

TalentDetector

**TalentDetector2022\_Winter**  
**MIĘDZYNARODOWA STUDENCKA**  
**KONFERENCJA NAUKOWA**

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

Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych,  
Wydział Mechaniczny Technologiczny,  
Politechnika Śląska  
28 stycznia 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. Bonek, Z. Brytan, S. Lesz, G. Matula, M. Opiela, D. Pakuła, W. Pilarczyk, M. Sroka, A. Śliwa, T. Tański, J. Trzaska, J. Mazurkiewicz

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 styczeń 2022

**MIĘDZYNARODOWA STUDENCKA KONFERENCJA NAUKOWA  
TALENTDETECTOR2022\_WINTER  
POLITECHNIKA ŚLĄSKA, GLIWICE  
28 STYCZNIA 2022**

Międzynarodowa Studencka Konferencja Naukowa TalentDetector2022\_Winter 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

**WSPÓLORGANIZATOR**

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  
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, *Khmelniyskyi National University, Ukraine*  
prof. Mykola Skyba, *Khmelniyskyi 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 hab. inż. Zbigniew Brytan, Prof. PŚ  
dr hab. inż. Klaudiusz Gołombek, Prof. PŚ  
dr hab. inż. Mariusz Krupiński, Prof. PŚ  
dr hab. inż. Sabina Lesz, Prof. PŚ  
dr hab. inż. Grzegorz Matula, Prof. PŚ  
dr hab. inż. Marek Opiela, Prof. PŚ  
dr hab. inż. Daniel Pakuła, Prof. PŚ  
dr hab. inż. Wirginia Pilarczyk, Prof. PŚ  
dr hab. inż. Agata Śliwa, Prof. PŚ  
dr hab. inż. Tomasz Tański, Prof. PŚ  
dr hab. inż. Jacek Trzaska, prof. PŚ  
dr hab. inż. Janusz Mazurkiewicz, prof. PŚ  
dr hab. inż. Marek Sroka  
dr inż. Marcin Bilewicz  
dr inż. Aleksandra Drygała  
dr inż. Barbara Grzegorzcyk  
dr inż. Ewa Jonda  
dr inż. Aneta Kania

dr inż. Monika Kciuk  
dr inż. Beata Krupińska  
dr inż. Anna Kloc-Ptaszna  
dr inż. Marek Kremzer  
dr inż. Mariusz Król  
dr inż. Agnieszka Nowak  
dr inż. Magdalena Polok-Rubiniec  
dr inż. Łukasz Reimann  
dr inż. Marcin Staszuk  
dr inż. Magdalena Szindler  
dr inż. Marek Szindler  
dr inż. Anna Włodarczyk-Fligier  
dr inż. Adam Zarychta  
dr inż. Bogusław Ziębowicz  
mgr inż. Anna Kiljan  
mgr inż. Weronika Smok  
mgr inż. Anna Woźniak  
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

### **TOM 1**

Własności przetwórcze biodegradowalnych materiałów kompozytowych o osnowie termoplastycznej (BIOPLAST GS 1289) O. Baszcheńska, K. Niesporek, M. Bociek, M. Masłowski, K. Starzyniec, Ł. Kołodziej, A.J. Nowak.....	1
Wpływ obróbki cieplnej na strukturę i własności mechaniczne stali 1.2709 wytwarzanej techniką SLM M. Benedyk, M. Król, T. Tański.....	10
Otrzymywanie i charakterystyka adsorbentów do zastosowań w pozaustrojowym oczyszczaniu krwi I. Biesiada, K. Malorna, J. Majewska .....	17
Mechanizm zużycia kawitacyjnego niskotarciowej powłoki kompozytowej CrN + WC/C nałożonej na generatory kawitacji ze stali P265GH i X2CrNi18-9 (304L) W. Borek, T. Linek, T. Tański .....	27
Koncepcja i znaczenie czwartej rewolucji przemysłowej K. Broy, L. Drużyńska, A. Kiljan, E. Jonda.....	38
Súčasn� trendy syst�mov pl�novania podnikov�ch zdrojov P. Chobot, M. Martinkovič, L. Kuchariková, E. Tillová, M. Bonek .....	51
Biodegradowalne polimery do zastosowań medycznych K. Cholewa, N. Jaskółka, W. Smok.....	61
Podnikateľsk� rizik� a sp�soby ich zni�zovania V. Chvaln�kov�, E. Bigořov�, L. Kuchariková, M. Bonek.....	69
Porównanie mikrostruktury oraz twardořci napoin wytworzonych w procesie PPTAW z proszków wzmacnianych WC N. Ciemała, Ł. Wantuch, Ł. Szostek, M. Adamiak.....	79

---

Wpływ temperatury i czasu obróbki cieplnej na twardość stali jakościowej do ulepszania cieplnego 1.0503 (C45). P. Cincio, P. Pogorzelski, J. Gola, M. Otto, S. Lesz, A. Drygała, A. Zarychta, S. Topolska, B. Hrapkowicz, J. Popis.....	87
Destruction of footwear and sewing materials by impact V. Danylchuk, O. Polishchuk, T. Romanets, S. Lisevich, M. Bonek.....	99
Struktura i własności powłoki Ti(C,N) naniesionej na podłoże z węglików spiekanych E. Drózdź, D. Pakuła .....	112
Struktura i własności kompozytów polimerowo-ceramicznych J. Dziduch, K. Gołombek G. Matuła.....	122
Analiza własności stali stosowanych na kolektory ssące w silnikach spalinowych A. Dziwis, W. Mikołajko, M. Marcinkowski, A. Śliwa , M. Sroka .....	134
Zastosowanie granul na bazie haloizytu i osadu ściekowego do adsorpcji niklu z wody A. Dziwis, N. Szczotka, E. Puszczalo, G. Kamińska, A. Marszałek, J. Majewska, M. Sroka, N. Fathy .....	152
Analiza numeryczna własności implantów płytkowych do zespoleń kręgosłupa z wykorzystaniem różnych materiałów inżynierskich A. Dziwis, A. Śliwa .....	160
Obróbka cieplna komponentów wytwarzanych metodą FDM P. Falkowska, M. Mularczyk, P. Stryczek, D. Tatar, S. Woryna, M. Król.....	172
Bezpieczeństwo pracy podczas pandemii Covid-19 N. Feldek, J. Handerek, A. Kiljan, E. Jonda .....	185
Struktura i własności szkła spienionego z dodatkiem mineralnym O. Fraszuk, M. Lis , P. Sakiewicz, K. Gołombek.....	202
Ceramika budowlana jako element GOZ S. Gabrysiak, M. Kocur, M. Poloczek, A. Sadkowska, M. Kremzer, B. Słomka-Słupik.....	215
Badania wytrzymałościowe folii wielowarstwowej LDPE uzyskanej nowoczesną technologią rozdmuchu T. Gliński, M. Bilewicz, T. Tański.....	223
Analiza charakterystyki polimerów elektroprzewodzących metodą Elektrochemicznej Spektroskopii Impedancyjnej M. Gocki, A.J. Nowak .....	231

