried out by increasing the resin ratio. The resin ratio was increased by 40%, but no difference was observed in the strength of the product formed. However, it was difficult for the product to come out of the mold and because the resin was too much, chemical reactions occurred and bubbles appeared.

As a result of all these tartan floor studies, it has been concluded that tartan tracks made of rubber can be made with XLPE. It has been proven that as the XLPE granules get smaller, the performance of the product increases and if the appropriate binder resin is selected, it will be a usable product.

The second study to produce a usable product with XLPE is the production of wood-plastic composite panels. The most suitable XLPE, polyester and mdf shavings formula was determined. After this process, plate production started. The surface of the product is machined in machining. Later, various mechanical and chemical tests were carried out for this plate. Combustion test, friction resistance test, dc tension test, and tensile and bending tests were applied. As a result of these tests, the product successfully passed the friction and tension tests. The desired performance could not be shown in the combustion test. The reason for the product to burn is the mdf sawdust used.

The last product of this study is the cable reel wedge that can be produced with XLPE. It was decided that the appropriate binder for this wedge is two-component polyurethane and production started. Products were tested with and without calcite. At the same time, products were tested with and without fiber. It was decided that the most suitable ratio for the 4 different wedges that came out was the 3rd sample. The calcite used has increased the volume of the product and made it economical. Thanks to the two-component polyurethane used, the desired softness and hardness have been achieved. In the hardness tests applied to the wedges, it was observed that 4 different samples were the same. The usability of the XLPE chock instead of the rubber reel chock currently used in cable factories has been proven in practice.

## **5. Conclusion**

As a result of all the studies, three different products have been produced from XLPE, which cannot be recycled. It has been proven that it is possible to make a tartan floor with XLPE when the appropriate adhesive and appropriate production method are applied in the tartan floor application. For wood-plastic composite material, it has been proven that it can be used in architectural and construction applications where high strength is not desired and that it can be used in places where insulation is required by giving the desired shape. In addition, it was concluded that the smaller the size of the granules, the better results can be obtained. It was observed that the fibers put into the wedge did not have a positive effect. Calcite prevented air bubbles formed. Calcite filled the gaps and served as a filler. It has been observed that polyurethane is the correct resin choice. The desired Shore A value was reached in the hardness test for the wedge.

## **References**

1. Meran C., Haldenbilen S., Kula M., Öztürk H. and Ozsandikci G., Çapraz bağlı polietilen (XPE) köpük atıkların geri dönüşümde kullanılabilirliğinin incelenmesi, Mühendis ve Makina, cilt 55, sayı 649, s. 64-68, 2014.
2. Oguz N., Hurda Polietilen Karakterizasyonu ve Geri dönüşümünün Ürün özellikleri Üzerinde Etkisinin İncelenmesi , İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, S. 3-10, S. 42-52, S. 27-28 (2011)

3. Hillary M., Sarıca S., Mutlu K., Makaraların Taşınması, Yüklenmesi, Depolanması ve Kabloların döşenmesine İlişkin Talimatlar. Nexans Türkiye Endüstri ve Ticaret A.Ş. - Denizli Kablo Fabrikası (2021)
4. Poliüretan Reçine Nedir? , <http://hobipolyester.blogspot.com/2019/03/poliuretan-recine-nedir-poliuretan-nasl.html> (2022)
5. Uyanık, Nurseli ve Şenkaya, Alaettin, Çapraz Bağlanabilen Polietilenin Geri Kazanılması. (2015)
6. Özge Erkan, Endüstri Ürünleri Tasarımcısı , Çocuk Oyun Parklarında Modül Tasarımında Ahşap-Plastik Kompozit Malzemenin Kullanım Olanakları . , İstanbul Kültür Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul S.14- 31
7. Gérard-Philippe Zéhil<sup>a</sup>, Joseph J. Assaad<sup>b</sup>, Feasibility Of Concrete Mixtures Containing Cross-linked Polyethylene Waste Materials, <sup>a</sup>-Notre Dame University – Louaize, Faculty of Engineering, Dept. of Civil and Environmental Engineering, P.O. Box 72, Zouk-Mosbeh, Lebanon  
<sup>b</sup>-University of Balamand, Faculty of Engineering, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Al Kurah, Lebanon, s. 4-8, (27 July 2019)
8. Lina Shang, Shifeng Wang, Yong Zhang, Yinxi Zhang, Research Institute of Polymer Materials, School of Chemistry and Chemical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 800 Dongchuan Road, Shanghai 200240, China, s. 887-900, (30 June 2010),
9. S. A. Crud, M. Zanin, Evaluation of the Incorporation of Recycled Material in the Dielectric Properties of High Density Polyethylene, Department of Materials Engineering - DEMa I Federal University of SZo Carlos - UFSCar Rodovia Washington Luis (June 1-5 2003 Nagoya)

## Projektowanie i analiza MES kompozytów polimerowych

W. Mikołajko <sup>a</sup>, M. Król <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials

email: wojcmik825@student.polsl.pl

<sup>b</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials

email: mariusz.krol@polsl.pl

**Streszczenie:** Celem pracy było zaprojektowanie oraz analiza wytrzymałościowa MES kompozytów polimerowych. Symulacja została przeprowadzona w programie Solidworks, który umożliwił przeprowadzenie w środowisku wirtualnym próby zginania wcześniej przygotowanych modeli. W tym celu zaprojektowano cztery modele wykonane z wzmocnieniami o różnej geometrii. Do badań przyjęto na osnovę oraz wzmocnienie naprzemiennie dwa materiały polimerowe: ABS oraz PET.

**Abstract:** The aim of this study was to design and FEM strength analysis of polymer composites. The simulation was carried out in Solidworks software, which enabled the bending test of previously prepared models to be carried out in a virtual environment. For this purpose, four models made with reinforcements of different geometries were designed. Two polymeric materials, ABS and PET, were used alternately as the matrix and reinforcement.

**Słowa kluczowe:** symulacja komputerowa, MES, kompozyty polimerowe, Solidworks

### 1. WSTĘP

Materiały kompozytowe należą do grupy materiałów powstałych poprzez połączenie dwóch odrębnych materiałów inżynierskich. W kompozytach możliwym jest oddzielenie przynajmniej dwóch odrębnych faz nierozpuszczających się w sobie, z czego jedną z nich jest osnowa, która ma za zadanie połączyć całość w jednolity element oraz przenosić obciążenie na drugą fazę, którą jest wzmocnienie (rys. 1). W ostatnich dekadach zauważono wzrost popularności tej grupy materiałowej ze względu na niemalże identyczne, a czasami lepsze własności niż konwencjonalne grupy materiałowe. Zastosowanie polimerowych kompozytów niesie ze sobą dodatkowo pozytywny element, którym jest niski ciężar właściwy, co jest pożądane w wielu branżach między innymi w przemyśle motoryzacyjnym. Zastosowanie kompozytu polimerowe, który ma podobne właściwości do stopów metali, obniża wagę całego pojazdu co prowadzi do znacznie niższego spalania paliwa, a co za tym idzie obniżenie emisji spalin. W motoryzacji kompozyty te są wykorzystywane do produkcji elementów nadwozi, zderzaki maski czy nawet

duże elementy przyczep kempingowych. Dodatkowo postęp technologiczny pozwala na produkowanie nie tylko elementów, które nie są obciążane w trakcie eksploatacji ale również coraz częściej producenci decydują się na stosowanie kompozytów polimerowych w produkcji podzespołów nośnych, co widoczne jest w sportach wyścigowych jak i super szybkich samochodach, w których duża masa jest wrogiem przyspieszenia [1-4].

Celem pracy było zaprojektowanie oraz analiza komputerowa MES kompozytów polimerowych w celu wyznaczenia własności mechanicznych zaprojektowanych kompozytów.



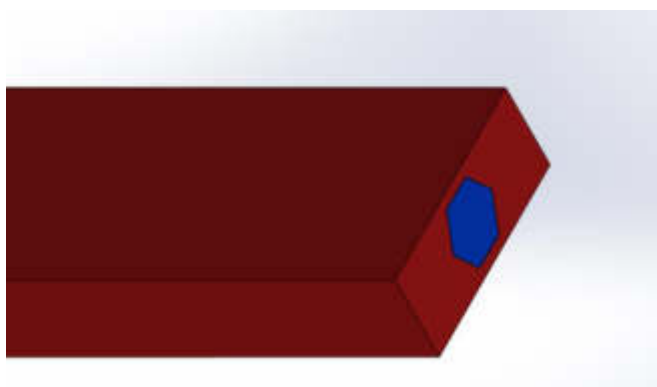
Rys. 1. Kompozyty z różnym typem wzmocnienia [5]

Fig. 1. Composites with different types of reinforcement [5]

## 2. METODYKA BADAŃ

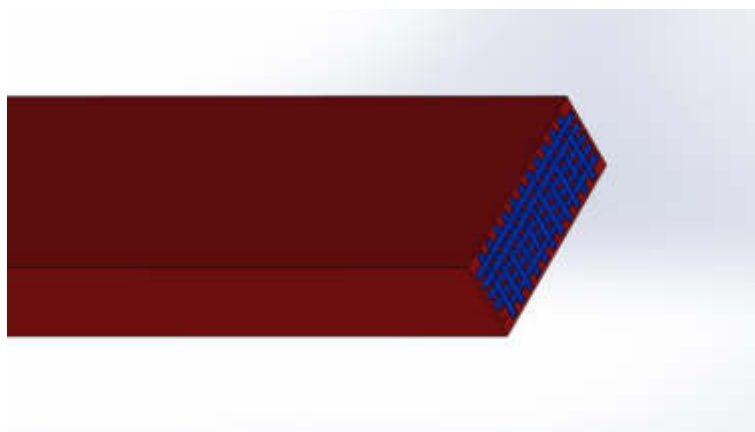
Pierwszym krokiem w pracy było zamodelowanie czterech modeli o różnym kształcie wzmocnienia. Do badań wybrano i zaprojektowano następujące kształty:

- sześciobok,
- siatka,
- dwuteownik,
- gwiazda (rys. 2–5).

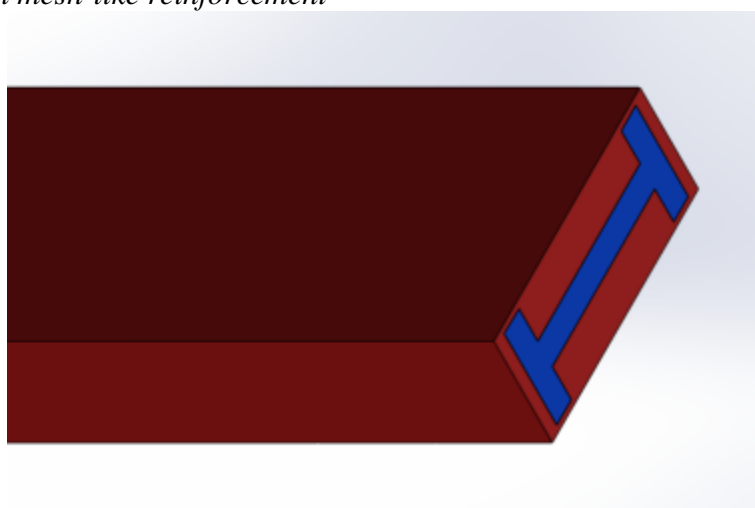


Rys. 2. Model z wzmocnieniem w kształcie sześcioboku

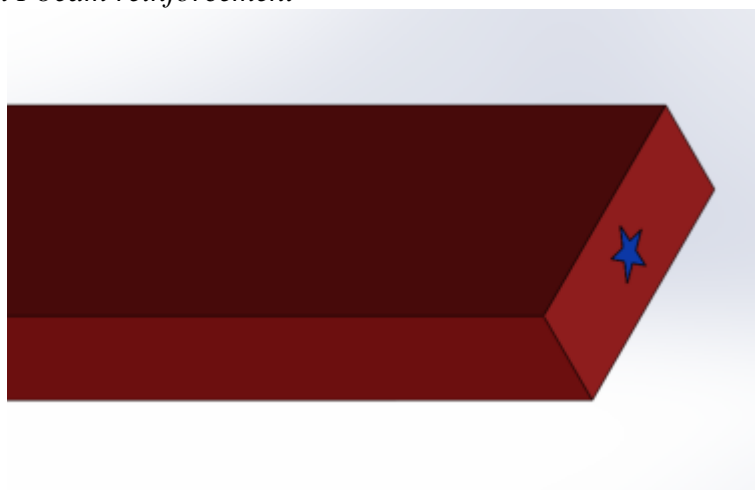
Fig. 2. Model with hexagonal reinforcement



Rys. 3. Model z wzmocnieniem w kształcie siatki  
*Fig. 3. Model with mesh-like reinforcement*



Rys. 4. Model z wzmocnieniem w kształcie dwuteownika  
*Fig. 4. Model with I-beam reinforcement*

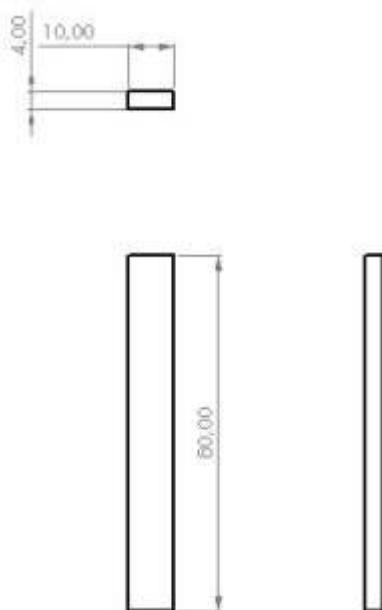


Rys. 5. Model z wzmocnieniem w kształcie gwiazdy  
*Fig. 5. Model with star-shaped reinforcement*

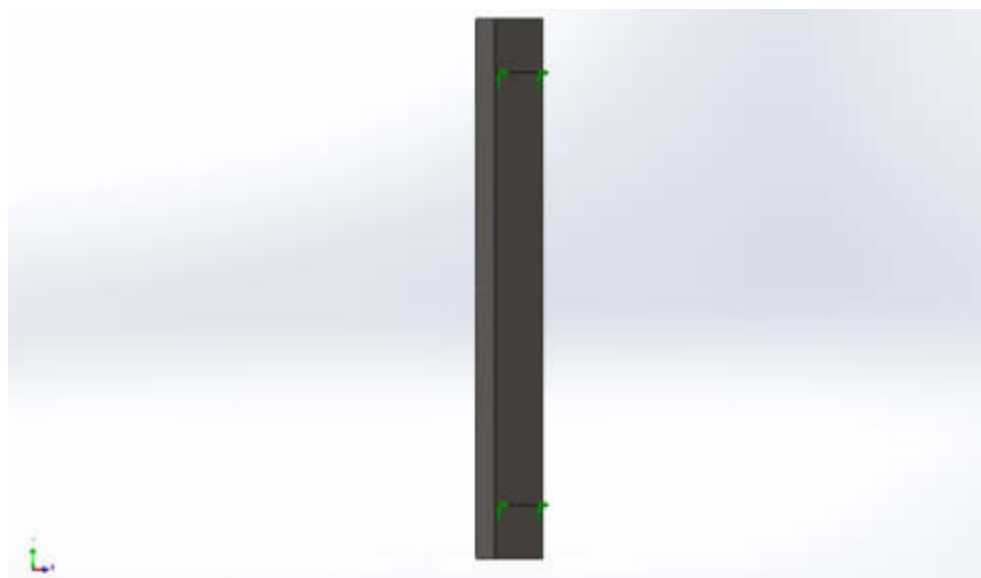
Wymiary modeli (rys. 6) zostały opracowane w oparciu o normę ISO 178:2003, która zawiera informacje m.in. w jaki sposób ma być przeprowadzana próba zginania. Dzięki normie



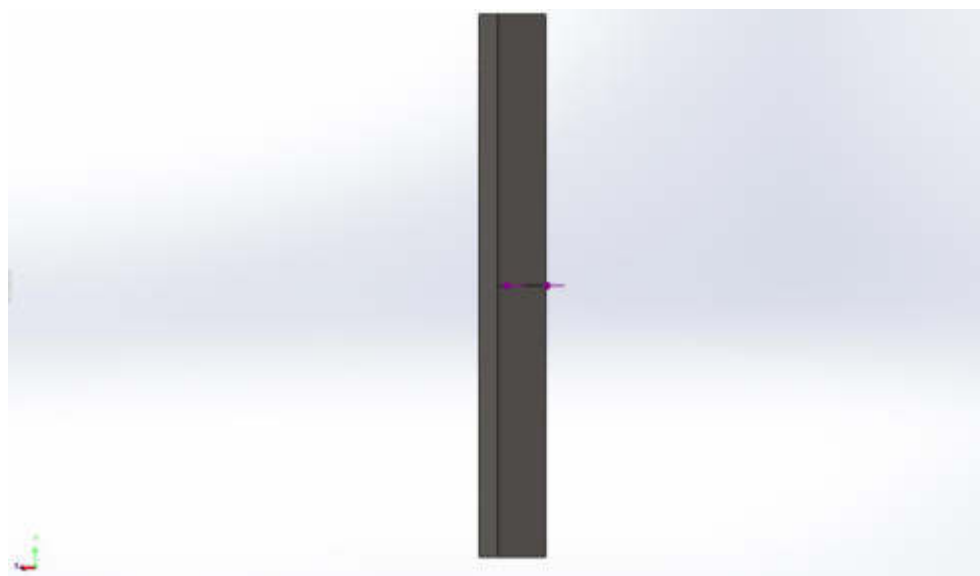
możliwe było również ustawienie warunków brzegowych w programie Solidworks. Tym samym dla każdej próbki w miejscu podpór ustawiono umocowania nieruchome (rys. 7). oraz po przeciwnej stronie przyłożenie siły o wartości 100 N (rys. 8). Ostatnim elementem było przypisanie materiałów oraz nałożenie siatki na model (rys. 9). Zdecydowano się naprzemiennie wykorzystać na osnowę oraz wzmocnienie PET oraz ABS. Właściwości wytrzymałościowe tych materiałów przedstawiono w tabelicy 1. W celu weryfikacji wykonano jeszcze model bez żadnego wzmocnienia w celu sprawdzenia wyników symulacji dla elementów wykonanych z czystego PET lub ABS czyli materiałów bez wzmocnienia.



Rys. 6. Wymiary modeli do badań trójpunktowego zginania  
Fig. 6. Dimensions of the models for three point bending

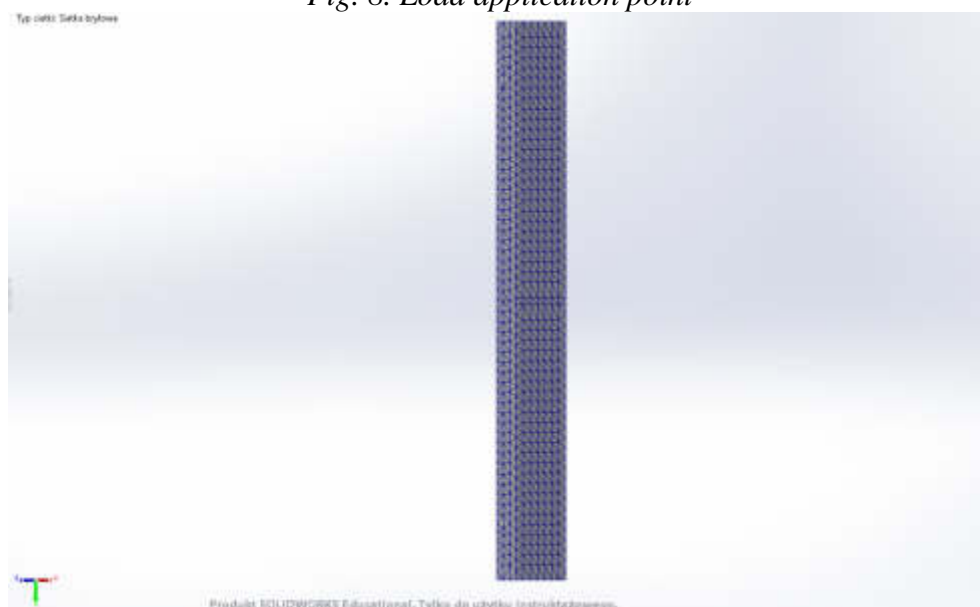


Rys. 7. Miejsce przyłożenia podpór  
Fig. 7. Location of supports



Rys. 8. Miejsce przyłożenia obciążenia

Fig. 8. Load application point



Rys. 9. Nałożona siatka na model

Fig. 9. Applied mesh on the model

Tablica 1. Własności PET i ABS [6]

Table 1. Properties of PET and ABS [6]

| Materiał | Współczynnik sprężystości [MPa] | Współczynnik Poissona | Masa właściwa [Kg/m <sup>3</sup> ] | Wytrzymałość na rozciąganie [MPa] |
|----------|---------------------------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| PET      | 2960                            | 0,37                  | 1420                               | 57,3                              |
| ABS      | 2000                            | 0,394                 | 1020                               | 30                                |

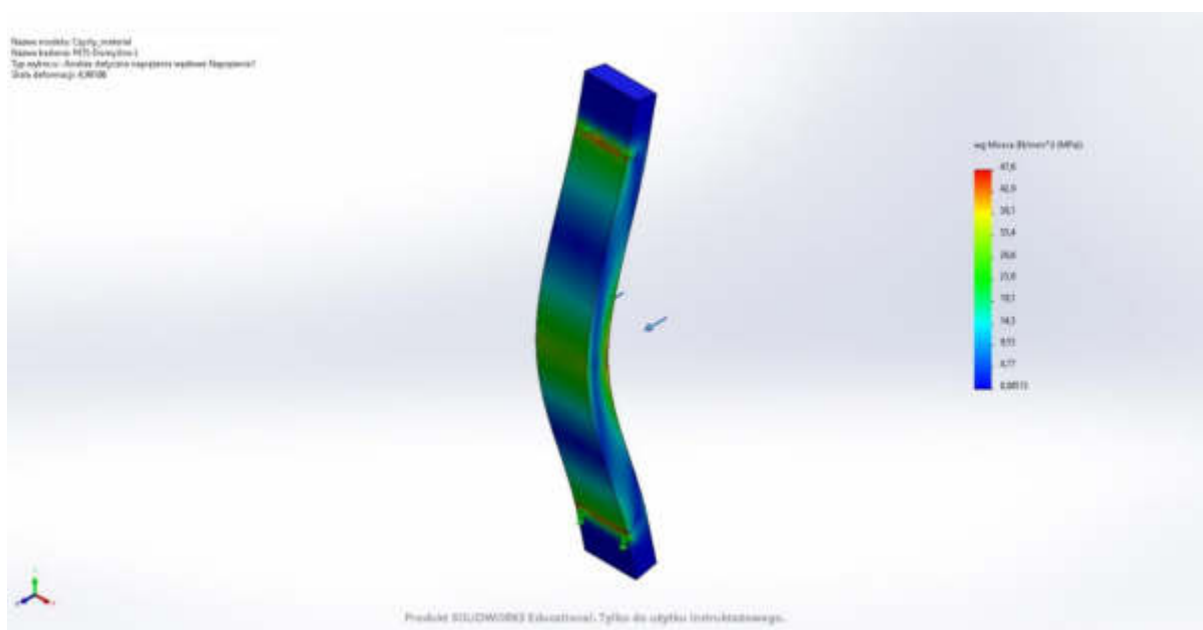
Warunki brzegowe symulacji:

- siła – 100 N,

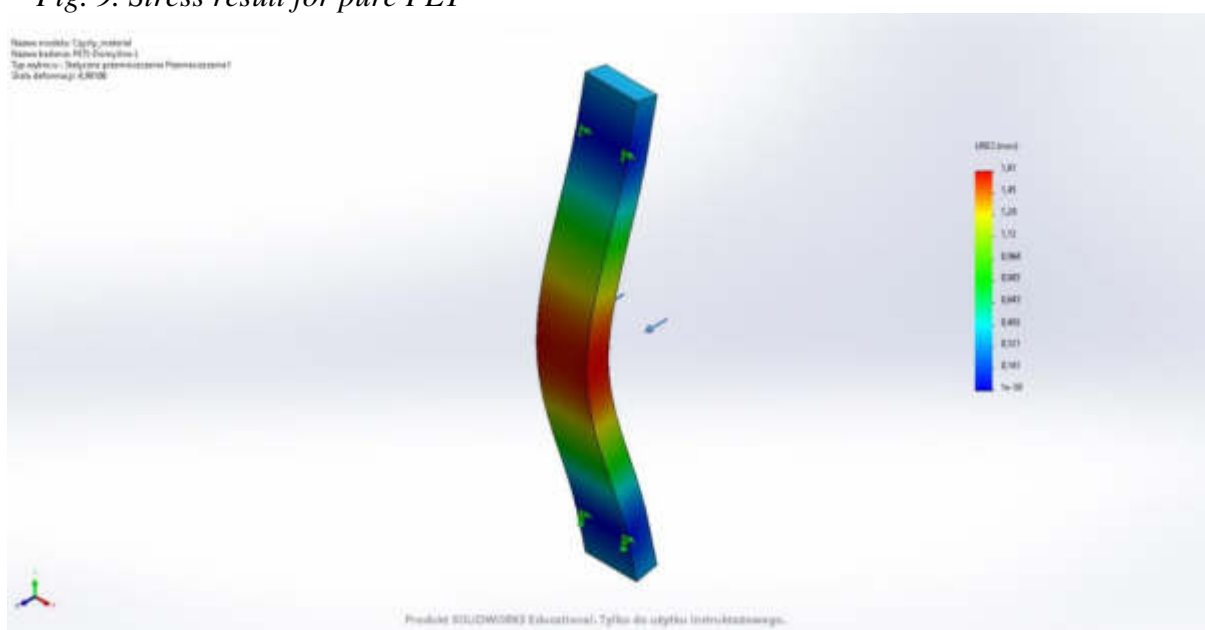
- odległość przeciwległych umocowań (rys. 7) wg normy ISO 178 – 64 mm,
- miejsce przyłożenia siły (rys. 8).

### 3. PRZEBIEG SYMULACJI

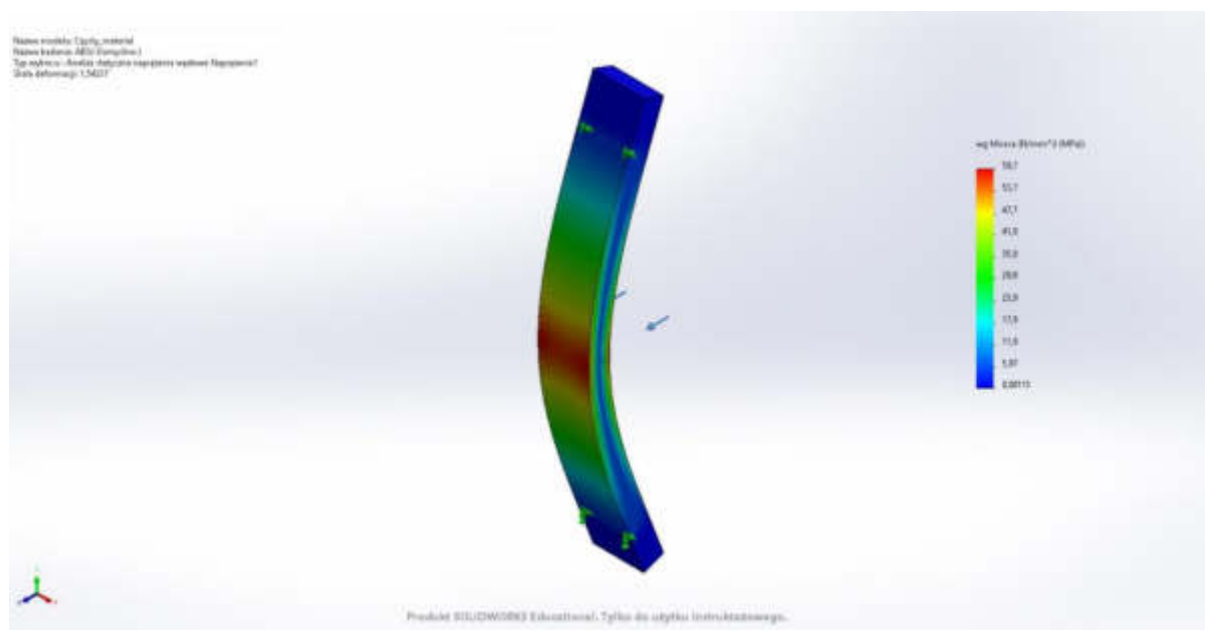
W wyniku przeprowadzonych symulacji MES otrzymano rozkład naprężeń w analizowanych modelach oraz wartość przemieszczeń, które przedstawiono na rys. 9 – 28 oraz w tablicach 2 i 3.



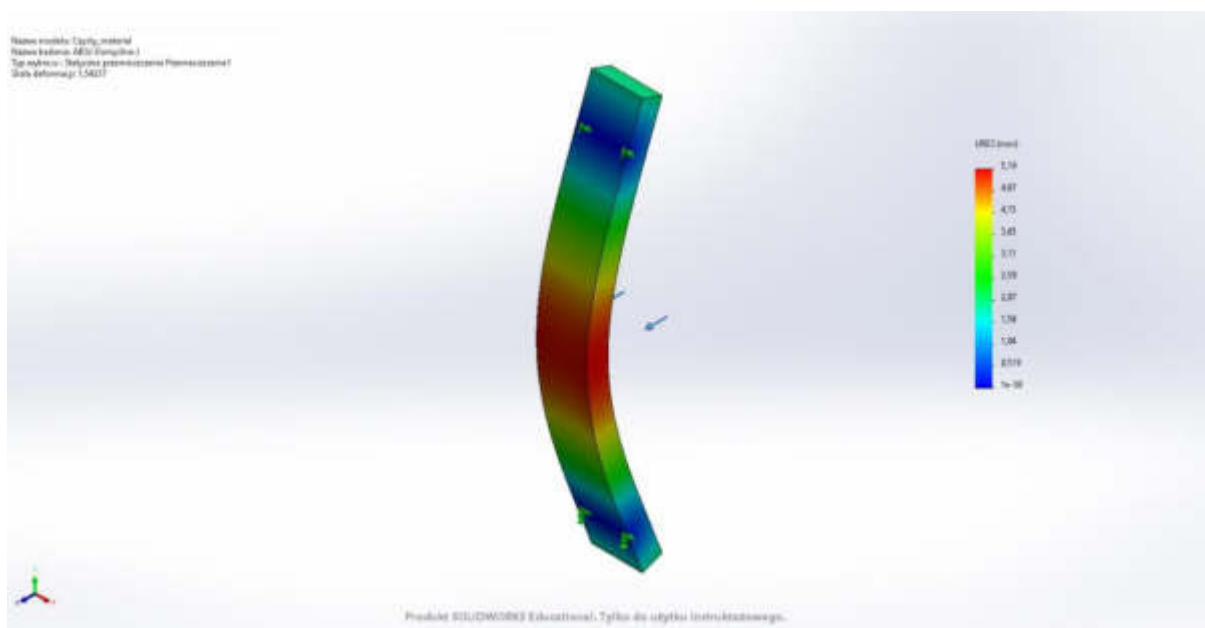
Rys. 9. Wynik naprężeń dla czystego PET  
*Fig. 9. Stress result for pure PET*



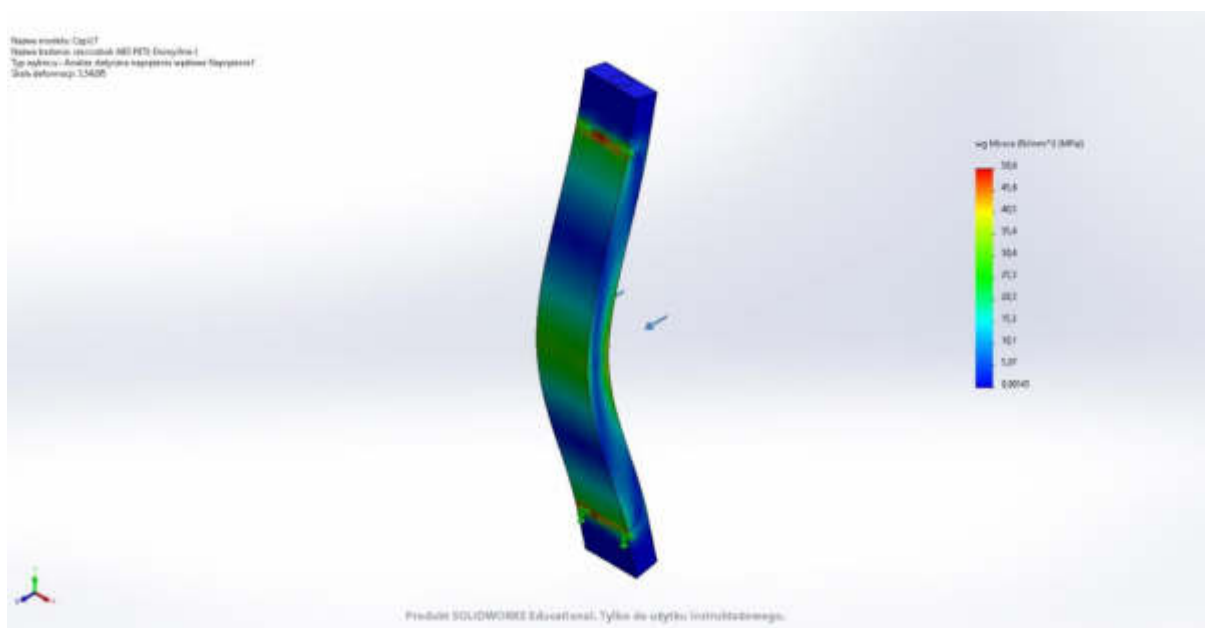
Rys. 10. Wynik przemieszczeń dla czystego PET  
*Fig. 10: Displacement result for pure PET*



Rys. 11. Wynik naprężeń dla czystego ABS  
*Fig. 11. Stress result for pure ABS*

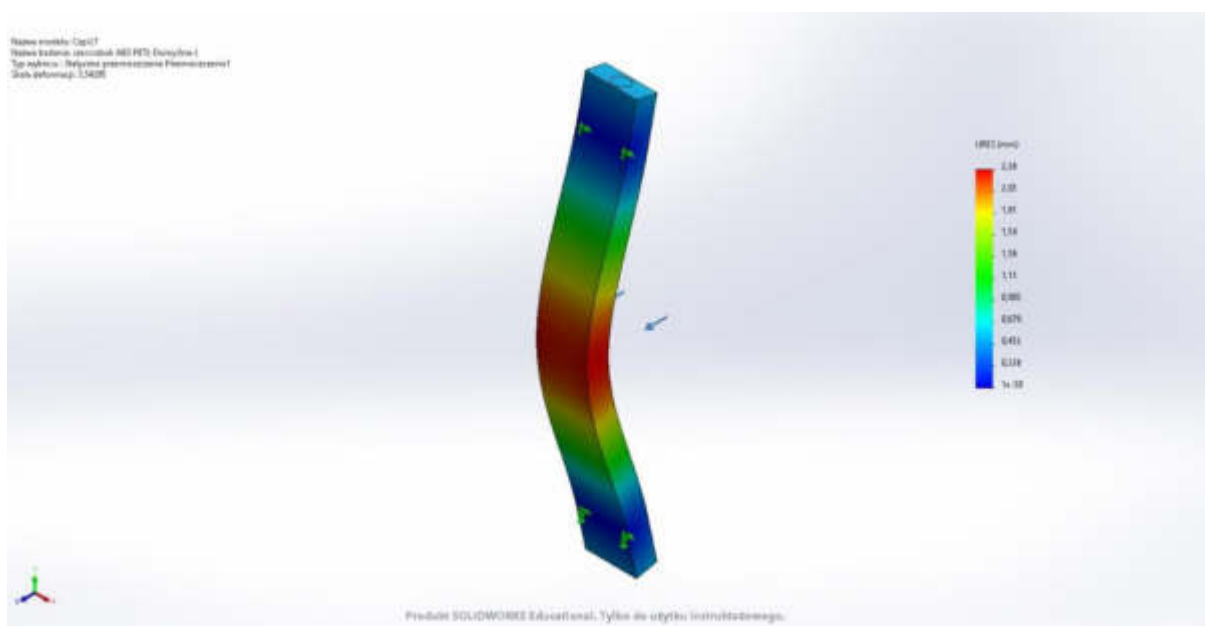


Rys. 12. Wynik przemieszczeń dla czystego ABS  
*Fig. 12: Displacement result for pure ABS*



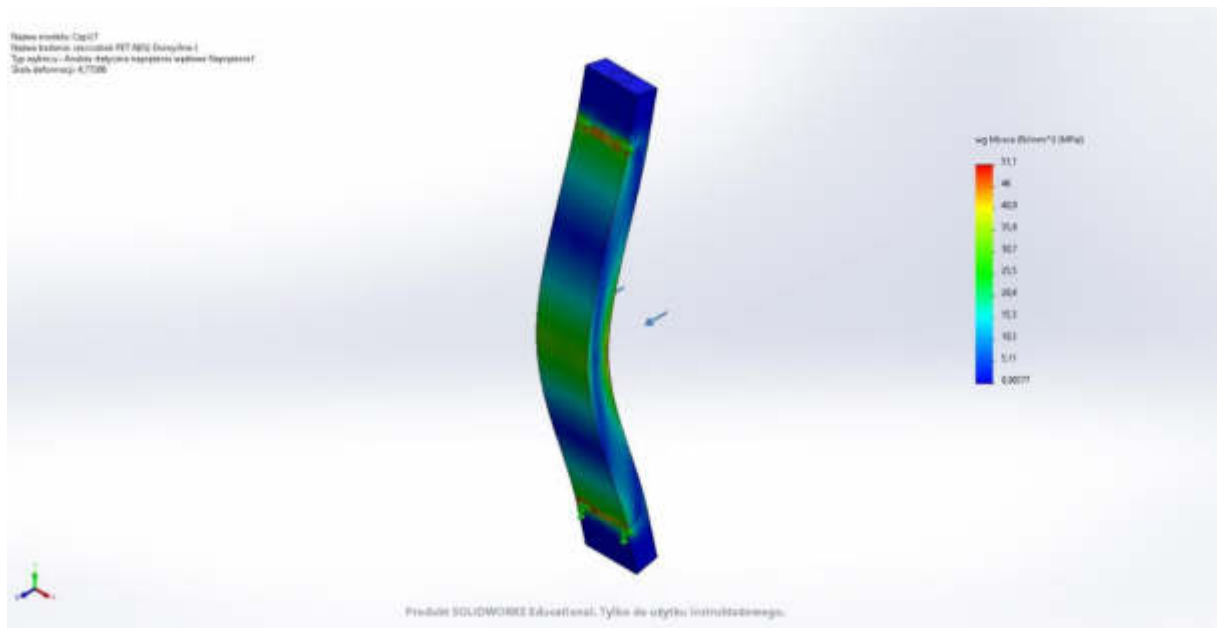
Rys. 13. Wynik naprężeń modelu z wzmocnieniem w kształcie sześcioboku o osnowie ABS i wzmocnieniem PET

*Fig. 13. Stress result of the model with hexagonal reinforcement of ABS matrix and PET reinforcement*



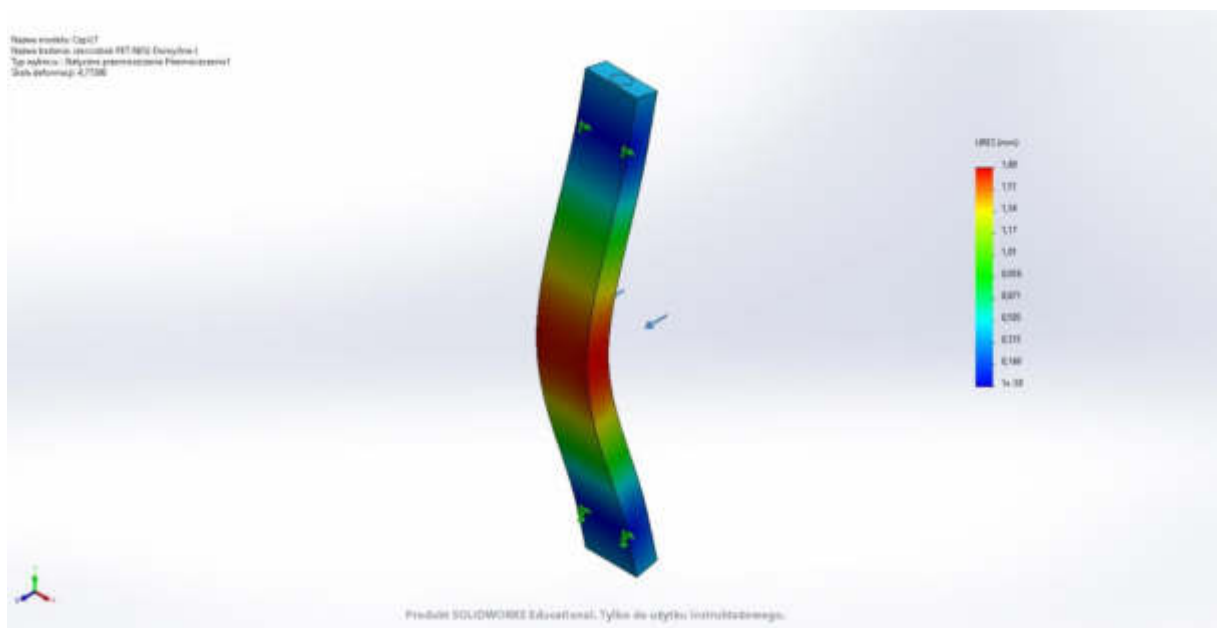
Rys. 14. Wynik przemieszczeń modelu z wzmocnieniem w kształcie sześcioboku o osnowie ABS i wzmocnieniem PET

*Fig. 14. Displacement result of the model with hexagonal reinforcement of ABS matrix and PET reinforcement*



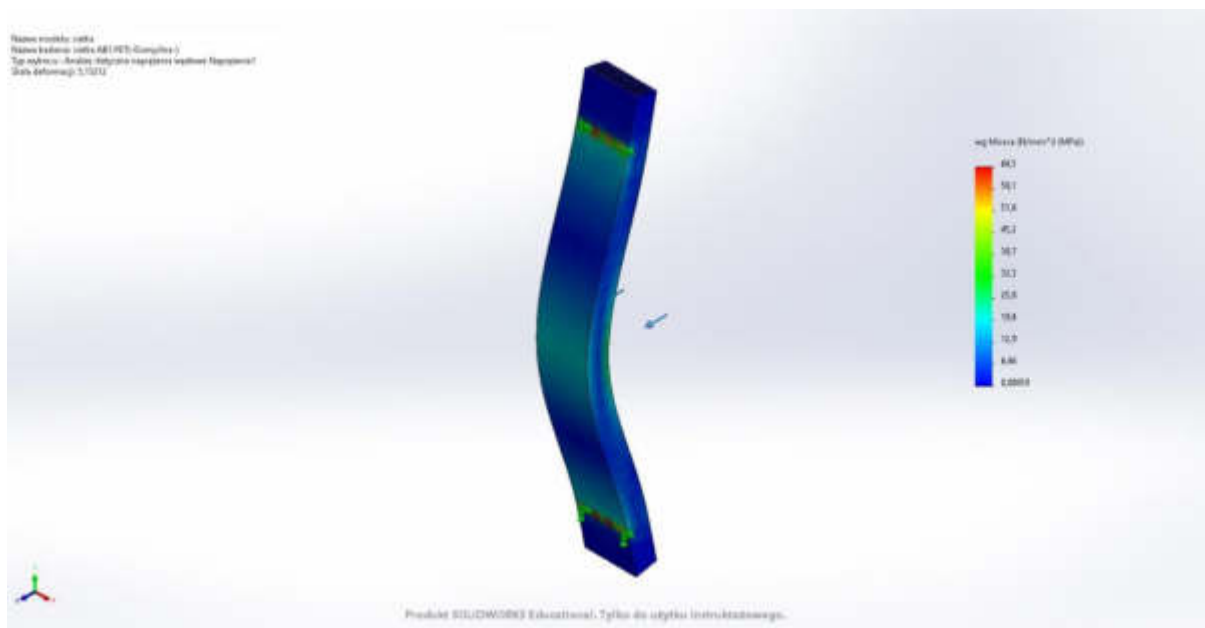
Rys. 15. Wynik naprężeń modelu z wzmocnieniem w kształcie sześcioboku o osnowie PET i wzmocnieniem ABS

Fig. 15. Stress result of the model with hexagonal reinforcement of PET matrix and ABS reinforcement



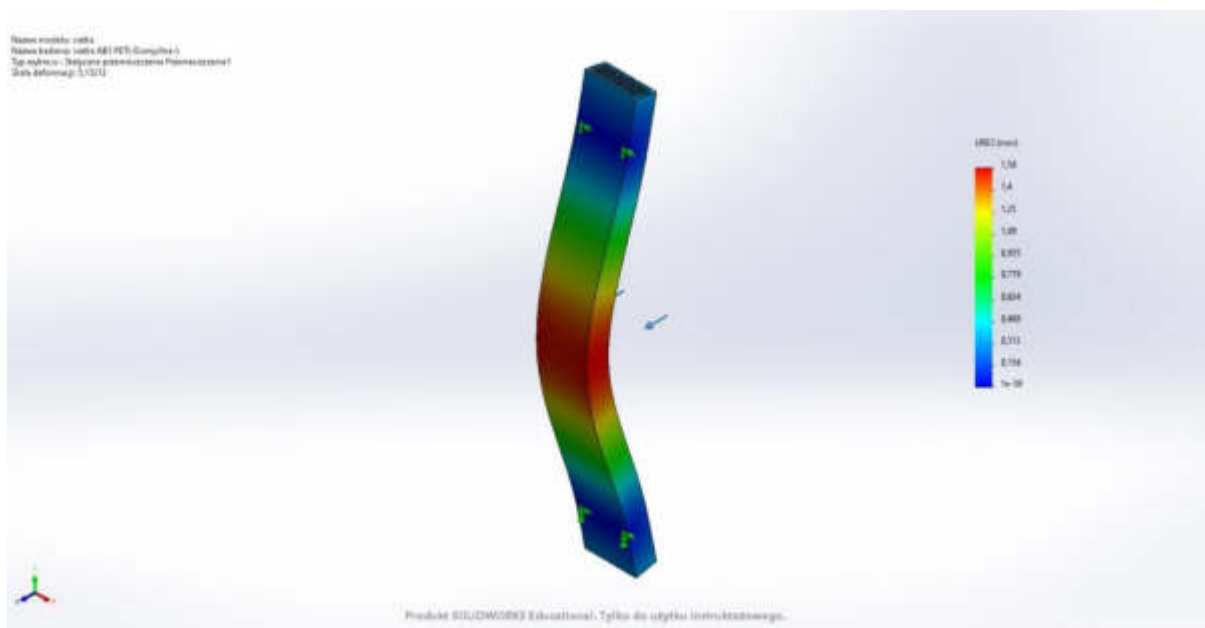
Rys. 16. Wynik przemieszczeń modelu z wzmocnieniem w kształcie sześcioboku o osnowie PET i wzmocnieniem ABS

Fig. 16. Displacement result of the model with hexagonal reinforcement of PET matrix and ABS reinforcement



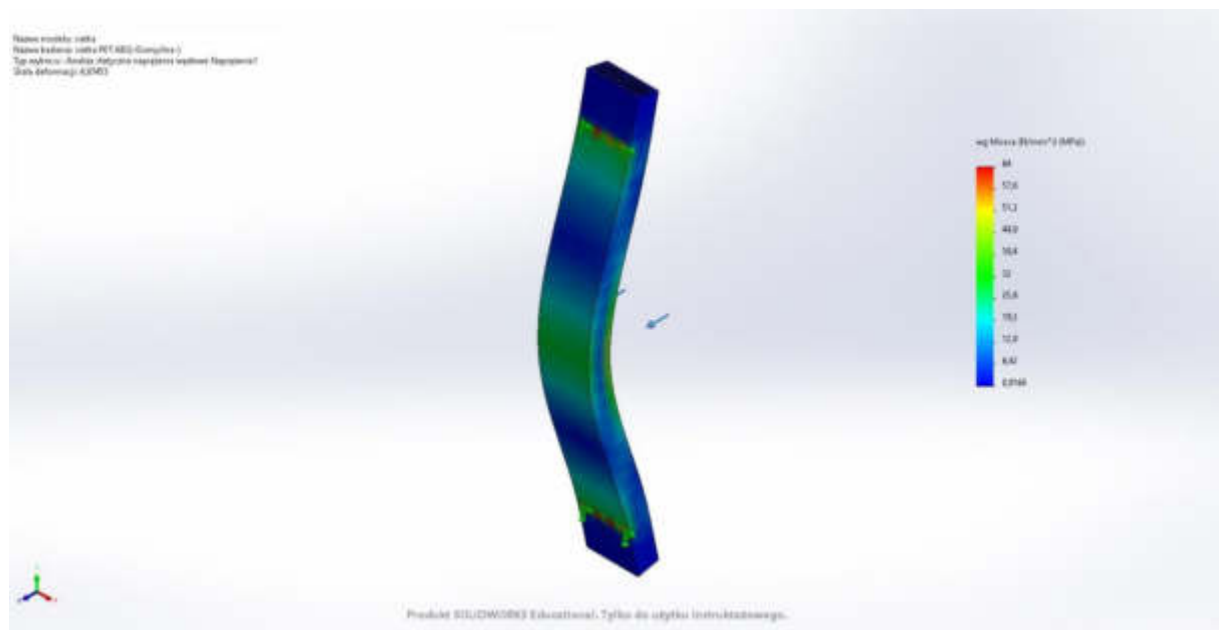
Rys. 17. Wynik naprężeń modelu z wzmocnieniem w kształcie siatki o osnowie ABS i wzmocnieniem PET

Fig. 17. Stress result of the model with ABS mesh reinforcement and PET reinforcement



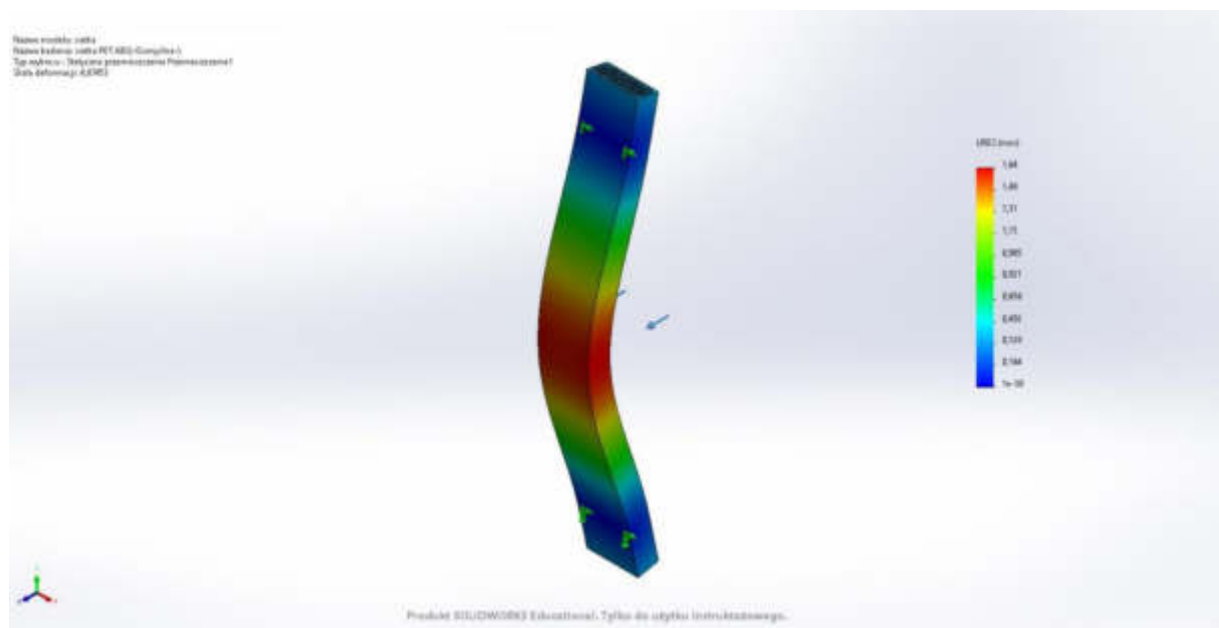
Rys. 18. Wynik przemieszczeń modelu z wzmocnieniem w kształcie siatki o osnowie ABS i wzmocnieniem PET

Fig. 18. Displacement result of the model with ABS matrix mesh reinforcement and PET reinforcement



Rys. 19. Wynik naprężeń modelu z wzmocnieniem w kształcie siatki o osnowie PET i wzmocnieniem ABS

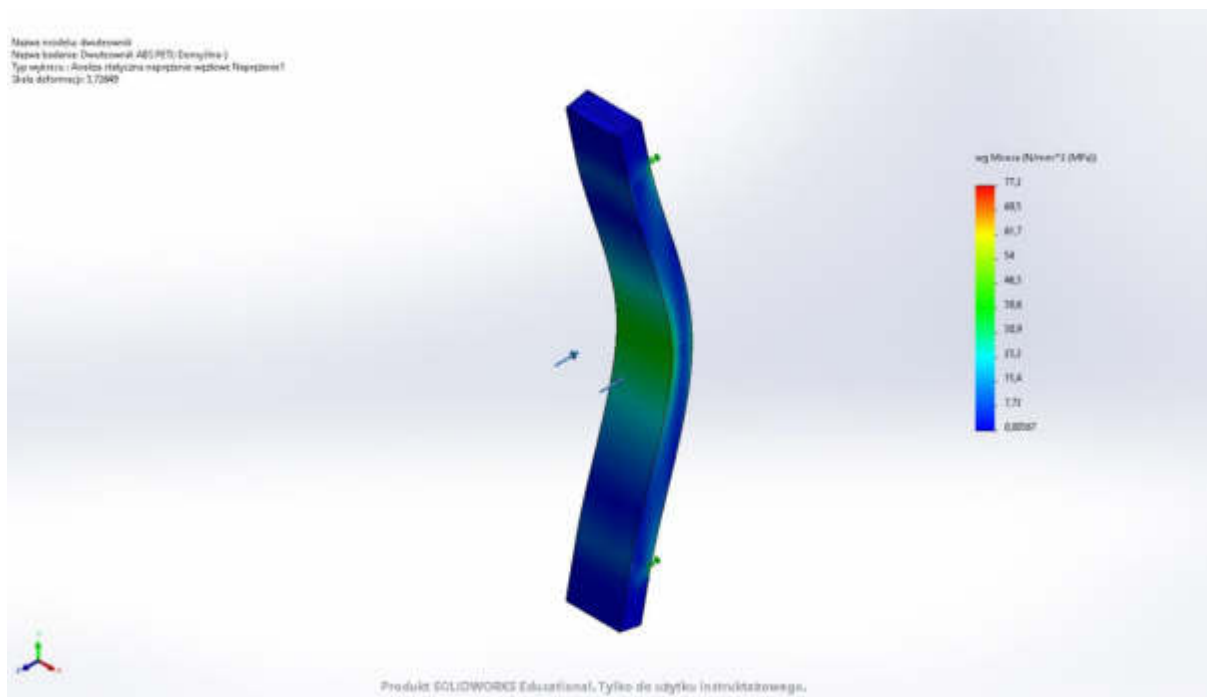
*Fig. 19. Stress result of the model with PET mesh reinforcement and ABS reinforcement*



Rys. 20. Wynik przemieszczeń modelu z wzmocnieniem w kształcie siatki o osnowie PET i wzmocnieniem ABS

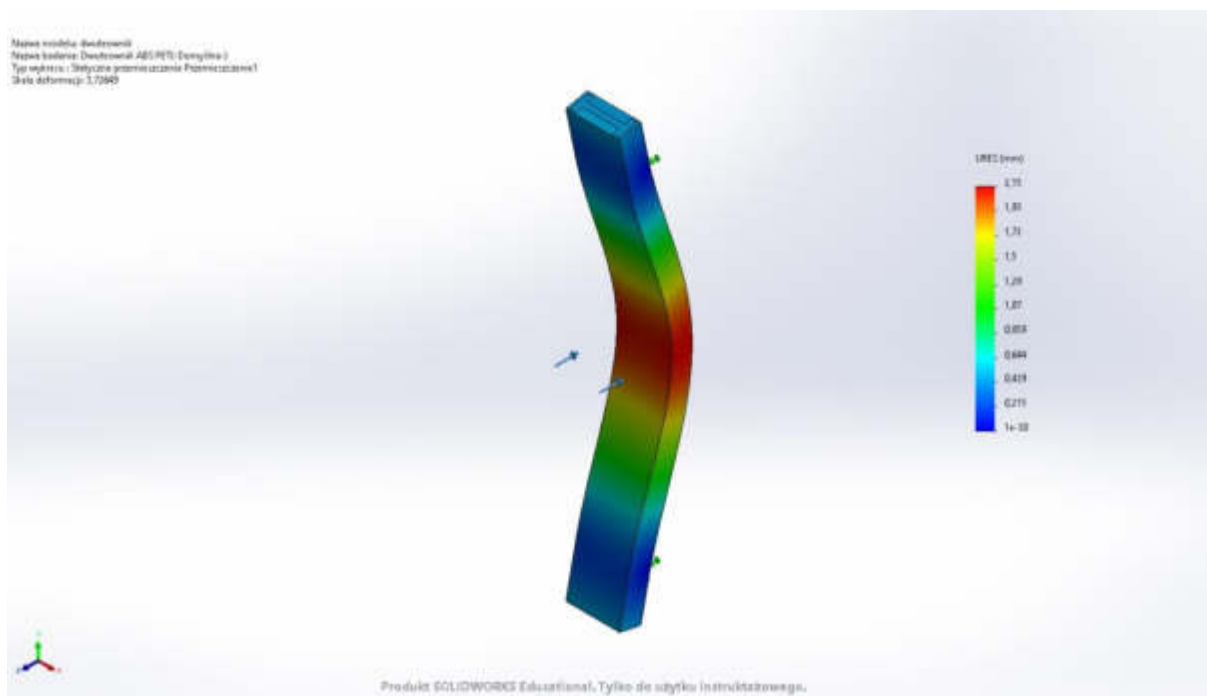
*Fig. 20. Displacement result of the model with PET matrix mesh reinforcement and ABS reinforcement*





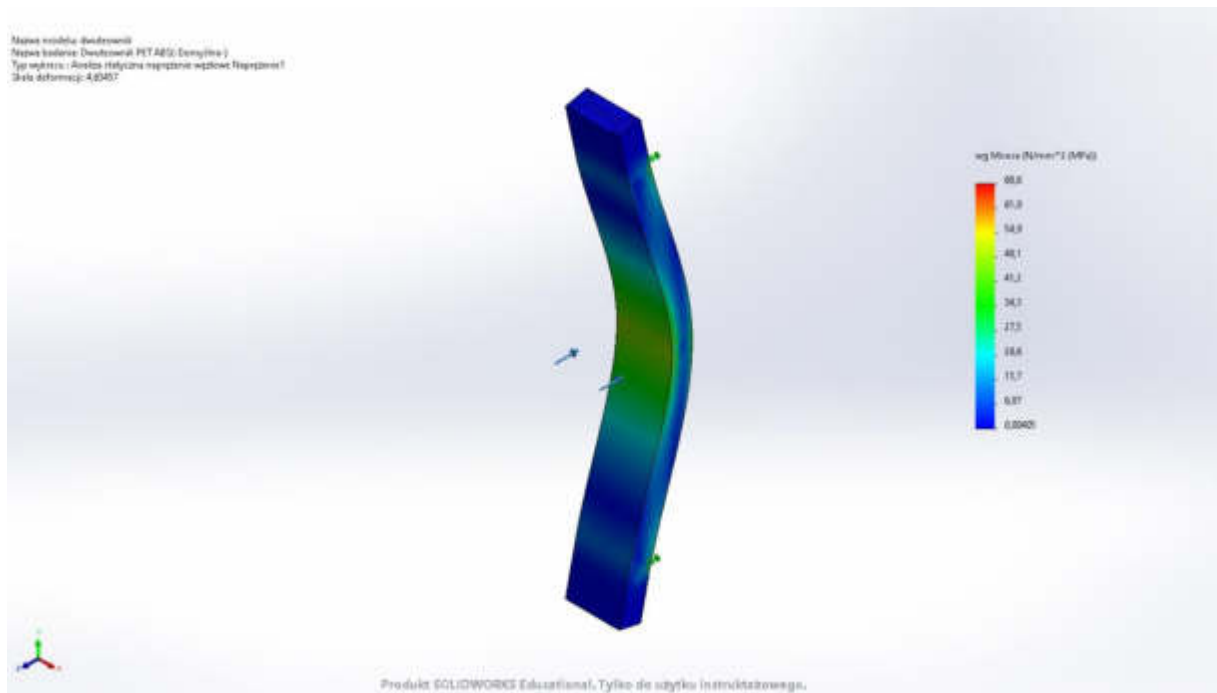
Rys. 21. Wynik naprężenia modelu z wzmocnieniem w kształcie dwuteownika o osnowie ABS i wzmocnieniem PET

Fig. 21. Stress result of the model with ABS matrix I-beam reinforcement and PET reinforcement



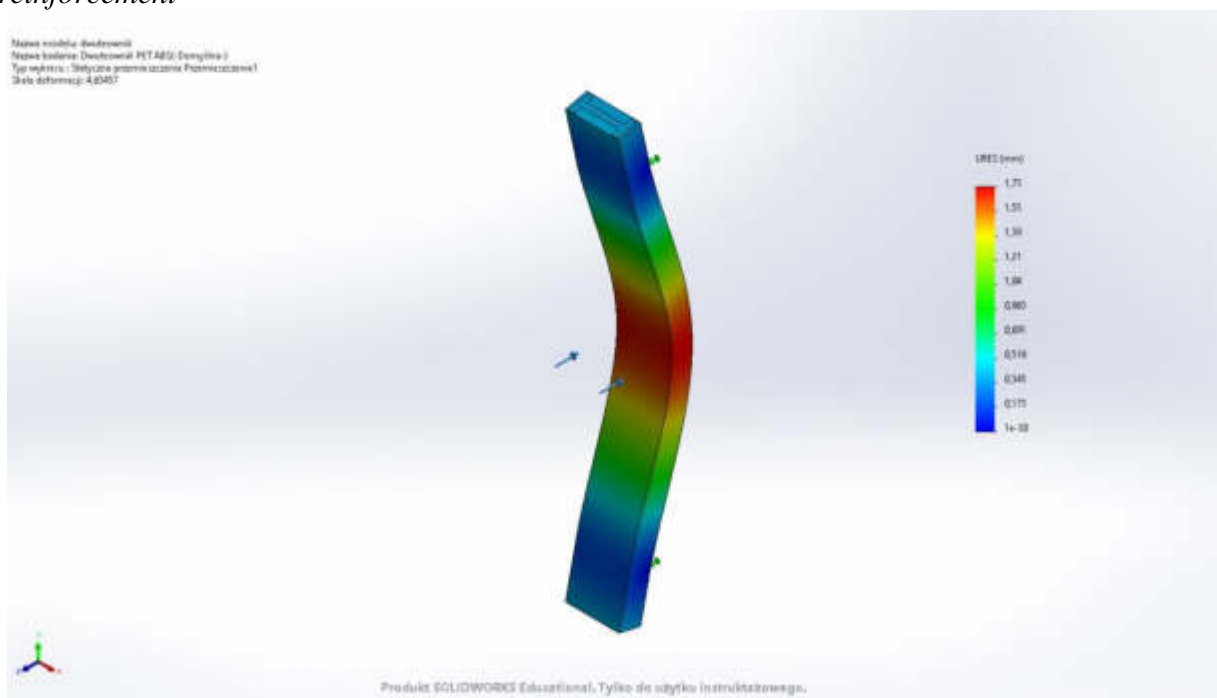
Rys. 22. Wynik przemieszczenia modelu z wzmocnieniem w kształcie dwuteownika o osnowie ABS i wzmocnieniem PET

Fig. 22. Displacement result of the model with ABS matrix I-beam reinforcement and PET reinforcement



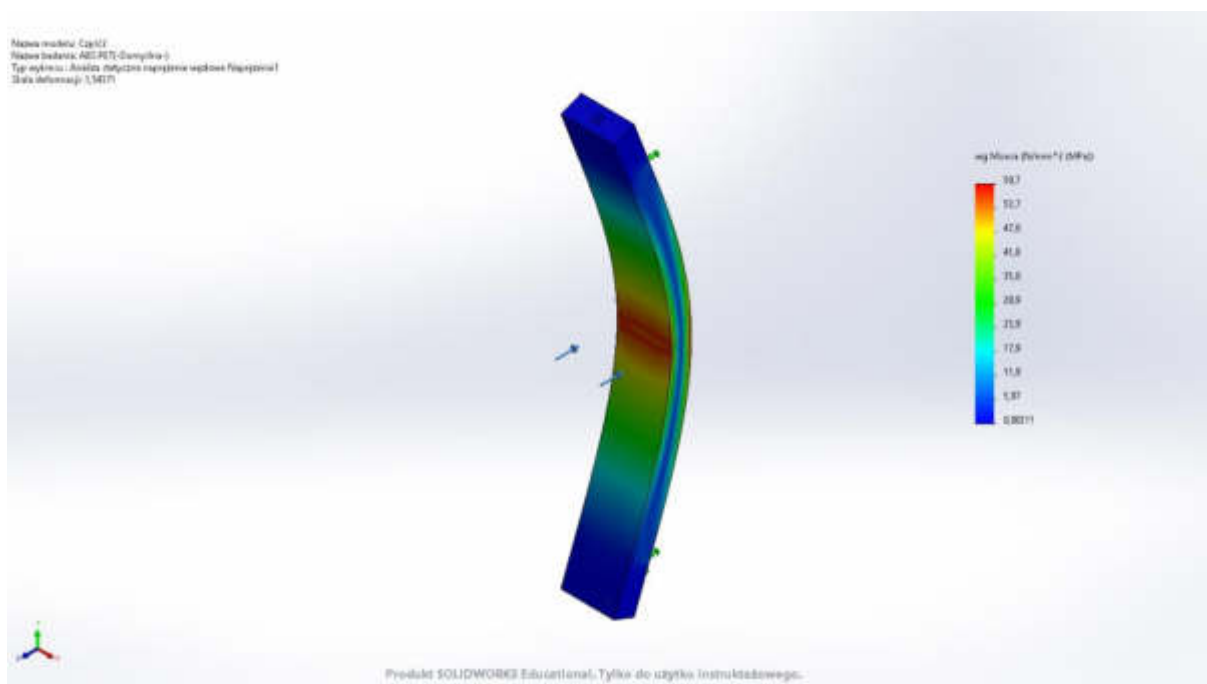
Rys. 23. Wynik naprężenia modelu z wzmocnieniem w kształcie dwuteownika o osnowie PET i wzmocnieniem ABS

Fig. 23. Stress result of the model with PET matrix I-beam reinforcement and ABS reinforcement



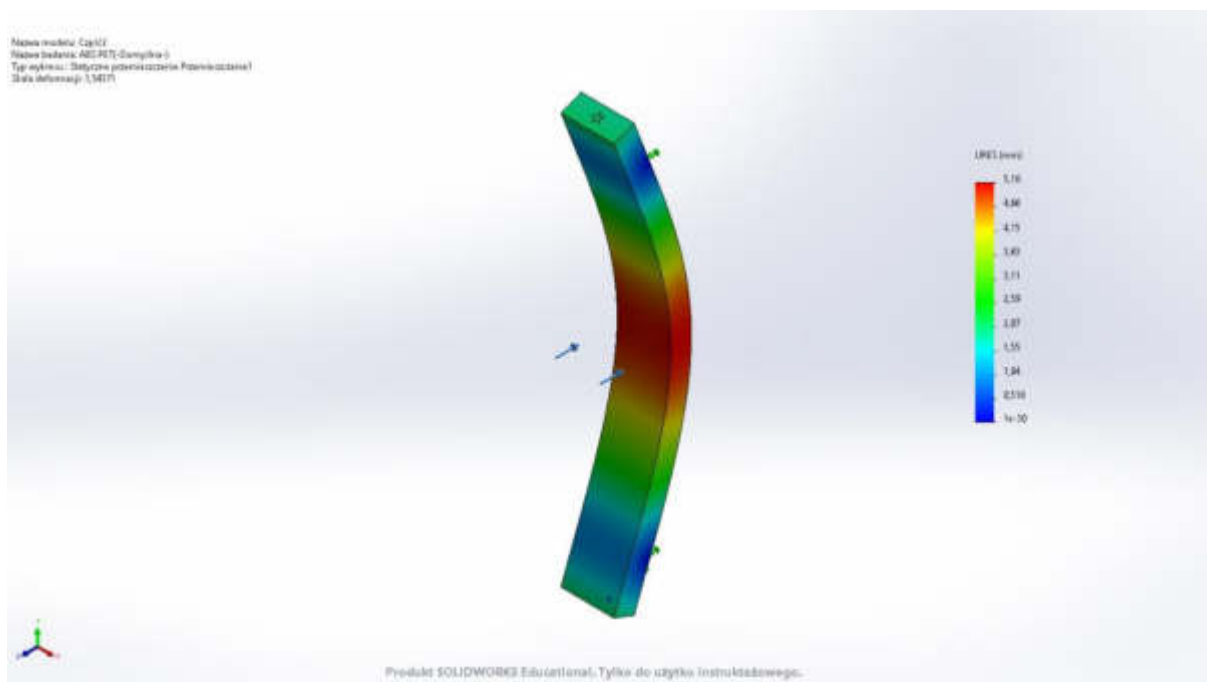
Rys. 24. Wynik przemieszczenia modelu z wzmocnieniem w kształcie dwuteownika o osnowie PET i wzmocnieniem ABS

Fig. 24. Displacement result of the model with PET matrix I-beam reinforcement and ABS reinforcement



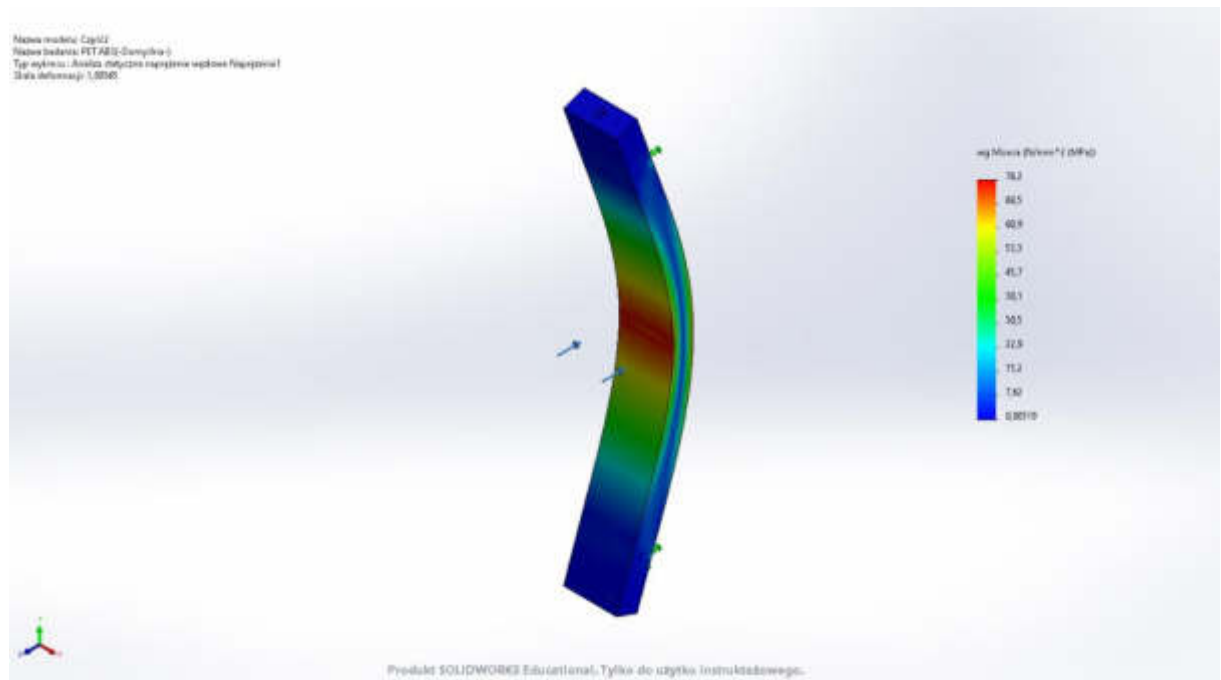
Rys. 25. Wynik naprężenia modelu z wzmocnieniem w kształcie gwiazdy o osnowie ABS i wzmocnieniem PET

*Fig. 25. Stress result of the model with star-shaped ABS matrix reinforcement and PET reinforcement*



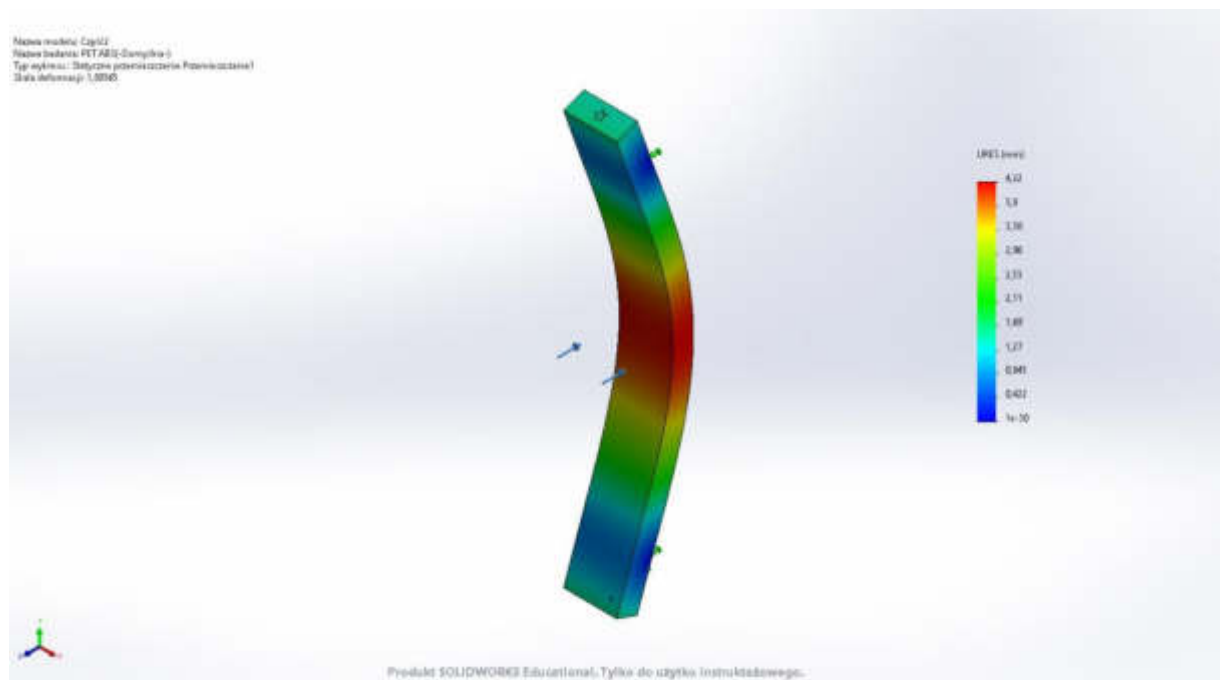
Rys. 26. Wynik przemieszczenia modelu z wzmocnieniem w kształcie gwiazdy o osnowie ABS i wzmocnieniem PET

*Fig. 26. Displacement result of the model with star-shaped ABS matrix reinforcement and PET reinforcement*



Rys. 27. Wynik naprężenia modelu z wzmocnieniem w kształcie gwiazdy o osnowie PET i wzmocnieniem ABS

Fig. 27. Stress result of the model with star-shaped PET matrix reinforcement and ABS reinforcement



Rys. 28. Wynik przemieszczenia modelu z wzmocnieniem w kształcie gwiazdy o osnowie PET i wzmocnieniem ABS

Fig. 28. Displacement result of the model with star-shaped PET matrix reinforcement and ABS reinforcement

#### 4. WYNIKI

W tablicach 2 i 3 przedstawiono wyniki badań z przeprowadzonych symulacji.

Tablica 2. Wyniki maksymalnych naprężeń oraz przemieszczeń dla modeli wykonanych z osnowy ABS oraz wzmocnienia PET

Table 2. Results of maximum stresses and displacements for models made of ABS matrix and PET reinforcement

| Model      | Naprężenie [MPa] | Przemieszczenie [mm] |
|------------|------------------|----------------------|
| PET        | 47,6             | 1,61                 |
| ABS        | 59,7             | 5,19                 |
| Sześciobok | 50,6             | 2,26                 |
| Siatka     | 64,5             | 1,56                 |
| Dwuteownik | 77,2             | 2,15                 |
| Gwiazda    | 59,7             | 5,18                 |

Tablica 3. Wyniki maksymalnych naprężeń oraz przemieszczeń dla modeli wykonanych z osnowy PET oraz wzmocnienia ABS

Table 3. Results of maximum stresses and displacements for models made of PET matrix and ABS reinforcement

| Model      | Naprężenie [MPa] | Przemieszczenie [mm] |
|------------|------------------|----------------------|
| PET        | 47,6             | 1,61                 |
| ABS        | 59,7             | 5,19                 |
| Sześciobok | 51,1             | 1,68                 |
| Siatka     | 64               | 1,64                 |
| Dwuteownik | 68,6             | 1,73                 |
| Gwiazda    | 76,2             | 4,22                 |

Z otrzymanych wyników symulacji można wywnioskować, że z spośród wybranych geometrii wzmocnienia najwyższe odnotowane naprężenie o wartości 77,2 MPa w przypadku osnowy wykonanej z ABS zarejestrowana dla wzmocnienia w postaci dwuteownika, z kolei przemieszczenie 5,18 mm w przypadku wzmocnienia o kształcie gwiazdy co jest niemalże identycznym wynikiem jak w przypadku czystego ABS, ponadto naprężenia występujące w tych dwóch modelach jest takiej samej wartości – 59,7 MPa. Natomiast, gdy osnowa jest wykonana z PET najwyższym naprężeniem jak i również przemieszczaniem charakteryzuje się model typu gwiazda – odpowiednio 76,2 MPa i 1,16 mm. Na podstawie wyników można stwierdzić, że geometria wzmocnienia kompozytów wpływa na wytrzymałość mechaniczną, a tym samym na odkształcenia elementów poddanych obciążeniu kompozytów. Można również zauważyć, że materiały użyte osobno są, posiadają niższe własności niż poszczególne kompozyty. Na wytrzymałość mechaniczną kompozytów wpływa również konfiguracja, który materiał jest wykorzystany na osnowę/wzmocnienie.

Wyniki:

a) dla próbek wykonanych z osnowy PET:

- najbardziej wytrzymała próbka – wzmocnienie w kształcie sześcioboku,
- próbka z najmniejszym odkształceniem – wzmocnienie w kształcie siatki,
- najmniej wytrzymała próbka – wzmocnienie w kształcie gwiazdy,
- próbka z największym odkształceniem – wzmocnienie w kształcie gwiazdy.

b) dla próbek wykonanych z osnowy ABS:

- najbardziej wytrzymała próbka – wzmocnienie w kształcie sześcioboku,
- próbka z najmniejszym odkształceniem – wzmocnienie w kształcie siatki,
- najmniej wytrzymała próbka – wzmocnienie w kształcie dwuteownika,
- próbka z największym odkształceniem – wzmocnienie w kształcie gwiazdy.

## 5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań wysunięto następujące wnioski:

- geometria wzmocnienia kompozytu wpływa na jego wytrzymałość,
- najlepszymi własnościami mechanicznymi charakteryzowały się próbki ze wzmocnieniem typu sześciobok,
- najlepsze własności mechaniczne uzyskano dla modelu, w którym na osnowę zastosowano materiał ABS a na wzmocnienie materiał PET.

## PODZIĘKOWANIE

Niniejsze opracowanie powstało w ramach działań Studenckiego Koła Naukowego „GYROID” działającego przy Katedrze Materiałów inżynierskich i Biomedycznych na wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

## BIBLIOGRAFIA

1. „Badanie i modelowanie połączeń nitowych w lotniczych strukturach kompozytowych” Radosław Bielawski, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska
2. „Ekologiczny samochód. Wzmocnione tworzywa sztuczne w technice motoryzacyjnej. Rozważania konstrukcyjne.” Karol Bielefeldt, Władysław Papacz, Janusz Walkowiak, Uniwersytet Zielonogórski.
3. „Kompozyty polimerowe z roślinnymi włóknami naturalnymi na potrzeby współczesnej motoryzacji” Joanna Pach, Paulina Mayer.
4. „Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo” L. A. Dobrzański, WNT Warszawa 2002
5. „Nauka o materiałach Wykład VII: Kompozyty” Jerzy Lis, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków
6. Baza danych programu Solidworks.

## Analiza wytrzymałościowa belki zderzaka przedniego samochodu osobowego

W. Mikołajko <sup>a</sup>, A. Śliwa <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Student/ka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email: wojcmik825@student.polsl.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład

email: agata.sliwa@polsl.pl

**Streszczenie:** W niniejszym artykule przedstawiono symulację komputerową przeprowadzoną w środowisku Solidworks, belki zderzaka samochodu osobowego wykonanej z różnych stopów aluminium oraz różnego rodzaju wzmocnienia w jej przekroju mającego wpływ na wytrzymałość całego elementu w momencie zderzenia. Ponadto zastosowano trzy różne siły odzwierciedlające zderzenie samochodu. Określono miejsca o najwyższej wartości naprężeń i przemieszczeń oraz wartość siły krytycznej przy której następuje odkształcenie elementu.

**Abstract:** This article presents a computer simulation carried out in the Solidworks environment, the bumper beam of a passenger car was tested. The simulation took into account the influence of various aluminum alloys and the type of reinforcement in the cross-section of the beam on the strength of the entire element at the time of collision at different forces. The analysis provided answers in which places the accumulation of stresses occurs, and thus the places most exposed to destruction. . Places of maximum values of stress and displacement were defined as well as the force that causes the buckling deformation.

**Słowa kluczowe:** Symulacja komputerowa, automotive, belka zderzaka, MES

### 1. WSTĘP

Dynamiczny rozwój przemysłu motoryzacyjnego na przestrzeni ostatnich dekad jest szczególnie widoczny w coraz to lepszych rozwiązaniach technologicznych polepszających komfort podróżowania. Lecz nie tylko komfort jazdy staje się lepszy, udoskonaleniu ulegają również czynniki poprawiające bezpieczeństwo osób znajdujących się w środku pojazdu podczas kolizji. Do rozwiązań poprawiających ten czynnik należy wymienić stosowane materiały konstrukcyjne do, których w głównej mierze należą [1]:

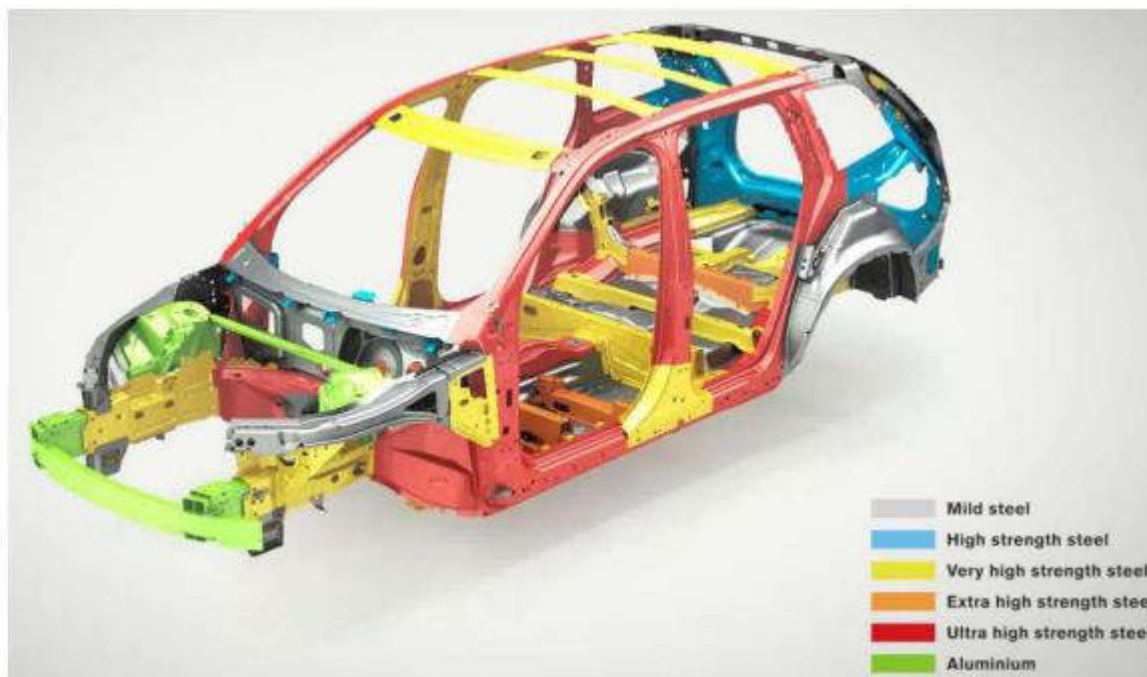
- metale żelazne – stal ultra-wytrzymała, stal wysokiej wytrzymałości,
- metale nieżelazne – aluminium, rzadziej tytan,

- kompozyty polimerowe,
- szkło.

Jednym z rozwiązań realnie wpływających na bezpieczeństwo podczas wypadku należy belka zderzaka, która montowana jest za poszyciem zewnętrznym zderzaka ( najbardziej wysunięta część konstrukcji samochodu zaznaczona kolorem zielonym Rys. 1.).

Zadaniem belki zderzaka jest absorpcja siły uderzenia powstałego w wyniku kolizji. Co za tym idzie wpływa na bezpieczeństwo jak i komfort jazdy, do materiałów stosowanych do ich produkcji należą konstrukcyjne stopy aluminium. Zastosowanie stopów aluminium jest w dzisiejszych czasach coraz bardziej powszechne ze względu na znakomite własności takie jak [2]:

- wysoka wytrzymałość,
- dużo lepsza odporność korozyjna niż w przypadku stali,
- niższy od stali ciężar właściwy, co powoduje obniżenie masy samochodu dzięki czemu pojazdy są bardziej ekologiczne,
- dobre przewodnictwo cieplne oraz niska rozszerzalność cieplna [3,].



Rys. 1. Konstrukcja samochodu Volvo XC90 z oznaczonymi materiałami wykorzystywanymi do ich produkcji[4].

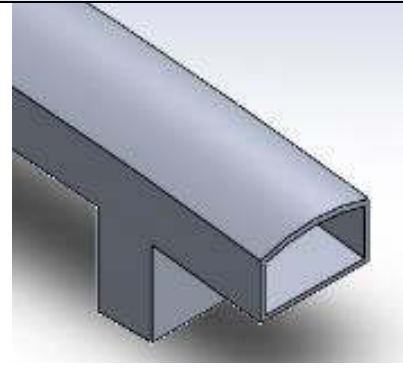
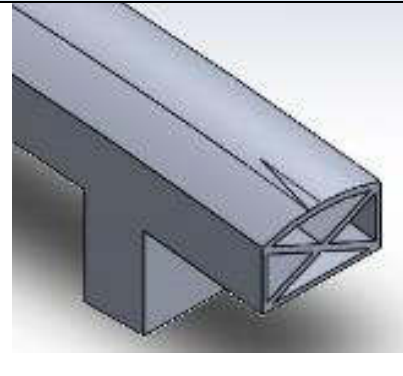
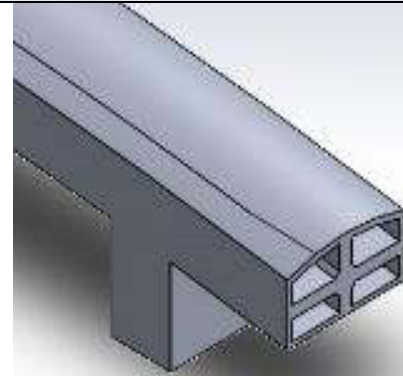
*Fig. 1. Construction of Volvo XC90 car with marked materials used for their production[4]*

## 2. ZAŁOŻENIA MODELOWE

Korzystając z programu CAD – owskiego Solidworks, zaprojektowano trzy rodzaje belek o jednakowych wymiarach lecz z zmienionym wzmocnieniem ( Rys. 2 – 4 ). Następnie zdefiniowano warunki brzegowe symulacji do których zaliczyć należy umocowanie nieruchome na dwóch podstawach oraz przyłożoną siłę na całej długości belki, tak aby odzwierciedlić uderzenie samochodu w przeszkodę z dużą przeszkodą. W symulacji przyjęto



siłę uderzenia o wartości 125000 [N]. Kolejnym krokiem symulacji było zdefiniowanie materiału z którego jest wykonany zderzak, jest to stop aluminium 6063 – T6, j stop aluminium obrabiony cieplnie oraz naturalnie starzony. Właściwości stopu zestawiono w tablicy 1, natomiast skład chemiczny stopu 6063 przedstawionow tablicy 2.

| Model A  | Model B  | Model C  |
|--|--|--|
|   |                                       |                                      |
| Rys. 2. Belka zderzaka bez wzmocnienia głównego profilu.<br><i>Fig. 2. Bumper beam without main profile reinforcement.</i> | Rys. 3. Belka zderzaka z wzmocnieniem głównego profilu.<br><i>Fig. 3. Bumper beam with main profile reinforcement.</i> | Rys. 4. Belka zderzaka z wzmocnieniem głównego profilu.<br><i>Fig. 4. Bumper beam with main profile reinforcement.</i> |

Taela. 1. Własności stopu aluminium 6063-T6[5].

Table 1. Properties of the 6063-T6 aluminium alloy[5].

| Własność                              | Wartość   | Jednostka         |
|---------------------------------------|-----------|-------------------|
| Współczynnik sprężystości             | 6.9e+10   | N/m <sup>2</sup>  |
| Współczynnik Poissona                 | 0.33      | n.d.              |
| Współczynnik naprężenia ścinającego   | 2.58e+10  | N/m <sup>2</sup>  |
| Masa właściwa                         | 2700      | kg/m <sup>3</sup> |
| Wytrzymałość na rozciąganie           | 240000000 | N/m <sup>2</sup>  |
| Wytrzymałość na ściskanie             |           | N/m <sup>2</sup>  |
| Granica plastyczności                 | 215000000 | N/m <sup>2</sup>  |
| Współczynnik rozszerzalności cieplnej | 2.34e-05  | /K                |
| Współczynnik przewodzenia ciepła      | 209       | W/(m·K)           |
| Ciepło właściwe                       | 900       | J/(kg·K)          |
| Stosunek tłumienia materiału          |           | n.d.              |

Tabela 2. Skład chemiczny stopu aluminium 6063[6].