---

Metalizacja materiałów polimerowych wytworzonych metodą przyrostową M. Gocki , B. Płoch , A.J. Nowak.....	239
Wpływ parametrów obróbki cieplnej na strukturę stali niestopowej, jakościowej, do ulepszania cieplnego 1.0503 (C45) J. Gola, M. Otto, P. Cincio, P. Pogorzelski, S. Lesz, A. Drygała, A. Zarychta, S. Topolska, B. Hrapkowicz, J. Popis.....	249
Wpływ dodatku Cu i Sr na kinetykę krystalizacji stopu Al-Si-Mg H. Góralczyk, P. Grabias, K. Rutkowski, B. Krupińska, M. Krupiński.....	265
Analiza wpływu zmian struktury na własności eksploatacyjne materiałów narzędziowych przetapianych laserowo P. Janiak, J. Kierepka, E. Kocyan, M. Konieczny, A. Wójtowicz, M. Bonek, O. Polishchuk .....	273
Aspekty praktyczne, teoretyczne i prawne procesu technologicznego laserowej obróbki powierzchniowej P. Janiak, J. Kierepka, E. Kocyan, M. Konieczny, A. Wójtowicz, M. Bonek, O. Polishchuk .....	282
Laserowa modyfikacja własności trybologicznych warstwy wierzchniej stali P. Janiak, J. Popis, A. Wójtowicz, P. Barski, E. Kocyan, M. Bonek, E. Tillova.....	298
Wpływ parametrów spawania laserowego z materiałem dodatkowym na własności złączy doczołowych ze stali S700MC D. Jankowska, J. Górka .....	305
Kształtowanie drobnokrystalicznej struktury warstwy wierzchniej stali poprzez laserowe przetapianie D. Jankowska, M. Jędrzejczyk, M. Szweda, K. Kurka, Sz. Gancarz, M. Bonek, E. Tillova .....	318
Wpływ parametrów natryskiwania na mikrostrukturę i wybrane własności powłok natryskiwanych cieplnie na podłoże ze stopu magnezu AZ91 J. Jaworska, M. Gruszka, M. Nabrdalik, M. Marcinkowski, W. Mikołajko, E. Augustyn, E. Jonda, A. Maciej, A. Kiljan .....	327
Wpływ parametrów napawania laserowego na mikrostrukturę oraz makrostrukturę napoin wykonanych proszkiem na osnowie stopu NiSiB z dodatkiem WC M. Jędrzejczyk, D. Jankowska, O. Białas, M. Adamiak .....	343

Wpływ wzmocnienia z włókna węglowego na własności wytrzymałościowe nylonu w druku 3D S. Jędrzejewski, M. Paluch, T. Słaboszewski, D. Solipiwo, M. Adamiak .....	353
Kształtowanie drobnokrystalicznej struktury metali poprzez laserowe przetapianie K. Kalaga, A. Nieszporek, X. Poppe, J. Rzeszowski, M. Bonek, E. Tillova .....	361
Odporność korozyjna materiałów konstrukcyjnych K. Kalaga, A. Nieszporek, X. Poppe, J. Rzeszowski, M. Bonek, E. Tillova .....	368
Analiza i ocena ryzyka zawodowego na stanowisku pracy spawacza P. Karchut, E. Jonda.....	381
Wpływ dodatku poliwęglanu na własności mechaniczne i strukturę kompozytu na osnowie blendy polimerowej poliwęglan/akrylonitryl-butadien-styren P. Kaślewicz, K. Mazik, M. Bilewicz .....	390
Metody obróbki powierzchniowej biomateriałów J. Kolasa, K. Kolbuch, A. Woźniak.....	397
Wykorzystanie materiałów ceramicznych i supertwardych materiałów narzędziowych w procesach obróbki powierzchniowej K. Kopeć, A. Kloc-Ptaszna .....	406
Wytwarzanie materiału polimerowego z białka pochodzenia zwierzęcego K. Koryciak, M. Ziółkowska, B. Głodek, P. Radek, M.M. Szindler, M. Szindler.....	418

## TOM 2

Struktura i własności tlenku cyrkonu wytwarzanego metodą FDM J. Koziół, M. Kremzer, G. Matula .....	431
Obróbka cieplno-plastyczna stopów Mg-Li M. Król, P. Snopiński, O. Poliszczuk, M. Skyba.....	440
Opracowanie i wytworzenie metodą druku 3D termoplastycznej wkładki do trójdzielnej formy wtryskowej A. Krzak, M. Gocki, S. Borek, M. Podsiodło, M. Bojdoł, A.J. Nowak .....	448
Zastosowanie druku 3D w dobie Przemysłu 4.0 K. Ksionsyk, T. Janczak, E. Jonda, A. Kiljan .....	455



---

Wpływ obróbki cieplnej na strukturę i własności użytkowe stali 60WCrV8 K. Kurka, M. Kciuk, R. Babilas .....	464
Struktura i własności teksturowanych laserowo materiałów narzędziowych N. Łopata, D. Pakuła .....	472
Porównanie technologii prasowania i formowania wtryskowego proszku na przykładzie węgliku spiekane P. Malkusch, N. Kos, A. Pieczka, W. Kurczak, G. Matula, K. Gołombek .....	482
Investigation of product manufacturing by recycling from cable waste cross linked polyethylene C. Meran, Ö. Eren, M. Ergin, K. Erdoğan, G. Akgül .....	499
Autonomous maintenance on wire drawing machine C. Meran, K. İlhan, B.C. Tufekci, V. Kaya, Y. Senyildiz .....	507
Improvement of key performance indicators in NEXANS maintenance management C. Meran, K. İlhan, A. Yavaş, E. Karahan, Ş. Büke .....	513
Aplikacja do akwizycji danych z EEG KT88-2400 D. Myszor, M. Wieczorek, M. Sujkowski, E. Szmyt, M. Zieliński, T. Kukuczka .....	524
The calculation of technological efforts on the mechanism of slotted needles of basic knitting machines V. Neimak, O. Polishchuk, T. Romanets, A. Yerii, M. Bonek .....	530
Konwencjonalne materiały narzędziowe (stal) oraz materiały narzędziowe o osnowie fazy wiążącej (węgliki spiekane, cermetale) oraz obróbka powierzchniowa tych materiałów M. Olszowska, A. Kloc-Ptaszna .....	539
Výroba primárneho hliníka a jeho zliatin I. Petrisková, L. Kuchariková, E. Tillová, L. Pastierovičová, M. Mazur, M. Bonek .....	558
System of adaptive frequency control of speed of rotation of the asynchronous three-phase electric motor of the drive of the rotary crusher for crushing of polymeric materials A. Polishchuk, O. Misiats, A. Pervak, V. Grudinín, M. Skyba, M. Bilewicz .....	567
Generalized classification filament for 3D-printing A. Polishchuk, V. Grudinín <sup>b</sup> , O. Polishchuk, P. Maidan .....	579
Optimization of the titanium oxide deposition process for photovoltaic applications L. Poniewiera, A. Rishko, D. Sudak, D. Kula, W. Barczyk, A. Drygała, M. Fijałkowski, S. Lesz, K. Gołombek, M. Kremzer .....	593

---

Wpływ teksturowania laserowego na powierzchnię materiałów. X. Poppe, M. Polok-Rubinić.....	603
Badania wstępne złącza spawanego wykonanego ze stali Super 304H T. Puszczalo, M. Sroka, A. Zieliński.....	612
Rodzaje hybrydowych obróbek powierzchniowych materiałów metalowych i ceramicznych M. Radoń, M. Staszuk .....	620
Programowanie robotów przemysłowych do zadań napawania laserowego R. Sanetra, M. Bonek.....	635
Polymérne kompozitné materiály vystužené vláknami L. Šikyňa, R. Bašťovanský, L. Kuchariková, E. Tillová, M. Bonek .....	651
Plazmová nitridácia a únavová životnosť austenitickej ocele AISI 304 M. Slezák, M. Uhrčík, L. Kuchariková, E. Tillová, M. Bonek .....	661
Teoretická analýza jednotlivých pásiem zvarového spoja AHSS ocelí využívaných v automobilovom priemysle J. Smatana, D. Medvecká, L. Kuchariková, E. Tillová, M. Bonek.....	670
Bezpieczeństwo pracy i ergonomia na stanowisku robotyka D. Sobecka, A. Kania.....	678
Analiza mikrostruktury złącza spawanego ze stali P92 po 3000 godzin wyżarzania w temperaturze 600°C oraz 650°C K. Sówka, M. Sroka .....	686
Wytwarzanie i badanie kompozytu o osnowie polimerowej z mineralnym wypełniacze N. Śpiewak, M. Lis, K. Gołombek.....	697
Konwencjonalna metoda spiekania materiału FC-0208 A. Stanula, W. Pilarczyk.....	711
Natryskiwanie cieplne ścian szczelnych kotłów energetycznych powłokami zabezpieczającymi przed korozją wysokotemperaturową W. Szymański, A. Migacz, A. Czupryński, M. Żuk .....	724
Technológie zvarania v petrochemickom priemysle N. Višňovská, R. Koňár, L. Kuchariková, E. Tillová, M. Bonek .....	744
Wpływ procesu mielenia kulowego na wielkość cząstek wełny mineralnej A. Walentyńska, B. Łażniewska-Piekarczyk, B. Tomiczek, M. Czop, D. Smyczek.....	754

---

Wpływ obróbki powierzchniowej na zużycie narzędzi skrawających D. Wilczek, D. Pakuła .....	762
Analiza termodynamiczna procesu wydzielania węglikoazotku $Ti_xV_{1-x}C_yN_{1-y}$ w stali typu HSLA A. Wojtacha, M. Opiela .....	770
Wpływ utwardzacza na wybrane własności wytrzymałościowe żywic poliestrowych G. Zieliński, A. Włodarczyk-Fligier .....	784
Wpływ parametrów degradacji i spiekania na strukturę i własności wytrzymałościowe komponentów ze stali nierdzewnych 17-4PH i 316L wytwarzanych technologią FDM M. Ziółkowska, G. Matula .....	792
Organizacja systemu produkcyjnego dla produkcji form metalowych wytwarzanych technologią druku 3D P. Złotoś, A. Ramos, R. Bednarczyk, N. Cieślińska, A. Barcz, K. Czupryńska, M. Bonek, O. Polishchuk .....	803
Poprawa własności eksploatacyjnych powierzchni materiałów narzędziowych przy użyciu obróbki laserowej P. Złotoś, A. Ramos, R. Bednarczyk, N. Cieślińska, A. Barcz, K. Czupryńska, M. Bonek, O. Polishchuk .....	815
Budowa stanowiska do badań technologicznych drutów wraz z badaniami przełomów i własności wytrzymałościowych P. Falkowska, M. Rejek, D. Tatar, K. Tobolik, M. Stachura, D. Werenc, J. Mazurkiewicz .....	825
Wpływ przygotowania powierzchni elementów cynkowanych galwanicznie oraz aluminiowych na przyczepność powłok poliestrowych nakładanych technologią proszkową B. Czechowski, P. Drejka, M. Rejek, K. Smolaga, M. Tlon, P. Zdybel, K. Jaszcz, J. Mazurkiewicz, A. Ryfa .....	834





## Struktura i własności tlenku cyrkonu wytwarzanego metodą FDM

J. Kozioł<sup>a</sup>, M. Kremzer<sup>b</sup>, G. Matula<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Studentka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Studenckie Koło Naukowe Metalurgii Proszków

email: julikoz430@student.polsl.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych

email: marek.kremzer@polsl.pl

email: grzegorz.matula@polsl.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono badania strukturę i własności wytrzymałościowe tlenku cyrkonu wytworzonego metodą przyrostową polegającą na ukierunkowanym wytłaczaniu materiału FDM (*ang. Fused Deposition Modeling*). Materiałem użytym do badań był filament napełniony proszkiem tlenku cyrkonu. W ramach pracy zaprojektowano geometrię próbek w środowisku CAD, dokonano optymalizacji parametrów druku 3D, degradacji chemicznej i termicznej lepiszcza oraz procesu spiekania. Otrzymane próbki poddano badaniom struktury w elektronowym mikroskopie skaningowym oraz badaniom własności wytrzymałościowych metodą trójpunktowego zginania.

**Abstract:** The article presents studies of the structure and strength properties of zirconium oxide produced by the additive method consisting in directed extrusion material - FDM (Fused Deposition Modeling). The material used for the tests was a filament filled with zirconium oxide powder. As part of the work, the geometry of the samples in the CAD environment was designed, the 3D printing parameters, chemical and thermal degradation of the binder and the temperature course of the sintering process were optimized. The obtained samples were tested for structure in a scanning electron microscope SEM and for strength properties testing using the three-point bending method.

**Słowa kluczowe:** materiały ceramiczne, tlenek cyrkonu, technologie przyrostowe, druk 3D, Fused Deposition Modeling

### 1. WSTĘP

Od kilku lat obserwuje się coraz szersze zastosowanie technologii przyrostowych w przemyśle. Spowodowane jest to ich dostępnością, stosunkowo niskim kosztem urządzeń oraz wieloma zaletami technologicznymi do których zaliczyć należy: szybkość wytwarzania,

możliwość prototypowania, a także łatwość zmiany parametrów (również geometrii elementu). Istnieją metody oparte na natryskiwaniu, ukierunkowanym osadzaniu energii ze złożem proszkowym bądź ciałem stałym w postaci drutu, wytłaczaniu materiału, spajaniu ze złożem proszkowym czy laminowaniu arkuszy. Jednym z rodzajów technologii przyrostowej jest proces wytłaczania materiałów FDM, który polega na wytwarzaniu elementów poprzez wytłaczanie uplastycznionego filamentu z głowicy, warstwa po warstwie. Modele projektowane są zazwyczaj tworzone za pomocą programów CAD, choć możliwe są również techniki inżynierii odwrotnej, takie jak skanowanie 3D. Proces FDM zyskał największą popularność wśród technologii przyrostowych ze względu na łatwą obsługę urządzeń, niskie koszty materiałów oraz możliwość szybkiego prototypowania. Najczęściej wykorzystywanymi materiałami w procesach FDM są materiały polimerowe. Wykorzystywane są ze względu na ich niską temperaturę uplastycznienia, niskie koszty, duży wybór rodzajów materiałów, kolorów itp. Jednak ze względu na ograniczone zastosowanie materiałów polimerowych, prowadzone są szeroko zakrojone badania nad wytwarzaniem filamentów napełnionych materiałami metalowymi, ceramicznymi czy kompozytami.

Na szczególną uwagę zasługuje wytwarzanie materiałów ceramicznych i betonu technologiami przyrostowymi, gdyż charakteryzują się one dobrymi własnościami mechanicznymi, takimi jak odporność na ściskanie czy korozję. Materiałami najczęściej wykorzystywanymi w druku 3D są: grafit, węgliki, tlenki, azotki, włókna węglowe, epoksydy z dodatkiem ceramiki, krzemionka.

W wytwarzaniu materiałów ceramicznych technologiami przyrostowymi wyróżniamy kilka etapów, które są charakterystyczne dla klasycznej metalurgii proszków, a podstawową różnicę stanowi jedynie sposób formowania. Do głównych etapów metalurgii proszków zaliczyć należy:

- wytwarzanie proszku,
- formowanie masy,
- wytworzenie proszku lub mieszaniny proszków różnych materiałów,
- przygotowanie proszku,
- formowanie proszku na zimno,
- spiekanie,
- ewentualna obróbka wykończająca.

Ze względu na wysokie własności wytrzymałościowe, takie jak duża twardość, wytrzymałość na ściskanie czy odporność na zużycie, materiały ceramiczne często znajdują zastosowanie w przemyśle lotniczym, stomatologicznym, budowlanym oraz na materiały narzędziowe. Spiekane materiały takie jak węgliki, azotki czy tlenki charakteryzują się korzystnymi własnościami wytrzymałościowymi, wysoką twardością i odpornością na ścieranie, dlatego znajdują zastosowanie do obróbki metali [1-6].