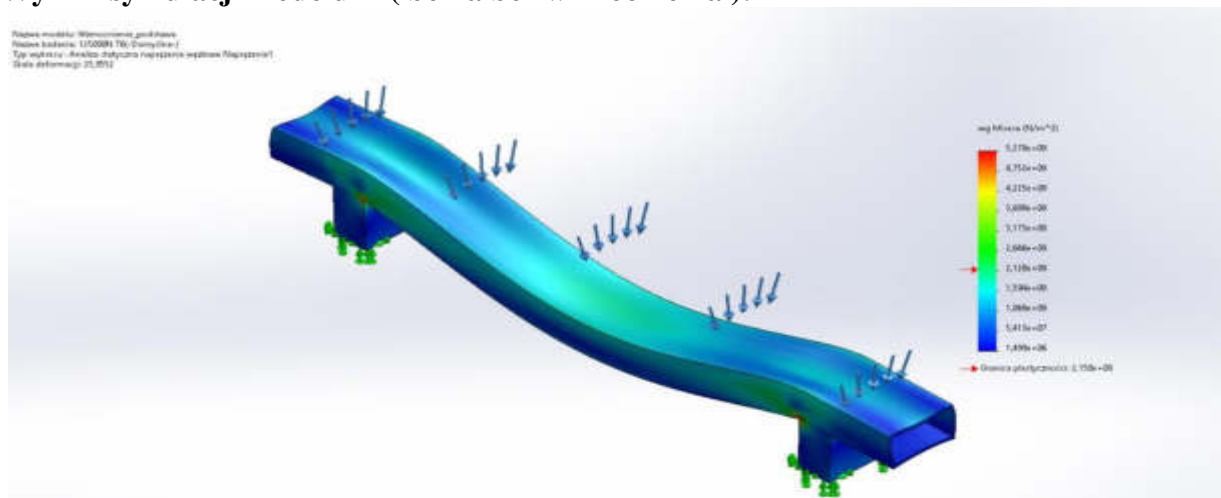
Table 2. Chemical composition of aluminium alloy 6063[6].

| Nazwa stopu | Si [%]  | Fe [%] | Cu [%] | Mn [%] | Mg [%]   | Cr [%] | Zn [%] | Ti [%] |
|-------------|---------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|
| 6063        | 0,2-0,6 | 0,35   | 0,1    | 0,1    | 0,45-0,9 | 0.05   | 0,1    | 0,1    |

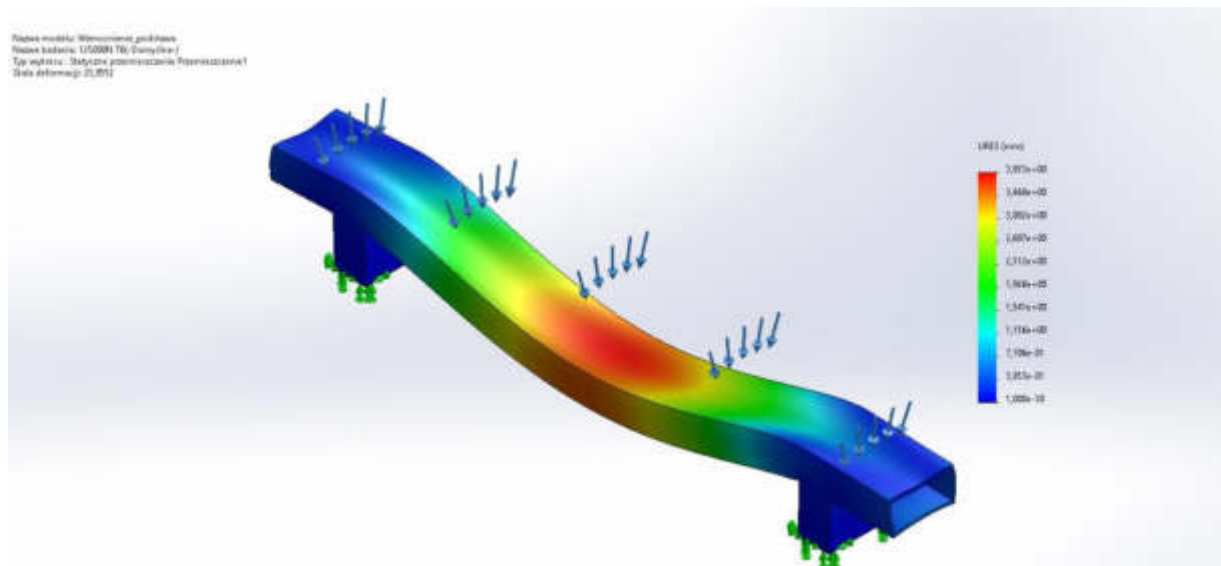
### 3. SYMULACJA KOMPUTEROWA

Dzięki zastosowaniu wymienionych wyżej w pracy warunków brzegowych wykonano dla każdej belki symulacje, biorąc pod uwagę ten sam materiał oraz siłę przyłożoną, co skutkowało przeprowadzeniem trzech symulacji komputerowych. Na rysunkach 5-7 przedstawiono wyniki symulacji komputerowej rozkładu naprężeń, przemieszczeń i odkształceń dla modelu A, belki bez wzmocnienia. Te same własności dla belki B, belki ze wzmocnieniem w kształcie X pokazano na rysunkach 8-10. Rysunki 11-13 obrazują belkę C, wzmocnienie w kształcie krzyża.

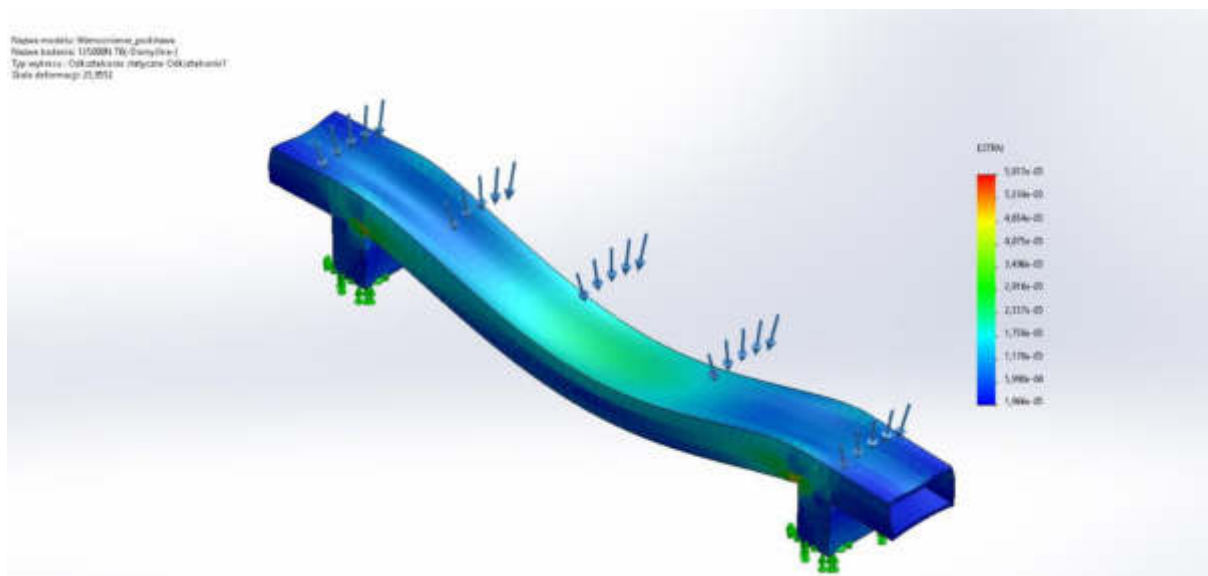
#### Wyniki symulacji modelu A ( belka bez wzmocnienia ):



Rys. 5. Wynik naprężenia modelu A przy sile 125000[N] dla stopu T6.  
Fig. 5. Stress result of model A at a force of 125000[N] for alloy T6.

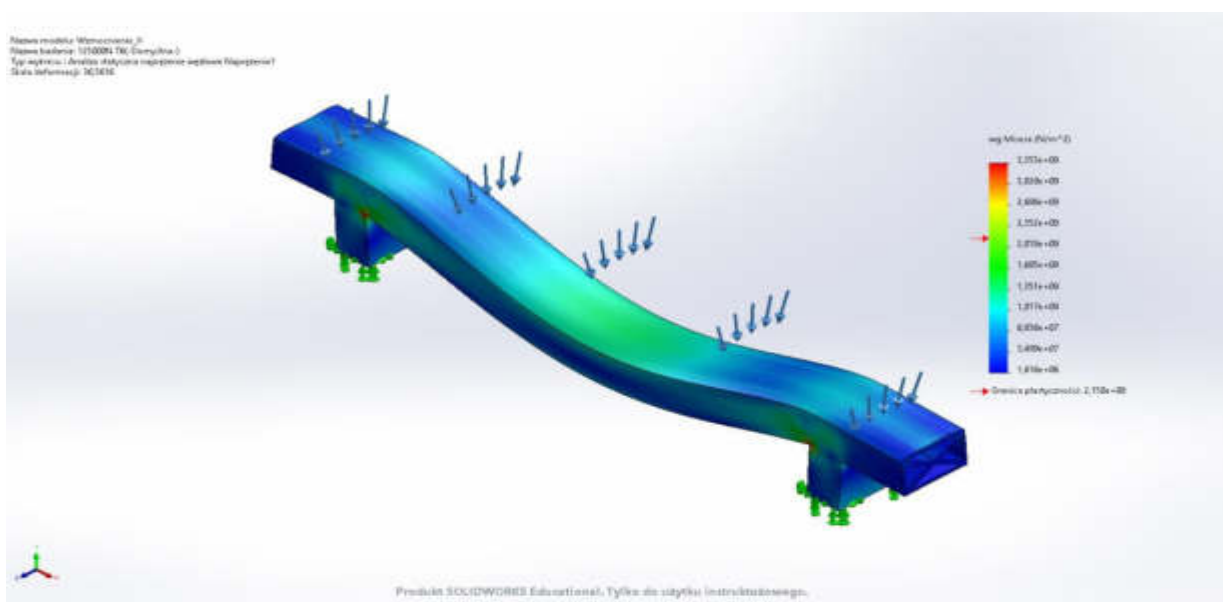


Rys. 6. Wynik przemieszczenia modelu A przy sile 125000[N] dla stopu T6.  
Fig. 6. Displacement result of model A at a force of 125000[N] for alloy T6.

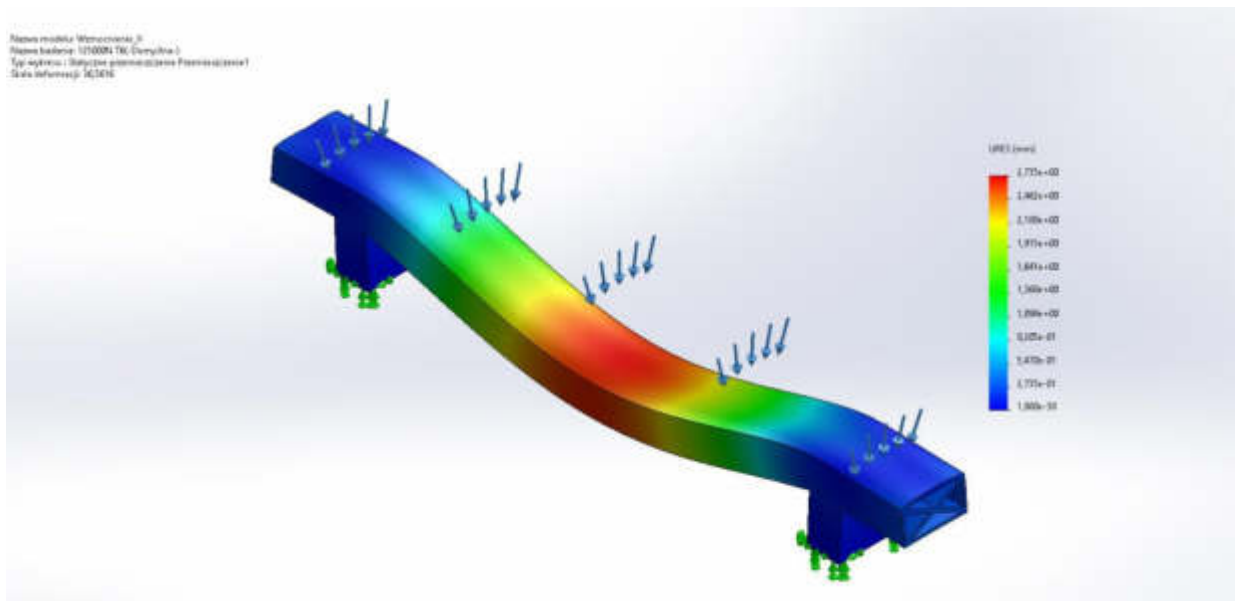


Rys. 7. Wynik odkształcenia modelu A przy sile 125000[N] dla stopu T6.  
Fig. 7. Deformation result of model A at a force of 125000[N] for alloy T6.

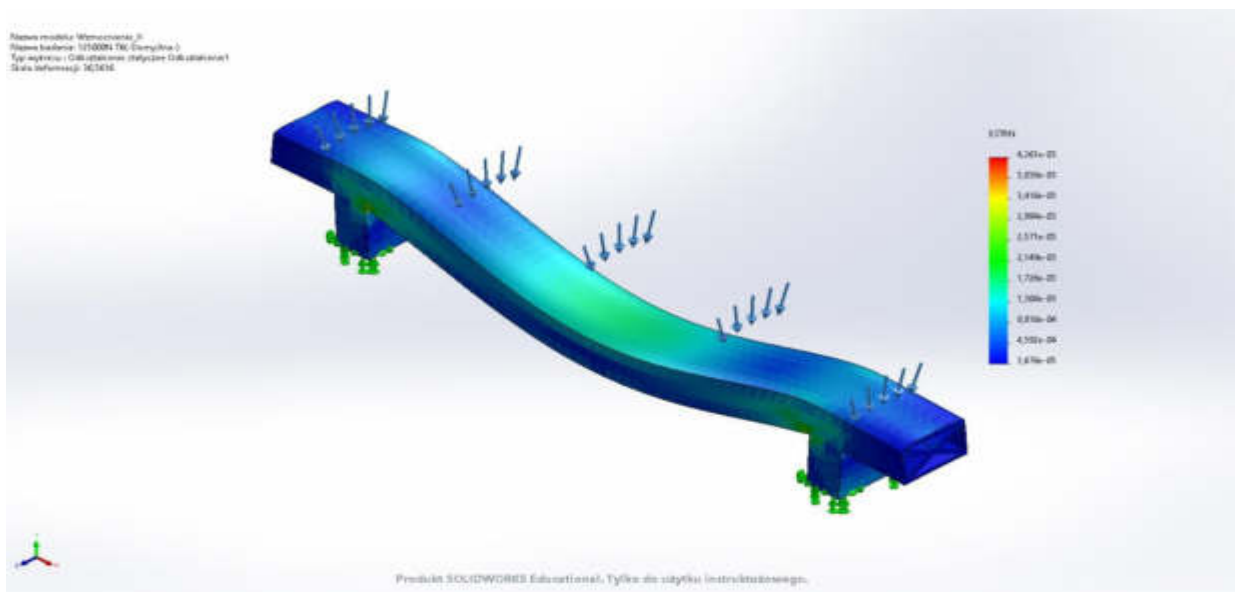
#### Wyniki symulacji modelu B ( belka z wzmocnieniem w kształcie X ):



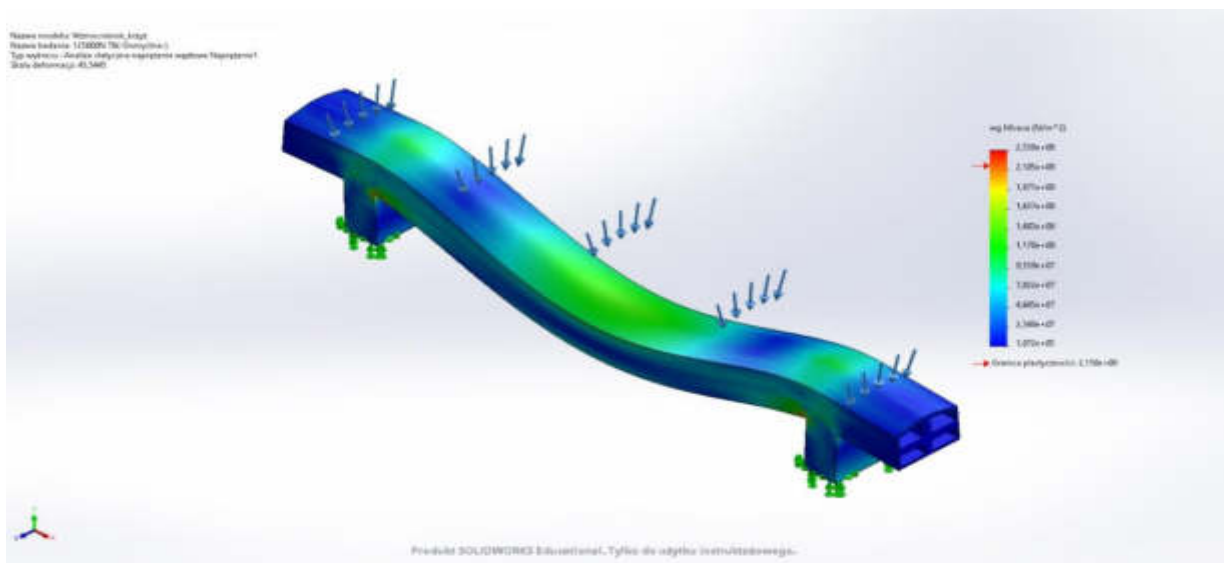
Rys. 8. Wynik naprężenia modelu B przy sile 125000[N] dla stopu T6.  
Fig. 8. Stress result of model B at a force of 125000[N] for alloy T6.



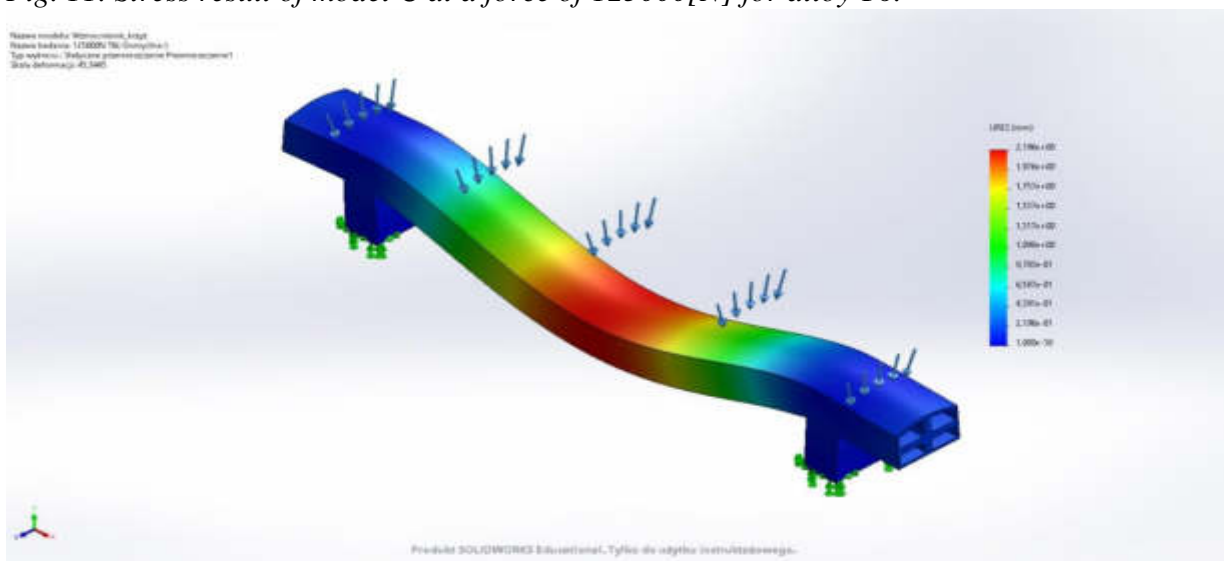
Rys. 9. Wynik przemieszczenia modelu B przy sile 125000[N] dla stopu T6.  
 Fig. 9. Displacement result of model B at a force of 125000[N] for alloy T6.



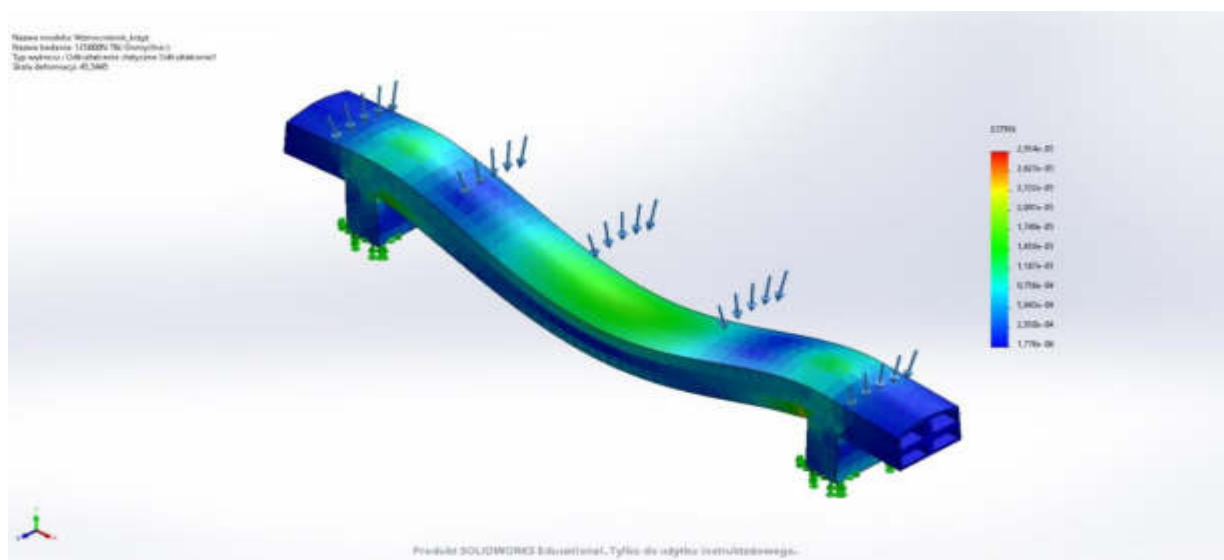
Rys. 10. Wynik odkształcenia modelu B przy sile 125000[N] dla stopu T6.  
 Fig. 10. Deformation result of model B at a force of 125000[N] for alloy T6.

**Wyniki symulacji modelu C (wzmocnienie w kształcie krzyża):**

Rys. 11. Wynik naprężenia modelu C przy sile 125000[N] dla stopu T6.  
Fig. 11. Stress result of model C at a force of 125000[N] for alloy T6.



Rys. 12. Wynik przemieszczenia modelu C przy sile 125000[N] dla stopu T6.  
Fig. 12. Displacement result of model C at a force of 125000[N] for alloy T6.



Rys. 13. Wynik odkształcenia modelu C przy sile 125000[N] dla stopu T6.

Fig. 13. Deformation result of model C at a force of 125000[N] for alloy T6.

Wyniki przeprowadzonych symulacji komputerowych zestawiono w tabelicy 3, gdzie zestawiono maksymalne naprężenia oraz przemieszczenia dla wszystkich trzech modeli po przyłożeniu siły 125000 [N].

Tabela 3. Wynik naprężeń i przemieszczeń.

Table 3. Stress and displacement result.

| Model | Naprężenie [MPa] | Przemieszczenie [mm] |
|-------|------------------|----------------------|
| A     | 528              | 3,85                 |
| B     | 335              | 2,74                 |
| C     | 234              | 2,20                 |

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Po przeprowadzeniu symulacji komputerowej stwierdzono, że wyniki naprężenia oraz przemieszczenia wskazują iż model C ( belka z wzmocnieniem w kształcie krzyża ) uzyskała najlepsze rezultaty, zanotowano najniższą wartość naprężenia 234[MPa] co wskazuje, że dany model jest zdolny do przenoszenia większych naprężeń od pozostałych modeli oraz najniższe przemieszczenie 2,20[mm]. Najbardziej niezadawalającym okazał się model bez żadnego wzmocnienia gdzie zaobserwowano najwyższe wyniki naprężenia oraz przemieszczenia: 528 [MPa] oraz 3,85 [mm] .Granica plastyczności, która wynosi 215 [MPa] została przekroczona w

każdym przypadku, jednak model C cechował się wartością do niej zbliżoną, a różnica wyniosła jedynie 19 [MPa].

Wnioski:

- geometria wzmocnienia belki ma wpływ na jej wytrzymałość,
- najlepszym wzmocnieniem spośród wybranych jest wzmocnienie w postaci krzyża (model C),
- przeprowadzona analiza pozwoliła określić miejsca, w których gromadzą się największe naprężenia,
- największe przemieszczenia zaobserwowano w środkowej części belki,

## LITERATURA

1. „Charakterystyka konstrukcji samochodowych wykonanych z stopów aluminium” – Robert Wieszała
2. „Materiały metalowe stosowane w budowie pojazdów samochodowych” – Nasze Publikacje, Nowoczesny Warsztat 6/2006
3. [https://automarpo.pl/page/207/0/1/254705/0/motoryzacja-czesci\\_samochodowe-czesci\\_karoserii-zderzaki-wzmocnienia\\_zderzakow\\_belki](https://automarpo.pl/page/207/0/1/254705/0/motoryzacja-czesci_samochodowe-czesci_karoserii-zderzaki-wzmocnienia_zderzakow_belki)
4. <http://www.boronextrication.com/2016/08/27/2016-xc90-volvo-body-structure/>
5. Baza danych Solidworks.
6. „Opinia techniczna, w zakresie odporności korozyjnej aluminiowych Konsol KW4 PAS z przekładką termiczną do wykonywania okładzin elewacyjnych, przeznaczonych do zastosowania w środowisku o kategorii korozyjności C3 wg PN-EN ISO 9223:2012” Nr pracy: 03314/18/Z00NZM Instytut Techniki Budowlanej Warszawa.

## Symulacja komputerowa zaczepek holowniczych wykonana w programie Solidworks

W. Mikołajko <sup>a</sup>, A. Śliwa <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Student/ka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: wojcmik825@student.polsl.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: agata.sliwa@polsl.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono symulacji komputerowej poddany został zaczepek holowniczy, który montowany jest w konstrukcji samochodu w przypadku konieczności jego holowania wykonanego z różnych materiałów inżynierskich takich jak stal nierdzewna, stal A286 oraz stal narzędziowa 1.2085. Analizę przeprowadzono przy użyciu oprogramowania SOLIDWORKS. Określono miejsca o najwyższej wartości naprężeń i przemieszczeń oraz wartość siły krytycznej przy której następuje odkształcenie elementu.

**Abstract:** This article presents a computer simulation carried out in Solidworks. The tested element was a towing device, which is mounted in the car construction when a car needs to be towed. Three materials were tested in the simulation and their results of stresses and displacements due to the application of a constant force were presented. The simulation made it possible to analyse the areas where stresses are likely to accumulate.

### 1. WSTĘP

Haki holownicze są ogólną nazwą części samochodowych służących do połączenia dwóch odrębnych pojazdów, dzięki czemu możliwym jest ciągnięcie jednego pojazdu za pomocą drugiego ( przyczepa, kemping ). Natomiast zaczepek holowniczy jest typem haku holowniczego, który montowany jest w razie konieczności przetransportowania uszkodzonego lub niezdolnego do jazdy samochodu. Zaczepy holownicze montowane są do sztywnej konstrukcji samochodu [1, 2]. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy zaczepek holowniczy.



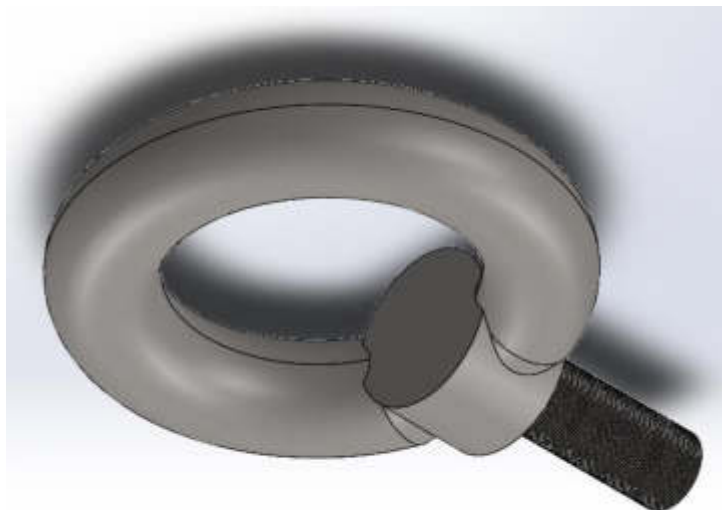
Rys. 1. Zaczepek holowniczy [3].

Fig. 1. Towing hitch [3].

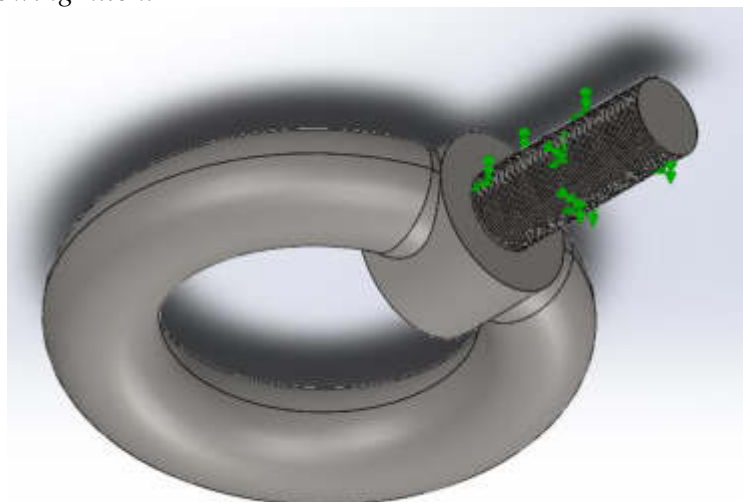


## 2. ZAŁOŻENIA MODELOWE

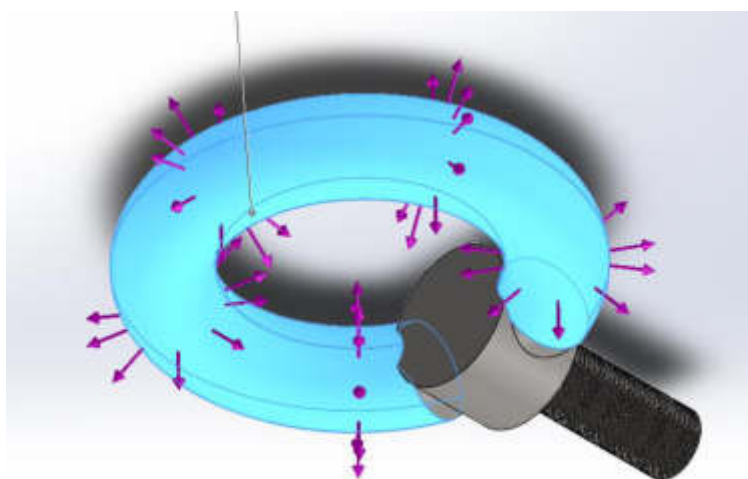
W pierwszy etapie wykonano model geometryczny zaczepu holowniczego, co przedstawiono na rysunku 2. Kolejnym krokiem było nałożenie warunków brzegowych: unieruchomienie zaczepu całej powierzchni gwintu jak na rys. 3 oraz przyłożenie siły. od wewnętrznej części pierścienia – wartość siły 15000 [N] co odpowiada ciężarowi 1500 [Kg] (rys. 4. ). Model wykonano z trzech różnych materiałów inżynierskich, staliwo nierdzewne, stal A286 oraz stal narzędziową 1.2085. Właściwości wybranych materiałów przedstawiono w tablicach 1 – 3.



Rys. 2. Model geometryczny zaczepu holowniczego  
*Fig. 2. Designed towing hitch.*



Rys. 3. Miejsce przytwierdzenia umocowania.  
*Fig. 3. Location of the fixation.*



Rys. 4. Miejsce przyłożenia siły.

Fig. 4. The location of the force attachment.

Tabela 1. Własności staliwa nierdzewnego[4].

Table 1. Properties of stainless cast steel[4].

| Własność                              | Wartość | Jednostka         |
|---------------------------------------|---------|-------------------|
| Współczynnik sprężystości             | 1.9e+11 | N/m <sup>2</sup>  |
| Współczynnik Poissona                 | 0.26    | n.d.              |
| Współczynnik naprężenia ścinającego   | 7.9e+10 | N/m <sup>2</sup>  |
| Masa właściwa                         | 7700    | kg/m <sup>3</sup> |
| Wytrzymałość na rozciąganie           |         | N/m <sup>2</sup>  |
| Wytrzymałość na ściskanie             |         | N/m <sup>2</sup>  |
| Granica plastyczności                 |         | N/m <sup>2</sup>  |
| Współczynnik rozszerzalności cieplnej | 1.5e-05 | /K                |
| Współczynnik przewodzenia ciepła      | 37      | W/(m·K)           |
| Ciepło właściwe                       | 520     | J/(kg·K)          |
| Stosunek tłumienia materiału          |         | n.d.              |

Tabela 2. Własności stali A286[4].

Table 2. Properties of A286 steel[4].

| Własność                              | Wartość   | Jednostka         |
|---------------------------------------|-----------|-------------------|
| Współczynnik sprężystości             | 2.01e+11  | N/m <sup>2</sup>  |
| Współczynnik Poissona                 | 0.31      | n.d.              |
| Współczynnik naprężenia ścinającego   | 7.7e+10   | N/m <sup>2</sup>  |
| Masa właściwa                         | 7920      | kg/m <sup>3</sup> |
| Wytrzymałość na rozciąganie           | 620000000 | N/m <sup>2</sup>  |
| Wytrzymałość na ściskanie             |           | N/m <sup>2</sup>  |
| Granica plastyczności                 | 275000000 | N/m <sup>2</sup>  |
| Współczynnik rozszerzalności cieplnej | 1.65e-05  | /K                |
| Współczynnik przewodzenia ciepła      | 15.1      | W/(m·K)           |
| Ciepło właściwe                       | 420       | J/(kg·K)          |
| Stosunek tłumienia materiału          |           | n.d.              |

Tabela 3. Własności stali narzędziowej 1.2085[4].

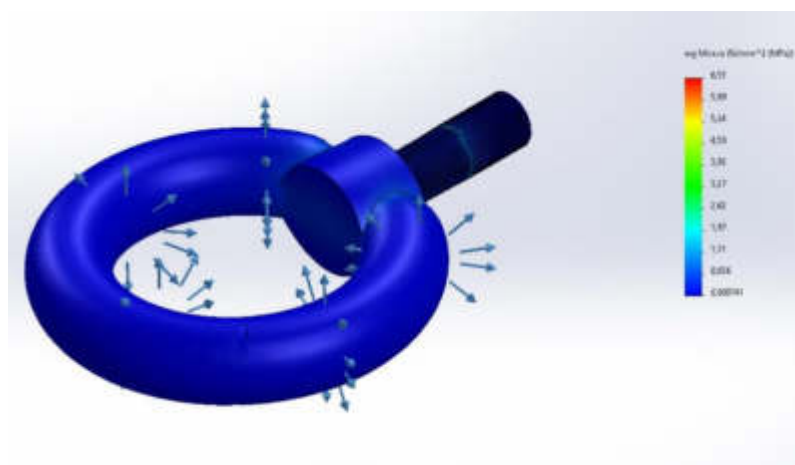
Table 3. Properties of tool steel 1.2085[4].

| Własność                              | Wartość    | Jednostka         |
|---------------------------------------|------------|-------------------|
| Współczynnik sprężystości             | 2.07e+11   | N/m <sup>2</sup>  |
| Współczynnik Poissona                 | 0.28       | n.d.              |
| Współczynnik naprężenia ścinającego   | 7.9e+10    | N/m <sup>2</sup>  |
| Masa właściwa                         | 7750       | kg/m <sup>3</sup> |
| Wytrzymałość na rozciąganie           | 1160000000 | N/m <sup>2</sup>  |
| Wytrzymałość na ściskanie             |            | N/m <sup>2</sup>  |
| Granica plastyczności                 | 950000000  | N/m <sup>2</sup>  |
| Współczynnik rozszerzalności cieplnej | 1.1e-05    | /K                |
| Współczynnik przewodzenia ciepła      | 14         | W/(m·K)           |
| Ciepło właściwe                       | 440        | J/(kg·K)          |
| Stosunek tłumienia materiału          |            | n.d.              |

### 3. WYNIKI SYMULACJI KOMPUTEROWEJ

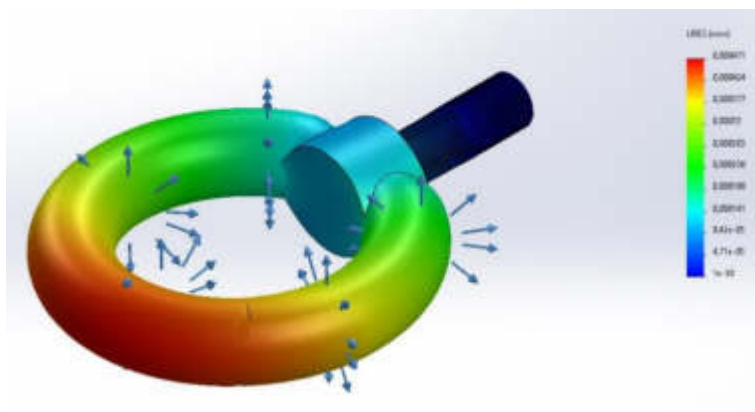
Na podstawie przeprowadzonej analizie numerycznej przy określonych warunkach brzegowych otrzymano następujące wyniki symulacji komputerowej w postaci barwnych map rozkładu naprężeń, przemieszczeń oraz odkształceń. Wyniki dla staliwa nierdzewnego przedstawiono na rysunkach 5-7, dla dla stali A286 na rysunkach 8-10 a dla stali narzędziowej 1.2085 na rysunkach 11-13.

#### Wyniki symulacji dla staliwa nierdzewnego:

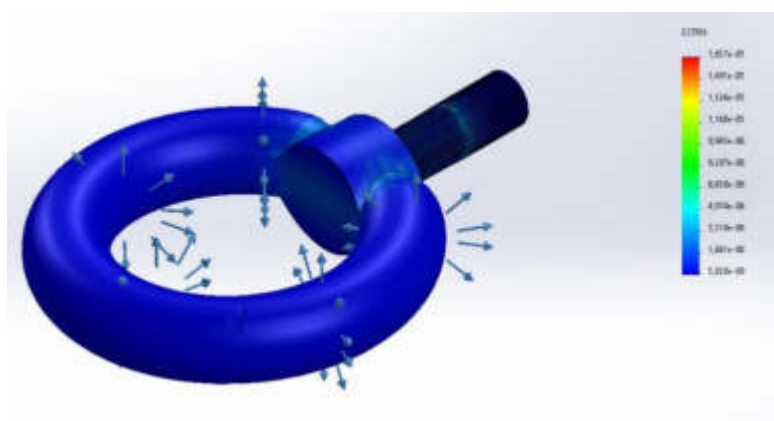


Rys. 5. Wynik naprężenia zaczepu holowniczego wykonanego z staliwa nierdzewnego.

Fig. 5. Stress result of a towing hitch made of stainless cast steel.

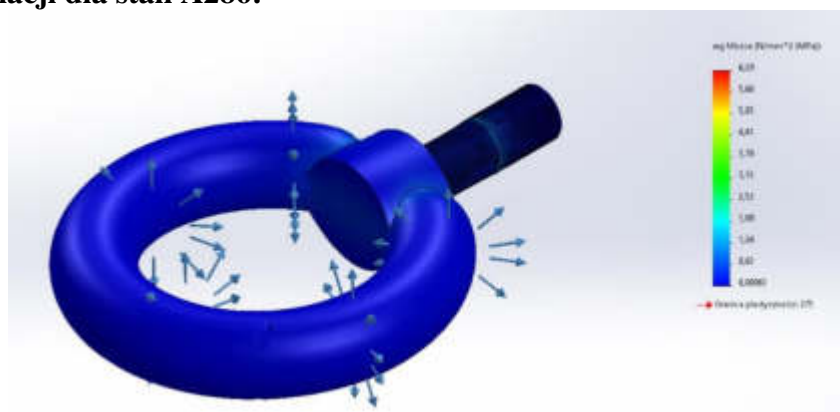


Rys. 6. Wynik przemieszczenia zaczepu holowniczego wykonanego z staliwa nierdzewnego.  
Fig. 6. Displacement result of a towing hitch made of stainless cast steel.

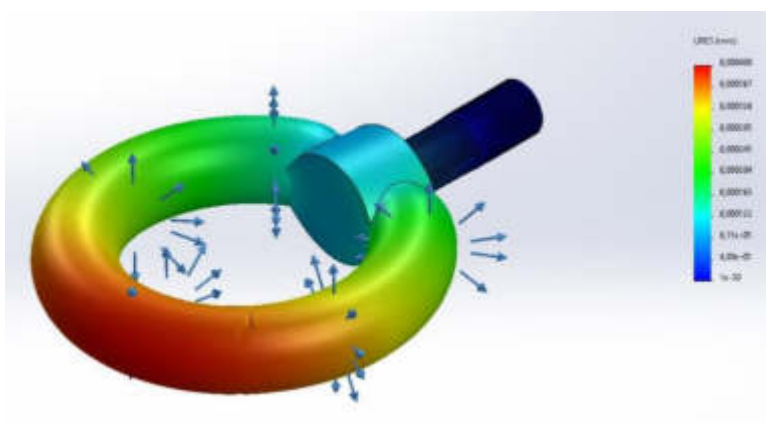


Rys. 7. Wynik odkształcenia zaczepu holowniczego wykonanego z staliwa nierdzewnego.  
Fig. 7. Deformation result of a towing hitch made of stainless cast steel.

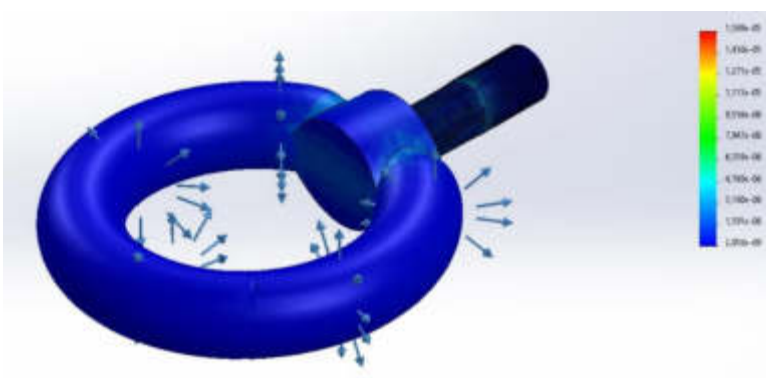
#### Wyniki symulacji dla stali A286:



Rys. 8. Wynik naprężenia zaczepu holowniczego wykonanego z stali A286.  
Fig. 8. Stress result of a towing hitch made of A286 steel.

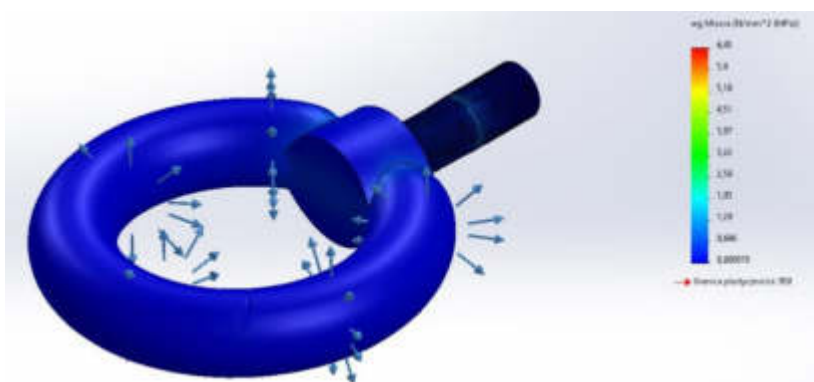


Rys. 9. Wynik przemieszczenia zaczepu holowniczego wykonanego z stali A286.  
Fig. 9. Displacement result of a towing hitch made of A286 steel.

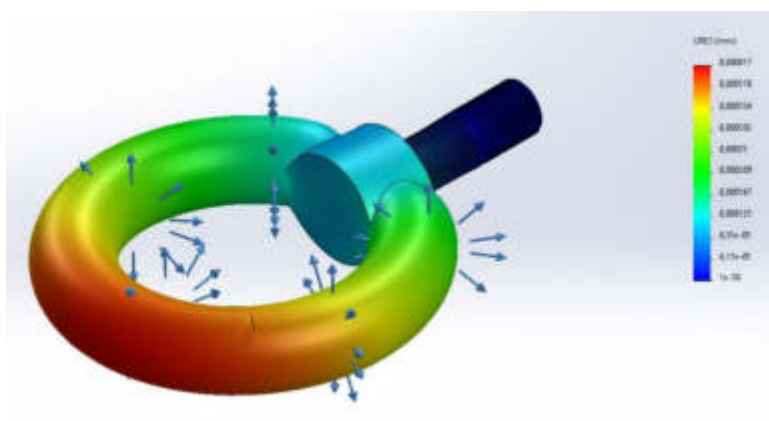


Rys. 10. Wynik odkształcenia zaczepu holowniczego wykonanego z stali A286.  
Fig. 10. Deformation result of a towing hitch made of A286 steel.

#### Wynik symulacji dla stali narzędziowej 1.2085:

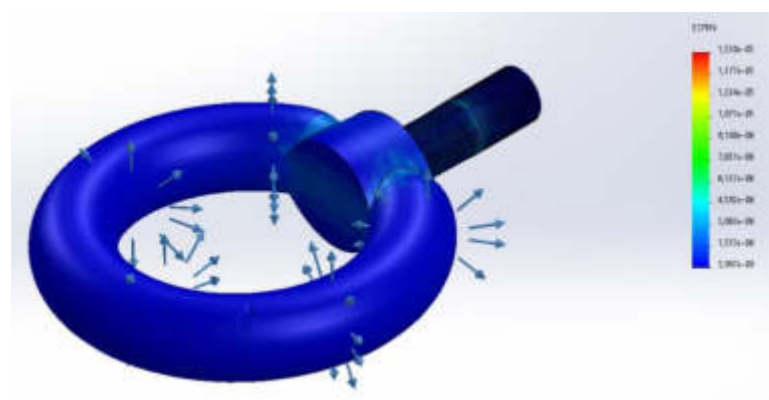


Rys. 11. Wynik naprężenia zaczepu holowniczego wykonanego z stali narzędziowej 1.2085.  
Fig. 11. Stress result of a towing hitch made of 1.2085 tool steel.



Rys. 12. Wynik przemieszczenia zaczepu holowniczego wykonanego z stali narzędziowej 1.2085.

Fig. 12. Displacement result of a towing hitch made of 1.2085 tool steel.



Rys. 13. Wynik odkształcenia zaczepu holowniczego wykonanego z stali narzędziowej 1.2085.

Fig. 13. Deformation result of a towing hitch made of 1.2085 tool steel.

Wyniki wykonanych symulacji rozkładu naprężeń oraz przemieszczeń zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Zestawienie wyników w przeprowadzonych symulacjach komputerowych

Table 5. Results obtained in the conducted researches

| Material            | Staliwo nierdzewne | Stal A286 | Stal narzędziowa 1.2085 |
|---------------------|--------------------|-----------|-------------------------|
| Wynik               |                    |           |                         |
| Naprężenie [MPa]    | 6,55               | 6,29      | 6,45                    |
| Przemieszczenie[mm] | 0,000471           | 0,000408  | 0,000417                |

#### 4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzona symulacja komputerowa w programie Solidworks pozwoliła stwierdzić, który z wybranych materiałów cechuje się najlepszymi własnościami mechanicznymi odpowiadając na pytanie, który materiał lepiej poradziłby sobie w przypadku użycia go do wytworzenia zaczepu holowniczego. Najlepszym materiałem jest stal A286, w której maksymalne naprężenie wyniosło 6,29, kolejny materiałem jest stal narzędziowa z wynikiem 6,45, a na samym końcu staliwo nierdzewne, z naprężeniem maksymalnym – 6,55. Jak można zauważyć w każdym przypadku wyniki są do siebie bardzo zbliżone i pod względem naprężeń jak i przemieszczeń, które są na poziomie mikrometrycznym, zatem wybór najlepszego materiału z spośród wybranych do symulacji komputerowej będzie opierał się na względach ekonomicznych.

#### BIBLIOGRAFIA

1. <https://www.volvocars.com>. Dostęp z dnia 28.04.2022
2. „Analiza wytrzymałościowa zaczepu kulowego do samochodu osobowego z zastosowanie MES” Zbigniew Budniak.
3. <https://ford.sklep.pl>. Dostęp z dnia 28.04.2022
4. Baza danych programu Solidworks.

## Numerical research of hydraulic distributor of the machine for pleating with the use of the software environment FloWorks

V. Neimak <sup>a</sup>, O. Polishchuk <sup>b</sup>, T. Romanets <sup>c</sup>, M. Bonek <sup>d</sup>, A. Yerii <sup>e</sup>, O. Posternak <sup>f</sup>

<sup>a</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: nejmakvit@gmail.com

<sup>b</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: opolishchuk71@gmail.com.

<sup>c</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: tromanec@gmail.com.

<sup>d</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials, Gliwice, Poland email: mirosław.bonek@polsl.pl.

<sup>e</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: andrijerij@gmail.com.

<sup>f</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: posternak5459@gmail.com.

**Abstract:** developed a new original hydraulic distributor design which provides the supply fluid according to a cycle diagram work on three major hydrocylinder for the working mechanisms of the machine for pleating.

On the basis of the analysis of the structure of a knife-roller pleating machine, the three actuators of which are driven by the electric drive through the chain of gear mechanisms, the authors developed a hydraulic system for distributing motion on the working mechanisms of the plasticizer. Hydraulic and hydro-kinematic schemes of the machine, working drawings of parts and assembly drawings of the hydraulic distributor are developed. The new original design of the hydraulic distributor ensures the supply of the working fluid in accordance with the cyclic diagram of the work on three hydraulic cylinders of the main working mechanisms of the plasticizer. The developed hydrodistributor can perform both distributive and control functions that can replace the controlled automatic devices. In general, the plasticizer has a simplified design and increased reliability.

However, at the moment there is no possibility to connect it to a high-pressure network, therefore, for checking the efficiency of the proposed hydraulic equipment, a cycle of experimental studies was conducted using the FloWorks module for the SolidWorks parametric modeling system.

The results of distribution of the liquid in the distributor for separate cavities, which result in the movement of the working bodies of the pleating machine, in particular the mechanism of feeding the fold-forming elements (knives), the mechanism of material capture and the mechanism for feeding and thermofixing of the material, are obtained.



**Keywords:** the hydraulic distributor, cycle diagram work, hydro-drive executive mechanisms, numerical research.

## 1. INTRODUCTION

One of the important tasks in the design and construction of machines is the optimal choice of the number of parts and components, their weight, metal capacity, type of drive, control and management devices, resulting in improved technical and economic performance of the machine.

A review and analysis of technology, equipment of hydraulic drives for technological machines, which is widely used in light industry in the garment, footwear and household services. The classification of hydraulic distributors, purpose, their characteristics and structure are considered, the advantages, disadvantages, possibilities of their regulation are defined.

## 2. OBJECTS AND METHODS OF RESEARCH

Based on the analysis of the design of the pleating machine [1] of the knife-roll type, three actuators of which receive motion from the electric drive through the chains of transmission mechanisms, the authors developed a hydraulic system of distribution of motion on the working mechanisms of the pleating machine.

Hydraulic actuator greatly simplifies the design, reduces metal consumption, noise during operation and increases the reliability of the machine by replacing the chains of transmission mechanisms, consisting of many pairs of friction and parts, 3 hydraulic cylinders, which are directly connected to the three actuators and receive motion from one switchgear according to the cyclogram of the pleating machine.

## 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The developed hydraulic distributor is made in the form of a cam roller mounted in a rotatable housing and having annular grooves located coaxially with the holes of the housing, and segmental grooves arranged coaxially with several holes connected to the hydraulic cylinders. Moreover, the location of these holes in the diametrical section, the angular dimensions and location of the segmental grooves of the camshaft correspond to the phases of the actuators according to the cyclic diagram of the machine.

Hydraulic and hydrokinematic schemes of the machine, working drawings of details and assembly drawings of the hydraulic distributor are developed. Calculations of hydraulic drive elements were performed [2,3]. A study of the complex switchgear was carried out, which confirmed its operability for the drive of hydraulic motors of the working mechanisms of the pleating machine.

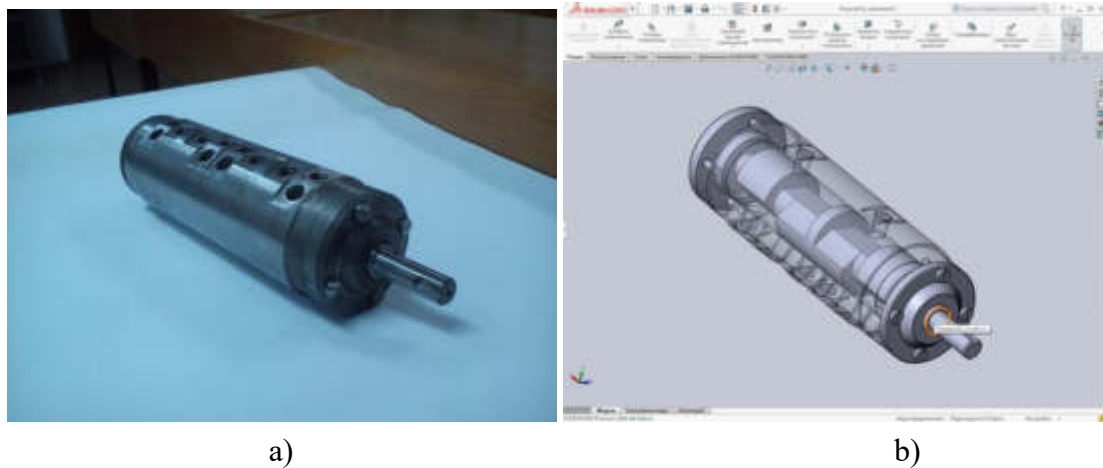


Figure 1. Hydraulic distributor for pleating machine (a), and its model developed in SolidWorks (b)

The new original design of the hydraulic distributor provides supply of working liquid according to the cyclic diagram of work on three hydraulic cylinders of the main working mechanisms of the pleating machine. The developed hydraulic distributor can perform both distribution and control functions that can replace controlled automatic devices. In general, the pleating machine has a simplified design and increased reliability.

In order to conduct experimental studies of the developed hydraulic equipment for the pleating machine, an experimental sample of the hydraulic distributor was made (fig. 1 a).

However, at the moment it is not possible to connect it to the high pressure network, so to test the proposed hydraulic equipment, it was decided to conduct a series of experimental studies using the FloWorks module for the parametric modeling system SolidWorks.

Initially, a model of the hydraulic distributor for the pleating machine in the SolidWorks system was developed, which is shown in fig. 1, b.

When working in the FloWorks module, the working area where the research is carried out is determined, and plugs with flow parameters are installed in all openings.

The pressure range according to the positions of the camshaft relative to the housing is specified.

The conditions of the experiment are as follows:

|                                       |         |
|---------------------------------------|---------|
| Inlet pressure                        | 5.3 MPa |
| Hydraulic losses                      | 10%     |
| The speed of rotation of the camshaft | 120 rpm |

The limit conditions are set, according to preliminary calculations, with the following parameters:

|                |          |
|----------------|----------|
| inlet pressure | 5.3 MPa, |
| outlet         | 4.8 MPa. |

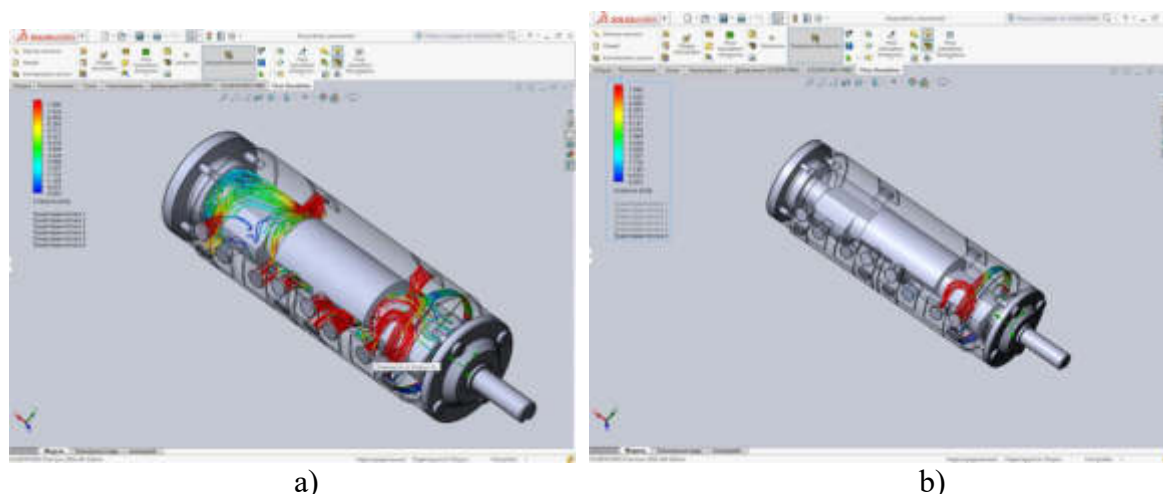


Figure 2. The total distribution of fluid in the distributor (a) and for the supply of fluid to the feed mechanism of the folding elements (knives) - (b)

After conducting numerical studies, in accordance with the initial conditions, the following results were obtained: the total distribution of fluid in the distributor and for the supply of fluid to the feed mechanism of folding elements (fig. 2, a, b).

The results of fluid distribution in the distributor for individual cavities that drive the working parts of the pleating machine, in particular the mechanism for feeding folding elements (knives) (fig. 2, b), the mechanism for capturing material (fig. 3, a) and the mechanism for feeding and heat setting material (fig. 3, b).

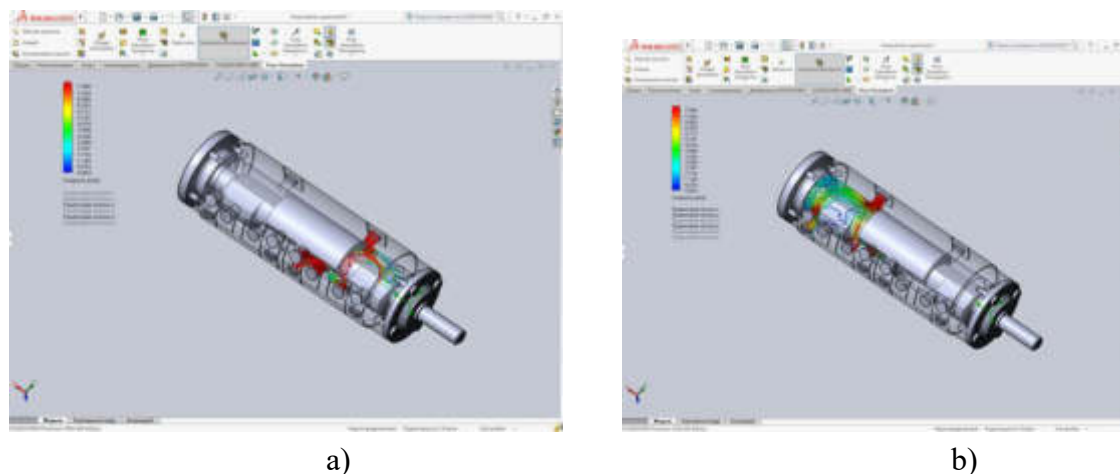


Figure 3. Distribution of fluid in the distributor for supplying fluid to the material capture mechanism (a) and for supplying fluid to the mechanism for supplying and thermofixing the material (b)

Numerical studies of fluid flow velocities in the pressure cavity (fig. 4, a) and in the drain cavity (fig. 4, b) of the hydraulic distributor depending on the geometric parameters.

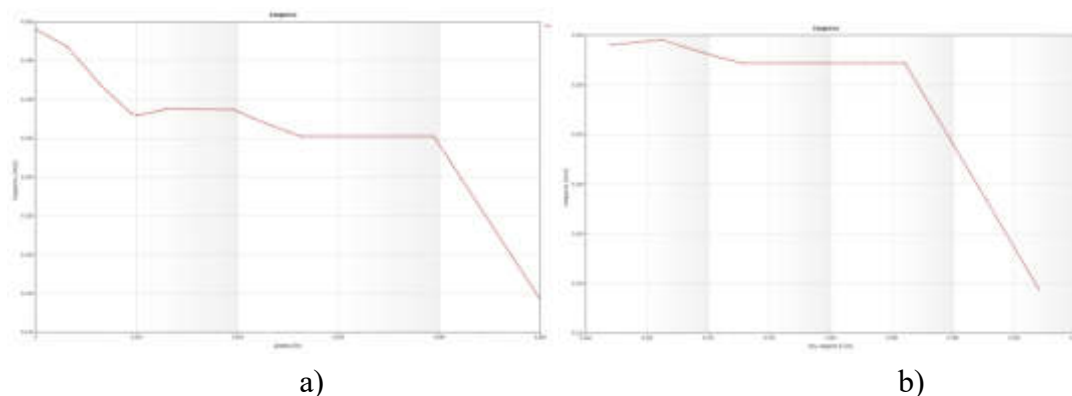


Figure 4. Flow rate in the pressure cavity (a) and in the drain cavity (b) of the distributor

#### 4. CONCLUSIONS

A new original design of the hydraulic distributor has been developed, which provides the supply of working fluid simultaneously to the three hydraulic cylinders of the main working mechanisms of the pleating machine, which work according to the cyclic diagram (cyclogram). That is, the developed mechanical distributor performs both distribution and control functions that can replace controlled automatic devices.

An experimental sample and a computer model of a hydraulic distributor for a pleating machine were developed, a series of numerical studies was performed using the FloWorks module in the SolidWorks parametric modeling system to determine the functional characteristics of the working fluid in the distributor cavities and the experimental sample was confirmed.

The results of experimental research are planned to be used in the future to develop a full-fledged design of the pleating machine with a developed hydraulic distributor.

#### BIBLIOGRAPHY

1. C.A. USSR 1498852, ISI D 06 J 1/00, Machine for pleating, B.A.Zajcev, O.O.Korotich, №427577/31-12, Cl. - 14.08.87, Publ. 07.08.89, Bull.№29.
2. T.M.Bashta, S.S.Rudnev, Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives: textbook for universities, Moscow, Mechanical engineering, 1982, 423 p.
3. Popov D.N., Mechanics of hydraulic and pneumatic drives: textbook for universities, Moscow, MGTU publ, 2001, 320 p.

## Materiały kompozytowe o osnowie polimerowej z naturalnym napelniaczem

K. Niemiec<sup>a</sup>, A. Włodarczyk-Fligier<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Student kierunku Inżynieria Materiałowa na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej

email: kasia9625@gmail.com

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email: anna.wlodarczyk@polsl.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono charakterystykę i wybrane własności kompozytowych materiałów polimerowych. Zbadano wybrane własności wytworzonych kompozytów o osnowie polietylenowej wzmocnianych mączką z łupin orzechów włoskich o różnej zawartości %. W ramach badań wykonano: badania twardości metodą kulkową, badania udarności metodą Charpy'ego, próbę statycznego rozciągania.

**Abstract:** The article presents the characteristics and selected properties of composite polymer materials. Selected properties of the produced composites with a polyethylene matrix reinforced with walnut shell flour with different % content were tested. The tests included: ball hardness tests, Charpy impact tests, static tensile tests.

**Słowa kluczowe:** kompozytowe materiały polimerowe, naturalne napelniacze, własności wytrzymałościowe

### 1. WSTĘP

Materiały kompozytowe o osnowie polimerów termoplastycznych z napelniaczami naturalnymi (roślinnymi jak i pochodzenia zwierzęcego), stanowią alternatywę wobec standardowych napelniaczy i zyskują coraz większe zainteresowanie. Jako główny przykład przytacza się kompozyty typu WPC (wood-polymer composites) polimerowo-drzewne czyli kompozyty polimerowe na osnowie termoplastów wzmocniane napelniaczami naturalnymi. Kompozyty te łączą pozytywne aspekty zarówno drewna jak i wielkocząsteczkowych tworzyw polimerowych [1-3]. Jako napelniacze kompozytów WPC stosować można drewno, łodygi roślin, ziarna zbóż, mączkę z łupin orzechów, bawełnę, wełnę, jedwab, azbest, celulozę [1,4,5].

Wybór matrycy polimerowej w kompozytach WPC ograniczony jest ze względu na własności napelniaczy naturalnych. Większość z napelniaczy naturalnych, w temperaturze powyżej 200°C zaczyna ulegać degradacji, przez co wybór osnowy jest możliwy tylko z polimerów, których przetwórstwo możliwe jest do tej temperatury. Do głównych materiałów

stosowanych jako osnowę w kompozytach WPC uwzględnia się tworzywa termoplastyczne, takie jak: polietylen (PE), polipropylen (PP), poli (chlorek winylu) (PVC) [6-9].

Głównym powodem stosowania kompozytów WPC są rosnące koszty ropy naftowej oraz gazu ziemnego czego powodem jest wyczerpywanie się tych źródeł. Utworzenie więc kompozytów napełnianych materiałem tanim, odnawialnym, a także biodegradowalnym stanowi nie tylko pozytywną cechę finansową, ale i ekologiczną [3].

Własności kompozytów WPC zależne są w pierwszej kolejności od własności osnowy oraz od rodzaju, udziału objętościowego oraz stopnia rozdrobnienia wykorzystanego napełniacza. Jako cechę mającą wpływ na końcowe własności kompozytów, podaje się także metodę jego wytwarzania. Do głównych metod wytwarzania kompozytów WPC zalicza się przede wszystkim wytłaczanie i wtryskiwanie. Wytłaczanie kompozytów o zawartości napełniacza około 40% można wykonać na typowej maszynie przetwórczej (jednoślismakowej lub dwuślismakowej) tworzyw termoplastycznych. Na jednorodność struktury oraz własności kompozytu istotny wpływ ma etap mieszania osnowy polimerowej z napełniaczem. Aby zapewnić jak najlepsze warunki przetwórstwa, należy poprawnie dobrać parametry mieszania, tj.: temperaturę, ciśnienie, prędkość obrotową [7,10].

Materiały kompozytowe WPC wytwarzane w ten sposób swoje główne zastosowanie znalazły w przemyśle wykończeniowym oraz meblarskim. Metoda wtryskiwania pozwala uzyskać wyroby różnego rodzaju i zastosowania. Wyroby te wykorzystywane są często na mniej odpowiedzialne elementy nadwozi samochodowych i części mebli [1,11]. Ze względu na łatwość metod przetwórczych oraz kształtowania, z kompozytów WPC wytwarza się elementy takie jak: zderzaki, nadkola, siedzenia, deski rozdzielcze, pokrywy komory silnika, profile okienne, drzwi, werandy, tarasy, gonty, dachy, meble ogrodowe, ławki, ogrodzenia, balustrady, poszycia podłogowe, blaty, biurka, uchwyty mebli, klamki, wieszaki, pojemniki, walizki, doniczki, kije baseballowe, łuki, narty, instrumenty muzyczne, ekrany akustyczne [1,6,12].

Coraz częściej wykorzystuje się mączkę powstałą z wykorzystania odpadów przemysłu spożywczego oraz rolnego, otrzymywana podczas procesu rozdrabniania. Mączka z łupin orzechów różnego gatunku stanowi innowacyjny materiał stosowany jako napełniacz kompozytów WPC o mikrostrukturze całkowicie innej od mikrostruktury drewna [5]. Do zalet za którymi przemawia użytkowanie mączki z łupin orzechów oraz zastąpienia nią mączki drzewnej decyduje:

- wysoka wytrzymałość oraz sztywność (niecałe 90% objętości komórki to ściany komórkowe),
- wysoka odporność na degradację pod wpływem promieniowania ultrafioletowego,
- proces mielenia/rozdrobnienia jest tańszy niż w przypadku drewna,
- większa stabilność wymiarowa niż w przypadku kompozytów z napełniaczem drewnianym (łupiny orzechów zawierają więcej składników hydrofobowych np. ligniny, niż higroskopijnych np. celulozy),
- mniejsza podatność na działanie grzybów i drobnoustrojów,
- wysoka twardość,
- obojętność chemiczna,
- nietoksyczność,
- biodegradowalność,
- zagospodarowanie odpadów [5,13].

### 1.1. Materiał do badań

Materiałem do badań były wytworzone próbki z materiałów kompozytowych o osnowie polietylenu PE, wzmocnianych mączką z łupin orzechów włoskich o frakcji 500  $\mu\text{m}$  i udziale: 0%, 10% oraz 30%. Osnowę kompozytu stanowił niemodyfikowany polietylen Hostalen GC 7260 o dużej gęstości (0,96  $\text{g}/\text{cm}^3$ ). Oznaczenia przygotowanych próbek do badań przedstawiono w tabelce 1.

Tabela 1. Oznaczenia wytworzonych próbek do badań.

| Oznaczenie | Rodzaj osnowy | Zawartość mączki z łupin orzechów włoskich, % |
|------------|---------------|---|
| K 0        | PE            | 0   |
| K 10       | PE            | 10  |
| K 30       | PE            | 30  |

Otrzymane próbki do badań, przetworzono metodą wtryskiwania w kształtki typu A1 (Rys. 1), według normy PN-EN ISO 527-1:2020-01 [14].



Rysunek 1. Próbką kompozytu o osnowie polietylenu z dodatkiem mączki z łupin orzechów włoskich.

*Figure 1. A sample of a composite based on polyethylene with the addition of walnut shell flour.*

### 1.2. Metodologia badań

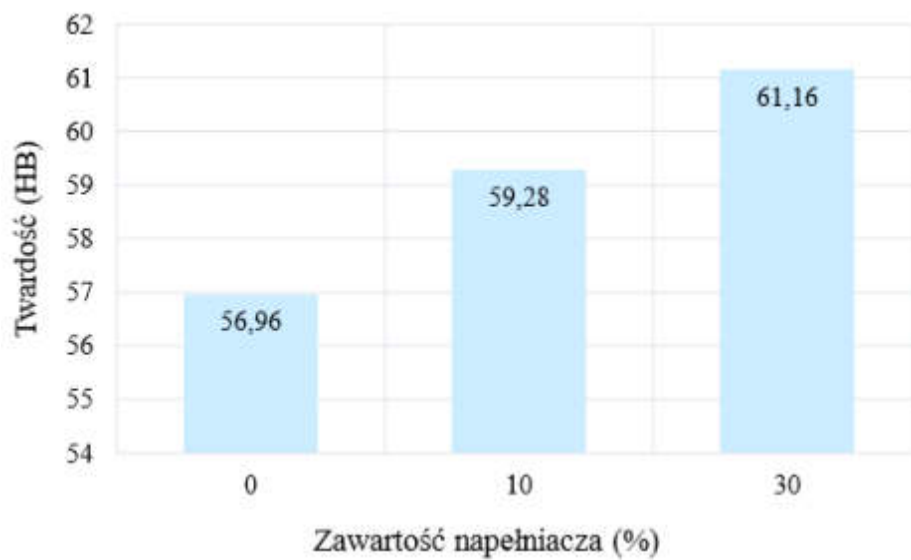
Badania twardości wytworzonych polimerowych materiałów kompozytowych przeprowadzono przy użyciu twardościomierza Zwick 3106, zgodnie z normą PN-EN ISO 2039-1 [15]. Badania wykonane zostały metodą kulkową w temperaturze otoczenia około 22°C. Przyjęte obciążenie badawcze wynosiło 358 N. Wykonano po 5 pomiarów dla każdego rodzaju próbek.

Próby udarnościowe zrealizowane zostały metodą Charpy'ego zgodnie z normą PN-EN ISO 179-1:2010 [16]. Badania wykonane zostały na młocie wahadłowym, w temperaturze otoczenia około 22°C. Energia uderzenia młota wynosiła 4 J. Przygotowane kształtki kompozytowe posiadały karb typu V, o głębokości rzędu 2 mm. Wykonano po 5 pomiarów dla każdego rodzaju próbek.

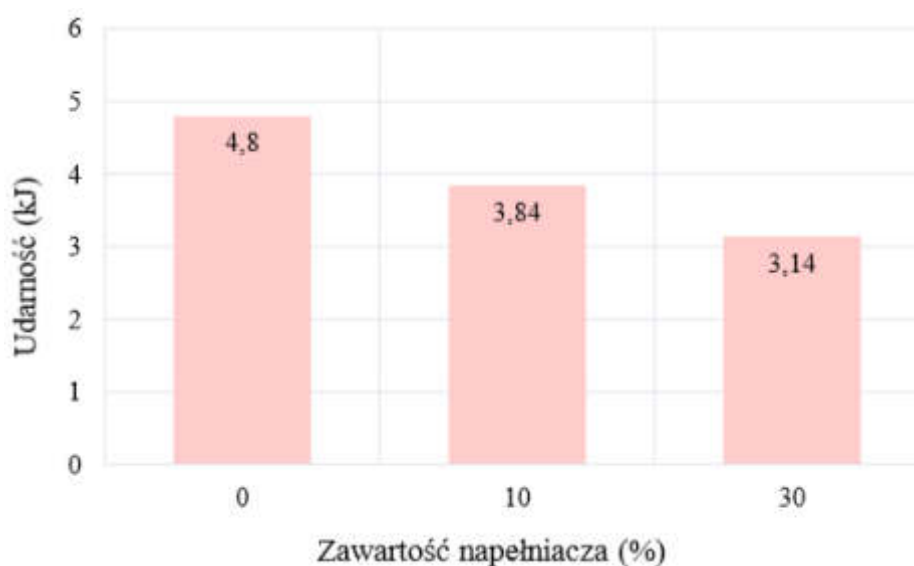
Statyczną próbę rozciągania wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 527-1: 1998 [17]. Próba wykonana została na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej firmy Zwick/Roell Z100, w temperaturze otoczenia około 22°C. Prędkość badawcza przyjęta to 50 mm/min. Wykonano po 5 pomiarów dla każdego rodzaju próbek.

### 1.3. Omówienie wyników badań

Analizując otrzymane wyniki badań można stwierdzić iż, wartość twardości kompozytu K 10 wynosi około 104 % wartości twardości kształtki nienapełnianej. Natomiast, twardość próbki K 30 wynosi 107 % wartości twardości K 0 oraz 103 % wartości twardości kompozytu z 10 % zawartością napełniacza. Na podstawie wykonanych badań można więc stwierdzić, iż wraz ze wzrostem ilości napełniacza, twardość kompozytów o osnowie polietylenowej z napełnianych wzrasta (Rys. 2).



Rysunek 2. Średnie wyniki twardości  
Figure 2. Average hardness results



Rysunek 3. Średnie wyniki udarności  
Figure 3. Average impact toughness results



Wykonane badania udarnościowe wykazują, że im większa zawartość napełniacza tym odporność na obciążenie dynamiczne spada. Kompozyty napełnione mączką z łupin orzechów włoskich, mają mniejszą udarność niż kształtki polietylenowe, które nie zostały napełnione (Rys. 3).

Analizując wyniki pomiarów uzyskanych podczas statycznej próby rozciągania, można stwierdzić, że napełnienie kompozytów polimerowych mączką z łupin z orzechów włoskich ma niekorzystny wpływ na wytrzymałość na rozciąganie. W przypadku kształtki K 10 spadek wytrzymałości jest niewielki i wynosi około 13 %. Porównując kształtki z 30 % zawartością napełniacza do kształtek nienapełnionych, spadek ten jest jednak znaczący i wynosi około 40 % (Rys. 4).



Rysunek 4. Średnie wyniki wytrzymałości na rozciąganie

Figure 4. Average tensile strength results

## 2. PODSUMOWANIE

Wytworzone kompozytowe materiały polimerowe łączą w sobie pozytywne aspekty zarówno polimerowej osnowy jak i naturalnego napełniacza. Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań stwierdzono, znaczący wpływ zawartości % napełniacza. Badania wskazują na polepszenie twardości próbek i wraz ze zwiększającym się udziałem % napełniacza twardość ta wzrasta. Natomiast wzrost ilości napełniacza oddziałuje niekorzystnie na odporność na obciążenie dynamiczne. Wyniki uzyskane zarówno z prób udarnościowych jak i ze statycznej próby rozciągania wykazały negatywny wpływ udziału % napełniacza na wytworzone próbki. Wśród plusów wykorzystania napełniaczy pochodzenia naturalnego między innymi łupin z orzechów, niekwestionowaną zaletą są względy ekologiczne – zagospodarowanie odpadów, ułatwienie recyklingu, ograniczenie wykorzystania materiałów pochodzących z nieodnawialnych źródeł oraz biodegradowalność.

## LITERATURA

1. A. Boczkowska, J. Kapuściński, Z. Lindemann, D. Witemberg – Perzyk, S. Wojciechowski: Kompozyty, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
2. A. Włodarczyk-Fligier, M. Polok-Rubiniec, B. Chmielnicki: Polypropylene-matrix polymer composites with natural filler, Archives of Metallurgy and Materials, 66 (2021) 313-319.
3. S. Zajchowski, J. Tomaszewska: Kompozyty polimerowo-drzewne, Teka Komisji Budowy i Eksploatacji Maszyn, Elektrotechniki, Budownictwa, Oddział Lublin – Polska Akademia Nauk, (2008) 183–188.
4. M. Proszek, S. Kuciel: Badania własności polipropylenu wypełnionego mączką drzewną oraz możliwością jego wytwarzania, V Konferencja Naukowo Techniczna, Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne, Katedra Przetwórstwa Materiałów Metalowych i Polimerowych Politechniki Śląskiej w Gliwicach, Gliwice 2002.
5. A. Włodarczyk-Fligier, M. Polok-Rubiniec, B. Chmielnicki: Kompozyty polimerowe z napełniaczem naturalnym, Materiały Kompozytowe, 2 (2019) 44-48.
6. W. Królikowski: Polimerowe kompozyty konstrukcyjne, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
7. S. Zajchowski, J. Ryszkowska: Kompozyty polimerowo-drzewne — charakterystyka ogólna oraz ich otrzymywanie z materiałów odpadowych, Polimery 54 (2009) 10.
8. J. Miedzianowska, M. Masłowski, K. Strzelec: Kompozyty polimerowe zawierające włókna roślinne - czynniki wpływające na wytrzymałość mechaniczną, Technologia i Jakość Wytrobów 63 (2018).
9. J. Barton, A. Niemczyk, K. Czaja, Ł. Korach, B. Sacher-Majewska: Kompozyty, biokompozyty i nanokompozyty polimerowe. Otrzymywanie, skład, właściwości i kierunki zastosowań, Chemik 68/4 (2014) 280–287.
10. A. Włodarczyk-Fligier, M. Polok-Rubiniec, B. Chmielnicki: Wytwarzanie kompozytów polimerowych z dodatkiem mączki z orzechów laskowych, LAB Laboratoria Aparatury Badawczej, 2 (2019) 14-16.
11. P. Postawa, T. Stachowiak, A. Szarek: Badania właściwości kompozytów drewno-polimer metodą DMTA, Kompozyty 10: 3 (2010) 266-269.
12. M. Prochoń, M. Witczak, A. Biernacka: Drewno jako składnik biokompozytów polimerowych, Elixir 1/5 (2017).
13. M. U. Obidiegwu, S. C. Nwanonyi, I. O. Eze, I. C. Egbuna: The Effect of Walnut Shell Powder on the Properties of Polypropylene Filled Composite, The International Asian Research Journal 02/ 02 (2014) 22-29.
14. PN-EN ISO 527-1:2020-01, Tworzywa sztuczne - Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu - Część 1: Zasady ogólne.
15. PN-EN ISO 2039-1:2004, Tworzywa sztuczne - Oznaczanie twardości - Część 1: Metoda wciskania kulki.
16. PN-EN ISO 179-1:2010, Tworzywa sztuczne - Oznaczanie udarności metodą Charpy'ego, Część 1: Nieinstrumentalne badanie udarności.
17. PN-EN ISO 527-1: 1998, Tworzywa sztuczne - Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu - Zasady ogólne.

## Badania powłoki TiO<sub>2</sub> uzyskanej metodą MSPVD na podłożu ze stopu aluminium Al-Si-Cu

M. Olszowska<sup>1a</sup>, P. Falkowska<sup>1b</sup>, Duda<sup>1c</sup>, M. Rejek<sup>1d</sup>, M. Staszuk<sup>2</sup>, Ł. Reimann<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, email: <sup>a</sup>magdols407@student.polsl.pl, <sup>b</sup>paulfal458@student.polsl.pl, <sup>c</sup>alekdud935@student.polsl.pl, <sup>d</sup>monirej772@student.polsl.pl

<sup>2</sup>Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: marcin.staszuk@polsl.pl

<sup>3</sup>Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Laboratorium Badań Materiałów, email: lukasz.reimann@polsl.pl

**Streszczenie:** W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań wpływu warunków osadzania powłok TiO<sub>2</sub> z podwarstwą czystego tytanu otrzymanych w procesie MSPVD na podłożu ze stopu aluminium typu Al-Si-Cu. W szczególności zbadano wpływ czasu nanoszenia powłok na własności fizykochemiczne badanych materiałów. Parametrem był czas nakładania powłok: 90 minut i 150 minut. Wykonano badania morfologii powłok za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) i mikroskopii sił atomowych (AFM) w celu określenia struktury badanych powłok i ich wpływu na właściwości fizykochemiczne. Wykonano badania struktury podłoża niepokrytego z wykorzystaniem mikroskopu świetlnego metalograficznego. W celu określenia własności powłok wykonano badania trybologiczne i korozyjne. Analizę produktów korozji i zużycia otrzymanych w trakcie badań właściwości fizykochemicznych przeprowadzono za pomocą analizy SEM i EDS. Na podstawie tej analizy stwierdzono, że próbki pokryte powłoką wykazują lepszą odporność korozyjną niż próbki niepowlekanne. Ponadto wykazano wpływ badanych powłok na poprawę kontaktu trybologicznego powierzchni powlekanych materiałów z przeciwpróbką WC-Co. Najlepsze własności trybologiczne wykazała próbka z nałożoną powłoką w czasie 150 minut.

**Abstract:** In this study, the influence of deposition conditions of TiO<sub>2</sub> coatings with pure titanium sublayer obtained by MSPVD process on Al-Si-Cu aluminum alloy was investigated. In particular, the effect of coating deposition time on the physicochemical properties of the materials studied was investigated. The reference parameter was the coating application time: 90 minutes and 150 minutes. The morphology of the coatings was investigated by scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM) to determine the structure of the studied coatings and their influence on the physicochemical properties. Uncoated substrate structure studies were performed using light metallographic microscopy. Tribological and corrosion studies were performed to determine the properties of the coatings. The corrosion products obtained during the physicochemical property studies were analyzed by SEM and EDS analysis. From this analysis, it was found that the coated samples resulted in better

corrosion resistance than the uncoated samples. Additionally, the effect of the investigated coatings on improving the tribological contact between the surface of the coated materials and the counter-sample was demonstrated. The sample with the coating applied within 150 minutes showed the best tribological properties.

**Słowa kluczowe:** PVD, Al-Si-Cu,  $TiO_2$ , MSPVD, SEM, korozja, tribologia

## 1. WSTĘP

Popularność zastosowania stopów Al-Si-Cu wciąż rośnie, głównie ze względu na różnorodność możliwości, np. w przemyśle motoryzacyjnym, przemyśle lotniczym, przemyśle zbrojeniowym [1]. Stopy te charakteryzują się wysoką wytrzymałością, niską gęstością, dobrą przewodnością cieplną i elektryczną. Jednakże dodatek miedzi w stopach Al-Si-Cu wpływa na pogorszenie odporności korozyjnej tego stopu [2]. Stąd w literaturze można znaleźć informacje o stosowaniu na tego typu stopach, o słabych właściwościach antykorozyjnych, powłok PVD [3].

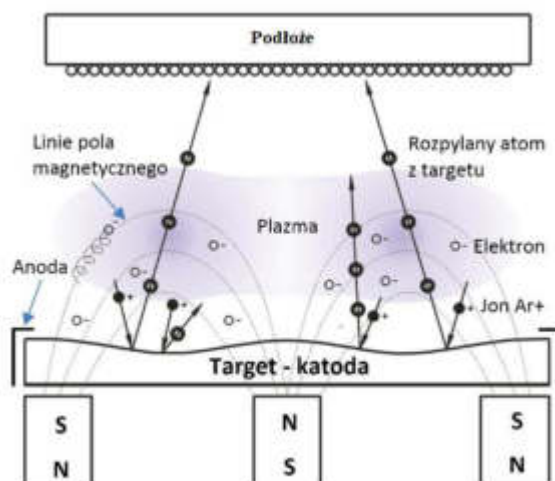
PVD, czyli fizyczne osadzanie z fazy gazowej stosowane jest do osadzania powłok. Nazwa PVD stosowana jest ogólnie do procesów osadzania powłok, z których materiał pozyskiwany jest w sposób fizyczny, np. odparowywanie ze źródła stałego, czy jonizacja gazów i par metali [4]. Jednym z rodzajów PVD jest MSPVD (Rysunek 1), czyli rozpylanie magnetronowe - to metoda, w której na skutek przyłożenia pola magnetycznego generowanego przez magnesy umieszczone za katodą wyładowanie pozostaje blisko powierzchni próbki. Zwiększa to szybkość jonizacji i osadzania plazmy. Dodatkowo zmniejsza to napięcie, które jest wymagane do utrzymania wyładowania (samopodtrzymującego się) umożliwiając przy tym osadzanie w dużo niższych ciśnieniach i z lepszą odtwarzalnością w porównaniu do innych metod PVD. Metoda rozpylania magnetronowego jest więc bardzo atrakcyjną metodą osadzania fizycznego, która generuje wysoce stabilne plazmy w łatwo kontrolowanym procesie [5]. Od wielu lat wykorzystuje się powłoki PVD w wielu dziedzinach przemysłu. Powłoka to warstwa materiału wytworzona w sposób sztuczny lub naturalny, albo nałożona w sposób sztuczny na powierzchnię wykonaną z innego materiału [6]. Powłoki PVD najczęściej wytwarzane są z metali przejściowych grup IVb do VIb układu okresowego oraz gazów reaktywnych lub par. Przykładowymi materiałami wykorzystywanymi w procesie tworzenia powłok są: tlenki, azotki, węgliki i inne [7]. Czynnikiem decydującym o ich popularności są właściwości jakie zapewniają po nanoszeniu na podłoże. Wpływają na poprawę właściwości trybologicznych, wytrzymałościowych, antykorozyjnych, czy dekoracyjnych. Wymaganiem technologicznym powłok PVD jest konieczność zapewnienia odpowiednio przygotowanego podłoża w celu zapewnienia odpowiedniej przyczepności powłoki do podłoża. Procesy przygotowania powierzchni przed nałożeniem powłoki:

- chemiczne przygotowanie powierzchni - jest to proces oczyszczania zgrubnego powierzchni odbywającego się poza komorą. Może obejmować np. usunięcie smarów, tłuszczów, usunięcie zanieczyszczeń mechanicznych;
- jonowe przygotowanie powierzchni - ma miejsce w komorze roboczej napyłarki i obejmuje dokładne oczyszczenie powierzchni, aktywowanie powierzchni i podgrzanie podłoża do odpowiedniej temperatury [6].

Poza czynnikami jakimi jest przygotowanie podłoża fundamentalną rolę odgrywa czas nakładania powłoki. Odpowiednia długość tego procesu jest w stanie zapewnić konkretną powłokę o odpowiednio rozwiniętej powierzchni. Chcąc dążyć do wyznaczenia optymalnego

czasu przeprowadzania procesu MSPVD przeprowadzono badania w dwóch wariantach czasowych. Z opublikowanych w literaturze badań wynika, że najbardziej obiecujące powłoki można otrzymać przy uwzględnieniu odpowiedniego czasu [8] ze względu na to, że w miarę upływu czasu na podłożu osadza się coraz więcej napylnych cząstek, które następnie tworzą coraz większe ziarna. Opublikowane badania w literaturze wskazują również na chropowatość, która zwiększała się wraz z czasem procesu osadzania. Zaobserwowano to podczas badań w procesie napyłania magnetronowego węgliku krzemu. Rozważono trzy czasy napyłania 40, 60 i 75 minut. Wydłużenie czasu zwiększyło grubość powłoki, a w konsekwencji zwiększyło wielkość ziarna. W miarę jak ziarna stają się większe wraz ze wzrostem czasu osadzania, zwiększa się również chropowatość powierzchni. Ponadto, dłuższe czasy osadzania pozwalają na tworzenie uporządkowanych i wysoce spójnych struktur krystalicznych, które charakteryzują się dużą twardością w stosunku do powłok amorficznych [9]. Wskazuje to na fakt, że czas osadzania powłok jest istotnym aspektem.

Powłoka  $\text{TiO}_2$  charakteryzuje się zależnością adhezji od temperatury procesu osadzania powłok. Kontrolowanie parametrów procesów pozwala na modyfikowanie własności otrzymanej powłoki i możliwości ich zastosowań poprzez otrzymywanie poszczególnych faz dwutlenku tytanu [10].



Rysunek 1. Schemat rozpylania magnetronowego [11]

Figure 1. Scheme of magnetron sputtering [11]

Celem niniejszej pracy jest zbadanie wpływu warunków osadzania powłoki  $\text{TiO}_2$  z zastosowaniem metody rozpylania magnetronowego MS-PVD na podłożu ze stopu aluminium Al-Si-Cu na strukturę i własności pokrytych materiałów.