Tlenek cyrkonu występuje w postaci białego ciała stałego o wysokiej temperaturze topnienia oraz wysokiej odporności chemicznej. Tlenek cyrkonu cieszy się dużym zainteresowaniem ze względu na różnorodne praktyczne zastosowania:

- jako katalizator, bądź nośnik katalizatora,
- jako czujnik tlenu,
- na powłoki ochronne do lusterek optycznych oraz filtrów,
- na urządzenia nanoelektroniczne,
- jako rodzaj biomateriału ceramicznego,
- jako dozymetry termoluminescencyjne UV,

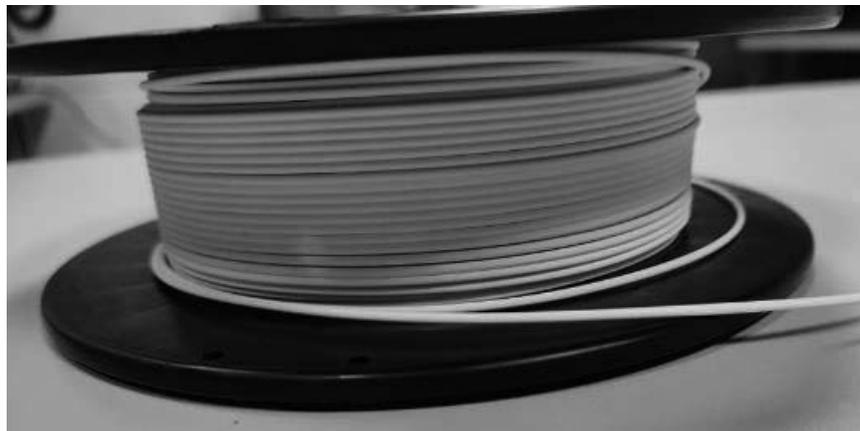
- w protetyce stomatologicznej [7].

Gęstość tlenku cyrkonu wynosi ok. 6 g/cm<sup>3</sup>. Posiada również bardzo niski współczynnik porowatości, co oznacza, niską ilość porów w strukturze obniżających własności mechaniczne. Jego wytrzymałość na zginanie waha się od 800 do nawet 1400 MPa.

Celem pracy było zbadanie struktury i własności tlenku cyrkonu wytwarzanego metodą FDM. Materiałem użytym do badań stanowił komercyjny filament z dodatkiem proszku tlenku cyrkonu. Dokonano optymalizacji parametrów druku 3D, degradacji chemicznej i termicznej oraz procesu spiekania.

## 2. PRZEBIEG BADAŃ

Materiałem użytym do drukowania próbek do badań był filament o średnicy 1,75 mm, napełniony tlenkiem cyrkonu w kolorze białym firmy SiCeram (Rys.1).

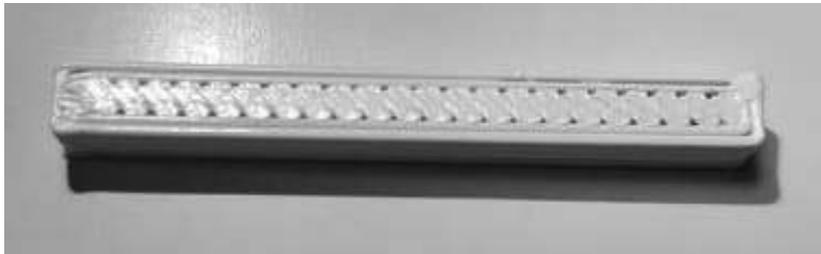


Rysunek 1. Filament firmy SiCeram z tlenkiem cyrkonu.

*Figure 1. SiCeram zirconium oxide filament.*

Pierwszym etapem badań było zaprojektowanie modeli próbek w programie CAD – Solidworks. Zaprojektowane zostały 2 rodzaje belek – o wymiarach 4x10x35 mm oraz 4x4x35 mm. Następnie modele te zapisane zostały do programu 3DGence Slicer 4.0 w celu podzielenia modelu na warstwy oraz nadaniu parametrów druku, takich jak: pozycja modelu na stole, ilość drukowanych modeli, skala, procent wypełnienia, średnica głowicy drukującej, temperatura ekstrudera, temperatura stołu, prędkość druku. Proces wytwarzania próbek do badań z tlenku cyrkonu polegał na osadzaniu stopionego materiału wykorzystując drukarkę 3DGence ONE.

Filamenty wypełnione cząstkami ceramicznymi cechują się wysoką kruchością. Z tego powodu są podatne na łamanie w trakcie drukowania, co przerywa cały proces. Podczas procesu druku zauważono, że filament po lekkim podgrzaniu uplastycznia się, a co za tym idzie – wzrasta jego elastyczność, stąd zdecydowano się na jego podgrzewanie do ok.40-50 °C. Dokonano optymalizacji parametrów druku, takich jak: temperatura głowicy drukującej, stolika oraz prędkość drukowania. Zoptymalizowane parametry przedstawiono w Tab. 1. Na Rys. 2 przedstawiono wydrukowaną próbkę przy użyciu parametrów z Tab. 1.



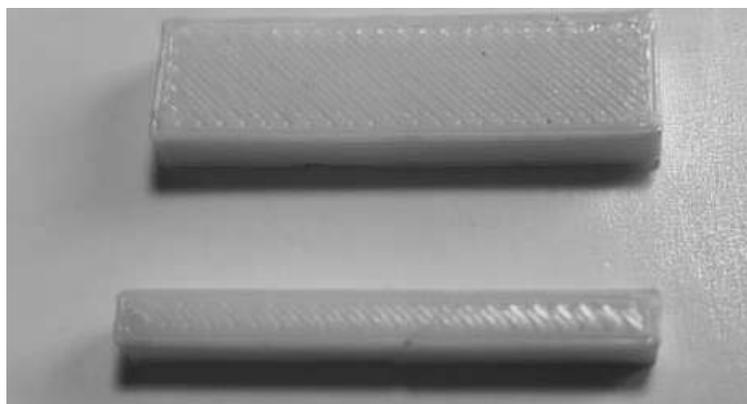
Rysunek 2. Wydrukowana próbka z tlenku cyrkonu.

*Figure 2. Printed zirconium oxide sample.*

Tablica 1. Parametry procesu druku przy użyciu filamentu napełnionego tlenkiem cyrkonu  
*Table 1. Parameters of the printing process with the use filament filled with zirconium oxide.*

Prędkość druku [mm/s]	30
Temperatura drukowania [°C]	170
Temperatura stołu [°C]	60

Po wydrukowaniu próbek zrealizowano dwa rodzaje procesów degradacji – chemiczny oraz termiczny. Wykonano je w celu usunięcia spoiwa proszku w wykorzystanym filamencie. Proces degradacji chemicznej polegał na zanurzeniu próbek w acetonie przez 48 godzin. Po wykonaniu procesu zauważono, że próbki drukowane po kilka na raz rozwarstwiają się i rozdzielają na części. Następnie lepiszcze filamentu usunięto przez degradację termiczną w atmosferze powietrza, w temperaturze max. 450 °C. Po procesach degradacji materiał poddano spiekaniu w atmosferze przepływającego powietrza w ilości 1litr/min. Temperatura spiekania wynosiła 1500 °C. Spieki przedstawiono na rysunku 3.



Rysunek 3. Próbkki tlenku cyrkonu po spiekaniu.

*Figure 3. Zirconium oxide samples after sintering.*

Tak otrzymane próbki poddano badaniu trójpunktowemu zginaniu. Badanie zrealizowano na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej firmy Zwick. W celu zbadania kształtu i wielkości



ziaren proszku tlenku cyrkonu zastosowanego w filamencie wykonano degradację cieplną lepiszcza samego filamentu i następnie wykonano obserwację struktury i morfologii proszków. W tym celu pokruszone filamenty wygrzewano w piecu przez 4 godziny w temperaturze 600 °C celem degradacji termicznej lepiszcza. Następnie zdegradowany materiał rozdrobniono w móżdziejcu. Tak przygotowany proszek zbadano za pomocą mikroskopu skaningowego Supra 35 firmy Zeiss wyposażonego w moduł EDS. Po procesie degradacji oraz spiekania próbki zmierzono oraz wyliczono skurcz objętościowy korzystając ze wzoru:

$$S_v = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100\%$$

gdzie:

$S_v$  – skurczliwość objętościowa

$V_0$  – objętość kształtki przed spiekaniem,

$V_1$  – objętość kształtki po spiekaniu

Następnie przeprowadzono badanie gęstości metodą hydrostatyczną korzystając ze wzoru:

$$\rho_b = \frac{m_s}{m_s - m_w} \rho_w$$

gdzie:

$\rho_b$  – gęstość badanego materiału,

$m_s$  – masa próbki na sucho,

$m_w$  – masa próbki w wodzie,

$\rho_w$  – gęstość wody.

### 3. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

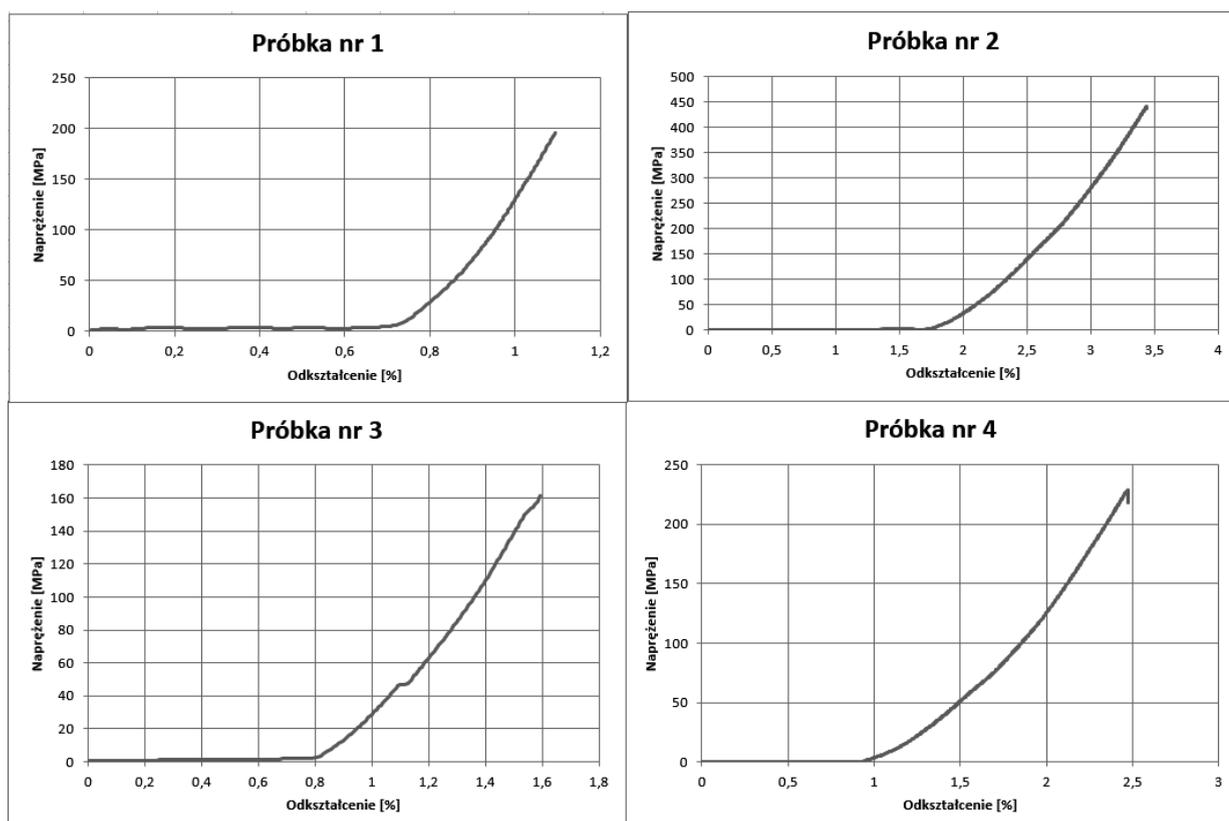
Proces drukowania elementów z filamentów wypełnionych cząstkami tlenku cyrkonu jest bardzo czasochłonny z uwagi na dużą kruchość filamentu. Producent podaje jedynie podstawowe parametry drukowania. Te jednak są zależne od rodzaju drukarki. Stąd na wstępie należy dobrać warunki drukowania do konkretnego urządzenia, co jest relatywnie czasochłonne. Brak informacji na temat warunków drukowania jest związany z niską popularnością filamentów wypełnionych cząstkami ceramicznymi oraz faktem, że są to zupełnie nowe rozwiązania w obszarze technologii przyrostowych.

Wydruki na podstawie danych producenta filamentu poddano wstępnej degradacji chemicznej. Niestety niektóre próbki uległy delaminacji kolejnych warstw wydruku. Zaobserwowano to w przypadku próbek, które były drukowane jednocześnie po kilka sztuk. Dzieje się tak z uwagi na to, że próbki drukowane są warstwa po warstwie – w przypadku kilku próbek drukowanych na raz, niższa warstwa zdąży wystygnać i kolejna nadrukowywana na nią charakteryzuje się niską przyczepnością. Do wydrukowania jednocześnie kilku sztuk wymagane byłoby zastosowanie drukarki wyposażonej w podgrzewaną komorę.

Badania zrealizowane na próbkach wytworzonych metodą FDM, pozwoliły na określenie wytrzymałości oraz struktury wytwarzanego w ten sposób tlenku cyrkonu. Wyniki badań metodą trójpunktowego zginania przedstawiono w tablicy 2 oraz na rysunku 4.

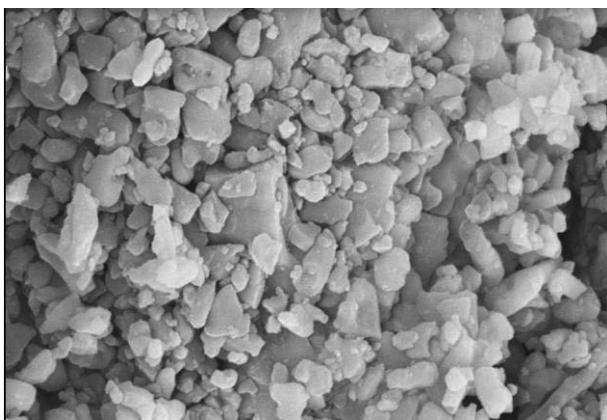
Tablica 2. Wyniki badania wytrzymałości na zginanie próbek z tlenku cyrkonu.  
 Table 2. Result of the bending strength test of zirconium oxide samples.

Nr próbki	$\sigma_{fM}$	h	b	$A_0$
	MPa	mm	mm	mm <sup>2</sup>
1	195,21	3,3	3,16	10,43
2	440,38	3,06	3,24	9,91
3	161,49	2,9	3,11	9,019
4	228,94	3,22	8,2	26,404



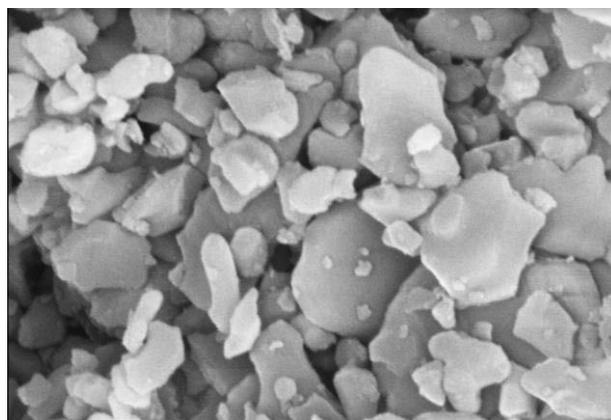
Rysunek 4. Wykresy napężenia od odkształcenia dla próbek z tlenku cyrkonu.  
 Figure 4. Stress-strain plots of zirconium oxide.