## 2. MATERIAŁ DO BADAŃ I METODOLOGIA

### 2.1 Materiał do badań

Badania wykonano na stopach aluminium typu Al-Si-Cu. Próbkę stanowiły krążki o średnicy 14 mm i wysokości około 5 mm. Przygotowanie próbek polegało na szlifowaniu na papierach ściernych o zmniejszającej się gradacji oraz polerowaniu przy pomocy tarcz polerskich i zawiesin diamentowych. Następnie próbki zostały oczyszczone w myjce ultradźwiękowej i osuszone sprężonym powietrzem. Badania przeprowadzono na podłożach niepowlakanych oraz pokrytych  $\text{TiO}_2$  odpowiednio w czasie 90 oraz 150 minut za pomocą metody PVD.

Do osadzania powłoki PVD typu  $TiO_2$  zastosowano metodę reaktywnego rozpylania magnetronowego za pomocą urządzenia Kurt J Lesker PVD 75, w której wykorzystano tarczę z czystego tytanu jako źródła par tytanu. W procesie zastosowano dwa gazy procesowe: argon oraz tlen jako gaz reaktywny. Osadzanie przeprowadzono w temperaturze  $100^\circ C$  przy użyciu źródła pary o stałym natężeniu prądu. Moc magnetronu wynosiła 200 W, a napięcie podłoża BIAS wynosiło -140 V. Najpierw osadzono podwarstwę czystego tytanu i napyłano ją przez 1 minutę w atmosferze czystego argonu. Następnie osadzono warstwę tlenku tytanu w dwóch różnych konfiguracjach czasowych - dla pierwszej próbki 90 minut, a dla drugiej próbki 150 minut. Przyjęto następujące oznaczenia badanych próbek: 0Al – podłoże niepokryte ze stopu aluminium Al-Si-Cu; P90Al – powłoka  $TiO_2$  osadzona w czasie 90 minut; P150Al - powłoka  $TiO_2$  osadzona w czasie 150 minut.

## 2.2 Metodologia

Topografię powierzchni, skład chemiczny oraz uszkodzenia powstałe po badaniu korozji i tribologii badano za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego Zeiss Supra 35, wyposażonego w detektor EDS firmy Thermo Scientific. Stosowane napięcie przyspieszające mieściło się w zakresie 5-20 kV.

Morfologię powłok zbadano za pomocą mikroskopu sił atomowych Park Systems XE-100. Pomiary przeprowadzono w trybie bezkontaktowym badając obszary o wymiarach  $1 \mu m \times 1 \mu m$ .

Mikrostruktura stopu niepowlekanego Al-Si-Cu została zbadana na mikroskopie świetlnym metalograficznym ZEISS Axio Observer Z1m z zastosowaniem powiększeń 100x i 200x. Do badań przygotowano zglądy metalograficzne. Próbki zainkludowano, wyszlifowano zmieniając poziom gradacji oraz wykonano polerowanie na tarczach polerskich. W celu ujawnienia struktury próbki Al-Si-Cu wytrawiono ją w 13% roztworze NaOH.

Badanie odporności uzyskanych powłok na korozję zbadano za pomocą elektrochemicznej metody potencjodynamicznej wykorzystując potencjostat-galwanostat ATLAS 0531 EU&IA. Układ naczyniowy zawierał w sobie 3 elektrody: elektrodę badaną – badana próbka, elektrodę odniesienia oraz elektrodę pomocniczą wykonaną ze stali nierdzewnej. Wykorzystano roztwór NaCl 3,5% w ilości 150 ml. Po wyznaczeniu potencjału obwodu otwartego w warunkach bezprądowych, wykonano rejestrację krzywych polaryzacji próbek.

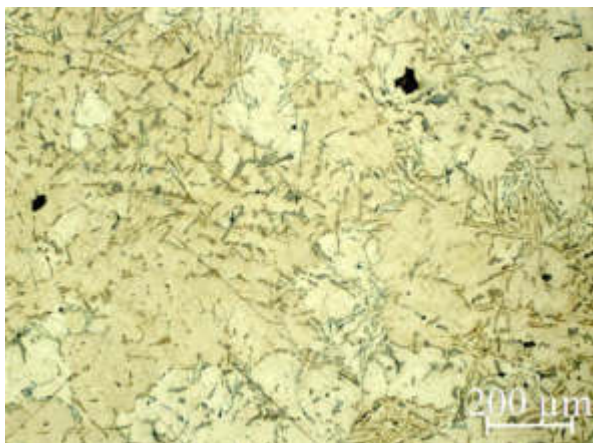
Badania odporności na zużycie wykonano z zastosowaniem trybometru CSM Instruments metodą "ball-on-disc" w temperaturze pokojowej. Jako przeciwpróbki zastosowano kulki WC-Co o średnicy 6 mm. Parametry testowe były następujące: średnica ścierania 5 mm, prędkość liniowa  $v = 0,5 \text{ cm/s}$ , siła normalna  $F_n = 0,5 \text{ N}$ . Współczynnik tarcia rejestrowano jako funkcję liczby cykli podczas próby. Badania wykonano do maksymalnej liczby cykli - 500 (cykl jest równy pełnemu obrotowi próbki).

## 3. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

### 3.1 Topografia i morfologia powierzchni

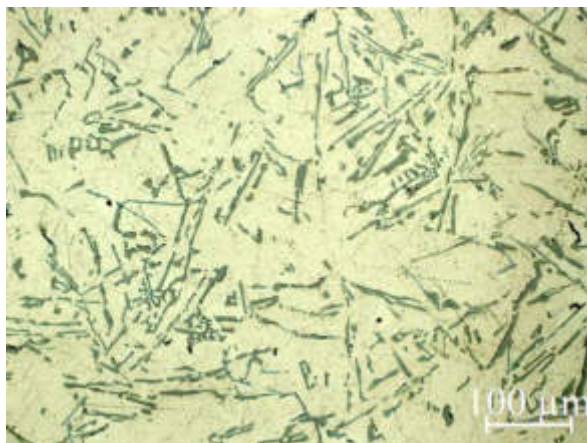
W celu ukazania mikrostruktury stopu aluminium Al-Si-Cu przygotowano zglądy metalograficzne próbek z niepokrytego stopu, które następnie wytrawiono. Badanie wykonane za pomocą mikroskopu świetlnego metalograficznego wykazało strukturę typową dla stopu odlewniczego Al-Si-Cu z wieloma podłużnymi wydzieleniami eutektycznymi krzemu w postaci dużych nieregularnych płytek z ostro-krawędziowymi narożami oraz wydzielenia

fazy miedzi o nieregularnych kształtach i występujących jako składnik potrójnej eutektyki (Rysunek 2-3). Wyniki porównano z badaniami w pracy [13].



Rysunek 2. Pow.100x Mikrostruktura odlewniczego stopu aluminium Al-Si-Cu, trawiono NaOH

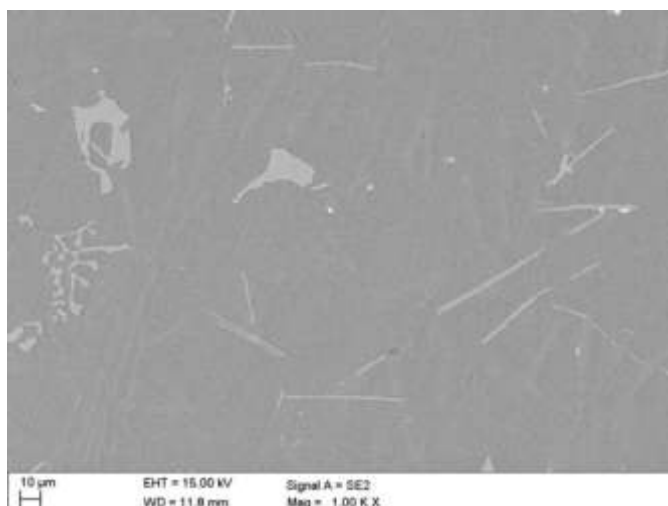
*Figure 2. Mag.100x; Microstructure of a cast Al-Si-Cu aluminum alloy, etched with NaOH*



Rysunek 3. Pow.200x; Mikrostruktura odlewniczego stopu aluminium Al-Si-Cu, trawiono NaOH

*Figure 3. Mag.200x; Microstructure of a cast Al-Si-Cu aluminum alloy, etched with NaOH*

W celu analizy struktury wykonano badania na skaningowym mikroskopie elektronowym. Badanie topograficzne, wykonane za pomocą mikroskopu skaningowego, powłoki  $TiO_2$  nałożonej techniką MSPVD wykazało, że powłoki posiadają zwartą, nieporowatą strukturę. Na powierzchni zauważalne są niewielkie wydzielania (Rysunek 4), są to wydzielania z podłoża, które z uwagi na cienką powłokę  $TiO_2$  są zauważalne na powierzchni pokrytej próbki.

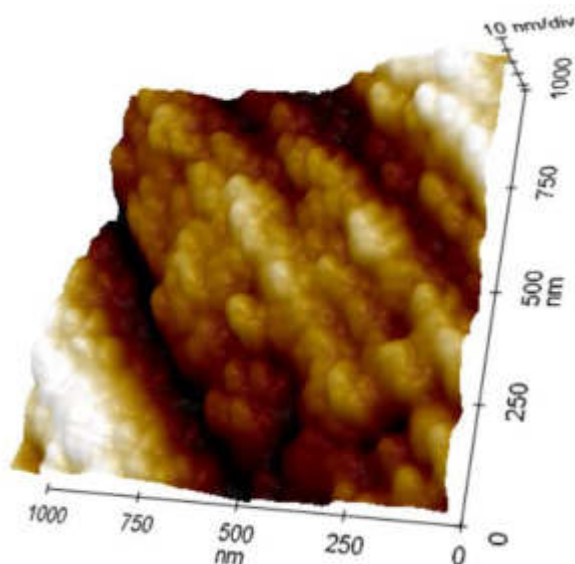


Rysunek 4. Topografia podłoża Al-Si-Cu z naniesioną powłoką metodą  $TiO_2$

*Figure 4. Al-Si-Cu substrate topography with an  $TiO_2$  coating*

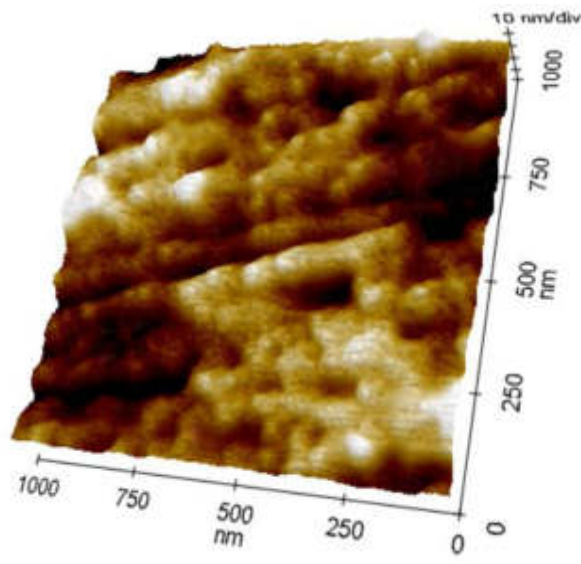
Podczas badania morfologii za pomocą mikroskopu sił atomowych stwierdzono, że otrzymane powierzchnie różnią się od siebie co może wynikać z niedokładności

w przygotowaniu podłoża do pokrywania. Można zaobserwować, że powłoka osadzana przez 150 minut (Rysunek 6) posiada nieco większą chropowatość niż powłoka osadzana przez 90 minut (Rysunek 5). Na powierzchni widoczne są również rysy powstałe podczas procesu szlifowania próbek co oznacza, że osadzona powłoka jest bardzo cienka.



Rysunek 5. Morfologia powłoki osadzonej na stopie aluminium typu Al-Si-Cu po procesie MSPVD wykonywanym w czasie 90 minut; obszar powierzchni próbki o wymiarach  $1 \times 1 \mu m$ .

*Figure 5. Morphology of coating deposited on Al-Si-Cu aluminum alloy after MSPVD process performed for 90 minutes; sample surface area of  $1 \times 1 \mu m$*



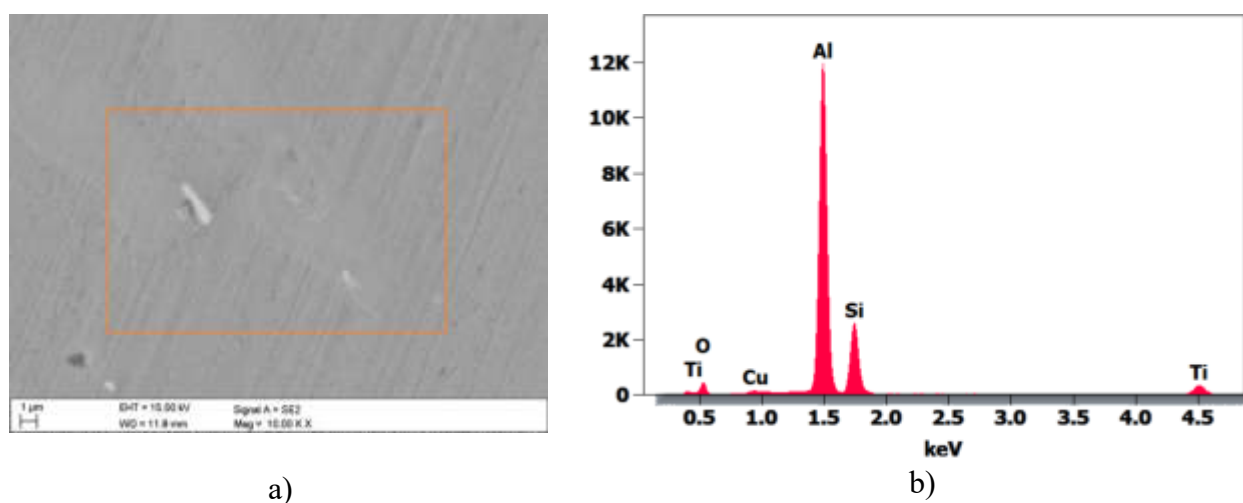
Rysunek 6. Morfologia powłoki osadzonej na stopie aluminium typu Al-Si-Cu po procesie MSPVD wykonywanym w czasie 150 minut; obszar powierzchni próbki o wymiarach  $1 \times 1 \mu m$ .

*Figure 6. Morphology of coating deposited on Al-Si-Cu aluminum alloy after MSPVD process performed for 150 minutes; sample surface area of  $1 \times 1 \mu m$*

### 3.2 Analiza składu chemicznego

Zbadano skład chemiczny powierzchni próbki wykonanej z Al-Si-Cu pokrytej jednowarstwową powłoką  $TiO_2$  z podwarstwą czystego tytanu otrzymaną metodą MSPVD wykorzystując w tym celu skaningowy mikroskop elektronowy oraz przystawkę do analizy EDS. Wyniki badania przedstawiono na rysunku 7. Analiza EDS powierzchni próbki z jednowarstwową powłoką  $TiO_2$  z podwarstwą czystego tytanu wykazała obecność tytanu i tlenu, co potwierdza obecność powłoki  $TiO_2$ . Oprócz  $TiO_2$  wykryto takie pierwiastki jak krzem, aluminium oraz miedź, które są składnikami podłoża, na którym osadzana była powłoka co ma związek z dużym obszarem oddziaływania wiązki i potwierdza, że grubość osadzonej powłoki jest niewielka.





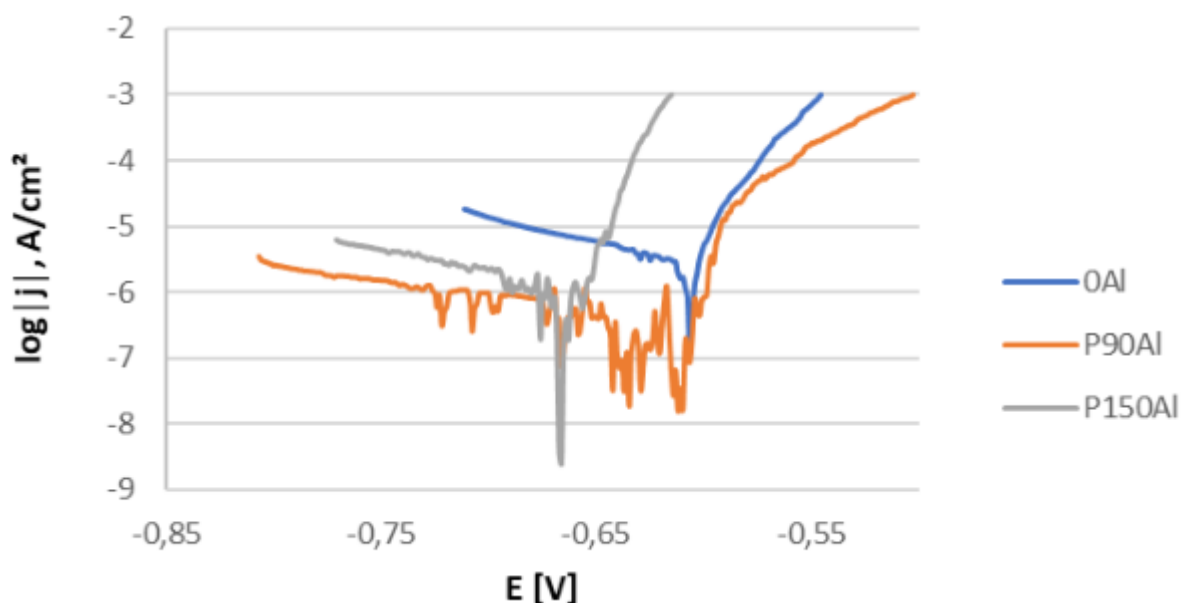
Rysunek 7. a) Zdjęcie SEM powierzchni próbki z Al-Si-Cu, z naniesioną powłoką TiO<sub>2</sub> metodą MSPVD z zaznaczonym obszarem, na podstawie którego dokonano analizy EDS; b) Wykres dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego dla zaznaczonego obszaru (a).  
 Figure 7. a) SEM photograph of the surface of an Al-Si-Cu sample with TiO<sub>2</sub> coating applied by MSPVD with the marked area from which EDS analysis was performed; b) X-ray energy dispersion plot for the marked area (a).

### 3.3 Testy korozyjne

W celu zbadania odporności na korozję, zarówno podłoża jak i powlekanych próbek powłoką TiO<sub>2</sub>, otrzymano za pomocą metody Tafela wartości potencjału korozyjnego ( $E_{\text{corr}}$ ), gęstości prądu korozyjnego ( $I_{\text{corr}}$ ) oraz opór polaryzacji ( $R_p$ ) jak i krzywe polaryzacji świadczące o zachowaniu materiału. W Tabelicy 1 przedstawiono otrzymane wyniki badań odporności na korozję metodą potencjodynamiczną dla próbki ze stopu aluminium Al-Si-Cu oraz badanych powłok.

Tabelica 1. Wyniki badań odporności na korozję dla stopu Al-Si-Cu oraz powłok TiO<sub>2</sub>

|        | Gęstość prądu korozji<br>$I_{\text{corr}}$ [A/cm <sup>2</sup> ] | Potencjał Korozyjny<br>$E_{\text{corr}}$ [V] | Opór polaryzacji<br>$R_p$ [Ω×m <sup>2</sup> ] |
|--------|---|--|---|
| 0Al    | $3,13 \times 10^{-6}$   | $-6,11 \times 10^{-1}$                       | $2,81 \times 10^3$                            |
| P90Al  | $0,518 \times 10^{-6}$  | $-6,30 \times 10^{-1}$                       | $21,22 \times 10^3$                           |
| P150Al | $1,32 \times 10^{-6}$   | $-6,64 \times 10^{-1}$                       | $4,91 \times 10^3$                            |



Rysunek 8. Krzywe polaryzacji dla stopów aluminium samego podłoża oraz z powłoką  $TiO_2$  dla różnych wariantów czasowych.

*Figure 8. Polarization curves for aluminum alloys of substrate alone and with  $TiO_2$  coating for different time variants.*

W ocenie odporności powierzchni badanych materiałów na korozję wzięto pod uwagę w szczególności gęstość prądu korozji oraz opór polaryzacyjny. Im wartość gęstości prądu korozji jest mniejsza tym odporność na korozję wzrasta. W przypadku oporu polaryzacyjnego wzrost wartości  $R_p$  oznacza poprawę własności elektrochemicznych.

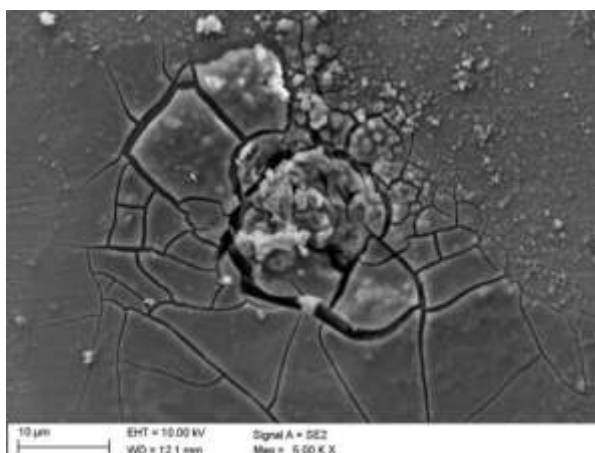
Analizując otrzymane wyniki odporności na korozję dla stopu Al-Si-Cu można zauważyć, że niepowlekaną materiał charakteryzował się największą podatnością na korozję. Próbka, której powłoka była nanoszona w czasie 90 minut posiada najmniejszą wartość  $I_{corr}$  równą  $0,518 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup> oraz najwyższą wartość  $R_p = 21,22 \times 10^3$   $\Omega \times m^2$ . W przypadku próbki P150Al gęstość prądu korozyjnego jest niemal trzykrotnie większa od P90Al, co wiąże się z mniejszą odpornością na korozję. W wyniku badań stwierdzono, że najlepszą odpornością na korozję cechowała się próbka P90Al.

### 3.4 Morfologia powierzchni po badaniu korozyjnym

Po przeprowadzeniu testów korozyjnych wykonano badanie za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego w celu obserwacji powstałych zniszczeń korozyjnych na powierzchni próbek (Rys. 9, 10).

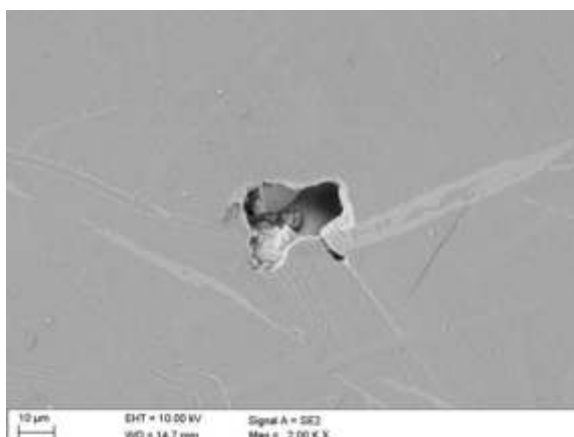
Badania mikrostruktur pozwoliły na zaobserwowanie wżerów i uszkodzeń powstałych wskutek korozji. Zauważono, że próbki z nałożonymi powłokami wykazały większą odporność na korozję w odniesieniu do podłoża z którego zostały wykonane. Świadczy to o zwiększaniu odporności na korozję dzięki zastosowaniu powłok  $TiO_2$ .

Dokonano pomiarów zaobserwowanych wżerów i zauważono, że dla powłoki naniesionej przez 90 minut na podłożu Al-Si-Cu wżery osiągały wymiary:  $33 \times 29$   $\mu m$ .



Rysunek 9. Próbkę 0Al; Widoczna korozja na podłożu Al-Si-Cu, zauważalne pęknięcia i wykruszenia

*Figure 9. Sample 0Al; Visible corrosion on the Al-Si-Cu substrate, noticeable cracks and chipping*

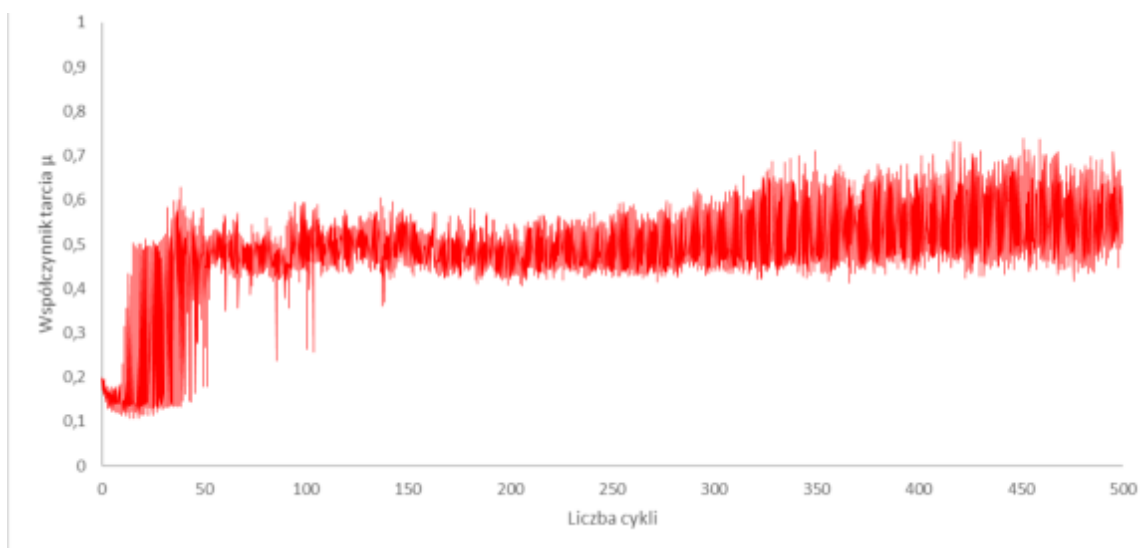


Rysunek 10. Próbkę P90Al; Widoczna korozja na próbce z Al-Si-Cu z naniesioną powłoką przez 90 minut, widoczny wżer

*Figure 10. Sample P90Al; Visible corrosion on the Al-Si-Cu sample with the coating for 90 minutes, visible pitting*

### 3.5 Tribologia

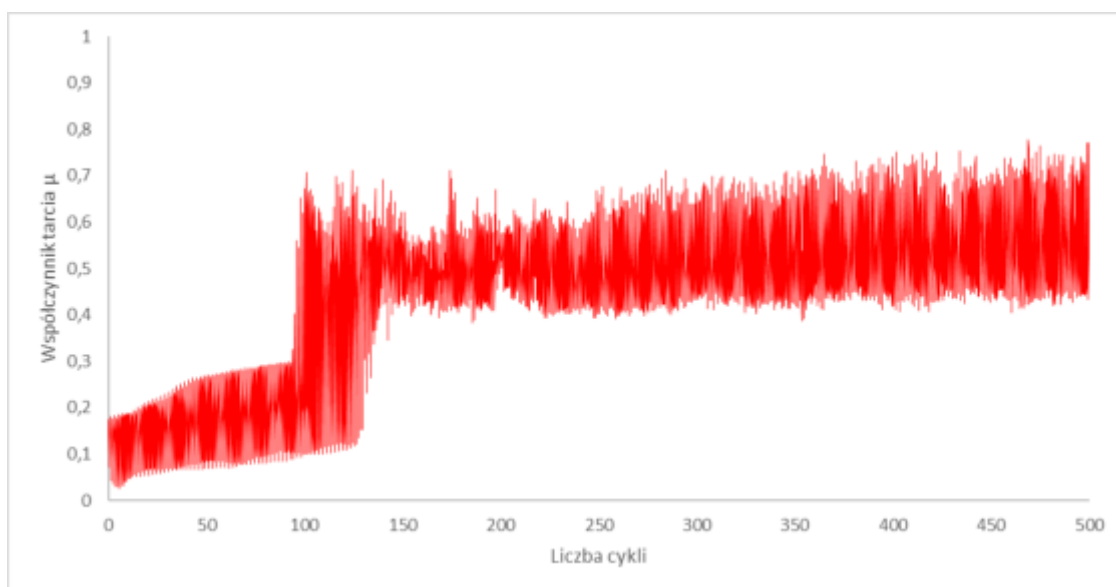
W celu zbadania odporności na ścieranie wykonano badanie tribologiczne „ball-on-disc”, gdzie rejestrowano współczynniki tarcia  $\mu$  w funkcji liczby cykli. Współczynnik tarcia pary trącej stop aluminium typu Al-Si-Cu – węgliki spiekane (przeciwpółka) wynosił około 0,5 (Rysunek 11), natomiast w początkowych cyklach wynosił około 0,2 co świadczy o występowaniu warstwy pasywnej na powierzchni stopu aluminium, która wraz ze wzrostem cykli została przetarta.



Rysunek 11. Współczynnik tarcia w funkcji liczby cykli dla niepowlekanego stopu Al-Si-Cu

*Figure 11. Coefficient of friction as a function of the number of cycles for an uncoated Al-Si-Cu alloy*

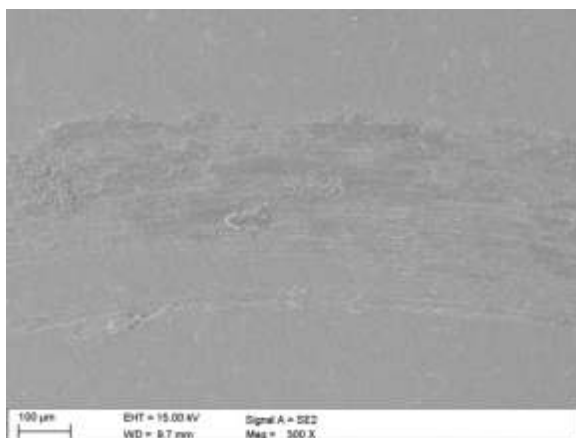
Zarejestrowany współczynnik tarcia dla badanej powłoki  $TiO_2$  w początkowych cyklach wynosił około 0,2. Po określonej liczbie cykli współczynnik gwałtownie wzrósł co świadczy o całkowitym przetarciu powłoki i odsłonięciu podłoża. Zaobserwować można, że odsłonięcie podłoża na skutek całkowitego zużycia powłoki nastąpiło po około 100 cyklach (Rysunek 12). Taki wynik świadczy o poprawie odporności na ścieranie dzięki zastosowaniu powłoki  $TiO_2$ .



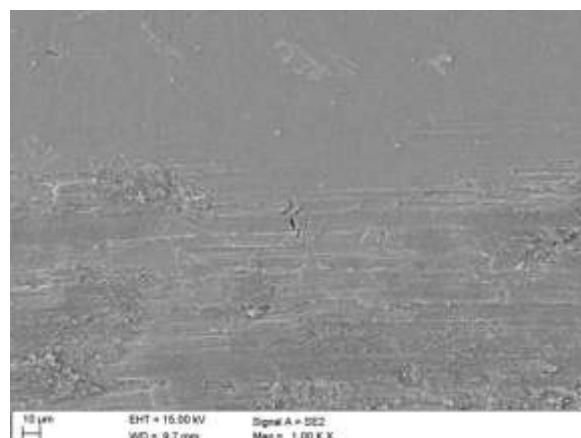
Rysunek 12. Współczynnik tarcia w funkcji liczby cykli dla powłoki  $TiO_2$  osadzonej na stopie Al-Si-Cu w czasie 150 minut

*Figure 12. Coefficient of friction as a function of the number of cycles for the  $TiO_2$  coating deposited on the Al-Si-Cu alloy during 150 minutes*

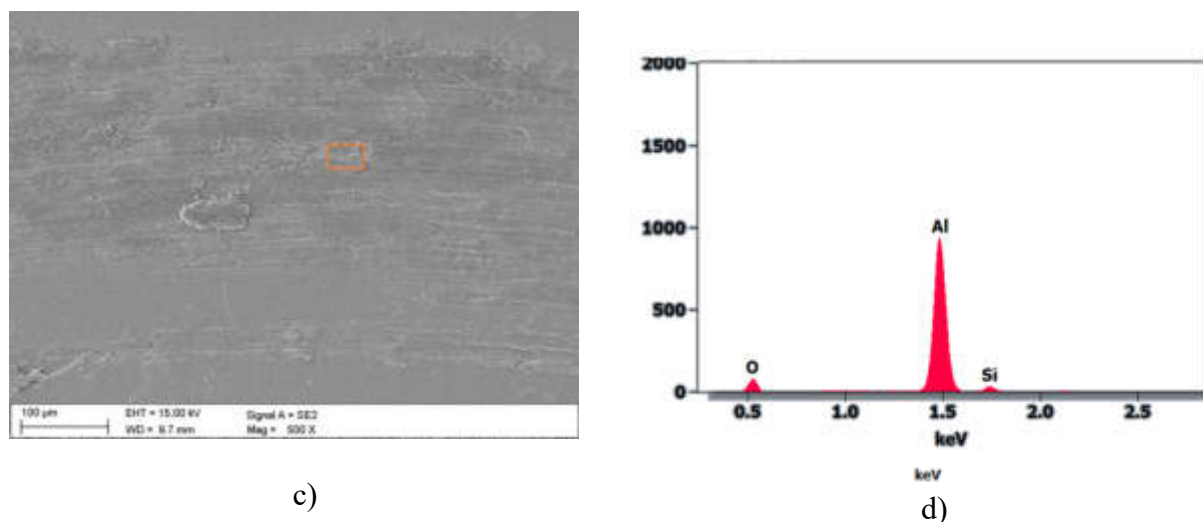
Wykonano zdjęcia powstałej ścieżki wytarcia za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego oraz dokonano analizy składu chemicznego miejsca powstałego wytarcia za pomocą EDS. Na podstawie zdjęć stwierdzono, że podstawowym mechanizmem powstałych zniszczeń było ścieranie (Rysunek 14a-b), w którego wyniku podłoże uległo odsłonięciu. Zaobserwowano również pęknięcia na powierzchni powstałego wytarcia (Rysunek 14b). Zmierzono szerokość powstałej ścieżki wytarcia, która wynosiła około 375  $\mu m$ . Analiza EDS potwierdziła całkowite odsłonięcie podłoża podczas wykonywanego testu.



a)



b)



Rysunek 14. Ścieżka wytarcia po próbie ścierania „ball-on-disc” dla powłoki  $\text{TiO}_2$  osadzonej przez 150 minut; a) pow. 300x; b) pow. 1000x; c) zdjęcie obszaru ścieżki wytarcia, na którym dokonano analizy EDS – analiza na potrzeby badania została pobrana z zaznaczonego miejsca; d) Wykres dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego dla zaznaczonego obszaru (c).

Figure 14. Abrasion path after ball-on-disc abrasion test for  $\text{TiO}_2$  coating deposited for 150 minutes; (a) 300x film; (b) 1000x film; (c) photo of the abrasion path area where EDS analysis was performed - the analysis for the study was taken from the marked area; (d) X-ray energy dispersion plot for the marked area (c).

#### 4. PODSUMOWANIE

Stopy aluminium znajdują coraz szersze zastosowanie dzięki połączeniu takich cech jak wysoka wytrzymałość i niska gęstość. Dodatek Cu w stopie Al-Si-Cu obniża odporność tego stopu na korozję, dlatego zapewnienie wysokiego tempa rozwoju w kierunku poprawy tej własności stało się przedmiotem zainteresowania w środowisku naukowym oraz przemysłowym. Modyfikację tej własności można zapewnić poprzez zastosowanie procesu nanoszenia powłok PVD, które dają możliwość poprawy własności antykorozyjnych tego stopu, wytrzymałościowych, a nawet wizualnych.

W pracy przedstawiono wyniki badań powłok  $\text{TiO}_2$  z podwarstwą czystego tytanu nakładanych metodą MSPVD na stop Al-Si-Cu. W odniesieniu do badań przeprowadzonych z wykorzystaniem nanoszenia powłok konwersyjnych  $\text{TiO}_2$  na stop aluminium Al-Mg-Si zaobserwowano w obu przypadkach poprawę odporności korozyjnej. Dzięki wprowadzeniu cząsteczek  $\text{TiO}_2$  poprawiono ogólną odporność na korozję wżerową. Wydłużenie czasu obróbki parą skutkowało lepszym pokryciem powierzchni badanego materiału [12], ta sama zależność widoczna jest w przypadku powłok  $\text{TiO}_2$  nakładanych na stop Al-Si-Cu.

Przedstawione w pracy wyniki mogą stanowić propozycję rozwiązania technologicznego stosowanego między innymi do elementów bezpośrednio narażonych na wystąpienie korozji. Z drugiej strony badania te mogą stanowić podstawę do dalszego rozwoju, gdzie należałoby porównać większą ilość czasów osadzania i porównać uzyskane efekty. W celu rozwoju samej powłoki  $\text{TiO}_2$  z podwarstwą czystego tytanu należałoby się skupić na przeprowadzeniu testów na innych podłożach.

## 5. WNIOSKI

Na podstawie wyników badań stwierdzono, że:

- Powłoka TiO<sub>2</sub> osadzona w czasie 150 minut posiadała nieco bardziej rozwiniętą i chropowatą powierzchnię niż ta sama powłoka osadzona w czasie 90 minut.
- Testy korozyjne wykazały, że zastosowana powłoka TiO<sub>2</sub> obniża podatność materiału na korozję wżerową w roztworze 3,5% NaCl. Najlepszą odporność korozyjną uzyskano dla próbki pokrytej powłoką w czasie 90 minut.
- Badanie tribologiczne wykazało, że powłoka TiO<sub>2</sub> poprawia odporność na ścieranie.

## PODZIĘKOWANIE

Niniejsze opracowanie powstało w ramach działań Studenckiego Koła Naukowego „GYROID” działającego przy Katedrze Materiałów inżynierskich i Biomedycznych na wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

## LITERATURA

1. Tao Liu, Zongrui Pei, Dallin Barton, Gregory B. Thompson, Luke N. Brewer, Characterization of nanostructures in a high pressure die cast Al-Si-Cu alloy, *Acta Materialia*, Volume 224, 2022, 117500, ISSN 1359-6454, DOI: 10.1016/j.actamat.2021.117500.
2. Wenchao Liu, Yu Sun, Cheng Deng, Lianxi Hu, Shangjing Yuan, Jingyuan Shen, Fei Gao, Meiyi Ba, Cu strengthened Al-Si-Cu semi-solid billet fabricated by liquid phase reaction sintering, *Materials Characterization*, Volume 188, 2022, 111925, ISSN 1044-5803, DOI: 10.1016/j.matchar.2022.111925.
3. M.A. Arenas, A. Conde, I. Garcia, J.J. de Damborenea, PVD hard coatings on ceramic tiles for aesthetic applications: surface characterisation and corrosion properties, *Ceramics International*, 2022, ISSN 0272-8842, DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.04.163.
4. G. Biava, I. Siqueira, R. Fernando Vaz, G. Biscaia de Souza, H. C. M. Jambo, A. Szogyenyi, Anderson G.M. Pukasiewicz, Evaluation of high temperature corrosion resistance of CrN, AlCrN, and TiAlN arc evaporation PVD coatings deposited on Waspaloy, *Surface and Coatings Technology*, Volume 438, 2022, 128398, ISSN 0257-8972, DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128398.
5. A.M. dos Santos, J.C. Sagas, A.L.J. Pereira, F.D. Origo, R.C. Catapan, D.A. Duarte, Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> spherical catalysts produced by magnetron sputtering, *Vacuum*, Volume 200, 2022, 111042, ISSN 0042-207X, DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.111042.
6. L.A. Dobrzański, A. Dobrzańska-Danikiewicz, *Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich*, Open Access Library, vol.5, 2011.
7. S. Morel, Koszty wytwarzania powłok metodami natryskiwania cieplnego, *Weld. Tech. Rev.*, vol. 84, no. 8, Aug. 2012, DOI: 10.26628/wtr.v84i8.363
8. V. Koshuro, M. Fomina, A. Fomin, High-hardness carbide coatings and their production on X82WMoCrV6-5-4 steel using induction physical vapor deposition, *Composite Structures*, Volume 281, 2022, 115045, ISSN 0263-8223, DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.115045.

9. O.P. Oladijo, M.R. Sanjay, L.L. Collicus, S. Siengchin, L. Moloisane, S.S. Oladijo, Effects of deposition time and RF power on the film characteristics of magnetron sputtered silicon carbide thin films, *Materials Today: Proceedings*, Volume 52, Part 5, 2022, Pages 2432-2438, ISSN 2214-7853, DOI: 10.1016/j.matpr.2021.10.423.
10. M. Basiaga, W. Walke, M. Staszuk W. Krajzer, A. Krajzer, K. Nowińska Influence of ALD process parameters on the physical and chemical properties of the surface of vascular stents, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Volume 17, Issue 1, 2017, Pages 32-42, ISSN 1644-9665, DOI: 10.1016/j.acme.2016.08.001.
11. P. Domanowski, Autoreferat do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego w dziedzinie Nauk Technicznych w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy Wydział Inżynierii Mechanicznej, 2018.
12. R. Ud Din, V.C. Gudla, M.S. Jellesen, R. Ambat, Microstructure and corrosion performance of steam-based conversion coatings produced in the presence of TiO<sub>2</sub> particles on aluminium alloys, *Surface and Coatings Technology*, Volume 296, 2016, Pages 1-12, ISSN 0257-8972, DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.03.093.
13. K. Labisz, Kształtowanie struktury i własności powierzchni odlewniczych stopów Al-Si-Cu, *Open Access Library*, vol. 5, 2013.

## Różnice osobowościowe pomiędzy inżynierem 3.0 oraz 4.0

L. Ośmiałowska <sup>a</sup>, P. Ullmann <sup>a</sup>, A. Kiljan <sup>b\*</sup>, E. Jonda <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Student/ka Wydziału Mechanicznego Technologicznego, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Politechnika Śląska

<sup>b</sup> Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Politechnika Śląska

\*email: anna.kiljan@polsl.pl

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia różnice osobowości reprezentowanych przez Inżyniera 3.0 oraz 4.0, a także opis cech charakteru, które ich definiują. W pierwszej części publikacji przedstawiono definicję kompetencji, zwrócono uwagę na podobieństwa tych dwóch typów współczesnego inżyniera, a także na znaczącą różnicę występującą w kompetencjach miękkich. W dalszej części umieszczony został krótki test osobowości, którego wykonanie pozwala sprawdzić, jakim typem osobowości charakteryzuje się dana osoba oraz zdefiniować jej/jego mocne i słabe strony.

**Abstract:** An article describes the differences between personalities represented by an Engineer 3.0 and Engineer 4.0 and the characterisation of character adjectives by which they are defined. In the first part of the publication the definition of competences is presented, the similarities between two types of modern engineer, and the significant differences in a soft skills. The following is a short personality questionnaire, which performing allows to check which type of personality is the one and helps with defining her/his strenghts and weaknesses.

**Słowa kluczowe:** kompetencje, inżynier 3.0 i 4.0, cechy charakteru

### 1. WSTĘP

Współczesny świat stworzył zapotrzebowanie na przekwalifikowanie się inżynierów. Transformacja wysoko wykwalifikowanych Inżynierów 3.0 w interdyscyplinarnych Inżynierów 4.0 trwa. Wiedza i doświadczenie definiujące Inżyniera 3.0 otoczone odpowiednimi kompetencjami miękkimi sprawiają, że doskonale sprostają oni zadaniom powierzonym współczesnym Inżynierom – Inżynierom 4.0. Każdy człowiek charakteryzuje się jednym przeważającym typem osobowości połączonym z innymi wariantami, które wpływają na predyspozycje do spełniania wymagań współczesnych Inżynierów.

Celem artykułu jest poszukiwanie odpowiedzi na pytanie, które cechy charakteru są najbardziej pożądane u Inżyniera 4.0, jaki typ osobowościowy najlepiej odnajdzie



się na tym stanowisku oraz, które typy osobowościowe się ze sobą najlepiej rozumieją, skomunikują i będą skutecznie wspólnie działać.

### 1.1. Czym są kompetencje?

Kompetencjami określane są cechy osobowości oraz umiejętności, które charakteryzują człowieka. Pozwalają one na realizowanie zadań i podejmowanie wyzwań we wszystkich dziedzinach życia. Według definicji Encyklopedii PWN kompetencje to: *“zakres czyjejś wiedzy, umiejętności i doświadczenia”*. W kontekście inżyniera kompetencje stanowią zdolności pozwalające na wykonanie przydzielonego mu zadania, rozwiązanie złożonego problemu technicznego oraz realizowania powierzonych mu obowiązków [1].

### 1.2. Podział na kompetencje miękkie i twarde

Ze względu na bardzo dużą różnorodność i zakres kompetencji, stosuje się ich podział na kompetencje miękkie (umiejętności psychospołeczne) oraz kompetencje twarde (zdobyta wiedza, umiejętności techniczne).

Kompetencje twarde to głównie wiedza i zdolności przydatne do wykonania konkretnej czynności. Przykład może stanowić znajomość oprogramowania komputerowego, korzystanie z narzędzi pomiarowych oraz wszelkie zdolności manualne pozwalające na wykonanie konkretnej pracy.

Kompetencje miękkie to według większości definicji umiejętności psychospołeczne i elastyczność w działaniu. Kompetencje te dzieli się na dwa zakresy zachowań ludzkich. Pierwszy z nich stanowi umiejętność radzenia sobie z sytuacjami stresowymi, planowanie działania i podejmowanie kluczowych decyzji. Umiejętności te sprawiają, że osoby skupiają się na swoich zadaniach i nie popadając w skrajne emocje dążą do wyznaczonego celu. Drugi zakres zachowań stanowi umiejętność odnajdywania się w otoczeniu i współpracę. Kompetencje miękkie to sprawne prowadzenie rozmów, argumentowanie swoich wypowiedzi, motywowanie innych. Osoby z dobrze rozwiniętymi w tym zakresie kompetencjami mają predyspozycje do tworzenia zespołów inżynierskich, organizowania i delegowania im zadań do wykonania, ułatwiają również wymianę informacji między członkami zespołu. Osoby z wyżej wymienionymi zdolnościami zazwyczaj sprawdzają się również na stanowiskach nauczycieli oraz negocjatorów [2]. W tabeli 1 przedstawiono kompetencje z podziałem na miękkie i twarde.

Tabela 1 Porównanie kompetencji miękkich i twardych

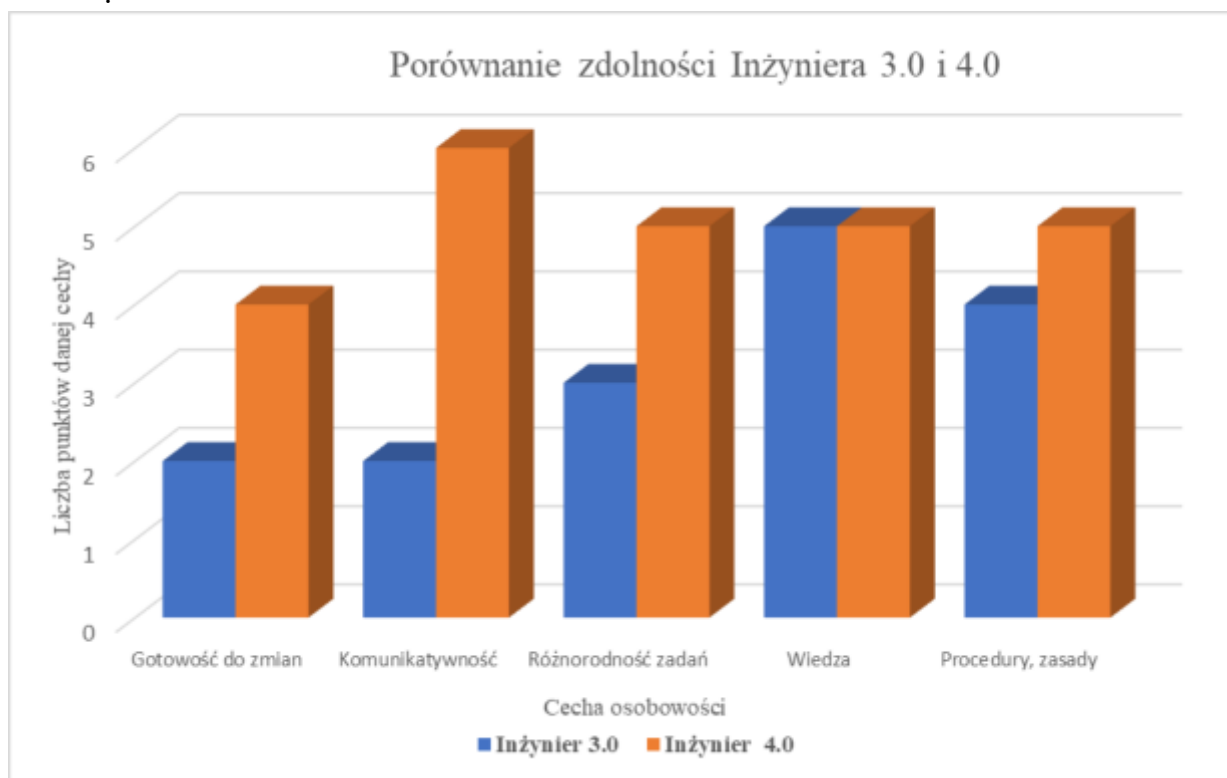
Table 1 Comparison of the soft and hard competences

| Kompetencje                                     |  |   |
|---|--|---|
| Miękkie   |  | Twarde  |
| Zdolność radzenia sobie z sytuacjami stresowymi | Zdolność do współpracy                   | Wiedza potwierdzona dyplomami i certyfikatami   |
| Zdolność planowania działania                   | Zdolność do prowadzenia negocjacji       | Umiejętność posługiwania się językiem obcym     |
| Zdolność do podejmowania kluczowych decyzji     | Sprawne prowadzenie rozmów - komunikacja | Zdolność analitycznego myślenia                 |
| Elastyczność działania                          | Motywowanie innych                       | Zdolność do skupienia się na własnych zadaniach |

## 2. CECHY CHARAKTERU WSPÓLNE I ROZBIEŻNE U INŻYNIERA 3.0 I 4.0

### 2.1. Porównanie cech charakteryzujących Inżyniera 3.0 i 4.0

Na rysunku 1 przedstawiono porównanie zdolności Inżyniera 3.0 i 4.0. Na osi x umieszczono poszczególne cechy, natomiast na osi y ich ocenę w skali od 0 ÷ 7, gdzie 0 oznacza słabo rozwiniętą cechę, niechęć do działania, natomiast 7 to cecha rozwinięta na wysokim poziomie, która oznacza pełną gotowość do działania [3].



Rysunek 1. Porównanie zdolności Inżyniera 3.0 i 4.0

*Figure 1 Comparison of the 3.0 and 4.0 Engineer abilities*

Na podstawie przedstawionych wyników można wnioskować, że Inżyniera 3.0 oraz 4.0 charakteryzuje bardzo wiele podobieństw, które głównie są zauważalne w przypadku takich cech, jak: specjalistyczna wiedza w danym zagadnieniu, potrzeba logicznego wykonywania zadań oraz koncentracja na ich wykonaniu według obowiązujących zasad. Z drugiej strony przy takich cechach, jak gotowość do zmian i komunikatywność można zauważyć istotną różnicę. W tym wypadku widać, że Inżynier 4.0 jest osobą znacznie mocniej otwartą na ludzi, jego umiejętności i gotowość przystosowania się do nowych sytuacji jest znacznie wyższa. Cechuje się on większą elastycznością w działaniu i realizacji zadań.

## 2.2. Ewolucja Inżyniera

Inżynier 3.0 działał według ściśle ustalonych norm i zgodnie z określonymi procedurami, odczuwał niepokój w trakcie zmieniających się sytuacji, większą uwagę poświęcał realizacji zadań, niż otaczających go ludzi, potrafił pracować w zespole, który już znał. Jest to osoba skrupulatna, która dąży do realizacji wyznaczonego celu. Małomówny inżynier 3.0 lubi pracować własnym tempem i preferuje samodzielną pracę. Zgodnie z profilowaniem typu osobowości według zasad Hipokratesa [4] można sądzić, że te cechy najlepiej opisują introwertyków: melancholików, którzy w pracy z łatwością dostosowują się do obowiązujących regulaminów oraz przywiązują ogromną uwagę do detali, a także flegmatyków - profesjonalnych i rzetelnych w pracy [5, 6].

Inżynier 4.0 podobnie, jak Inżynier 3.0 posiada wiedzę techniczną w swojej dziedzinie specjalizacji oraz stosuje się do ustalonych norm i działa zgodnie z określonymi procedurami. Jest otwarty i potrafi wpływać na otaczających go ludzi. Różni się on od inżyniera 3.0 w głównej mierze cechami charakteru związanymi z komunikatywnością i gotowością do szybkiego wprowadzania zmian, czy też różnorodnością zarówno w zadaniach, nad którymi pracuje, jak i w kontaktach z innymi ludźmi. Musi być również świadomy wyżej wymienionych różnic oraz umiejętności. Do ich obowiązków coraz rzadziej należą czynności powtarzalne, które są zastępowane pracą maszyn, a zadaniem inżyniera coraz częściej jest ich optymalizacja i zapewnienie bezpieczeństwa. Bardzo ważna jest zdolność do właściwej interpretacji faktów oraz przewidywania nadchodzących wydarzeń, a także umiejętność do sprawnego podejmowania decyzji [6, 7].

Na istotne części składowe rzetelnego, współczesnego inżyniera składają się: jego zachowanie, szacunek dla innych oraz system wartości, który reprezentuje. W dzisiejszych czasach przywiązuje się coraz większą uwagę podczas poszukiwania tak nacechowanych pracowników, pomimo faktu, że staje się to coraz bardziej skomplikowanym procesem. Coraz częściej w zakładach pracy stosuje się testy osobowościowe mające na celu określenie typu osobowości pracowników, które pozwalają na zbadanie ich silnych i słabych stron, predyspozycji oraz umożliwiają weryfikację ich umiejętności.

Cechy charakteru wpływają na predyspozycje osób pozwalające odnaleźć się w roli Inżynierów 4.0, spełniania ich specyficznych wymagań oraz wypełniania zadań im stawianym. Według Hipokratesa wyróżnia się 4 typy osobowości: choleryk, flegmatyk, melancholik, sangwinik, które grupuje się na introwertyków i ekstrawertyków.

Dzięki rozwiniętym zdolnościom interpersonalnym dobry inżynier cechuje się zdolnością do analizy dużej ilości danych pochodzących z różnych źródeł, szacowania jak bardzo są one istotne i wiarygodne, a także gotowością na zmiany oraz otwartością na inne dziedziny i ludzi [8].

## 3. TYPY OSOBOWOŚCI NA PODSTAWIE TEORII HIPOKRATESA

Poniżej zamieszczono ankietę wykonaną w celu uzyskania odpowiedzi na pytanie, który typ osobowościowy najlepiej odnajdzie się w roli inżyniera 4.0 oraz, jakie cechy są najbardziej pożądane na wyżej wymienionym stanowisku. Ankieta składa się z 13 pytań, a na każde pytanie uczestnicy mieli do wyboru 4 odpowiedzi przedstawione w Tabeli 2. Każda z zaprezentowanych możliwych odpowiedzi odpowiada cechom osobowościowym charakterystycznym dla jednego z czterech typów osobowości – choleryka, flegmatyka, melancholika oraz sangwinika.

Kwestionariusz osobowości przeznaczony do wyznaczenia typu osobowości [opracowanie własne]:

1. Jakim zdarza Ci się być podczas rozmowy?
2. Jaka cecha najlepiej opisuje Cię w pracy?
3. Na jakim stanowisku chciałbyś pracować?
4. Jaki jesteś podczas pracy w grupie?
5. Jaka cecha najbardziej Cię opisuje?
6. Która cecha Twojego charakteru jest przyczyną niewykonania zleconego zadania?
7. Kim starasz się być w nowym towarzystwie?
8. Jak najchętniej spędzasz czas?
9. Co najbardziej sobie cenisz w Twoim miejscu pracy/nauki?
10. Jakbyś siebie opisał?
11. Co jest Twoją słabością?
12. Jaki zawód chciałbyś wykonywać?
13. Jaki był Twój ulubiony przedmiot szkolny?

Tabela 2 Cechy osobowościowe – odpowiedzi do ankiety  
*Table 2 Personality traits - answers to the questionnaire*

| Cechy osobowości |                 |                  |               |                    |
|------------------|-----------------|------------------|---------------|--------------------|
| L.p.             | A               | B                | C             | D                  |
| 1                | niecierpliwy    | niezdecydowanym  | niepewnym     | wtrącam się        |
| 2                | niezastąpiony   | ociągający się   | wybredny      | chaotyczny         |
| 3                | dyrektor        | mediator         | programista   | sprzedawca         |
| 4                | odważny         | dyplomatyczny    | drobiazgowy   | rozrywkowy         |
| 5                | wytrwałość      | tolerancyjność   | idealizm      | energiczność       |
| 6                | natańczywość    | niepokój         | przygnębienie | naiwność           |
| 7                | manipulant      | dystansujący się | samotnik      | zmienny            |
| 8                | zawody sportowe | film w domu      | teatr         | impreza towarzyska |
| 9                | wyniki          | spokój           | porządek      | atmosfera          |
| 10               | uparty          | pesymista        | sceptyk       | optymista          |
| 11               | brak empatii    | brak chęci       | brak humoru   | brak dyscypliny    |
| 12               | policjant       | pedagog          | księgowy      | aktor              |
| 13               | w-f             | język polski     | matematyka    | zajęcia teatralne  |

Kolumny z wyżej wymienionymi cechami osobowościowymi charakteryzują 4 typy charakteru opisane poniżej :

- A - Choleryk - dynamiczny i aktywny, człowiek czynu
- B - Flegmatyk - spokojny, cierpliwy, chłodny
- C - Melancholik - idealista, poważny i zdeterminowany
- D - Sangwinik - spontaniczny, energiczny, wesoły

### 3.1. Charakterystyka typu osobowości

#### 3.1.1. Choleryk

Choleryk jest zazwyczaj ekstrawertykiem i optymistą. Wprost można go opisać, jako człowieka czynu, zdecydowanego i aktywnego, twardo stąpającego po ziemi przedsiębiorcę. Przyjmuje zazwyczaj rolę przywódcy i zajmuje się organizacją wszelkich wydarzeń. Stawia na praktyczne rozwiązania, które wprost pomagają mu w realizacji jego celów. Według niego najważniejsze są osiągnięcia grupy, łatwo wzbudza zaufanie i odnajduje się w nieoczekiwanych sytuacjach.

Zawodowo uwielbia zdrową rywalizację, która powoduje u choleryka dodatkową mobilizację, dzięki czemu dynamizuje swoje czyny i skupia się na maksymalizacji wydajności. Jest również bardzo wymagający wobec innych i stara się panować nad wszystkim, delegując przy tym pracę w rozsądny sposób. Bardzo lubi zmiany i dobrze odnajduje się w czynnościach wykonywanych pod presją czasu, jest w swoich poczynaniach samodzielny i nie znosi sprzeciwu. Słowo "przepraszam" oznacza dla niego przyznanie się do błędu, do którego bardzo rzadko jest skłonny się przyznać.

Jego słabość to pracoholizm, nieposkromiona chęć dowodzenia i manipulacji innymi. Jest zazwyczaj tak skupiony na osiągnięciu celu, że nie pozwala innym na podjęcie decyzji będąc pewnym, że to on ma rację, a inni są w błędzie. Dodatkowo udaje mu się tak kierować działaniami ludzi, że nawet nie są tego świadomi, a podpowiedziane przez innych rozwiązania wykorzysta i przedstawi bez skrpułów jako własne [9, 10].

#### 3.1.2. Flegmatyk

Opanowany flegmatyk to zamknięty w sobie, życzliwy introwertyk. Lubi stanąć w cieniu wydarzeń i działać z drugiego planu - jest dobrym obserwatorem ludzi i słuchaczem, co sprawia, że jest bardzo lubiany w towarzystwie. Cechuje go spokój oraz uprzejmość, nie popada w złość lub depresję. Mówi się potocznie, że jest to osoba uniwersalna.

Jako pracownik jest osobą bardzo rzetelną i profesjonalną, dobrze odnajduje się w przydzielonych mu zadaniach administracyjnych. Nie przeszkadza mu presja, ale wykonuje również chętnie zadania, które są rutynowe i preferuje stanowiska, na których nie musi wykazywać większej inicjatywy w działaniu. Może pełnić funkcję mediatora w rozwiązywaniu problemów i znajduje proste sposoby na wyjście z nich.

Największą słabością flegmatyka jest trudność do szybkiej adaptacji w razie zmian i ekscytacji przy dowolnych kwestiach. Kolejną cechą, która go ogranicza jest zdystansowanie emocjonalne i brak otwartości na ludzi. Nie jest to osoba rozrywkowa, preferuje spokój i tego też oczekuje od innych. Lubi osiągać cel, wkładając w działanie jak najmniejszą ilość pracy i wysiłku, odkładać realizację zadań do ostatniej chwili, nie czuje także odpowiedzialności za grupę [9, 10].

#### 3.1.3. Melancholik

Melancholik jest sumienny, refleksyjny i często zamyślony. Dużą wagę przywiązuje do sztuki, zagłębia się w teksty filozofów i poematy, ceni bliski kontakt z przyrodą. Melancholicy są często osobami utalentowanymi i zdeterminowanymi do działania, idealistami. Są skłonni do poświęceń dla innych i są bardzo wrażliwi na ich potrzeby, dlatego też są często opisywani, jako oddani przyjaciele, którzy zawsze służą dobrym słowem.

W pracy cenią sobie porządek i ciszę, najchętniej pracują samodzielnie i sami sobie organizują pracę. Melancholik łatwo dostosowuje się do panujących w miejscu pracy reguł

i przestrzega skrupulatnie wszelkich regulaminów, zawsze realizuje powierzone mu zadania w wyznaczonym terminie i finalizuje rozpoczęte prace. Chętnie pracuje z danymi analitycznymi, tworzy sprawozdania i rozlicza skrupulatnie raporty.

Problemem melancholików jest ich zewnętrzna aparycja. Trudno rozpoznać u takich osób czy są smutne, czy szczęśliwe, łatwo popadają również w depresję. Często nie rozumieją żartów i traktując każdą sytuację z pełnią powagi obwiniają się za najmniejsze niedociągnięcia. Są to zazwyczaj osoby z niską samooceną, co bardzo utrudnia przedstawienie im problemu, bądź wyrażanie krytyki [9, 10].

### 3.1.4. Sangwinik

Sangwinik jest osobą wesołą, dzięki czemu z łatwością przyciąga do siebie innych ludzi. Jest rozmowny, cechuje go duże poczucie humoru oraz barwna osobowość. Jest to człowiek ciekawy świata i otwarty na ludzi, dużo mówi i chętnie poznaje nowe grupy osób. Pełen entuzjazmu w większości przypadków działa spontanicznie, nie tracąc przy tym nigdy wiary w założony cel i nie przejmuje się nieprzychylnymi opiniami.

W pracy sangwinicy podtrzymują ducha zespołu i wprowadzają dobrą atmosferę. Często żartują i z odpowiednią wrażliwością niwelują negatywne emocje, które mogą pojawiać się podczas codziennej pracy. Ich sposób bycia zjednuje współpracowników i ułatwia im kontakty interpersonalne, co czyni ich dobrymi handlowcami. Te cechy charakteru sprawiają, że stanowią często twórczy bodziec dla innych do działania. Łatwo tworzą dobre relacje z klientami i bardzo cenią sobie elastyczność i swobodę w wykonywanych czynnościach.

Do słabości sangwiników zalicza się ich brak dostrzegania własnych wad i nieprawidłowych zachowań. Osobom z tym typem osobowości, często zdarza się mieć zbyt wysokie mniemanie o sobie i próbowanie przechytrzenia innych. Ich gadatliwość i wyolbrzymianie wielu spraw może powodować irytację u innych osób. Często też dochodzi do sytuacji, w których sangwinik nie finalizuje wcześniej zaplanowanych czynności, co utrudnia mu osiągnięcie wyznaczonych celów [9, 10].

## 3.2. Jakie typy osobowości mogą razem współpracować?

Biorąc pod uwagę indywidualny wynik każdej osoby odpowiadającej na pytania w powyższym kwestionariuszu można stwierdzić, że każdy człowiek jest połączeniem kilku typów osobowości. Zazwyczaj jest to jeden przeważający profil. W celu ułatwienia zrozumienia, jakim osobom będzie łatwiej wspólnie funkcjonować, należy dodatkowo pogrupować typy osobowości na introwertyków (melancholik i flegmatyk) oraz ekstrawertyków (sangwinik i choleryk).

Melancholik i flegmatyk są oboje introwertykami. Pozwala to na zgodne połączenie ich osobowości. Osoby takie uzupełniają się w kwestii emocjonalnej, w której flegmatyk jest znacznie stabilniejszy, natomiast to melancholik ze swoim perfekcjonizmem dopilnuje, aby zadania zostały wykonane prawidłowo i w odpowiednim terminie. Melancholicy i flegmatycy są w stanie ze sobą razem dobrze współpracować, bo doceniają ciszę, spokój i prywatność w miejscu pracy.

Ekstrawertycy natomiast, sangwinik i choleryk działają pod wpływem impulsu. Są to osoby, które uwielbiają dynamiczne zmiany, ciągły ruch i zamieszanie. Ekstrawertycy wyrażają się poprzez swoją aparycję i czyny. Oboje doskonale jednoczą sobie ludzi: sangwinik poprzez swój wesoły styl bycia i poczucie humoru, choleryk natomiast dzięki swojej prostoliniowości

i stanowczości w dążeniu do celu. Są to typy osobowości, dla których ważne jest słowo i ekspresja. Szybkie i aktywne działanie jednocy te dwa profile i pozwala na zdyscyplinowaną pracę w bardzo dobrej atmosferze.

Przeciwności również się przyciągają, ale w tym wypadku występuje już konieczność przystania na większą ilość kompromisów. Mowa tutaj o połączeniach uzupełniających. Współpraca flegmatyka i sangwinika również może być owocna, ponieważ są w stanie podejść do wykonywanych zadań z odpowiednim dystansem i humorem. Wszelkie problemy rozwiązują spokojnie i bez żadnych ekscesów wykonują swoją pracę.

Podobnie uzupełniają się melancholik i choleryk, są to osoby w głównym stopniu nakierowane na osiągnięcie zamierzonego celu. Wymagają od samych siebie bardzo dużo, a do swoich obowiązków podchodzą bardzo skrupulatnie. Melancholik jest w stanie swoim zachowaniem lekko stonować temperament choleryka, natomiast ten drugi dba o ciągłą motywację i zachowanie pełnej koncentracji [9, 10].

#### **4. TYP OSOBOWOŚCI, KTÓRY NAJŁATWIEJ ODNAJDZIE SIĘ W ŚRODOWISKU INŻYNIERA 4.0**

Na podstawie profilowania typu osobowości według zasad Hipokratesa można wnioskować, że najbardziej pasują do tego stanowiska ekstrawertycy, czyli sangwinik oraz choleryk. Ich mocną stroną są praca w zespole i zarządzanie grupą, która dla Inżyniera 4.0 ma kluczowe znaczenie. Kolejnym atutem jest ich zdolność do adaptacji i elastyczność przy implementacji nowych projektów oraz innych zmian. Ponadto są to osoby otwarte na rozwój zarówno osobisty, jak i całego zespołu, co pozwala na rozszerzenie obszaru zagadnień, nad którymi mogą pracować. Choleryk oraz sangwinik to osoby lubiące wyzwania i łatwo adaptujące się do zmian, nie mające więc problemu z łączeniem dwóch podstawowych elementów - wirtualnych i fizycznych, na których opiera się działanie współczesnego Inżyniera. Osoba pracująca na tym stanowisku musi być wszechstronna i powinna łączyć wiedzę z zakresu produkcji, jej komputeryzacji wraz ze znajomością wdrażania systemów informatycznych [8,11].

#### **5. PODSUMOWANIE**

Na stanowisku inżyniera 4.0 zgodnie z przeprowadzonym kwestionariuszem osobowości najlepiej odnajdą się choleryk oraz sangwinik. Połączenie tych dwóch typów osobowości o podobnych cechach, charakterach i sposobach pracy skutkuje dobrą komunikacją, zrozumieniem oraz skutecznym wspólnym działaniem.

Cyfryzacja i globalizacja odgrywa istotną rolę na tym stanowisku oraz zmusza inżynierów do współpracy z międzynarodowymi klientami. Dzięki wirtualnym narzędziom i odpowiednim szkoleniom sangwinicy i cholerycy są w stanie udoskonalić swoje zdolności komunikowania się i przedstawiania danych projektowych. Ich wiedza i doświadczenie definiujące Inżyniera 3.0, otoczone odpowiednimi kompetencjami miękkimi sprawiają, że doskonale sprostają zadaniom powierzonym współczesnym inżynierom – Inżynierom 4.0.

#### **LITERATURA**

2. <https://encyklopedia.pwn.pl/>

3. <https://hrk.pl/pl/baza-wiedzy/artykuly-eksperckie/czym-sa-kompetencje-miekkie-i-twarde-przyklady-tych-umiejetnosci>  
03.08.2021
4. Zbigniew Piątek, Jak rozwijac kompetencje Inżyniera 4.0? <https://przemysl-40.pl/index.php/2018/04/11/jak-rozwijac-kompetencje-inzyniera-4-0/>, 11.04.2018
5. Katarzyna Płuska, Cztery typy osobowości według Hipokratesa – którym jesteś? +Test <https://www.katarzynapluska.pl/cztery-typy-osobowosci-wg-hipokratesa-ktorym-jestes-test/>, 28.03.2017
6. Małgorzata Hadwiczak, Inżynier 4.0 – czwarta rewolucja przemysłowa a kluczowe kompetencje pracowników
7. Małgorzata Stoch, Inżynierowie przemysłu 4.0 : jak ich rozwijac? <https://www.ican.pl/b/inzynierowie-przemyslu-40-jak-ich-rozwijac/1A0LUxCGY>, 22.11.2016
8. Wojciech Traczyk, Jaki bedzie inzynier w przemyśle 4.0? <https://elektrotechnikautomatyk.pl/artykuly/jaki-bedzie-inzynier-w-przemysle-4-0>, 21.04.2021
9. Jarosław Gracel, Małgorzata Stoch, Agnieszka Bieganska, Aneta Rzaca Inżynierowie Przemysłu 4.0 (Nie)gotowi do zmian?, Inżynierowie Przemysłu 4.0 (nie)gotowi do zmian? - Control Engineering Polska, 01.2017
10. Littauer Florence, Sweet Rose Osobowość Plus w praktyce. Jak skutecznie współpracować z każdym, Logos Oficyna Wydawnicza, Warszawa 2011.
11. Littauer Florence Osobowość plus. Jak zrozumieć innych przez zrozumienie siebie, Logos Oficyna Wydawnicza, Warszawa 2000
12. Agnieszka Politańska, Co ma wspólnego Inżynier 4.0 z człowiekiem renesansu <https://automatykaonline.pl/Artykuly/Przemysl-4.0/Co-ma-wspolnego-Inzynier-4.0-z-czlowiekiem-renesansu>, 20.11.2018
13. Szymon Augustyniak, Inżynier 4.0, <https://www.computerworld.pl/news/Inzynier-4-0,415318.html>, 10.09.2019
14. Inżynier 4.0 – ekspert do zadań specjalnych, <https://automatykab2b.pl/prezentacje/52476-inzynier-4-0-ekspert-do-zadan-specjalnych>, 09.03.2020



## Recyklácia Al a jeho zliatin

Ivana Petrisková<sup>a</sup>, Lenka Kuchariková<sup>a</sup>, Eva Tillová<sup>a</sup>, Lucia Pastierovičová<sup>a</sup>, Magdalena Mazur<sup>b</sup>, Mirosław Bonek<sup>c</sup>, Marek Roszak<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra materialového inžinierstva, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovak Republic

<sup>b</sup> Department of Production and Safety Engineering, Faculty of Management, Czenstochowa university of Technology, ul. Armii Krajowej 19B, 42-200 Częstochowa, Poland

<sup>c</sup> Department of Engineering Materials and Biomedicals, Faculty of Mechanical Engineering, Silesian Technical University, ul. Konarskiego 18a, PL - 44-100 Gliwice, Poland

\*email: petriskova@stud.uniza.sk

**Abstrakt:** Článok je zameraný na teoretický rozbor poznatkov o sekundárnej výrobe hliníka a jeho zliatin, t.j. recyklácii. V článku je uvedený prehľad pozitív a negatív recyklačného procesu, porovnanie primárnej a sekundárnej spôsob výroby Al a jeho zliatin z hliníkových odpadov.

**Kľúčové slová:** hliník, recyklácia, sekundárna výroba Al.

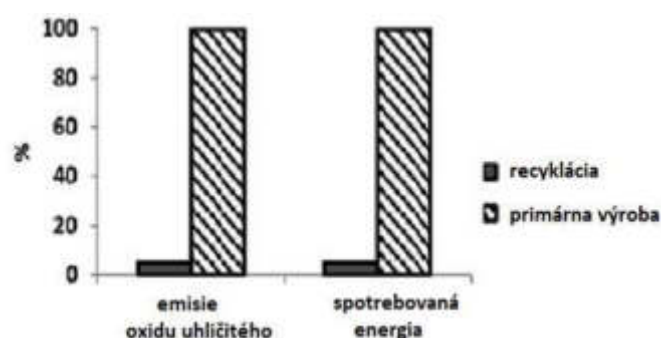
## 1. ÚVOD

Recyklačné procesy hliníkových zliatin sú v súčasnosti veľmi populárne, či už kvôli ubúdajúcim surovinovým zdrojom pre primárnu výrobu, ale aj kvôli snahe eliminovať emisie, čo má pozitívny dopad na životné prostredie. Recyklovaním hliníka sa zabraňuje úniku viac ako 90 ton oxidu uhličitého ročne do atmosféry. Celkovo v porovnaní s primárnou výrobou sa pri recyklácii produkuje oveľa menej odpadu. Veľmi dôležitým faktorom je až 95 % úspora energie v porovnaní s primárnou výrobou Al a jeho zliatin, čo má za následok výrazné zníženie finančných nákladov pri výrobe, nakoľko náklady na energiu potrebnú pri výrobe kovu sú rozhodujúcim faktorom vývoja ceny predaja.

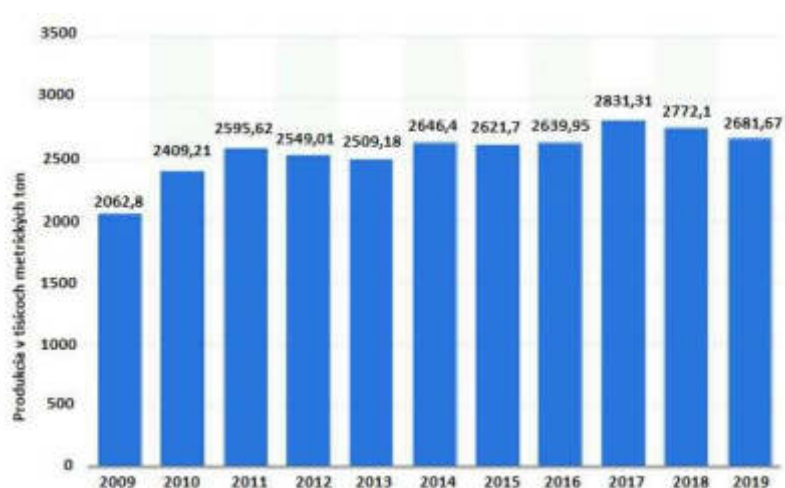
## 2. VPLYV VÝROBY HLINÍKA NA ŽIVOTNÉ PROSTREDIE

Sekundárna výroba, resp. recyklácia, predstavuje výrobu Al a jeho zliatin z Al šrotu a Al odpadov. Z hľadiska životného prostredia je recyklácia hliníka ekologicky výhodná, pretože zbieranie a spracovanie hliníkového šrotu má menší vplyv na životné prostredie ako primárna výroba (obr.1). Vývoj v oblasti využívania recyklácie pri výrobe sekundárnych zliatin vzrástol po obnove hospodárstva a priemyslu po druhej svetovej vojne [1]. Recyklácia hliníka je v súčasnosti veľmi populárna najmä kvôli zvyšujúcej sa spotrebe a tým pádom i výrobe hliníka a zvyšujúcemu sa množstvu odpadu alebo šrotu (obr. 2), ktorý sa nachádza v obehu. To sa deje

ako dôsledok veľkého využitia hliníka v oblasti automobilového, leteckého a kozmického priemyslu, energetiky a pod [2].



Obrázok 1. Vplyv primárnej a sekundárnej výroby Al na životné prostredie [3]  
 Figure 1. The impact of primary and secondary production Al on the environment [3]

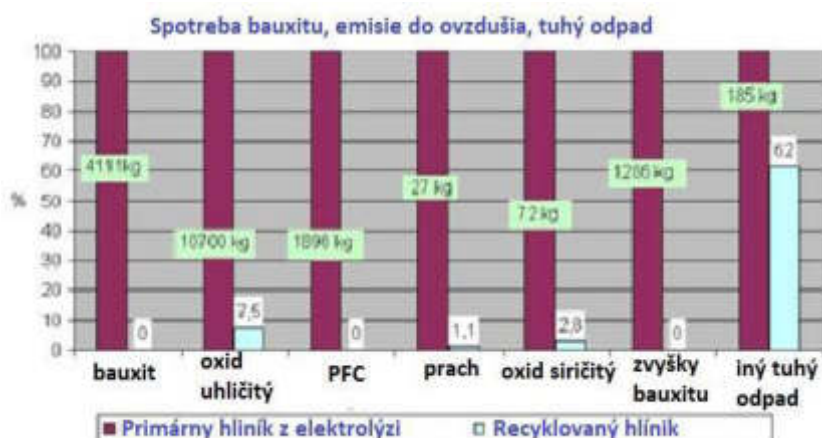


Obrázok 2. Produkcia sekundárneho Al a jeho zliatin v Európe podľa rokov [4]  
 Figure 2. Production of secondary Al and its alloys in Europe by years [4]

K ďalším výhodám pri výrobe kilogramu recyklovaného hliníka patria [1,5, 6]:

- znížená spotreba bauxitu približne o 8 kg,
- znížená spotreba a produkcia chemikálií o 4 kg,
- znížená produkcia emisií CO<sub>2</sub> o 9,8 kg, čo predstavuje približne 94 % emisií CO<sub>2</sub>,
- znížená produkcia červeného kalu o 1,4 kg.
- elkové emisie skleníkových plynov je pri recyklácii až 40-krát nižšia (obr. 3).

V dôsledku tohto sa produkcia recyklovaného hliníka každým rokom zvyšuje [1,5]. V súčasnosti je takmer tretina používaných hliníkových produktov recyklovateľných. Nie je však možné dosiahnuť vysoký podiel recyklovaného kovu vo všetkých nových výrobkoch z hliníka, pretože jeho dostupné množstvo po dobe životnosti výrazne nedosahuje celkový dopyt [7].



Obrázok 3. Príklad výhod recyklácie Al a jeho zliatin [8]

Figure 3. An example of the advantages of recycling Al and its alloys [8]

Nemožno však opomenúť, že aj sekundárna výroba hliníka (recyklácia) produkuje značné množstvo odpadov a emisií. Časť z nich je možné recyklovať, ale mnohé majú nebezpečný charakter. Čistením spalín pri tavení vznikajú prachové tuhé odpady alebo kaly [9]. Spaliny obsahujú prachové častice, použité tavidlá, kyslé plyny a pod. Ďalej sa pri upravovaní šrotu produkujú odpadové plyny obsahujúce tuhé znečisťujúce látky (TZL), organické pary (VOC) [5]. Pri rafinácii najmä pri procese odhorčikovania sa používa chlór vzniká soľ  $MgCl_2$ , ktorá sa siahne v steroch pri prebytku chlóru vznikne chlorid hlinitý, ktorý reaguje s vlhkosťou za vzniku  $HCl$ . Použitie solí  $AlF_3$  (fluorid hlinitý) má za následok tvorbu  $MgF_2$  (fluorid horečnatý),  $HF$  (kyselina fluorovodíková) a výparov  $AlF_3$ ,  $SiF_4$  (fluorid kremičitý) a prachu [10]. Tieto emisie sa čiastočne zachytávajú strešnými príklopami alebo úplným uzavretím pece, čo závisí od jej typu. Vo Venturiho odlučovačoch sa čistia najmä emisie z odhorčikovania, elektrostatický odlučovač sa používa na elimináciu dioxínov, ktoré sú produktom nedostatočného spaľovania [11]. Emisie z pecných horákov obsahujú najmä  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$  a  $NO_2$  [12]. V konečnom dôsledku však možno skonštatovať, že odpady vznikajúce pri recyklácii sú menšieho meradla ako pri primárnej výrobe Al a jeho zliatin.

### 3. TECHNOLÓGIA VÝROBY SEKUNDÁRNEHO AL A JEHO ZLIATIN

Technológiu výroby sekundárneho Al a jeho zliatin možno definovať nasledujúcimi krokmi [5,13]:

- prvým krokom je úprava hliníkového šrotu (drvenie, triedenie, čistenie). Úprava hliníkového odpadu je zameraná na kvalitu a na zníženie strát spojených s jeho spracovaním. Spracovanie odpadu závisí od rôznych faktorov ako napr. typ odpadu (starý alebo nový šrot), chemické zloženie odpadu a podobne. Podľa toho sa určuje najvhodnejšia technológia spracovania., pretože ak je vhodne spracovaný môže sa využiť na rôznorodé aplikácie.
- potom nasledujú operácie tavenia, rafinácie, odplyňovania, legovania a úpravy štruktúry zliatin, sťahovania sterov, filtrácie a odlievania do polotovarov.

Vo všeobecnosti technológia výroby sekundárneho hliníka závisí predovšetkým na type vstupných surovín a druhu aplikácie novo-recyklovaného hliníka. Základné rozdelenie vstupných surovín, t.j. hliníkového šrotu je [14]:

- nový šrot, ktorý vzniká pri procese výroby hliníka alebo pri jeho spracovaní,

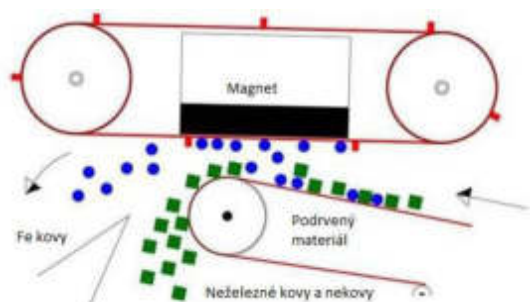
- starý šrot, ako materiál po dobe životnosti

Nový šrot nepotrebuje špeciálnu úpravu okrem prípadnej úpravy na požadovanú veľkosť alebo sušenia a zhutnenia. Triesky a stery sa tiež považujú za nový šrot, ale triesky sú znečistené vplyvom olejov a iných kvapalín z obrábania a stery obsahujú nitrídy a tavidlá, preto je potrebné tieto materiály upraviť [5]. Stery sa spracovávajú granulovaním v zariadeniach na granuláciu sterov a následným pretavením v rotačnej peci na hliníkové zliatiny. Z tejto operácie pretavovania sterov v rotačných peciach vznikajú odpady, ktoré sa zvyknú označovať ako soľné trosky [15]. U sterov sa rozlišujú stery, ktoré vznikajú z prvého tavenia- biele stery (obsah Al 15 – 80 %) a stery z druhého tavenia- čierne stery (obsah Al 7- 50 %). Soľné trosky obsahujú 7- 9 % Al, pričom zvyšok tvoria oxidy a taviace soli [16]. Hliníkový šrot sa generuje v mnohých častiach výrobného procesu. Stráca sa buď počas tavenia alebo pri jednej z mnohých obrábacích operácií použitých na výrobu hliníkového kusu. Najväčší zmysel má vrátiť šrot do tej istej zliatiny alebo druhu ak je to možné.

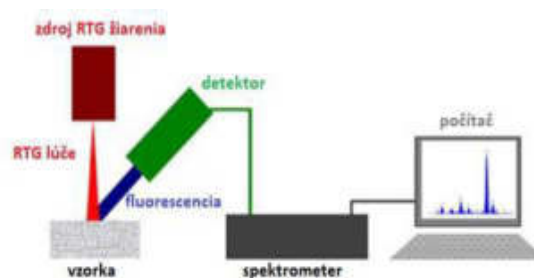
### 3.1 Spracovanie vstupného materiálu

Spracovanie alebo úprava šrotu predstavuje zlepšenie kvality suroviny, zlepšenie manipulácie so surovinou a zamedzenie oxidácie. To zahŕňa ručnú alebo automatizovanú separáciu na oddelenie komponentov, úpravu veľkosti a pod. Ešte pred samotnou mechanickou úpravou je potrebné šrot skladovať v súlade s platnou legislatívou, pretože niektoré druhy odpadov môžu obsahovať, zlúčeniny ako sú karbidy, sulfidy alebo nitrídy a tie pri reakcií s vodou vytvárajú toxické a horľavé plyny (amoniak, sulfán, metán a pod.). Pred nákupom odpadu je potrebné odobrať určité množstvo vzoriek na analýzu (typ šrotu, chemické zloženie, výťažnosť, homogenita) [5].

Rozmerová úprava šrotu prebieha drvením, významom drvenia je rozoberanie odpadu na menšie časti, ktoré postupujú ďalej k triedeniu, k fyzikálnej separácii alebo rovno k taveniu [7]. Pre tenkostenné a malorozmerné materiály sa pred ďalším spracovaním uplatňuje zhutnenie, čo zahŕňa najčastejšie operáciu lisovania alebo briketovania [5]. Oddelenie hliníka v tomto štádiu je možné vykonať rôznymi operáciami, ako sú napríklad magnetická (obr. 4), vzduchová, elektrostatická separácia, vírivé prúdy, separácia vo fluidnom lôžku alebo využitie senzorov (obr. 5). Toto sú metódy suchej separácie, čo znamená že sa pri nich nepoužíva kvapalina [5, 17-21]. Čo sa týka mokrej separácie, treba spomenúť metódu sink – float, táto metóda je založená na oddeľovaní častíc o rôznej mernej hmotnosti, častice z vyššou hustotou klesnú na dno a ľahšie častice plávajú na hladine. Proces prebieha vo vodnej suspenzii [5].



Obrázok 4. Princíp magnetickej separácie [20]  
Figure 4. Principle of magnetic separation [20]



Obrázok 5. Princíp použitia RTG žiarenia [21]  
Figure 5. Principle of using X-rays [21]

### 3.2 Tavenie

Predupravený šrot postupuje na tavenie, zvyčajne o teplote približne 700 – 750 °C, čo závisí od teploty tavenia daných zliatin [7]. Tavenie sa vykonáva v taviacich peciach, vo výrobe sa však bežne používajú taviaco - ustal'ovacie pece, tak aby prehriatie taveniny bolo čo najmenšie. Na tavenie sekundárneho hliníka existuje široká škála pecí, výber pece ovplyvňujú mnohé faktory ako napr. geometria odpadu, koncentrácia hliníka v odpade, početnosť zmien v zložení zliatin, ďalej to môžu byť kapitálové náklady, straty tavením a životnosť pece [5].

### 3.3 Rafinácia

Rafinácia je nevyhnutnou súčasťou výroby hliníka, zahŕňa tieto operácie: odstraňovanie nečistôt soľami, odplynenie, legovanie a sťahovanie sterov. Väčšinou sa do taveniny pridáva aj čistý hliník z elektrolyzy, čo má za následok prítomnosť alkalických kovov v tavenine (Li, Na, Mg, alebo Ca). Je možné ich odstrániť použitím inertného plynu, ktorý obsahuje reaktívny plyn  $Cl_2$ . Prichytené chloridy k plynu sú vnesené na hladinu a následne sa sťahujú ako stery [14-28]. Horčik sa odstraňuje injektážou čistého chlóru do taveniny.  $MgCl_2$ , ktorý sa vytvorí je absorbovaný v soľnej troske. Ďalej je z taveniny potrebné odstrániť rozpustný vodík (odplynenie). Najčastejšie využívanou metódou je prebublávanie inertnými plynmi ( $N_2$ , Ar) o teplote 700 – 800 °C [13]. Tento proces je založený na difúzii rozpusteného vodíku do bublín inertného plynu [5]. K odplyneniu je možné použiť aj chloridy rôznych kovov napr.  $ZnCl_2$  (chlorid zinočnatý),  $MnCl_2$ , použitie týchto solí znamená že vo finálnom produkte sa budú nachádzať aj tieto kovy. Pred odlieváním do požadovaných tvarov prebieha úprava štruktúry legovaním, aby sa dosiahli požadované vlastnosti zliatin. Po rozpustení legovacích prísad dochádza k sťahovaniu sterov z povrchu taveniny hrablom ručne alebo pomocou vysokozdvížneho vozíka do pripravenej prenosnej vane [15]. Následne dochádza k odlievaniu samotných odliatkov zo sekundárnych zliatin rovnakou cestou ako z primárnych zliatin.

## 4. ZÁVER

Sekundárna výroba hliníka sa v posledných desaťročiach dostáva do popredia najmä vďaka ekonomickým a environmentálnym benefitom, pričom kvalita zliatin zostáva zachovaná. Významný rozdiel je v emisiách skleníkových plynov, ktoré sú až 40 – krát nižšie v porovnaní s primárnou výrobou, 95 % - ná úspora energie pri sekundárnej výrobe je tak šetrná životnému prostrediu ako aj ekonomicky výhodná pre priemysel zaoberajúci sa výrobou hliníka. To znamená že priemysel by sa mal orientovať na čo najväčšiu úsporu energie a na výrobu využívať obnoviteľné zdroje energie, taktiež je potrebné voliť vhodné skladovanie určitých nebezpečných odpadov podľa platnej legislatívy. Následne sa volí správna technológia spracovania a tavenia na základe chemického zloženia a miery znečistenia odpadu.

### Pod'akovanie

Príspevok vznikol v rámci riešenia spoločného slovensko-poľského študentského projektu TalentDetector 2022 a projektov VEGA 01/0398/19, KEGA 016ŽU-4/2020 a projektu na podporu mladých vedeckých pracovníkov UNIZA, ID 12715.

**LITERATÚRA**

1. Jassim, Using sustainable manufacturing process to produce solid shaft from Al-Zn alloys chips and copper chips without melting. (2016) Vol. 40. s. 13-17. ISSN 2212-8271.
2. Š. Valenčík, P. Cengel, Výrobný systém recyklácie odpadového hliníka. [online]. [http://www.ams.tuke.sk/data/ams\\_online/1999/number1/mag08/mag08.pdf](http://www.ams.tuke.sk/data/ams_online/1999/number1/mag08/mag08.pdf).
3. R. Behethsi, Sustainable Aluminium and Iron Production: Doctoral Thesis. Stockholm : School of Chemical Science and Engineering, 2017. 88s.
4. M. Carlier, Global primary aluminum smelting energy intensity 2008-2019.2021. [online]. <https://www.statista.com/statistics/1116216/aluminum-smelting-energy-intensity/>.
5. T. Havlík, A. Miškuřová, Spracovanie a recyklácia hliníkových odpadov. Košice: Equilibria, 2013. s. 384. ISBN 978-80-8143-080-0.
6. AMM. The Aluminium Automotive Manual. 2002. [online] <https://www.european-aluminium.eu/media/1531/aam-materials-1-resources.pdf>.
7. M. Bertram, M. Hryniuk a kol. Aluminium Recycling in Europe The Road to High Quality Products Organisation. 2006. [online]. [European\\_Recycling\\_Brochure-1.pdf](https://greenbuilding.worldaluminium.org/uploads/media/1256563914).
8. Milovanoff, I.D. Posen, H.L. Maclean, Quantifying environmental impacts of primary aluminum ingot production and consumption. In: Journal of Industrial Ecology. (2021) 25 s. 67-78.
9. N.H. Jaffari, T.D. Stark, R. Roper, Classification and Reactivity of Secondary Aluminum Production Waste. 2013. In: Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste. 18 (4).
10. Miškuřová, D. Oráč, M. Laubertová, Environmentálne aspekty výroby ľahkých kovov. Vol.1 Košice:Equilibria, 2013. ISBN 978-80-8143-083-1.
11. C.J. Lothgren, B. Bavel, Dioxin emissions after installation of a polishing wet scrubber in a hazardous waste incineration facility. In: Chemosphere, (2005) 61 s. 405-412. ISSN 0045-6535.
12. E. Molnár, E. Virčíková, Charakteristika emisií znečisťujúcich látok z technológie pretavovania hliníkových odpadov. Acta Montanistica Slovaca, (2005.) 10. s. 220-223.
13. Š. Michna, I. Lukáč a kol., Encyklopedie hliníku. Prešov: Adin s.r.o, 2005. 722s. ISBN 80-89041-88-4.
14. IAI, The International Aluminium Institute. 2018. [online]. <https://recycling.world-aluminium.org/resources/materials/>.
15. Confal, Technológia. [online]. <https://www.confal.sk/sk/recyklacia/nase-technologie.html>.
- a. Gil, S.A. Korili, Management and valorization of aluminium saline slags: Current status and future trends. In: Chemical Engineering Journal, 2016 v. 289, s. 74-84. ISSN 13858947.
16. V. Blaha, F. Kaľavský, Aplikácia suchých separačných metód pre znižovanie obsahu zvyškov nespáleného uhlia a separácie Fe z čiernouhoľných popolčekov: Acta Montanistica Slovaca. (2008) 13 s. 235-240. ISSN 1335-1788.
17. M. Adamčík, Mechatronika třídění mikročástic metodou vzduchové separace. Brno. 2010. 46 s. Recyklační-stroje, Excentrický vířivý proud. [online]. <http://www.recyklační-stroje.eu/nase-nabídka/separace-kovu/excentrický-vířivý-proud/>.
18. Magcentrum, Separátor kovov. [online]. <http://www.magcentrum.sk/separatory-kovu.html>.
19. M. Jarvikivi, LIBS, 2018. [online]. <https://hha.hitachi-hightech.com/pt/blogs-events/blogs/2018/01/03/what-is-libs/>.

## Analysis of mechanical models and analytical dependences for description of materials for manufacture of light industry products

A. Polishchuk <sup>a</sup>, O. Polishchuk <sup>b</sup>, M. Skyba <sup>c</sup>, S. Lisevych <sup>d</sup>, M. Bonek <sup>e</sup>, V. Grudinin <sup>f</sup>

<sup>a</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: andrepol215@gmail.com.

<sup>b</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: opolishchuk71@gmail.com.

<sup>c</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: rector@khnu.km.ua.

<sup>d</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: lisevichsv@gmail.com.

<sup>e</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials, Gliwice, Poland email: mirosław.bonek@polsl.pl.

<sup>f</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: vovagrudinin1@gmail.com.

**Abstract:** The article analyzes mechanical models and analytical dependences to describe materials for the production of light industry products. The study of the deformation that occurs in materials under compression is necessary to predict the behavior of these materials in the performance of technological operations of light industry, which is of considerable scientific and practical interest. Analysis of existing methods for predicting the deformation properties of materials revealed the importance and complexity of solving this problem, insufficient study, the need for further research for emerging and unexplored materials. The analysis of existing mechanical models and their application for modeling elastic, viscoelastic, viscoelastic-plastic properties of materials showed the possibility of using models to model the interaction of working bodies of machines with materials in technological operations in the manufacture of light industry products. The obtained experimental data can be used to study equipment for light industry operations.

**Keywords:** material, light industry, mechanical model, modeling of material properties.

### 1. INTRODUCTION

The constant expansion of the field of use of materials in light industry requires the study of their physical and mechanical characteristics. Physico-mechanical properties determine the degree of change in the structure, size, shape of the product when a certain force

is applied to it. Depending on the magnitude and duration of the force field, materials are subject to deformation and destruction. Therefore, there are both deformation and strength properties. Deformation properties characterize the ability of a material to deform under the action of mechanical stress. Deformation of a material should be understood as a change in its size, volume and shape due to temperature, external mechanical action and internal forces. As a rule, deformation is accompanied by a change in the structure of materials and their properties. In this case, the stronger the deformation, the greater the change in structure and properties. Deformation properties are the most important of the physical and mechanical characteristics that affect the performance of the finished product. The variety of deformation and relaxation processes in materials is due primarily to the peculiarities of their molecular and supramolecular structure. In turn, strength properties characterize the ability to resist destruction.

When performing light industry operations, certain deformations of the material occur. Finished products of light industry should use materials that have the necessary physical, mechanical and technological properties. Therefore, when considering the mechanics of the process of cutting, perforation, embossing, branding, marking, one of the main tasks is to study the deformation of the material being processed, and determining the stress and strain is important to understand the complex laws of this process. The peculiarity of these operations and the resulting difficulties are determined by changes in the physical and mechanical properties of materials of different structure used and the degree of their anisotropy. Relaxation (stress drop at constant deformation) and creep (increase in deformation at constant load) inherent in the materials used allow them to be classified as materials with elastic-viscous or elastic-viscous-plastic properties. For materials of this kind is characterized by the dependence of deformation not only on the magnitude of the load, but also on the rate of deformation.

Mechanical interaction, for example, the blades of the working body of the cutter (punch) with materials that have elastic-viscous-plastic properties, when cutting and perforating is characterized by the following parameters: the relative speed of movement of working tools and the object; design parameters of the working bodies (sharpening angle and the amount of blunting of the cutter blade); the angle of sharpening of the blade of the cutter (punch); the parameters of the force interaction of the blade with the material and, as a consequence of this interaction, the deformation of the object of processing and localized destruction.

Similar interaction of the working body and the material and characteristics will be in the performance of other technological operations (fixing of metal fittings, branding, marking, embossing).

The interaction of working tools with footwear, clothing and leather goods in their performance is characterized by very complex physical phenomena that are not yet clear analytical description. Therefore, the most rational approach to a complete understanding of the physical picture of the process today is a combination of empirical and theoretical research.

## **2. FORMULATION OF THE PROBLEM**

The processes of cutting, perforation, embossing, fastening of metal fittings are mechanical, in which the action of working tools on the material is accompanied by its transition to the boundary of elastic deformations. Therefore, in the study of these processes, the properties of materials such as elasticity, ductility and viscosity are of paramount importance. The processes of marking and branding are not accompanied by the transition of



the material beyond the elastic deformations and, accordingly, their elasticity becomes of paramount importance.

Materials for the manufacture of footwear, clothing and leather goods, which are processed during the operations of cutting, perforation, embossing, are materials with elastic-viscous or elastic-viscous-plastic properties. Materials for the manufacture of footwear, clothing and leather goods, which are processed during the operations of branding and marking, are materials with elastic properties. Materials from which metal fittings are made (for example eyelets are made of brass L70, steel 08kp) must have high ductility.

Currently, many different models are known that reflect the mechanical properties of bodies similar to the materials of footwear, clothing and leather goods, and their individual structural elements (fibers, threads). However, at present there are no single universal models and their corresponding analytical expressions [1]. Therefore, any research in this area is relevant.

### 3. PRESENTING MAIN MATERIAL

Numerous studies in the field of physical and mechanical properties of polymeric materials for light industry products (threads, fabrics, films, leather, rubber, polyurethanes, knitwear, etc.) conducted by various scientists [1-5] have shown that most of them are viscoelastic bodies.

When describing the stress-strain states of products, constants and characteristic functions can be determined as a result of solving the equation of state. In the study of viscoelastic behavior, the experimental problem is to determine the relationships between stress, strain and time for a given type of strain and a given load regime.

Mechanical models and hereditary theory, as well as theories of aging, flow, and hardening are the most widely used to describe the viscoelastic properties of materials from existing theoretical approaches.

One of the ways to study the inelastic behavior of materials is based on the idea of creating general defining equations that take into account the whole set of conditions that affect the deformation process: hereditary processes; speed, type of load, etc. They allow you to solve with any degree of accuracy, both linear and nonlinear problems. The most common principle that can be used as a basis for research is the principle of "hereditary memory". It leads to the construction of defining relations in the form of integral equations, which are more general than differential.

The Boltzmann-Volterra equation is used to describe the linear viscoelastic properties of materials [5]:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{E} \int_0^t k(t-s)\sigma(s)ds \quad (1)$$

where  $\sigma$  - voltage;  $E$  - modulus of linear elasticity;  $s$  - current time;  $k(t-s)$  - the core of creep.

The main problem in linear hereditary viscoelasticity is the choice of nuclei, which must meet two basic requirements: first, they need to correctly describe the mechanical behavior of the material, and secondly, to solve problems using integral expressions was enough sorry.

Consideration of material deformation based on linear viscoelastic behavior is permissible only for relatively small loads, deformations and temperatures. The use of linear viscosity to describe the properties of most materials is considered with some approximation.

Therefore, a nonlinear theory of viscoelasticity based on the nonlinear superposition principle, which generalizes the Boltzmann-Voltaire principle, is used to more accurately describe the deformation of materials [3]. In this paper, we propose to use the Boltzmann-Voltaire relationship in the theory of viscoelasticity to describe the viscoelastic properties of textile materials.

One of the most common methods of describing deformation and relaxation processes in footwear, clothing, textiles is the use of mechanical models that explain the structure and mechanism of the phenomena that occur. These models consist of physically sound combinations of elements and with a certain degree of probability reproduce the main characteristics of the material: viscosity, elasticity, ductility.

In classical mechanics, there are two simplest models, such as Hooke's elastic body model (spring) and Newton's viscous fluid model (damper). That is, the graphical representation of such models are rheological schemes in which the elastic properties are reflected in the form of an elastic spring, and viscous - in the form of a hydraulic cylinder with a piston moving in Newtonian fluid. Based on them, basic models of bodies such as "Hooke's body", "Maxwell's body", "Burgers' body", "Kelvin's body", etc. are compiled. (Fig. 1) [1].

A material similar to Maxwell's body is characterized by the importance of the duration of the force acting on it for its mechanical properties. If the time of external action is short, the behavior of the material is similar to the behavior of the solid "Hook body", and if too large - "Maxwell's body" flows as a viscous Newtonian fluid (Fig. 1, a). The Kelvin body model can be used only to describe the deformation of materials of products in which the phenomenon of stress relaxation does not occur, which is absent in this model (Fig. 1, b).

Various combinations of elementary mechanical models can be used to model the elastic, viscoelastic, viscoelastic and plastic properties of materials. Of course, when combining these models, the properties that play the most significant role in the process under consideration are of paramount importance. Different (consecutive and parallel) ways of connecting such elements make it possible to model the deformation behavior of shoe, sewing, leather and haberdashery materials with complex properties.

Deformation properties of materials with elastic-viscous or elastic-viscous-plastic properties significantly affect the process of technological operation and is one of the main factors determining its parameters, modes, and results - productivity, accuracy, cost material, quality and others.

To describe the nature of the behavior of light industry materials under load, the most successful is the physical model, known as the generalized model of W. Kelvin-Voigt or Alfrey (Fig. 1, c). It contains three series-connected elements: instantaneous-elastic ( $E_1$ ); highly elastic, consisting of elements of late elasticity ( $E_2$ ) and viscosity ( $\eta_2$ ) connected in parallel; viscous flow element ( $\eta_1$ ). That is, this model can be used to describe the deformation of materials of products in which there is a phenomenon of stress relaxation at constant deformation. Materials used in the manufacture of light industry products have a relaxing nature of behavior under the action of external forces.

The improved model of the generalized Kelvin-Voigt model proposed by Kukin and Solovyov is shown in Fig. 1, g. the properties of the first link are determined by almost one "spring". The second link of the model reflects the highly elastic deformation, and the third, respectively, the residual plastic. Moreover, the development of plastic deformation is constrained by the presence of elastic, so it is represented by a link of the elastic type.

However, to express the irreversibility of the plastic component, a clamp is added to the "spring", which prevents it from shrinking after stretching.

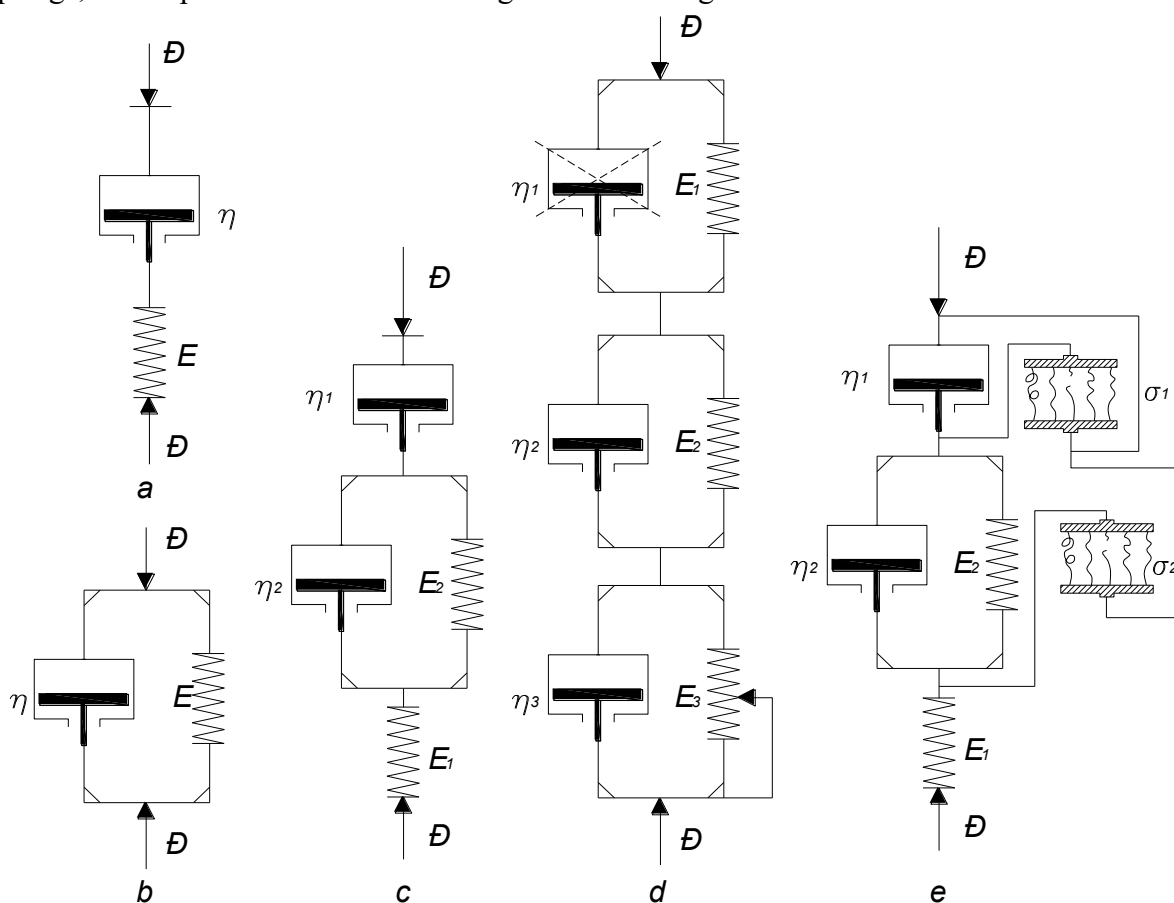


Fig. 1 - Schemes of rheological models (used to describe the compression process): a- "Maxwell's body"; b- "Kelvin's body" (Kelvin-Voigt-Meyer model); four-parameter model of fibrous high-polymer material (Alfred); Mr. Kukin-Solovyov's three-link model; Alfrey's d-model with added elements of destruction

The Alfrey model, shown in Figure 1d, takes into account the relationship between deformation of materials and their destruction, which was not taken into account in the models described above. In addition to the elements of elastic and viscous deformation, "elements of destruction" are introduced into this model, which describe the development of two processes in the material that are exposed to external forces - deformation and destruction.

The three-link model and similar models of materials for footwear and leather goods with additional elements with an acceptable degree of reliability reflect the characteristics of the behavior of materials with elastic-viscous and elastic-viscous-plastic properties during their deformation. This description is very important to form an idea of the interaction of work tools with the material, which is destroyed in connection with changes in process speed in a fairly wide range.

Various combinations of elementary mechanical models are also used to model the elastic, viscoelastic, viscoelastic and plastic properties of textile materials. The most common for this purpose are the models presented in Fig. 2 [3].

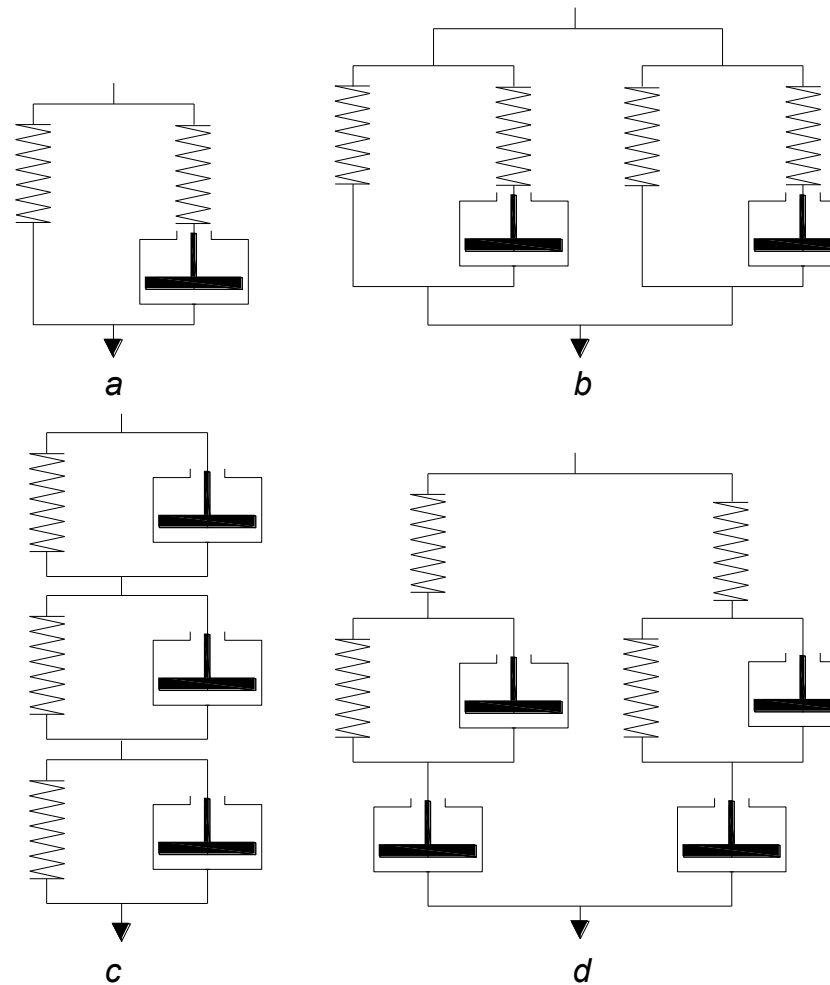


Fig. 2 - Models of Eiring, Dogadkin, Bartenev, Reznikovskiy (a), Matukonisa (b), three-component elastic (c), visco-elastic-plastic (d)

In each of these examples, the material exhibits properties intermediate between the properties of a solid and a liquid. However, for the complete imitation of textile materials with a nonlinear relationship between stress, strain and time, it is also necessary to use complex devices with ideal elements.

Other mechanical models are known to describe relaxation processes in viscoelastic materials [6]. This combined model for describing the properties of textile materials has been proposed by a number of scientists on the basis of Kelvin-Voigt elements established between two elements of Maxwell's model. To describe the creep of knitted fabrics Koblyakov AM and quantitative description of relaxation of tissue deformation Buzov BA and Petrovskiy DG a three-component Kelvin-Voigt model was used. For adhesive nonwovens Tikhomirov VB and Samoilova LV proposed model consisting of series-connected elastic elements and a Kelvin-Voigt element. The model of deformation of genuine leather as a fibrous mesh material was proposed by Zibin Yu.P. and improved by Shestakova NA A model consisting of two Kelvin-Voigt elements connected in series and a viscous element to describe the relaxation properties of the skin was proposed by Zhikharev AP [7]. The mechanical model consisting of four Kelvin-Voigt elements proposed in [6] can be used to describe the processes of relaxation

deformation of different material systems and used in practice to determine and predict their rheological properties. The model of deformation of viscoelastic material in the form of two parallel connected links of different nature, proposed by Semenov VK, Belkin AE, [8] can be used to study rubber and polyurethanes. There are other models that describe viscoelastic processes in light industry materials.

Physico-mechanical properties of materials that are subject to mechanical action in the operations of cutting, perforation, embossing, marking, branding in the manufacture of footwear, clothing, leather goods in most cases taken from the classical disciplines of materials science and resistance of materials. From there, the main properties under study are taken. Basically it is: resistance of conditionally elastic materials to compression, bending, rupture. Therefore, the data obtained from the study of these properties, and directly used in the theory of mechanical failure, do not always satisfy scientists, as they need to take into account the specifics of the process of technological operation. In addition, conventional research methods are not always in line with the phenomena that occur during mechanical failure.

Changes that occur in footwear, textiles and leather goods in their processing during the technological operations, are reflected primarily in the mobility of structural elements and their deformation properties. When performing the above technological operations in the materials there are various deformations, the achievement of a critical value of which is characterized, for example, for cutting and perforation operations, the beginning of the process of separating the structural elements of the material along the cut line. Thus, for these two operations, the first stage of the process of technological operation is characterized by physical and mechanical indicators of the transition of material structure from equilibrium to "excited state", and the second - indicators of destruction of structural elements and their recovery.

In the technical literature on sewing and footwear materials science, as well as on the study of processes in the materials themselves, data on their deformation characteristics in tension are given. However, for example, to perform technological operations of cutting, perforation, embossing in the first place is the deformation of compression. A review of the technical literature has shown that research conducted in this direction is insufficient. In this regard, it is of great interest to consider compression as the main deformation for certain technological operations. Compression deformation occurs in the material under the action of forces directed perpendicular to its plane. Just to perform the above operations, the action of force will be directed perpendicular to the plane of the material.

For qualitative and quantitative assessment of changes in the material during mechanical action and after its termination, perform single-cycle studies and use the method of estimating the deformation properties of materials based on computer analysis of the process of loading and relaxation [2].

In this article [1] describes the computer installation "RELAX", which implements the method of relaxation spectrometry. The method of relaxation spectrometry allowed to identify three components of deformation and calculate six indicators that most fully describe the elastic, viscous and plastic properties of a sample of material or system of materials. These data in general most fully characterize their deformation behavior, reflect the mobility of various elements of its internal macro- and microstructure.

Using the "RELAX" complex, the author conducted research to evaluate the deformation properties of shoe materials and their flooring during compression. To use the deformation properties, materials studied at this installation, the authors put in the software rheological model, shown in Fig.3.

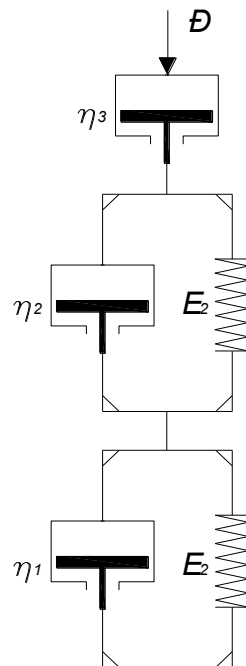


Fig. 3 - Rheological model used in the study of material properties by relaxation spectrometry

This model is described by the equation of the form [2]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} e^{-t/t_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} e^{-t/t_2} + \frac{\sigma_0}{\eta_3} \Delta t \quad (2)$$

where  $E_1$  - is the modulus of instantaneous elasticity, MPa, which characterizes the elastic properties of the most mobile structural elements of the sample, for example, grids of bundles of skin fibers, which are manifested under rapid loading and recovery of deformation;  $E_2$  - modulus of high elasticity, MPa, which characterizes the elastic properties of less mobile structural elements, such as elements of the internal structure of skin fibers;  $E_3$  - equilibrium modulus of elasticity - the total characteristic of the elastic properties of all elements of the structure, which is manifested in a sufficiently long observation time;  $\sigma_0$  - average compression stress;  $\eta_1$  - viscosity coefficient according to the "fast" relaxation process (characterizes the internal friction of more mobile structural elements, such as networks of bundles of skin fibers);  $\eta_2$  - viscosity coefficient of the "slow" relaxation process (characterizes the internal friction of the smaller structural elements of the skin);  $\eta_3$  - coefficient of plastic viscosity (characterizes the internal friction with irreversible plastic deformation of the sample);  $\Delta t$  - time of development of plastic deformation (loading time).

The equilibrium modulus of elasticity is determined by the following formula:

$$E_3 = 1 / (1 / E_1 + 1 / E_2) \quad (3)$$

Time constants of "fast" and "slow" relaxation process:

$$t_1 = \frac{\eta_1}{E_1}, t_2 = \frac{\eta_2}{E_2} \quad (4)$$

The parameters  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $\eta_3$  are determined from the analysis of the deformation relaxation schedule:

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_1(t) - \varepsilon_2(t)}; E_2 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_2(t) - \varepsilon_3(t)}; E_3 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_1(t) - \varepsilon_3(t)}; \quad (5)$$

$$\eta_1 = T_1 E_1; \eta_2 = T_2 E_2; \eta_3 = T_3 E_3,$$

On the basis of experiments with shavro leather samples, complex material of shoe upper blank (base - smooth elastic chrome tanned leather with natural front surface, strengthening material - hot-melt knitted jersey), shoe upper leathers [2, 9, 10] ranges of change of the basic deformation indicators for the given materials. But the range of polymeric materials is large. Therefore, in the future it is necessary to conduct research to determine the basic parameters of the relaxation process and for other materials used for the manufacture of light industry products.

#### 4. CONCLUSIONS

1. The study of deformation occurring in materials under compression is necessary to predict the behavior of these materials in the performance of technological operations of light industry, which is of considerable scientific and practical interest.

2. Analysis of existing methods for predicting the deformation properties of materials revealed the importance and complexity of solving this problem, insufficient study, the need for further research for other new materials that have not been studied.

3. The analysis of existing mechanical models and their application for modeling elastic, viscoelastic, viscoelastic-plastic properties of materials showed the possibility of using models for modeling the interaction of working bodies of machines with materials when performing technological operations in the manufacture of light products industry.

4. The experimental data obtained by the authors can be used in the study of equipment for light industry operations.

#### BIBLIOGRAPHY

1. Litvin EV Research of operation of mechanical cutting in production of footwear and leather goods: dis. ... Cand. tech. Sciences: 05.19.06 / Litvin Evgeny Viktorovich. - Moscow, 2005. - 241p.
2. Sokolov VN Scientific and technical bases of technological cutting in light industry: dis ... doctor of technical sciences. Sciences: 05.02.13 / Sokolov Vladimir Nikolaevich.- Moscow, 2006. - 351p.
3. Lopatchenko TP Research of deformation properties of volume warming materials for designing of clothes and equipment of special purpose / Т.Р. Лопатченко, А.С. Рукавишников. Rostov n / D: Publishing House Center DSTU, 2014. - 178p.

4. Lisienkova LN Development of the theory and methods of research of deformation properties of materials for clothes under the influence of technological and operational factors: dis ... Cand. tech. Sciences: 05.19.01 / Lisienkova Lyubov Nikolaevna.- Moscow, 2010. - 343p.
5. Serebryakova LA Formation and evaluation of consumer properties of needle-punched nonwovens from secondary raw materials for various purposes: author's ref. dis. to obtain the degree of Cand. tech. Science: special. 05.19.08 "Commodity of industrial goods and raw materials of industry" / Serebryakova Lyudmila Andreevna. - Moscow, 2009. - 44p.
6. Tomasheva RN Modeling of relaxation processes in materials systems for shoe uppers / Tomasheva RN, Gorbachik VE // Modeling in technology and economics. - Vitebsk: UO "VGTU", 2016. - P.176-179.
7. Zhikharev AP Theoretical bases and experimental methods of researches for an estimation of quality of materials at force, temperature and humidity influences: monograph / A. Zhikharev. - Moscow: IIC MGUDT, 2003. - 327p.
8. Semenov VK Mathematical model of viscoelastic behavior of rubber under cyclic loading / Semenov VK, Belkin AE Moscow: Proceedings of higher educational institutions. Mechanical Engineering, 2014. №2. - P.46-51.
9. Abdullin I.Sh. Change of deformation properties of complex footwear material as a result of influence of nonequilibrium low-temperature plasma / Abdullin I.Sh. // Bulletin of the Kazan Technological University. - 2012. - №15. - P.44-45.
10. Yasenkov DA Automation of measurement of relaxation characteristics of footwear materials of light industry: dis. ... Cand. tech. Sciences: 05.13.06 / Yasenkov Dmitry Anatolyevich. - Moscow, 2014. - 135p.



## Polymeric materials for manufacture of light industry products and their physical and mechanical properties

A. Polishchuk <sup>a</sup>, O. Polishchuk <sup>b</sup>, M. Skyba <sup>c</sup>, S. Lisevych <sup>d</sup>, M. Bonek <sup>e</sup> A. Pervak <sup>f</sup>

<sup>a</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: andrepol215@gmail.com.

<sup>b</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: opolishchuk71@gmail.com

<sup>c</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: rector@khnu.km.ua.

<sup>d</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: lisevichsv@gmail.com.

<sup>e</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials, Gliwice, Poland email: mirosław.bonek@polsl.pl.

<sup>f</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: pervak.2003@gmail.com.

**Abstract:** Light industry of Ukraine is a diversified complex on production of footwear and clothes today. Potential opportunities of the enterprises of light industry allow to make a wide range of products, capable to satisfy all demand of domestic market. Products of light industry are consumer goods and great demands are placed on their quality. There is a set of the materials applied to production of footwear and clothes.

Today chemical industry actively develops. In the future it will lead to emergence of new materials for light industry. Use of perspective modern materials with various physico-mechanical properties and technologies of their production will promote production of high-quality products. They will meet all requirements of customers and conditions of their safe use.

The carried-out review of the materials used for production of footwear and clothes has shown that to them consumer and production (technological) requirements are shown. Consumer requirements generally are defined by purpose of products and their use. Physico-mechanical indicators influence both technological properties, and operational. Of them there are also requirements to materials for production of footwear and clothes. All this needs to be considered when using operations of light industry, especially: cutting, perforation, marking, branding, stamping and so forth.

**Keywords:** footwear, clothes, leather, textile material, polymer materials, light industry.

## 1. INTRODUCTION

The light industry of Ukraine is today a multi -sectoral complex for the production of shoes, clothing and leather products. In the field of light industry, more than 10 thousand small, medium and large enterprises operate about 150 thousand workers, in particular in: textile industry - about 2.5 thousand, the production of finished clothing and fur - about 6 thousand, leather and leather shoes - about 1.5 thousand. Potential capacity of light industry enterprises allows to produce a wide range of goods capable of satisfying the entire demand of the domestic market [1].

## 2. FORMULATION OF THE PROBLEM

Light industry products are consumer goods and high requirements are made. Quality is a set of properties of the product, its suitability to meet the needs of a person in accordance with the purpose. The set of certain properties that determine the quality of the product is directly related to the purpose of the product and the requirements for the consumer. The quality of light industry products (shoes, clothing, leather products, etc.) is formed at the stage of their design and is determined by a reasonable choice of basic and auxiliary materials, the rational design of equipment and equipment, the perfection of the technological process [2]. Therefore, for the production of shoes, clothing and leather products, first of all, materials of different nature and purpose are required, with different physical and mechanical properties that can provide the required quality of the product.

The purpose of the article is to review the main varieties of polymeric materials used in the light industry for the production of shoes, clothing, leather products and their properties.

## 3. PRESENTING MAIN MATERIAL

The shoe product consists of parts of the top and bottom parts, connected by a certain method of fastening. When wearing parts of the shoe, they feel high loads, both from the inside and from the outside. Different degrees of loads affect the deformations that occur in the material when working on the bottom. In this regard, the materials have a number of requirements, the satisfaction of which allows the shoes to perform qualitatively their basic functions [3].

The sets of materials that can be represented by the parts of the bottom and top of the shoe are shown in Fig. 1. As can be seen from Fig. 1, the parts of the top (a) and the bottom of the shoe (b) are made of various materials: natural materials (genuine leather, fur, felt, etc.) and different polymer compositions (artificial and synthetic leather, rubber, polyethylene foam, polyurethane, polyester, polyvinyl chloride, thermoelastoplasty, etc.).

In the manufacture of shoes, basic materials are used for the manufacture of external, internal and intermediate parts of the top and bottom. The top materials include natural, artificial and synthetic soft skin, textile materials (fabrics, knitwear, non-woven materials, felt, felt), natural and artificial fur. The bottom of the shoe is natural rigid leather, caoutchouc, rubber, plastics, cardboard and wood and others.

Auxiliary materials are intended for the fastening of parts, decoration and decoration of shoes. The fasteners are threads, nails, screws, studs and adhesives. Finishing materials include paints, finishing touches and polishing materials, textile and gallantry products (cords, tapes,

braid), and shoe fittings (buckles, buttons, blocks, hooks, fasteners, cracks, cracks, grommets, pukli, etc.).

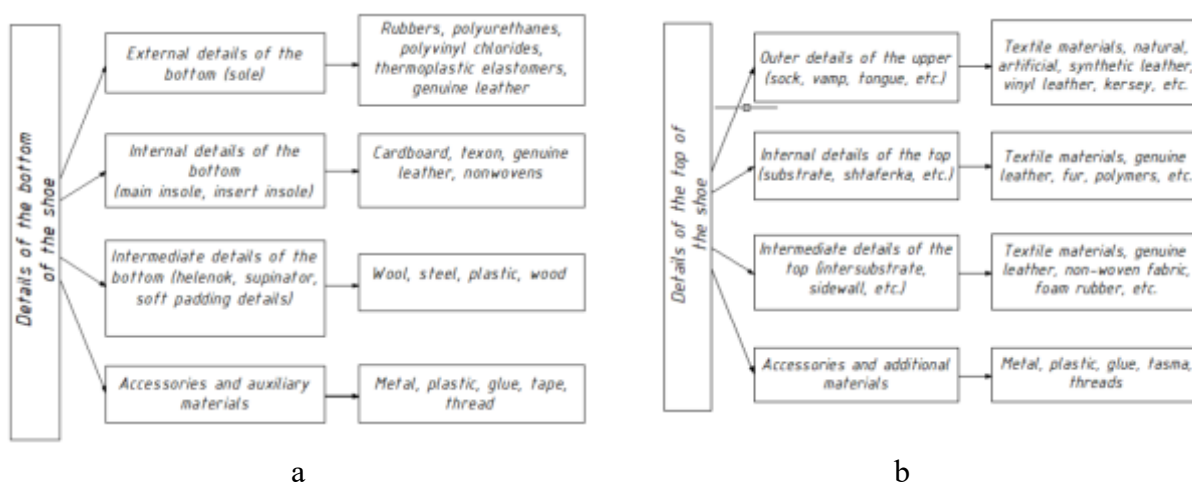


Fig. 1 - Set of materials: a - for the parts of the bottom of the shoe; b - for the top of the top shoes

All materials used for the manufacture of clothing are classified on the basis of destination. According to this classification, materials are divided into groups: basic; applied; lining; insulation; materials for connection of clothing parts (sewing threads, adhesives); finishing materials; clothes fittings (buttons, buttons, grommets, zippers, etc.) [4].

The main materials for the manufacture of clothing are divided into groups of fabrics: cotton and linen; shirts and plates; silk; costumes; Coats and cloak. Natural and artificial leather, suede, artificial fur is also used. Laying materials are fabrics used as lining in clothing, in the course of operation are exposed to intense friction, so they must first have strength to abrasion. Applied materials are used to add the shape of sewing products, their storage, as well as to strengthen the parts of the garments. The peculiarity of applied materials is the increased rigidity. Insulation materials are used for the manufacture of insulation substrates in clothing.

Auxiliary materials are designed to connect parts, and decoration. The materials for connecting parts are thread and adhesive, welded and combined connections of parts and components of sewing products. Finishing materials include ribbons, braid, cords, lace, as well as fabrics, leather, suede, fur, buttons, beads and more. The accessories of clothing include buttons, hooks, loops, buckles, buttons, grommets, zippers.

Various materials are used to make leather haberdashery products. They are divided into basic and auxiliary. The main materials include natural, artificial and synthetic leather, textual materials. Auxiliary materials are used to secure the main parts and process the product. The fasteners include threads, adhesives and more. To the decoration - paints, acels, accessories [5]. Natural, artificial, synthetic leather and film mothers are widely used for leather products. Often, one product uses natural and synthetic leather, decorated in a single style. Fabrics of various composition, weave, processing are also used.

Thus, one of the significant factors that shapes the quality and competitiveness of shoes, clothing and leather products is the materials used in the process of their manufacture. Let us dwell more on the basic materials used for their man

One of the best materials for the manufacture of shoes is genuine leather. It is known that 95% of all skin consists of a close plexus of the thinnest fibers and bundles of fibers of a

special protein substance - collagen, which is very high in strength [6]. The combination of fibrous structure, high strength of fibers and high porosity determines all the most valuable properties of genuine leather. For example, the leather, from which the top of the shoe is made, withstands about 4-5 million bends and does not break. Such high bending strength is due to the fibrous structure of the skin and its high porosity. Genuine leather porosity determines its high permeability to air and water vapor, as well as high thermal protection properties, which is important in terms of shoe hygiene.

However, with all its undeniable benefits, genuine leather has a number of significant disadvantages as a material for shoes. Its main disadvantage is the heterogeneity in thickness, structure and density, which creates difficulties in the production of standard shoes.

Raw materials for the production of natural skin are skins of cattle, goats, sheep and other animals. Their quality is formed at different stages of the life cycle and depends on a large number of factors [7]. In this case, the most significant factor is the method of duplication. In order for the skin to become denser, rigid, waterproof, it is treated. After finishing operations (resting, washing, wiring, painting, grinding, etc.), the skin becomes a pleasant appearance. Chrome skin has good hygienic properties, they are elastic, plastic, form-resistant, have a good appearance. Lava skin is used for model shoes, it has an elegant appearance, a shiny surface, but its hygienic properties are low. Today, in shoe production, a suede is a very popular raw material, which has a sufficiently high stiffness, softness, good breathability, and is resistant to water. It is usually used to make the top of model shoes. Yuft leather is produced by the combined method of tanning - thick, soft skin high in fat (26-30%), waterproof. The most valuable type of Yufti is juniper. Depending on the appointment of the Yuft there is a shoe and a sandal leather.

Natural leather in the leather industry is used for the production of women's handbags, folders, portfolios, small leather products, suitcases, gloves, waist and clock. Leather with different ways and characters of the facial processing - skin with a natural front surface smooth, rifled, "mint", with artistic embossing, with a lined face surface (nubuck), with a grinded face surface smooth, rifled, with artistic press. Polyurethane coating, pearly effect, metallic surface and the like are widely used.

Most of the products produced by light industry are made using polymeric materials, both as the main material, as well as accessories, sewing threads and various finishing elements. The most widely used for the manufacture of a variety of light industry products (clothing, shoes, bags, suitcases, gloves, etc.) are used artificial leather of various colors, surface textures and synthetic woven materials. Artificial leather in the production of light industry products have some advantages over natural: allow to provide a lower weight of the product; to reduce the cost of production; To diversify the appearance of products due to textures that mimic different agriculture of natural skin, to provide good functional characteristics [2].

The most important characteristics of artificial skins are mechanical indicators, such as abrasion resistance, rupture strength, elongation during stretching, flexion strength, frost resistance, heat resistance, strength of adhesion of the front layer with the base throughout the operation. In turn, the properties of artificial leather for light industry products are determined by the structure of the reinforcing base, the type and quality of raw materials and materials, the choice of technological regulation of their production.

Such mechanical properties of artificial leather, such as strength, stretch largely depend on the material of the base. The fibrous base is fabric, knitwear, paper, as well as various non-woven materials used depending on the purpose of the product. As textile materials for the base of artificial skins use polyamide, polyester, polyacrylonitrile, aromatic polyamides, glass and

more. The use of aramid textual material allows you to get a low layering and weight of the skin. Textile materials made of polyester and acrylic fibers for the base of artificial skin contribute to their resistance to weathering.

The coating of artificial skin is formed by impregnation of the fibrous base (through coating) or applying the polymer to the surface of the base (surface coating), and the combination of these methods is used. In the case of a small value of the strength of the adhesion of the front layer with the base, the peeling of the front layer, which affects the quality of the product.

The main component of artificial leather is the film-forming polymer composition. In modern production as film-forming agents are used mainly synthetic high molecular weight compounds: polyvinyl chloride, polyurethanes, synthetic latexes, rubber mixtures based on different rubbers, etc.

The possibility of variations of softeners, fillers, poisons, stabilizers, dyes and others opens the prospects of creating new materials with improved properties, allows to obtain a wide range of materials with a different complex of properties, and ultimately provide the required level of quality of the light industry.

The use of these materials in the manufacture of shoes, clothing and leather products and qualitative performance of these operations will facilitate the production of high-quality products that will be competitive, will give all the requirements of the customer and the specifications of its safe use.

Recently, composite leather is widely used for the manufacture of shoes and leather products [8]. It is a material of crushed leather fibers, pressed at high pressure with or without a connecting agent. The properties of natural leather, as objects of protein origin, are a large amount of information, and data on the study of composite skin is practically absent. Compositional skin in accordance with the accepted classification of polymers can be considered as artificial material - genuine leather. Synthetic skin on woven, non-knit or knitted basis is also used as a skin-like material that simulates or replaces genuine leather.

In [8], studies of the physical and mechanical properties of compositional and synthetic skin were also conducted in uniform stretching. The limit of rupture was: for composite skin 23.4 MPa, for synthetic skin 3.9 MPa. Relative elongation for rupture: for composite skin 68.5 %, for synthetic skin 5.3 %. Artificial (compositional) skin cannot compete with natural, they are worse in hygienic properties, resistance to multiple influences, the ability to form. Synthetic skin on a fibrous basis has the most durability, so they are strengthened with a thin reinforcing fabric. In terms of physical and mechanical properties, this type of fox materials is close to genuine leather.

The significant advantage of composite skin is their lower cost of production. Therefore, manufacturers use composite materials for the top of the top of the shoe. However, it should be noted that the physical and mechanical properties of composite skin are not a direct analogue of genuine leather.

Cheap compositional materials that replace genuine leather include kirza. Cyrza is a thick, relatively rigid artificial compositional material obtained by the impregnation of a cotton base with special rubber-based compositions. Basic positive properties of kirza: lightness; mechanical strength to puncture, abrasion, breaks; flexibility; good air permeability; resistance to water; low cost, etc. It is used for the manufacture of working and special shoes (army boots, boots), tablets, drive belts, as well as for sewing working gloves, bags, protective aprons, special dresses and more.

Polyvinyl chloride (PVC) is often used for the production of shoe soles because of a number of predominant characteristics. It is elastic and lightweight, demonstrates incredible strength

with multiple bends, has a high level of electrical insulation. PVC is most commonly used for the manufacture of spring and summer shoes for everyday wear.

Among the variety of materials for the manufacture of sole for shoes polyurethane occupies one of the leading positions. In its purest form, it is a rather rigid and not flexible material, which after special processing has valuable qualities, namely: it becomes light (in a foamed form), more pliable for the manufacture of shoes. Polyurethane sole wear, thermal, frost resistant. Polyurethane can be made of moccasins and sneakers, as well as shoes for the cold season.

Along with polyurethane, thermoplastic sole (TEP) is one of the most popular and one most common. In the molten state, thermoelastoplastic is quite fluid, and therefore without the effort, it can be made both a simple sole and sole of a complex configuration (for example, corrugated). The sole of the heat is stable and durable. It is much lighter than rubber, so it is extremely comfortable. The only downside is low heat resistance (may be deformed at 70 C).

The sole production has been used for several centuries and it has not lost its relevance. From the very beginning, this material demonstrated excellent durability, was not afraid of temperature fluctuations, had good flexibility and strength, did not deteriorate during prolonged storage. These properties are not only preserved today, but also improved. Thanks to the use of special technologies, the material has become easier, and its service life has increased. Unlike other materials, rubber also demonstrates good performance: shoes on a rubber sole are easy to care for, it is practical, not demanding, incredibly comfortable to wear. The material is used for the production of sneakers, sneakers, boots, boots, etc.

Porous rubber is a soft material that is often used in the production of orthopedic shoes (as well as boots, boots, sneakers, sandals). It differs from others by heat and holy, that is, in summer the leg will not heat up from the asphalt, in winter - to freeze.

The skin is a porous rubber of a skin -shaped appearance, inside which is a special filler of fibrous origin. The skin is very similar to the skin. Its distinctive feature is increased durability and wear resistance. It is strong, reliably resist abrasion, does not deform when exposed to temperatures, convenient and comfortable in operation. Most often, this material is used in the creation of demi-season shoes.

Textile materials for the top of shoes are becoming more popular in the world of fashion: silk for model shoes, knitwear for summer semi-boots, felt for insulation of shoes, etc. Currently, the volume of use in shoe production of textile materials is followed by genuine leather, significantly exceeding the volume of artificial and synthetic materials. At least 50% of the manufactured shoes have a lining of woven, non-woven materials or knitwear. Up to 25% of the annual output is shoes, in which all the details of the top (external and internal) are made of textile canvases [9].

The raw material composition of textile materials for shoes is practically not limited. Traditionally, the use of cotton canvases, both for external and internal details of shoes, which is 53%, semi-woolen fabrics - 33%, silk - 13%, silk and linen - about 1%.

The widespread use of textile materials in shoe production is explained by their valuable properties: standard of shape and size, small weight, high values of air and vapor permeability, hygroscopicity, which allows them to be used in shoes of different sexual purposes, sufficient strength. The limits of stretching or elongation are uneven in directions (base and ditches, width and length of the canvas). In terms of elastic properties, shape resistance and durability, textile shoe materials are inferior only to genuine leather.

The most promising are textile materials made on the basis of various chemical fibers. Among the chemical fibers used to produce fibrous materials of various purposes, there are the

following main groups: fibers and general purposes, including their modified types; elastomer threads; high-strength threads, including threads obtained by fibrillation of films; high-modular threads; heat-resistant and threaded fibers and filaments; fibers and threads with specific physical, physicochemical and chemical properties. Different properties of textile materials made on the basis of chemical fibers provide them wide use in the manufacture of shoes, clothing and haberdashery.

The volume of production and consumption of non-woven materials is increasing. This is due to the fact that the production of non-woven materials is the shortest and cheap way to obtain a wide range of cloths from the output raw to finished products. The rapid development of the market of non-woven materials in the world was facilitated by the creation of high-performance methods of their chemical production: from the melt of polymer, from the inflating of the polymer, thermal scraping, hydrostraine fastening, the fierce method of production, etc. [10].

Shoe non-woven materials are endowed with the following advantages: abrasion resistance; plasticity; Heat heat; strong break and puncture; environmentally friendly; They are easily duplicated with other shoe materials. Materials, depending on the purpose and purpose of use, in finished products (shoes) can have different properties (structure, color, etc.) [11].

Shoe non-woven materials can be the following types: non-woven canvas for the manufacture of insoles (insertion and filling); non-woven cloths for interior shoes (lining materials, inserts and insulation); Non-woven materials for shaping and socks of shoes.

A non-woven canvas for the manufacture of insoles is a synthetic canvas, which is made by the needles, followed by or without thermal fixation. Advantages of insole cloth: excellent thermal insulation properties; durability; practicality, durability; environmental friendliness; are not exposed to deformation, deformation. Non-woven cloths for interior shoes (lining materials, inserts and insulation), depending on their purpose in the product (shoes), differ in their structure: rigidity, surface density and color. Non-woven materials for the formation of back and socks of shoes are stiff in structure, abrasion-resistant and durable. Thanks to thermal fixation, these canvases have the required strength and hold the shape in the finished product (shoes).

The physical and mechanical properties of non-woven materials are significantly different. They are also affected by the presence of moisture. The effect of humidity is more noticeable on natural fibrous non-woven material: to break the natural material in a moist state, it is necessary to apply strength, more than twice as much as synthetic material, while elongated (stretch) natural material will be almost twice as much as synthetic. In addition, a large mass of synthetic raw materials for the manufacture of light industry will be reflected on a larger mass of the product, which indicates the benefit of the natural fibrous composition of the felt. However, less relative elongation of synthetic material is in favor of its greater shape resistance [10].

Shoe cardboard is a leaf material consisting of crushed leather, cellulose and other fibers and fillers, laid latexes, dispersions or polymer emulsions. The method of manufacturing distinguishes cardboards of wet and dry methods of production. The wet-production cardboard is obtained by molding by one- or multilayered tide according to paper production technology. Dry production cardboard is obtained by the technology of formation of polymer non-woven materials. These cardboard data are characterized by high porosity and better hygienic characteristics [12].

In the manufacture of shoes use cutouts cut out of sheets: insoles, plains, backs and more. Depending on the purpose of the cardboard, certain types and brands are made, for which the

main indicators are normalized: the thickness of the cardboard, its density, the rigidity of bending, the limit of strength during stretching, wetness, formula, mold resistance and others.

Currently, the first place in the world in the volume of release is the shoe of the adhesive method of fastening of the bottom. The main design element of such shoes is the main insole, which is made mainly of cardboard. The efficiency of technological processes of production of these shoes and a number of its important ergonomic properties, such as flexing and supporting rigidity, adjusting the bottom of the shoe to the foot, etc., will depend on the properties of cardboards used.

Studies of the physical and mechanical properties of different brands of cardboard are carried out in the work [13]. These studies have shown that the strength limit and relative elongation of different brands of cardboard fluctuate widely. The value of the strength of the cardboard when stretching in the dry state varies widely: from 5.51 to 25.01 MPa. The minimum stretch strength is characterized by cardboards "Alfatex", "Flexan 330 Cellsan", "Flexan Speciale", maximum - cardboard of the brands "Altex 50" and "Flexil". The relative elongation of stretching cardboards, which were investigated in the dry state was 3.6 - 14.6%. The smallest deformation characteristics differ in Konitex and Plantex cardboards. The highest values of this indicator are noted in the cardboards of the brands "Flexil" and "Flexan Speciale".

The research by the author of this work showed that the properties of shoe cardboards, cut along and across the sheet, differ significantly. The limit of stretching in the transverse direction is 1.5 - 2 times lower, and the relative elongation when stretching is 1.5 - 2 times higher than the corresponding values of these indicators of samples, cut in the longitudinal direction. The coefficient of uniformity for all cardboards, which were investigated was 0.45 - 0.80, which is typical of cardboard of multilayered tint, unlike cardboard of single-layer tint, which have more uniform properties in the area.

There are many other materials used for the production of shoes, clothing and leather products. To date, the chemical industry is actively developing, which in the future will lead to the emergence of new materials for the light industry. The use of promising modern materials with different physical and mechanical properties and technologies of their production will contribute to the production of high-quality products, which will meet all the requirements of customers and the specifications of their safe use.

#### **4. THE RESULT OF WORK**

An inspection of polymeric materials used for the manufacture of shoes, sewing and leather products showed that consumer and production (technological) requirements are presented.

Consumer requirements are mainly determined by the purpose of products and their use.

In the manufacture of shoes, clothing and leather products and their operation, the materials have a stretching, compressive, bending effort, and in some cases different efforts act together and repeatedly repeated. Therefore, production requirements are characterized by certain physical-mechanical and technological properties. These properties include: stretch strength, elongation, humidity, viscosity, rigidity, resistance to needle punctures, formula, rigidity, resistance to multiple bends, stress when cracks of the facial layer, elastic and residual elongation, heat resistance, etc. The presence of certain properties in the material determines its use for the production of a certain product.

For example, leather elongation plays an important role in the manufacture and operation of shoes, but not haberdashery products, as it evaluates the molding properties of materials, but as



you know, haberdashery products in the production process are not amenable to large deformation. The greater the rate of residual elongation in the overall elongation of the skin, the more plastic it is. Skin products with large residual elongation quickly lose their shape during operation. Thus, the ratio of reserves of elastic and residual elongation in materials should be optimal. It is desirable, for example, that the skin has plasticity when forming a workpiece of shoes and elasticity during its operation.

The voltage rate for the cracks of the facial layer is usually lower than the overall strength of the skin. This indicates that the destruction of the skin begins with the facial layer, which is more external influences. Natural skin with a weak front layer (chrome, bass) when tightening and during wearing process.

In the production of shoes and leather products, individual parts are subjected to joints and bending. It should be noted that the skin is better compressed than tensile: the skin resistance is 5-10 times more than the resistance of the tensile. When the bending effort, the material is stretched on one side and compressed on the other. Some details are repeatedly bent. One of the most important indicators that characterize the possibility of long-term operation of leather products is the resistance of the skin to repeated bending.

In quality, for example, genuine leather for the top of the top of shoes and haberdashery products should not be rigid, but for the details of the bottom shoes on the contrary - rigid.

## 5. CONCLUSIONS

The above physico-mechanical indicators of polymer materials affect both technological properties and performance of made shoes, clothing or leather products. They should be taken into account when performing light industry operations, namely: cutting, performing, marking, marking, embossing, etc.

## BIBLIOGRAPHY

1. Kasian L.E. State and prospects of development of light industry of Ukraine / L.E. Kasian // Scientific Bulletin of Uzhhorod National University. - 2016. - Issue 6. Part 1 - P.147-150.
2. Havrylova O.E. Application of perspective polymeric materials in the light industry for increase of quality of products / O.E. Havrylova, L.L. Nykytyna // Bulletin of the Kazan Technological University. - 2014. - № 18. - P.96-99.
3. Makhotkyna L.Y. Polymeric materials that improve the hygienic properties of bottom parts / L.Y. Makhotkyna, P.M. Halialutdynova, N.V. Tykhonova // Bulletin of the Kazan Technological University. - 2013. - № 21. - P.162-163.
4. Huraliuk A.H., Kushtan H.V., Nezhur V.S., Kyiak N.O., Mykula N.I., Fedor V.F., Demchyshyn H.S., Palosh N.M. Electronic textbook on the subject "Commodity of non-food products" in the profession of seller of non-food products qualification: 4 category. - Uzhhorod, 2016.
5. Neverov A.N., Chalykh T.N., Pekhtasheva E.L. and others. Commodity examination of industrial goods: Textbook / Ed. prof. A.N. Neverov. - M.: MTSFØR, 2006. - 848 p.
6. Tykhonova N.V. Natural and synthetic polymers in modern footwear production / N.V. Tykhonova, T.V. Zhukovskaia, L.Y. Makhotkyna // Bulletin of the Kazan Technological University. - 2010. - № 9. - P.369-372.

7. Khimych V. I. Definition and substantiation of consumer properties of footwear / V.I. Khimych, H.I. Khimycheva, A.S. Zenkin // *Eastern European Journal of Advanced Technologies*. - 2013. - № 5 (3). - P. 24-26.
8. Beck N.V. The study of the properties of composite skin / N.V. Beck, O.E. Kosheleva, V.A. Volodyn, L.Y. Makhotkyna // *Bulletin of the Kazan Technological University*. - 2013. - № 6. - P.106-108.
9. Havrylova O.E. Application of perspective polymeric materials in the light industry for increase of quality of products / O.E. Havrylova, L.L. Nykytyna // *Bulletin of the Kazan Technological University*. - 2012. - № 15. - P.190-194.
10. Fatkulyna R.R. Estimation of properties of nonwoven fibrous materials / R.R. Fatkulyna // *Bulletin of the Kazan Technological University*. - 2013. - № 24. - P.34-35.
11. Shoes [Electronic resource]. - Access mode: <http://pulsarua.com/uk/product/vzuttyevi-polotna>
12. Makhotkyna L.Y. Polymer composite materials in footwear production / L.Y. Makhotkyna, N.V. Tykhonova, E.A. Emeltsova // *Bulletin of the Kazan Technological University*. - 2011. - № 6. - P.300-301.
13. Espenko Y.A. Complex research of properties of modern stelechny cardboards / Y.A. Espenko, R.N. Tomasheva, T.M. Borysova, V.E. Horbachyk // *Bulletin of Vitebsk State Technological University*. - 2012. - Issue. 22. - P.47-53.

## Wpływ efektu starzenia i uszczelniania na własności elektryczne barwnikowych ogniw fotowoltaicznych

L. Poniewiera<sup>a</sup>, A. Januła<sup>a</sup>, M. Stachura<sup>a</sup>, P. Pogorzelski<sup>a</sup>, B. Drygała<sup>b</sup>, J. Drygała<sup>b</sup>,  
M. Drewniak<sup>c</sup>, S. Lesz<sup>d</sup>, B. Grzegorzczak<sup>d</sup>, M. Kremzer<sup>e</sup>, A. Drygała<sup>d</sup>

<sup>a</sup> student, Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 18a Konarskiego Str., 44-100 Gliwice, Poland

<sup>b</sup> uczeń Salezjańskiego Zespołu Szkół Publicznych im. św. Dominika Savio w Zabrze

<sup>c</sup> uczeń Zespołu Szkół Zawodowych nr 2 w Knurowie

<sup>d</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials, 18a Konarskiego Str., 44-100 Gliwice, Poland

<sup>e</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Scientific and Didactic Laboratory of Nanotechnology and Material Technologies, Towarowa 7 Str., 44-100 Gliwice, Poland

email: [aleksandra.drygala@polsl.pl](mailto:aleksandra.drygala@polsl.pl)

**Streszczenie:** W ramach niniejszej pracy określono wpływ efektu starzenia i uszczelniania na własności elektryczne barwnikowych ogniw fotowoltaicznych. Porównano własności elektryczne wytworzonych fotoogniw wraz z upływem czasu, które wyznaczono na podstawie zmierzonych charakterystyk prądowo-napięciowych.

**Abstract:** The study presents the results of the influence of ageing and sealing effect on the electrical properties of the dye-sensitized solar cells (DSSCs). The electrical properties of the manufactured DSSCs over time were compared. These were determined on the basis of the measured current-voltage characteristics.

**Słowa kluczowe:** fotowoltaika, barwnikowe ogniwa fotowoltaiczne, własności elektryczne, efekt starzenia,

### 1. WSTĘP

Największymi ograniczeniami ogniw fotowoltaicznych jest ich sprawność oraz żywotność. O ile w warunkach laboratoryjnych półprzewodnikowe ogniwa mogą osiągać sprawność na poziomie 28%, to wydajność urządzeń wykorzystywanych komercyjnie oscyluje w zakresie od 15÷20%. Producenci komercyjnych fotoogniw gwarantują, że sprawność w ciągu pięciu lat eksploatacji nie powinna spaść poniżej 90%. Zarówno technologia jak i środowisko, w którym

pracuje fotoogniwo odgrywają tutaj kluczową rolę. Najpopularniejsze obecnie ogniwa słoneczne produkowane są z wykorzystaniem krzemu monokrystalicznego, polikrystalicznego lub amorficznego. Produkowane są również ogniwa wykonane z innych półprzewodników takich jak tellurek kadmu, selenek indowo-miedziowy czy arsenek galu [1-3].

Poza klasycznymi ogniwami słonecznymi opartymi na związkach półprzewodnikowych, coraz większą rolę na rynku odgrywają barwnikowe ogniwa fotowoltaiczne oraz urządzenia oparte na związkach organicznych. Barwnikowe ogniwa fotowoltaiczne DSSCs (ang. dye-sensitized solar cells) są znacznie tańsze od klasycznych rozwiązań, jednak posiadają niższą sprawność (na poziomie do około 15% w warunkach laboratoryjnych). DSSCs nie posiadają typowego złącza p-n. Zbudowane są z dwóch oddzielonych od siebie elektrod wykonanych najczęściej na podłożach szklanych (możliwe jest również zastosowanie podłoży elastycznych). Na jednej z elektrod osadzany jest materiał półprzewodnikowy np.  $\text{TiO}_2$  z zaadsorbowanym na jego powierzchni światłoczułym barwnikiem (fotoanoda), natomiast na drugiej znajduje się warstwa katalityczna np. platyna (katoda). Przestrzeń pomiędzy elektrodami wypełnia elektrolit zawierający układ redoks  $\text{I}^-/\text{I}_3^-$ . Takie rozwiązanie sprawia, że ogniwo słoneczne jest transparentne, a dodatkowo może wytwarzać energię, również w świetle rozproszonym [4-6].

Transparentność oraz potencjalna elastyczność barwnikowych ogniw fotowoltaicznych stwarza ogromne możliwości ich aplikacji w wielu gałęziach przemysłu. Najszerze zastosowanie znajdują obecnie jako szyby fotowoltaiczne, zarówno w sektorze budowlanym jako szyby, świetliki, transparentne ścianki działowe w budynkach, ale również w przemyśle automotive jako szyby samochodowe czy szyberdachy. Można zaobserwować wykorzystanie takich ogniw fotowoltaicznych jako żaluzje, łamacze światła lub jako elementy fasady budynku [7-11]. DSSCs znajdują również zastosowanie w elektronice np. firma GCell produkuje zasilane barwnikowymi ogniwami słonecznymi bezprzewodowe klawiatury komputerowe. Możliwość wytworzenia elastycznych DSSCs dodatkowo zwiększa możliwość ich aplikacji na przykład w przemyśle włókienniczym. Urządzenia są wkomponowywane w wierzchnią warstwę ubrań (np. kurtki) lub innych akcesoriów (np. torebki czy plecaki), umożliwiając generowanie energii elektrycznej wykorzystanej do ładowania elektroniki w miejscach popularnych obecnie powerbanków [11-13].

W niniejszej pracy dokonano analizy wpływu efektu starzenia i uszczelniania na własności użytkowe barwnikowych ogniw fotowoltaicznych. Wyznaczono własności elektryczne otwartego (nieuszczelnionego) i zamkniętego (uszczelnionego) układu fotowoltaicznego wraz z upływem czasu.

## 2. MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

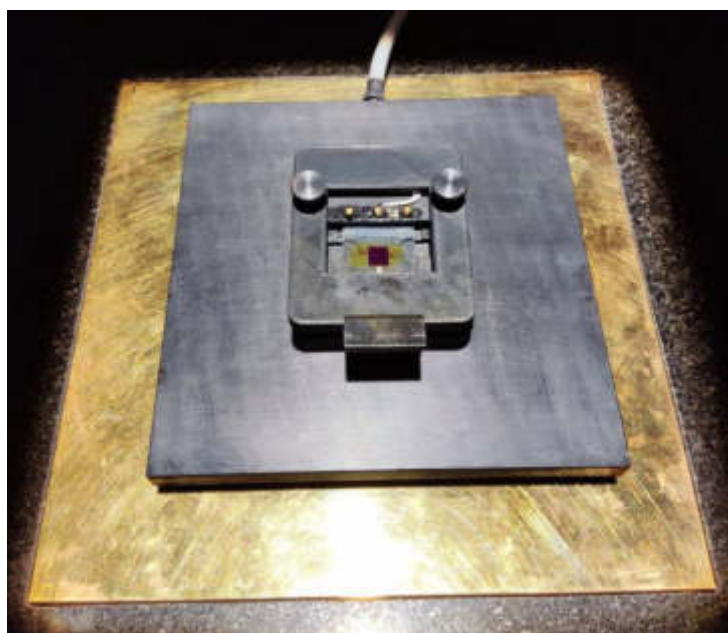
Wykonano fotoogniwa w układzie otwartym (bez uszczelnienia) oraz zamkniętym (z uszczelnieniem). W celu wykonania elektrod DSSC (fotoanody i przeciwelektrody) wykorzystano podłoża szklane z jednostronnie osadzoną warstwą tlenku cyny domieszkowanego fluorem FTO firmy Sigma-Aldrich o rezystywności  $7 \Omega/\square$ , które oczyszczono kolejno w izopropanolu, detergencie i alkoholu etylowym (przez 10 minut w każdym z odczynników) jednocześnie poddając je działaniu ultradźwięków. Na część podłoży naniesiono sitodrukiem pastę dwutlenku tytanu 18NR-T firmy Greatcell Solar, którą wygrzewano w temperaturze  $500^\circ\text{C}$ . Tak przygotowaną fotoanodę uczulano barwnikiem N719 (Di-tetrabutylamoniowy cis-bis (izotiocyjanato) bis (2,2'-bipirydylo-4,4'-dikarboksyloato)

ruten (II) firmy Greatcell Solar. Przeciwelektrodę DSSC wytworzono przez osadzenie metodą sitodruku na podłoże szklane pasty platynowej firmy Sigma Aldrich, którą wygrzewano w temperaturze 450°C. Następnie fotoanodę i przeciwelektrodę łączyło ze sobą, a pomiędzy nimi umieszczano elektrolit EL-HPE firmy Sigma-Aldrich w sposób zależny od tego czy ogniwo słoneczne było zabezpieczone lub niezabezpieczone przed jego wyciekami. W ramach niniejszej pracy wytworzono trzy rodzaje barwnikowych ogniwo fotowoltaicznych:

- nieuszczelnione,
- uszczelnione folią polimerową,
- uszczelnione silikonem.

Barwnikowe ogniwa fotowoltaiczne uszczelniano zgodnie z opisem znajdującym się w artykule pt. „Uszczelnianie barwnikowych ogniwo fotowoltaicznych” niniejszego opracowania.

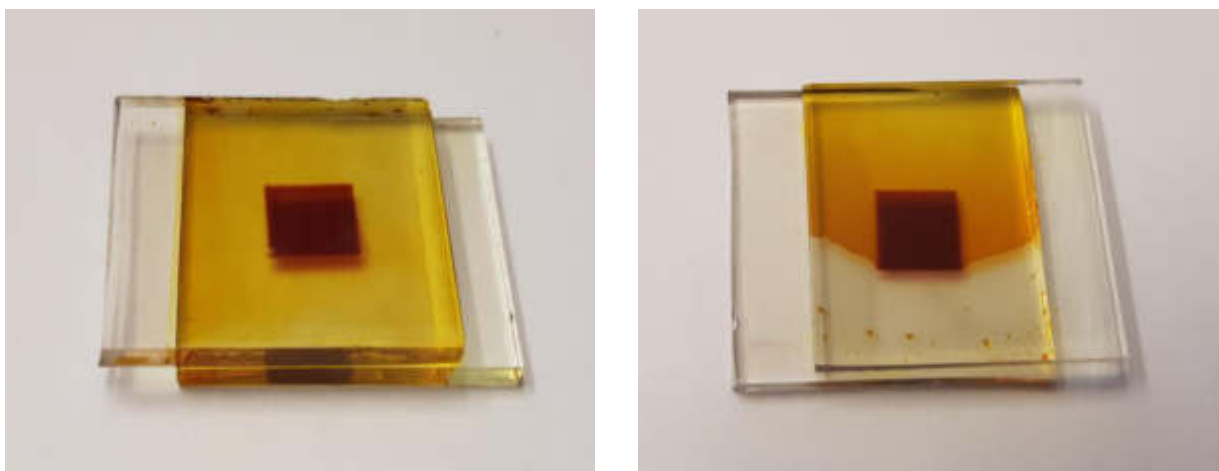
Właściwości elektryczne wytworzonych DSSCs określono na podstawie zmierzonych charakterystyk prądowo-napięciowych przy użyciu systemu SS I V CT 02 firmy PV Test Solutions Tadeusz Żdanowicz wyposażonego w symulator promieniowania słonecznego. Pomiar wykonano przy natężeniu oświetlenia 1000 W/m<sup>2</sup> i dla widma promieniowania słonecznego AM 1,5. Urządzenie pomiarowe kalibrowano względem ogniwa wzorcowego, a badane DSSCs mocowano w specjalnym uchwycie pomiarowym (Rys 1). Analizie poddano właściwości elektryczne uszczelnionych i nieuszczelnionych barwnikowych ogniwo fotowoltaicznych przez okres 28 dni, przy czym pomiar wykonywano co 7 dni. Starzenie przeprowadzono w warunkach normalnych w temperaturze pokojowej wynoszącej około 25°C.



Rysunek 1. Uchwyt pomiarowy wraz z umieszczonym w nim DSSCs  
*Figure 1. Measuring holder with the DSSCs*

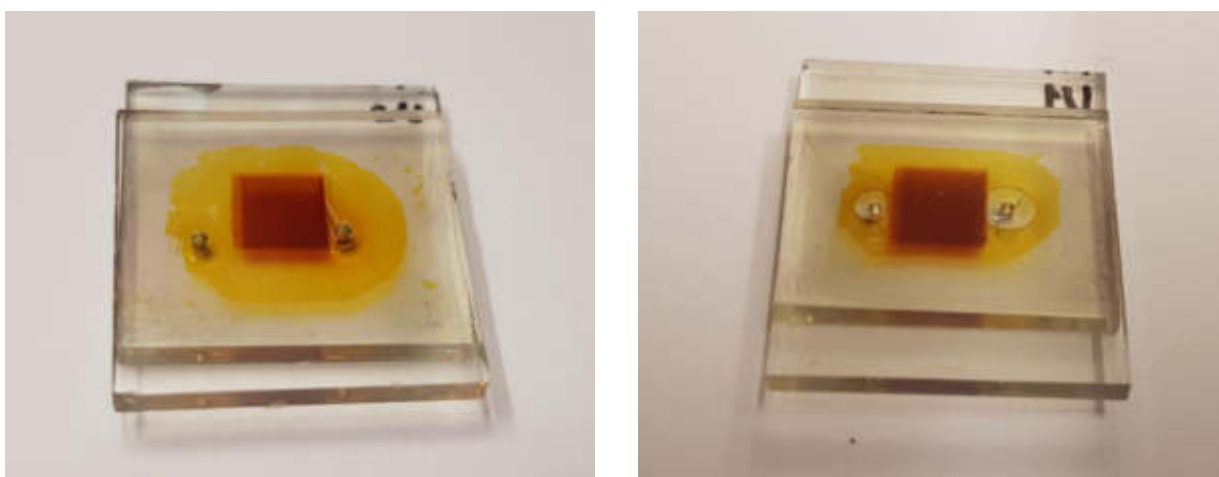
#### 4. WYNIKI BADAŃ

Na rysunku 2 przedstawiono nieuszczelnione barwnikowe ogniwo fotowoltaiczne zaraz po wypełnieniu elektrolitem oraz po 7 dniach od wykonania. Zaobserwowano ubytek elektrolitu wraz z upływem czasu. W przypadku zamkniętych barwnikowych ogniw fotowoltaicznych po 28 dniach stwierdzono obecność elektrolitu pomiędzy fotoanodą i przeciwelektrodą DSSC (Rys. 3).



Rysunek 2. Nieuszczelnione barwnikowe ogniwo fotowoltaiczne a) zaraz po wypełnieniu elektrolitem b) po 7 dniach od wykonania

*Figure 2. Unsealed dye-sensitized solar cell a) immediately after filling with electrolyte b) 7 days after manufacturing*

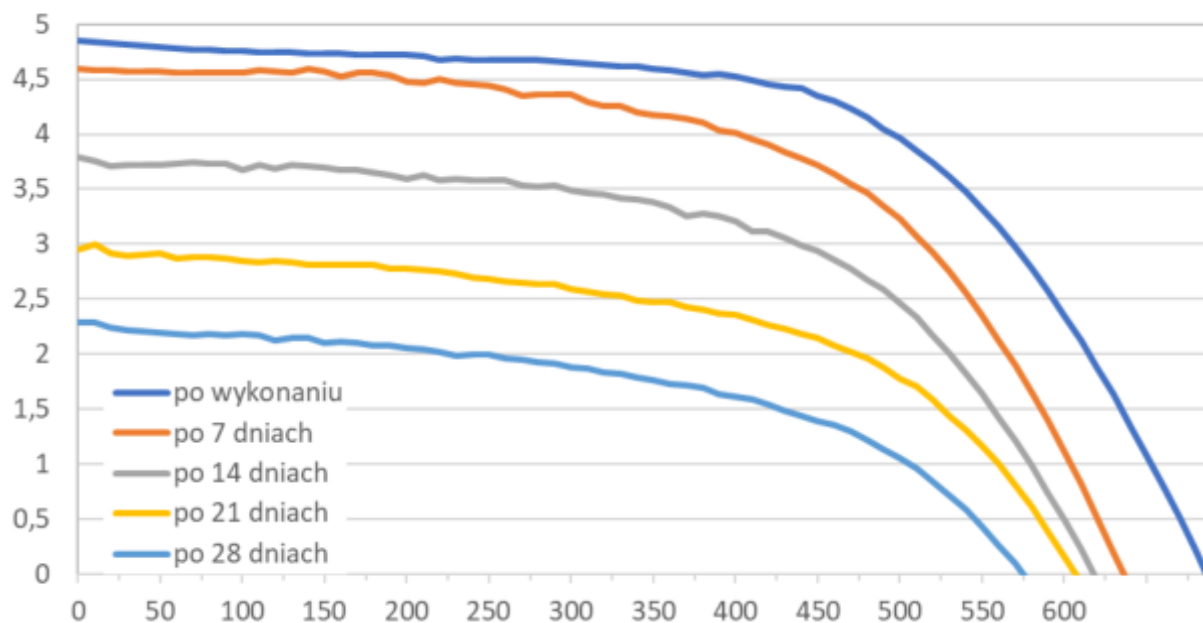


Rysunek 3. Barwnikowe ogniwo fotowoltaiczne wypełnione elektrolitem uszczelnione a) folią polimerową b) silikonem po 28 dniach starzenia

*Figure 3. Dye-sensitized solar cell with electrolyte sealed with a) polymer film, b) silicone after 28 days ageing*

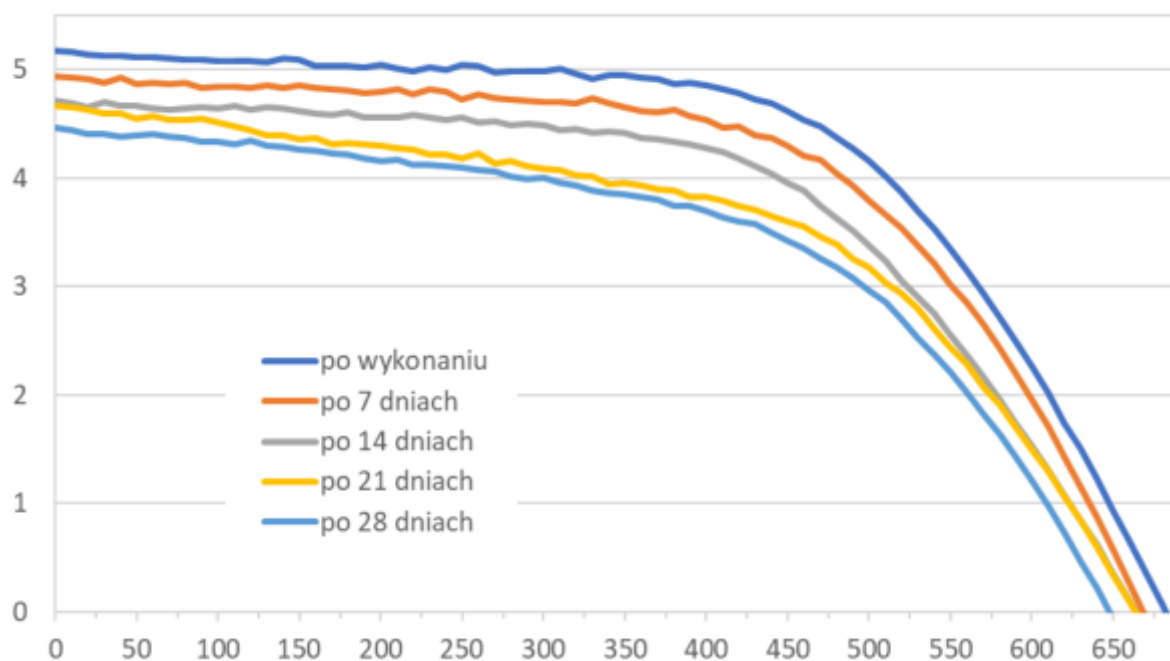
Na Rysunkach 4 - 6 przedstawiono charakterystyki prądowo-napięciowe uszczelnionych i nieuszczelnionych barwnikowych ogniw fotowoltaicznych wraz z upływem czasu. Wyznaczone własności elektryczne barwnikowych ogniw fotowoltaicznych takie jak: prąd zwarcia  $I_{SC}$ , napięcie obwodu otwartego  $U_{OC}$ , prąd w punkcie maksymalnej mocy  $I_m$ , napięcie w punkcie maksymalnej mocy  $U_m$ , maksymalna moc  $P_m$ , współczynnika wypełnienia  $FF$  oraz sprawności przetwarzania energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną  $\eta$  zestawiono w Tabelcy 1.

Na podstawie zmierzonych charakterystyk prądowo-napięciowych oraz otrzymanych własności elektrycznych stwierdzono, że wraz z upływem czasu zmniejsza się sprawność otwartych i zamkniętych barwnikowych ogniw fotowoltaicznych. Spadek wydajności dla otwartego, uszczelnionego folią oraz silikonem barwnikowego ogniwa fotowoltaicznego wynosi odpowiednio 3,12 %, 1,15 %, 1,10 %. Początkowa wydajność dla fotoogniw wykonanych zarówno w układzie otwartym, jak i zamkniętym jest porównywalna. W badanym okresie (28 dni) nie stwierdzono również wycieku elektrolitu w uszczelnionych barwnikowych ogniwach fotowoltaicznych.



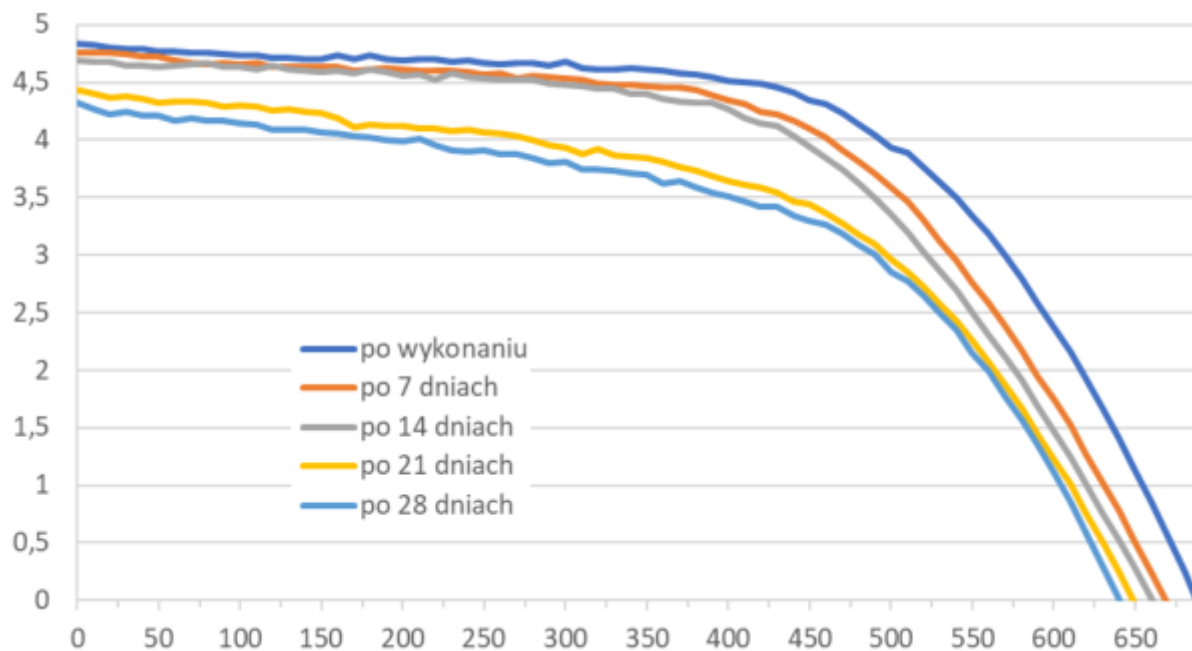
Rysunek 4. Porównanie charakterystyk prądowo-napięciowe nieuszczelnionego barwnikowego ogniwa fotowoltaicznych wraz z upływem czasu

Figure 4. Comparison of the current-voltage characteristics of unsealed dye-sensitized solar cells over time



Rysunek 5. Porównanie charakterystyk prądowo-napięciowe uszczelnionego folią polimerową barwnikowego ogniwa fotowoltaicznych wraz z upływem czasu

*Figure 5. Comparison of the current-voltage characteristics of the polymer film sealed dye-sensitized solar cells over time*



Rysunek 6. Porównanie charakterystyk prądowo-napięciowe uszczelnionego silikonem barwnikowego ogniwa fotowoltaicznych wraz z upływem czasu

*Figure 6. Comparison of the current-voltage characteristics of the silicone sealed dye-sensitized solar cells over time*



Tablica 1. Porównanie własności elektrycznych nieuszczelnionych i uszczelnionych barwnikowych ogniw fotowoltaicznych wraz z upływem czasu

Table 1. Comparison of the electrical properties of unsealed and sealed dye-sensitized solar cells over time

| Termin pomiaru                            | Własności elektryczne |                  |               |               |               |             |               |
|---|-----------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|-------------|---------------|
|   | $I_{sc}$<br>[mA]      | $U_{oc}$<br>[mV] | $I_m$<br>[mA] | $U_m$<br>[mV] | $P_m$<br>[mW] | $FF$<br>[-] | $\eta$<br>[%] |
| <b>DSSC nieuszczelnione</b>               |                       |                  |               |               |               |             |               |
| po wykonaniu DSSC                         | 4,85                  | 686,49           | 4,14          | 481,07        | 1,99          | 0,61        | 4,65          |
| po 7 dniach                               | 4,59                  | 636,08           | 3,68          | 454,37        | 1,67          | 0,56        | 3,93          |
| po 14 dniach                              | 3,79                  | 618,18           | 2,98          | 442,28        | 1,32          | 0,56        | 3,12          |
| po 21 dniach                              | 2,96                  | 606,65           | 2,18          | 441,98        | 0,96          | 0,54        | 2,70          |
| po 28 dniach                              | 2,29                  | 574,51           | 1,60          | 405,62        | 0,65          | 0,49        | 1,53          |
| <b>DSSC uszczelnione folią polimerową</b> |                       |                  |               |               |               |             |               |
| po wykonaniu DSSC                         | 5,18                  | 682,11           | 4,45          | 472,25        | 2,10          | 0,60        | 4,82          |
| po 7 dniach                               | 4,94                  | 668,42           | 4,18          | 465,36        | 1,96          | 0,59        | 4,51          |
| po 14 dniach                              | 4,71                  | 664,30           | 3,99          | 463,69        | 1,78          | 0,57        | 4,23          |
| po 21 dniach                              | 4,66                  | 663,91           | 3,52          | 462,57        | 1,63          | 0,53        | 4,02          |
| po 28 dniach                              | 4,47                  | 647,95           | 3,42          | 450,91        | 1,54          | 0,53        | 3,67          |
| <b>DSSC uszczelnione silikonem</b>        |                       |                  |               |               |               |             |               |
| po wykonaniu DSSC                         | 4,83                  | 687,79           | 4,12          | 482,72        | 1,99          | 0,60        | 4,65          |
| po 7 dniach                               | 4,76                  | 668,76           | 4,00          | 461,55        | 1,85          | 0,58        | 4,30          |
| po 14 dniach                              | 4,69                  | 660,70           | 3,96          | 446,98        | 1,77          | 0,57        | 4,17          |
| po 21 dniach                              | 4,43                  | 649,22           | 3,39          | 455,33        | 1,54          | 0,54        | 3,61          |
| po 28 dniach                              | 4,32                  | 640,56           | 3,25          | 460,05        | 1,49          | 0,54        | 3,55          |

## 5. WNIOSKI

Głównym ograniczeniem wykorzystania w praktyce barwnikowych ogniw fotowoltaicznych jest krótka żywotność w porównaniu do krzemowych fotoogniw, która często spowodowana jest wyciekaniem i wysoką lotnością stosowanych elektrolitów. Na podstawie dokonanej analizy wpływu efektu starzenia i uszczelnienia na własności elektryczne barwnikowych ogniw słonecznych stwierdzono, że wraz z upływem czasu zmniejsza się sprawność DSSCs, przy

czym największy spadek zaobserwowano dla otwartego układu fotowoltaicznego. Zastosowanie uszczelnienia pozwala na wydłużenie żywotności DSSCs.

Barwnikowe ogniwa fotowoltaiczne są stosunkowo proste w konstrukcji, nie wymagają użycia drogich materiałów, pracują przy szerokim kącie padania światła oraz przy niskim natężeniu promieniowania, mają dobry stosunek wydajności do ceny. Zalety te wraz z zapewnieniem dobrej jakości uszczelnienia i długą żywotnością zwiększają ich potencjał aplikacyjny i stają się konkurencyjne w stosunku do komercyjnie stosowanych krzemowych ogniw fotowoltaicznych.

## PODZIĘKOWANIA

Pracę zrealizowano w ramach kształcenia zorientowanego projektowo – PBL programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza w zakresie projektu pt.: „Wpływ efektu starzenia i uszczelniania na własności elektryczne barwnikowych ogniw fotowoltaicznych”.

## LITERATURA

1. M. Gul, Y. Kotak, T. Muneer, Review on recent trend of solar photovoltaic technology. *Energy Exploration & Exploitation* 34/4 (2016) 485-526
2. M. Aghaei, A. Fairbrother, A. Gok, S. Ahmad, S. Kazim, K. Lobato, G. Oreski, A. Reinders, J. Schmitz, M. Theelen, P. Yilmaz, J. Kettle: Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 159 (2022) 112160
3. S., Werle, J. Ferdyn-Grygierek, M. Szczygieł, Ochrona klimatu i środowiska, nowoczesna energetyka, Praca zbiorowa, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2021
4. M. Szindler, M. Szindler, Barwnikowe ogniwa fotowoltaiczne z polielektrolitem, *Przegląd elektrotechniczny* 8 (2018) 32-34
5. K. Sharama, V. Sharama, S.S. Sharama, Dye-sensitized solar cell technology: Fundamentals and Current Status. *Nanoscale Research Letters* 13/381 (2018) 1-46
6. A. Drygała, L.A. Dobrzański, M. Szindler, M. Prokopiuk vel Prokopowicz, M. Pawlyta, K. Lukaszowicz, Carbon nanotubes counter electrode for dye-sensitized solar cells application. *Archives of Metallurgy and Materials* 61/2 (2016) 803-806
7. S. Mathew, A. Yella, P. Gao, et al., Dye-sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the molecular engineering of porphyrin sensitizers. *Nature Chemistry* 6 (2014) 242–247
8. <https://archello.com/product/bipv-with-dssc-glass-modules>
9. <https://mlsystem.pl/dssc/>
10. <https://cen.acs.org/articles/94/i18/future-low-cost-solar-cells.html>
11. M. Kokkonen, P. Talebi, J. Zhou, S. Asgari, S.A. Soomro, F. Elsehrawy, J. Halame, S. Ahmad, A. Hagfeldt, S. G. Hashmi, Advanced research trends in dye-sensitized solar cells, *Journal of Materials Chemistry A* 9 (2021) 10527-10545
12. <https://electrotile.com/nowinki-barwnikowe-ogniwa-sloneczne/poradniki/>
13. M.A. Saeed, K. Yoo, H. C. Kang, J.W. Shim, J.J. Lee, Recent developments in dye-sensitized photovoltaic cells under ambient illumination, *Dyes and Pigments* 194 (2021) 109626

## Polymérne kompozitné materiály vystužené vláknami

Lukáš Šikyňa<sup>a</sup>, Ronald Bašťovanský<sup>b</sup>, Lenka Kuchariková<sup>a</sup>, Eva Tillová<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra materiálového inžinierstva, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovak Republic

<sup>b</sup> Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra konštruovania a častí strojov, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovak Republic

\*email: sikyna53@stud.uniza.sk

**Abstrakt:** Práca sa zaoberá kompozitnými materiálmi vystuženými uhlíkovými vláknami. Predmetom záujmu v tomto článku je skúmanie vlastností kompozitných materiálov pri záťažových mechanických skúškach. Okrem toho sa porovnávajú dva druhy použitých kompozitných profilov pri simulácii spoja. Cieľom je vytvoriť stručný prehľad mechanických vlastností na základe jednotlivých zaťažení a porovnať použité materiály.

**Kľúčové slová:** kompozitné materiály, ohyb, tlak,

### 1. ÚVOD

Zaťažovacie mechanické skúšky nám poskytujú základne informácie o materiáli. Princíp mechanických skúšok spočíva v pôsobení vonkajších síl na materiál, ktorý skúšame. Zo získaných výsledkov môžeme jednotlivé materiály porovnávať, určiť ich základne mechanické vlastnosti. U polymérnych materiálov je známe, že sú veľmi premenlivé v chemickom a morfológickom zložení. Z tohto dôvodu sa nedajú určiť podmienky, pri ktorých by mala prebiehať skúška. Stanovené normy určujú a upravujú takéto podmienky len čiastočne. Výber pravých podmienok pre konkrétnu skúšku a skúšaný materiál je určený buď materiálovými normami, alebo je rozhodnutie v kompetencii operátora skúšky, ktorý svojím odborným úsudkom stanoví priebeh skúšky. Veľmi dôležitý je aj spôsob, akým bude už konkrétny výrobok počas používania namáhaný. Šírenie poškodení v rámci kompozitného materiálu je podstatne odlišné, ako je to pri kovocho alebo iných konvenčných materiáloch. Lom v kompozitných materiáloch sa šíri pomalšie, nakoľko mu v tom bránia vlákna. Na vzniku a postupe poškodení má najväčší podiel orientácia vlákien, rozloženie výstuže a typ matrice. Pri kompozitných materiáloch s vláknovou výstužou dochádza k vnútorným štruktúrnym porušeniam omnoho skôr, ako sa objavia veľké makroskopické porušenia. K najčastejším porušeniam celistvosti materiálov patria [1-2]:

- vznik mikrotrhlín v matrici;
- oddeľovanie vlákien od matrice;

- pretrhnutie vlákien;
- delaminácia (oddeľovanie jednotlivých vrstiev v lamináte).