Morfologię proszku tlenku cyrkonu użytego do wytwarzania filamentów przedstawiono na rysunkach 5 i 6, natomiast wyniki badań na mikroskopie stereoskopowym przedstawiono na rysunkach od 7 do 10.



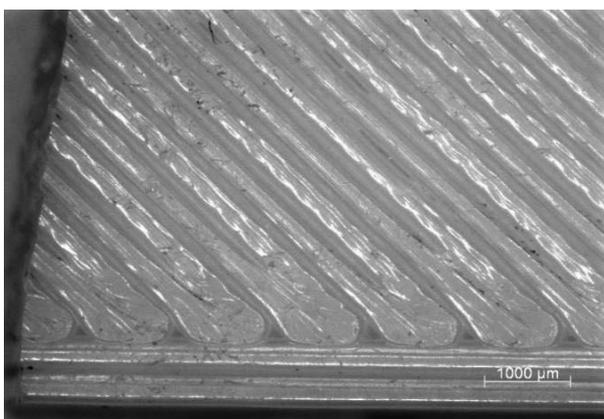
Rysunek 5. Morfologia proszku cyrkonu użytego do wytwarzania filamentów, pow. 50 000x.

Figure 5. Morphology of zirconium oxide powder used in filaments, mag. 50 000x.



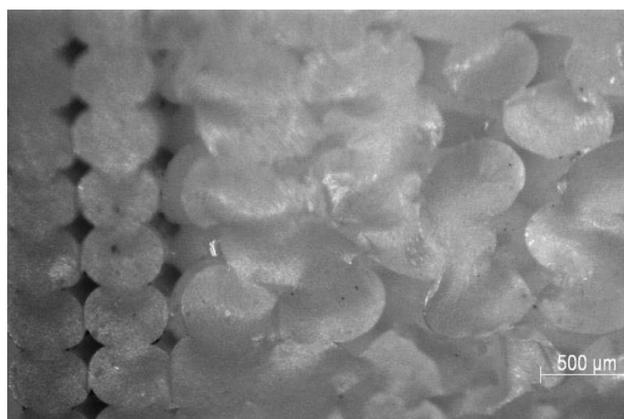
Rysunek 6. Morfologia proszku cyrkonu użytego do wytwarzania filamentów, pow. 100 000x.

Figure 6. Morphology of zirconium oxide powder used in filaments, mag. 100 000x .



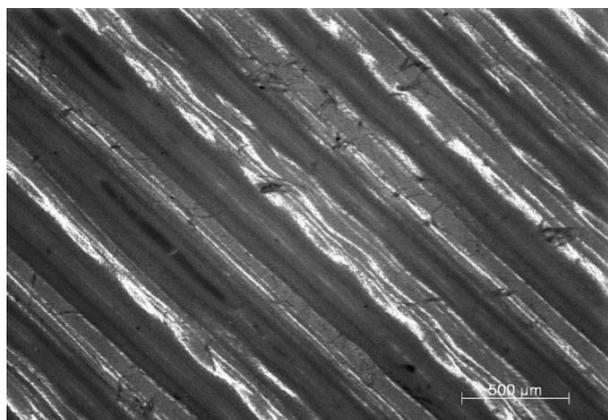
Rysunek 7. Widok boku próbki z tlenku cyrkonu,

Figure 7. Side view of the zirconium oxide sample



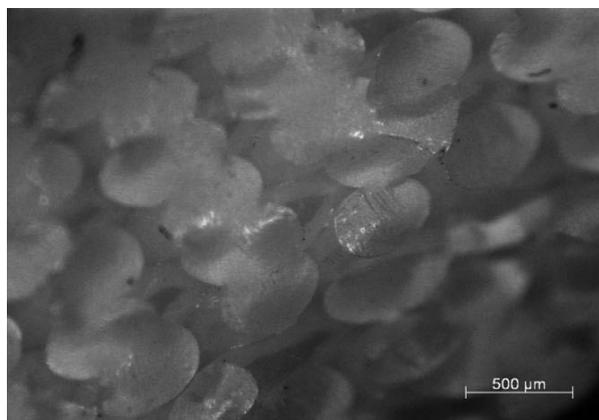
Rysunek 8. Widok przelomu próbki z tlenku cyrkonu,

Figure 8. Cross-section view of the zirconium oxide sample



Rysunek 9. Widok boku próbki z tlenku cyrkonu.

*Figure 9. Side view of the zirconium oxide sample*



Rysunek 10. Widok przełomu próbki z tlenku cyrkonu.

*Figure 10. Cross-section view of the zirconium oxide sample*

Podczas obserwacji cząstek proszku tlenku cyrkonu dokonano ich pomiarów wielkości. Średnia wielkość cząstek wynosi 621 nm. Morfologia proszku jest jednorodna, cząstki posiadają płatkowy kształt. Podczas obserwacji próbek pod mikroskopem stereoskopowym wyraźnie zauważalne są pory wynikające ze sposobu drukowania. W celu ich większego zagęszczenia po spiekaniu należy zmniejszyć dysze drukarki lub sposób drukowania. Średni skurcz spieków jest relatywnie wysoki i wynosi 48%. Jest on zależny od udziału polimerowego lepiszcza w filamencie, gdzie w przypadku materiałów ceramicznych wynosi ok. 50%. Zatem skurcz na tym poziomie jest jak najbardziej wiarygodny. Dość duży rozrzut wyników badania wytrzymałości na zginanie wynika z licznych porów, kanałów i nieciągłości w próbkach po spiekaniu. Jest to zależne głównie od sposobu drukowania. Duże przestrzenie między ścieżkami drukowanymi niestety nie ulegają anihilacji podczas procesu spiekania, stąd spiekane wydruki będą miały zawsze niższą gęstość i wytrzymałość mechaniczną od litego tlenku cyrkonu. Maksymalną wytrzymałością na zginanie tlenku cyrkonu, jaką udało się uzyskać wynosiła 440 MPa. Jest to wynik o połowę mniejszy od charakterystycznej wytrzymałości tlenku cyrkonu wytwarzanego konwencjonalnymi metodami. Badanie gęstości metodą hydrostatyczną drukowanych spieków może się okazać metodą obarczoną sporym błędem pomiarowym przy założeniach, że spiek jest relatywnie zagęszczony. Obserwując przełomy próbek spiekanych, należy przyjąć, że są to spieki porowate, które podlegają innej procedurze pomiarowej. Gęstość spieków badanych wg przyjętej metody wynosiła odpowiednio dla próbek o małym przekroju  $5,16 \text{ g/cm}^3$  oraz dużym przekroju  $5,8 \text{ g/cm}^3$ . Na tej podstawie można przypuszczać, że druk wzdłuż próbki obniża jej zagęszczenie po degradacji lepiszcza i spiekaniu.

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie wykonanych badań sformułowano następujące wnioski:

- filamenty z materiałów ceramicznych charakteryzują się wysoką kruchością, stąd wymagane jest ich wcześniejsze uplastycznienie. Odbywać się to może poprzez podgrzewanie bezpośrednio przed wprowadzeniem do głowicy,

- próbki z filamentów ceramicznych wymagają drukowania pojedynczo, ze względu na szybkie stygnięcie wydrukowanej warstwy. Gdy temperatura warstwy maleje, jednocześnie spada jej plastyczność, więc zmniejsza się adhezja pomiędzy warstwami. W trakcie procesu degradacji chemicznej, gdy rozpuszczane jest lepiszcze podtrzymujące proszek, istnieje ryzyko rozwarstwiania się próbek,
- drukowane próbki z tlenku cyrkonu charakteryzują się dwukrotnie niższą wytrzymałością na zginanie niż materiały wytwarzane konwencjonalnymi metodami, jednak druk 3D umożliwia na wytwarzanie elementów o skomplikowanym kształcie,
- przedstawiona technologia druku 3D materiałów ceramicznych wymaga dalszych badań optymalizacyjnych, jednak ze względu na liczne zalety i szerokie perspektywy rozwoju, bez wątpienia znajdzie zastosowania praktyczne.