## 2. EXPERIMENTÁLNY MATERIÁL

Na overovanie a zistenie vlastností boli na mechanické skúšky použité uhlíkové profily kruhového prierezu (Obr.1).



Obrázok 1. Vzorky profilov s kruhovým prierezom použité pri experimente.

*Figure 1. Samples of profiles with circular cross-section used in the experiment.*

Tieto vzorky sa delili na tri skupiny:

- Prvá vzorka s označením „L“ je vyrobená metódou namotávania prepregu, kde jednotlivé vrstvy boli ukladané -  $5 \times 0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $33^\circ$ . Dĺžky vzoriek: 98, 196 a 393 mm. Na (Obr. 1) sú vľavo.
- Druhá vzorka má označenie „M“. Jej profily boli vyrobené metódou ručného nasycovania výstuže živicom a následne namotávané na trň. Vrstvy sa namotávali pod uhlami -  $4 \times 0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $33^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $33^\circ$ . Vzorky boli rozdelené na dĺžky: 100, 200 a 400 mm. Na (Obr. 1) sa nachádzajú vpravo.
- Tretia vzorka s označením „O“ je oceľová rúra dĺžky 200mm. Na (Obr. 1) v strede.

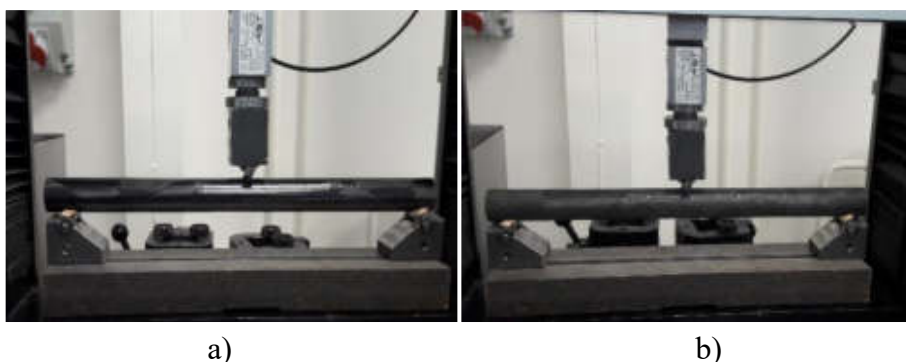
Profily vzoriek „L“ mali vďaka svojej výrobní technológii a vytvrdzovaniu vo vákuu lesklý a hladký povrch, ale pri vzorkách „M“ vyrábaných ručným nasycovaným výstuže bol povrch rúr drsný, preto sa vonkajší priemer opracoval. Po opracovaní ostal povrch matný (Obr. 1). Vonkajší priemer všetkých skúšaných profilov predstavoval  $D = 32$  mm a vnútorný priemer  $d = 28$  mm. Vzorka „O“ (oceľová rúra) nám slúžila na porovnanie získaných hodnôt s kompozitnými profilmi.

## 3. METODIKA EXPERIMENTOV

### 3.1 Skúška ohybom

Skúška ohybom sa uskutočnila v súlade s normami STN EN ISO 178 a STN EN ISO 14125. Cieľom pozorovania bolo zistiť priebehy napätí a kritických hodnôt pri zaťažovaní v trojbodovom ohybe. Skúška sa realizovala na zariadení Lab-Test 5.20, ktorého rozsah je 30 kN. Teplota miestnosti bola  $22^\circ\text{C}$  a relatívna vlhkosť 50 %. Vzorky boli zaťažované priechnikom,

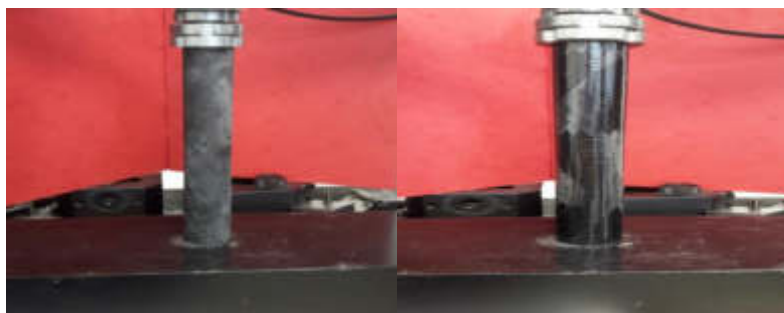
ktorý sa pohyboval rýchlosťou  $5 \text{ mm/ min}^{-1}$ . Zaťažovali sa až do momentu porušenia vzorky. Počas skúšky sa zaznamenávali dráha pričniska (priehyb vzorky) a pôsobiaca sila na vzorku. Skúška ohybom bola vykonaná na vzorkách 2x  $L=393 \text{ mm}$  (vpravo) a 2x  $M=400 \text{ mm}$  (vľavo). Tieto vzorky boli ustavené na podpery (vzdialenosť  $P=360 \text{ mm}$  (Obr. 2)). Okrem vzoriek vyrobených z uhlíkových vlákien bola skúšaná aj oceľová vzorka, ktorá slúžila len pre grafické porovnanie týchto dvoch odlišných materiálov. Oceľová vzorka  $O=200 \text{ mm}$  bola zaťažená maximálnou silou  $5000 \text{ N}$ , vzdialenosť podpier bola  $P=170 \text{ mm}$ . Keďže kontakt pri ohybovej skúške je takmer bodový, v mieste styku bola použila oceľová podložka. Skúšaná vzorka sa tak nedeformuje lokálne, ale v celom objeme.



Obrázok 2. Skúška ohybom na vzorkách a)  $L=393 \text{ mm}$ , b)  $M=400 \text{ mm}$ .  
*Figure 2. Bending test on samples  $L=393 \text{ mm}$ , and  $M=400 \text{ mm}$ .*

### 3.2 Tlak

Skúška tlakom sa uskutočnila v súlade s normou STN EN ISO 604 na všetkých dĺžkach profilov a jej cieľom bolo zistiť veľkosť sily, pri ktorej sa začnú prejavovať makroskopické znaky porušenia. Pri skúške je zaťažovaná aj matrica, ktorej vystužujúce a spevňujúce vlastnosti sú zásadné a bránia kolapsu štruktúry materiálu.



Obrázok 3. Priebeh skúšky tlakom.  
*Figure 3. Pressure test procedure.*

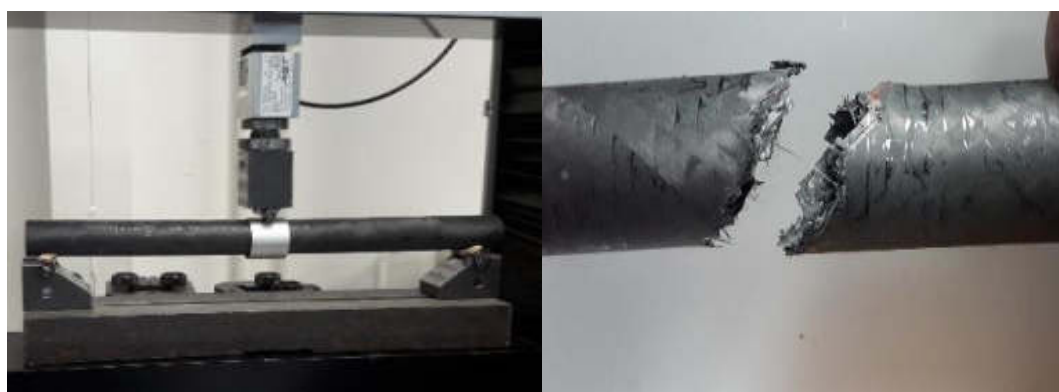
Kompozitné profily boli namáhané v pozdĺžnom smere na zariadení Lab-Test 5.20, ktorého maximálna hodnota zaťaženia je  $30 \text{ kN}$ . Pričnisk prístroja sa na začiatku pohyboval rýchlosťou  $5 \text{ mm/min}^{-1}$  do zaťaženia  $20 \text{ N}$ . V tomto prvotnom zažatí sa vymedzia a zrovnajú vôle v zariadení a čeľustiach, ktoré držia vzorku. Potom zariadenie tlačí na vzorku s rýchlosťou deformácie  $1 \text{ mm/min}^{-1}$  až do jej deštrukcie alebo po prednastavený limit čiže do  $25 \text{ kN}$ . Skúška

tlakom bola vykonaná na vzorkách 2x L=98 mm, L=196 mm, L=393 mm, 2x M=100 mm, M=200 mm, M=400 mm a O=200 mm. Na (Obr. 3) je zobrazený spôsob zaťažovania vzoriek.

## 4. VÝSLEDKY A DISKUSIA

### 4.1 Skúška ohybom

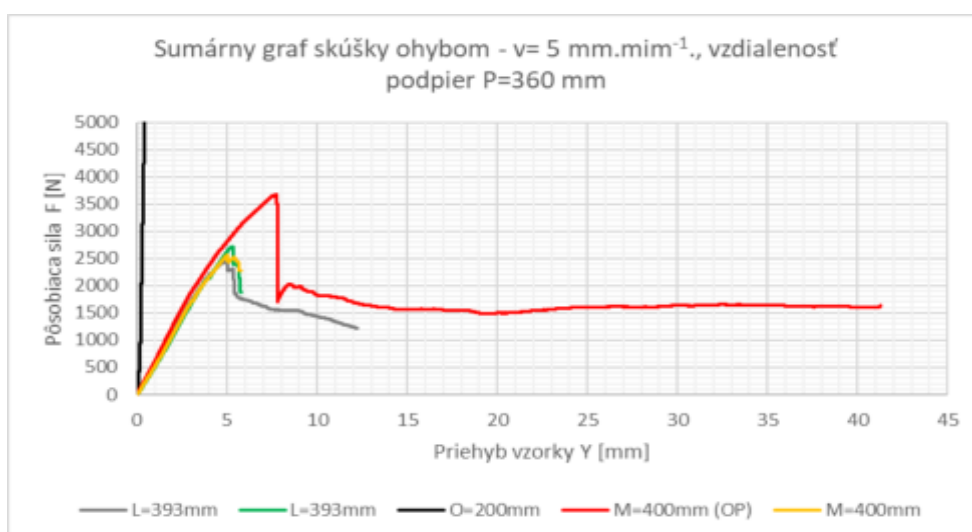
Lom, ktorý môžeme pozorovať (Obr. 4) je pod uhlom približne  $45^\circ$ , čiže pod uhlom, v ktorom boli namotávané vlákna. Lom postupoval pomaly a kontinuálne v celom priebehu skúšky. Vlákna sa oddeľovali od matrice a pretrhávali sa postupne. Ako prvé sa začali trhať horné vlákna, ktoré boli zaťažené tlakom. Spodné vlákna, zaťažené ťahom, praskli pri vyššom zaťažení ako horné vlákna. Čiastočne je to spôsobené aj tým, že hrana ocelej podložky namáhala horné vlákna vzorky strihom.



Obrázok 4. Výsledok skúšky po použití ocelej podložky.

Figure 4. Test result after use of the steel pad.

Z nameraných dát pri skúškach sa zostrojili grafy závislosti pôsobiacej sily  $F$  [N] a priehybu vzorky  $Y$  [mm], ktoré preukazujú priebeh síl v rôznych skúšobných materiáloch (Obr. 5).



Obrázok 5. Sumárny graf trojbodového ohybu.

Figure 5. Summary graph of three-point bending.

Sila, pri ktorej sa vzorky začali výrazne deštruovať predstavuje hodnotu zaokrúhlene 2600 N a priehyb vzoriek sa pohyboval okolo 5 mm. Jediný rozdiel predstavuje vzorka M=400 mm (OP), ktorá bola ohýbaná pomocou oceleovej podložky a oproti ostatným vzorkám sa dokázala viac ohnúť. U všetkých vzoriek sa objavilo aspoň jedno z týchto poškodení:

- lom v smere namotávaných vlákien,
- pretrhnutie vlákien v dôsledku vtlačenia podložky,
- namáhanie spodných vlákien na ťah.

Vzorka O=200 mm slúžila ako materiál zastupujúci konvenčnú sféru. Skúška oceleovej rúrky sa ukončila pri 5000 N preto, aby sme mohli zostaviť prehľadný graf. Nemôžeme porovnávať poškodenia ocele a uhlíkových kompozitov po skúške ohybom, pretože tie pri skúške nevznikli.

## 4.2 Skúška tlakom

Všetky vzorky boli zaťažované rovnakým spôsobom a u takmer všetkých vzoriek sa dosiahlo maximálne možné napätie 25 kN. Forma deštrukcie bola kontinuálna a vyskytovala sa hlavne v oblasti dotykových plôch. Najčastejšou poruchou bolo delaminovanie vrstiev uhlíkového profilu a deštrukcia kruhovej plochy, ktorou sa prenášalo silové pôsobenie.

Zaťažovaním vzoriek vyrobených z prepregu („L“) sa okrem delaminácie uhlíkových vrstiev vyskytlo poškodenie lomom. Pri tlakovej skúške s týmito materiálmi sa pri dvoch takmer identických vzorkách L=98 mm vyskytlo šmykové porušenie, ktoré bolo pod uhlom namotávania vrstiev prepregu (Obr. 6).



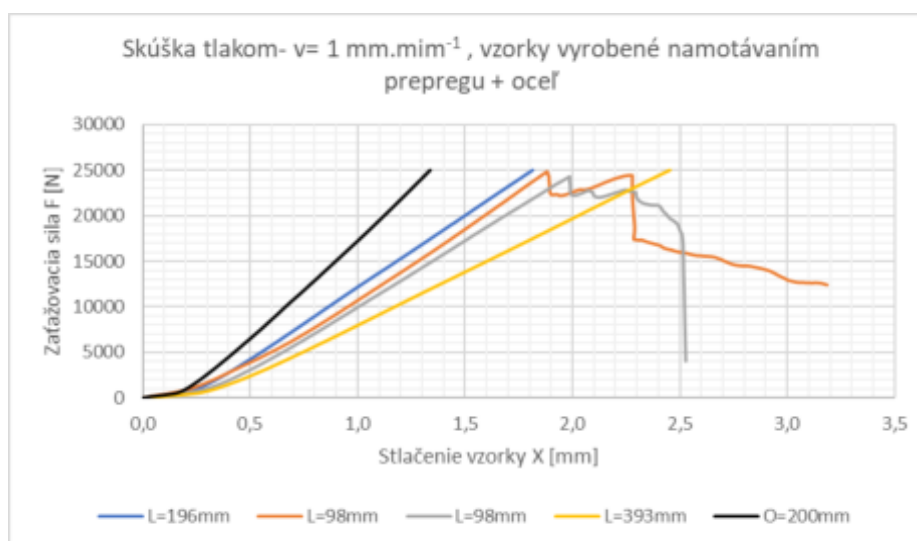
Obrázok 6. Poškodenie vzorky L=98mm.

Figure 6. Sample damage L = 98mm.

U dlhších vzoriek sa podobné poškodenie vôbec neobjavilo. Pre lepšiu interpretáciu výsledkov skúšky nám poslúži grafické zobrazenie (Obr. 7), v ktorom môžeme pozorovať maximálnu hodnotu pôsobiacej sily a zároveň stlačenie vzoriek vyrobených z prepregu.

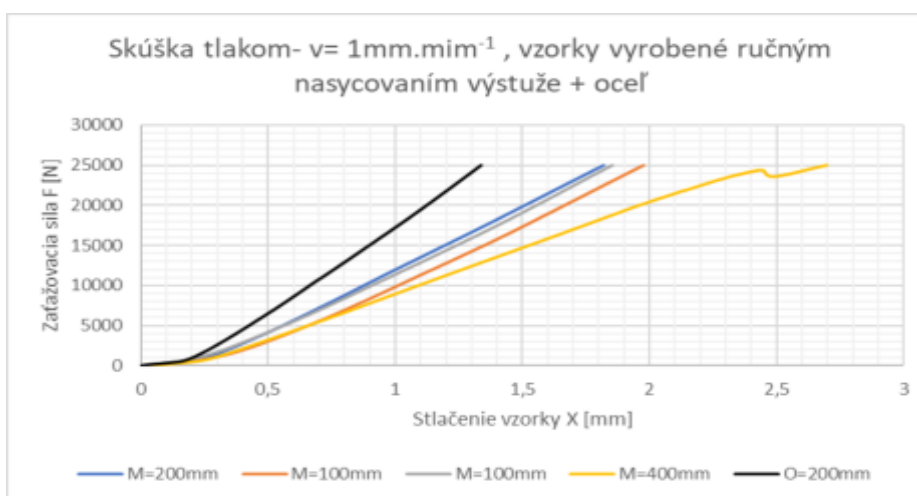
Zaťažovanie vzoriek vyrobených ručným nasycovaním výstuže matricou („M“) prebiehalo rovnakým spôsobom. Poškodenie uhlíkových kompozitov bolo obdobné ako u vzoriek vyrobených z prepregu. Vyskytla sa delaminácia a poškodenie stykovej plochy, cez ktorú sa prenášalo silové pôsobenie. Vrstvy výstuže, ale aj samotné vlákna sa oddeľovali od matrice v mieste styku s priečnikom. Pri analýze poškodení sa u vzoriek „M“ nevyskytlo šmykové poškodenie ako u vzoriek „L“. Pri ručne nasycovaných vzorkách môžeme na (Obr. 8) pozorovať takmer identické priebehy skúšky u vzoriek M=100 mm a M=200 mm. Na (Obr. 8)

môžeme vidieť grafický priebeh skúšky vzoriek 2x M=100 mm, M=200 mm, M=400 mm a O=200 mm



Obrázok 7. Graf skúšky tlakom vykonanej na vzorkách 2x L=98 mm, L=196 mm, L=393 mm a O=200 mm.

Figure 7. Graph of pressure test performed on samples 2x L=98 mm, L=196 mm, L=393 mm and O=200 mm



Obrázok 8. Graf skúšky tlakom vykonanej na vzorkách 2x M=100 mm, M=200 mm, M=400 mm a O=200 mm.

Figure 8. Graph of pressure test performed on samples 2x M=100 mm, M=200 mm, M=400 mm and O=200 mm

Poškodenia, ktoré nastali u vzoriek „M“ sú podobné, ako u vzoriek z prepregu (Obr. 9). Porovnaním oboch typov uhľíkových kompozitov a rozsahom ich poškodení sme prišli k záveru, že ručne nasycované vzorky aj pri menších rozmeroch zniesli väčšie silové pôsobenie ako vzorky z prepregu. Šmykové porušenie sa prejavilo iba na krátkych dĺžkach skúšobného materiálu „L“.





Obrázok 9. Poškodenie uhlíkových profilov pri skúške tlakom.

*Figure 9. Damage to carbon profiles during the pressure test.*

## 5. ZÁVER

Na základe dostupnosti a druhu skúšobných uhlíkových profilov bol zvolený spôsob a forma vykonania mechanických skúšok za účelom zistenia sledovaných vlastností.

Výsledky mechanických skúšok priniesli zaujímavé informácie o možných druhoch porušenia a poškodenia uhlíkových kompozitných materiálov. Bolo zistené, že dôležitým faktorom pri skúšaní materiálov v trojbodovom ohybe je tlačná podložka. Od nej sa odvíja možné poškodenie, ktoré predstavovalo povrchové pretrhávajúce vlákna, vtlačenie podložky do materiálu, narušenie horných vrstiev materiálu v smere namotávania vlákna a lomy.

Ďalej bolo zistené, že pri simulovaní spojov uhlíkových profilov sa u vzoriek vyrobených z prepregu prejavila väčšia odolnosť materiálu. Poškodenie lomom nastalo pri oboch druhoch skúšaných materiálov.

Pri skúške tlakom bolo pozorované delaminovanie horných vrstiev kruhovej plochy uhlíkových kompozitov. Vrchná časť skúšobných telies, ktorú tvorila kruhová plocha sa pôsobením sily drvíka, čo vyvolalo delamináciu a oddeľovanie vlákna od matrice. Toto poškodenie sa prejavilo na každej vzorke nezávisle od spôsobu výroby.

## PodĎakovanie

Príspevok vznikol v rámci riešenia spoločného slovensko-poľského študentského projektu TalentDetector 2022 a projektu KEGA 016ŽU-4/2020.

## LITERATÚRA

1. SKOČOVSKÝ, P. - BOKŮVKA, O. - KONEČNÁ, R. - TILLOVÁ, E.: Náuka o materiáli. EDIS- vydavateľstvo ŽU, Žilina 2014.
2. LIPTÁKOVÁ, T. - ALEXY, P. - GONDÁR, E. - KHUNOVÁ, V.: Polymérne konštrukčné materiály. [online]. 2012
3. STN EN ISO 178 - Plasty stanovenie ohybových vlastností.
4. STN EN ISO 14125 - Vlákna vystužené plastové kompozity. Stanovenie ohybových vlastností.
5. STN EN ISO 604 - Plasty stanovenie tlakových vlastností.

## Vplyv chemicko-tepelného spracovania na únavovú životnosť austenitickej ocele AISI 304

Martin Slezák<sup>a\*</sup>, Milan Uhrčík<sup>a</sup>, Eva Tillová<sup>a</sup>, Lenka Kuchariková<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra materiálového inžinierstva, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovak Republic

\* email: slezak15@stud.uniza.sk

**Abstract:** Článok sa zaoberá hodnotením vplyvu chemicko-tepelného spracovania s akcentom na štúdium vplyvu aplikácie plazmovej nitridácie na únavovú životnosť austenitickej ocele AISI 304. Pre zdokumentovanie účinku plazmovej nitridácie boli realizované: analýza mikroštruktúry, hodnotenie tvrdosti, hodnotenie únavovej životnosti využitím trojbodového cyklického zaťažovania a fraktografická analýza lomových plôch. Fraktografickou analýzou sa určilo iniciačné miesto trhliny, mechanizmus vzniku a šírenia únavovej trhliny a samotný typ lomu.

**Keywords:** plazmová nitridácia, austenitická oceľ, únavová životnosť, mikroštruktúrna analýza, fraktografická analýza

### 1. ÚVOD

Chemicko-tepelné spracovanie je v praxi najčastejšie využívané z dôvodu zvýšenia odolnosti povrchovej vrstvy nasycovaním povrchu súčiastok vhodne zvolenými chemickými prvkami. Chemicko-tepelným spracovaním je úmyselne vyvolaná zmena chemických, fyzikálnych a mechanických vlastností v povrchových vrstvách. Povrchová vrstva je ovplyvnená natoľko, že dochádza i k zmene jej štruktúry [1-2]. K možným chemicko-tepelným spracovaním austenitickej ocele AISI 304 patrí nitridácia. Ide o proces pri ktorom sa nasycuje povrch oceľovej súčasti dusíkom v kvapalnom alebo plynnom prostredí [3]. Optimálna východisková štruktúra ocele pred spracovaním je sorbit. Nepripustný je oduhličený povrch nitridovanej súčiastky [4-5]. Hlavnou podmienkou plazmovej nitridácie je prítomnosť atomárneho dusíka na povrchu kovu. Tento atomárny dusík sa dokáže dostať cez povrchovú adsorpčnú vrstvu nitridov, za zvýšenej teploty do mriežky základného kovu a ďalej do ocele [6].

Austenitická koróziivzdorná oceľ AISI 304 sa využíva na výrobu súčiastok pracujúcich v dynamicky namáhaných podmienkach. Vznikajúce lomy majú začiatok v miestach, kde je sústredené najväčšie namáhanie. Obvykle je to na povrchu súčiastok. Lomy ľahšie vznikajú na

miestach po mechanickom obrábaní alebo vo vruboch. Ďalší činiteľ, ktorý má vplyv na iniciáciu lomu, je chemický účinok, ktorý pôsobí na povrchu súčiastok.

Korózia veľmi znižuje medzu únavy. Naopak medzu únavy zvyšujú procesy povrchového vytvrdzovania, z ktorých je najvýznačnejšia práve nitridácia. Rovnako všetky kroky smerujúce k zlepšeniu povrchu, ako napr. leštenie, spôsobujú vyššiu odolnosť proti únave [7]. Priaznivý vplyv nitridácie na zvýšenie medze únavy sa vysvetľuje tým, že nitridovaná vrstva je v stave veľkého vnútorného tlakového napätia, ktoré pôsobí opačne oproti napätiu ťahovému. Nitridovaná vrstva ako prostriedok k zvýšeniu medze únavy sa odporúča skôr pre súčasti namáhané striedavým ohybom ako torzným namáhaním, avšak aj u torzných tyčí sa dobre uplatnila, aj keď sa nepoužili špeciálne nitridačné ocele [8].

## 2. EXPERIMENTÁLNE POSTUPY A MATERIÁL

Ako experimentálny materiál bola použitá austenitická oceľ AISI 304. Obsah uhlíka v týchto oceliach je zvyčajne nižší ako 0,08 %. Chemické zloženie materiálu je uvedené v tab. 1. Tieto ocele majú dobrú koróznú odolnosť a vysokú mechanickú pevnosť až do 1100 °C. Materiál je podľa dodacieho listu spracovaný valcovaním za tepla. Toto technologické spracovanie môže ovplyvňovať mikroštruktúru materiálu.

Tabuľka. 1 Chemické zloženie experimentálneho materiálu v hm. %

Table. 1 Chemical composition of experimental material in wt. %

| Označenie | EN označenie | C    | Si  | Mn  | Cr    | Ni     | Ostatné |
|-----------|--------------|------|-----|-----|-------|--------|---------|
| AISI 304  | X5CrNi18-10  | 0,07 | 1,0 | 2,1 | 17-19 | 8-10,5 | zvyšok  |

Ovplyvnenie povrchu experimentálnych vzoriek pre uskutočnenie trojbodového ohybu a vyhodnotenia mikroštruktúry ako aj tvrdosti sa uskutočnilo pomocou plazmovej nitridácie.

Mikroštruktúra austenitickej ocele AISI 304 bola hodnotená vo východiskovom stave a v stave po plazmovej nitridácii s využitím svetelného metalografického mikroskopu NEOPHOT 32. Vzorky boli pre pozorovanie pripravené pomocou štandardných metalografických postupov.

Hodnotenie tvrdosti podľa Vickersa skúšobných vzoriek vo východiskovom stave a po plazmovej nitridácii bolo realizované pomocou mikrotvrdomera Zwick/Roell ZHV $\mu$  so zaťažujúcou silou 0,02 kp (HV $_{0,02}$  = 0,196 N) pre vzorku východiskového stavu a 0,01 kp (HV $_{0,01}$  = 0,0981N) pre vzorku po plazmovej nitridácii, s časovým zotrvaním vtlačaného telieska 10 sekúnd. Pre lepšiu viditeľnosť výsledných vtlačkov boli vzorky pred meraním tvrdosti metalograficky pripravené.

Cyklické zaťažovanie skúšobných vzoriek bolo realizované na rezonančnom pulzátore Zwick/Roell Amsler 150 HFP 5100 (Obr. 1). Skúšobné vzorky boli zaťažované trojbodovým cyklickým ohybom pri podmienkach: vzdialenosť podpier 30 mm (obr. 2), teplota okolia 20 °C, zaťažujúca frekvencia  $f \approx 80$  Hz. Únavové skúšky boli vykonané v oblasti počtu cyklov  $N \approx 10^4$  až  $N \approx 2 \cdot 10^7$ , pri strednom napätí  $\sigma_m = -540$  MPa pre vzorky východiskového stavu a  $\sigma_m = -720$  MPa pre vzorky po plazmovej nitridácii. Amplitúda napätia sa pri vzorkách vo východiskovom stave pohybovala v rozmedzí  $\sigma_a = 180$  MPa až 450 MPa a pri vzorkách po plazmovej nitridácii v rozmedzí  $\sigma_a = 180$  MPa až 630 MPa. Bolo použitých 7 skúšobných vzoriek pre každý stav.



Obrázok 1. Rezonančný pulzátor  
*Figure 1. Resonant pulsator*



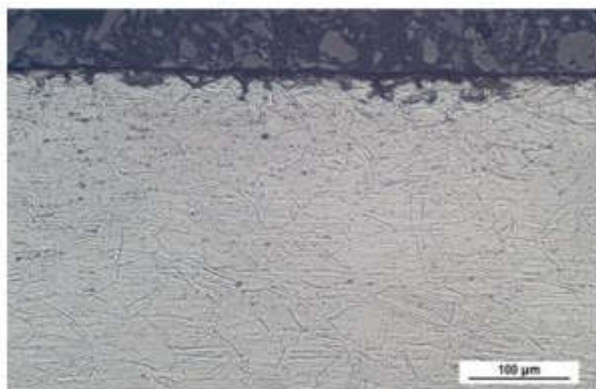
Obrázok 2. Detail na skúšobnú vzorku pri trojbodovom ohybe  
*Figure 2. Detail of a test specimen at three-point bending*

Pre vyhodnotenie vplyvu plazmovej nitridácie na charakter iniciácie a šírenia sa únavového lomu bol použitý rastrovací elektrónový mikroskop TESCAN VEGA LMU II.

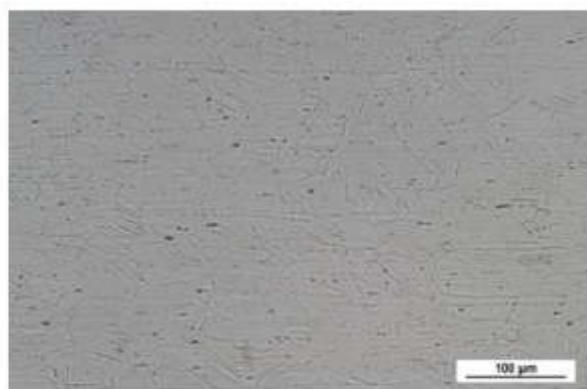
### 3. VÝSLEDKY A DISKUSIA

#### 3.1. Analýza mikroštruktúry

Z analýzy východiskového stavu austenitickej ocele AISI 304 vyplýva, že štruktúra je tvorená polyedrickými zrnami austenitu rôznej veľkosti (Obr. 3). V štruktúre môžeme sledovať prítomnosť žihacích dvojčiat, ale aj deformačných dvojčiat, avšak textúra zrna nevykazuje prílišnú deformáciu.



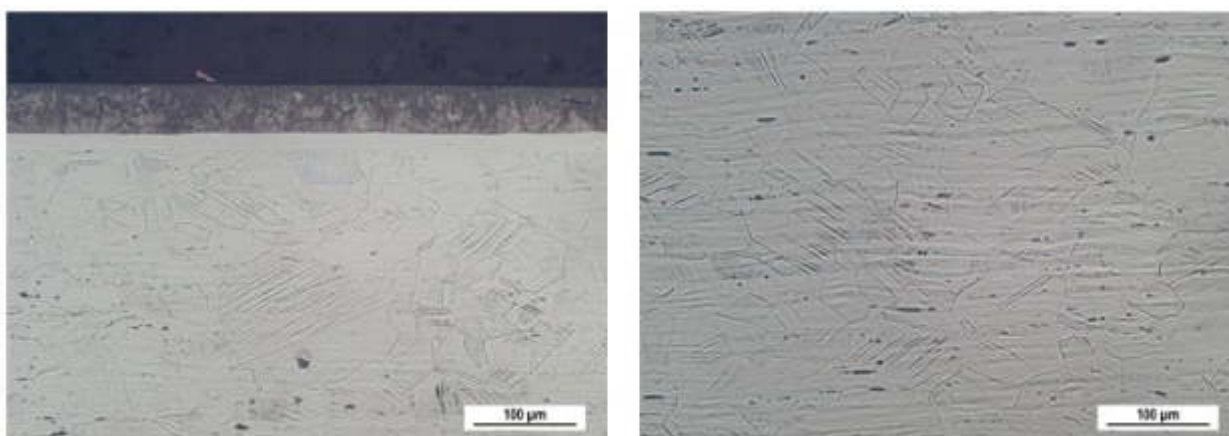
a) okraj vzorky/ *edge of sample*



b) jadro vzorky / *in core*

Obrázok 3. Mikroštruktúra austenitickej ocele AISI 304, východiskový stav, lept. Kallings  
*Figure 3. Microstructure of AISI 304 steel in the initial state, etch. Kallings*

Z analýzy mikroštruktúry ocele AISI 304 po plazmovej nitridácii vyplýva, že štruktúra je totožná s austenitickou oceľou AISI 304 vo východiskovom stave a je tvorená polyedrickými zrnami austenitu rôznej veľkosti (Obr. 4). Na povrchu vzorky je viditeľná nitridačná vrstva ktorá vznikla pri procese plazmovej nitridácie a postupovala smerom do jadra. Z hľadiska pozorovania mikroštruktúry možno usúdiť, že jadro je po plazmovej nitridácii tvorené hrubozrnnejšou štruktúrou.



a) okraj vzorky/ *edge of sample*

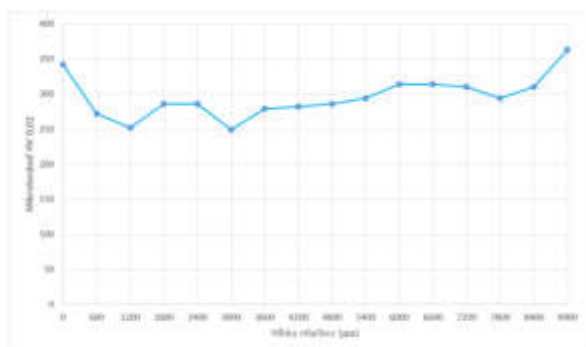
b) jadro vzorky / *in core*

Obrázok 4. Mikroštruktúra ocele AISI 304 po plazmovej nitridácii, lept. Kallings

Figure 4. Microstructure of austenitic steel AISI 304 after plasma nitriding, etch. Kallings

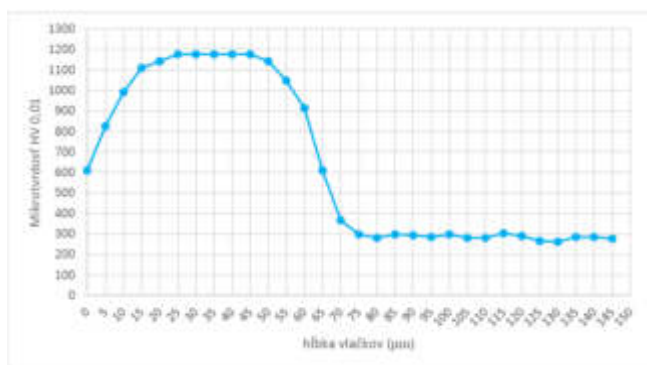
### 3. 2 Hodnotenie tvrdosti

Výsledky hodnotenia tvrdosti podľa Vickersa sú uvedené na obr. 5 a obr. 6. Zo získaných výsledkov vyplýva, že priemerná hodnota tvrdosti na vzorke pre východiskový stav bola 294 HV<sub>0,02</sub>. U vzorky po plazmovej nitridácii to bolo rôzne, na nitridačnej vrstve bola priemerná tvrdosť 1131,1 HV<sub>0,01</sub> a v jadre 285,6 HV<sub>0,01</sub>.



Obrázok 5. Priebeh tvrdosti austenitickej ocele AISI 304 vo východiskovom stave

Figure 5. Hardness course of austenitic steel AISI 304 in the initial state

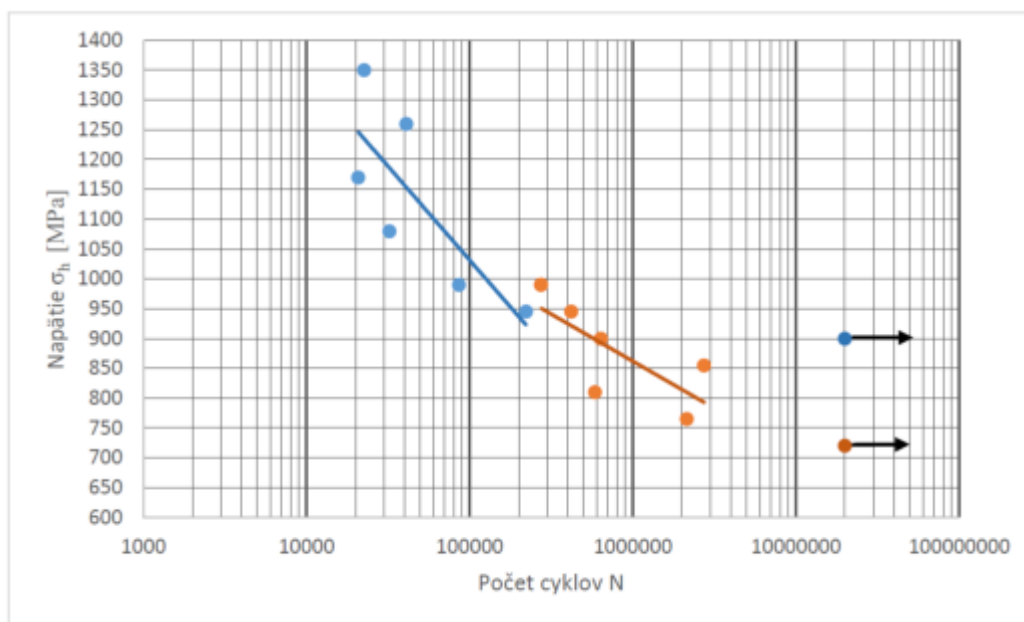


Obrázok 6. Priebeh tvrdosti austenitickej ocele AISI 304 po plazmovej nitridácii

Figure 6. Hardness course of austenitic steel AISI 304 after plasma nitriding

### 3.3 Únavová životnosť experimentálneho materiálu

Z výsledkov únavových skúšok boli zostrojené grafy závislosti  $\sigma_h - N$  v semilogaritmickej súradniciach. Únavovú životnosť po plazmovej nitridácii reprezentuje modrá krivka a vo východiskovom stave oranžová (Obr. 7). Z výsledkov je zrejmé, že plazmová nitridácia má výrazný vplyv na zlepšení únavovej životnosti austenitických ocelí AISI304.



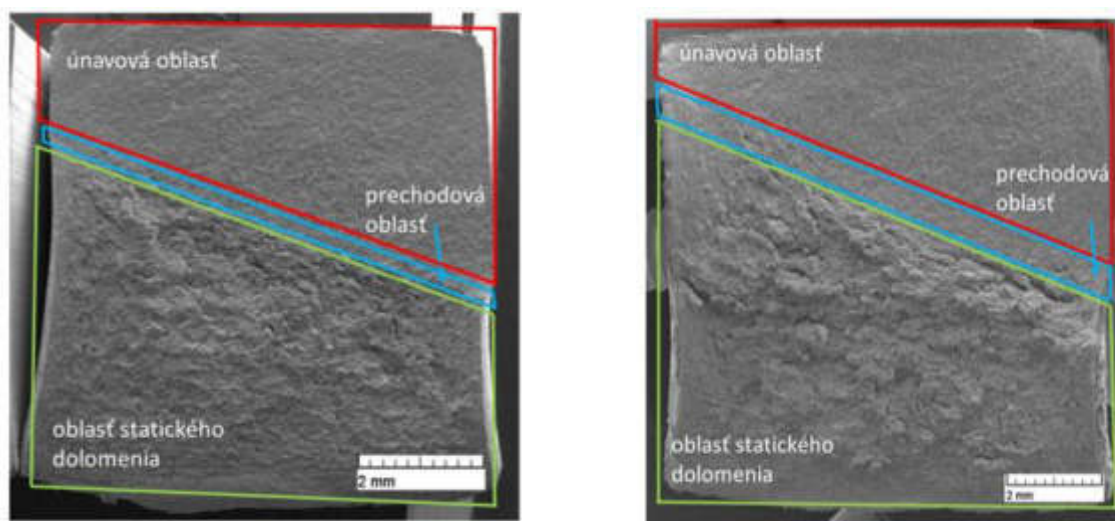
Obrázok 7. Porovnanie závislosti  $\sigma_h - N$  pre ocel' AISI 304 vo východiskovom stave a po plazmovej nitridácii

Figure 7. Comparison of  $\sigma_h - N$  dependence for AISI 304 steel in initial state and after plasma nitriding

### 3.4 Fraktografické hodnotenie

Celkový pohľad na lomovú plochu poskytuje informáciu o množstve únavového porušenia a statického dolomenia (Obr. 8). Mikrofraktografické hodnotenie bolo aplikované pre posúdenie prítomnosti charakteristických znakov rastu únavovej trhliny, striácií ako aj miesta iniciácie (Obr. 9).

Z výsledkov fraktografickej a mikrofraktografickej analýzy vyplýva, že nitridačná vrstva nemá výrazný vplyv na zmenu iniciácie a šírenia sa únavového lomu. Je vidieť, že nedochádza k výraznému nárastu únavového porušenia, ani k zmenám šírenia sa únavového lomu na vzorkách použitých pre experimentálne práce.

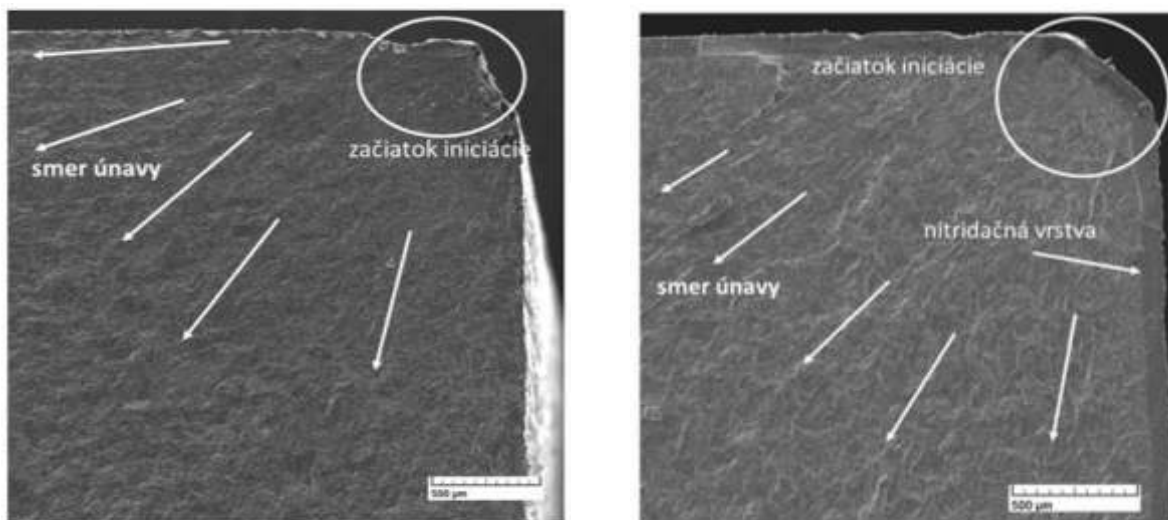


a)

b)

Obrázok 8. Celkový pohľad na lomovú plochu: a) vo východiskovom stave b) v stave po plazmovej nitridácii

Figure 8. General view of the fracture surface: a) as-cast state, b) after nitriding layer



a)

b)

Obrázok 9. Mikrofraktografická analýza iniciácie trhliny a únavového šírenia sa: a) vo východiskovom stave b) v stave po plazmovej nitridácii

Figure 9. Mikrofractographic analysis of beginning of initiation, fatigue direction: a) as-cast state, b) after nitriding layer

#### 4. ZÁVER

Z realizovaných analýz ocele AISI 304 vo východiskovom stave a v stave po plazmovej nitridácii možno konštatovať nasledujúce závery:

- analýzou mikroštruktúry bolo zistené, že austenitická štruktúra je tvorená polyedrickými zrnami austenitu rôznej veľkosti, v ktorej sa nachádzalo aj veľké množstvo vtrúsenín na báze MnS. Neboli pozorované veľké rozdiely medzi štruktúrou východiskového stavu a po plazmovej nitridácii. Vo vzorkách po plazmovej nitridácii bolo možné odlíšiť nitridačnú a difúznú vrstvu, ktoré vznikli chemicko-tepelným spracovaním;
- z hodnotenia tvrdosti podľa Vickersa vyplýva, že priemerná hodnota tvrdosti ocele vo východiskovom stave je 294 HV0,02. Po plazmovej nitridácii bola priemerná tvrdosť nitridačnej vrstvy 1 131,1 HV0,01 a jadra 285,6 HV0,01;
- z hodnotenia únavových skúšok vyplýva, že tyče vo východiskovom stave vydržali väčší počet cyklov ako tyče po plazmovej nitridácii, ale pri nižšom napätí;
- fraktografická analýza nepreukázala vplyv plazmovej nitridácie na charakter lomu a štart iniciácie trhliny. Nitridácia neovplyvnila porušovanie vzorky pod nitridačnou vrstvou. Na vzorkách vo východiskovom stave aj po plazmovej nitridácii môžeme sledovať tvárne striacie, tvárne jamky po sulfidových časticiach a sekundárne trhliny. V niektorých jamkách boli identifikované okrúhle pozostatky po sulfidoch.

## PodĎakovanie

Príspevok vznikol v rámci riešenia spoločného slovensko-poľského študentského projektu TalentDetector 2022, projektu KEGA 016ŽU-4/2020 a študentského grantového projektu UNIZA č. 2490/2021 „*Využitie chemicko-tepelného spracovania na zvýšenie únavovej životnosti vybraných konštrukčných materiálov*“.

## LITERATÚRA

1. J. Korecký, Tepelné spracování kovů. 3. vyd. Praha SNTL, 1965. 92 s. ISBN 04-202-65.
2. V. Kraus, Povrchy a ich úpravy. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2000. 216 s. ISBN 80-7082-668-1.
3. T. Aizawa, H. Kuwahara, Plasma Nitriding as an Environmentally Benign Surface Structuring Process. Japan: Eco Society, 2003.
4. J. Dilinger, a kol., 2007: Moderní strojírenství pro školu i praxi. Praha: Europa-sobotáles cz. s. r. o., 2007. 612 s. ISBN 978-80-86706-19-1.
5. K. Ďaďourek, Vybrané technológie povrchových úprav - Nitridácia. [online]. [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/VTM/vtm%20Dad/10doutvyb.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/VTM/vtm%20Dad/10doutvyb.pdf)
6. T. Brinke, a kol., Plasma-Assisted Surface Treatment. Nitriding, nitrocarburizing and oxidation of steel, cast iron and sintered materials. Germany: Metaplas Ionone Oberflächenveredelungstechnik GmbH, 2006. 71 s. ISBN-10: 3-937889-39-6.
7. F. Czerwiński, Heat Treatment - Conventional and Novel Applications. Ontario: Intech open Science, 2012. ISBN 978-953-51-0768-2.
8. A. Holemář, V. Hrubý, Iontová nitridace v praxi. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. Redakce strojírenské a metalurgické literatury. ISBN 80-03-00001-7.



## Teoretická analýza jednotlivých druhov AHSS ocelí využívaných v automobilovom priemysle

Juraj Smatana<sup>a\*</sup>, Denisa Medvecká<sup>a</sup>, František Nový<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra materiálového inžinierstva, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovak Republic

\*email: smatana14@uniza.sk

**Abstrakt:** Práca sa zaoberá teoretickou analýzou vysokopevnostných ocelí pričom najväčší dôraz kladie na druhú generáciu týchto ocelí. V práci je zhrnutie doterajších znalostí o týchto oceliach, najmä ich využitie v automobilovom priemysle, charakteristika a výroba.

**Kľúčové slová:** vysokopevnostné ocele, ocele v automobilovom priemysle

### 1. ÚVOD

V automobilovom priemysle je trendom znižovanie hmotnosti a zvyšovanie komfortu a bezpečnosti automobilu. Vo svete sa stávajú trendom autá s elektrickým pohonom alebo autá s hybridným pohonom, ktoré vďaka akumulátorom naberajú na svojej váhe. Dôvodom prečo automobilky pristupujú k týmto alternatívnym pohonom je znižovanie emisií. Znižovanie emisií je hlavná téma v týchto časoch a preto sa táto práca zameriava na materiály, ktoré sú vo forme napr. tenkých plechov čím je možné znížiť hmotnosť vozidla a zároveň zvýšiť bezpečnosti. Z tohto dôvodu je dôležité zamerať sa na vlastnosti a kvalitu jednotlivých druhov materiálov, ktoré možno použiť na výrobu plechov pre elektro automobily.

### 2. ROZDELENIE AHS OCELÍ

AHS ocele možno rozdeliť do troch základných skupín:

- **Prvá generácia** zahŕňa štyri triedy ocelí: dvojfázové (angl. DP - Dual Phase), komplexne legované (CP - angl. Complex Phase), ocele TRIP (angl. Transformation-Induced Plasticity) a ocele martenzitické (MS). V tab. 1 sú popísané vybrané charakteristiky ocelí prvej generácie AHS [1].

Tab. 1 Vybrané charakteristiky pre triedy ocelí prvej generácie AHS [1]

Tab. 1 Selected characteristics for first generation AHS steel grades [1]

| Prvá generácia AHSS | Mikroštruktúra                           | Rozsah pevnosti v ťahu [MPa] |
|---------------------|--|------------------------------|
| DP                  | Ferit + martenzit                        | 400-1000                     |
| CP                  | (Ferit + bainit) matrica + malé množstvo | 400-1000                     |
| TRIP                | perlitu, martenzit a zvyškový austenit   | 500-1000                     |
| MS                  | Ferit + martenzit/bainit + austenit      | 700-1600                     |

- **Druhá generácia** AHS ocelí (tab. 2) obsahuje neskoršie vyvinuté triedy ocelí ako ocele TWIP (angl. Twinning-Induced Plasticity).

Tab. 2 Vybrané charakteristiky pre triedy ocelí druhej generácie AHS [1]

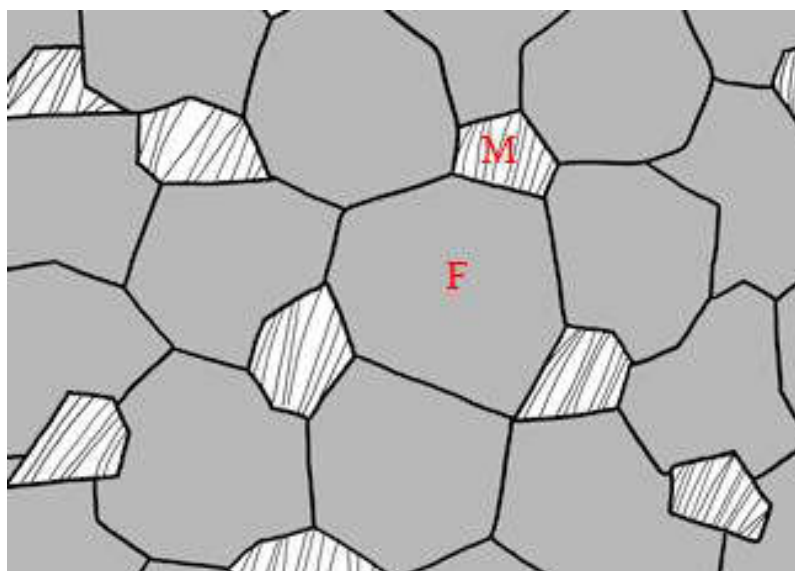
Tab. 2 Selected characteristics for second generation AHS steel grades [1]

| Druhá generácia AHSS | Mikroštruktúra                | Rozsah pevnosti v ťahu [MPa] |
|----------------------|-------------------------------|------------------------------|
| TWIP                 | Jednofázový zvyškový austenit | 1100-1650                    |

- **Tretia generácia** AHS ocelí je najnovšia skupina progresívnych ocelí a je stále vo výskume a rozvoji. Avšak predpokladá sa, že vyplní miesto medzi už vyskúmanou prvou a druhou generáciou [1].

## 2.1 Dvojfázové ocele

Príklad mikroštruktúry dvojfázovej ocele (DP 600) je dokumentovaný na obr. 1.



Obr. 1 Schéma mikroštruktúry DP ocele. F - ferit, M - martenzit [2]

Fig. 1 Scheme of microstructure of DP steel. F - ferrite, M - martensite [2]

Skupina ocelí s duplexnou mikroštruktúrou pozostávajúcou z mäkkej feritickej matrice obsahuje 10 až 40 % tvrdých martenzitických ostrovčekov a zvyškový austenit. Tento typ štruktúry umožňuje dosahovať maximálnu pevnosť v ťahu 500 až 1200 MPa.

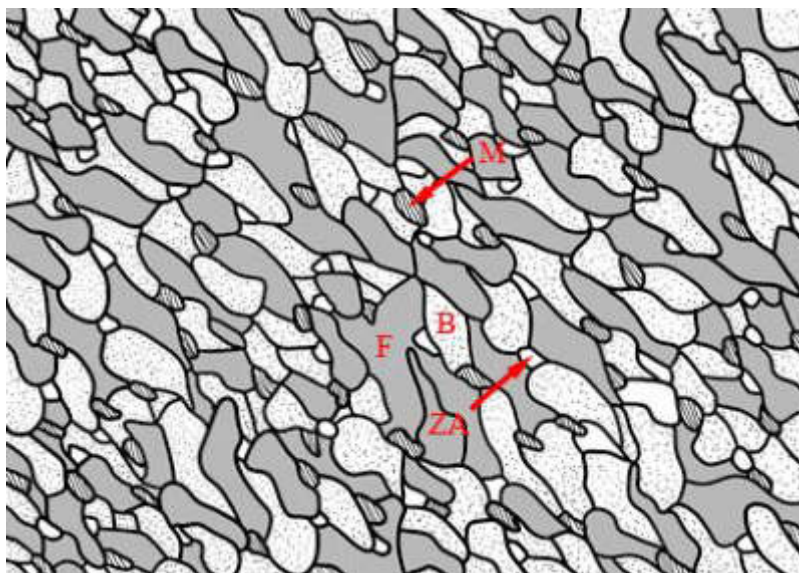
Všetky dvojfázové ocele majú obsah uhlíka menej ako 0,15 hm.%. Takýto nízky obsah uhlíka zaručuje dobrú zvarateľnosť materiálu. Po tepelnom spracovaní sa v matrici nachádza ferit, v ktorom sú rozložené malé martenzitické ostrovčeky.

Dvojfázovú štruktúru dosiahneme interkritickým žiňaním z teplôt  $Ac_1$  a  $Ac_3$  alebo riadeným valcovaním (termomechanické riadené spracovanie). V prvom prípade sa vďaka austenitizácii vytvoria zrná austenitu vo feritickej matrici, ktorý sa pri ochladzovaní transformuje na martenzit. V automobilovom priemysle sa tieto ocele používajú na rôzne spojovacie prvky, kolesá, držiaky vzpier a na častiach, ktoré majú byť odľahčené [1-4].

## 2.2 Komplexne legované ocele

K týmto druhom ocelí patria nízkouhlíkové ocele, ktoré obsahujú feriticko - bainitickú matricu s menším podielom perlitu, martenzitu a zvyškového austenitu (obr. 2). Dosahujú vysokú pevnosť, tvrdosť a majú vysoký koeficient deformačného spevnenia. Medza klzu týchto ocelí je od 600 až do 920 MPa. Medza pevnosti býva od 780 až do 1130 MPa.

Komplexne legované ocele majú výrazne zjemnené zrná, ktoré sú výsledkom potlačenia rekryštalizácie alebo sú dôsledkom precipitácie mikrolegujúcich prvkov Ti a Nb. Niób zvyšuje aj pevnosť za tepla a titán zvyšuje odolnosť voči interkryštalovej korózii. Následne sú tieto precipitáty rovnomerne rozložené po celej štruktúre. CP ocele majú vysokú schopnosť absorbovať mechanickú energiu. Majú veľmi dobrú schopnosť absorpcie nárazovej energie, preto ich využitie na automobile je práve B-stĺpik, ktorý pri bočnej zrážke dostáva najväčšiu časť nárazovej energie, ktorú tento materiál dokáže skvelo pohltiť. Tak isto sa CP oceľ využíva aj pre výstuže dverí a nárazníkov [2,5].



Obr. 2 Schéma mikroštruktúry komplexne legovanej ocele. F - ferit, M - martenzit, B - bainit, ZA - zvyškový austenit [2]

Fig. 2 Scheme of microstructure of complex phase steel. F - ferrite, M - martensite, B - bainite, ZA - residual austenite [2]

### 2.3 TRIP ocele

TRIP ocele majú vysokú ťažnosť, ktorá je dôsledkom deformačne indukovanej martenzitickej transformácie (transformation induced plasticity - transformácia na martenzit pri deformácii). Pri vonkajšom napätí preberajú oblasti austenitu zaťaženie a transformujú sa na martenzit, ktorý je súčasne ďalej deformovaný. Doštičky martenzitu, ktoré vznikajú v sklzových pásoch, sú veľmi účinnou prekážkou pre pohyb dislokácií. Pokiaľ v priebehu zaťažovania vznikne trhlinka, indikuje sa v deformovanej zóne na jej čele martenzitická transformácia a doštičky martenzitu bránia ďalšiemu šíreniu trhliny.

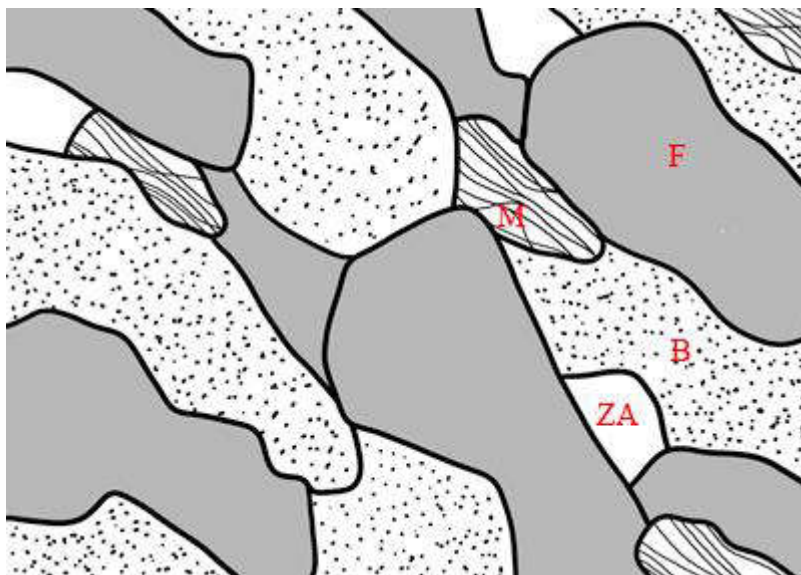
Ocele TRIP sú zatiaľ skupinou ocelí s vysokou pevnosťou, ktorá je najmenej zvládnutá v teórii a praxi. Z aplikácií je možné uviesť poľahy v leteckom a raketovom priemysle, chirurgické ihly, špeciálne laná a pod.

Mikroštruktúra TRIP ocelí sa skladá z feritu, bainitu a martenzitu, ale aj zvyškového austenitu ktorý sa nachádza v matrici feritu a to v množstve minimálne 5 hm. % (obr. 3, tab. 3). Od TRIP ocelí sa očakáva izotermická výdrž na strednej teplote, ktorá zapríčini tvorbu bainitu [2].

Tab. 1 Využitie TRIP ocelí v automobilovom priemysle [2]

Tab. 3 Use of TRIP steels in the automotive industry [2]

| Druh ocele   | Spôsob využitia   |
|--------------|---|
| TRIP 350/600 | Rámy lišt, výstuže lišt   |
| TRIP 400/700 | Bočné lišty, Crash box  |
| TRIP 450/800 | Palubná doska, stropové lišty   |
| TRIP 600/980 | B-stĺp, stropové lišty, kolíska motora, predné a zadné lišty, rám sedadla |

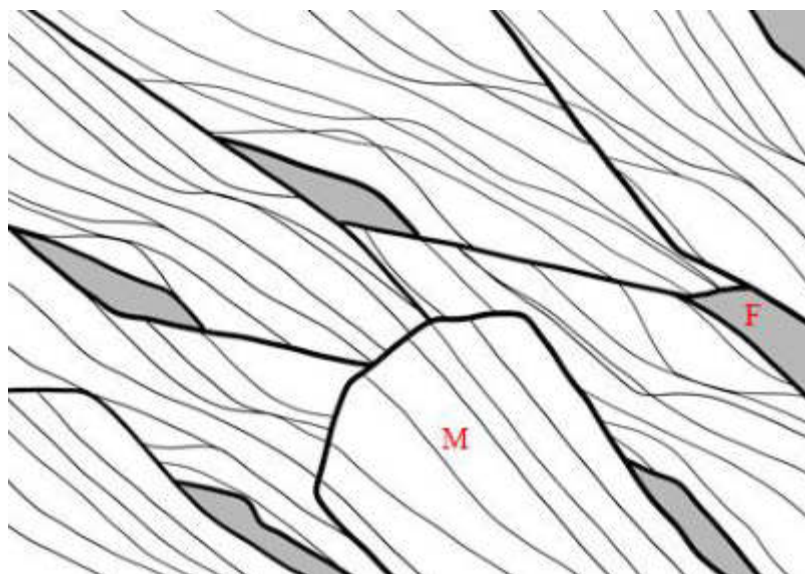


Obr. 3 Schéma mikroštruktúry TRIP ocele. F - ferit, M - martenzit, B - bainit, ZA - zvyškový austenit [2]

Fig. 3 Diagram of TRIP steel microstructure. F - ferrite, M - martensite, B - bainite, ZA - residual austenite [2]

## 2.4 Martenzitické ocele

U týchto ocelí sa austenit, ktorý je v mikroštruktúre prítomný počas valcovania za tepla alebo žihania, vďaka procesu žihania, transformuje na martenzit a to hlavne kritickými rýchlosťami ochladzovania (obr. 4). Mikroštruktúra tejto ocele môže okrem martenzitu obsahovať aj malé množstvo feritu, bainitu a zvyškového austenitu. Tieto ocele dosahujú pevnosť v ťahu až 1700 MPa [2].



Obr. 4 Schéma mikroštruktúry martenzitickej ocele. F - ferit, M - martenzit [2]

Fig. 4 Diagram of martensitic steel microstructure. F - ferrite, M - martensite [2]

Tab. 2 Využitie martenzitických ocelí v automobilovom priemysle [2]

Tab. 4 Use of martensitic steels in the automotive industry [2]

| Druh ocele   | Spôsob využitia   |
|--------------|---|
| MS 950/1200  | Nosníky nárazníka, bočné výstuže dverí, výstuže nárazníka |
| MS 1150/1400 | Bočné prahy, bočné výstuže dverí, výstuže nárazníka       |
| MS 1250/1500 | Bočné výstuže dverí, nosníky nárazníka, výstuže nárazníka |

## 3. VYUŽITIE AHS OCELÍ

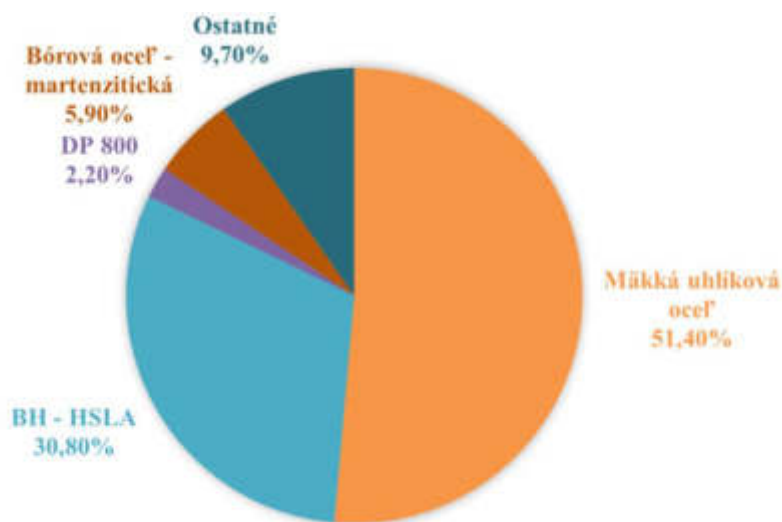
AHS ocele sa uplatňujú najmä tam, kde je požadovaná vysoká pevnosť, ale zároveň nízka hmotnosť materiálu. Okrem automobilového priemyslu, ktorý je pre AHS ocele najdominantnejším, iné priemysle tiež našli potenciál vo využití týchto ocelí, napr. pri stavbe lodí, v leteectve, v spotrebičoch, a v civilných alebo vojenských konštrukciách.

AHS ocele sa v automobilovom priemysle využívajú hlavne z týchto dôvodov [1-2]:

- zlepšenie výsledkov v nárazovej skúške (čelná zrážka, zrážka z boku a zrážka zo zadnej strany), prostredníctvom zvýšenia pevnosti materiálu;
- zníženie celkovej váhy vozidla;
- úspora paliva vďaka zníženej hmotnosti;
- redukovanie emisií vďaka úspore paliva.

Ostatné dôležité kritéria využitia sú: odolnosť voči korózií, tvárnosť, zvarateľnosť a dostupnosť. Do roku 2020 sa predpokladalo zníženie priemernej hmotnosti európskeho automobilu na hmotnosť 870 kg; v roku 2017 bol priemer 1100 kg. Už v roku 2013 boli AHS ocele vo vysokej miere využívané v automobilovom priemysle a to napr.:

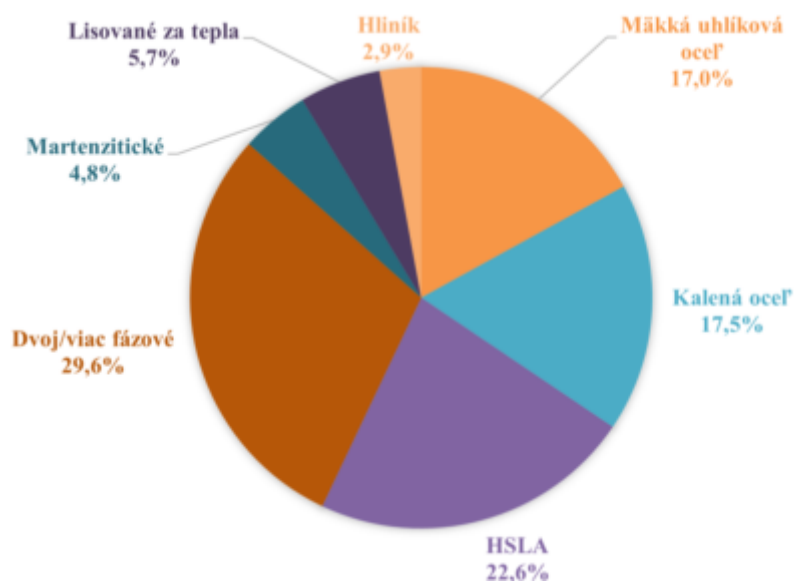
- **Ford Fusion** (Obr. 5) - obsahuje 36,2 % progresívnych vysokopevných ocelí a 33,3 % nízkolegovaných vysokopevných ocelí [1].



Obr. 5 Materiálové zloženie automobilu Ford Fusion [6]

Fig. 5 Ford Fusion car material [6]

- **GM Cadillac ATS** (Obr. 6) - obsah AHS\_ocelí je 34,4 %



Obr. 6 Materiálové zloženie vozidla GM Cadillac ATS [1]

Fig. 6 Material composition of GM Cadillac ATS [1]

### 3. ZÁVER

Článok poskytuje prehľad jednotlivých AHS ocelí zameriavajúc sa na ich vlastnosti štruktúru a možnosti využitia. Každá z ocelí je využiteľná pre rôzne komponenty v automobilovom priemysle a v súčasnosti do značnej miery aj aplikovaná na ich výrobu ako je preukázané v článku.

Je však dôležité preskúmať vplyv jednotlivých technológií výroby automobilových komponentov na zmenu vlastností ako napr. vplyv rôznych druhov tvárnenia ale aj spôsobov zvarovania.

### PodĎakovanie

Príspevok vznikol v rámci riešenia spoločného slovensko-poľského študentského projektu TalentDetector 2022, projektu KEGA 016ŽU-4/2020 a grantového projektu UNIZA č. 12786/2021 „Analýza mikroštruktúrnych zmien v teplom ovplyvnenej oblasti zvarových spojov vysokopevnej ocele S960MC“.

### LITERATÚRA

1. Demeri, M. Y., 2013. Advanced High-Strength steels - Science, Technology, and Applications, ASM International ISBN 978-1-62708-005-7 [str. 60-62, 160-165].
2. Keeler, S., et al.: Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 6.0. [Online] Dostupné na: <worldautosteel.org>
3. Herditzky A., et al. Moderné koncipované ocele použité pri výrobe automobilovej karosérie. [Online] 2008. [cit. 2021-05-26] Dostupné na: <<https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/12-2008/pdf/106-109.pdf>>
4. Arcelormittal. Dual phase steels. [Online]. [Cit. 2021-05-26]. Dostupné na: <[https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/first\\_gen\\_AHSS/DP](https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/first_gen_AHSS/DP)>
5. Hudák J., et al. Hodnotenie materiálovej tváriteľnosti ocelí s vyššou pevnosťou pre automobilový priemysel. [Online] 2008. [cit. 2021-05-26] Dostupné na: <<https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/12-2008/pdf/136-139.pdf>>
6. Boronextrication. 2019. Chevrolet Silverado; Steel and Aluminium? [Online] 2018. [cit. 2021-25-5]. Dostupné na: <<http://www.boronextrication.com/2018/03/23/2019-chevrolet-silverado-steel-and-aluminum/>>

## Rodzaje systemów zarządzania wdrożonych w przedsiębiorstwach, a świadomość studentów uczelni technicznej na ich temat

K. Świeca<sup>a</sup>, M. Stec<sup>a</sup>, A. Kiljan<sup>b\*</sup>, E. Jonda<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Student Wydziału Mechanicznego Technologicznego, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Politechnika Śląska, ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice;

<sup>b</sup> Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Politechnika Śląska, ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice;

\*e-mail: [anna.kiljan@polsl.pl](mailto:anna.kiljan@polsl.pl)

**Abstract:** W pracy dokonano ogólnej charakterystyki wybranych norm ISO dotyczących certyfikowanych systemów zarządzania przedsiębiorstwami, m.in.: ISO 9001:2015, ISO 45001:2018, ISO 14001:2018, ISO 27001:2018 oraz ISO 22301:2019 oraz przedstawiono wyniki badania przeprowadzonego w grupie Studentów kierunków technicznych uczelni wyższych, które miało na celu sprawdzenie ich poziomu wiedzy na temat omawianych norm.

**Keywords:** Systemy zarządzania, ISO, normy ISO

### 1. WSTĘP

Konkurencyjność stanowi absolutny fundament funkcjonowania nowoczesnego rynku. Leży ona u podstaw postępu technologicznego oraz stałego rozwoju gospodarki i wynika z faktu jednoczesnej aktywności na rynku wielu różnych przedsiębiorców, starających się spełniać potrzeby klientów o tych samych lub bardzo podobnych wymaganiach. W dobie postępującej globalizacji, stale ułatwiającej dostęp do praktycznie nieograniczonej ilości informacji, firmy stają przed koniecznością ciągłego podnoszenia poziomu świadczonych przez siebie usług. Jednym ze sposobów umacniania swojej pozycji rynkowej, znajdującym zastosowanie w praktycznie każdej branży rynku, jest wdrażanie przez nie systemów zarządzania zgodnych z międzynarodowymi normami ISO. Uniwersalność budowy owych norm (omawiana w kolejnych rozdziałach publikacji), a co za tym idzie – ich kompatybilność z różnymi modelami biznesowymi organizacji, umożliwia porównywanie między sobą działalności i wyników przedsiębiorstw o pozornie różnym charakterze.



## 2. PODEJŚCIE PROCESOWE W SYSTEMACH ZARZĄDZANIA

Cykl Deminga (zwany także cyklem PDCA z ang. Plan-Do-Check-Act lub po prostu kołem Deminga) jest jednym z głównych narzędzi stosowanych w systemach zarządzania. Schemat ten, ilustrujący proces ciągłej poprawy jakości i wydajności procesów poprzez regularnie podejmowane, małe zmiany, składa się z czterech zasadniczych kroków. Pierwszy z nich (Plan, planuj) jest związany z badaniem stanu rzeczywistego efektywności danego procesu oraz sformułowaniem planu jego udoskonalenia. Na jego podstawie realizuje się następnie działania zapobiegawcze, stanowiące drugi krok procesu (Do, działaj), mające na celu wyeliminowanie lub odpowiednie zredukowanie stwierdzonych uprzednio nieprawidłowości. Celem trzeciego kroku (Check, sprawdzaj) cyklu jest porównanie wyników działań zapobiegawczych z przyjętym planem i uruchomienie ewentualnych czynności w przypadku stwierdzenia rozbieżności pomiędzy nimi. Czwartym, ostatnim krokiem (Act, wykonaj) jest stałe wprowadzenie zmian do procesu wyjściowego w przypadku przyniesienia przez nich lepszych rezultatów [1,2]. Podejście procesowe cyklu PDCA jest ściśle związane z konstrukcją omawianych w tym artykule norm ISO - można bowiem schematycznie przypisać kolejnym krokom cyklu poszczególne, odpowiadające im treścią rozdziały norm, omówione dokładniej w kolejnych części niniejszej publikacji.



Rysunek 1 Cykl PDCA (koło Deminga) [2]

Figure 1 The PDCA cycle [2]

## 3. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA I KONSTRUKCJA SYSTEMÓW ZARZĄDZANIA ZGODNYCH Z NORMAMI ISO

System zarządzania zdefiniować można jako zbiór wzajemnie powiązanych ze sobą elementów organizacji służących do ustanowienia polityk i celów oraz procesów umożliwiających ich osiągnięcie [3]. Certyfikowane Systemy Zarządzania zgodne z normami

ISO (a konkretniej ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, ISO 45001:2018, ISO 27301:2019 oraz ISO 22301:2019) omawiane w tym artykule charakteryzuje wspólny schemat budowy - składają się one z dziesięciu rozdziałów, różniąc się między sobą jedynie treścią konkretnych działań operacyjnych. Ta ujednolicona struktura, nosząca nazwę High-Level Structure (HLS), w znaczącym stopniu ułatwia przedsiębiorstwom zrozumienie oraz poprawną interpretację stawianych przez nie wymagań, jednocześnie umożliwiając ich wzajemną integrację (przy wdrażaniu więcej niż jednej) oraz pozwalając na sprawniejszy proces przeprowadzania audytów. Treść norm ISO ma charakter ogólny, dzięki czemu wdrażanie opartych na nich systemów zarządzania jest możliwe w przedsiębiorstwach w praktycznie każdej branży, bez względu na ich rozmiar, charakter świadczonych usług, czy też pozycję względem konkurencji. Istotną częścią procesu wdrażania Systemów Zarządzania zgodnych z normami ISO jest zapewnienie ich kompatybilności z obecnymi już w firmie wewnętrznymi systemami - dopasowanie systemów do modelu biznesowego firmy jest warunkiem koniecznym do prawidłowego ich funkcjonowania, a sama budowa systemu opartego na normach ISO w przedsiębiorstwie powinna mieć charakter zmiany ewolucyjnej [4].

Zgodnie z załącznikiem SL, stanowiącym wzorzec budowy norm ISO dotyczących systemów zarządzania, składają się one z dziesięciu rozdziałów, przedmowy oraz wprowadzenia. Rozdziały 0 - 3 stanowią wstęp do treści poszczególnych norm, określając ich cel i zakres, a także wskazując na ich wzajemną kompatybilność. Rozdział 4 - "Kontekst Organizacji" - dotyczy wewnętrznych oraz zewnętrznych czynników związanych z działalnością organizacji, mogących wpłynąć na jej zdolność do osiągnięcia określonych celów, które firma powinna zdefiniować. Wspomina on o potrzebach i oczekiwaniach stron zainteresowanych organizacją, zakresie danego systemu zarządzania, a także procesach go dotyczących. Rozdział 5 - „Przywództwo” poświęcony jest konieczności zaangażowania najwyższego kierownictwa organizacji w proces opracowania, wdrożenia oraz ciągłego rozwoju systemu zarządzania, wprowadzenia polityki dotyczącej systemu, a także przydzielanie uprawnień osobom odpowiedzialnym za prawidłowe funkcjonowanie danego systemu. Rozdział 6 - "Planowanie" - opisuje aktywności związane z określonymi przez organizację ryzykiem oraz szansami wynikającymi z działania danego systemu, a także sposób określania celów funkcjonowania poszczególnych systemów wraz ze sposobem planowania ich osiągnięcia. Rozdział 7 - "Wsparcie" - opisuje kwestie zasobów, kompetencji, świadomości, komunikacji oraz udokumentowanych informacji niezbędnych do prawidłowej pracy każdego z poszczególnych systemów zarządzania. Rozdział 8 - "Działania operacyjne" (jeden z rozdziałów, którego forma i treść różnią się w zasadniczy sposób pomiędzy poszczególnymi normami) - dotyczy procesów planowania oraz nadzoru nad szeregiem działań operacyjnych, których prowadzenie oraz kontrolowanie stanowią niezbędny element danego systemu zarządzania. Rozdział 9 - "Ocena efektów działania" poświęcony jest zagadnieniu monitoringu, pomiarów, analizy i oceny danego systemu zarządzania, a także wymagań dotyczących jego audytowania oraz regularnego przeglądu. W rozdziale 10 - "Doskonalenie" - wspomniana jest konieczność dążenia przedsiębiorstwa do ciągłego doskonalenia działań i procesów związanych z poszczególnymi systemami zarządzania oraz instrukcje postępowania w przypadku stwierdzenia wystąpienia niezgodności.

Poszczególne rozdziały lub grupy rozdziałów norm można przyporządkować kolejnym krokom cyklu Deminga, uzyskując w ten sposób jasny obraz wspomnianego już podejścia procesowego. Rozdziały 4,5 oraz 6 opisują działania odpowiadające krokowi pierwszemu (P - planuj), stanowiąc swego rodzaju podłoże informacyjne niezbędne do rozpoczęcia cyklu. Rozdział 7 oraz 8, zawierają instrukcje operacyjne oraz zasoby niezbędne do prawidłowego działania systemów zarządzania i odpowiadają drugiemu krokowi procesu (Do - działaj).

Rozdział 9, poświęcony weryfikacji poprawności funkcjonowania systemów, wpisuje się w zakres kroku trzeciego (Check - sprawdź), natomiast Rozdział 10, dotyczący działań korygujących oraz stałego doskonalenia systemów, odpowiada krokowi czwartemu cyklu (Act - wykonaj).

Normy ISO dotyczące systemów zarządzania stanowią kompleksowe źródło informacji, wytycznych oraz wymagań niezbędnych do opracowania, wdrożenia oraz stałego rozwoju danego systemu w przedsiębiorstwie. Kolejne rozdziały artykułu przedstawiają w sposób ogólny istotę oraz treść norm dotyczących pięciu wybranych systemów zarządzania wdrażanych w przedsiębiorstwach.

### **1. Systemy Zarządzania Jakością zgodne z normą ISO 9001**

Jakość zdefiniować można jako stopień, w jakim zestaw cech obiektu spełnia postawiony mu, określony zestaw wymagań [5]. Jest ona jedną z podstawowych charakterystyk praktycznie dowolnego obecnego na rynku dobra, niejednokrotnie stanowi również najważniejszą cechę produktu lub usługi branżą pod uwagę przez klienta przy okazji podejmowania decyzji o zakupie. Jakość jest nierozłącznie związana ze wszystkimi aspektami zarządzania i funkcjonowania przedsiębiorstwa, co w pewnym stopniu wymusza konieczność odpowiedniego nią zarządzania w organizacjach dążących do stałego podnoszenia swojej konkurencyjności poprzez np. wdrażanie kompleksowych systemów zarządzania jakością [4].

Norma ISO 9001:2015 jest dokumentem zawierającym wymagania dotyczące systemu zarządzania jakością w organizacji. Skupia się ona wokół dostawy właściwego produktu zgodnego z określoną przez klienta specyfikacją, a samą jakość postrzega jako zgodność z określonymi wymaganiami. Przepisy normy uwzględniają potrzeby klienta zdefiniowane w umowie, pomijając jednak (w odróżnieniu do chociażby filozofii TQM) wzajemne powiązania pomiędzy klientem a firmą [6]). Treść normy dostarcza obszernej wiedzy na temat sposobu opracowania, wdrożenia oraz doskonalenia systemu zarządzania jakością, którego funkcjonowanie oparte jest na 7 fundamentalnych zasadach. (1) Orientacja na klienta stanowi pierwszą (wręcz wynikającą z definicji jakości) zasadę - zakłada ona, że celem działalności każdej organizacji jest spełnianie potrzeb aktualnych i przyszłych klientów. (2) Przywództwo - wskazuje na istotną rolę wyższego kierownictwa w firmie, które to poprzez stawianie celów i kierunków oraz stwarzanie odpowiednich warunków pracy powinno zapewniać odpowiednie zaangażowanie pracowników w działalność przedsiębiorstwa. (3) Zaangażowanie ludzi podkreśla dodatnią zależność pomiędzy wysokim zaangażowaniem pracowników wszystkich szczebli firmy (wspieranym poprzez np. regularne szkolenia, czy też otwartość na innowacyjność) na możliwość efektywnego zarządzania organizacją. (4) Podejście procesowe odnosi się do omówionego wcześniej cyklu Deminga i bazującej na nim schematycznej budowy norm. (5) Doskonalenie - zwraca uwagę na konieczność ciągłego ulepszania warunków wewnętrznych i zewnętrznych organizacji i oparte jest na stojących przed firmą szansach i możliwościach rozwoju. (6) Podejmowanie decyzji na podstawie dowodów jest zasadą podkreślającą konieczność zachowania obiektywności i realistyczności procesów decyzyjnych. Ostatnia z zasad, (7) Zarządzanie relacjami wskazuje na konieczność nawiązywania i kultywowania dobrych relacji ze stronami zainteresowanymi w procesie budowania i utrzymywania prawidłowo funkcjonującego systemu zarządzania jakością [1].

## 2. Systemy Zarządzania Środowiskowego zgodne z ISO 14001:2018

Idea zminimalizowania negatywnego wpływu aktywności ludzkiej na środowisko naturalne, jak i same działania z nią związane stają się w ostatnim czasie coraz istotniejszym elementem życia codziennego. Świadomość konieczności ochrony naszej planety jest coraz większa wśród obecnych na rynku konsumentów, co niezwykle łatwo jest dostrzec w podejmowanych przez wiele firm działaniach marketingowych, wyraźnie wyróżniających w swoich produktach cechy związane z ich ekologicznym pochodzeniem, zrównoważoną metodą wytwarzania, niskim śladem węglowym itp. Możliwie niski poziom negatywnego oddziaływania przedsiębiorstwa na środowisko naturalne stał się wobec tego jedną z wyraźnych zalet firm, mogących udowodnić podejmowane w tym celu działania poprzez wdrażanie i utrzymywanie Systemów Zarządzania Środowiskiem.

System Zarządzania Środowiskowego jest definiowany przez normę ISO 14001 jako część systemu zarządzania obejmująca strukturę organizacyjną, planowanie, odpowiedzialność oraz zasady postępowania, zawierająca wszelkie procedury, procesy oraz środki niezbędne do opracowania, wdrożenia, utrzymywania oraz rozwoju polityki środowiskowej w organizacji. Aspekty środowiskowe działalności organizacji dotyczą sposobu i stopnia, w jakim wytwarzane przez firmę produkty lub świadczone usługi mogą negatywnie wpłynąć na otaczające ją środowisko naturalne. Uwzględnia się w nich czynniki takie jak m.in.: wytwarzane przez firmę emisje (np. dwutlenku węgla), sposób utylizowania odpadów, stopień zanieczyszczenia gruntu i wód gruntowych, odprowadzanie ścieków, czy też zużycie zasobów i surowców naturalnych. [7]. Uzyskanie certyfikacji zgodności ISO 14001 wiąże się z przyjęciem oraz udokumentowaniem wynikających z polityki firmy zadań i celów środowiskowych, odnoszących się do związanych z jej działalnością aspektów środowiskowych (opisanych powyżej).

## 3. Systemy Zarządzania Bezpieczeństwem i Higieną Pracy zgodne z ISO 45001:2018

Do 2018 roku w Polsce obowiązywała norma PN-N-18001:2004, natomiast wraz z procesem unifikacji i standaryzacji systemów zarządzania polskie przedsiębiorstwa wprowadziły, jako system zarządzania normę ISO 45001:2018. Wspólną cechą polskiej, jak i międzynarodowej normy ISO jest ciągłe doskonalenie się w zakresie wymagań dotyczących bezpieczeństwa, wykorzystując cykl Deminga. Najważniejsze korzyści wynikają z kompatybilności pomiędzy systemami zarządzania np. ISO 9001, ISO 14001. Skuteczne wdrożenie systemu zarządzania BHP jest nierozzerwalne z definicją zagrożenia, ryzyka i szans, które zostały opisane w normie 45001:2018 w następujący sposób [8]:

- Zagrożenie - źródło mogące spowodować uraz i dolegliwości zdrowotne,
- Ryzyko - wpływ niepewności,
- Szansa - okoliczność lub zespół okoliczności, które mogą doprowadzić do poprawy efektów działania w zakresie BHP.

Istotą normy ISO 45001 jest opisanie szeregu zasad i czynności, które mają za zadanie poprawić poziom bezpieczeństwa w przedsiębiorstwie. W każdym z rozdziałów normy, której konstrukcja została opisana w rozdziale pt. „Ogólna charakterystyka i konstrukcja certyfikowanych systemów zarządzania zgodnych z normami ISO”, znajduje się dokładny opis w jaki sposób norma na temat Bezpieczeństwa i Higieny Pracy powinna zostać wdrożona w strukturę przedsiębiorstwa. Fundamentem rozdziału poświęconemu kontekstowi organizacji jest zrozumienie potrzeb pracowników, a także określenie zakresu, jaki powinien obejmować system zarządzania BHP z uwzględnieniem czynników zewnętrznych i wewnętrznych

organizacji. Konkluzją niniejszego rozdziału są zasady, jakie akceptuje organizacja wraz z wdrażaniem systemów zarządzania, sprawdzaniem oraz ciągłym doskonaleniem systemów zarządzania BHP. Treść rozdziału dotyczącego przywództwa wyjaśnia, że kierownictwo powinno dbać o respektowanie zasad BHP, brać pełną odpowiedzialność za wdrożony system zarządzania i prowadzić do osiągania zaplanowanych celów. Kierownictwo zobligowane jest do organizowania szkolenia oraz zapewnić niezbędne zasoby wymagane do wdrożenia i utrzymania systemu zarządzania BHP. Niezbędnym elementem ciągłego doskonalenia implementowanego systemu jest komunikacja na wszystkich szczeblach organizacji. Planowanie systemu zarządzania Bezpieczeństwa i Higieny Pracy to analiza ryzyka i szans. Zadaniem przedsiębiorstwa jest identyfikacja zagrożeń, które mogą wynikać z czynnika ludzkiego, nieprzystosowanej infrastruktury, oraz procedur pracy. Podsumowaniem rozdziału planowania BHP są sposoby realizowania założonych celów, do których należą np. monitorowanie i aktualizowanie postawionych celów. Uzyskanie odpowiedzi na pytania (choćby poprzez zastosowanie metody 5Why, której celem jest znalezienie źródła problemu przez zadanie sobie pytania: dlaczego?) pozwala w doskonały sposób zaplanować osiągnięcia celów BHP [9]. Wsparciem określa się niezbędne zasoby, którymi dysponuje przedsiębiorstwo, które w bezpośredni sposób przyczynią się do ulepszenia systemu zarządzania BHP. Działania operacyjne w praktyczny sposób mają za zadanie kontrolować powyżej wymienione wytyczne. Według normy eliminacją zagrożenia jest minimalizacja ryzyka na stanowisku pracy lub zastępowanie procesu produkcyjnego innymi procesami. Skuteczne poruszanie się w cyklu Deminga wymaga od przedsiębiorstw oceny działania, czyli wyciągania wniosków. Analizie, najlepiej wielokryterialnej należy poddać cały proces, przeanalizować kryteria oraz ocenić ryzyka i szanse. Ostatnią wytyczną jest ciągle doskonalenie, której najważniejszym zadaniem jest wdrażanie ustalonych elementów, będących rezultatem zastosowanego cyklu Deminga w celu osiągnięcia zamierzonych wyników [8].

#### **4. Systemy Zarządzania Bezpieczeństwem Informacji zgodne z normą ISO 27001**

W obecnych czasach zdecydowana większość generowanych danych jest poddawana procesowi cyfryzacji. Naturalnym krokiem jest zatem chęć ich jak najefektywniejszej ochrony. W odpowiedzi na zapotrzebowanie przedsiębiorstw, międzynarodowa norma ISO 27001 opisuje procesy ustanawiania, wdrażania, utrzymywania oraz doskonalenia technik bezpieczeństwa w organizacji. Jej budowa oraz ogólna treść jest analogiczna do pozostałych norm, czego rezultatem jest doskonała kompatybilność z pozostałymi systemami zarządzania. Norma ISO 27001 może być zastosowana w praktycznie każdej organizacji niezależnie od charakteru jej działalności. Podmiotem podlegającym systemowi zarządzania bezpieczeństwem informacji są wszystkie zasoby organizacji, które należy zidentyfikować oraz określić, w jakim stopniu powinno się je zabezpieczyć. Bezpieczeństwo informacji nie jest tylko bezpieczeństwem danych procesowych, czy ochroną systemów informatycznych, odnosi się również do zabezpieczenia danych osobowych pracowników oraz informacji handlowych. Systemy zarządzania bezpieczeństwem oparte na międzynarodowych standardach z pewnością pozytywnie wpływają na świadomość bezpieczeństwa pracowników, pomagają w zarządzaniu ryzykiem, a także pozwalają konsekwentnie realizować cele organizacji. Korzyści wynikające z bezpieczeństwa informacji można podzielić na biznesowe i wewnętrzne. Do korzyści biznesowych należy ciągłość biznesu i minimalizacja strat, których źródłem mogą być np. przecieki danych technologicznych lub bazy danych klientów. Korzyściami wewnętrznymi

natomiast będzie unikanie kar za naruszanie bezpieczeństwa informacji oraz wzrost świadomości pracowników w zakresie ochrony informacji [1,10].