Uwagi ogólne: Niniejsze opracowanie powstało częściowo dzięki realizacji projektu pt. „Dobór warunków degradacji lepiszcza i spiekania elementów wytwarzanych metodą przyrostową z wysokowypełnionych filamentów” w ramach działań Studenckiego Koła Naukowego Metalurgii Proszków działającego na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach, finansowanego w ramach programu „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza”.

## LITERATURA

1. C. Fiał, M. Pieknik, Druk 3D jako technologia przyszłości – część 1, Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Przemysłu Skórzanego, Technologia i Jakość Wyrobów 65, 2020
2. Oficjalna strona internetowa firmy B3D specjalizującej się w technologiach przemysłowych <https://b3d.com.pl/> (dostęp 19.11.2021)
3. J. Bochnia, Wybrane właściwości fizyczne materiałów kształtowanych technologiami przyrostowymi, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2018
4. Management Association & Information Reso, 3D Printing: Breakthroughs in Research and Practise, Engineering Science Reference, 2016
5. D. Loncierz, W. Lakzer, Wpływ parametrów druku 3D w technologii FDM na własności mechaniczne i użytkowe obiektów wykonanych z PLA, Aktualne problemy Biomechaniki, 2016
6. L. A. Dobrzański, Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2002
7. F. L. Riley, Silicon Nitride and Related Materials, Journal, 2000
8. K. Lasek, P. Okoński, E. Mierzwińska-Nastalska, Tlenek cyrkonu – właściwości fizyczne i zastosowanie kliniczne, Protetyka Stomatologiczna, 2009, LIX, 6, 415-422

## Obróbka cieplno-plastyczna stopów Mg-Li

M. Król<sup>a</sup>, P. Snopiński<sup>a</sup>, O. Poliszczuk<sup>b</sup>, M. Skyba<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: mariusz.krol@polsl.pl, przemyslaw.snopinski@polsl.pl

<sup>b</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Engineering Mechanics, Khmelnytskyi, Ukraine, email: opolishchuk71@gmail.com

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono analizę mechanizmu odkształcenia na gorąco jednofazowego odlewniczego stopu Mg-4,5Li-1,5Al modyfikowanego 0,2% dodatkiem TiB. Określono również model konstytutywny i warunki pracy na gorąco stopu Mg-Li. Procedurę ściskania na gorąco stopu Mg-4,5Li-1,5Al+0,2TiB przeprowadzono na dylatometrze DIL 805 A/D w temperaturach odkształcania w zakresie 250 °C do 400 °C i przy szybkościach odkształcania w zakresie 0,01 s<sup>-1</sup>-1 s<sup>-1</sup>.

**Abstract:** In this work, analysis of the hot deformation mechanism of an as-cast single  $\alpha$ -phase Mg-4.5Li-1.5Al alloy modified with 0.2% TiB addition, as a grain refiner, is presented. The constitutive model and hot working terms of the Mg-Li alloy were also determined. The hot compression procedure of the Mg-4.5Li-1.5Al+0.2TiB alloy was performed using a DIL 805 A/D dilatometer at deformation temperatures from 250 °C to 400 °C and with strain rates of 0.01 s<sup>-1</sup>-1 s<sup>-1</sup>.

**Słowa kluczowe:** odlewnicze stopy magnezu, obróbka cieplno-plastyczna, modyfikacja stopów Mg-Li

### 1. WSTĘP

Ultralekkie stopy magnez-lit, charakteryzują się niską gęstością, wysoką wytrzymałością i sztywnością, charakteryzują się dobrymi własnościami do tłumienia drgań i doskonałą formowalnością [1-3]. Stopy te mają szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu m.in. takich jak elektronika, wojsko, przemysł lotniczy i kosmiczny, przemysł samochodowy i inne [4-6]. Warto zauważyć, że wraz ze wzrostem ilości Li wzrasta podatność do odkształcenia stopu Mg-Li, natomiast znacznie spada wytrzymałość, stabilność termiczna, odporność na pełzanie i korozję [7, 8]. Struktura krystaliczna stopów Mg-Li może wykazywać trzy rodzaje struktur spowodowany zmianami zawartości litu w stopach. Z diagramu fazowego Mg-Li, [5, 9] wynika, że przy zawartości Li poniżej ~5,7% mas. uzyskuje się heksagonalną strukturę pojedynczą  $\alpha(Mg)$  typu close-packed (HCP). Stopy magnezu z zawartością Li w zakresie ~5,7-10,3% mas. mają strukturę podwójną, a struktura eutektyczna zawiera fazę HCP  $\alpha(Mg)$  i fazę

(BCC)  $\beta(\text{Li})$ . Powyżej 10,3 % mas. mikrostruktura Li we wszystkich stopach Mg-Li składa się z fazy  $\beta(\text{Li})$  [10]. Jedną z najprostszych i najbardziej użytecznych technik polepszania właściwości mechanicznych stopów jest stopowanie lub obróbka plastyczna [11]. Obecnie, stopy Mg-Li są wytwarzane metodą termoplastycznego odkształcania w celu poprawy właściwości mechanicznych materiałów konstrukcyjnych, aby rozszerzyć zakres ich zastosowań [12]. Optymalizacja procesu formowania daje kontrolę nad kształtowaną mikrostrukturą, dlatego konieczne jest badanie zachowania się ultralekkich stopów Mg-Li podczas odkształcania.

W niniejszej pracy, przeprowadzono próbę ściskania na gorąco stopu jednofazowego stopu  $\alpha$  Mg-4,5Li-1,5Al o strukturze HCP z dodatkiem TiB, w celu systematycznej analizy zachowania się stopu podczas odkształcania w podwyższonej temperaturze. Ustalono optymalny model konstytutywny oraz warunki pracy na gorąco stopu Mg-Li z TiB.

## 2. PRZEBIEG BADAŃ

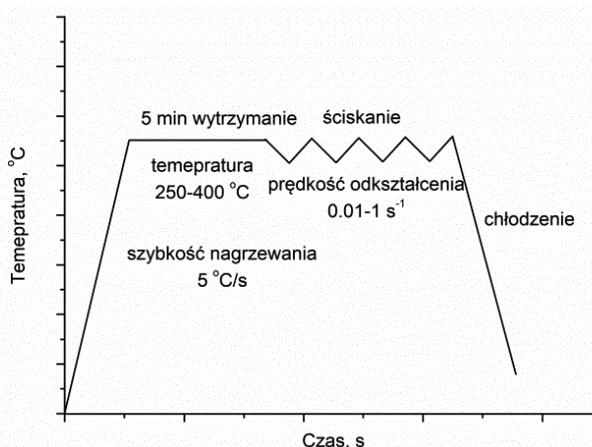
W badaniach zastosowano odlewniczy stop Mg-4,5Li-1,5Al+0,2TiB o składzie chemicznym przedstawionym w tablicy 1.