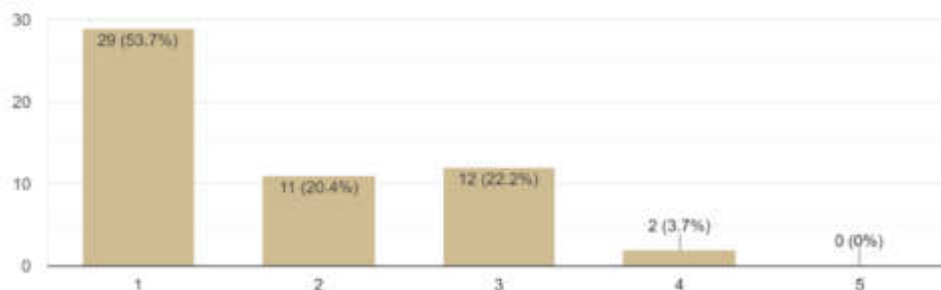
#### **5. Systemy Zarządzania Ciągłością Działania zgodne z ISO 22301:2019**

Pandemia COVID - 19 precyzyjnie uwypakowała nieprzystosowanie wielu organizacji do dynamicznych zmian zachodzących w związku z wystąpieniem światowego kryzysu. System zarządzania ciągłością działania ISO 22301 pozwala przedsiębiorstwom na stabilne funkcjonowanie podczas zdarzeń losowych lub awarii sprzętowych. Pierwowzorem normy ISO 22301 są brytyjskie standardy z serii BS 25999 [11], niemniej w międzynarodowym systemie większy nacisk został położony na rozszerzenie i zrozumienie idei BCM (Business Continuity Management), który wprowadza kluczowe zmiany w obrębie: kierownictwa, dokładniejszego planowania i przygotowywania zasobów niezbędnych do ciągłości systemu oraz skuteczniejszej komunikacji. Nie ma obowiązku wdrażania systemów zarządzania ciągłością działania, natomiast każda organizacja, która wykorzystując wielokrotnie omawiany cykl Deminga, może dążyć do minimalizacji wystąpienia ryzyka, poprzez implementacje normy. Niezaprzeczalną korzyść stanowić będą minimalizacja wystąpienia zakłóceń w organizacji lub odpowiednie procedury, które pozwolą skutecznie reagować podczas sytuacji kryzysowych [12].

#### **4. ŚWIADOMOŚĆ STUDENTÓW KIERUNKÓW TECHNICZNYCH UCZELNI WYŻSZYCH DOTYCZĄCA SYSTEMÓW ZARZĄDZANIA ZGODNYCH Z NORMAMI ISO**

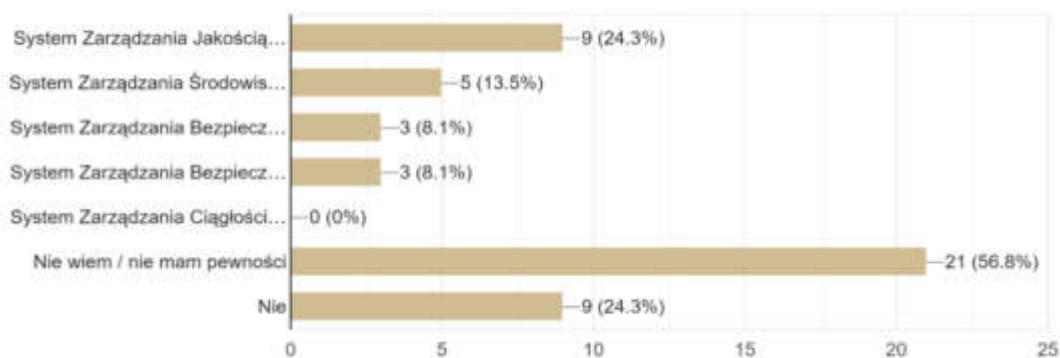
Jednym z celów niniejszej publikacji, poza przybliżeniem czytelnikowi struktury, ogólnej treści oraz istoty systemów zarządzania zgodnych z normami ISO, było zbadanie wiedzy oraz opinii studentów na ich temat. Badanie to zostało przeprowadzone na 85 studentach Politechniki Śląskiej w postaci anonimowej, internetowej ankiety zawierającej łącznie 12 pytań - 6 poświęconych danym osobowym studentów, służącym celom statystycznym (płeć, kierunek, semestr, stopień studiów oraz stan zatrudnienia) oraz 6 poświęconych znajomości i opinii na temat certyfikowanych systemów zarządzania zgodnych z normami ISO. Na rysunkach 1 – 6 przedstawione zostały otrzymane przez nią wyniki.

Jaka jest Pana/Pani wiedza na temat norm ISO dotyczących systemów zarządzania przedsiębiorstwami ?  
54 responses



Rysunek 2 Wykres słupkowy przedstawiający rozkład odpowiedzi n pytanie dotyczące poziomu znajomości norm ISO, gdzie 1- nie posiadam wiedzy na ich temat 2 - posiadam podstawową wiedzę na ich temat, 3 - posiadam dobrą wiedzę na ich temat, 4 - posiadam bardzo dobrą wiedzę na ich temat 5 - posiadam szeroką/ekspercką wiedzę na ich temat, Źródło: opracowanie własne  
Figure 2 The following chart shows the response distribution to a question related to the degree of knowledge of the ISO norms, where 1 - I possess no knowledge on that topic, 2 - I possess a basic knowledge on that topic, 3 - I possess a good knowledge on that topic, 4 - I possess a very good knowledge on that topic, 5 - I possess an extensive knowledge on that topic, Source: Author's own study

(Pytanie skierowane do osób pracujących) Czy w Pana/Pani firmie wdrożony został lub jest obecnie wdrażany jeden lub więcej System Zarządza...rosimy o podanie informacji, jaki jest to system:  
37 responses



Rysunek 3 Wykres słupkowy przedstawiający rozkład odpowiedzi na pytanie dotyczące systemów zarządzania przedsiębiorstwem obecnie wdrażanych lub już wdrożonych w przedsiębiorstwach, w których pracują osoby ankietowane, Źródło: opracowanie własne  
Figure 3 The following chart shows the response distribution to a question related to business management systems currently being implemented, or already implemented in companies, in which interviewees work, Source: Author's own study

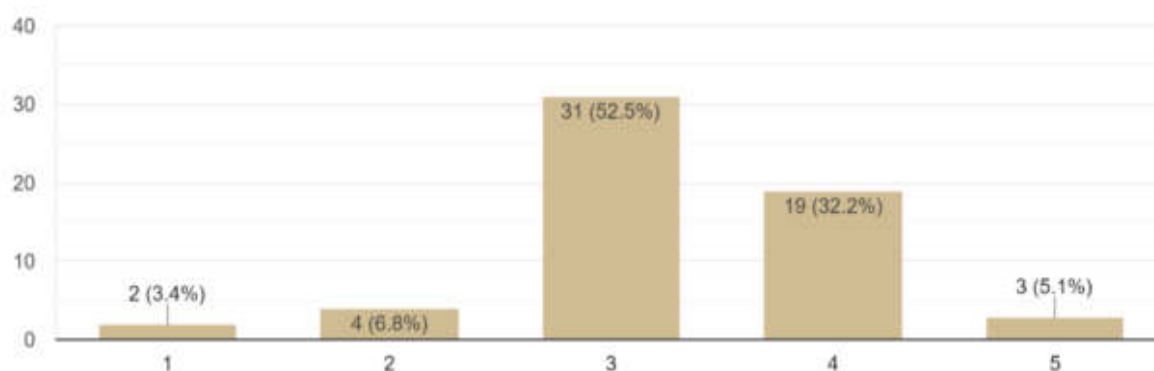
Pierwszym, sformułowanym na podstawie wyników ankiety wnioskiem jest niezaprzeczalnie niski poziom wiedzy studentów kierunków technicznych związanej z tematyką systemów

zarządzania zgodnych z normami ISO - ponad 50 % ankietowanych osób deklaruje całkowity brak wiedzy na ich temat, 20 % - podstawową, 22 % - dobrą oraz ok. 4% - bardzo dobrą wiedzę na ich temat. Ani jedna z ankietowanych osób nie zadeklarowała eksperckiego poziomu wiedzy na temat systemów zarządzania przedsiębiorstwami zgodnymi z normami ISO (rys. 2)

Kolejne pytanie skierowane było do osób obecnie pracujących i dotyczyło systemów wdrożonych lub obecnie wdrażanych u pracodawców osób ankietowanych. Zdecydowana większość, bo ponad 65 % osób ankietowanych nie wie lub nie ma pewności, czy w jej/jego firmie obecne są (lub są obecnie wdrażane) certyfikowane systemy zarządzania przedsiębiorstwami, natomiast ok. 25% twierdzi, iż firma ich zatrudniająca nie posiada oraz nie wdraża obecnie żadnego z tych systemów. Najpopularniejszym z systemów funkcjonujących w firmach osób ankietowanych jest System Zarządzania Jakością zgodny z normą ISO 9001 (24% odpowiedzi), drugim - System Zarządzania Środowiskiem ISO 14001 (13,5%), na trzecim natomiast (ex aequo) System Zarządzania Bezpieczeństwem i Higieną Pracy oraz System zarządzania Bezpieczeństwem Informacji (8% odpowiedzi). Żadna z ankietowanych osób nie zadeklarowała istnienia lub obecnego wdrażania w ich firmie Systemu Zarządzania Ciągłością Działania zgodnego z normą ISO 22301 (rys. 3).

Jak istotny wpływ wywiera wg Pana/Pani posiadanie chociaż jednej certyfikacji ISO dotyczącej systemów zarządzania przedsiębiorstwami na konkurencyjność firmy?

59 responses



Rysunek 4 Wykres słupkowy ilustrujący rozkład odpowiedzi ankietujących na pytanie o wpływ systemów zarządzania na konkurencyjność firmy, gdzie 1 - nie wywiera żadnego wpływu na konkurencyjność firmy, 2 - minimalnie podnosi konkurencyjność firmy, 3 - w lekkim stopniu podnosi konkurencyjność firmy, 4 - w zauważalnym stopniu podnosi konkurencyjność firmy, 5 - znacząco podnosi konkurencyjność firmy, Źródło: opracowanie własne

Figure 4 The following chart shows the response distribution to a question related to the influence of business management systems on company's competitiveness, where 1 - they don't have any influence on company's competitiveness, 2 - they minimally improve the company's competitiveness, 3 - they slightly improve the company's competitiveness, 4 - they conceivably improve the company's competitiveness and 5 - they considerably improve the company's competitiveness, Source: Author's own study

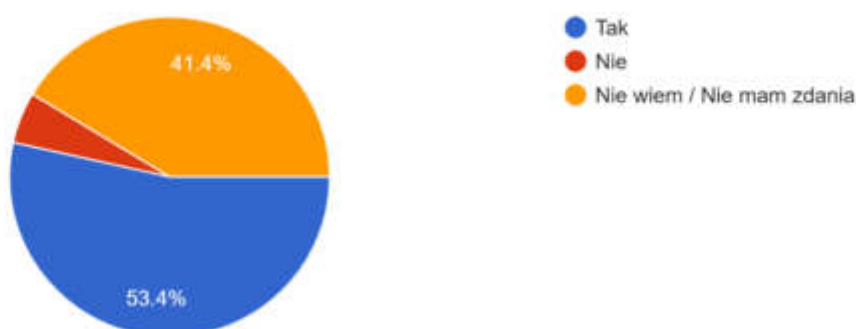
Trzy ostatnie pytania ankiety dotyczyły opinii ankietowanych osób na temat systemów zarządzania zgodnych z normami ISO. Ponad 50% ankietowanych uważa, że wdrożenie przynajmniej jednego systemu w lekkim stopniu podnosi konkurencyjność firmy na rynku,



ok 30% twierdzi, iż ich wdrożenie w zauważalnym stopniu podnosi jej konkurencyjność, natomiast jedynie 5% ankietowanych sądzi, iż wdrożenie chociaż jednego CSZ zgodnego z normami ISO w zauważalnym stopniu podnosi jej konkurencyjność rynkową. Około 10% ankietowanych osób jest zdania, iż ich wdrożenie nie wywiera żadnego lub wywiera jedynie minimalny wpływ na konkurencyjność przedsiębiorstwa (rys. 4). Z ankiety wynika także, iż połowa z ankietowanych studentów rozważałaby wdrożenie jednego lub więcej SZP zgodnego z ISO w swojej firmie - ok. 40% nie było pewnych, natomiast jedynie 5% ankietowanych nie rozważałoby wdrożenia takiego rozwiązania (rys. 5).

Czy jako przedsiębiorca rozważyłby/rozważyłaby Pan/Pani wdrożenie jednego lub więcej Systemu Zarządzania Przedsiębiorstwem zgodnego z normami ISO w swojej firmie?

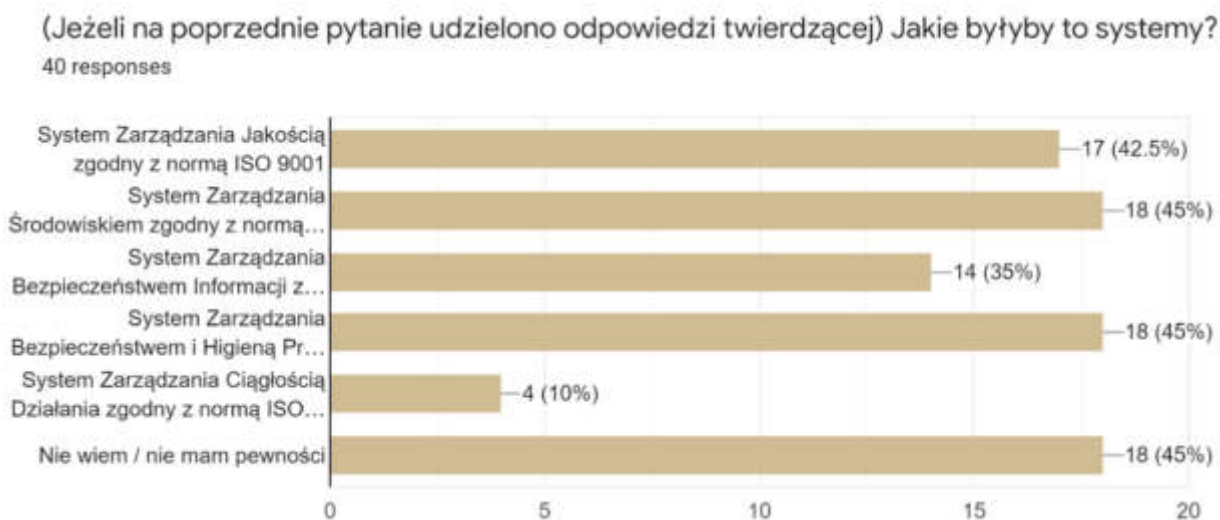
58 responses



Rysunek 5 Wykres kołowy przedstawiający rozkład odpowiedzi na pytanie o to, czy ankietowany rozważałby wdrożenie systemu lub systemów zarządzania przedsiębiorstwami w swojej firmie, Źródło: opracowanie własne

Figure 5 The following chart shows the response distribution to a question, whether the interviewee would consider the implementation of one or more business management systems in his/her company, Source: Author's own study

Wśród osób deklarujących chęć wdrożenia jednego lub więcej SZP około połowa nie była pewna, jaki byłby to system. 45% osób ankietowanych zadeklarowało chęć wdrożenia SZ Środowiskiem zgodnego z normą ISO 14001 oraz SZ BHP zgodnego z ISO 45001, ok. 43% - SZ Jakością zgodnego z ISO 9001, a 35% - SZ Bezpieczeństwem Informacji zgodnego z ISO 27001. Najmniej, bo jedynie 10% ankietowanych osób rozważałoby wdrożenie w swoim przedsiębiorstwie SZ Ciągłości Działania zgodnego z ISO 22301 (rys. 6).



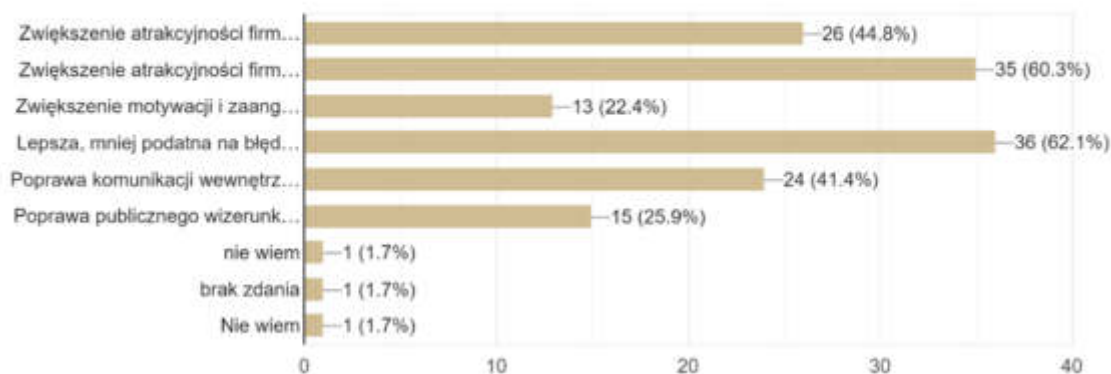
Rysunek 6 Wykres słupkowy przedstawiający rozkład odpowiedzi ankietowanych na pytanie o rodzaj systemu, którego wdrożenie rozważaliby oni w swoim przedsiębiorstwie, Źródło: opracowanie własne

Figure 6 The following chart shows the response distribution to the question about the type of business management system, the implementation of which the interviewee would consider, Source: Author's own study

Ostatnie pytanie dotyczyło największych wg. ankietowanych korzyści z wdrożenia jednego lub więcej systemu zarządzania w firmie. "Lepsza, mniej podatna na błędy organizacja działań firmy" była najczęściej wybieraną przez ankietowanych odpowiedzią (ok. 60%), zaraz po niej "Zwiększenie atrakcyjności firmy w oczach potencjalnych partnerów (tj. dostawców, podwykonawców, zleceniodawców itd.), również z ok. 60% wszystkich odpowiedzi (rys. 7). Zwiększenie atrakcyjności firmy w oczach potencjalnych klientów oraz poprawa komunikacji wewnętrznej w przedsiębiorstwie również stanowiły często wybieraną odpowiedź (ok 40% w przypadku obu odpowiedzi). Dwoma najrzadziej wybieranymi opcjami było zwiększenie motywacji i zaangażowania wszystkich pracowników firmy (ok 20% odpowiedzi) oraz poprawa publicznego wizerunku firmy (ok 25%). Jedynie 6% ankietowanych wyraziło niepewność co do tego pytania.

Jakie są wg Pana / Pani największe korzyści z wdrożenia w firmie jednego lub więcej systemów zarządzania zgodnych z normami ISO? (proszę wybrać maksymalnie 3 odpowiedzi)

58 responses



Rysunek 7 Wykres słupkowy przedstawiający rozkład odpowiedzi ankietowanych na pytanie o największe ich zdaniem korzyści z wdrożenia jednego lub więcej systemów zarządzania w przedsiębiorstwie, Źródło: opracowanie własne

Figure 7 The following chart shows the response distribution to the question concerning the biggest (in the interviewees' opinion) advantage stemming from the implementation of one or more business management systems in the company, Source: Author's own study

## 5. WNIOSKI

1. Prawidłowe wdrożenie oraz stały rozwój systemów zarządzania przedsiębiorstwami zgodnych z międzynarodowymi normami ISO oferuje firmom możliwość podniesienia poziomu swojej konkurencyjności rynkowej oraz zwiększenie sprawności operacyjnej dzięki lepszej koordynacji i zaangażowaniu pracowników na każdym szczeblu organizacyjnym.
2. Wyniki przeprowadzonej ankiety wyraźnie komunikują ogólny brak wiedzy dotyczącej systemów zarządzania zgodnych z normami ISO wśród studentów kierunków technicznych uczelni wyższych, co wskazuje na możliwość przeprowadzenia pewnych usprawnień w systemie szkolnictwa wyższego.
3. Warty uwagi jest również fakt całkowitego lub częściowego braku świadomości pracowników firm (szczególnie młodych, wciąż studiujących) o istnieniu wdrożonych lub o obecnym wdrażaniu w ich firmie systemów. Brak wiedzy na ich temat jest problemem szczególnie poważnym w firmach, gdzie rzeczywiście są one wdrożone – świadomość wszystkich pracowników firmy o ich obecności jest bowiem obowiązkowym elementem ich dobrego funkcjonowania.
4. Większość ankietowanych studentów uważa, że wdrożenie jednego lub więcej CSZ pozytywnie wpływa na konkurencyjność organizacji i deklaruje, iż sami byliby skłonni do ich stosowania w swoim przedsiębiorstwie - co ciekawe, proporcjonalny, ilościowy rozkład systemów najczęściej wybieranych przez studentów odpowiada rozkładowi SZP rzeczywiście wdrożonych w firmach w Polsce i na świecie [13].

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] Katarzyna Czop, Arkadiusz Gola, Eżbieta Małyszek, Kazimierz Szatkowski, Nowoczesne zarządzanie produkcją: ujęcie procesowe, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN
- [2] Jacek Kukiz, „Cykl PDCA”, KANBAN.PL, <https://kanban.pl/nl36/>, dostęp: 7 maja 2022
- [3] Stawowy Angelika, 2018, System Zarządzania a elastyczność organizacji – analiza literaturowa i konceptualizacja, Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej seria: Organizacja i zarządzanie, zeszyt 127. Ss. 243-248
- [4] Ligarski Mariusz J., 2007, System Zarządzania Jakością – szansa czy zagrożenie dla organizacji, Przegląd Organizacji, nr 2, ss. 38-41
- [5] Bielawa Anna, Postrzeganie i rozumienie jakości – przegląd definicji jakości, Studia i prace wydziału nauk ekonomicznych i zarządzania, nr 21, ss. 143 – 149
- [6] Szczepańska K., 2011, W dążeniu do doskonałości, Warszawa, CH Beck
- [7] Dębowska M. I., 2004, Systemy Zarządzania Środowiskowego, Archiwum Odlewnictwa, nr 13, s. 58-61
- [8] Z. Pawłowska, M. Pęciłło – Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy 2018. Doskonalenie zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy z uwzględnieniem wymagań i wytycznych normy międzynarodowej ISO 45001
- [9] K. Knop, Analiza problemów w systemie zarządzania produkcją w wybranym przedsiębiorstwie
- [10] J. Łuczak, M. Tyburski, Poznań 2009, Systemowe zarządzanie bezpieczeństwem informacji ISO/IEC 27001
- [11] System zarządzania ciągłością działania zgodny z BS 25999, [iso.org.pl, https://www.iso.org.pl/uslugi-zarzadzania/wdrazanie-systemow/zarzadzanie-ryzykiem/bs-25999/](https://www.iso.org.pl/uslugi-zarzadzania/wdrazanie-systemow/zarzadzanie-ryzykiem/bs-25999/), dostęp: 8 maja 2022
- [12] System zarządzania ciągłością działania zgodny z ISO 22301 Business Continuity Management, [iso.org.pl, https://www.iso.org.pl/uslugi-zarzadzania/wdrazanie-systemow/zarzadzanie-ryzykiem/iso-22301/](https://www.iso.org.pl/uslugi-zarzadzania/wdrazanie-systemow/zarzadzanie-ryzykiem/iso-22301/), dostęp: 8 maja 2022
- [13] The ISO Survey of Management System Standard Certifications – 2019

## Struktura i własności warstwy wierzchniej stali narzędziowej obrabianej laserowo

D. Tatar<sup>1</sup>, A. Bodnar, K. Jędrzejczyk, P. Jerominek, P. Świerczek, T. Głowinkowski,  
M. Bonek, E. Tillova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny,  
email: danitat271@student.polsl.pl

<sup>2</sup> Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra materiálového inžinierstva, Žilina,  
Slovak Republic

**Streszczenie:** Praca jest przeglądem literatury obejmującym zapoznanie się z technologią laserową, działaniem lasera, jak i jego szerokim zastosowaniem w przemyśle. Skupiono się na dokładnym przedstawieniu tematu. Ujęto tutaj wiele aspektów zastosowań wraz z przykładami zaprezentowanymi na grafikach.

**Abstract:** The work is a review of the literature covering the knowledge of laser technology, laser operation and its wide application in industry. The focus was on the exact presentation of the topic. Many aspects of the application are covered here with examples shown in the graphics.

**Słowa kluczowe:** technologie laserowe; laser; przemysł.

### 1. WSTĘP

Urządzenia laserowe należą do technologii stosunkowo nowych i wciąż rozwijanych. Technologie te znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle ze względu na swoje właściwości i sposób działania.

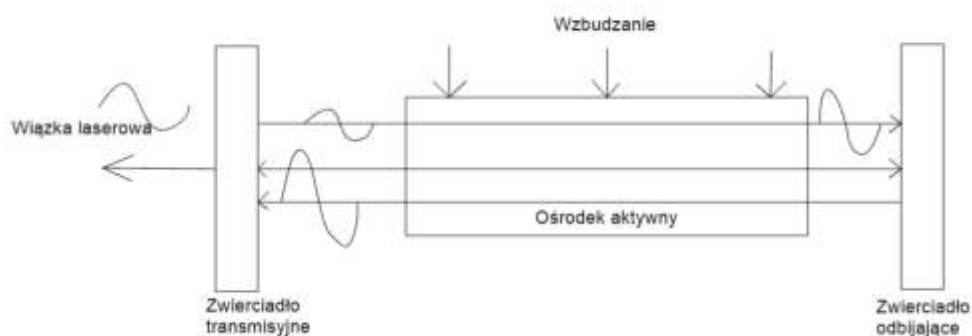
#### 1.1. Laser

Laser jest definiowany jako wiązka promieniowania elektromagnetycznego charakteryzująca się spójnością i monochromatycznością. Skrót słowa laser wywodzi się od wzmocnienia światła przez wymuszoną emisję promieniowania. Światło lasera powstaje na elektronów pochłaniających energię i przeskakujących na wyższe poziomy energetyczne w skutek czego nadmiar energii jest uwalniany w postaci fotonów. Zasada działania lasera opiera się na tzw. emisji wymuszonej. [1]

Do znanych cech światła laserowego można zaliczyć:

- spójność;

- monochromatyczność (jednobarwność);
- natężenie;
- kierunkowość.[2]



Rysunek 1. Budowa lasera - schematyczna

Figure 1. Construction of the laser - schematic

## 1.2. Historia lasera

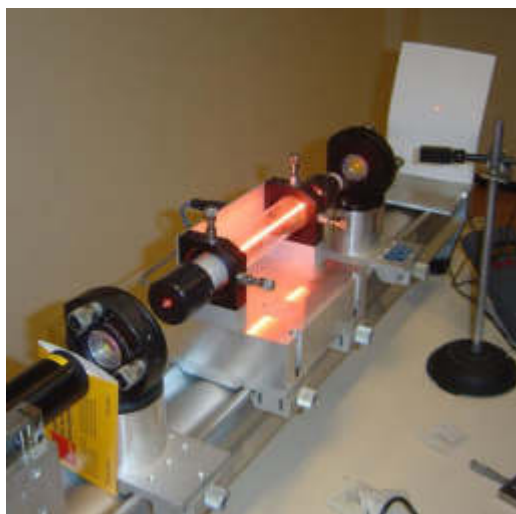
Pierwszym laserem w historii był tzw. laser rubinowy. Został on zbudowany i uruchomiony w 1960 roku przez fizyka Theodore'a Maimana. Laser rubinowy charakteryzuje się ośrodkiem czynnym w postaci rubinu. [1]



Rysunek 2. Pierwszy laser (Ruby rod-rubinowy ośrodek czynny, flashlamp-lampa błyskowa, silver reflectors-srebrne lustra) [3]

Figure 2. First laser (Ruby rhodium-ruby active medium, flashlamp-flash lamp, silver reflectors-silver mirrors) [3]

Kolejnym laserem w historii był laser gazowy (helowo-neonowy). Został on zbudowany w 1961 roku. Jego twórcami byli A. Javan, R. W. Bennett i D.R. Herriot.



Rysunek 3. Laser helowo-neonowy [4]

*Figure 3. Helium-neon laser [4]*

W kolejnym roku Snitzer uruchomił laser bazujący na szkłe neodymowym (1962 rok), a w 1964 roku Karkos i Gaisik stworzyli laser, który bazował na bazie granatu itrowo-glinowego, który był domieszkowany neodymem. W tym samym roku N. G. Basow i A. M. Prochorow oraz C. H. Townes otrzymali nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki za prace będące podstawą działania maserów i laserów. 1964 rok owocował w nowe odkrycia i również w tym roku zbudowano pierwszy laser półprzewodnikowy z pompowaniem diodowym.

Rozwój laserów ciągle się poszerzał, natomiast w Polsce utworzono pierwszy polski laser w Wojskowej Akademii Technicznej w 1963 roku laseru gazowego. [5]

## 2. ZASTOSOWANIE LASERA W PRZEMYŚLE

Laser z uwagi na swoje działanie znalazł zastosowanie w przemyśle. Znajduje on zastosowanie w funkcji:

- Cięcia;
- Znakowania;
- Spawania;
- Hartowania;
- Napawania. [6]

### 2.1. Cięcie laserem

Jest metodą bardzo precyzyjną, która charakteryzuje się uzyskiwaniem elementów wysokiej jakości. Możliwość zastosowania tej metody do zarówno dużych jak i niewielkich elementów jest jej zdecydowanym atutem. Czas cięcia tą metodą jest dużo krótszy w porównaniu do innych metod, co pozwala na zaoszczędzenie czasu w produkcji przemysłowej, seryjnej. [6]

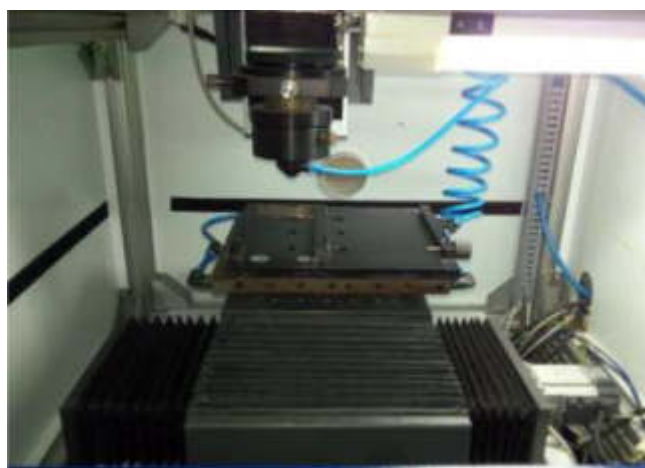


Rysunek 4. Cięcie laserem [6]

*Figure 4. Laser cut [6]*

## 2.2. Znakowanie laserem

Proces ten polega na znakowaniu materiałów z zachowaniem minimalnej szkodliwości dla wytrzymałości i trwałości tych materiałów. Często proces znakowania jest stowowany jako symbol określenia standaryzacji oryginalnego produktu, bądź ich branding, czy identyfikalności. Jest on dużo lepszą metodą od tradycyjnych etykiet, czy pieczętek z uwagi na trwałość znakowania. [7]



Rysunek 5. Znakowanie laserem [7]

*Figure 5. Laser marking [7]*

## 2.3. Spawanie laserem

Jest procesem służącym do łączenia ze sobą dwóch materiałów z wykorzystaniem wiązki laserowej. Metoda ta jest skuteczną technologią z uwagi na precyzję spawania oraz powtarzalność. Często ta metoda stosowana jest w przemyśle z uwagi na swoją seryjność. [8]



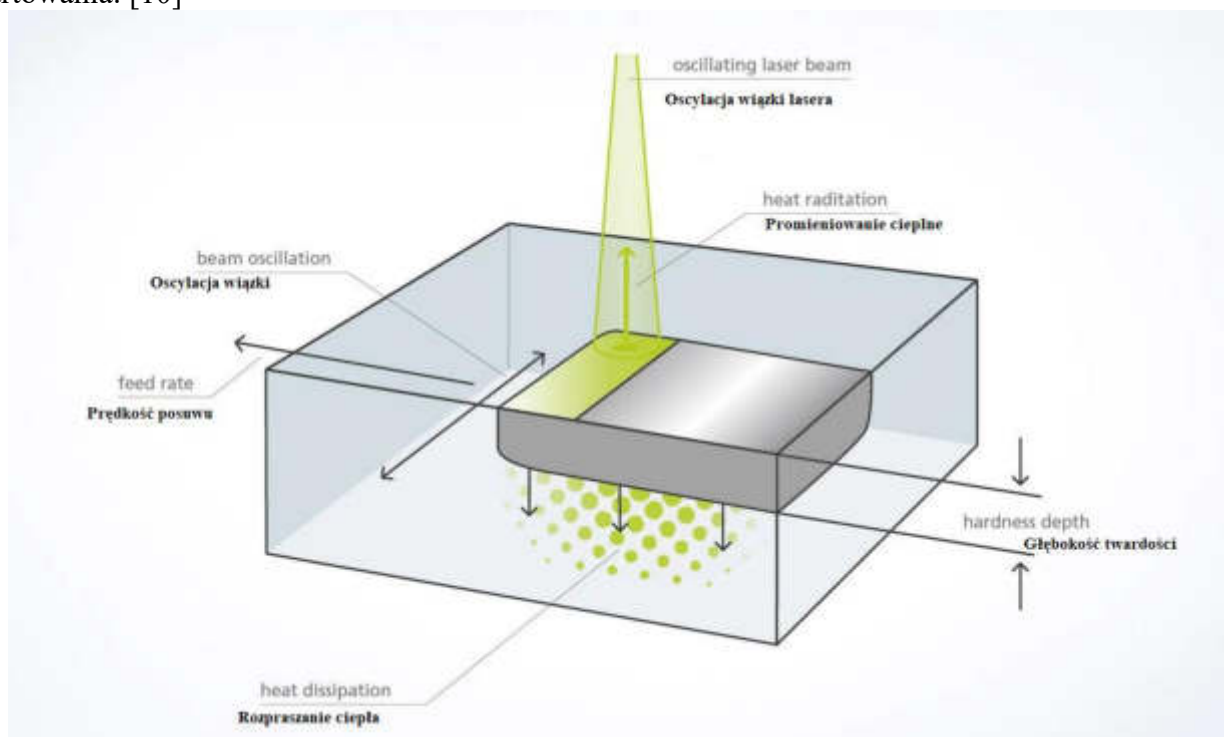


Rysunek 6. Spawanie laserem [9]

Figure 6. Laser welding [9]

## 2.4. Hartowanie laserem

W procesie hartowania laserowego warstwa wierzchnia danego przedmiotu podgrzewana jest do temperatury niewiele niższej niż temperatura topnienia. Proces ten przeprowadza się z wykorzystaniem wiązki lasera. Laser nagrzewa dane miejsce, a następnie przesuwa się do kolejnego. Upřednio nagrzane miejsce bardzo szybko się schładza i zachodzi proces hartowania. [10]



Rysunek 7. Schemat hartowania laserowego [10]

Figure 7. Scheme of laser hardening [10]

## 2.5. Napawanie laserem

Proces napawania laserem polega na pokrywaniu elementu obrabianego warstwą wybranego materiału z wykorzystaniem topnienia, które zachodzi jednocześnie. Laser w tym procesie służy jako źródło ciepła. Proces napawania przeprowadza się poprzez wprowadzeniu materiału, np. w formie proszkowej bądź jako drut spawalniczy. Lasera ma za zadanie rozgrzać dany element i

go roztopić lokalnie, a doprowadzany gaz obojętny zmiesza się z proszkiem metalowym, który topi się w rozgrzanym miejscu i łączy z elementem obrabianym. Proces ten często wykorzystywany jest w przemyśle, np. spawalniczym. [11]

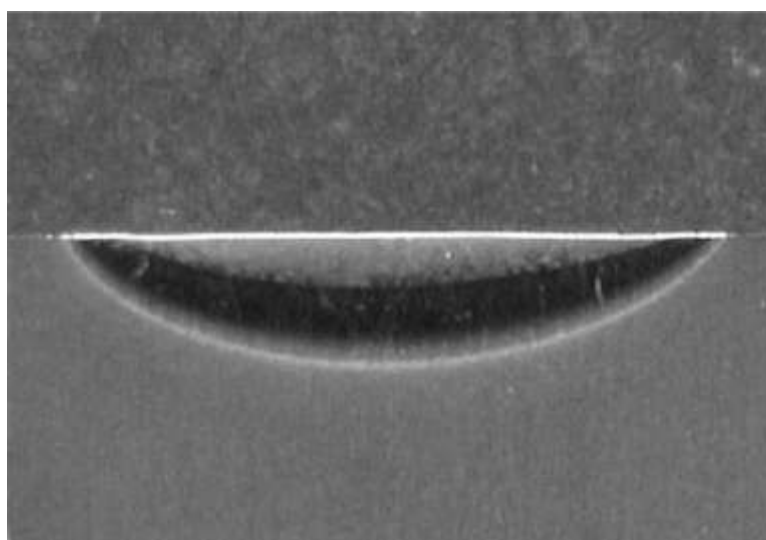


Rysunek 8. Napawanie laserowe [11]

*Figure 8. Laser surfacing [11]*

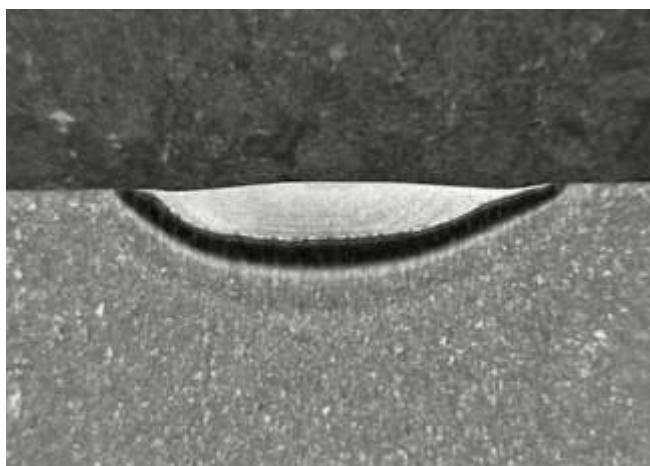
### 3. OMÓWIENIE I WYNIKI BADAŃ

#### 3.1 Badanie warstwy wierzchniej przetapianej próbki



Rysunek 9. Warstwa wierzchnia stali HS6-5-3-8 po przetapianiu przy parametrach: prędkość skanowania – 0,5 m/min, moc wiązki – 1,7 kW

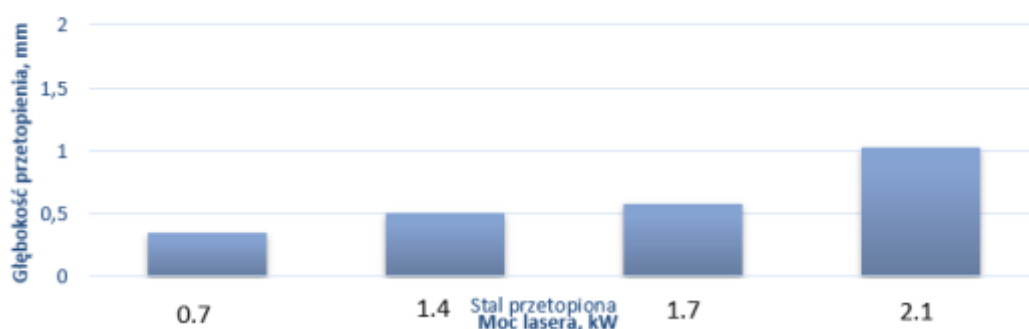
*Figure 9: Surface layer of HS6-5-3-8 steel after remelting with parameters: scanning speed - 0.5 m/min, beam power - 1.7 kW*



Rysunek 10. Warstwa wierzchnia stali HS6-5-3-8 po przetapieniu przy parametrach: prędkość skanowania – 0,5 m/min, moc wiązki – 2,1 kW

Figure 10. Surface layer of HS6-5-3-8 steel after remelting with parameters: scanning speed - 0.5 m/min, beam power - 2.1 kW

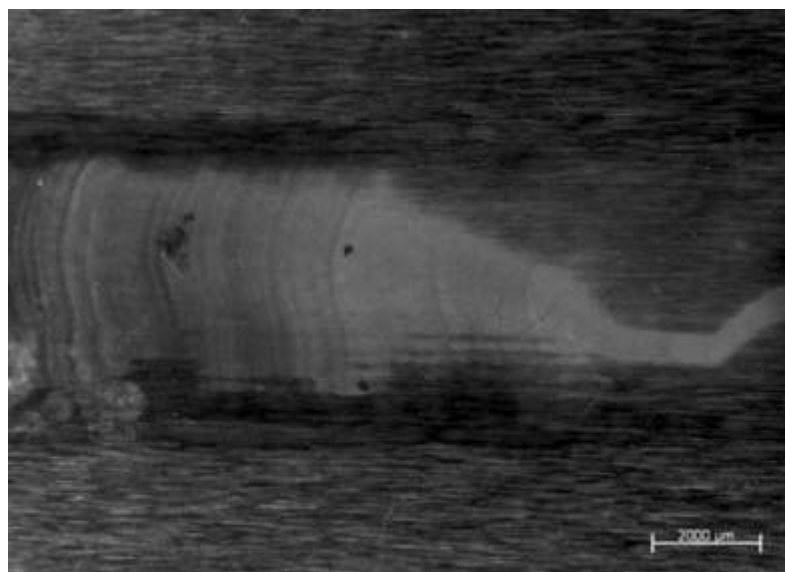
Ocena procesu przetapiania opiera się na analizie zdjęć wykonanych przy pomocy skaningowego mikroskopu elektronowego Opton DSM-940 oraz głębokości i szerokości stref przetapiania próbek stali HS6-5-3-8 przetapianych wiązką lasera różne uprawnienia. Poprzez analizę wyników badań można określić wpływ różnych parametrów na proces wypełniania spoiny. Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono zdjęcia strefy przetopu stali przy stałej prędkości 0,5 m/min. Posiada wielomodowy rozkład energii w kierunku prostopadłym do dłuższego boku skupionej wiązki, zapewniając w ten sposób szeroką powierzchnię szczeliny. Kształt strefy przetapiania znacznie się różni i składa się ze strefy przetapiania, strefy wpływu ciepła i materiału pierwotnego. Gdy moc lasera wynosi 0,7 kW, głębokość penetracji wynosi około 0,4 mm, a przy 2,1 kW głębokość penetracji wynosi około 1,1 mm. Parametr gęstości mocy wiązki laserowej ma decydujący wpływ na głębokość penetracji warstwy materiału. Wraz ze wzrostem gęstości mocy wiązki zwiększa się udział materiału podłoża, co wskazuje na głębsze przetapianie, jak pokazano na rysunku 11.



Rysunek 11. Wpływ mocy lasera na głębokość strefy przetopionej warstwy wierzchniej stali HS6-5-3-8 po laserowym przetapieniu laserem o mocy 0,7 kW, 1,4 kW, 1,7 kW, 2,1 kW, przy stałej prędkości przetapiania 0,5 m/min

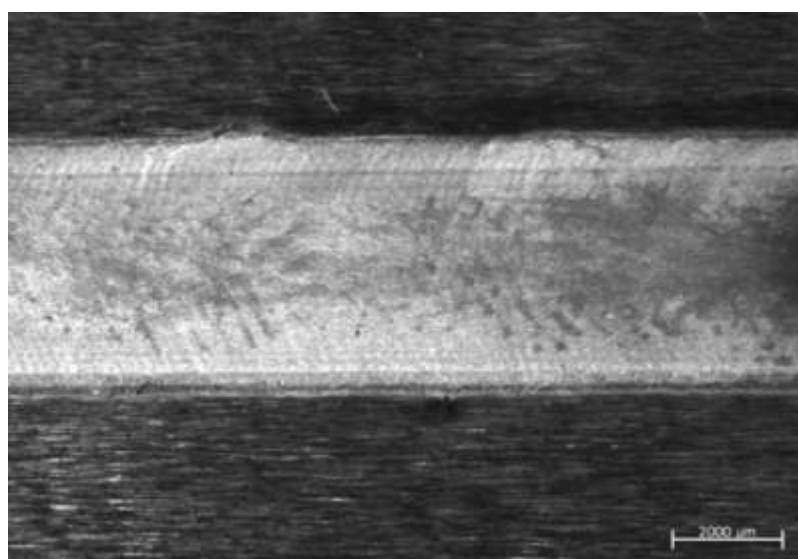
Figure 11: Effect of laser power on the depth of the remelted zone of the surface layer of HS6-5-3-8 steel after laser remelting with 0.7 kW, 1.4 kW, 1.7 kW, 2.1 kW, at a constant remelting speed of 0.5 m/min

### 3.2 Badanie lica przetopionej próbki stali HS6-5-3-8



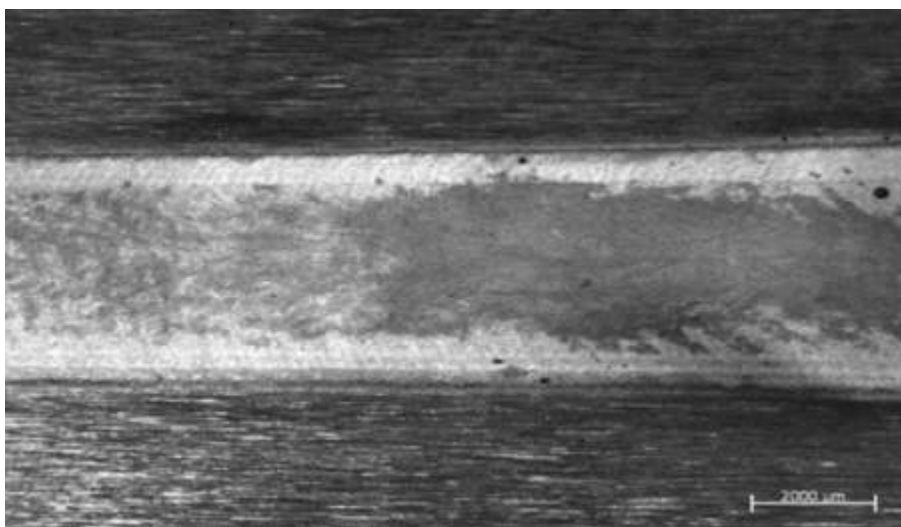
Rysunek 12. Widok lica po przetapianiu stali HS6-5-3-8, moc lasera 0,7 kW

Figure 12: View of the grain surface after remelting of HS6-5-3-8 steel, laser power 0.7 kW



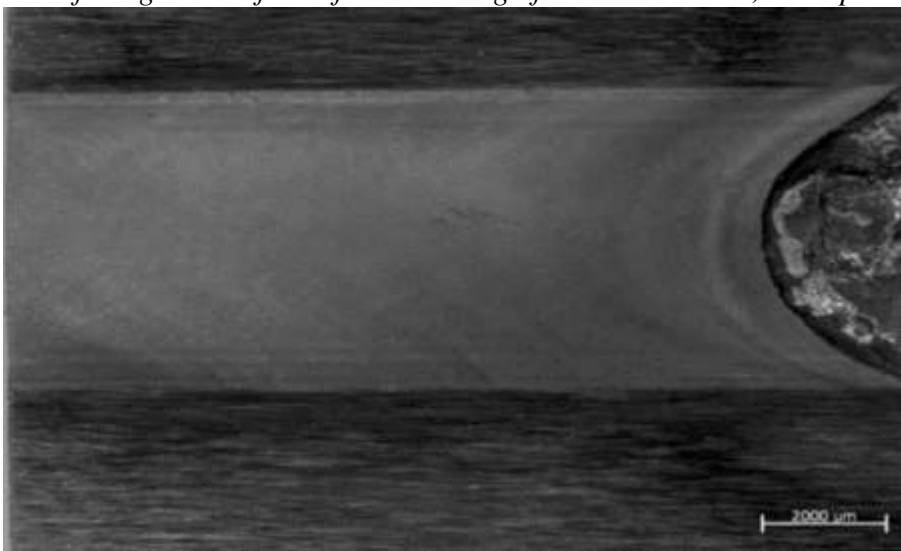
Rysunek 13. Widok lica po przetapianiu stali HS6-5-3-8, moc lasera 1,4 kW

Figure 13: View of the grain surface after remelting of HS6-5-3-8 steel, laser power 1.4 kW



Rysunek 14. Widok lica po przetopieniu stali HS6-5-3-8, moc lasera 1,7 kW

*Figure 14: View of the grain surface after remelting of HS6-5-3-8 steel, laser power 1.7 kW*



Rysunek 15. Widok lica po przetopieniu stali HS6-5-3-8, moc lasera 2,1 kW

*Figure 15: View of the face after remelting HS6-5-3-8 steel, laser power 2.1 kW*

W wyniku laserowego nadtopienia warstwy wierzchniej uzyskuje się ścieżkę o przekroju poprzecznym odpowiadającym rozkładowi energii w wiązce laserowej. Do przetopienia warstw wierzchnich użyto mocy w zakresie od 0,7- 2,1 kW. Na każdej powierzchni próbki wykonano ścieżkę przetapiania o długości 55 mm. Wymiary zogniskowanej na powierzchni materiału wiązki lasera wynoszą 1,8x6,8mm. Robocza długość ogniskowa (mierzona od powierzchni szkła ochronnego w głowicy) wynosi 92 mm. Przetapianie odbyło się prostopadle do dłuższego boku zogniskowanej wiązki, z wielomodowym rozkładem energii, zapewniającym uzyskanie szerokiego lica ściegu. Na Rysunku 15 widoczne jest, że dla wyższych mocy lasera otrzymane ścieżki charakteryzują się gładzszymi powierzchniami oraz wyraźną granicą przetopu względem próbki przetapianej przy mniejszej mocy lasera (rys. 12).

### 3.3 Badanie chropowatości warstwy wierzchniej stali szybko tnącej

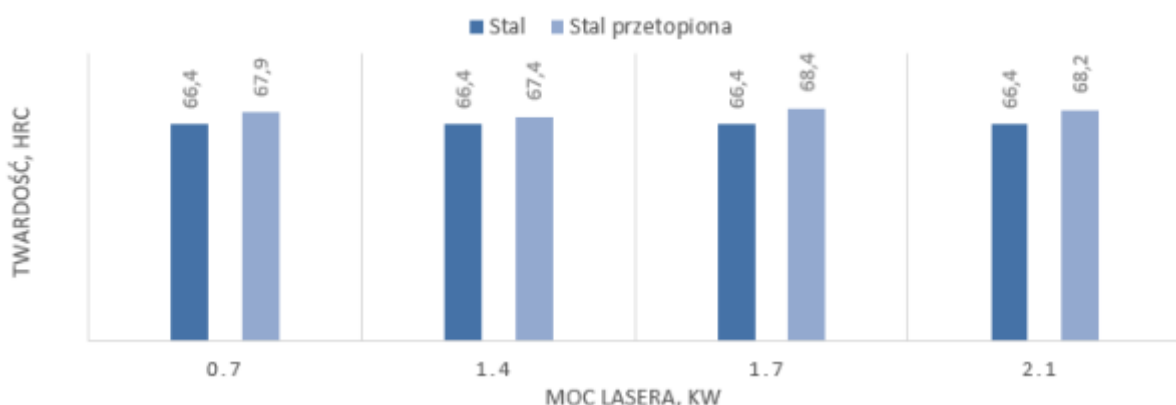
Po przetopieniu laserowym na powierzchni próbki widoczne są chropowate obszary. Może to być spowodowane utlenianiem i wyparowaniem materiału warstwy wierzchniej, co jest związane ze strefą przetapiania. Najniższą chropowatością charakteryzuje się laserowe topienie stali przy mocy 0,7kW i do 2,1kW, jak pokazano na rysunku 8. Ważną rolę odgrywa tutaj moc lasera. Można zaobserwować, że chropowatość stali wzrasta wraz z mocą wiązki laserowej. Obserwacja makroskopowa przeprowadzona po laserowej obróbce cieplnej wykazała, że powierzchnie elementów wymagają użycia dodatkowej obróbki redukującej ich chropowatość. Pory obecne na powierzchni mogą służyć jako mikro zasobniki na płyn smarujący. Pozwoli to na zmniejszenie współczynnika tarcia współpracujących elementów.



Rysunek 16. Wpływ mocy lasera na wartość parametru chropowatości warstwy wierzchniej stali HS6-5-3-8 po laserowym przetopieniu laserem o mocy 0,7 kW, 1,4 kW, 1,7 kW, 2,1 kW, przy stałej prędkości przetapiania 0,5 m/min

*Figure 16: Influence of the laser power on the value of the roughness parameter of the surface layer of HS6-5-3-8 steel after laser remelting with laser powers of 0.7 kW, 1.4 kW, 1.7 kW, 2.1 kW, at a constant remelting speed of 0.5 m/min*

### 3.4 Badanie twardości warstwy wierzchniej stali szybko tnącej

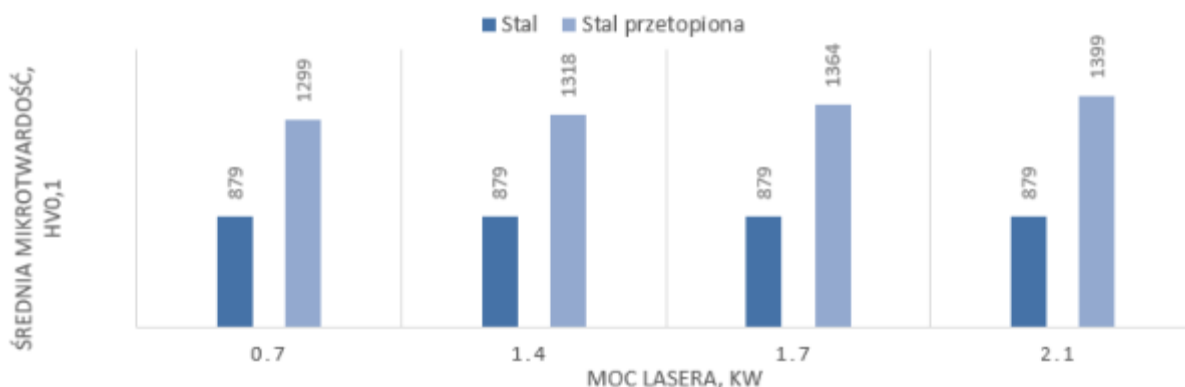


Rysunek 17. Zmiana średniej twardości warstwy wierzchniej stali HS6-5-3-8 po laserowym przetopieniu laserem o mocy 0,7 kW, 1,4 kW, 1,7 kW, 2,1 kW, przy stałej prędkości przetapiania 0,5 m/min

*Figure 17. Change in average hardness of the surface layer of HS6-5-3-8 steel after laser remelting with 0.7 kW, 1.4 kW, 1.7 kW, 2.1 kW, at a constant remelting speed of 0.5 m/min*

Przeprowadzenie pomiarów mikrotwardości obyło się liniowo na płaszczyźnie poprzecznego przekroju napoin, zaczynając od lica napoiny w kierunku materiału rodzimego, przy pomocy ultramikrotwardościomierzu dynamicznym DUH 202 firmy Shimadzu. Pomiarów dokonano przy obciążeniu 0,1 N, wykonując niezbędną liczbę odcisków na przekroju każdej badanej próbki, odpowiednio do głębokości zmian strukturalnych w warstwie wierzchniej materiału. Wyniki pomiarów przedstawiono w formie wykresu dla wybranych wartości gęstości mocy wiązki lasera.

Na rysunku 18 przedstawiono wykres gdzie zawarta jest mikrotwardość materiału rodzimego stali szybko tnącej HS6-5-3-8, która wynosi ok. 850HV<sub>0,1</sub> oraz średnią mikrotwardość warstwy wierzchniej po przetapianiu laserem o różnej mocy. Przy większych głębokościach przetapiania można zauważyć wzrost twardości powierzchni. Spowodowane jest to przetopieniem większego obszaru, a co prowadzi do znacznego rozdrobnienia struktury. A to w efekcie umacnia przetopioną powierzchnię. Najmniejszą twardość uzyskała próbka przetapiana przy mocy lasera 0,7kW i wyniosła ok. 1300HV<sub>0,1</sub> a najwyższą przy mocy 2,1kW gdzie twardość wyniosła ok. 1400HV<sub>0,1</sub>. Różnica między warstwą przetopioną przy mocy wiązki 0,7kW a 2,1kW wynosi ok. 100HV<sub>0,1</sub>. Na podstawie wyników pomiarów mikrotwardości wyznaczono względne procentowy przyrost mikrotwardości dla każdej z próbek. W porównaniu do materiału rodzimego po przetapianiu wystąpił przyrost twardości o ok. 30%.



Rysunek 18. Średnia mikrotwardość warstwy wierzchniej stali HS6-5-3-8 po laserowym przetapianiu laserem o mocy 0,7 kW, 1,4 kW, 1,7 kW, 2,1 kW, przy stałej prędkości przetapiania 0,5 m/min

Figure 18: Average microhardness of the surface layer of HS6-5-3-8 steel after laser remelting with 0.7 kW, 1.4 kW, 1.7 kW, 2.1 kW, at a constant remelting speed of 0.5 m/min

#### 4. WNIOSKI

- 1) Decydujący wpływ na głębokość przetapiania materiału ma gęstość moc wiązki lasera. Wraz ze wzrostem gęstości mocy wiązki wzrasta udział materiału podłoża. Laserowa obróbka stali HS6-5-3-8 przy mocy lasera 2,1kW powoduje przetopienie warstwy wierzchniej na głębokość max. 1,2 mm. Warstwa która powstała w wyniku przetopienia charakteryzuje się widocznym rozdrobnieniem struktury oraz zróżnicowaną morfologią zależną od lokalnych szybkości chłodzenia oraz podwyższoną twardością - ok. 1400 HV<sub>0,1</sub>.
- 2) Przekrój poprzeczny ścieżki laserowo nadtopionej warstwy wierzchniej odpowiada rozkładowi energii w wiązce laserowej. Zwiększając moc lasera uzyskujemy ścieżki z gładszą powierzchnią i wyraźniejszą granicą przetopu względem próbki.

- 3) Po laserowym przetapianiu na warstwie wierzchniej pojawiły się obszary chropowate. Do ich powstania doprowadziło utlenianie i wyparowanie materiału z warstwy wierzchniej, co koreluje ze strefami przetopienia. Najmniejszą chropowatością wyróżniła się stal przetopiona laserem o mocy 0,7kW, a największą 2,1kW. Dzięki temu widzimy, że chropowatość wzrasta wraz ze wzrostem mocy wiązki.
- 4) Wraz z głębokością przetopienia wzrasta twardość warstwy wierzchniej. Dzieje się tak dzięki rozdrobnieniu struktury. Najmniejszą twardość uzyskała próbka przetapiana przy mocy lasera 0,7kW i wyniosła ok.1300HV<sub>0,1</sub> a najwyższą przy mocy 2,1kW, gdzie twardość wyniosła ok. 1400HV<sub>0,1</sub>. W porównaniu do materiału rodzimego po przetapianiu wystąpił przyrost twardości o ok. 30%.

## 5. PODSUMOWANIE

Wynalezienie lasera umożliwiło rozwój technologii laserowych. Laser znalazł zastosowanie w hartowaniu, napawaniu i wielu innych procesach. Dzięki ciągłemu rozwojowi technologii szereg zastosowania lasera powiększa się, ale głównym jego odbiorcą jest przemysł, który dzięki wynalezieniu lasera ułatwił wiele procesów, zaoszczędził czas, jak i skupił się na większej seryjności.

## PODZIĘKOWANIE

Praca powstała w wyniku realizacji projektu w ramach kształcenia zorientowanego projektowo - PBL, w konkursie VII w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza, Politechnika Śląska.

## LITERATURA

1. X. Teng, M. Zhang, A. Mujumdar: Potential application of laser technology in food processing; 2021.
2. A. Żurawska: Budowa i zasada działania lasera ([a.zurawska.po.opole.pl/images/dopobrania/wm/2017/wyklad-10.pdf](http://a.zurawska.po.opole.pl/images/dopobrania/wm/2017/wyklad-10.pdf)).
3. [fiztaszki.pl/node/77](http://fiztaszki.pl/node/77) (dostęp dnia 15.05.2022)
4. Kastler-Brossel Laboratory
5. [palico.eu/historia-lasera](http://palico.eu/historia-lasera) (dostęp dnia 15.05.2022)
6. [ddwloclawek.pl/pl/701\\_materialy\\_partnera/38059\\_zastosowanie-lasera-w-przemysle.html](http://ddwloclawek.pl/pl/701_materialy_partnera/38059_zastosowanie-lasera-w-przemysle.html) (dostęp dnia 15.05.2022)
7. M. Pandey, B. Doloi: Parametric analysis on fiber laser marking characteristics for generation of square shaped marked surface on stainless steel 304.
8. M. Haque, K. Moeed, Z. Zaka: Laser welding of thermoplastics – A review; 2022.
9. [blumenbecker.com/pl/automatyka-przemyslowa/robotyka-przemyslowa/spawanie-laserowe](http://blumenbecker.com/pl/automatyka-przemyslowa/robotyka-przemyslowa/spawanie-laserowe) (dostęp dnia 15.05.2022)
10. [trumpf.com/pl\\_PL/rozwiazania/zastosowania/obrobka-powierzchni-za-pomoca-lasera/hartowanie-laserowe/](http://trumpf.com/pl_PL/rozwiazania/zastosowania/obrobka-powierzchni-za-pomoca-lasera/hartowanie-laserowe/) (dostęp dnia 15.05.2022)
11. [kuka.com/pl-pl/produkty-i-uslugi/technologie-procesow/napawanie-laserowe](http://kuka.com/pl-pl/produkty-i-uslugi/technologie-procesow/napawanie-laserowe) (dostęp dnia 15.05.2022)



## Technologia laserowa w odniesieniu do innych procesów – fenomen wśród technologii

D. Tatar<sup>1</sup>, A. Bodnar, K. Jędrzejczyk, P. Jerominek, P. Świerczek, T. Głowinkowski,  
M. Bonek, E. Tillova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny,  
email: danitat271@student.polsl.pl

<sup>2</sup> Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra materiálového inžinierstva, Žilina,  
Slovak Republic

**Streszczenie:** W artykule ujęto omówienie technologii laserowej wraz z jej innymi aspektami na podstawie dostępnej literatury.

**Abstract:** The article discusses laser technology along with its other aspects based on the available literature.

**Słowa kluczowe:** laser, PVD, technologie

### 1. WSTĘP

Technologie współczesnych czasów starają się sięgać po coraz nowsze osiągnięcia. Jedną z nowszych technologii są technologie laserowe, które uznaje się za kluczowy wynalazek czasów nowożytnych wywierających ogromny wpływ na rozwój ludzkości. Technologie laserowe jak i sam laser znajdują szereg zastosowań we współczesnym przemyśle. Począwszy od pomiarów kontrolnych po procesy wytwarzania. [1]

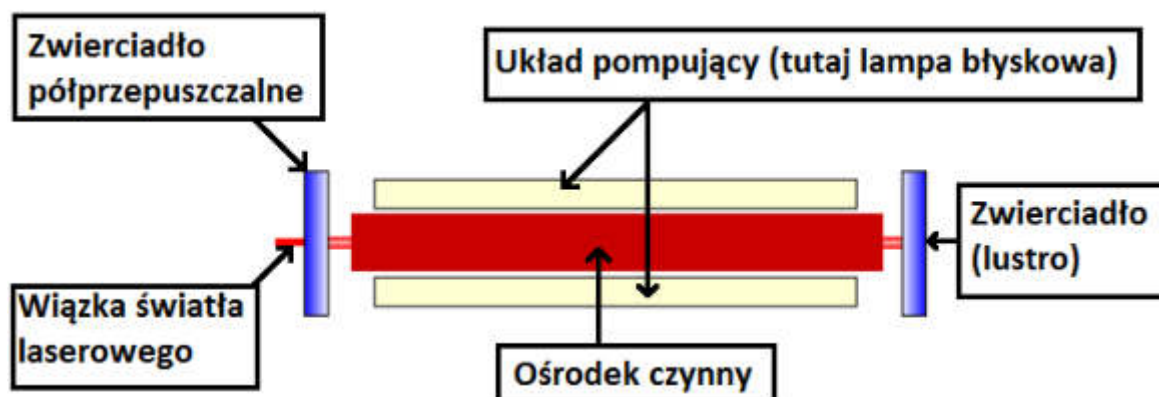
### 2. TECHNOLOGIE LASEROWE

#### 2.1 Technologia laserowa – działanie

Technologie laserowe są jednym z elementów dziedziny technologii procesów materiałowych, w których możemy odnaleźć takie procesy jak walcowanie, kucie, cynkowanie i wiele innych. Technologia ta charakteryzuje się wykorzystaniem lasera w swoich działaniach. Laser znany jest jako urządzenie emitujące promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu światła widzialnego, ultrafioletu lub podczerwieni, wykorzystujące zjawisko emisji wymuszonej.

Nowoczesne urządzenia laserowe (Rys.1.) pozwalają na optymalizację swojego działania poprzez możliwość ustalenia takich paramterów jak:

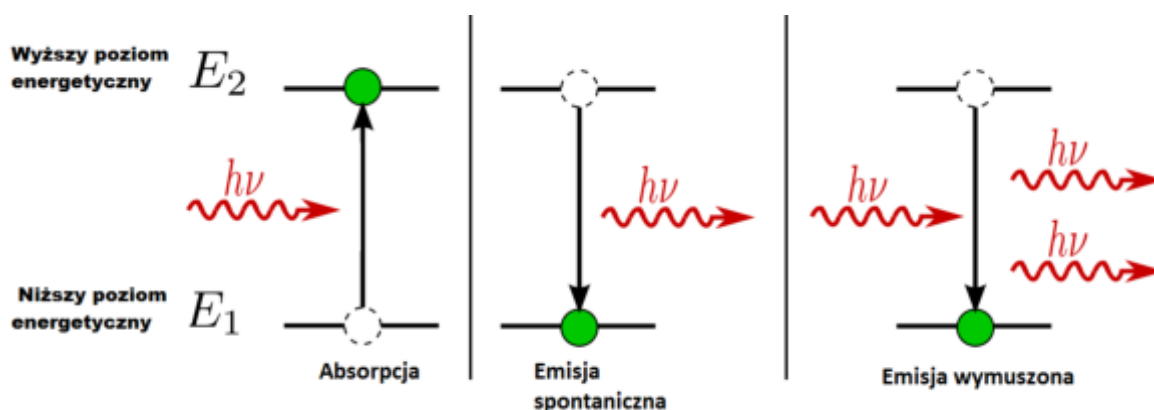
- rodzaj promieniowania;
- wymiar i kształt ogniska;
- długość ogniskowej;
- gęstość mocy;
- śledzenie i kierowanie torem przesuwu wiązki.



Rysunek 1. Schemat budowy lasera [2]

Figure 1. Schematic diagram of the laser [2]

Działanie lasera (Rys.2.) jest możliwe dzięki zjawiskom emisji wymuszonej, spontanicznej i absorpcji. Przyjmując sytuację, że wszystkie atomy są w stanie podstawowym działanie rozpoczyna się w układzie pompującym, który daje energię do ośrodka czynnego, w którym znajdujące się tam atomy absorbują tę energię. Zatem ich elektrony na skutek tego procesu przechodzą na wyższe stopnie energetyczne. Kolejno jeden atom w sposób spontaniczny emituje foton, a ten wyemitowany foton wyzwala kolejne fotony w emisji wymuszonej. Na koniec atomy znajdują się znowu w stanie podstawowym i proces się powtarza. [2]

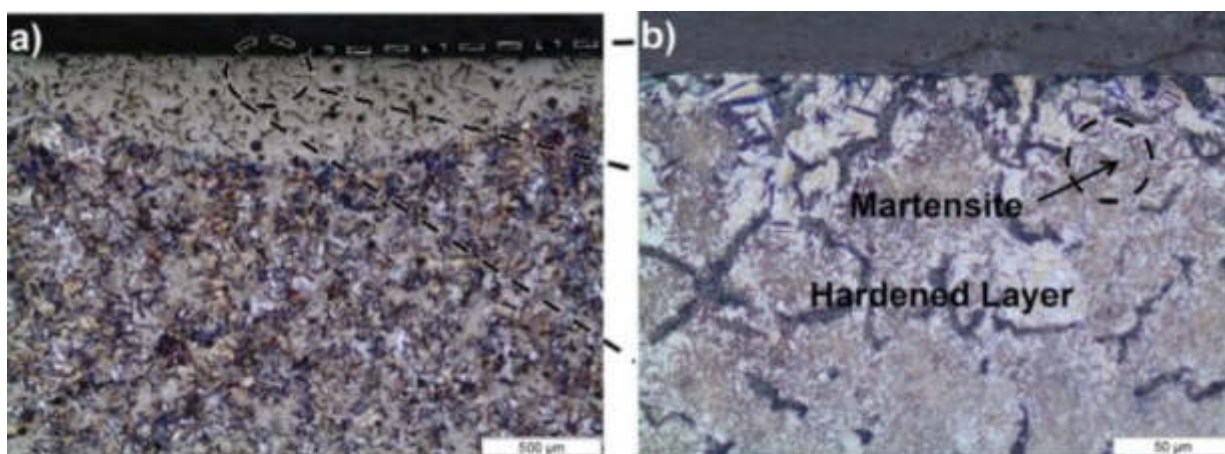


Rysunek 2. Schemat działania lasera [2]

Figure 2. Diagram of laser operation [2]

## 2.2 Porównanie powierzchni materiału po obróbce laserowej w stosunku do zastosowania powłok PVD i CVD

Zastosowanie konkretnej technologii wiąże się ze zmianą powierzchni obrabianego materiału. W przypadku technologii laserowej do zmiany powierzchni dochodzi np. w momencie hartowania laserowego. Powierzchnia próbki staje się dużo twardsza na skutek procesu hartowania, który przeprowadza się w tym celu. Na powierzchni próbki po zastosowaniu lasera możemy zobaczyć z wykorzystaniem mikroskopu zdecydowaną zmianę w mikrostrukturze.

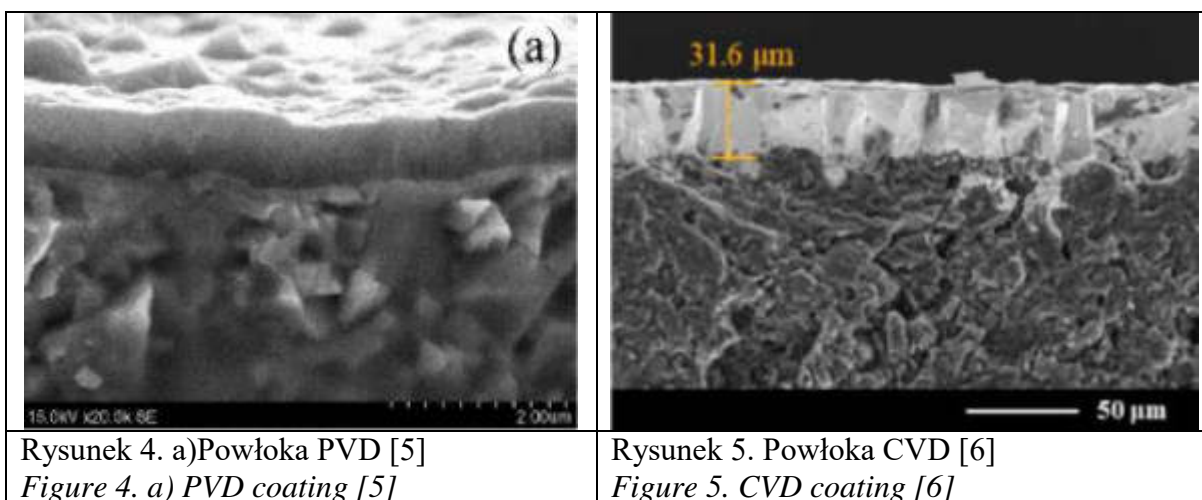


Rysunek 3. a) Mikrostruktura warstwy powierzchniowej utwardzanej laserowo, b) Szczegóły utwardzonej warstwy [3]

Figure 3. a) Microstructure of the laser hardened surface layer, b) Details of the cured layer [3]

W przypadku procesów PVD i CVD zmiana na powierzchni zachodzi w odmienny sposób. Nie jest to zmiana w samym materiale, a na jego powierzchni. W procesie PVD i CVD produktem docelowym jest powłoka i to właśnie ją jesteśmy w stanie zaobserwować na powierzchni obrabianego materiału. Powłokę nakłada się w celach:

- dekoracyjnych;
- poprawy własności wytrzymałościowych;
- poprawy odporności korozyjnej;
- poprawy własności trybologicznych. [4]

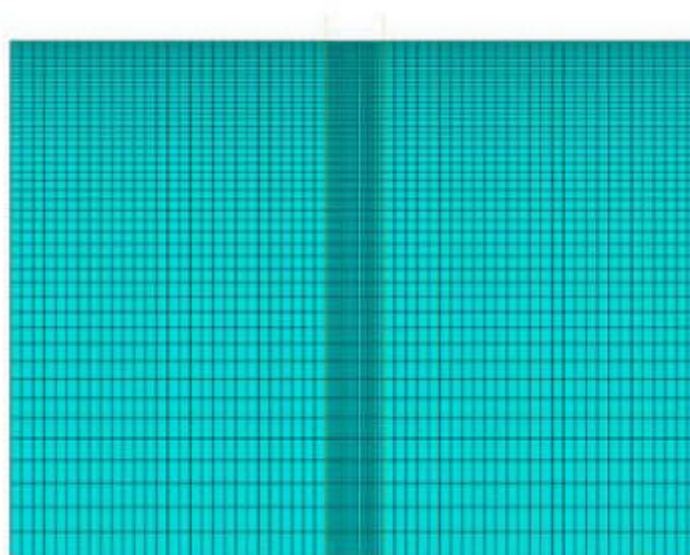


Rysunek 4. a) Powłoka PVD [5]  
Figure 4. a) PVD coating [5]

Rysunek 5. Powłoka CVD [6]  
Figure 5. CVD coating [6]

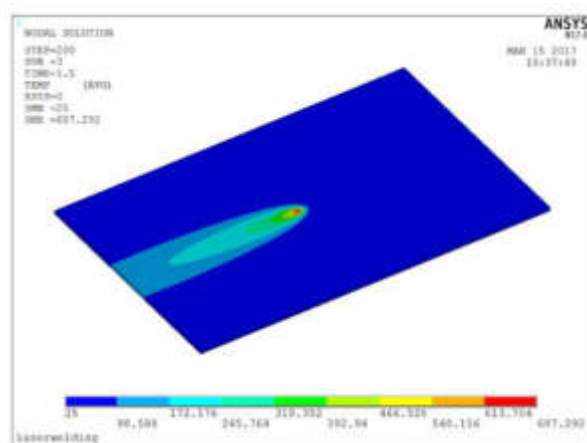
### 2.3 Analiza powierzchni poddanej obróbce laserowej z wykorzystaniem metody elementów skończonych

Metoda elementów skończonych jest typem numerycznej analizy pozwalającym na wyznaczenie wielu wartości istotnych dla różnych dziedzin inżynierii takich jak wytrzymałość materiałów, termodynamika lub mechanika płynów rozpatrując skomplikowane geometrycznie powierzchnie jako elementy 2D lub 3D. Polega ona na dyskretyzacji modelu rozpatrywanego przedmiotu na skończoną wartość elementów poprzez zastosowanie siatki dyskretyzacji. Obliczenia wykonane na poszczególnych elementach siatki dyskretyzacji pozwalają na określenie stanu rozkładu przemieszczeń, naprężeń, odkształceń, reakcji w podporach, i wielu innych wartości opisujących stan rozpatrywanego elementu. Znając te wartości dla poszczególnych elementów wewnątrz siatki możemy określić stan całego elementu [7].

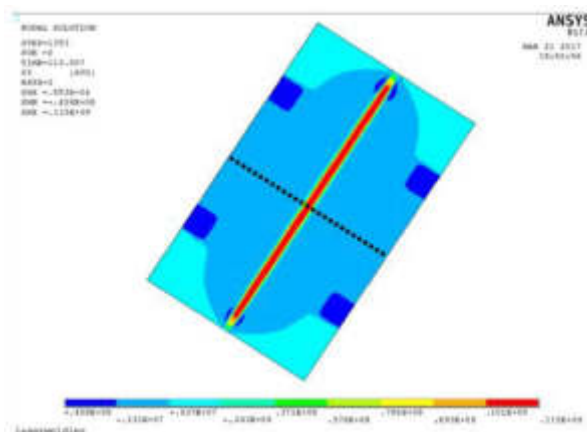


Rysunek 6. Model płytki spawanej laserowo z nałożoną siatką dyskretyzacyjną [8]  
Figure 6. Model of a laser-welded plate with an applied discretizing mesh [8]

Analizując element przy pomocy metod numerycznych możemy przeprowadzić analizę naprężeń wewnątrz spawanego materiału jak również analizę termiczną procesów cieplnych w trakcie spawania. Dzięki takiej analizie możemy określić istotne informacje na temat przebiegu procesu cieplnego jak i stan naprężeń powstałych w trakcie procesu spawania. Metoda ta jest bardzo dokładna i pozwala na dokładne określenie stanu naprężeń mimo czynników wpływających na ich rozkład. Na dokładność tej metody przekłada się możliwość korzystania z bogatych bibliotek materiałowych w które wyposażone są program, które uwzględniają w obliczeniach parametry materiałowe wpływające na stan elementu obciążonego przez czynniki zewnętrzne. Analiza termiczna procesów cieplnych z wykorzystaniem MES polega na dokładnym określeniu parametrów materiałowych i warunków brzegowych co pozwala na zminimalizowanie wpływu zmian stanów materii w trakcie procesu na wyniki analizy. Określenie wartości uzyskanych dzięki analizie MES jest ciężkie do określenia metodami pomiarowymi ze względu na szybkość przebiegu zmian strukturalnych. [9]



Rysunek 7. Analiza termiczna procesu cieplnego spawania laserowego [8]  
*Figure 7. Thermal analysis of the thermal laser welding process [8]*



Rysunek 8. Analiza naprężeń płyty spawanej laserowo [8]  
*Figure 8. Stress analysis of laser-welded plate [8]*

## 2.4 Automatyzacja i robotyzacja procesów obróbki laserowej

Laserowe techniki wytwarzania należą do najbardziej obiecujących i efektywnych, przyczyniając się do rozwoju technologicznego wielu gałęzi przemysłu, a zwłaszcza tych, w których dominuje obróbka materiałów. Obróbka laserowa charakteryzuje się bezkontaktowym działaniem, selektywnością oraz możliwością pełnej automatyzacji procesu. Bezkontaktowy charakter obróbki laserowej gwarantuje czystość miejsca obróbki, a także umożliwia zdalne sterowanie wiązką laserową poprzez przezroczyste bariery ochronne, w próżni, atmosferze gazowej lub pod wodą. Ważne jest, że można skoncentrować wiązkę promieniowania laserowego do bardzo małych rozmiarów, nawet tak małych jak część mikrometra. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie zewnętrznie dużych wartości koncentracji mocy i selektywne oddziaływanie wiązką na starannie wybrane obszary materiału, np. w miejscach trudno dostępnych, poddawanych obciążeniom mechanicznym itp. bez obawy o wpływ dostarczonego ciepła na sąsiednie obszary, sąsiadujące elementy i deformację części [10].



Rysunek 9. Stanowisko wielofunkcyjnej obrabiarki CNC [11]

*Figure 9. Multifunctional CNC machine tool station [11]*

System laserowy składa się z narzędzia do cięcia laserowego, systemu optycznego do prowadzenia narzędzia do cięcia laserowego, oprogramowania do sterowania laserem, powierzchni roboczej do podtrzymywania obrabianego materiału oraz systemu odciągowego do odprowadzania cząstek dymu i zanieczyszczeń powstałych w procesie cięcia laserowego. Cięcie, cięcie połączkowe, grawerowanie i znakowanie można tworzyć w trybie wektorowym lub rastrowym. Obróbka laserowa jest wykonywana na statycznej lub transportowanej perforowanej płycie metalowej lub metalowej siatce jako powierzchni roboczej, aby utrzymać materiał płaski i nieruchomą, zminimalizować "oparzenia odbiciowe" i wspomóc system odciągowy w celu odprowadzenia emisji z cięcia.

Jedną z najbardziej podstawowych operacji obróbki jest cięcie w którym cięcie laserowe ma kilka znaczących zalet nad konwencjonalnymi wycinarkami nożowymi. Pierwszą z nich jest bezkontaktowe cięcie laserem, w którym nie jest konieczne mocowanie materiału za pomocą systemu próżniowego; cięcie odbywa się bez tarcia, a dzięki temu można łatwo wycinać dowolne kształty. Drugą zaletą jest to, że wiązka laserowa uszczelnia krawędzie cięcia materiałów syntetycznych. Uszczelnienie krawędzi zapobiega strzępieniu się materiału i może wyeliminować obcinanie lub oddzielne operacje obróbki krawędzi w dalszych procesach produkcyjnych. Trzecią zaletą jest to, że ponieważ proces cięcia jest wykonywany tylko przez jedno narzędzie, wiązkę laserową, konstrukcja laserowej jest mniej skomplikowana, a koszty jej utrzymania są niższe w porównaniu z noży. Wadą jest to, że wycinarki laserowe są

droższe niż wycinarki nożowe, oraz mogą pojawić się problemy podczas cięcia grubszych materiałów [12].

### 3. PODSUMOWANIE

Technologie laserowe to technologie przyszłości, których rozwój i automatyzacja jest procesem rozwojowym. Porównanie technologii laserowej z technologią PVD i CVD pozwoliło na zaobserwowanie różnic i zmian w perspektywie powierzchni.

### PODZIĘKOWANIE

Praca powstała w wyniku realizacji projektu w ramach kształcenia zorientowanego projektowo - PBL, w konkursie VII w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza, Politechnika Śląska.

### LITERATURA

1. A. Borek, R. Grzelka, A. Klimpel, S. Mucha, B. Ścibisz: Technologie laserowe spawania, wytwarzania i obróbki cieplnej warstw wierzchnich; 2013.
2. [wewewefsa.blogspot.com/2015/03/wszystko-o-laserach.html](http://wewewefsa.blogspot.com/2015/03/wszystko-o-laserach.html) (dostęp dnia 15.05.2022)
3. V. Writzl, M. Lima, W. Guesser, F. Possoli, J. Neves, P. Borges: Influence of laser-hardening on microstructure and hardness of plasma-nitrided compacted graphite iron; 2021.
4. D. A. Dobrzański L.A, Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2011.
5. D. Kazlauskas, V. Jankauskas, R. Kreivaitis, S. Tučkutė: Wear behaviour of PVD coating strengthened WC-Co cutters during milling of oak-wood; 2022.
6. Y. Wang, Q. Dou, J. Yang, Q. Li: Residual stress and ablation behavior of CVD TaC coatings on graphite; 2022.
7. J. Zielnica: Wytrzymałość materiałów; Wyd. Pol. Poznańskiej; 1996.
8. Z. Leia, J. Zoua, D. Wanga, Z. Guoa, R. Baia, H. Jianga: Finite-element inverse analysis of residual stress for laser welding based on a contour method; Dalian; 2020.
9. A. Bień: Numeryczna analiza procesu obróbki laserowej w aspekcie badań materiałowych, Uniwersytet Warmińsko Mazurski; Olsztyn; 2015.
10. Andrew Y. C. Nee: Handbook of Manufacturing Engineering and Technology.
11. Pan, Z., Polden, J., Larkin, N., van Duin, S. & Norrish, J. (2012). Recent progress on programming methods for industrial robots. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 28 (2), 87-94.
12. Ineta Vilumsone-Nemes Industrial Cutting of Textile Materials.

## Projekt stanowiska pracy operatora maszyny z uwzględnieniem cech antropometrycznych człowieka

M. Tomala<sup>a</sup>, M. Spilka<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Studentka, Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zarządzanie i Inżynieria Produkcji

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych  
email: monika.spilka@polsl.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono metodologię stosowaną do zaprojektowania ergonomicznego i bezpiecznego stanowiska pracy z uwzględnieniem cech antropometrycznych człowieka. Do wyznaczenia kluczowych wymiarów posłużono się zasadą miar ograniczających. Ponadto, biorąc pod uwagę obowiązujące przepisy prawne, opracowano projekt stanowiska pracy operatora wtryskarki spełniającego wymagania ergonomii.

**Abstract:** The article presents the methodology used to design an ergonomic and safe workplace, taking into account human anthropometric features. The principle of limiting measures was used to determine the key dimensions. Moreover, taking into account the applicable legal regulations, a design of the injection molding machine operator's workplace meeting the requirements of ergonomics was developed.

**Słowa kluczowe:** ergonomia stanowiska pracy, cechy antropometryczne, operator wtryskarki, bezpieczeństwo pracy

### 1. WSTĘP

Przystosowanie przestrzeni roboczej człowieka ma ogromne znaczenie dla zdrowia oraz wydajności pracownika. Projektując przepływ pracy, wszelkie czynności powinny być tak zoptymalizowane, aby przy jak najmniejszym nakładzie pracy, środkach technicznych i jak najmniejszej stracie czasu osiągać jak najlepsze wyniki. Często niebezpieczeństwa jakie niesie ze sobą praca na stanowisku produkcyjnym są spowodowane brakiem uwzględnienia podstawowych danych antropometrycznych potencjalnego użytkownika maszyny.

Według Polskiego Wydawnictwa Naukowego: „Antropometria to dział antropologii, jedna z metod zbierania danych o człowieku, dotyczących jego cech ilościowych, czyli dających się zmierzyć” [1]. Rozwijając tę myśl, można stwierdzić, że antropometria jest dziedziną nauk, która zajmuje się pomiarami ciała, w tym jego kształtu, masy, siły, mobilności, elastyczności



oraz zdolności do pracy. Trzeba pamiętać, że ludzie są bardzo zróżnicowani (pod względem wymiarów, proporcji, jak i w przypadku wszystkich innych cech), a projektowanie zorientowane na pracownika wymaga tego, aby wziąć to pod uwagę. Zapewnienie optymalnych rozmiarów przestrzeni roboczej i rozmieszczenia poszczególnych segmentów stanowiska pracy, ma na celu przede wszystkim umożliwienie pracownikowi przyjęcia wygodnej, niewymuszonej dla niego postawy, jak i nieograniczonego zakresu ruchów roboczych, co pozwoli w perspektywie czasu na uniknięcie szybkiego zmęczenia czy pojawienia się jakichkolwiek kontuzji ciała. Antropometria obok ergonomii skupia się na tym samym ogólnym celu, jakim jest stworzenie bezpiecznego i efektywnego miejsca pracy [2].

## 2. METODYKA BADAŃ

Celem zaprojektowania ergonomicznego stanowiska pracy operatora wtryskarki, uwzględniono cechy antropometryczne człowieka.

### 2.1. Projektowanie stanowiska pracy z uwzględnieniem antropometrii człowieka

Projektując stanowisko pracy, należy uwzględnić dane antropometryczne człowieka. Takie pomiary całego ciała stosuje się, aby opisać i zdefiniować pewne grupy ludzkie (na przykład według: miejsca pochodzenia, wieku czy płci), aby następnie móc je ze sobą zestawić i porównać. Zebrane dane antropometryczne pozwalają wnioskować o zasięgu i rozpiętości ruchów, jakich dokonuje człowiek podczas wykonywania swojej pracy. Dzięki tej wiedzy zaprojektowane miejsce pracy jest ergonomiczne i bezpieczne. Oprócz tego można także zmierzyć: pozycje statyczne (stanie, siedzenie, leżenie) oraz wielkości kątów pomiędzy poszczególnymi elementami ciała [3].

Podstawę pomiarów antropometrycznych stanowi odległość między tzw. punktami antropometrycznymi [3]. Są one ściśle określone i znajdują się w miejscach łatwo wyczuwalnych na ciele lub w miejscach łączy kostnych. Pomiarów ciała dokonuje się przy użyciu antropometru i cyrkla kabłąkowego. Pomiarów wielkości liniowych wyrażane są w milimetrach [mm], a wielkości kątowe w stopniach [°]. Na potrzeby ergonomii dane antropometryczne populacji wyrażane są poprzez parametr centyli (percentyli) - skrajnych 5. i 95. oraz środkowego – 50 [2].

Celem opracowania miejsca pracy, uwzględniając cechy antropometryczne człowieka, zastosowano dane z „Atlasu miar człowieka” [4]. Informacje w nim zawarte obejmują dane dotyczące polskiej populacji (w tym, zarówno kobiet jak i mężczyzn). Przyjmuje się, że optymalnie wygodne i bezpieczne warunki pracy zapewniają wymiary, które mieszczą się między wartościami 5. i 95. centyla populacji. Jest to reguła, którą określa się jako zasadę miar ograniczających. Metoda ta jest wykorzystywana przy samym projektowaniu, jak i przy analizie miejsc roboczych. W artykule oparto się na zbiorze danych 5cM. i 95cM, który zgodnie z zasadą miar ograniczających uwzględnia 90 % populacji mężczyzn [5].

Stosowana przy projektowaniu przyszłych miejsc pracy miara centylowa przedstawia fizyczne cechy niskiego, średniego i wysokiego człowieka, odpowiadające kolejno 5., 50. i 90. centylowi wzrostu. Centyl jest rozumiany jako punkt na skali ocen, poniżej którego znajduje się określony procent wyników. Poziom 5 centyla oznacza, że 95 % z całej populacji przekracza wartość odpowiedniej dla tego poziomu cechy, czyli 5 % nie osiąga wymiarów minimalnych. Poziom 50 centyla informuje, że połowa populacji nie przekracza odpowiedniej

wartości cechy. Poziom 95 centyla określa, że tylko 5 % populacji przekracza wartość cechy (95 % populacji nie przekracza wymiarów maksymalnych). Zgodnie z powyższymi wytycznymi skrajne wielkości wymiarowe stanowisk pracy (w tym, dla rozpatrywanego w niniejszym artykule operatora wtryskarki) określone są wg [5]:

- 5. centyla – są to wymiary zewnętrzne, czyli w szczególności granice stref aktywności roboczej i górna granica położenia elementów manipulacyjnych. Dodatkowo, określone są również inne parametry, takie jak dopuszczalna rezystancja elementów sterujących oraz siła, która jest wymagana do wykonywania czynności roboczych;
- 95. centyla – są to wymiary wewnętrzne, czyli np. szerokości i głębokości stref zarezerwowanych dla kończyn dolnych lub tułowia. Dodatkowo są to również wymiary dojść i dostępu do miejsc niezbędnych do zrealizowania procesu pracy (otwory, przejścia), a także określenie dolnej granicy położenia elementów manipulacyjnych.

### 3. PROJEKT STANOWISKA PRACY OPERATORA WTRYSKARKI

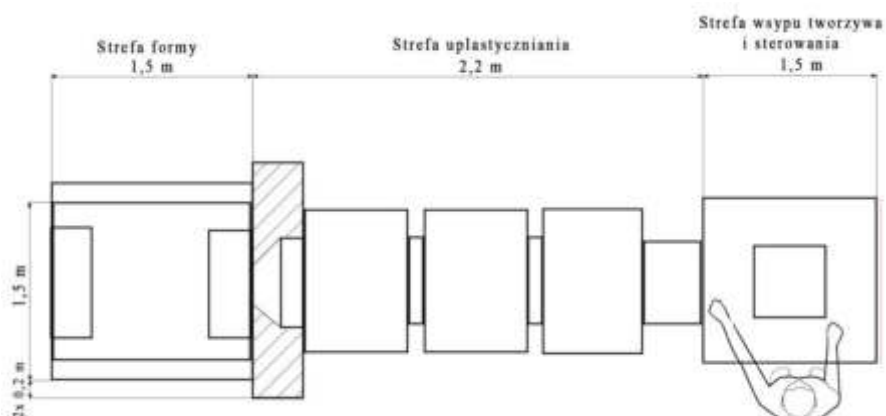
Operator wtryskarki zajmuje się obsługą urządzenia służącego do formowania wyrobów o różnych kształtach z tworzyw sztucznych. Jest to popularny zawód w branży produkcyjnej, dlatego bardzo istotnym jest, aby takie stanowisko pracy było zgodne z zasadami ergonomii i bezpieczeństwa. Do obowiązków operatora wtryskarki należy: nadzór procesu wytwarzania elementów, wypełnianie dokumentacji technicznej oraz czyszczenie i konserwacja sprzętu.

Istnieje wiele pozycji, w jakich operator wtryskarki musi pozostawać podczas wykonywania czynności roboczych. Pracuje on głównie w pozycji stojącej, często jednak przemieszcza się w celu przyniesienia niezbędnych materiałów do pracy lub po to, aby odnieść gotowy wyrób na magazyn. Operator wtryskarki podczas pracy przyjmuje również inne pozycje takie jak:

- nachylenie się nad maszyną przy pracy,
- kucnięcie przy maszynie w celu jej oczyszczenia,
- sięganie do elementów maszyny,
- przesuwanie środków technicznych,
- podnoszenie ciężarów (np. worek z granulatem).

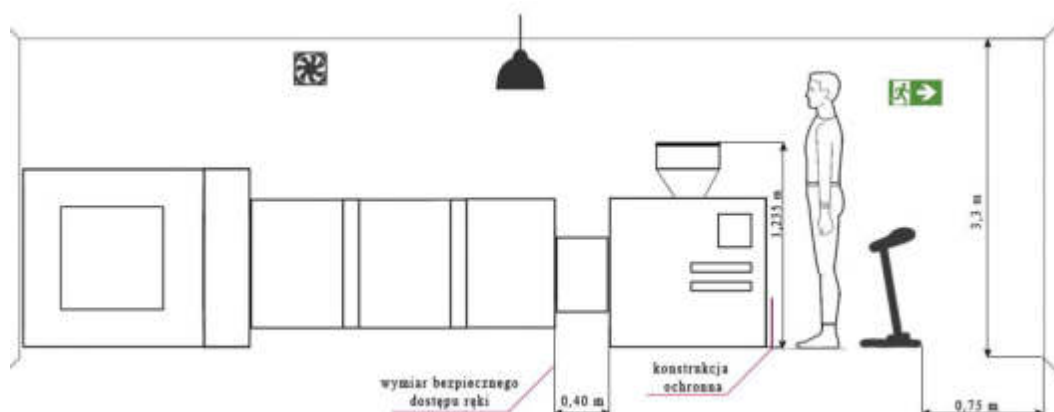
Stanowisko robocze operatora wtryskarki zostało zaprojektowane z uwzględnieniem cech antropometrycznych pracownika zgodnie z zasadami ergonomii i bezpieczeństwa w pracy, opierając się na normie PN-EN ISO 26800:2011 [6]. Przy projektowaniu uwzględniono wymiary poszczególnych stref maszyny oraz jej całkowitą szerokość, które oznaczono na rys. 1.

Widoczny na rys.1 pracownik stoi od przodu maszyny, przy zsypie tworzywa sztucznego, gdzie spędza większość swojego czasu pracy, podając tworzywo oraz kontrolując układ sterowniczy urządzenia. Operator podczas pracy przemieszcza się również wokół maszyny w celu obserwacji poprawności przebiegu całego procesu wytwarzania.



Rysunek 1. Widok zaprojektowanego stanowiska pracy operatora wtryskarki z góry  
 Figure 1. Top view of the designed injection moulding machine operator workplace

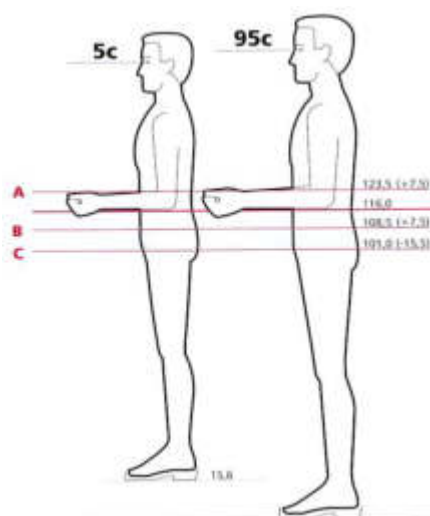
Widok zaprojektowanego stanowiska pracy operatora wtryskarki wraz z przestrzenią roboczą zamieszczono na rys. 2. Pomieszczenie robocze zostało zaprojektowane zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (Dz.U. 2003 nr 169 poz. 1650) [7] na wysokość 3,3 m. W otoczeniu roboczym pracownika znajduje się miejsce na maszynę wraz z jej wyposażeniem oraz wolna przestrzeń zapewniająca pracownikowi swobodę ruchu niezbędną do wykonania powierzonych zadań. Według wymagań prawnych [7] przejścia pomiędzy ścianami, a maszyną przeznaczone do obsługi urządzenia posiadają szerokość co najmniej 0,75 m. Zgodnie z polskimi przepisami BHP [7] na jednego pracownika powinno przypadać minimum  $13 \text{ m}^3$  objętości pomieszczenia roboczego. W zaprojektowanym pomieszczeniu roboczym zapewniono operatorowi  $\pm 56 \text{ m}^3$  przestrzeni roboczej oraz  $2 \text{ m}^2$  wolnej powierzchni podłogi.



Rysunek 2. Widok zaprojektowanego stanowiska pracy operatora wtryskarki wraz z przestrzenią roboczą od przodu  
 Figure 2. View of the designed injection moulding machine operator workplace with workspace from the front

Wyznaczając wymiar stanowiący o wysokości płaszczyzny stanowiska pracy, należy dostosować ją do najwyższego pracownika. Punktem odniesienia jest wysokość łokcia, która

zgodnie z danymi antropometrycznymi dla 95cM wynosi 113,5 cm (rys. 3). Do wymiaru 113,5 cm należy doliczyć wysokość obuwia roboczego  $\pm 2,5$  cm [2].



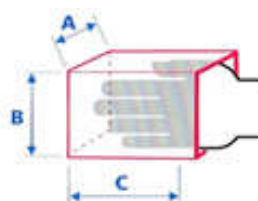
Rysunek 3. Wymiary do projektowania wysokości płaszczyzny pola pracy [2]  
Figure 3. Dimensions for designing the working field plane height [2]

gdzie naddatki wymiarowe [2]:

- A- praca precyzyjna – ok. 7,5 cm powyżej łokcia,
- B- praca lekka – ok. 5,0-7,5 cm poniżej łokcia,
- C- praca ciężka – ok. 15,03 cm poniżej łokcia.

Ostatecznie wysokość płaszczyzny stanowiska pracy operatora wtryskarki przy wariancie „A - praca precyzyjna” wyniosła 123,5 cm.

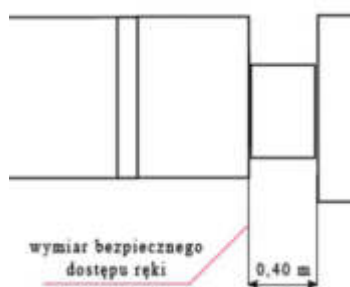
Podczas projektowania pod uwagę wzięto wymiary dojrść i dostępu do miejsc koniecznych do wykonania określonej pracy oraz niezbędne wymiary bezpieczeństwa (rys. 4; tabela 1). Zaprojektowano otwór umożliwiający dostęp rąk do maszyny w celu jej konserwacji (rys. 5).



Rysunek 4. Wymiary ręki do obliczeń bezpiecznego dostępu [2]  
Figure 4. Hand dimensions for safe access calculations [2]

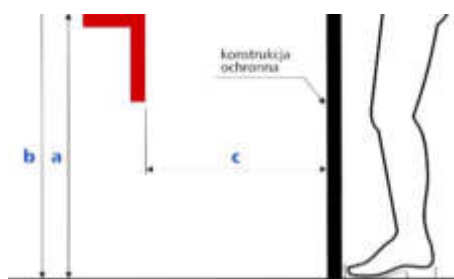
Tabela 1 Obliczenia wymiarów bezpiecznego dostępu [2]  
Table 1. Calculation of safe access dimensions [2]

| Mężczyźni | Wymiary ręki  | Naddatek    | Wymiary otworu |
|-----------|---|-------------|----------------|
| 5c        | $A \times B \times C = 4,8 \times 10,1 \times 18,1$ | 4,5x13x15,2 | 9,3x23,1x33,3  |
| 95c       | $A \times B \times C = 6,1 \times 12,1 \times 21,0$ | 4,5x13x15,2 | 10,6x25,1x36,2 |



Rysunek 5. Zaprojektowany wymiar dostępu fragmentów ciała do maszyny  
 Figure 5. Designed dimension for access of body parts to the machine

Posługując się normą PN-EN ISO 20430:2020-12 [8] określono podstawowe wymagania bezpieczeństwa pracy przy obsłudze urządzenia do formowania wyrobów z tworzyw sztucznych. Od strony przejścia, gdzie maszyna nie jest bezpośrednio używana zaprojektowano również konstrukcję ochronną w strefie niebezpiecznej dla stóp, grożącej zmiążdżeniem kończyn dolnych przy układzie napędowym maszyny (rys. 6, 7) [8].



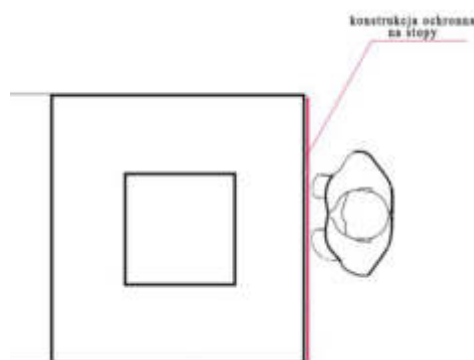
Rysunek 6. Konstrukcja ochronna przy strefach niebezpiecznych [2]  
 Figure 6. Protective structure in hazardous areas [2]

gdzie:

a = 123,5 cm – wysokość usytuowania strefy niebezpiecznej umieszczonej za konstrukcją ochronną tj. wysokość wtryskarki,

b = 30 cm – wysokość osłony,

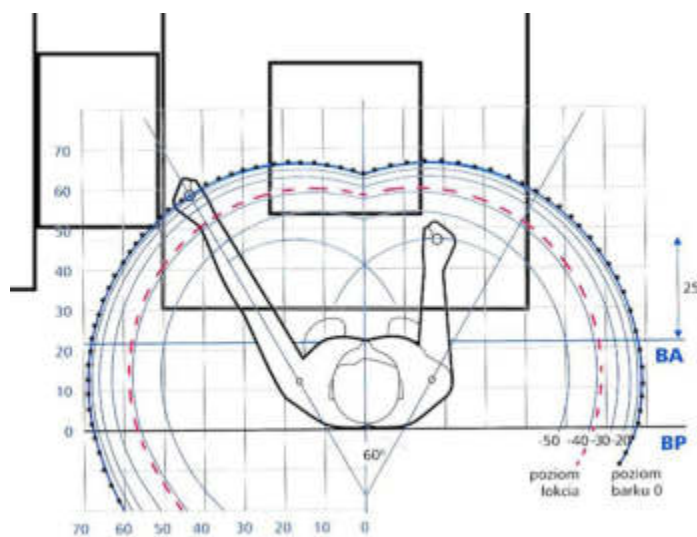
c = 7 cm – odległość pozioma konstrukcji ochronnej do strefy niebezpiecznej.



Rysunek 7. Schemat zaprojektowanej konstrukcji ochronnej stóp  
 Figure 7. Schematic of the designed foot protection structure

Dodatkowo posługując się normą PN-EN ISO 14738:2009 [9], zostały uwzględnione dane antropometryczne człowieka tak, aby pracownik miał pełny zakres ruchów oraz możliwość

pracy w naturalnej postawie ciała przy maszynie. Dzięki normie PN-EN 1005-4+A1:2009 [10] zapewniono wystarczającą przestrzeń operacyjną dla wszystkich segmentów ciała, tak aby mogły swobodnie wykonywać czynności robocze, a ruchy i siły rozwijane podczas pracy przez pracownika w przestrzeni roboczej, mogły odpowiadać ich naturalnym trajektoriom i szybkościom. Funkcjonalne wymiary zasięgów rąk zostały wyznaczone poprzez położenie środka chwytu dłoni względem baz odniesienia. Określone zostały wymiary zasięgu normalnego, które są oznaczone przerywaną linią, zaś poziom maksymalnego, wymuszonego pola zasięgu rąk przedstawiono cieńszą linią z kropkami (rys. 8) [2].



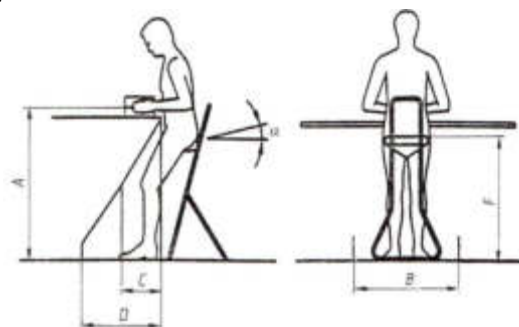
Rysunek 8. Zakres ruchów operatora wtryskarki [2]

Figure 8. Movement range of the injection moulding machine operator [2]

gdzie, bazy odniesienia to płaszczyzny [2]:

- pozioma 0 – na wysokości wyrostka barkowego,
- pionowa BP – czołowo tylna, styczna do pleców,
- pionowa BA – czołowa przednia do określania miar dystansu.

W celu zmniejszenia uczucia zmęczenia oraz uniknięcia długiego przebywania w niewygodnej dla pracownika pozycji, zapewniono operatorowi wtryskarki siedzisko podpierające, dzięki któremu wyeliminowano również ryzyko związane z ciągłą pracą stojącą przy maszynie (rys. 9, 10).



Rysunek 9. Pozycja stojąca z podparciem – wymiary [9]

Figure 9. Standing position with support – dimensions [9]

gdzie [2]:

A - 123,5 cm – wysokość pracy,

B - 35,6 cm – szerokość przestrzeni dla kończyn dolnych,

C - 29,7 cm – głębokość przestrzeni dla kończyny dolnej na wysokości kolana,

D - 45,9 cm – głębokość przestrzeni dla kończyny dolnej na wysokości kostki,

F - 72,6 cm – wysokość siedziska podpierającego

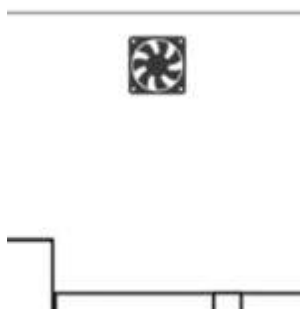
$\alpha$  - 128 ° – kąt niecki siedziska.



Rysunek 10. Dodatkowe siedzisko podpierające

*Figure 10. Additional support seat*

Przy projektowaniu otoczenia roboczego wokół stanowiska pracy operatora wtryskarki w celu ochrony jego zdrowia zamontowano na ścianach wentylatory, które usuwają pył powstały w procesie wykonywania czynności roboczych (rys. 11) [7].



Rysunek 11. Zastosowane wentylatory na stanowisku pracy

*Figure 11. Applied workstation fans*

Intensywność światła ma bardzo duży wpływ nie tylko na bezpieczeństwo pracy, ale także jej efektywność. Pracownikowi zapewniono również zgodnie z normą PN-EN 12464-1:2022-01 [11], równomierne oświetlenie o dużej powierzchni, szerokim kącie padania i o średnim poziomie natężenia (500 lx) (rys. 12) [11].



Rysunek 12. Zastosowane oświetlenie nad stanowiskiem pracy  
*Figure 12. Applied lighting above the workplace*

Aby w razie niebezpieczeństwa zapewnić operatorowi wtryskarki pracującemu przy swoim stanowisku szybkie i sprawne wydostanie się z obiektu zagrażającego jego życiu zaprojektowano znaki bezpieczeństwa. Zostały zamieszczone na odpowiedniej wysokości w zasięgu wzroku człowieka tj. według 95 cm 173,4 cm (rys. 13) [2, 7].



Rysunek 13. Zastosowane znaki bezpieczeństwa  
*Figure 13. Safety signs used*

#### 4. PODSUMOWANIE

W niniejszym opracowaniu przedstawiono metodologię projektowania ergonomicznego i bezpiecznego stanowiska pracy z uwzględnieniem cech antropometrycznych człowieka. Posługiwanie się danymi antropometrycznymi w procesie planowania stanowiska pracy jest jednym z podstawowych zagadnień ergonomii. Projektując miejsce robocze należy uwzględnić rodzaj wykonywanej na nim pracy oraz wszelkie możliwości psychofizyczne pracowników. Na etapie planowania stanowiska pracy należy przeanalizować i w miarę możliwości jak najbardziej zminimalizować potencjalne ryzyka wynikające bezpośrednio z wykonywania pracy na danym stanowisku. Przystosowanie przestrzeni roboczej ma ogromne znaczenie dla zdrowia oraz wydajności pracownika, dlatego też powinno to być nadrzędnym priorytetem dla projektanta przyszłego stanowiska pracy.

W artykule zaprojektowano ergonomiczne i bezpieczne stanowisko robocze operatora wtryskarki, uwzględniając przy tym wszystkie niezbędne kryteria wyszczególnione powyżej. Biorąc pod uwagę polskie przepisy prawne, wysokość pomieszczenia roboczego operatora maszyny do przetwórstwa tworzyw sztucznych wyniosła 3,3 m, jego szerokość 9 m, a głębokość 1,9 m, dając  $\pm 56$  m<sup>3</sup> objętości przestrzeni roboczej. Uwzględniając cechy antropometryczne człowieka, umiejscowiono płaszczyznę roboczą stanowiska pracy na wysokości 123,5 cm. Zapewniono pracownikowi wymiar dostępu umożliwiającą dostęp całego



ciała w celu poziomego przemieszczania się do przodu w pozycji wyprostowanej w wymiarze 198 cm, oraz wymiar dostępu umożliwiający dostęp całego ciała w celu poziomego przemieszczania się do przodu w pozycji wyprostowanej bokiem w wymiarze 44,2 cm. Zaprojektowany został dodatkowo wymiar dostępu rąk do maszyny, aby umożliwić operatorowi możliwość konserwacji urządzenia, w wymiarze 10,6 cm x 25,1 cm x 36,2 cm. Aby stanowisko pracy było bezpieczne, zastosowano konstrukcję ochronną w strefie niebezpiecznej dla stóp w wysokości 123,5 cm x 30 cm. Pomieszczenie robocze zostało wyposażone w znaki bezpieczeństwa, które zostały umiejscowione na linii wzroku pracownika tj. 173,4 cm. Podczas projektowania stanowiska pracy dla operatora wtryskarki zadbano dodatkowo o prawidłowe oświetlenie oraz wentylację pomieszczenia.

## LITERATURA

1. Strona internetowa: <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/antropometria;3870014.html> (dostęp z dnia 14.11.2020).
2. W. Horst (red.), Ergonomia z elementami bezpieczeństwa pracy – przewodnik do ćwiczeń laboratoryjnych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2006.
3. J. Charzewska, A. Kopiczko, M. Łopuszańska-Dawid, N. Bieńko, A. Pastuszek: Przewodnik do ćwiczeń z antropologii. Cz.1. Wydanie II poprawione i rozszerzone. Wydawnictwo Akademia Wychowania Fizycznego Józefa Piłsudskiego w Warszawie, Warszawa, 2019.
4. A. Gedliczka, Atlas miar człowieka – dane do projektowania i oceny ergonomicznej, CIOP, Warszawa, 2001.
5. P. Nowak, Dostosowywanie środowiska pracy 315[01].Z2.01, Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom, 2007, strona internetowa: [http://edukacja.darsa.pl/1/16/Technik\\_bezpieczenstwa\\_i\\_higieny\\_pracy\\_315\[01\].Z2.01\\_u.pdf](http://edukacja.darsa.pl/1/16/Technik_bezpieczenstwa_i_higieny_pracy_315[01].Z2.01_u.pdf), (dostęp z dnia 06.01.2021).
6. Norma PN-EN ISO 26800:2011 Ergonomia - Podejście ogólne, zasady i pojęcia, PKN, Warszawa, 2011.
7. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (Dz.U. 2003 nr 169 poz. 1650).
8. Norma PN-EN ISO 20430:2020-12 Maszyny do przetwórstwa tworzyw sztucznych i mieszanek gumowych -- Wtryskarki -- Wymagania bezpieczeństwa, PKN, Warszawa, 2020.
9. Norma PN-EN ISO 14738:2009 Bezpieczeństwo maszyn -- Wymagania antropometryczne dotyczące projektowania stanowisk pracy przy maszynie, PKN, Warszawa, 2009.
10. Norma PN-EN 1005-4+A1:2009 Bezpieczeństwo maszyn -- Możliwości fizyczne człowieka -- Część 4: Ewaluacja pozycji pracy i ruchów w relacji do maszyny, PKN, Warszawa, 2009.
11. Norma PN-EN 12464-1:2022-01 Światło i oświetlenie -- Oświetlenie miejsc pracy -- Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach, PKN, Warszawa, 2022.

## Fabrication of polymer-clay nanocomposite sponge as an adsorbent for water treatment - MB dye

Y.M. Tsekpo <sup>a,c</sup>, A. Appiah <sup>b</sup>, M. Adamiak <sup>b</sup>, E. Annan <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Student of the Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering

<sup>b</sup> Materials Testing Laboratory, Faculty of Mechanical Engineering, Silesian University of Technology

<sup>c</sup> Department of Materials Science and Engineering, School of Engineering Sciences, College of Basic and Applied Sciences, University of Ghana, Accra, Ghana  
email: yt900528@student.polsl.pl

**Abstract:** An eco-friendly sugar templating process was used to generate porous bentonite/polydimethylsiloxane (PB) and porous magnetite nanoparticles/bentonite/polydimethylsiloxane (PBNP) sponge-like adsorbents in this study. During the infiltration of PDMS solution into the sugar template in the vacuum chamber, bentonite and magnetite particles were integrated on the surface of the PDMS, and the porous structure was generated during the leaching out of sugar particles in water. Methylene blue dye (MB dye) was effectively removed from wastewater using the as-prepared composite sponges as an adsorbent. The removal efficiencies of the composite PBNP and PB were ~91% and ~85%, respectively.

**Keywords:** Adsorption, Bentonite, Polydimethylsiloxane (PDMS), Magnetite nanoparticles, Sponge, Methylene blue dye

### 1. INTRODUCTION

The advent of the 21st century saw the adoption of sustainable development goals. Key among these goals is the provision of potable water and sanitation; which is important to the quality of human life across the globe (SDG 6). Water scarcity has become common in these times owing to the increase in population and the limited water resources available to satisfy our needs. Currently, only 0.007% of the 2.5% freshwater sources are available for human activities [1]. Contaminants introduced into freshwater systems must be reduced to acceptable levels by statutory bodies to conserve the limited freshwater resources [2, 3]

Textile industry wastewater is the most contaminated, with serious implications for freshwater bodies all over the world, including Ghana [4]. The main contaminant in textile industry wastewater is a dye, and they are present in concentrations that induce colourization of the effluent. Aside the textile industry, dyes are used in a variety of industries, including leather

tanning, cosmetics, paint, paper, and pulp, and are present in significant quantities in their effluents. Dyes in freshwater bodies are concerning since they are detectable in limited amounts and are difficult to remove. Low sunlight penetration and decreased photochemical activity are common consequences, putting aquatic life at risk [2]. The use of dyes and their related chemicals makes effluents poisonous, carcinogenic, and mutagenic, as well as the biochemical and chemical oxygen demand on aquatic life in freshwater, which is harmful to humans. As a result, dye removal for industrial wastewater is needed before disposal into the environment.

The development of reliable and cost-effective methods for removing dyes from wastewaters has progressed over time [5]. Coagulation, filtration, oxidation, advanced oxidation technique, electrochemical, biological treatment, ion exchange, and adsorption are some of the latest methods for removing dye as a contaminant [6]. Adsorption is showing much promise as the technique of choice due to its ease. Scientific reports on various adsorbents for dye removal have been recorded yearly. Notable adsorbents include clays, zeolite, activated carbon from solid waste, siliceous material and bioadsorbents [7, 8]. The major drawback with using these adsorbents though they have good removal efficiencies is the residue of the adsorbent that remain in the water after adsorption is achieved [9]. The development of suitable composites to address this problem has been growing in the scientific community and the composite that seems to show promise is polymer-clay nanocomposites [10].

Polymers are increasingly being used as a matrix to retain adsorbent materials for environmental remediation applications due to their low cost and ease of reusability. Due to its unique chemical and physical qualities, polydimethylsiloxane (PDMS) is a desirable material for a variety of applications, including material engineering and biomedical science [11]. Transparent, chemically inert, elastic, non-toxic, non-flammable, hydrophobic in nature, inexpensive, and highly flexible, PDMS is an appealing material [12]. Because of their high oil adsorption capacity and porosity, porous PDMS structures have recently attracted a lot of attention in the oil-water separation field [13, 14]. The physical adsorption of methylene blue dye was achieved using porous PDMS containing bentonite and magnetite nanoparticles.

This study focuses on fabricating and characterizing a polymer-clay composite sponge that removes methylene blue dye from water. This sponge was produced from polydimethylsiloxane (PDMS), bentonite clay and magnetite nanoparticles and was subjected to a batch adsorption test to ascertain their dye removal efficiency. This research establishes the use of polymer - clay/doped composites for removal of cationic dyes from water.

## 2. Materials and methods

### 2.1 Sample Preparation

Without any further purification, bentonite clay powder (<50 nm, Sigma-Aldrich) was used as received. Green synthesis was also utilized to make iron oxide ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) nanoparticles. Dow Corning Corporation provided the Polydimethylsiloxane (PDMS) prepolymer and curing agent (Sylgard 184). A nearby convenience store provided the sugar particles

The sugar template approach was used to make pure PDMS sponges, Bentonite Clay/ PDMS sponges (PB) and Bentonite Clay/Iron oxide ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) nanoparticles/PDMS (PBNP) sponges. A sugar template was fabricated by kneading 5.6 g of sugar particles into a 1 cm  $\times$  1 cm  $\times$  1 cm mould and then sun drying it. To get the final sugar template, the sugar block was carefully removed from the mould. A 10:1 mixture of PDMS prepolymer and curing agent was mixed up and poured over the final sugar template. The PDMS filled template was achieved through degassing in a vacuum for 1 hour and then cured overnight. The sugar/PDMS template was then immersed in water at 80 °C for 2 hours to dissolve the sugar and create a sponge-like

structure. After washing with deionized water and drying in an oven at 100 °C, the final PDMS sponge-like structure was achieved as seen see Figure 1c.

In a similar experiment to manufacture sponges, PB and PBNP sponges, bentonite clay and iron oxide ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) were mixed uniformly with sugar particles to make sugar/bentonite clay and sugar/bentonite clay/iron oxide ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) template. To make the sugar/bentonite clay template 0.4 g of bentonite clay was combined with 5.6 g of sugar, respectively. 8 mg of iron oxide ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) nanoparticles were added to the sugar/bentonite clay template preparation for the sugar/bentonite clay/ iron oxide ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) template. To make the final PB and PBNP sponges, the other steps were similar. Using an environmentally friendly sugar template approach, three-dimensional porous sponge-like PDMS, PB and PBNP composites were created. A Jenway 6705 UV-vis spectrophotometer (Cole-Parmer, Staffordshire, UK) was used to measure the maximum absorbance value at 668 nm for methylene blue dye solutions with concentrations of 5 mg/L. The wavelength of 668 nm corresponds to methylene blue's maximum absorption.

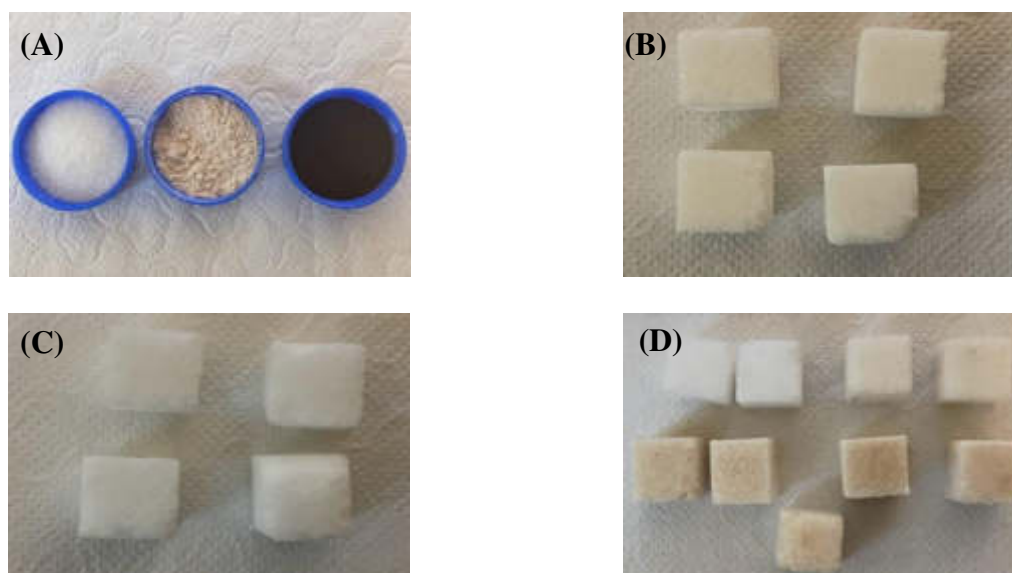


Figure 1. Images of (A) powders used in the preparation of sponge L-R Sugar, Bentonite, Magnetite Nanoparticles respectively, (B) Powdered sugar that has been kneaded into cubes, (C) Porous PDMS structure and (D) Fabricated sponges

## 2.2 Adsorption Studies

The adsorption studies were conducted in 250 mL beakers with a sponge and a 50 mL liquid volume, with an initial methylene blue concentration of 5 mg/L. To prevent photodegradation of the methylene blue solution, wrap the beaker with tin foil and store it in a dark place. Samples of the solution are taken using a syringe after an adsorption time of 1 hour to 5 hours, and the maximum absorbance at 668 nm is evaluated. Adsorption studies were repeated for various adsorption times, and average removal efficiencies were recorded. To explain the sponges' dye removal potential and methodology, the percentage removal of sponges was calculated. The experiment was repeated three times for each set of sponges, with the average recorded. The experiment was carried out at a constant temperature of  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ . In terms of batch adsorption, all other parameters of the experiment are the same.

$$A\% = \left( \frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

where  $A\%$  denotes the amount of methylene blue adsorbed from the solution,  $C_0$  is the initial concentration of dye and  $C_t$  is the final concentration of the dye solution and the other parameters are as in equation (1).

### 2.3 Characterization

The nature of the bonds found in the sponge was studied using a Spectrum Two FTIR Spectrometer by PerkinElmer (Perkin-Elmer, Waltham, MA, USA).

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1 FTIR Characterization

The FTIR spectra of the materials utilized in the sponge's preparation, as well as the fabricated sponge, were collected. This was done to better understand the nature of the linkages that existed before and after fabrication. Figure 2 shows the FTIR spectra of bentonite, sugar, magnetite nanoparticles and PDMS. This was done to get a better understanding of the materials' chemistry before they were fabricated.

The bands for the raw bentonite include an O-H stretching caused the band at  $3615 \text{ cm}^{-1}$ , while interlayer and intralayer H-bonded O-H stretching caused the broad band at  $3404 \text{ cm}^{-1}$ . The siloxane (-Si-O-Si-) group stretching may be responsible for the band at  $1634 \text{ cm}^{-1}$ . This suggests that the hydroxyl connection between the octahedral and tetrahedral layers is possible. The asymmetric OH stretch (deformation mode) of water produces a very acute and intense band at  $1634 \text{ cm}^{-1}$ , which is a structural feature of the mineral. Al-OH is responsible for the band at  $976 \text{ cm}^{-1}$  and  $662 \text{ cm}^{-1}$  respectively [15].

The primary absorption peaks of PDMS were detected at wavenumbers of  $2962 \text{ cm}^{-1}$  for the C-H bond stretching in  $\text{CH}_3$ ,  $1259 \text{ cm}^{-1}$  for the  $\text{CH}_3$  bond in the symmetric bending in Si- $\text{CH}_3$ ,  $1018 \text{ cm}^{-1}$  for the Si-O-Si bond, and  $793 \text{ cm}^{-1}$  for  $\text{CH}_3$  rocking in the Si- $\text{CH}_3$  bond. The food-grade sugar detected peaks at wavenumbers of  $3558$ ,  $3325$ ,  $2924$ ,  $1058$  and  $997 \text{ cm}^{-1}$ . Stretched bonds of the OH and phenol groups were found to be present at  $3558$  and  $3325 \text{ cm}^{-1}$  respectively. Methyl group bonds were detected at  $2924 \text{ cm}^{-1}$  whereas secondary alcohols were detected at  $1058 \text{ cm}^{-1}$ . Mono sub alkene C-H bond observed at  $997 \text{ cm}^{-1}$  [16]. The Fe-O present in the magnetite nanoparticles is indicated at  $540 \text{ cm}^{-1}$  wavelengths [17].

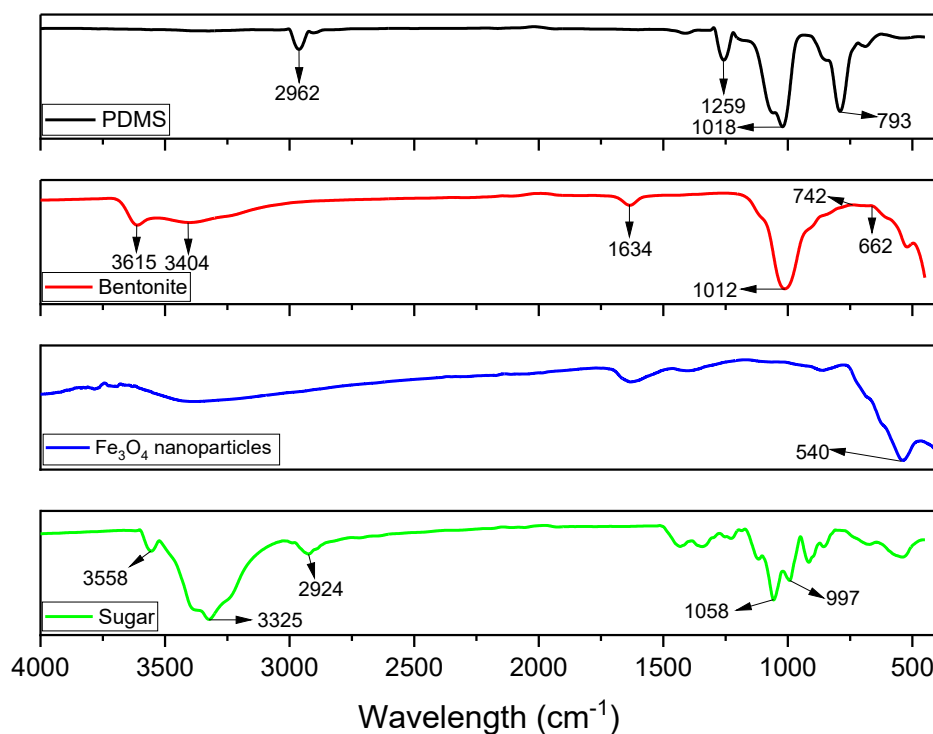


Figure 2. FTIR of materials used in the sponge fabrication

After the sponges were fabricated FTIR analysis was performed to ascertain the complete removal of the pore-forming agent i.e. food-grade sugar and also understand the bonds present in the newly formed composite. Figure 3 shows the FTIR spectra of the control, PB and PBNP samples fabricated. From the spectra displayed no wavelength corresponding to the function group of food-grade sugar is present hence this proves that it was completely removed in the leaching process. The interaction between the clay and polymer led to the presence of new peaks and hence evidence of a new material being formed. Peaks were observed at wavelengths 3353, 2962, 1634, 1259, 1009, 787, 690 and 516 cm<sup>-1</sup>. However, the control sample yield peaks similar to that of pure PDMS since it was set off as the control for the experiment. Comparing the peaks of the new composites to that of a known database the following interpretation was obtained from the peaks[18]. The peak of 3353 cm<sup>-1</sup> is consistent with OH stretched bond and is evidence of water molecules present in the bentonite structure. 2962 cm<sup>-1</sup> shows evidence of a C-H bond stretching in CH<sub>3</sub> and is consistent with the PDMS structure. The occurrences of peaks at 1634 and 1009 show the presence of the Si-O-Si bond. 1259 cm<sup>-1</sup> is correspondent to the CH<sub>3</sub> bond in the symmetric bending in Si-CH<sub>3</sub>. 787 cm<sup>-1</sup> peak shows the presence of CH<sub>3</sub> rocking in the Si-CH<sub>3</sub> bond. 690 peak shows the presence of the Al-OH bond. 516 cm<sup>-1</sup> is evidence of a Fe-O bond in the material an indication of magnetite nanoparticles present.

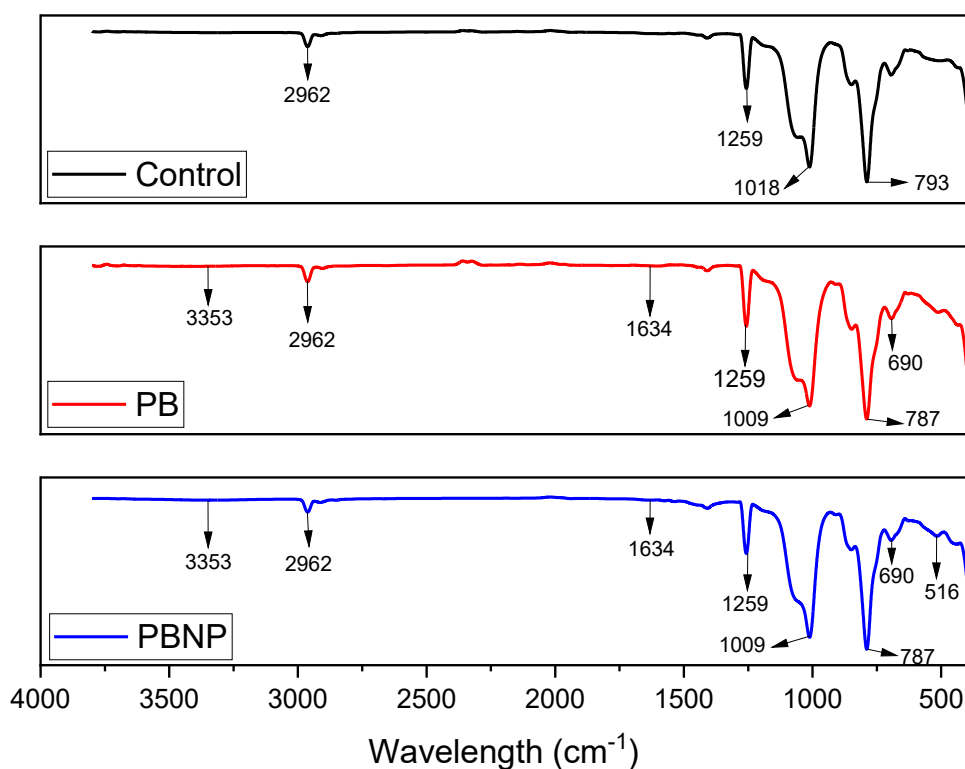


Figure 3. FTIR spectra of fabricated sponges

### 3.2 Effect of Contact Time on MB Adsorption

The impact of contact time on MB dye's binding processes and equilibrium times is crucial since it is heavily impacted by characteristics such as adsorbent pore structure, adsorbent particle size or surface area, and adsorbent concentration. Figure 4 shows the proportion of MB dye removal as a function of contact time for the composite sponge as estimated from Eq. (1). It was discovered that as contact duration rises, the amount of methylene blue dye removed increases. The equilibrium contact time was considered to be 5 hours for this study. Removal in PB and PBNP is seen to increase sharply and rapidly in the first two hours. The removal at this point was 76.3% and 77.1 % for PB and PBNP respectively. This is due to the presence of a large number of vacant sites initially, at the surface for dye adsorption. After 3 hours the removal of PB seems to have plateaued with a final removal efficiency of 84.5% after the study period. Due to repulsive forces between methylene blue adsorbed on the surface of PB and the reduction of active sites for adsorption to take place, it becomes difficult to occupy unoccupied sites. [19, 20]. However, the PBNP sponge continues to increase until the fifth hour to give final removal efficiency of 90.8%. after the period. The continued increase in adsorption of MB dye can be attributed to the presence of magnetite nanoparticles. These particles provided added active sites for adsorption due to their large surface area [21, 22]. This caused a 6.5% increase in removal effectiveness between the PBNP and PB sponge.

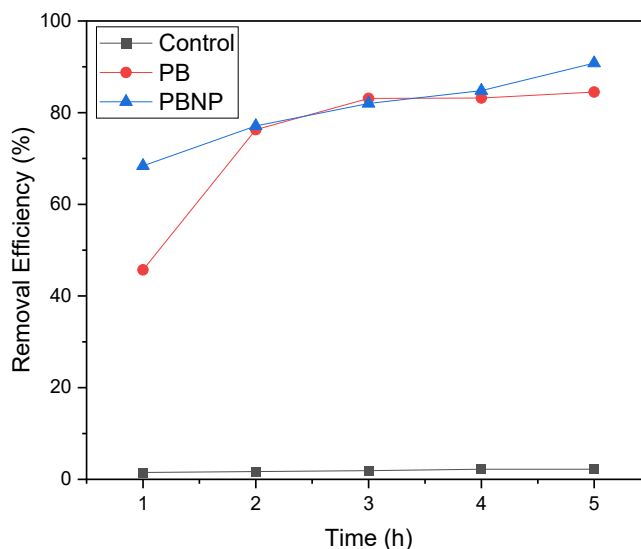


Figure 4. A plot of removal efficiency against time

#### 4. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

This study shows that utilizing a polymer-clay composite with magnetite nanoparticles, it is possible to remove methylene blue dye from water (PB and PBNPs). After 5 hours of contact time, the maximum percentage removal for PBNPs and PB adsorbents was 90.8% and 84.6%, respectively. Magnetite nanoparticles are used to demonstrate an increase in removal efficiency. This research clearly demonstrates a practical and sustainable technique for designing filtering systems to remove MB dye from industrial wastewater using readily available and inexpensive components. Though this study proves the removal of MB dye by the fabricated adsorbent sponge, the adsorption kinetics and isotherms need to be studied and further looked at in future studies to determine the mechanism of adsorption.

#### ACKNOWLEDGEMENT

Appreciation is extended to Prof. Tomasz Jarosz (Faculty of Chemistry, Silesian University of Technology), Prof. Agnieszka Stolarczyk (Faculty of Chemistry, Silesian University of Technology) and Patryk Janasik (Faculty of Chemistry, Silesian University of Technology) for their assistance and technical support.

#### REFERENCES

1. KS, M.M. and P.K.M.P.J. Athrey, *Study on Desalination and controlling of heavy metal Ion pollution using Graphene oxide*. 2018.
2. Ruan, W., et al., *Removal of dyes from wastewater by nanomaterials: a review*. 2019. 10(1): p. 09-20.
3. Libhaber, M. and Á. Orozco-Jaramillo, *Sustainable Treatment and Reuse of Municipal Wastewater: For decision makers and practising engineers*. 2012: Iwa publishing.



4. Katheresan, V., J. Kannedo, and S.Y. Lau, *Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2018. 6(4): p. 4676-4697.
5. Berber, M.R., *Current advances of polymer composites for water treatment and desalination*. Journal of chemistry, 2020. 2020.
6. Kumara, P.S., et al., *A critical review on recent developments in the low-cost adsorption of dyes from wastewater*. 2019. 172: p. 395-416.
7. Mohammed, M., A. Shitu, and A. Ibrahim, *Removal of methylene blue using low cost adsorbent: a review*. Res. J. Chem. Sci. ISSN, 2014. 2231: p. 606X.
8. Rafatullah, M., et al., *Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: A review*. Journal of Hazardous Materials, 2010. 177(1): p. 70-80.
9. Gupta, V., *Application of low-cost adsorbents for dye removal—a review*. Journal of environmental management, 2009. 90(8): p. 2313-2342.
10. Buruga, K., et al., *A review on functional polymer-clay based nanocomposite membranes for treatment of water*. Journal of Hazardous Materials, 2019. 379: p. 120584.
11. Zhu, D., S. Handschuh-Wang, and X. Zhou, *Recent progress in fabrication and application of polydimethylsiloxane sponges*. Journal of Materials Chemistry A, 2017. 5(32): p. 16467-16497.
12. Miranda, I., et al., *Properties and applications of PDMS for biomedical engineering: A review*. Journal of Functional Biomaterials, 2021. 13(1): p. 2.
13. Yu, C., et al., *Facile preparation of the porous PDMS oil-absorbent for oil/water separation*. Advanced Materials Interfaces, 2017. 4(3): p. 1600862.
14. Choi, S.-J., et al., *A Polydimethylsiloxane (PDMS) Sponge for the Selective Absorption of Oil from Water*. ACS Applied Materials & Interfaces, 2011. 3(12): p. 4552-4556.
15. Annan, E., et al., *Synthesis and characterization of modified kaolin-bentonite composites for enhanced fluoride removal from drinking water*. Advances in Materials Science and Engineering, 2021. 2021.
16. Lee, J., et al., *Effect of thermal treatment on the chemical resistance of polydimethylsiloxane for microfluidic devices*. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2013. 23(3): p. 035007.
17. Asimeng, B.O., et al., *Characterization and Inhibitory Effects of Magnetic Iron Oxide Nanoparticles Synthesized from Plant Extracts on HeLa Cells*. International Journal of Biomaterials, 2020. 2020: p. 2630735.
18. Vahur, S., et al., *ATR-FT-IR spectral collection of conservation materials in the extended region of 4000-80 cm<sup>-1</sup>*. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2016. 408(13): p. 3373-3379.
19. Zare, K., et al., *Enhanced removal of toxic Congo red dye using multi walled carbon nanotubes: kinetic, equilibrium studies and its comparison with other adsorbents*. Journal of Molecular Liquids, 2015. 212: p. 266-271.
20. Arora, C., et al., *Iron based metal organic framework for efficient removal of methylene blue dye from industrial waste*. Journal of Molecular Liquids, 2019. 284: p. 343-352.
21. Fan, W., et al., *Hybridization of graphene sheets and carbon-coated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles as a synergistic adsorbent of organic dyes*. Journal of Materials Chemistry, 2012. 22(48): p. 25108-25115.
22. Othman, N.H., et al., *Adsorption kinetics of methylene blue dyes onto magnetic graphene oxide*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2018. 6(2): p. 2803-2811.

## Analýza zvaru na poškodenom dne PHM zásobníka

Natália Višňovská<sup>a\*</sup>, Radoslav Koňár<sup>b</sup>, Lenka Kuchariková<sup>a</sup>, Eva Tillová<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra materiálového inžinierstva, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovak Republic

<sup>b</sup> Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra technologického inžinierstva, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovak Republic

\*email: visnovska4@stud.uniza.sk

**Abstract:** Článok sa zaoberá analýzou zváraného PHM zásobníka používaného v petrochemickom priemysle. Analýza spočívala vo vyhodnotení chemického zloženia, makro a mikroskopického hodnotenia jednotlivých častí zvarov z dna zásobníka vyrobeného technológiou zvárania pod tavivom, zváraním na neodstrániteľnú kovovú podložku.

**Keywords:** petrochemický priemysel, potrubia, plynovody, zváranie

### 1. ÚVOD

Pri návrhu technologického postupu zvárania v petrochemickom priemysle, je potrebné brať do úvahy špecifiká skladovaných ropných produktov [1-2]. Ropa je horľavá kvapalina, ktorá je tvorená zmesou uhl'ovodíkov, najmä alkánov, nafténov, arénov a polárnych zlúčenín. Podľa literatúry, môže mať ropa plynnú a tuhú formu, aj keď bežne sa označuje iba ako kvapalná [2]. Vplyv roztokov kyslých plynov CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>S je problematický v tom, že kyslé plyny môžu ovplyvniť materiál a zmeniť jeho mikroštruktúru. Kyslosť roztokov týchto plynov nie je taká ako u roztokov silných kyselín, a preto v niektorých prípadoch, sú ocele a liatiny pre tieto prostredia použiteľné. Napr. v roztokoch kyseliny uhličitej prebieha korózia s vodíkovou depolarizáciou, akonáhle pH roztoku klesne vďaka koncentráciám CO<sub>2</sub> pod hodnotu 4.

Rýchlosť korózie ocele a liatiny, je závislá na kyslosti roztoku, určená koncentráciou rozpúšťaného oxidu uhličitého. Preto v roztokoch nasýtených oxidom uhličitým za tlaku, najmä pri vyššej teplote, je korózna rýchlosť už neúnosne vysoká. Za prítomnosti kyslíka, môže dochádzať k zmiešanej depolarizácii, takže korózia v roztokoch oxidu uhličitého a kyslíku je ešte väčšia.

Pri pôsobení vodných roztokov oxidu uhličitého na sivú liatinu, dochádza k prednostnému rozpúšťaniu železa zo zliatiny, takže na povrchu zostávajú grafitové lupienky spojené vzájomne tuhými koróznymi produktami železa. Pri tomto selektívnom napadnutí, označovanom ako spongióza, nesprávne niekedy aj grafitizácia, sa zdanlivo nemení vnútorný rozmer napadanej súčiastky [3-4].

## 2. EXPERIMENTÁLNY MATERIÁL

Pre analýzu zvarov sa použil 40 rokov prevádzkovaný PHM zásobník. Analyzovaný zvar bol odobratý z poškodeného dna PHM zásobníka (Obr. 1), ktorý bol zváraný technológiou zvárania pod tavivom, zváraním na neodstrániteľnú kovovú podložku. Hrúbka steny materiálu PHM zásobníka bola 8 mm. Základným materiálom zásobníka podľa STN normy oceľ 11 353.1. Chemické zloženie a vybrané mechanické vlastnosti sú uvedené v tab. 1.

Priemer dna zásobníka bol 13 500 mm a výška 10 000 mm. Schéma predpokladanej úpravy zvarových plôch pri zváraní je na Obr. 2. Odobratá vzorka pre analýzu mala rozmery 445 x 300 x 8 mm. Podložka, ktorá bola použitá pre podloženie zvaru pri zváraní mala prierez 35 x 5 mm (Obr. 3).

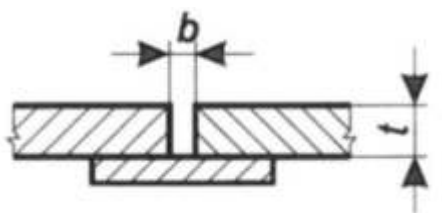


Obrázok 1. Slovnaft - dno nádrže  
Figure 1. Slovnaft - tank bottom

Tabuľka 1. Chemické zloženie a mechanické vlastnosti ocele 11 353.1, podľa materiálového listu

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of 11353.1 alloy, according to delivery note

| Hmotnostný obsah prvku v % |           | Mechanické vlastnosti     |               |
|----------------------------|-----------|---------------------------|---------------|
| C                          | Max 0,18  | Medza klzu                | 195 - 637 MPa |
| P                          | Max 0,050 | Medza pevnosti            | 373 - 980 MPa |
| S                          | Max 0,050 | Ťažnosť A <sub>5</sub>    | 6 - 31 %      |
| P+S                        | Max 0,090 | Tvrdosť HB <sub>max</sub> | 113 - 290     |



Obrázok 2. Predpokladaná geometria zvaru pred zváraním ( $b \leq 4$  mm,  $t = 8$  mm)  
Figure 2. Assumed weld geometry before welding ( $b \leq 4$  mm,  $t = 8$  mm)



Obrázok 3. Výrez dna nádrže PHM zásobníka zo spoločnosti Slovnaft, a.s. (vrchná strana vzorky - vľavo, spodná strana vzorky - vpravo)

Figure 3. Cutout of the bottom of the fuel tank from the company Slovnaft, a.s. (upper side of the sample - left, lower side of the sample - right)

### 3. METODIKA EXPERIMENTOV

Na odobratom zvare, boli vykonané nasledovné skúšky:

- *Analýza chemického zloženia* - v základnom materiáli a vo zvarovom kove, spektrálnou analýzou pomocou prístroja BELEC COMPACT PORT (obr. 4).



Obrázok 4. Analýza chemického zloženia materiálu

Figure 4. Analysis of chemical composition of material

- *Makroštruktúrna analýza.*

Zo vzorky (obr. 3) boli odobraté 2 výrezy v priečnom smere na os zvaru. Pre prípravu vzoriek na makroštruktúrny rozbor, boli vzorky prebrúsené, preleštené a následne leptané 4 % Nitalom. Makroštruktúra, bola nasnímaná digitálnym mikroskopom Keyence VHX 5000.

## 4. VÝSLEDKY A DISKUSIA

### 4.1. Analýza chemického zloženia

Analýza chemického zloženia základného materiálu potvrdila menšie rozdiely v spájaných druhoch materiálu (tabuľka 2 a 3). Možno však pozorovať, že analýza chemického zloženia zvaru (tabuľka 4) nepreukázala výrazné rozdiely v chemickom zložení oproti základným materiálom.



Obrázok 5. Miesta realizácie spektrálnej analýzy

Figure 5. The places of spectral analysis

Tabuľka 2. Spektrálna analýza základný materiál č.1

Table 2. The chemical composition of material č. 1

| meranie | Hmotnostný obsah prvku v % |        |       |       |        |       |       |       |        |       |
|---------|----------------------------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|
|         | C                          | Si     | Mn    | Cu    | Al     | Cr    | Mo    | Ni    | Co     | CE    |
| 1       | 0,144                      | 0,002  | 0,389 | 0,010 | <0,001 | 0,045 | 0,016 | 0,037 | <0,001 | 0,220 |
| 2       | 0,120                      | <0,001 | 0,375 | 0,009 | <0,001 | 0,018 | 0,011 | 0,026 | <0,001 | 0,190 |
| 3       | 0,151                      | 0,002  | 0,386 | 0,012 | <0,001 | 0,056 | 0,017 | 0,045 | 0,005  | 0,230 |
| Priemer | 0,138                      | 0,002  | 0,383 | 0,010 | <0,001 | 0,039 | 0,015 | 0,036 | 0,002  | 0,220 |

Tabuľka 3. Spektrálna analýza základný materiál č.2

Table 3. The chemical analysis of material 2

| meranie | Hmotnostný obsah prvku v % |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
|---------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|         | C                          | Si    | Mn    | Cu    | Al    | Cr    | Mo    | Ni    | Co    | CE   |
| 1       | 0,191                      | 0,117 | 0,415 | 0,077 | 0,021 | 0,151 | 0,024 | 0,083 | 0,007 | 0,31 |
| 2       | 0,141                      | 0,121 | 0,415 | 0,075 | 0,035 | 0,190 | 0,027 | 0,085 | 0,007 | 0,26 |
| 3       | 0,141                      | 0,118 | 0,42  | 0,074 | 0,028 | 0,172 | 0,026 | 0,081 | 0,005 | 0,26 |
| Priemer | 0,158                      | 0,119 | 0,417 | 0,075 | 0,028 | 0,171 | 0,026 | 0,083 | 0,006 | 0,28 |

Tabuľka 4. Spektrálna analýza z miesta zvaru  
**Table 4. The chemical analysis from the weld spot**

| meranie | Hmotnostný obsah prvku v % |       |       |       |       |       |       |       |       |                |
|---------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|
|         | C                          | Si    | Mn    | Cu    | Al    | Cr    | Mo    | Ni    | Co    | C <sub>E</sub> |
| 1       | 0,146                      | 0,418 | 1,495 | 0,076 | 0,047 | 0,261 | 0,037 | 0,11  | 0,006 | 0,47           |
| 2       | 0,082                      | 0,458 | 1,569 | 0,077 | 0,019 | 0,155 | 0,024 | 0,08  | 0,004 | 0,39           |
| 3       | 0,078                      | 0,423 | 1,448 | 0,078 | 0,006 | 0,092 | 0,019 | 0,069 | 0,009 | 0,35           |
| Priemer | 0,102                      | 0,433 | 1,504 | 0,077 | 0,024 | 0,169 | 0,027 | 0,086 | 0,006 | 0,40           |

#### 4.2 Makroštruktúrna analýza

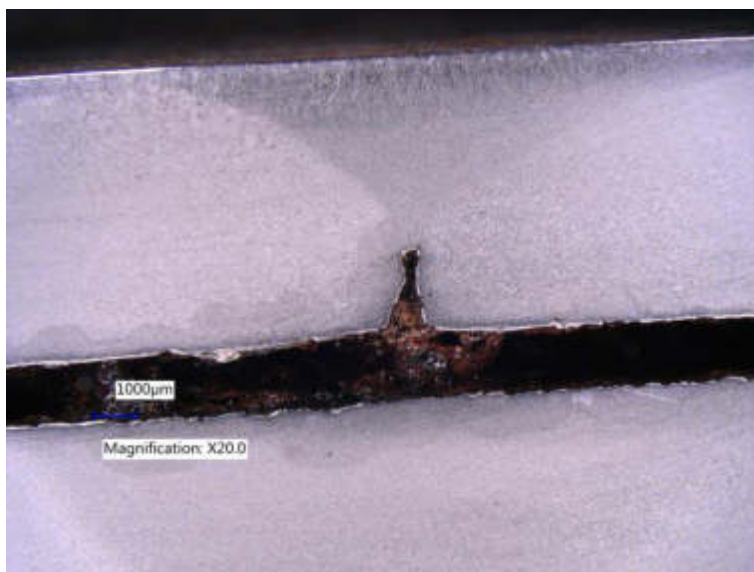
Z analýzy makroštruktúry základného materiálu v časti 1 (obr. 6), je možné konštatovať, že pri zostavovaní zvarového spoja, došlo v danom mieste k veľkému lineárnemu presadeniu. Pri zváraní došlo pravdepodobne k zatečeniu zvarového kovu do priestoru medzi presadeným materiálom a podložkou. Uprostred zvaru sa tak vytvorila veľká vertikálne orientovaná dutina.



Obrázok 6. Makroštruktúra materiálu v časti 1s časťou zvaru, lept. Nital  
*Figure 6. Makrostructure of material 1 with weld spot, etch. Nital*

V pravej časti makroštruktúry, môžeme pozorovať studený spoj, ktorý pravdepodobne vznikol počas prevádzky nádrže, vplyvom zmien zaťaženia dna nádrže, ku ktorým dochádza počas napúšťania a vypúšťania nádrže. Na makroštruktúre, nie je možné pozorovať prevýšenie zvaru, nakoľko bolo prevýšenie obrúsené po zváraní, ako požiadavka pri výrobe.

Makroštruktúra materiálu z časti 2 je dokumentovaná na obr. 7. Na makroštruktúre môžeme pozorovať, že pri zostavovaní zvarového spoja bola správne dodržaná šírka koreňovej medzery. Avšak, keďže bola koreňová medzera = 0 mm, tak nedošlo k prevareniu koreňa. Pri zváraní nedošlo k úplnému nataveniu zvarových plôch a vznikol neprevarený koreň s hĺbkou 2 mm.



Obrázok 7. Makroštruktúra materiálu v časti 2 s časťou zvaru, lept. Nital  
*Figure 7. Makrostructure of material 2 with weld spot, etch. Nital*

## 5. ZÁVER

Z analýzy chemického zloženia a hodnotenia makroštruktúry zvarových spojov, odobraných z poškodeného dna PHM zásobníka, vyplýva, že:

- neboli zistené výrazné rozdiely v chemickom zložení zvaru oproti základnému materiálu;
- uhlíkový ekvivalent  $C_E$  neprekročil hodnotu 0,4;
- v časti 1 bol analyzovaný studený spoj, ktorý pravdepodobne vznikol počas prevádzky nádrže, vplyvom zmien zaťaženia dna, ku ktorým dochádza počas napúšťania a vypúšťania nádrže;
- v časti 2 bol identifikovaný neprevarený koreň zvaru.

## PodĎakovanie

Príspevok vznikol v rámci riešenia spoločného slovensko-poľského študentského projektu TalentDetector 2022 a projektu KEGA 016ŽU-4/2020.

## LITERATÚRA

1. I. Hrivňák, Teória zvariteľnosti kovov a zliatin. Bratislava: Veda, vydavateľstvo SAV, 1989. ISBN 8022400165.
2. E. Hronček, Zváranie v chemickom strojárstve. Bratislava: Alfa, 1972.
3. I. Hrivňák, Zváranie a zvariteľnosť materiálov. s.l.: Citadella, 2013. ISBN 978-80-89628-18-6.
4. V. Leždík, a kol. Opravy plynovodných potrubí vykonávané technológiou zvarovania. 2020. ISBN 978-80-969599-3-8.

## Aspekty materiałowe i technologiczne w wytwarzaniu płyt gramofonowych

W. Wanczura <sup>a</sup>, A. Woszczak <sup>a</sup>, A. Ludwig <sup>a</sup>, A. Olszewska <sup>a</sup>, A. Barczyńska <sup>a</sup>,  
T. Słaboszewski <sup>b</sup>, A. Ziebowicz <sup>c</sup>, B. Ziębowicz <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Student/ka Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, SKN Materiałów Funkcjonalnych

<sup>b</sup> Studentka Wydział Inżynierii Biomedycznej, Politechnika Śląska

<sup>c</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

<sup>d</sup> Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Biomedycznej, Katedra Biomateriałów i Inżynierii Wyrobów Medycznych

**Streszczenie:** W artykule opisano najistotniejsze zagadnienia dotyczące płyt gramofonowych. Omówiono po krótku historię płyty gramofonowej oraz materiały, które na przestrzeni lat były używane do wytwarzania płyt. Dokonano również podziału płyt winylowych ze względu na czas, jakiego potrzebujemy do odsłuchania całego dźwięku zarejestrowanego na płycie. Dodatkowo omówiono mechanizm działania oparty na rowkach oraz dwie możliwe metody wytwarzania.

**Abstract:** The article describes the most important issues related to gramophone records. The history of the gramophone record and the materials that have been used in the production of records over the years are briefly discussed. The vinyl records were also divided according to the time needed to listen to the entire sound recorded on the disc. In addition, the groove-based mechanism of action and two possible manufacturing methods are discussed.

**Słowa kluczowe:** płyta gramofonowa, płyta winylowa, gramofon, poli(chlorek winylu), PVC.

### 1. WSTĘP

Wraz z upływem czasu i ogromnym rozwojem cywilizacji na przestrzeni wieków, ludzie w różnych dziedzinach poszukują wszelakich sposobów na to, aby w miarę możliwości ułatwić i umilić sobie życie. Dzieje się tak również w kwestii zapisu i odtwarzania dźwięku. Opracowano już wiele nośników dźwięku, dzięki którym możemy słuchać muzyki godzinami, bez żadnej manualnej ingerencji człowieka, związanej przykładowo z przewijaniem czy przełączeniem utworu. Pomimo dostępności całego szeregu różnych odtwarzaczy dźwięku, na wyróżnienie zasługuje jeden szczególnie. Mowa oczywiście o narodzonym z fonografu, sławnym gramofonie.



Gramofon jest urządzeniem ponadczasowym i dla wielu również sentymentalnym. Swoje początki miał w XIX wieku, a znajduje zastosowanie po dziś dzień jako odtwarzacz ulubionych dźwięków dla melomanów, kolekcjonerów i nie tylko, również dla miłośników dobrej muzyki, którzy są gotowi poświęcić udogodnienia jakie niosą za sobą chociażby popularne w dzisiejszych czasach platformy internetowe, służące do słuchania muzyki, na rzecz klimatu, jaki zapewnia gramofon.

Niemniej jednak sam gramofon, pomimo swojej wspaniałości nie jest w stanie działać nic. Abyśmy mogli cieszyć się dźwiękami z niego płynącymi, potrzebny jest nam pewien ciekawy krążek wykonywany z tworzyw sztucznych, zwany płytą gramofonową, bo to właśnie dzięki współpracy z nią z gramofonu rozprzestrzenia się muzyka.

Muzyka ta nie jest do końca zwyczajna. Dźwięk, który słyszymy za pomocą odtworzenia z płyty gramofonowej daje słuchaczowi czas błogiego odprężenia, nostalgii i pozwala bardzo głęboko wczuć się w muzykę. Dzieje się tak, gdyż nagrania na płytach gramofonowych dla ludzkiego ucha są cieplejsze, a co za tym idzie, po prostu przyjemniejsze od tego dźwięku jaki zapewniają nam inne nośniki.

## 2. RYS HISTORYCZNY

Wszystko zaczęło się w 1887 roku, kiedy to wynalazca gramofonu, Emil Berliner, opatentował pierwszą płytę gramofonową. Była to płyta z twardo wulkanizowanego kauczuku – ebonitu. Płyty z tego materiału wytwarzane były w dwóch rozmiarach: początkowo 5 cali, następnie 7 cali, a prędkość odtwarzania wynosiła 70 obrotów na minutę. Aktualnie takie płyty nie są łatwe do zdobycia.

Przez kolejne 10 lat płyty gramofonowe były udoskonalane i w ten sposób w 1897 roku do ich produkcji zaczęto używać pewnej odmiany żywicy. Była to żywica pozyskiwana z wydzieliny owadów żyjących w Tajlandii i Indiach – szelak. Zastosowanie szelaku, który charakteryzuje się mniejszą ziarnistością od swojego poprzednika pozwoliło, na częściową redukcję szumu, który niósł się w dźwięku wydobywanym z płyty ebonitowej [1]. Płyty szelakowe poza swoją kruchością i sporą masą miały jeszcze inną wadę, mianowicie był to materiał drogi, tak więc stare płyty odkupywano, mielono, przesiewano, a następnie używano ich do produkcji nowych. Przez ten zabieg wiele nagrań z przełomu wieku zostało bezpowrotnie zniszczone [2].

Materiałem, który sprawdził się w praktyce, z którego to ostatecznie do dziś wytwarzane są płyty gramofonowe jest poli(chlorek winylu) – PVC. PVC okazał się strzałem w dziesiątkę, gdyż dzięki swoim własnościom pozwolił jeszcze bardziej zredukować szum, a dodatkowo jest dość wytrzymały i lekki oraz bardzo tani.

## 3. MATERIAŁY

Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę materiałów, z jakich na przestrzeni lat były produkowane płyty gramofonowe.

### 3.1. Ebonit

Jest to tworzywo sztuczne, którego proces otrzymywania polega na wulkanizacji naturalnego lub sztucznego kauczuku. Należy do tworzyw kauczukowych z grupy duromerów. Ze względu na zawartość siarki wahającą się w przedziale 25-30% jest twardy, kruchy

i wytrzymały na ścieranie. Jest dobrym izolatorem, łatwy w obróbce mechanicznej, a dodatkowo charakteryzuje się odpornością na działanie czynników chemicznych [3].

### 3.2. Szelak

To odmiana żywicy naturalnej, będąca produktem rafinacji wydzieliny owadów z rzędu pluskwiaków żerujących na drzewach tropikalnych [4]. Znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach, na przykład w protetyce, przemyśle spożywczym, farmaceutycznym, jako barwnik oraz klej.

### 3.3. Poli(chlorek winylu) PVC

W przemyśle nazwa PVC odnosi się zarówno do czystego polimeru jak i tworzywa sztucznego, które oprócz polimeru zawiera modyfikatory oraz wypełniacze. Sprawiają one, że tworzywo sztuczne ma odpowiednie właściwości konstrukcyjne. Tworzywa sztuczne PVC charakteryzują się doskonałymi właściwościami dielektrycznymi. Ponadto PVC ma doskonałą odporność chemiczną oraz mechaniczną. PVC ze względu na swoje właściwości stosowane jest jako izolacja w przewodach audio, oraz elementy obudów [5].

## 4. PODZIAŁ PŁYT GRAMOFONOWYCH

Płyty gramofonowe możemy sklasyfikować ze względu na długość odtwarzanej muzyki. Wyróżniamy trzy najpopularniejsze typy płyt: LP (Long Play), EP (Extended Play) i Single. Na płytach LP, jak nazwa wskazuje, czas odtwarzania jest najdłuższy, wynosi zazwyczaj do 60 minut. Dlatego też ten rodzaj płyt uznawany jest za pełnowymiarowy album muzyczny. Single zawierają zazwyczaj po jednej piosence na obu stronach płyty, z czego jedna jest tym właściwym utworem, a druga pewnego rodzaju bonusem. Z kolei płyta EP jest czymś pośrednim pomiędzy dwoma poprzednimi. To ak zwany minialbum. W jej skład wchodzi kilka utworów, ale za mało by można było sklasyfikować ją jako pełnowartościowy album muzyczny [6].

### 4.1. Long Play

Płyty LP wydawane są na winylach o rozmiarze 12 cali (30cm) i odtwarzane są z prędkością 33 i 1/3 lub 45 obrotów na minutę.

### 4.2. Extended Play

Płyty te wydawane są w trzech wielkościach:

- płyty 7 (siódemki), których średnica to 17,5cm a prędkość odtwarzania wynosi 33 i 1/3 obrotów na minutę,
- płyty 10 (dziesiątki), których średnica jest równa 25cm a prędkość odtwarzania wynosi 45 obrotów na minutę,
- płyty 12 (dwunastki) - których średnica jest równa 30cm a prędkość odtwarzania wynosi 45 obrotów na minutę,

### 4.3. Single

Nagrywane na 7-calowych płytach (średnica 17,5cm), które odtwarzane są z prędkością 45 obrotów na minutę, jednakże dzisiejsze techniki tłoczenia płyt gramofonowych nie stronią również od nagrywania singli o średnicy 12 cali (30cm).

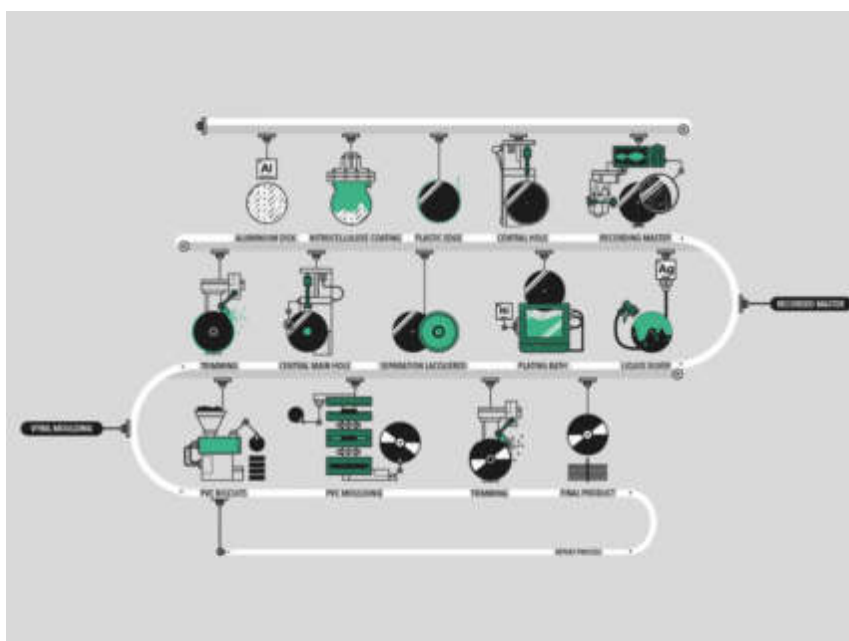
## 5. METODY WYTWARZANIA

Tłocznia to miejsce, w którym niepozorny winylowy granulat zamienia się w produkt, który olśniewa nas dźwiękiem i wyglądem. W tłoczni znajdziemy grono dźwiękowców, plastyków odpowiedzialnych za pożądany efekt wizualny oraz specjalistów z linii produkcyjnej, którzy przepuszczają jedynie idealne egzemplarze. Wyróżniamy dwie metody wytwarzania płyt winylowych. Pierwszą, tradycyjną jest wytwarzanie w matrycach. Jednak jest to proces długi i złożony. Dlatego z pomocą przychodzi do nas technologia DMM, która skraca czas wytwarzania.

### 5.1. Metoda w matrycach

Do tłoczni trafia już odpowiednio przygotowany materiał muzyczny ze studia nagrań. Trzeba przygotować matrycę zanim przystąpimy do regularnej produkcji winyli. Wszystko zaczyna się w studiu nagrań od wycięcia płyty lakierowanej - jej średnica to zazwyczaj 14 cali. Umieszcza się ją na specjalnej maszynie, przypominającej bardzo rozbudowany gramofon. Charakteryzuje się ona przede wszystkim bardzo mocnym napędem. Nad płytą lakierowaną, która przylega podciśnieniowo do talerza, ustawia się głowicę nacinającą oraz mikroskop służący kontroli powstałego rowka. Jako pierwszy nacina się zapis próbny, celem sprawdzenia poprawności ustawień. Następnym etapem jest wycięcie całego rowka na danej stronie. Obraz tej płyty będzie bezpośrednio przekładany na kształt finalnego produktu. Po przeprowadzeniu kontroli jakości, pracownik nanosi na końcu rowka oznaczenia nazywane matrixem. Kolejna faza produkcji to oczyszczenie dysku lakierowanego oraz pokrycie go chlorkiem cynawym, który ułatwia osadzanie się azotanu srebra na powierzchni lakieru. Następnie następuje galwanizacja. W specjalnej maszynie umieszcza się płytę tak, by posrebrzana strona znalazła się w bezpośrednim kontakcie z wanną galwanizerską. Znajduje się w niej płyn, w którym rozpuszcza się nikiel. To właśnie nim zostanie pokryta płyta. Dysk zaczyna się obracać. Do płyty zostaje podłączony biegun dodatni, przez co na srebrnej powierzchni osadza się nikiel, biało-srebrzysty metal o lekkim, złotym zabarwieniu. Przez płytę przepływa prąd o niewielkim napięciu - jedynie 10V, ale za to bardzo dużym natężeniu, wynoszącym 150A [7].

Po upływie około 1,5 godziny warstwa jest już wystarczająco gruba, by oddzielić ją od dysku lakierowanego. Niklowa płyta, która powstała nazywa się powszechnie ojcem, czyli negatywem.



Rysunek 1. Proces wytwarzania płyt gramofonowych metodą w matrycach [8]

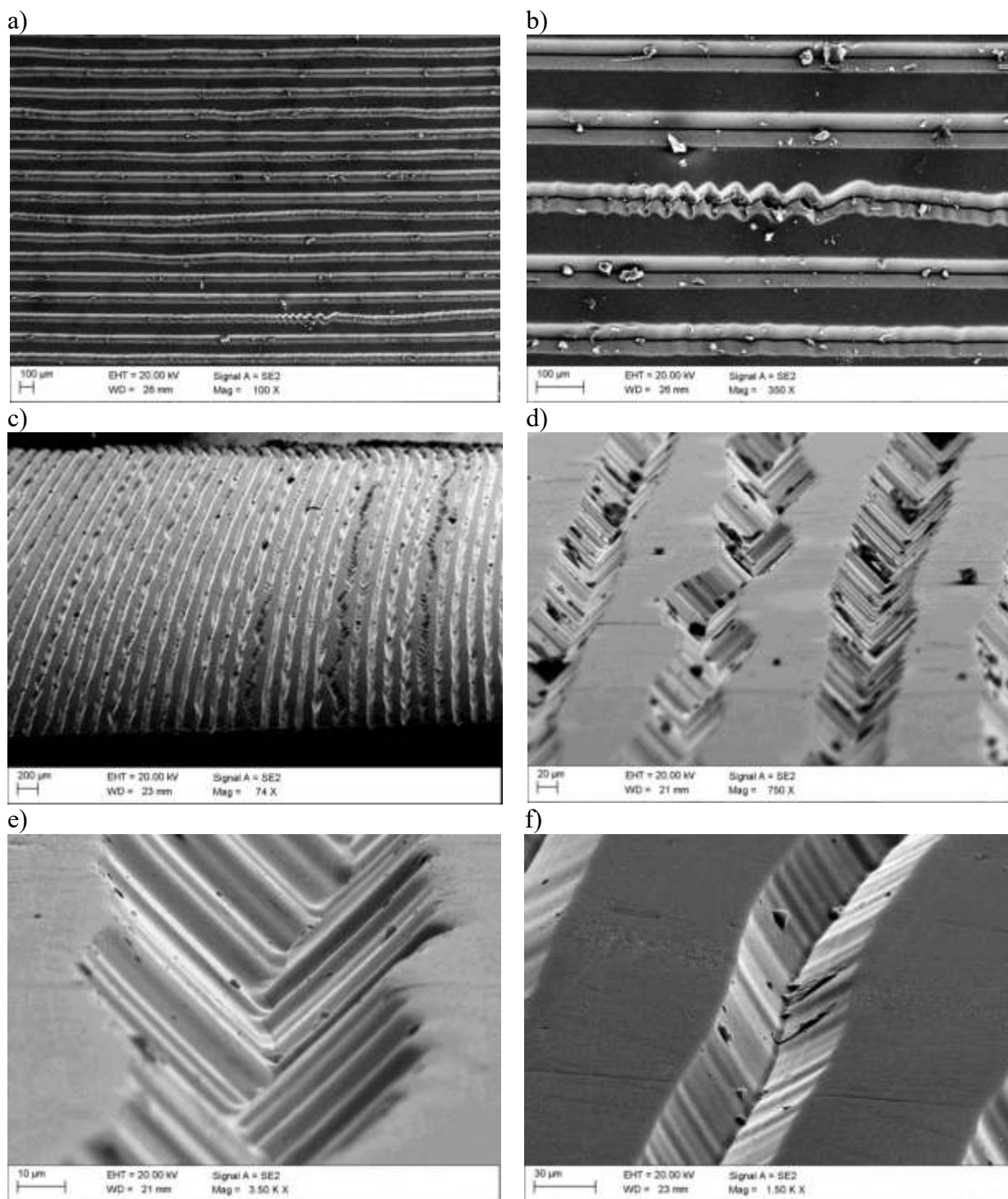
Figure 1. The process of producing gramophone records using the matrix method [8]

## 5.2. Metoda DMM

W technologii DMM nie używa się dysku lakierowanego, a płyty miedzianej, którą od razu można pokryć niklem, bez konieczności używania azotanu srebra. DMM wygrywa nad tradycyjnym procesem w zmniejszeniu szumów, wysokie częstotliwości są lepiej odzwierciedlane oraz ryzyko powstania przesłuchów pomiędzy kolejnymi zwojami rowka jest znacznie zminimalizowane [9]. Ostatni element wytwarzania płyt winylowych jest wspólny dla obydwu metod. Należy uformować kołnierz pozwalający na zamocowanie matrycy na formie i wyciąć otwór w środku płyty. Po zamontowaniu matrycy następuje proces tłoczenia płyt. Może on się odbywać ręcznie lub automatycznie. Aby powstała pełnowartościowa płyta do wyłaczarki dołączony jest zasobnik z wyciętymi labelami oraz ekstruder, czyli dozownik z odpowiednią ilością granulatu.

## 6. MECHANIZM DZIAŁANIA

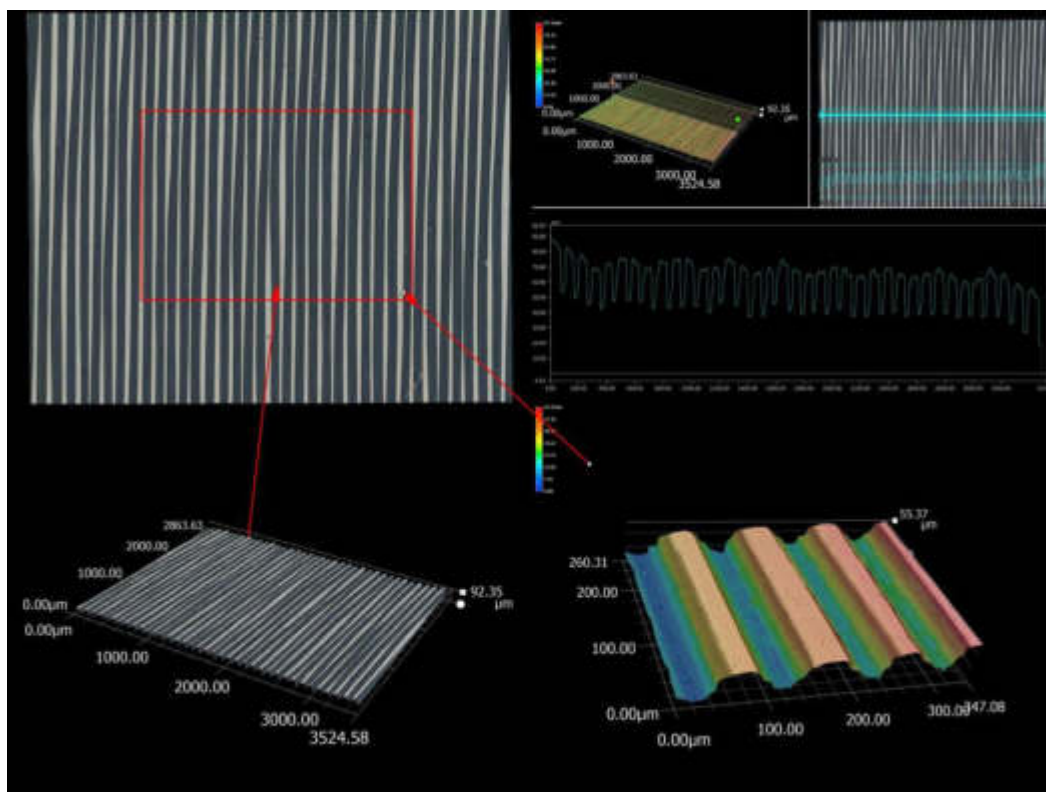
Aby poznać mechanizm działania płyty gramofonowej warto w pierwszej kolejności przyjrzeć się budowie płyty, która nie jest specjalnie skomplikowana. Płyta gramofonowa jest niczym innym jak krążkiem z otworem w samym jego środku. Ale na jej powierzchni znajduje się jej najważniejszy element - rowek. To właśnie w nim zapisana jest muzyka. Rowek ma ułożenie spiralne wokół otworu na środku płyty. Jego wnętrze wypełnione jest mikroskopijnymi nierównościami, dzięki którym igła poruszająca się w obrębie rowka wprawiana jest w drgania. Rowki możemy podzielić ze względu na ich szerokość na normalnorowkowe (120 $\mu$ m), mikrorowkowe (55 $\mu$ m) oraz stereorowkowe (25 $\mu$ m) [10]. Na rysunku 2 przedstawiono obrazy rowka płyty winylowej typu LP (Long Play) o szerokości rowka 120 $\mu$ m wykonane przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego SEM Supra 25.



Rysunek 2. Rowki płyty winylowej: a) powiększenie 100x – widok z góry, b) powiększenie 350x – widok z góry, c) powiększenie 75x – widok z boku, d) powiększenie 750x – widok z boku, e) powiększenie 350x – widok z boku, f) powiększenie 150x – widok z boku

Figure 2. Vinyl record groove: a) magnification 100x – view from above, b) magnification 350x – view from above, c) magnification 75x – side view, d) magnification 750x – side view, e) magnification 350x – side view, f) magnification 150x – side view

Na rysunku 3 przedstawiono obrazy rowka płyty winylowej typu LP (Long Play) o szerokości rowka 120 $\mu\text{m}$  wykonane przy użyciu mikroskopu laserowego KEYENCE.



Rysunek 3. Rowek płyty winylowej  
*Figure 3. Vinyl record groove*

## 7. PODSUMOWANIE

Płyty winylowe są ikoną nośników muzycznych, które są obecne wśród nas już od wielu lat, pomimo tego, że były wypierane przez wiele innych formatów zapisu dźwięku. Przetrwały ze względu na swój urok, którym potrafią oczarować niejednego melomana. Stanowią nieodłączny element życia koneserów muzyki.

Gramofony i płyty winylowe na dobre powróciły do łask miłośników muzyki. Tym źródłem dźwięku interesują się nie tylko ludzie dojrzały, którzy wychowywali się słuchając płyt winylowych ale i ludzie bardzo młodzi, także studenci, dla których jest to coś egzotycznego i nowego zarazem. Artykuł jest częścią projektu PBL „Ocena zużycia trybologicznego igły i płyty gramofonowej podczas ich eksploatacji oraz wpływ środków czyszczących na własności fizyczne płyty gramofonowej” realizowanego w ramach VII konkursu PBL na Politechnice Śląskiej.

## LITERATURA

1. <https://muzykainaczej.wordpress.com/2nd-child-page/szelaki/>
2. <http://gazeta-kolekcjonera.myvimu.com/o-pierwszych-plytach-slow-kilka/>
3. <https://www.szkolnictwo.pl/szukaj,Ebonit>

4. <https://docplayer.pl/18415929-Technologia-i-materialoznawstwo-elektrotechniczne.html>
5. <http://www.avstore.pl/baza-wiedzy/czym-jest-pvc/>
6. <https://www.psychosonda.pl/artykuly/rodzaje-plyt-winylowych>
7. <https://dogramofonu.pl/tloczenie-plyt-winylowych-jak-dziala-plyta-winylowa#Tloczenie%20plyt%20winylowych>
8. <https://audiolifestyle.pl/nawosci/jak-powstaje-plyta-winylowa/>
9. <https://www.hifi.pl/slovník/dmm.php>
10. <https://www.psychosonda.pl/artykuly/budowa-plyty-winylowej>

## Ocena ryzyka zawodowego narzędziem zapewnienia bezpieczeństwa na stanowisku pracy

K. Zajączkowska<sup>a</sup>, M. Spilka<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Studentka, Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zarządzanie i Inżynieria Produkcji

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych  
email: monika.spilka@polsl.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono ocenę ryzyka zawodowego jako jedno z ważniejszych narzędzi zarządzania bezpieczeństwem w miejscu pracy. Stosując wybrane metody, przeprowadzono ocenę ryzyka zawodowego dla stanowiska pracy elektromontera. Zastosowanie metody Risk Score umożliwiło dokonanie oceny ryzyka dla zidentyfikowanych zagrożeń, zaś metody Politechniki Śląskiej dla wykonywanych czynności w odniesieniu do czasu ich trwania. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, iż bezpieczeństwo pracownika zatrudnionego na stanowisku elektromontera jest w dużym stopniu zagrożone, konieczne jest zatem stałe monitorowanie i analizowanie potencjalnych zagrożeń, jak również przeprowadzanie oceny ryzyka na tym stanowisku, które może zapobiec niepożądanym zdarzeniom.

**Abstract:** The article presents the occupational risk assessment as one of the most important tools of safety management in the workplace. Using selected methods, an occupational risk assessment for the workplace of electrical systems installer was carried out. The use of the Risk Score method allowed to assess the risk for the identified threats, while the method of the Silesian University of Technology for the performed activities in relation to their duration. On the basis of the conducted analyzes, it was concluded that the safety of an employee working as an electrical systems installer is highly endangered, therefore it is necessary to constantly monitor and analyze potential threats, as well as to conduct a risk assessment at a workplace, which may prevent undesirable events.

**Słowa kluczowe:** stanowisko pracy, ocena ryzyka zawodowego, metoda Risk Score, metoda Politechniki Śląskiej, zarządzanie bezpieczeństwem

### 1. WSTĘP

Zdrowie i życie ludzkie są wartościami niewymiernymi i nadrzędnymi. Jednakże wszystkim wykonywanym czynnościom, w tym także pracy zawodowej towarzyszą zdarzenia, które mogą wywołać niekorzystne skutki, powodujące uszczerbek na zdrowiu lub nawet utratę życia. Nie



można ich całkowicie wyeliminować, a ich występowanie jest określane mianem ryzyka zawodowego.

Według definicji zawartej w rozporządzeniu Ministra Pracy i Polityki Socjalnej w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy, ryzyko zawodowe zostało określone jako „prawdopodobieństwo wystąpienia niepożądanych zdarzeń związanych z wykonywaną pracą, powodujących straty, w szczególności wystąpienia u pracowników niekorzystnych warunków zdrowotnych w wyniku zagrożeń zawodowych występujących w środowisku pracy lub sposobu wykonywania pracy” [1].

Zgodnie z Konstytucją RP „każdy ma prawo do bezpiecznych i higienicznych warunków pracy” [2]. Ryzyko zawodowe występuje w mniejszym lub w większym stopniu na każdym stanowisku pracy, a obowiązkiem pracodawcy, zgodnie z obowiązującymi przepisami, jest informowanie podwładnych o zagrożeniach i przeprowadzanie oceny ryzyka zawodowego, związanego ze zidentyfikowanymi zagrożeniami [3].

Ocena ryzyka zawodowego polega na przewidywaniu jak często i jakie szkody mogą dotknąć pracownika zatrudnionego na danym stanowisku pracy, a celem oceny ryzyka zawodowego jest wdrożenie odpowiednich działań korygujących lub/i zapobiegawczych zapewniających bezpieczeństwo i higienę pracy pracowników [4].

W aktach prawnych nie zostały określone wymagania w zakresie doboru metod oceny ryzyka zawodowego. Wybór metody zależy m.in. od celu badań, stopnia szczegółowości, a także charakteru otrzymanych wyników, które muszą być zadowalające i wystarczające do wyznaczenia dopuszczalności ryzyka, a także prawidłowego planowania czynności korygujących. Wobec tego nie można stosować się do jednej, uniwersalnej metody (dla każdego ze stanowisk), ze względu na różnorodność i specyfikę działalności przedsiębiorstw. W przypadku niezadowalających wyników, konieczne jest przeprowadzenie ponownej oceny ryzyka, przy zastosowaniu innych, bardziej zaawansowanych metod lub skorelowaniu kilku metod jednocześnie [5].

## 2. METODYKA BADAŃ

Celem zapewnienia bądź poprawy bezpieczeństwa na stanowisku pracy elektromontera zastosowano wybrane metody oceny ryzyka zawodowego.

### 2.1. Metoda Risk Score

Metoda Risk Score jest wskaźnikową metodą jakościową. Wyrażana jest w skali trójstopniowej i umożliwia dokonanie oceny zagrożenia na podstawie wyliczonego wskaźnika ryzyka (R) będącego iloczynem trzech parametrów [6, 7]:

$$R=S \cdot E \cdot P \quad (1)$$

gdzie:

*S* – potencjalne skutki zagrożenia,

*E* – ekspozycja na zagrożenie,

*P* – prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia.

Do oszacowania ryzyka przyjmuje się następującą skalę:

S – 1 - 100 pkt.,  
 E – 0,5 - 10 pkt.,  
 P – 0,1 - 10 pkt.

Poszczególne parametry ryzyka zawodowego, oceniane w kilkustopniowych skalach, przedstawiono w tabelach 1-3.

Tabela 1. Ocena potencjalnych skutków zagrożenia (S) [6]

*Table 1. Assessment of the potential effects of the hazard (S) [6]*

| Wartość S | Strata             | Opis                        |                      |
|-----------|--------------------|-----------------------------|----------------------|
|           |                    | Straty ludzkie              | Straty materialne    |
| 100       | Poważna katastrofa | Wiele ofiar śmiertelnych    | Ponad 25 mln PLN     |
| 40        | Katastrofa         | Kilka ofiar śmiertelnych    | 5 – 25 mln PLN       |
| 15        | Bardzo duża        | Ofiara śmiertelna           | 500 tys. – 5 mln PLN |
| 7         | Duża               | Ciężkie uszkodzenie ciała   | 25 – 500 tys. PLN    |
| 3         | Średnia            | Absencja                    | 5 – 25 tys. PLN      |
| 1         | Mała               | Udzielenie pierwszej pomocy | Poniżej 5 tys. PLN   |

Tabela 2. Ocena ekspozycji na zagrożenie (E) oraz ocena prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia (P) [6]

*Table 2. Assessment of exposure to hazard (E) and assessment of the hazard occurrence probability (P) [6]*

| Wartość E | Opis                           | Wartość P | Opis                            | Szansa [%] |
|-----------|--------------------------------|-----------|---------------------------------|------------|
| 10        | Stała                          | 10        | Bardzo prawdopodobne            | 50         |
| 6         | Częsta (codzienna)             | 6         | Całkiem możliwe                 | 10         |
| 3         | Sporadyczna (raz na tydzień)   | 3         | Mało prawdopodobne, ale możliwe | 1          |
| 2         | Okazjonalna (raz na miesiąc)   | 1         | Tylko sporadycznie możliwe      | 0,1        |
| 1         | Minimalna (kilka razy rocznie) | 0,5       | Możliwe do pomyślenia           | 0,01       |
| 0,5       | Znikoma (raz do roku)          | 0,2       | Praktycznie niemożliwe          | 0,001      |
|           | -                              | 0,1       | Tylko teoretycznie możliwe      | 0,0001     |

Tabela 3. Ocena wskaźnika poziomu ryzyka – wartościowanie ryzyka (R) (opracowanie własne na podstawie [7])

*Table 3. Assessment of the risk level indicator – risk valuation (R) (own elaboration based on [7])*

| Wartość ryzyka [R] | Oszacowanie ryzyka | Dopuszczalność ryzyka | Kategoria ryzyka | Niezbędne działania              |
|--------------------|--------------------|-----------------------|------------------|----------------------------------|
| $R < 20$           | Bardzo małe        | Dopuszczalne          | Zaniedbywalne    | Wskazana kontrola                |
| $20 \leq R < 70$   | Małe               | Dopuszczalne          | Akceptowalne     | Potrzebna kontrola               |
| $70 \leq R < 200$  | Średnie            | Dopuszczalne          | Średnie          | Potrzebna poprawa                |
| $200 \leq R < 400$ | Duże               | Niedopuszczalne       | Poważne          | Potrzebna natychmiastowa poprawa |
| $R \geq 400$       | Bardzo duże        | Niedopuszczalne       | Nieakceptowalne  | Wskazane wstrzymanie pracy       |

## 2.2. Metoda Politechniki Śląskiej

Metoda Politechniki Śląskiej polega na ocenie ryzyka zawodowego na poziomie wykonywanych czynności z uwzględnieniem czasu ich wykonywania. Zgodnie z założeniem powinna być przeprowadzana przez minimum trzech ekspertów (np. pracowników wykonujących czynności robocze, dozór, pracowników służby BHP, społecznych inspektorów pracy) [8, 9].

Niezbędnym etapem przed przystąpieniem do przeprowadzenia oceny ryzyka jest sporządzenie harmonogramu czasu pracy. Powinien on zawierać opis wykonywanych czynności wraz z czasem ich wykonywania [8, 9].

Czas trwania oblicza się wskaźnikiem czasu trwania czynności roboczych według poniższego wzoru [8, 9]:

$$WT_{cz} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i \cdot N_i) \quad (2)$$

gdzie:

$WT_{cz}$  – wskaźnik czasu trwania czynności roboczej,

$T_i$  – czas trwania czynności przypisany przez  $i$  – tego eksperta,

$N_i$  – częstość wykonywania czynności roboczej nadana przez  $i$  – tego eksperta,

$n$  – liczba oceniających.

Ryzyko zawodowe, zgodnie z poniższym wzorem, szacuje się poprzez ocenę prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia oraz ocenę skutków tego zdarzenia podczas wykonywania ocenianej czynności [8, 9].

$$WR_{cz} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i \cdot S_i) \quad (3)$$

gdzie:

$WR_{cz}$  – wskaźnik ryzyka zawodowego związanego z wykonywaniem określonej czynności roboczej,

$P_i$  – prawdopodobieństwo wystąpienia niebezpiecznych zdarzeń przypisane przez  $i$  – tego oceniającego,

$S_i$  – wielkość prawdopodobnych strat przypisana przez  $i$  – tego oceniającego,

$n$  – liczba oceniających.

W kolejnym etapie uczestnicy zespołu przeprowadzają szacowanie ryzyka. Następuje to poprzez subiektywne przypisanie prawdopodobieństwa i skutków zgodnie z tabelą 4 [8, 9].

Tabela 4. Prawdopodobieństwo wystąpienia niebezpiecznych zdarzeń (P) oraz wielkość prawdopodobnych strat (S) [8, 9]

Table 4. The probability of a hazardous events occurrence (P) and the size of the probable losses (S) [8, 9]

| Skala prawdopodobieństwa                                   |                          |
|--|--------------------------|
| Prawdopodobieństwo wystąpienie niebezpiecznych zdarzeń (P) | Ranga prawdopodobieństwa |
| Dużę (zdarza się kilka razy w miesiącu)                    | 4                        |
| Znaczące (zdarza się kilka razy w roku)                    | 3                        |
| Niewielkie (zdarza się raz na kilka lat)                   | 2                        |
| Minimalne (teoretycznie możliwe)                           | 1                        |
| Skala strat (skutków)                                      |                          |
| Wielkość prawdopodobnych strat (S)                         | Ranga skutków            |
| Krytyczne – wypadek śmiertelny                             | 4                        |
| Poważne – wypadek ciężki                                   | 3                        |
| Nieznaczne – wypadek lekki                                 | 2                        |
| Zaniedbywalne – mikrourazy zawodowe                        | 1                        |

Po otrzymaniu wyników oceny ryzyka następuje przydzielenie czynności do poszczególnych kategorii, zgodnie ze skalą zamieszczoną w tabeli 5.

Tabela 5. Skala ryzyka zawodowego dla wartości wskaźnika WRcz [8, 9]

Table 5. The scale of occupational risk for the value of the WRcz indicator [8, 9]

| WRcz             | Kategoria czynności                | Ryzyko czynności       |
|------------------|------------------------------------|------------------------|
| Od 1,00 do 2,00  | Czynność bezpieczna                | Ryzyko minimalne       |
| Od 2,01 do 3,00  | Czynność prawie bezpieczna         | Ryzyko akceptowalne    |
| Od 3,01 do 6,00  | Czynność niebezpieczna             | Ryzyko istotne         |
| Od 6,01 do 9,00  | Czynność szczególnie niebezpieczna | Ryzyko niepożądane     |
| Od 9,01 do 16,00 | Czynność krytyczna                 | Ryzyko nieakceptowalne |

### 3. OCENA RYZYKA ZAWODOWEGO METODĄ RISK SCORE

Pracownik zatrudniony na stanowisku elektryka wykonuje prace w systemie zmianowym na otwartej przestrzeni, jak i wewnątrz obiektów energetycznych, głównie na wysokościach, w zagłębieniach, czy wykopach, a także w zmiennych warunkach atmosferycznych, niekiedy w warunkach niedostatecznego oświetlenia [10].

W trakcie wykonywania pracy elektryk narażony jest na różnego rodzaju zagrożenia, m.in. porażenie prądem elektrycznym, wybuchy, pożary, oparzenia termiczne, biologiczne oraz chemiczne, wszelkiego rodzaju upadki (z wysokości lub na niższy poziom), kolizje samochodowe, jak i obciążenia dynamiczne oraz statyczne.

Mogące wystąpić zagrożenia skutkują m.in. ciężkimi urazami ciała, oparzeniami, złamaniami kończyn, zatruciami, zniekształceniem układu ruchu, a nawet utratą życia.

Z uwagi na dużą liczbę zidentyfikowanych zagrożeń, ocenę ryzyka zawodowego metodą Risk Score przedstawiono dla zagrożeń powodujących najwyższy poziom ryzyka. Dla zidentyfikowanych, wybranych zagrożeń określono potencjalne straty, ekspozycję na zagrożenie oraz prawdopodobieństwo wystąpienia tego zagrożenia (tabela 6).

Tabela 6. Ocena ryzyka zawodowego na stanowisku elektromontera (opracowanie własne na podstawie [10])

Table 6. Occupational risk assessment in the position of an electrical systems installer (own elaboration based on [10])

| Nazwa zagrożenia   | Potencjalne straty ludzkie (S)           | Ekspozycja na zagrożenie (E)   | Prawdopodobieństwo wystąpienia (P) | Wartość ryzyka R | Kategoria ryzyka/ dopuszczalność ryzyka                     |
|--|--|--------------------------------|------------------------------------|------------------|---|
| Porażenie prądem elektrycznym i/lub poparzenie łukiem elektrycznym | 7  | 6                              | 3                                  | 126              | Kategoria nr 3<br>Ryzyko średnie                            |
|  | Duża strata; Ciężkie uszkodzenia ciała   | Częsta (codzienna)             | Mało prawdopodobne, ale możliwe    |                  | Ryzyko dopuszczalne<br>Potrzebna poprawa                    |
| Pożar  | 40                                       | 1                              | 3                                  | 120              | Kategoria nr 3<br>Ryzyko średnie                            |
|  | Katastrofa; Kilka ofiar śmiertelnych     | Minimalna (kilka razy rocznie) | Mało prawdopodobne, ale możliwe    |                  | Ryzyko dopuszczalne<br>Potrzebna poprawa                    |
| Oparzenia termiczne  | 15                                       | 6                              | 3                                  | 270              | Kategoria nr 4<br>Ryzyko duże                               |
|  | Bardzo duża strata; Ofiara śmiertelna    | Częsta (codzienna)             | Mało prawdopodobne, ale możliwe    |                  | Ryzyko niedopuszczalne,<br>Potrzebna natychmiastowa poprawa |
| Upadek na tym samym poziomie                                       | 3  | 10                             | 6                                  | 180              | Kategoria nr 3<br>Ryzyko średnie                            |
|  | Średnia strata; Absencja                 | Stać                           | Całkiem możliwe                    |                  | Ryzyko dopuszczalne<br>Potrzebna poprawa                    |
| Uczestniczenie w kolizjach lub wypadkach drogowych                 | 7  | 6                              | 3                                  | 126              | Kategoria nr 3<br>Ryzyko średnie                            |
|  | Duża strata; Ciężkie uszkodzenia ciała   | Częsta (codzienna)             | Mało prawdopodobne, ale możliwe    |                  | Ryzyko dopuszczalne<br>Potrzebna poprawa                    |
| Niedostateczne oświetlenie   | 3  | 3                              | 1                                  | 9                | Kategoria nr 1<br>Ryzyko bardzo małe                        |
|  | Średnia strata; Absencja                 | Sporadyczna (raz na tydzień)   | Tylko sporadycznie możliwe         |                  | Ryzyko dopuszczalne,<br>Wskazana kontrola                   |
| Zmienne warunki atmosferyczne                                      | 1  | 3                              | 1                                  | 3                | Kategoria nr 1<br>Ryzyko bardzo małe                        |
|  | Mała strata; Udzielenie pierwszej pomocy | Sporadyczna (raz na tydzień)   | Tylko sporadycznie możliwe         |                  | Ryzyko dopuszczalne<br>Wskazana kontrola                    |

Z przeprowadzonej oceny ryzyka na analizowanym stanowisku pracy wynika, że dla wybranych zagrożeń ryzyko jest na poziomie dopuszczalnym. Jednakże w przypadku oparzeń termicznych występuje duże ryzyko ich powstania. Konieczne jest natychmiastowe wprowadzenie działań korygujących, mogących zminimalizować ryzyko wystąpienia tego zagrożenia. W przypadku zagrożeń, które występują w stopniu dopuszczalnym, również wskazane jest podjęcie czynności obniżających poziom ryzyka.

Po uwzględnieniu działań korygujących przeprowadzono ponowną ocenę ryzyka, wyniki której zamieszczono w tabeli 7.

Tabela 7. Ocena ryzyka zawodowego na stanowisku elektromontera z uwzględnieniem działań korygujących zmniejszających ryzyko zawodowe (opracowanie własne na podstawie [10])  
Table 7. Occupational risk assessment in the position of an electrical systems installer, taking into account corrective actions reducing the occupational risk (own elaboration based on [10])

| Nazwa zagrożenia   | Wartość ryzyka R | Sposób redukcji lub utrzymanie ryzyka na akceptualnym poziomie   | Potencjalne straty ludzkie (S)           | Ekspozycja na zagrożenie (E)   | Prawdopodobieństwo wystąpienia (P) | Wartość ryzyka R | Kategoria ryzyka/dopuszczalność ryzyka po redukcji |
|--|------------------|--|--|--------------------------------|------------------------------------|------------------|--|
| Porażenie prądem elektrycznym i/lub poparzenie łukiem elektrycznym | 126              | Przestrzeganie postanowień przepisów i instrukcji bhp; Zachowanie koncentracji; Używanie sprzętu ochronnego; Praca zgodnie z wymogami instrukcji prac pod napięciem; Stosowanie w urządzeniach elektroenergetycznych barier, blokad i osłon, odzieży roboczej, kominarek trudnopalnych; Używanie środków ochrony indywidualnej i sprzętu do prac pod napięciem | 3  | 6                              | 1                                  | 18               | Kategoria nr 1<br>Ryzyko bardzo małe               |
|  |                  |  | Średnia strata; Absencja                 | Częsta (codzienna)             | Tylko sporadycznie możliwe         |                  | Ryzyko dopuszczalne<br>Wskazana kontrola           |
| Pożar  | 120              | Utrzymanie w należytym stanie technicznym urządzeń i instalacji; Zabezpieczenie miejsca wykonywania pracy; Nadzór przełożonego nad sposobem wykonywania pracy; Stosowanie się do instrukcji obsługi maszyn i urządzeń; posiadanie gaśnic   | 40                                       | 1                              | 1                                  | 40               | Kategoria nr 2<br>Ryzyko małe                      |
|  |                  |  | Katastrofa; Kilka ofiar śmiertelnych     | Minimalna (kilka razy rocznie) | Tylko sporadycznie możliwe         |                  | Ryzyko dopuszczalne<br>Potrzebna kontrola          |
| Oparzenia termiczne  | 270              | Przestrzeganie przepisów i zasad BHP; Stosowanie odpowiedniej odzieży; Stosowanie środków ochrony indywidualnej; Używanie sprawnych urządzeń elektrycznych; Zapewnienie środków pierwszej pomocy   | 7  | 6                              | 3                                  | 126              | Kategoria nr 3<br>Ryzyko średnie                   |
|  |                  |  | Duża strata; Ciężkie uszkodzenia ciała   | Częsta (codzienna)             | Mało prawdopodobne, ale możliwe    |                  | Ryzyko dopuszczalne<br>Potrzebna poprawa           |
| Upadek na tym samym poziomie                                       | 180              | Stosowanie odpowiedniego obuwia; Przestrzeganie przepisów i zasad BHP; Utrzymywanie we właściwym stanie technicznym dróg, placów, itp; Utrzymywanie porządku w miejscu pracy; Instruktaże i szkolenia BHP  | 1  | 10                             | 3                                  | 30               | Kategoria nr 2<br>Ryzyko małe                      |
|  |                  |  | Mała strata; Udzielenie pierwszej pomocy | Stoła                          | Mało prawdopodobne, ale możliwe    |                  | Ryzyko dopuszczalne<br>Potrzebna kontrola          |

|  |     |   |  |                              |                            |    |   |
|--|-----|---|--|------------------------------|----------------------------|----|---|
| Uczestniczenie w kolizjach lub wypadkach drogowych | 126 | Przestrzeganie przepisów ruchu drogowego, Przeglądy środków transportu; Zachowanie szczególnej ostrożności i koncentracji; Dostosowanie prędkości do warunków panujących na drodze; Prowadzenie pojazdu w pełnej sprawności psychofizycznej; Profilaktyczne badania lekarskie | 3  | 6                            | 1                          | 18 | Kategoria nr 1<br><b>Ryzyko bardzo małe</b>     |
|  |     |   | Średnia strata; Absencja                 | Częsta (codzienna)           | Tylko sporadycznie możliwe |    | <b>Ryzyko dopuszczalne</b><br>Wskazana kontrola |
| Niedostateczne oświetlenie                         | 9   | Przestrzeganie przepisów BHP i stosowanie dodatkowego oświetlenia   | 1  | 2                            | 0,5                        | 1  | Kategoria nr 1<br><b>Ryzyko bardzo małe</b>     |
|  |     |   | Mała strata; Udzielenie pierwszej pomocy | Okazjonalna (raz na miesiąc) | Możliwe do pomyślenia      |    | <b>Ryzyko dopuszczalne</b><br>Wskazana kontrola |
| Zmienne warunki atmosferyczne                      | 3   | Stosowanie odzieży i obuwia ochronnego dostosowanego do panującego klimatu; Wydawanie napoi i posiłków regeneracyjnych; Dostosowanie organizacji pracy do istniejących warunków atmosferycznych   | 1  | 2                            | 1                          | 2  | Kategoria nr 1<br><b>Ryzyko bardzo małe</b>     |
|  |     |   | Mała strata; Udzielenie pierwszej pomocy | Okazjonalna (raz na miesiąc) | Tylko sporadycznie możliwe |    | <b>Ryzyko dopuszczalne</b><br>Wskazana kontrola |

Ponowne przeprowadzenie oceny ryzyka, po zastosowaniu działań korygujących pokazuje, że ryzyko w znacznym stopniu uległo obniżeniu i osiągnęło poziom dopuszczalnego. Mimo to, należy pamiętać, że wciąż konieczne jest analizowanie i kontrolowanie ryzyka.

#### 4. OCENA RYZYKA ZAWODOWEGO METODĄ POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Celem przeprowadzenia oceny ryzyka metodą Politechniki Śląskiej sporządzono harmonogram czasu pracy dla stanowiska elektromontera (tabela 8), a następnie oszacowano ryzyko zawodowe dla poszczególnych czynności. Poszczególne wartości ryzyka przedstawiono w tabeli 9.

Na podstawie uzyskanych wyników oszacowanego ryzyka dokonano klasyfikacji czynności do poszczególnych kategorii, zgodnie z przyjętą wcześniej skalą.

Zestawienie wyników rozkładu ryzyka zawodowego w odniesieniu do wykonywanych czynności przedstawiono na rysunku 1, zaś na rysunku 2 zamieszczono rozkład kategorii ryzyka zawodowego, który obrazuje udział kategorii zagrożeń w dziennym rozkładzie pracy na stanowisku elektromontera.

Tabela 8. Harmonogram czasu pracy dla stanowiska elektryka (na podstawie [11])  
Table 8. Work time schedule for the position of an electrical systems installer (based on [11])

| Lp. | Nazwa czynności  | Czas trwania [min] |
|-----|--|--------------------|
| 1.  | Prace organizacyjne, podział pracy przez przełożonego                        | 15                 |
| 2.  | Codzienna obsługa samochodu  | 15                 |
| 3.  | Przygotowanie materiałów i załadunek na samochód                             | 35                 |
| 4.  | Jazda samochodem   | 40                 |
| 5.  | Przygotowanie strefy pracy   | 15                 |
| 6.  | Przygotowanie sprzętu i materiałów   | 30                 |
| 7.  | Rozstawienie i przygotowanie podnośnika do pracy                             | 10                 |
| 8.  | Odłączenie przyłącza (odgałęzienia) w PPN                                    | 40                 |
| 9.  | Złożenie i ponowne rozstawienie podnośnika do prac                           | 15                 |
| 10. | Przerwa śniadaniowa  | 15                 |
| 11. | Rozciąganie i przymiarka nowych przewodów                                    | 20                 |
| 12. | Podłączenie przewodów na słupie w odgałęzieniu                               | 35                 |
| 13. | Złożenie i ponowne rozstawienie podnośnika do pracy                          | 20                 |
| 14. | Montaż i podłączenie przyłącza (odgałęzienie) w PPN                          | 60                 |
| 15. | Załadunek materiałów i sprzętu na samochód                                   | 20                 |
| 16. | Zlikwidowanie strefy pracy   | 10                 |
| 17. | Kierowanie samochodem  | 40                 |
| 18. | Rozładunek materiału i sprzętu   | 15                 |
| 19. | Rozliczenie przydzielonej pracy w systemach informatycznych i u przełożonego | 30                 |

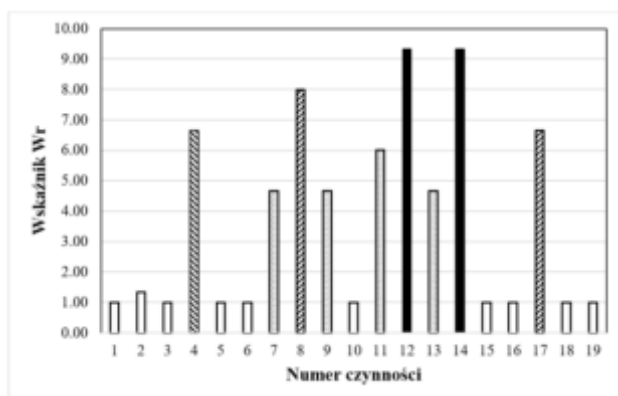
Tabela 9. Wyniki przeprowadzonej oceny – wskaźnik ryzyka czynności  
Table 9. Results of the conducted assessment – activity risk index

| Lp. | Ekspert 1<br>[P x S] | Wynik | Ekspert 2<br>[P x S] | Wynik | Ekspert 3<br>[P x S] | Wynik | WR <sub>cz</sub> | Kategoria czynności   |
|-----|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|------------------|---|
|     |                      |       |                      |       |                      |       |                  | Ryzyko czynności  |
| 1   | 1 x 1                | 1     | 1 x 1                | 1     | 1 x 1                | 1     | 1,00             | Czynność bezpieczna<br>Ryzyko minimalne                     |
| 2   | 1 x 1                | 1     | 1 x 2                | 2     | 1 x 1                | 1     | 1,33             | Czynność bezpieczna<br>Ryzyko minimalne                     |
| 3   | 1 x 1                | 1     | 1 x 1                | 1     | 1 x 1                | 1     | 1,00             | Czynność bezpieczna<br>Ryzyko minimalne                     |
| 4   | 2 x 3                | 6     | 2 x 4                | 8     | 2 x 3                | 6     | 6,66             | Czynność szczególnie<br>niebezpieczna<br>Ryzyko niepożądane |
| 5   | 1 x 1                | 1     | 1 x 1                | 1     | 1 x 1                | 1     | 1,00             | Czynność bezpieczna<br>Ryzyko minimalne                     |
| 6   | 1 x 1                | 1     | 1 x 1                | 1     | 1 x 1                | 1     | 1,00             | Czynność bezpieczna<br>Ryzyko minimalne                     |
| 7   | 2 x 2                | 4     | 3 x 2                | 6     | 2 x 2                | 4     | 4,66             | Czynność niebezpieczna<br>Ryzyko istotne                    |

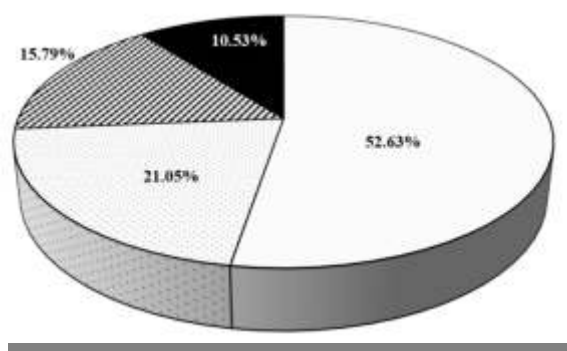


|    |       |   |       |    |       |   |      |  |
|----|-------|---|-------|----|-------|---|------|--|
| 8  | 2 x 4 | 8 | 2 x 4 | 8  | 2 x 4 | 8 | 8,00 | Czynność szczególnie niebezpieczna<br>Ryzyko niepożądane |
| 9  | 2 x 2 | 4 | 3 x 2 | 6  | 2 x 2 | 4 | 4,66 | Czynność niebezpieczna<br>Ryzyko istotne                 |
| 10 | 1 x 1 | 1 | 1 x 1 | 1  | 1 x 1 | 1 | 1,00 | Czynność bezpieczna<br>Ryzyko minimalne                  |
| 11 | 2 x 3 | 6 | 2 x 3 | 6  | 2 x 3 | 6 | 6,00 | Czynność niebezpieczna<br>Ryzyko istotne                 |
| 12 | 2 x 4 | 8 | 3 x 4 | 12 | 2 x 4 | 8 | 9,33 | Czynność krytyczna<br>Ryzyko nieakceptowalne             |
| 13 | 2 x 2 | 4 | 3 x 2 | 6  | 2 x 2 | 4 | 4,66 | Czynność niebezpieczna<br>Ryzyko istotne                 |
| 14 | 2 x 4 | 8 | 3 x 4 | 12 | 2 x 4 | 8 | 9,33 | Czynność krytyczna<br>Ryzyko nieakceptowalne             |
| 15 | 1 x 1 | 1 | 1 x 1 | 1  | 1 x 1 | 1 | 1,00 | Czynność bezpieczna<br>Ryzyko minimalne                  |
| 16 | 1 x 1 | 1 | 1 x 1 | 1  | 1 x 1 | 1 | 1,00 | Czynność bezpieczna<br>Ryzyko minimalne                  |
| 17 | 2 x 3 | 6 | 2 x 4 | 8  | 2 x 3 | 6 | 6,66 | Czynność szczególnie niebezpieczna<br>Ryzyko niepożądane |
| 18 | 1 x 1 | 1 | 1 x 1 | 1  | 1 x 1 | 1 | 1,00 | Czynność bezpieczna<br>Ryzyko minimalne                  |
| 19 | 1 x 1 | 1 | 1 x 1 | 1  | 1 x 1 | 1 | 1,00 | Czynność bezpieczna<br>Ryzyko minimalne                  |

Kolor biały (brak wypełnienia) odpowiada za czynności bezpieczne, gdzie ryzyko występuje w stopniu minimalnym. Czynności niebezpieczne, gdzie ryzyko jest istotne oznaczono wypełnieniem „w kropki”. Wypełnienie „zakreślone” odpowiada za czynności szczególnie niebezpieczne, gdzie ryzyko jest niepożądane. Natomiast kolorem czarnym oznaczono czynności krytyczne, w tym przypadku ryzyko jest nieakceptowalne.



Rysunek 1. Rozkład ryzyka zawodowego w odniesieniu do wykonywanych czynności  
Figure 1. Distribution of occupational risk in relation to the activities performed



Rysunek 2. Rozkład ryzyka zawodowego w odniesieniu do kategorii ryzyka  
Figure 2. Distribution of occupational risk in relation to the risk category

Ponad połowa czynności wykonywanych podczas dnia pracy na stanowisku elektromontera jest klasyfikowanych do czynności bezpiecznych, gdzie ryzyko występuje w stopniu minimalnym. Jednakże głównie należy zwrócić uwagę na czynności o podwyższonym stopniu ryzyka. Czynności, takie jak odłączenie, montaż i ponowne podłączenie przyłączy, a także przewodów są szczególnie niebezpieczne, a nawet mogą okazać się krytyczne. Należy pamiętać, że są to czynności w większości przypadkach wykonywane na wysokości, co prowadzi do zwiększenia ryzyka i możliwości wystąpienia niepożądanych wypadków. Konieczne jest podjęcie natychmiastowych działań, które spowodują obniżenie ryzyka.

## 5. PODSUMOWANIE

W niniejszym opracowaniu wykazano, iż ocena ryzyka zawodowego jest niezbędnym narzędziem zapewnienia bezpieczeństwa na stanowisku pracy. Prawidłowo przeprowadzona ocena ryzyka zawodowego pozwala zminimalizować, a nawet wyeliminować zagrożenia oraz ich niepożądane skutki.

Ocenę ryzyka wykonano na stanowisku elektromontera, wykorzystując dwie metody analityczne: Risk Score oraz Politechniki Śląskiej.

Metodę Risk Score wykorzystano do oceny ryzyka zawodowego dla zidentyfikowanych zagrożeń. Dla zagrożeń występujących w stopniu niedopuszczalnym wskazano działania korygujące, których zastosowanie umożliwiło osiągnięcie zamierzonego celu, czyli obniżenia ryzyka do poziomu akceptowalnego bądź dopuszczalnego.

Metoda Politechniki Śląskiej posłużyła do oceny ryzyka zawodowego dla wykonywanych czynności w odniesieniu do czasu ich trwania. Ryzyko obliczone tym sposobem kształtuje się na wyższym poziomie. Zastosowanie tej metody pozwala na zobrazowanie stopnia zagrożeń w konkretnie wykonywanych czynnościach.

Różnorodność metod nie pozwala na bezpośrednie porównanie otrzymanych wyników, jednakże podjęcie oceny ryzyka zawodowego dwiema metodami pozwala spojrzeć na zagrożenia występujące na analizowanym stanowisku z różnych stron. Pomimo różnorodności wykorzystywanych parametrów, obie metody posiadają jednakowy cel.

Elektromonter codziennie narażony jest na innego rodzaju zagrożenia, a jego warunki pracy są zmienne. Z uwagi na wykonywanie niepowtarzalnych czynności, których nie można przewidzieć, bardziej odpowiednie jest dokonywanie oceny ryzyka zawodowego metodą Risk Score. Identyfikacja wszystkich możliwych zagrożeń pozwala dokładniej przygotować pracownika pod względem działania ich skutków oraz poziomu ryzyka.

## LITERATURA

1. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bhp z późn. zm. (Dz. U. 2003, nr 169, poz. 1650).
2. Konstytucja Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 2 kwietnia 1997 r. (Dz. U. 1997, nr 78, poz. 483).
3. Kodeks pracy, Ustawa z dnia 26 czerwca 1974 r. z późn. zm. (Dz. U. 1974, nr 24, poz. 141).
4. P. Siemiątkowski, Ocena ryzyka zawodowego 2012, Wydawnictwo Wiedza i Praktyka, Warszawa, 2012.

5. M. Krause, Praktyczne aspekty doboru metod oceny ryzyka zawodowego, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Organizacja i Zarządzanie 59 (2011) 173-190.
6. B. Chrószcz, J. Hansel, Analiza i ocena ryzyka zawodowego, Wydawnictwo AGH, Kraków, 2011.
7. R. Bryła, Bezpieczne stanowisko pracy: ocena ryzyka, instrukcje stanowiskowe, listy kontrolne, Wydawnictwo Elamed, Katowice, 2007.
8. S. Krzemień, M. Krause, Zarządzanie bezpieczeństwem w górnictwie, Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie 9 (2000) 21-33.
9. A. Duda, T. Juzek, Ocena ryzyka zawodowego podczas czynności związanych z drążeniem przodka i zabudową obudowy, Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji 7/1 (2018) 329-340.
10. „Karta oceny ryzyka zawodowego na stanowisku pracy nr 23 – Załącznik nr 5 do zasad”, TAURON Dystrybucja S.A., 2019.
11. Protokół z dnia 14.02.2018 „Badania wydatku energetycznego na stanowiskach robotniczych w TAURON Dystrybucja S.A.

## Wpływ parametrów zgrzewania doczołowego na wytrzymałość połączenia rur polietylenowych

G. Zieliński <sup>a</sup>, M. Polok-Rubiniec <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email: zielinskigrzegorz1994@gmail.com

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email: Magdalena.polok-rubiniec@polsl.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wpływ zgrzewania doczołowego na wytrzymałość połączenia rur polietylenowych w zależności od parametrów procesu. Wykonano zgrzewanie doczołowe w dwóch różnych temperaturach 160°C, 250°C przy trzech różnych siłach 160N, 320N, 500N, dla każdej temperatury. W trakcie statycznej próby rozciągania zauważono, iż zmiana parametrów zgrzewania doczołowego nie wpłynęła znacząco na parametry wytrzymałościowe.

**Abstract:** The article presents the effect of butt welding on the joint strength of polyethylene pipes depending on the parameters of the process. Butt welding was performed at two different temperatures, 160°C, 250°C, with three different forces, 160N, 320N, 500N, for each temperature. During the static tensile test, it was noticed that the change in the butt welding parameters did not significantly affect the strength parameters

**Słowa kluczowe:** polietylen PE, statyczna próba rozciągania, zgrzewanie doczołowe

### 1. WSTĘP

Współczesny przemysł kładzie duży nacisk na koszt wykonania elementów - będący głównym czynnikiem ekonomicznym, jakość oraz szybkość procesu w stosunku do jego ceny. Względy ekonomiczne dominują w każdej dziedzinie przemysłu, który szuka optymalizacji pod względem doboru materiałów, usprawniania procesu produkcyjnego oraz zwiększania trwałości elementów. Podobnie w przypadku przemysłu kanalizacyjnego, w których do nie dawna dominowały materiały metalowe, w tym miedź. Materiały te zostały zastąpione przez tańsze oraz łatwiejsze w wytwarzaniu i obróbce materiały polietylenowe, których właściwości pozwalają sprostać wymaganiom eksploatacyjnym w tym obszarze [1,3].

Łatwość obróbki oraz łączenia materiałów polimerowych potwierdziły sukces tych materiałów na rynku pod względem ekonomicznym. Optymalizacja parametrów łączenia

materiałów polimerowych pozwala na uzyskiwanie złączy konstrukcyjnie spełniających kryteria doboru materiałowego w wielu dziedzinach przemysłu, zastępując materiały ceramiczne oraz metalowe, które wymagają większego wkładu energetycznego w obróbkę [2-5].

Zgrzewanie doczołowe pozwala na szybkie i dobre jakościowo zgrzewanie rur PE. W dzisiejszych czasach rury polietylenowe wykorzystywane między innymi do budowy wodociągów są zgrzewane doczołowo przez zgrzewarki automatyczne. Rola operatora w tym procesie polega tylko na nałożeniu rury oraz wyjęciu frezarki i płyty grzejnej na sygnał maszyny, co przyspiesza proces zgrzewania większych konstrukcji. Metodą doczołową można zgrzewać przede wszystkim rury, jednak oprócz rur także pręty, płyty i kształtowniki. Proces zgrzewania doczołowego polega na ułożeniu np. rur PE w obejmach maszyny. W zależności od rodzaju maszyny (ręczna lub automatyczna), obejmami steruje operator lub komputer. Należy pamiętać by rury były z takiego samego materiału oraz posiadały taki sam rozmiar. Następnie końcówki rur, które będą zgrzewane są wygładzane za pomocą frezu. Po wygładzeniu następuje podgrzanie obu końców rury przez płytę grzejną. Kolejnym etapem jest usunięcie płyty grzejnej i docisk obu elementów do siebie z odpowiednią siłą. Rury możemy wyciągnąć z obejm dopiero po upływie czasu chłodzenia. Zgrzewanie doczołowe znajduje również przeznaczenie w tak ciężkich warunkach jak w budowie gazociągów i wodociągów. Te odpowiedzialne zadanie możliwe jest dzięki dużej odporności na obciążenia dynamiczne i wysokiej wartości wydłużenia na granicy plastyczności rur polietylenowych. Połączenia rur są wytrzymałe na siły zginające i rozciągające. Kluczowe parametry w procesie zgrzewania doczołowego to czas, temperatura, siła [4-8].

## 2. MATERIAŁ DO BADAŃ

Materiał do badań stanowiła rura, wykonana z polietylenu dużej gęstości (PE-HD). Rura polietylenowa była zgodna z normą PN-EN 12201-2+A1:2013-12 [9]. W tabeli 1 przedstawiono wybrane własności polietylenu dużej gęstości

Tabela 1. Wybrane własności polietylenu

*Table 1. Selected properties of polyethylene*

| Własności                           | Wartość  | Jednostka |
|-------------------------------------|----------|-----------|
| Naprężenie przy zerwaniu            | 30-40    | MPa       |
| Naprężenie na granicy plastyczności | 25-30    | MPa       |
| Moduł Younga                        | 600-1400 | MPa       |
| Temperatura użytkowania             | -30-85   | °C        |

Badane rury polietylenowe zostały poddane procesowi zgrzewania doczołowego. Wykonano 9 zgrzewów (w 5 różnych temperaturach, w każdej temperaturze przy 3 różnych siłach). Zgrzewanie przeprowadzone zostało w temperaturach: 160°C, 250°C, przy udziale następujących sił dla każdej temperatury: 160N, 320N, 500N.

Wykonano pomiary geometryczne zgrzein, a następnie rury zostały pocięte za pomocą piły taśmowej, tak aby z każdego zgrzewu otrzymać 10 elementów ze zgrzeiną. Przy pomocy form, otrzymano na prasie hydraulicznej próbki do badań (rys1).



Rys.1. Przygotowane próbki do badań

*Fig.1. Prepared samples of testing*

### 3. METODYKA BADAŃ

Wykonano zdjęcia termowizyjne kamerą FLIR podczas zgrzewania doczołowego w temperaturach 160°C, 250°C. Pomiary geometryczne zgrzein zmierzono suwmiarką zarówno szerokość i wysokość wypływki powstałej na wskutek uplastycznienia się materiału podczas zgrzewania.

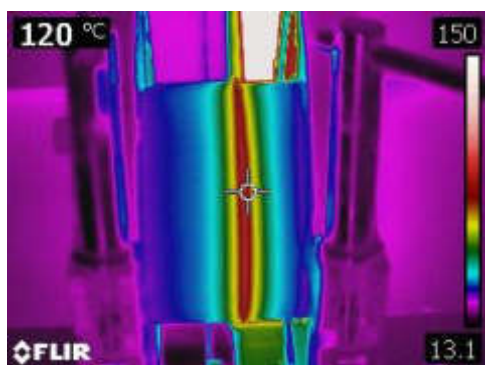
Rury polietylenowe zostały pocięte na element, a następnie wykonano zdjęcia przy użyciu mikroskopu stereoskopowego marki Olympus Z62, przy powiększeniu 15x.

Badanie wytrzymałościowe zostało przeprowadzone zgodnie z normą PN-EN ISO 527-1:2020-01 [10]. Próba rozciągania została przeprowadzona w temperaturze 22°C oraz niskiej wilgotności powietrza na kształtkach typu A1. Badanie wykonano na maszynie marki Zwick Roell Z020, prędkość rozciągania próbek wynosiła  $v=5$  mm/min.

### 4. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

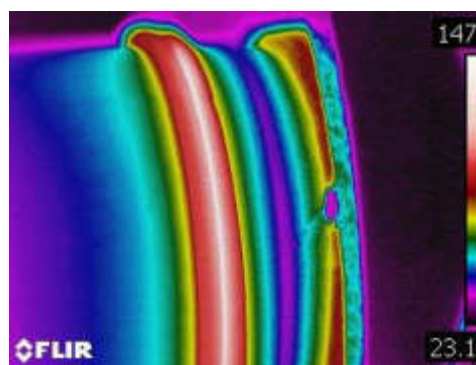
Na zdjęciach (rys. 2, 3) z kamery termowizyjnej możemy zaobserwować, że wraz ze wzrostem temperatury zgrzewania obserwuje się niewielki jego wpływ na wzrost długości rury, która ulega podgrzaniu. Jest to wynikiem złego przewodnictwa tworzywa polimerowego, które utrudnia przekazywanie energii cieplnej tworzywu położonemu dalej od elementu grzejnego. Oznacza to, że tworzywo o wysokiej temperaturze, a co za tym idzie małej lepkości, sąsiaduje z nieuplastycznionym polimerem. W takim przypadku, przyłożenie do strefy zgrzewania siły skutkować będzie łatwiejszym usunięciem nagrzanego materiału z połączenia do wypływki. Potencjalnie może mieć to negatywny wpływ na wytrzymałość połączenia, a w przypadku wypływki wewnątrz rury ograniczać przekrój rurociągu i zaburzać przepływ medium. Z racji izolacyjnego charakteru polietylenu zaobserwowano wąskie spektrum wpływu ciepła na materiał zgrzewany.

Podczas wykonywania pomiarów (Tabela 2) zaobserwowano wzrost szerokości i wysokości wypływki, wraz ze wzrostem temperatury i siły docisku zgrzewania. Świadczy to o poprawnym wykonaniu procesu zgrzewania doczołowego rur polietylenowych. Obserwacja ta jest zgodna z przypuszczeniami wyrażonymi w czasie analizy przedstawionych zdjęć termowizyjnych.



Rys. 2. Zdjęcie termowizyjne zgrzeiny przy temperaturze zgrzewu 160°C

*Fig.2. Thermal image of the weld at the temperature of 160°C*



Rys. 3. Zdjęcie termowizyjne zgrzeiny przy temperaturze zgrzewu 250°C

*Fig.3. Thermal image of the weld at the temperature of 250°C*

Tabela 2. Pomiary geometryczne zgrzein

*Table 2. Geometric measurements of welds*



| Parametry zgrzewania | Średnia szerokość wyplýwki [mm] | Średnia wysokość wyplýwki [mm] |
|----------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 160°C, 160N          | 3,63                            | 2,26                           |
| 160°C, 320N          | 3,14                            | 1,85                           |
| 160°C, 500N          | 5,17                            | 3,28                           |
| 250°C, 160N          | 8,24                            | 3,42                           |
| 250°C, 320N          | 9,41                            | 3,00                           |
| 250°C, 500N          | 11,11                           | 3,74                           |

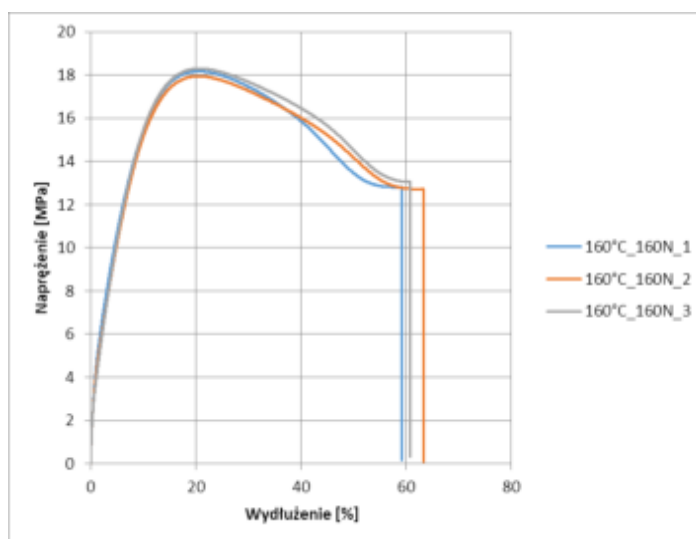
Z analizy stereoskopowej (tabela 3) wynika, że złącze uzyskane w każdym z badanych parametrów jest prawidłowe. Wraz ze wzrostem parametrów rośnie wymiar zgrzeiny, jest to efekt oczekiwany.

Na podstawie analizy wytrzymałościowej statycznej próby rozciągania (Rys. 4) zaobserwowano, iż zmiana parametrów zgrzewania doczołowego nie wpłynęła znacząco na parametry wytrzymałościowe. Granica plastyczności  $R_e$  dla badanych próbek wynosi między 18,13 a 18,87MPa, nie są to zmiany znaczące. Dla wszystkich badanych kształtek, pobranych z połączeń zgrzewanych przy zastosowaniu różnych warunków procesu zaobserwować można było wystąpienie uplastycznienia materiału kształtki poza zgrzeiną. Świadczy to, że zgrzeiny charakteryzują się wytrzymałością nie mniejszą od materiału rury. Oznacza to, że w przypadku działania na rurociąg siły osiowej uplastycznieniu uległyby rury. Z pewnością wpłynęłoby to na zmniejszenie wytrzymałości rurociągu, ale dzięki zdolności polietylenu do ulegania znacznym odkształceniom, prawdopodobnie nie spowodowało utraty szczelności.

Tabela 3. Przykładowe zgrzeiny uzyskane podczas obserwacji pod mikroskopem stereoskopowym, 15x

Table 3. Examples of welds obtained during observation under a stereoscopic microscope, 15x

| Parametry badania | Zdjęcie zgrzewu   |
|-------------------|---|
| 160°C, 160N       |   |
| 250°C, 160N       |  |



Rys. 4. Statyczna próba rozciągania w temperaturze 160°C przy obciążeniu 160N.  
Fig.4. Static tensile test at 160°C with a load of 160N.



## 5. WNIOSKI

1. Stwierdzono, że zmiana parametrów zgrzewania doczołowego nie wpłynęła znacząco na parametry wytrzymałościowe określone w trakcie statycznej próby rozciągania.
2. Zaobserwowano wystąpienie uplastycznienia materiału kształtki poza zgrzeiną w przypadku wszystkich badanych kształtek, pobranych z połączeń zgrzewanych przy zastosowaniu różnych warunków procesu. Wynika z tego, że zgrzeiny charakteryzują się wytrzymałością nie mniejszą od materiału rury.
3. Wraz ze wzrostem temperatury zgrzewania obserwowano zwiększenie wymiarów wypływek.
4. Zastosowanie w czasie przygotowania próbek temperatury wyższej od zalecanej nie wpłynęło negatywnie na wytrzymałość uzyskanego połączenia.
5. Obniżenie lub zwiększenie siły docisku, w stosunku do zalecanej wartości, nie wpłynęło negatywnie na wytrzymałość połączenia, ale miało wpływ na wartości geometryczne wypływek.

## LITERATURA

1. K. Czaja, Poliolefiny, wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2005
2. J.F. Rabek, Współczesna wiedza o polimerach, wyd. Naukowe PWN, Warszawa, 2008.
3. J. Koszkuł, Materiały polimerowe, wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 1999.
4. W. Łużny, Wstęp do nauki o polimerach, wyd. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków, 1999.
5. H. Saechtling, Tworzywa sztuczne: poradnik, wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2007
6. A. Wróblewska, Wpływ parametrów zgrzewania na jakość połączeń gazociągów polietylenowych zlokalizowanych na terenie szkód górniczych. Nafta-Gaz (2015) 71.10: 768-775
7. A. Klimpel, Spawanie i zgrzewanie tworzyw termoplastycznych, wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2000.
8. T. Jachowicz, T. Klepka., Przetwórstwo tworzyw polimerowych, wyd. Politechnika Lubelska, Lublin, 2012.
9. PN-EN 12201-2+A1:2013-12 Systemy przewodów rurowych z tworzyw sztucznych do przesyłania wody oraz do ciśnieniowej kanalizacji deszczowej i sanitarnej - Polietylen (PE) - Część 2: Rury
10. PN-EN ISO 527-1: 2020-01 Tworzywa sztuczne - Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu - Część 1: Zasady ogólne

## Analiza wpływu przekładki termicznej na współczynnik przenikalności termicznej drzwi

P. Płaczek, T. Tański, P. Snopiński

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: p.placzek@capek.pl

**Streszczenie:** W artykule krótko scharakteryzowano wady i zalety drzwi stalowych oraz ich najczęstsze zastosowanie. Prezentowana praca skupia się jednak przede wszystkim na analizie przenikalności termicznej, wykonanej dla drzwi stalowych, w których zastosowano przekładki termicznej oraz zaproponowano rozwiązanie usunięcia mostka termicznego.

**Abstract:** The article briefly describes the advantages and disadvantages of steel doors and their most common applications. The presented work, however, focuses primarily on the analysis of thermal permeability, performed for steel doors in which thermal breaks were used and a solution to remove the thermal bridge was proposed.

**Słowa kluczowe:** Drzwi stalowe, izolacyjność termiczna

### 1. WSTĘP

Obecne konstrukcje drzwi stalowych niczym nie przypominają rozwiązań z przed lat, oprócz tego, że odznaczają się nowoczesnym designem, zapewniają jednocześnie dobrą izolacyjność i bezpieczeństwo przy atrakcyjnej cenie zakupu (Rys. 1). Drzwi stalowe, dzięki stosunkowo niskiej cenie oraz dobrym własnościom wytrzymałościowym są często wybierane do domów jednorodzinnych. Nowoczesne drzwi ze stali nie są wykonywane z jednego kawałka metalu, w skrócie to nowoczesna, wielowarstwowa konstrukcja, dzięki której drzwi mogą być nie tylko bardzo mocne, ale i niezbyt ciężkie. Z reguły ze stali wykonywane jest zewnętrzne obicie drzwi, w postaci cienkiej, na ogół nieprzekraczającej dwóch milimetrów grubości blachy, która mocowana jest na rdzeń wykonany z innego materiału (polistyren ekspandowany, polistyren, poliuretan, wełna mineralna i inne) lub w postaci rdzenia, na który nakładane są warstwy innego materiału (np. laminatu lub drewna). Patrząc na kompleksowe rozwiązania konstrukcyjne drzwi, w tym także stalowych, można wymienić dwa główne elementy, tj. ościeżnice krawędziowaną z blachy stalowej o grubości 1,2-1,5mm oraz skrzydło.



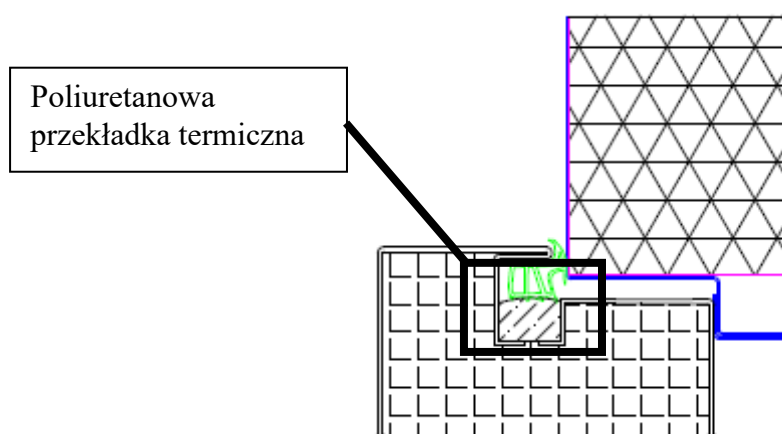
*Rysunek 1. Drzwi stalowe produkowane przez firm Capek [materiały własne]*

Skrzydło składa się z dwóch krawędziowanych arkuszy blachy o grubości 0,5-0,7mm pomiędzy, które zazwyczaj wklejone jest wypełnienie izolacyjne. Drzwi stalowe, dzięki swojej sztywności charakteryzują się zwiększoną odpornością na włamania oraz przy zastosowaniu odpowiedniego wypełnienia (wełna mineralna) zadawalającą odpornością ogniową. Poniżej przedstawiono przykład prototypowych drzwi stalowe które były poddane testom na badanie izolacyjności ogniowej, w celu weryfikacji ich odporności ogniowej zgodnie z normą PN-EN 1634-1:2009, badaniu poddaje się próbny element z obu stron. Drzwi oceniane są ze względu na kryteria szczelności i izolacyjności ogniowej. Jak można zauważyć podczas badania pod wpływem temperatury drzwi uległy deformacją. Jednak nie nastąpiło przejście ognia w związku czym, zaprojektowana konstrukcja nie utraciła szczelności ogniowej.



*Rysunek 2. Po lewej drzwi stalowe po 37 minutach od strony nienagrzewanej, po prawej drzwi stalowe po ostudzeniu [ materiały własne].*

Jak wiadomo, stal jako materiał inżynierski charakteryzuje się niskimi wartościami izolacji termicznej, dlatego też aby stworzyć bezpieczne rozwiązanie konstrukcji drzwi stalowych, należy skorzystać również z innych materiałów, tj. drewna, polichlorku winylu PVC, poliuretanu PU stanowiących wypełnienie takie konstrukcji. Problemem pozostaje mostek termiczny ościeżnicy, który powoduje przemarzanie konstrukcji oraz obniżenie parametru przenikalności termicznej. Mostek termiczny powstaje, w wyniku braku izolatora na konstrukcji przegrody, pomiędzy pomieszczeniami ogrzewanymi i nieogrzewanymi. Aby wyeliminować powyższy problem zaprojektowano, zgodnie z własną koncepcją, ościeżnice z przerwaniem mostkiem termicznym. Było to rozwiązanie projektowe ościeżnicy z przekładką poliuretanową (Rys.3).



Rysunek 3. Przekrój projektu ościeżnicy z przekładką poliuretanową.

Poliuretan charakteryzuje się niskim współczynnikiem przewodzenia ( $\lambda$ - 0,022-0,024 W/mK), tym samym pozwoli na podwyższenie koniecznych parametrów izolacyjnych naszego rozwiązania.

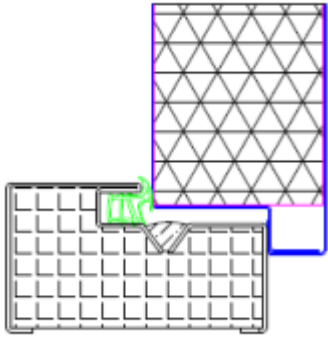

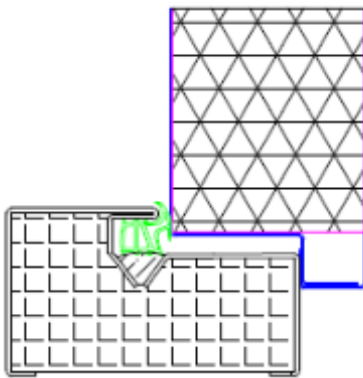
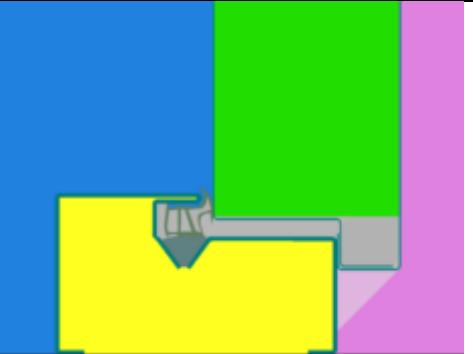
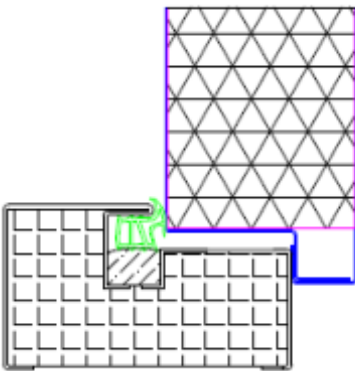

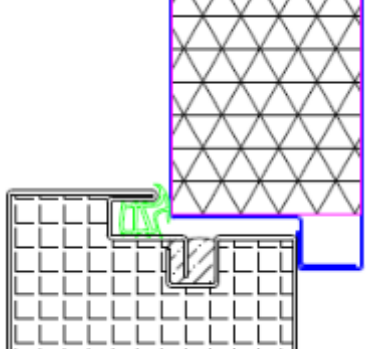

## 2. METODYKA I WYNIKI BADAŃ

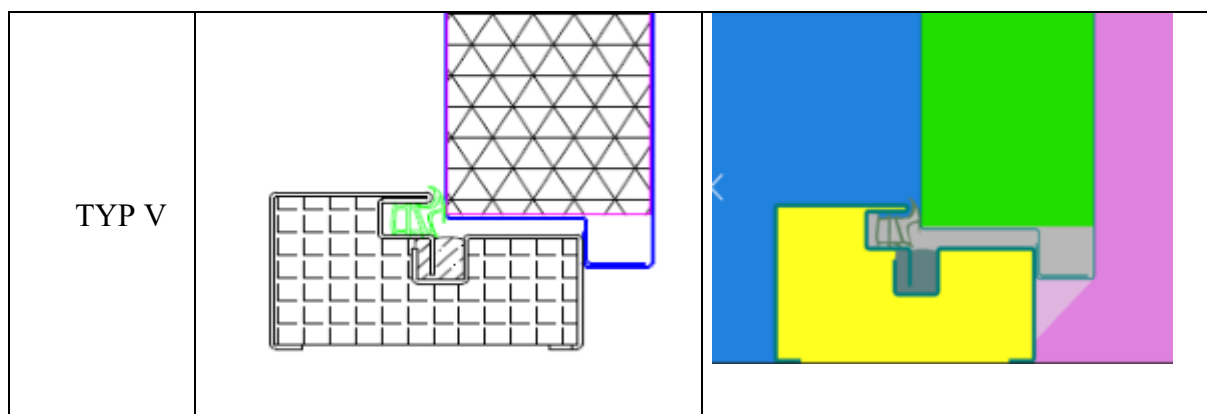
Do analizy numerycznej wpływu rozwiązania z przekładką termiczną zaprojektowano 5 różnych koncepcji połączenia profili ościeżnicy. Do obliczeń przyjęto następujące parametry przewodzenia.

Tablica 1. Parametry przewodzenia ciepła materiałów ościeżnicy.

| Lp. | element konstrukcji  | materiał   | $\lambda$ [W/m*K] |
|-----|----------------------|------------|-------------------|
| 1   | Profile ościeżnicy   | Stal       | 50                |
| 2   | Przekładka termiczna | Poliuretan | 0,024             |
| 3   | Płaszcz skrzydła     | Stal       | 50                |
| 4   | Próg                 | Aluminium  | 160               |
| 5   | Uszczelka ościeżnicy | EPDM       |                   |
| 6   | Wypełnienie skrzydła | Poliuretan | 0,024             |

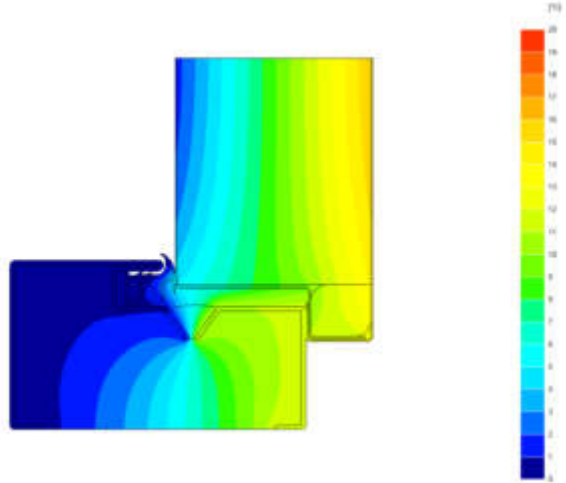
Następnie zaprojektowano i przygotowano przekroje do badań w programie BISCO.  
 Tablica 2. Koncepcje przekrojów wraz z przypisanymi materiałami.

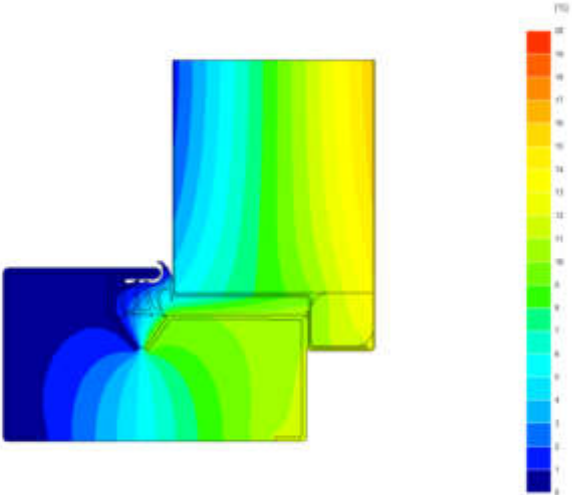
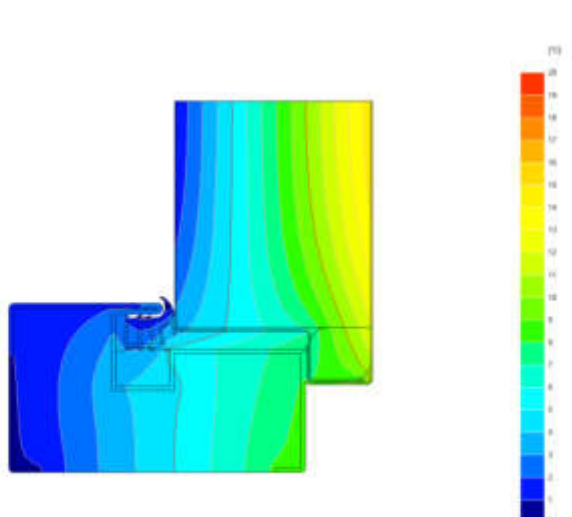
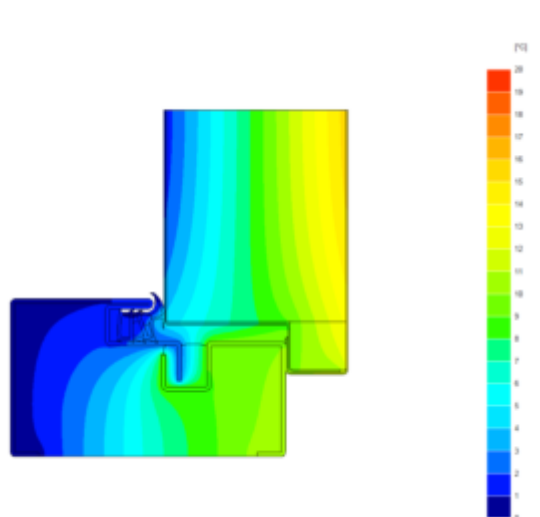
| Koncepcja przekroju | Przekrój złożenia profili ościeżnicy i skrzydła                                     | Przekrój złożenia profili ościeżnicy i skrzydła z przypisanym materiałem             |
|---------------------|---|--|
| TYP I               |    |    |
| TYP II              |   |   |
| TYP III             |  |  |
| TYP IV              |  |  |

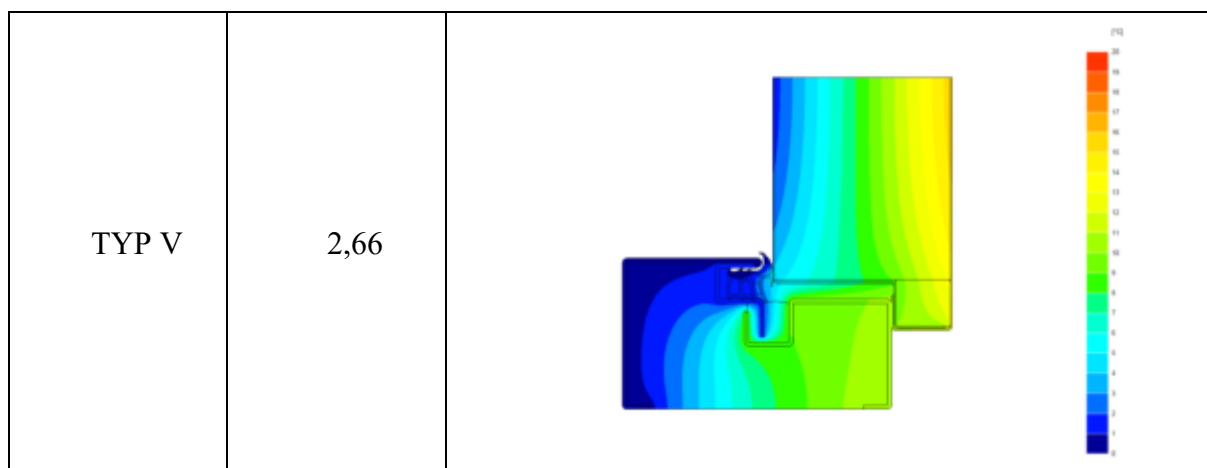


Obliczenia wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 1077-2:2012 „Ciepłne właściwości użytkowe okien, drzwi i żaluzji. Obliczanie współczynnika przenikania ciepła. Część 2: Metoda komputerowa dla ram”, z wykorzystaniem programu „BISCO” firmy PHYSIBEL. Współczynniki przenikalności termicznej dla drzwi otwieranych do wewnątrz razem z rozkładem temperatur przedstawiono w tabelicy 3.

Tablica 3. Rozkład temperatur dla drzwi otwieranych do wewnątrz.

| Koncepcja przekroju | Współczynnik przenikalności $U_f$ | Rozkład temperatur   |
|---------------------|-----------------------------------|--|
| TYP I               | 2,74                              |  |

|                |             |  |
|----------------|-------------|--|
| <p>TYP II</p>  | <p>2,66</p> |    |
| <p>TYP III</p> | <p>2,54</p> |   |
| <p>TYP IV</p>  | <p>2,74</p> |  |

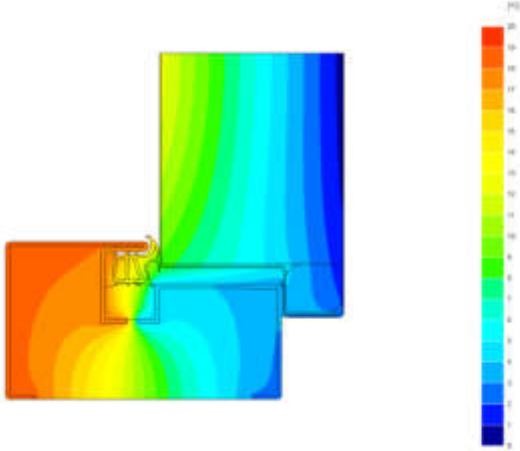
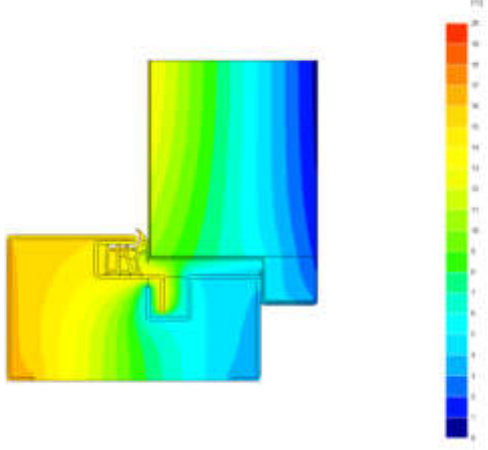
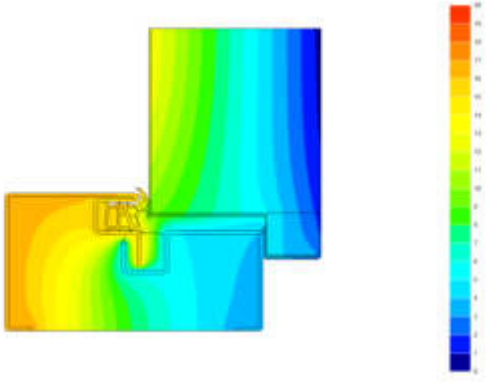


Następnie przeprowadzone analogiczne obliczenia dla drzwi otwieranych na zewnątrz.

Tablica 4. Rozkład temperatur dla drzwi otwieranych na zewnątrz.

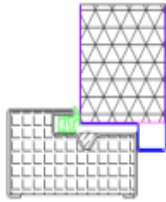
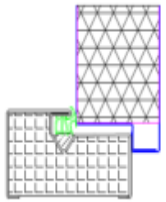
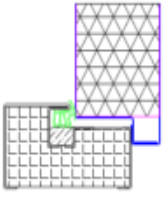
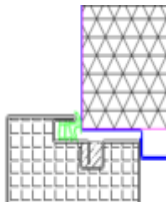
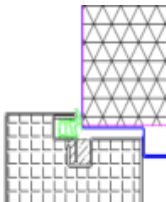
| Koncepcja przekroju | Współczynnik przenikalności $U_f$ | Rozkład temperatur |
|---------------------|-----------------------------------|--------------------|
| TYP I               | 2,41                              |                    |
| TYP II              | 2,51                              |                    |



|         |      |   |
|---------|------|---|
| TYP III | 2,43 |  A 2D cross-sectional simulation of a thermal junction. The left side is a heat source (red/orange), and the right side is a heat sink (blue). The simulation shows a central component with a complex shape. A color scale on the right indicates temperature, ranging from 0 (blue) to 200 (red). |
| TYP IV  | 2,98 |  A 2D cross-sectional simulation of a thermal junction, similar to TYP III but with a different internal geometry. The color scale on the right indicates temperature, ranging from 0 (blue) to 200 (red).   |
| TYP V   | 2,81 |  A 2D cross-sectional simulation of a thermal junction, similar to TYP III and IV but with a different internal geometry. The color scale on the right indicates temperature, ranging from 0 (blue) to 200 (red).   |

Zestawione współczynniki przenikalności termicznej zaprezentowano zbiorczo w tabelicy nr 5.

Tablica 5. Porównanie współczynników przenikalności termicznej analizowanych przekrojów.

|                             | Typ Przekroju   |   |   |   |   |
|-----------------------------|---|---|---|---|---|
|                             | Typ I   | Typ II  | Typ III   | Typ IV  | Typ V   |
|                             |  |  |  |  |  |
| Drzwi otwierane do wewnątrz | 2,74  | 2,66  | 2,54  | 2,74  | 2,66  |
| Drzwi otwierane na zewnątrz | 2,31  | 2,51  | 2,43  | 2,98  | 2,81  |

Na podstawie otrzymanych wyników badań numerycznych zauważono, że przesunięcie przekładki termicznej w kierunku strony ogrzewanej obniża współczynnik przenikalności termicznej. Przesunięcie przekładki o 10mm obniżyło współczynnik przenikalności termicznej o 3%.

Współczynnik przenikalności drzwi obliczono zgodnie z normą PN-EN ISO 10077-1:2017-10 „Ciepłne właściwości użytkowe okien, drzwi i żaluzji. Obliczenie współczynnika przenikania ciepła. Część 1: postanowienia ogólne”. Obliczenia wykonano dla drzwi referencyjnych o wymiarach 1230x2180. Wartości współczynników  $U_d$  przedstawiono w tablicy 6.

Tablica 6. Współczynniki przenikalności termicznej drzwi.

| Typ     | Drzwi otwierane do wewnątrz | Drzwi otwierane na zewnątrz |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|
| Typ I   | 1,2                         | 1                           |
| Typ II  | 1,1                         | 1,1                         |
| Typ III | 1,1                         | 1,1                         |
| Typ IV  | 1,2                         | 1,2                         |
| Typ V   | 1,1                         | 1,1                         |

### 3. PODSUMOWANIE

Na podstawie wykonanych obliczeń zestawionych w tablicy 6 można stwierdzić, że przekładka termiczna ościeżnicy znacząco poprawiła współczynnik przenikalności termicznej drzwi stalowych, gdyż parametr ten dla drzwi stalowych wynosi 1,5 [W/m<sup>2</sup>K]. Ze względu na proces produkcji TYP I będzie najbardziej zasadnym wyborem z uwagi na aspekt ekonomiczny, ze względu na ilości gięć arkusza blachy, z kolei TYP V ze względu na konstrukcję połączenia jest rozwiązaniem sztywniejszym.

Metoda obliczeniowa zgodna z normą PN-EN ISO 1077-2:2012 przy zastosowaniu programu BISCO pozwala znacznie przyspieszyć proces wyznaczania parametru przenikalności termicznej drzwi. Zgodnie z założeniami producenta walidacja programu wynosi 5% do badań empirycznych na skrzynce grzejnej. Dlatego też wydaje się zasadne korzystanie z tego typu możliwości inżynierskich, w celu szybkiego projektowania różnych rozwiązań konstrukcyjnych.

## **BIBLIOGRAFIA**

1. <https://oknoserwis.pl/arttykul-4345/izolacyjnosc-cieplna-drzwi-zewnetrznych.html> [Dostęp 23.07.2022]
2. Norma PN-EN ISO 10077-1:2017-10
3. Norma PN-EN ISO 1077-2:2012

## Porównanie własności termicznych elementów wypełnień stalowego skrzydła drzwiowego

P. Płaczek, T. Tański, P. Snopiński

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych. email: p.placzek@capek.pl

**Streszczenie:** W niniejszym artykule opisano materiały wykorzystywane jako wypełnienia zewnętrznych skrzydeł drzwiowych. Krótko omówiono ich zalety, metody wytwarzania oraz wykonano analizę numeryczną przenikalności termicznej w oprogramowaniu BISCO dla skrzydła drzwiowego o grubości 55mm.

**Abstract:** This article describes the materials used as fillings for external door leaves. Their advantages and manufacturing methods were briefly discussed, and the numerical analysis of thermal permeability was performed in the BISCO software for a 55 mm thick door leaf.

**Słowa kluczowe:** Drzwi stalowe, izolacyjność termiczna,

### 1. WSTĘP

Ze względu na wymagania związane z nowelizacją przepisów ogłoszonych przez Ministerstwo Transportu, Budownictwa i Gospodarki morskiej 5 lipca 2013 roku w sprawie warunków technicznych, zgodnie z którymi od dnia 1.01.2021 roku współczynnik przenikalności termicznej drzwi w przegrodach zewnętrznych lub w przegrodach pomiędzy pomieszczeniami ogrzewanymi i nieogrzewanymi nie może być większy niż  $1.3 [W/(m^2 \cdot K)]$ , konieczne staje się poszukiwanie rozwiązań pozwalających obniżyć powyższy parametr.

Skrzydło drzwi stalowych składa się z dwóch krawędziowanych arkuszy blachy pomiędzy które z reguły wklejone jest wypełnienie skrzydła. W zależności od zastosowanego wypełnienia, skrzydło uzyskuje określone parametry akustyczne, termiczne lub mechaniczne. Ponadto w ostatnim czasie dąży się również do ograniczenia zużycia materiałów pierwotnych i nieprzetwarzalnych, a także zwraca się większą uwagę na wzrost dbałości o środowisko naturalne poprzez stosowanie materiałów biodegradowalnych. Jednakże wciąż najczęściej wykorzystywane są materiały uznawane za klasyczne, nie biodegradowalne, tj.: polistyren ekspandowany (XPS), polistyren (EPS), poliuretan (PU) oraz wełna mineralna.

Analizę przenikalności termicznej wykonuje się zgodnie z normą PN-EN ISO 10077-2:2012 „Ciepłne właściwości użytkowe okien, drzwi i żaluzji. Obliczanie współczynnika przenikania

ciepła. Część 2: Metoda komputerowa ram”, przy zastosowaniu programu BISCO. Współczynnik przenikania ciepła ramy wyliczany jest za pomocą wzoru:

$$U_f = \frac{L_f^{2D} - U_p * b_p}{b_f} \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$$

*Norma PN –EN ISO 10077-2:2012 Załącznik C.1*

### 1.1. Rodzaje wypełnień skrzydła

Drzwi zewnętrzne powinny charakteryzować się doskonałą izolacyjnością termiczną i akustyczną. Jest to zarówno wymóg normy jak również wymóg rynkowy, gdzie klient oczekuje, że drzwi będą go chronić zarówno przed dobiegającym z zewnątrz hałasem lub izolować jego odgłosy od innych oraz przed czynnikami zewnętrznymi, w tym między innymi ciepłymi. Poniżej opisano najczęściej występujące wypełnienia w skrzydłach drzwiowych.

- Pianka poliuretanowa

Poliuretany to polimery składające się z dwóch surowców polioliu i izocyjanianu. Mają doskonałe właściwości termoizolacyjne. Przetwarza się go metodą odlewania ręcznego lub maszynowego. Dwukomponentowy system miesza się w odpowiednich proporcjach. Następnie materiał wypełnia formę tworząc strukturę zamknięto komórkową. Proces formowania trwa ok. 20 min w prasie w temperaturze 50°C [2].



*Rys. 1 Przekrój skrzydła z wypełnieniem poliuretanowym (opracowanie własne)*

- Polistyren ekspandowany

Powstaje w wyniku wstępnego spienienia granulatu, z następnym łączeniem ich w formie bloku. Proces ten polega na napełnianiu pentanem kuleczek polistyrenu podczas spieniania. Następnie pod wpływem pary są ze sobą sklejjane. Zalety tego typu materiałów to przede wszystkim: mała gęstość i tym samym niski ciężar [3].



*Rys. 2. Przekrój skrzydła z wypełnieniem XPS (opracowanie własne)*

- Polistyren ekstrudowany

Powstaje w wyniku wtlaczania granulatu do formy o odpowiednich wymiarach. Charakteryzuje się większą twardością oraz lepszymi własnościami termoizolacyjnymi niżeli polistyren ekspandowany.



Rys. 3. Przekrój skrzydła z wypełnieniem EPS (opracowanie własne)

- Wełna mineralna

Materiał produkowany z surowców naturalnych. Występuje w odmianach skalnej i szklanej (mineralna). Powstająca w procesie wytapiania wełna mineralna powstaje poprzez stopienie stłuczki szklanej (pochodzącej najczęściej z recyklingu), piasku kwarcowego wraz z dodatkami uszlachetniającymi, tj. dolomit, wapień i gabro. Następnie taka przygotowana mieszanka, najczęściej wymieszana i wstępnie zhomogenizowana jest podgrzewana do temperatury 1000 °C i poddawana procesowi rozwłóknienia, formowania i łączenia za pomocą lepiszcza w płyty, maty, otuliny, charakteryzujące się dobrymi własnościami wytrzymałościowymi oraz termoizolacyjnymi. Najważniejszą cechą wełny mineralnej jest jej niepalność.



Rys. 4. Przekrój skrzydła z wypełnieniem z wełny mineralnej (opracowanie własne)

- Grzybnia

Ekologiczny materiał powstały w wyniku zakorzenienia grzybów w materiale organicznym np. drewnie lub odpadach roślinnych. Wytwarzanie materiału zaczyna się od przygotowania podłoża, a następnie zaszczepienia grzybnią. Proces rozrastania trwa ok. 14 dni w temperaturze 20°C. W tym czasie grzybnia wrasta w materiał organiczny tworząc stabilny strukturalny kompozyt. Następnie kompozyt jest wygrzewany w piecu w temperaturze 200°C przez ok. 20 minut. Tak przygotowany materiał charakteryzuje się wysoką termoizolacyjnością oraz

niepalnością. Materiał jest w pełni ekologiczny i po okresie eksploatacyjnym, może być składowany jako materiał biodegradowalny lub można go ponownie wykorzystać jako podłoże dla kolejnego posiewu grzybni.



Rys. 2 Płyta izolacyjna z grzybni (opracowanie własne)

Tablica 1. Parametry przenikalności termicznej, dla wybranych materiałów wypełnienia.

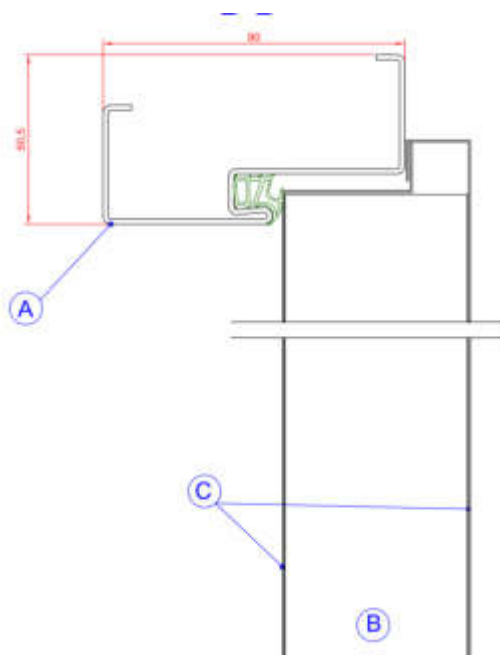
| Rodzaj wypełnienia                             | EPS   | XP S  | Wełna | PU    | Grzybnia |
|--|-------|-------|-------|-------|----------|
| Współczynnik przenikalności termicznej [ W/mK] | 0,044 | 0,029 | 0,032 | 0,022 | 0,024    |

## 1. METODYKA I WYNIKI BADAŃ

W celu obliczenia przenikalności termicznej przygotowano w programie CAD przekroje skrzydła z ościeżnicą. Następnie podzielono przekroje na trzy części tj.:

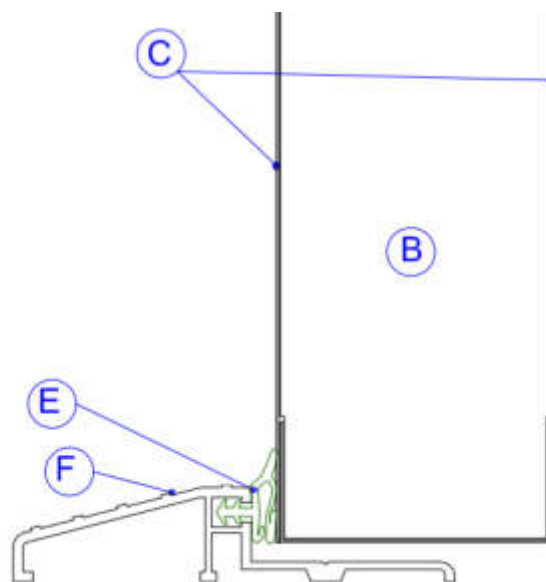
- Ościeżnica- skrzydło (Rys.6)
- Ościeżnica- próg (Rys.7)
- Wypełnienie (Rys.8)

- Ościeżnica i skrzydło



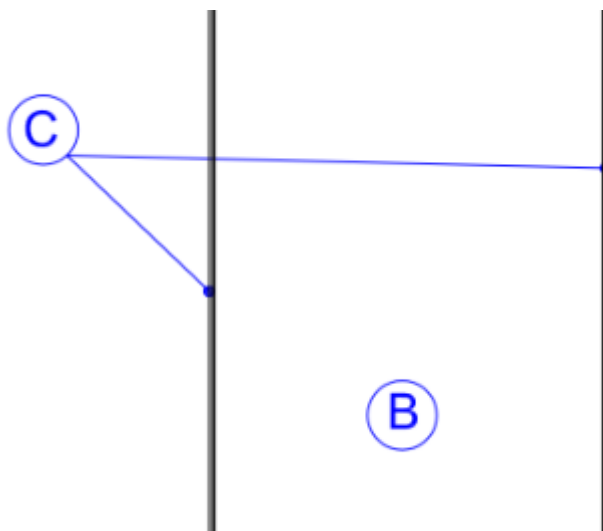
Rysunek 3 Przekrój ościeżnicy i skrzydła; A- ościeżnica stalowa; C- stalowy płaszcz; B- wypełnienie skrzydła z tabeli 1 (opracowanie własne)

- Ościeżnica i próg



Rys. 7. Przekrój ościeżnicy i progu; C- płaszcz zewnętrzny; B- wypełnienie skrzydła z tabeli 1; E- uszczelka; F- próg (opracowanie własne)  
- skrzydło





Rys. 4 C- płaszcz skrzydła; B- wypełnienie skrzydła z tabeli 1 (opracowanie własne)

Następnie tak zaprojektowanym przekrojom, przypisano w programie BISCO materiały z których były wykonane (jako element B w projektach (Rys. 6-8) posłużyły poszczególne materiały z tablicy 1). Do obliczeń przenikalności termicznej dla powyższych przekrojów przyjęto współczynniki przewodzenia ciepła materiałów konstrukcji drzwi stalowych umieszczone w tablicy 2.

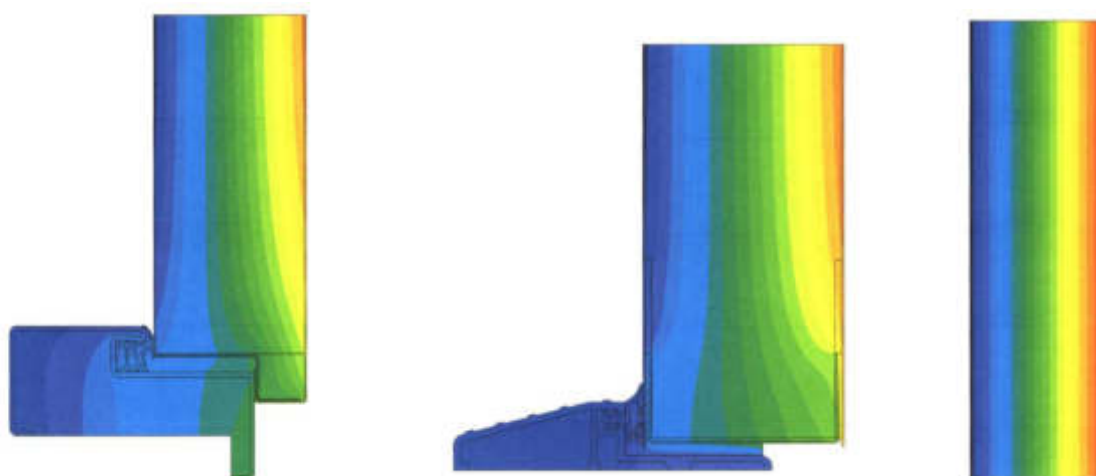
Tablica 2. Współczynniki przewodzenia ciepła wybranych materiałów inżynierskich.

| Lp. | element konstrukcji  | materiał               | $\lambda$ [W/m*K]      |
|-----|----------------------|------------------------|------------------------|
| 1   | Ościeżnica           | Stal                   | 50                     |
| 2   | Płaszcz skrzydła     | Stal                   | 50                     |
| 3   | Próg                 | Aluminium              | 160                    |
| 4   | Uszczelka ościeżnicy | EPDM                   |                        |
| 5   | Wypełnienie skrzydła | Na podstawie tablicy 1 | Na podstawie tablicy 1 |

Tablica 3. Warunki brzegowe przyjęte do obliczeń zgonie z normą PN-EN ISO 10077-2:2012:

| Lp. | Obszar                           | Temp. [°C] |
|-----|----------------------------------|------------|
| 1.  | Graniczny zewnętrzny             | 0          |
| 2.  | Graniczny wewnętrzny             | +20        |
| 3.  | Graniczny wewnętrzny Zredukowany | +20        |

Rozkład temperatur dla analizowanych przekrojów przedstawiono poniżej:



Rysunek 9. Rozkład temperatur dla analizowanych przekrojów. a) ościeznica-skrzydło, b) ościeznica- próg, c) skrzydło.

Obliczenia współczynnika  $U_d$  dla drzwi o grubości 55mm i wymiarach zewnętrznych 2100x1100mm zostały wykonane dla projektu zbiorczego, tj. złożonego z poszczególnych przekrojów na podstawie wzoru. Współczynnik przenikania ciepła ramy wyliczany jest za pomocą wzoru [1] w którym zastosowano kolejno 5 analizowanych wypełnień. W tabelicy poniżej przedstawiono wartości  $U_d$  dla analizowanych wypełnień (tablica 4).

Tablica 4. Wartości współczynnika przenikania ciepła skrzydła o grubości 55mm dla różnych materiałów.

| Rodzaj wypełnienia  | EPS                       | XP<br>S                   | Wełna<br>mineralna        | PU                        | Grzybni<br>a              |
|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Współczynnik $U_d$ dla drzwi o grubości 55mm i wymiarach zewnętrznych 2100x1100mm | 1,4<br>W/m <sup>2</sup> K | 1,2<br>W/m <sup>2</sup> K | 1,2<br>W/m <sup>2</sup> K | 1,0<br>W/m <sup>2</sup> K | 1,1<br>W/m <sup>2</sup> K |

## PODSUMOWANIE

Wykonana analiza numeryczna wykazała, że rodzaj zastosowanego wypełnienia ma znaczący wpływ na współczynnik  $U_d$  przenikania ciepła skrzydła drzwi. Zamiana wypełnienia z EPS na pozostałe pozwala uzyskać parametry  $U_d$  zgodne z wymogami rozporządzenia. W związku z powyższym zastosowanie wypełnienia zależne będzie od przeznaczenia. Wypełnienie poliuretanowe charakteryzuje się najniższym współczynnikiem przenikalności termicznej, jednak ze względu na klasę palności E- skrzydła te nie znajdują zastosowania jako drzwi przeciwpożarowe. W takim zastosowaniu doskonale sprawdzi się natomiast wełna mineralna- klasa palności A1. Wełna charakteryzuje się również doskonałymi właściwościami akustycznymi. Wadą jest duża gęstość przez co wzrasta ciężar skrzydła. XPS przy takim

samym współczynnikiem przenikalności termicznej jaki jest przypisany dla wełny mineralnej będzie znacznie lżejszy. Zastosowanie grzybni będzie najlepszym rozwiązaniem z punktu widzenia ekologii. Wypełnienie jest w pełni biodegradowalne, a proces technologiczny wytworzenia materiału nie jest energochłonny.

## BIBLIOGRAFIA

1. L.A. Dobrzański, Podstawy nauki o materiałach i materiałoznawstwo, Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 2002;
2. MT WG-3542- karta techniczna systemy PU Polychem Systems.
3. <https://www.chemiabudowlana.info/index,sloownik,172> [dostęp 20.07.2022]
4. <https://www.ecovative.com/pages/why-mycelium> [dostęp dnia 20.07.2022]
5. <https://www.rockwool.com/pl/produkty-i-rozwiazania/produkty/hardrock-max/?selectedCat=dokumentacja%20produktowa>; [dostęp dnia 20.07.2022]
6. *Norma PN* –EN ISO 10077-2:2012;