Tablica 1. Skład chemiczny badanego stopu (wt. %)

Table 1. The chemical composition of the alloy (wt. %)

Li	Al	Si	B	Ti	Fe	Mg
4.66	1.80	0.0052	0.0019	0.0069	0.0019	reszta

Badanie jednoosiowego ściskania na gorąco przeprowadzono przy użyciu dylatometru DIL 805 A/D firmy BAHR, w zakresie prędkości odkształcania od  $0,01 \text{ s}^{-1}$  do  $1 \text{ s}^{-1}$  i temperatury od  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , z użyciem termopary PtRh10-Pt w atmosferze ochronnej argonu, aby zapobiec utlenianiu się próbek. Przed eksperymentami ściskania, próbki ogrzewano do temperatury odkształcania z szybkością nagrzewania  $5 \text{ }^\circ\text{C/s}$  i utrzymywano izotermicznie przez czas 5 min, a następnie ścisniono ze stałą szybkością odkształcania. Schemat eksperymentalny symulacji na gorąco przedstawiono na rysunku 2. Stopień odkształcenia wynosił 60%, co odpowiada rzeczywistemu odkształceniu około 1. Po odkształceniu, stopy chłodzono z zastosowaniem argonu o wysokim przepływie.



Rysunek 1. Schemat eksperymentu

Figure 1. The experimental scheme

### 3. WYNIKI

Krzywe naprężenie-odkształcenie stopu Mg-4,5Li-1,5Al+0,2TiB w różnych warunkach przedstawiono na rysunku 2. Na podstawie krzywych naprężenie-odkształcenie można stwierdzić, że wartość naprężenia płynięcia zależy od szybkości odkształcania i temperatury odkształcenia. Można zaobserwować, że wraz z obniżeniem się prędkości odkształcania lub ze wzrostem temperatury odkształcenia, szczyt naprężenia obniża się. Ponadto można zauważyć, że podczas, gdy prędkość odkształcania jest stała, naprężenie rośnie w pierwszym etapie. Następnie, prędkość naprężenia zmniejsza się aż do uzyskania naprężenia maksymalnego, po czym następuje stopniowa redukcja aż do ponownego wygładzenia. Prawie wszystkie krzywe wykazują wyraźny pojedynczy punkt szczytowy. Podczas, gdy odkształcenie rośnie do określonego punktu, wzrasta energia magazynowania odkształcenia, czemu towarzyszy dynamiczne zmękczenie. Kształt rzeczywistego wykresu naprężenie-odkształcenie spada, a wykres staje się gładki i płaski. Po przekroczeniu naprężenia szczytowego, wykresy wykazują stały spadek spowodowany obecnością dynamicznego zmękczenia, takiego jak dynamiczna rekrytalizacja (DRX) i dynamiczna regeneracja (DRV). Po osiągnięciu, naprężenie płynięcia staje się stałe. To zdarzenie wskazuje na słabe i mocne naprzemienne utwardzanie i dynamiczne zmękczenie, które jest spowodowane iteracją anihilacji i akumulacji dyslokacji. Aby uzyskać wiedzę na temat korelacji różnych wskaźników i naprężenia płynięcia, w celu monitorowania zachowania się stopu w warunkach wysokotemperaturowego odkształcenia plastycznego, zastosowano kryterium Arrheniusa w celu określenia korelacji naprężenia płynięcia i wielu wskaźników, a model konstytutywny  $\dot{\epsilon}$  może być oszacowany przy użyciu [13]:

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

Ponadto, wpływ prędkości odkształcania i temperatury na zachowanie odkształceniowe może być dalej opisany przez parametr Zenera-Hollomona ( $Z$ ) przy użyciu równania typu wykładniczego:

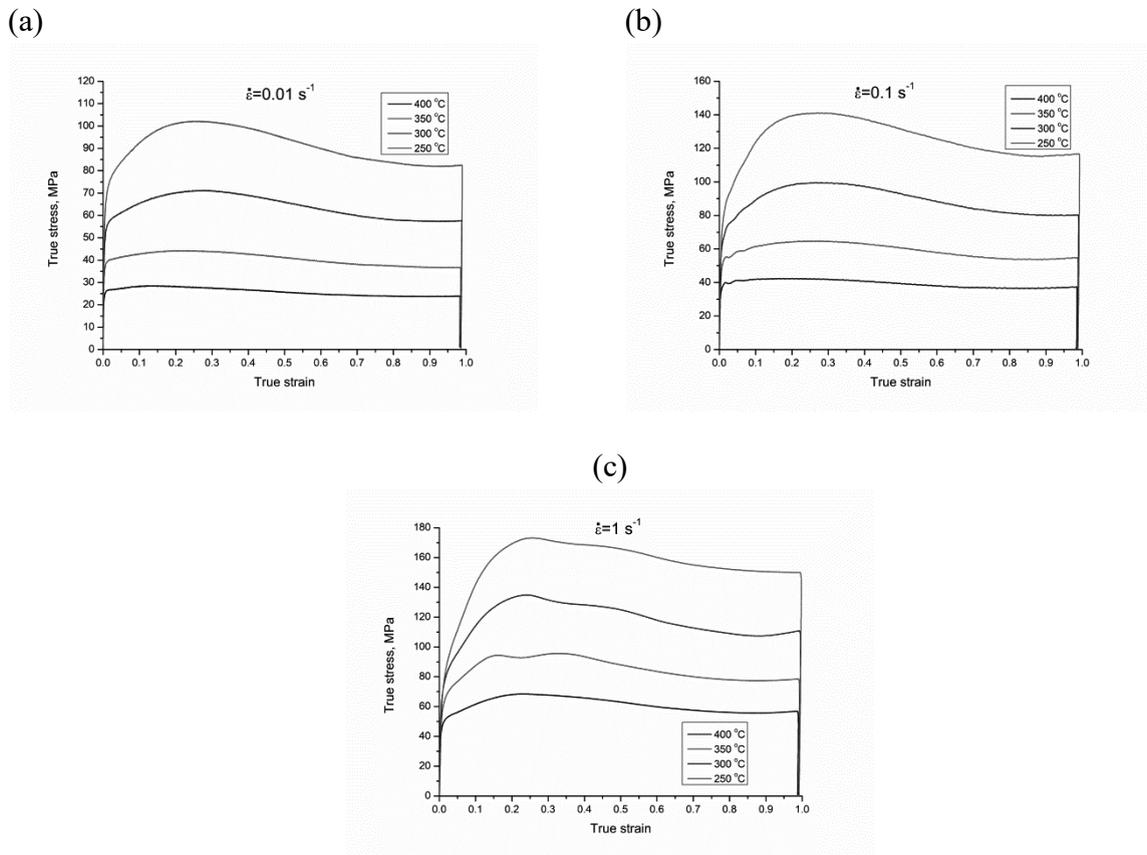
$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (2)$$

gdzie  $\dot{\epsilon}$  jest szybkością odkształcania ( $s^{-1}$ ),  $Q$  jest energią aktywacji dla odkształcenia na gorąco (kJ/mol),  $\sigma$  reprezentuje naprężenie płynięcia (MPa),  $R$  reprezentuje uniwersalną stałą gazową ( $mol^{-1}K^{-1}$ ),  $T$  jest temperaturą termodynamiczną (K),  $n$  jest wykładnikiem naprężenia, podczas gdy  $A$ ,  $n$  (wykładnik naprężenia) i  $\alpha$  (współczynnik naprężenia) są stałymi. Korelacja pomiędzy parametrem  $Z$  i  $r$  może być oszacowana za pomocą [14]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A_1 \sigma^{n_1} \quad (3)$$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A_2 \exp(\beta\sigma) \quad (4)$$





Rysunek 3. Krzywe naprężenie-odkształcenie stopu Mg-4,5Li-1,5Al+0,2TiB podczas ściskania na gorąco przy różnych prędkościach odkształcania: a)  $0,01 \text{ s}^{-1}$ , b)  $0,1 \text{ s}^{-1}$ , c)  $1 \text{ s}^{-1}$   
 Figure 3. The true stress-strain curves of the Mg-4.5Li-1.5Al+0.2TiB alloy during hot compression tests at varying strain rates : a)  $0.01 \text{ s}^{-1}$ , b)  $0.1 \text{ s}^{-1}$ , c)  $1 \text{ s}^{-1}$

Przedstawione równanie 2 jest odpowiednie dla każdego poziomu naprężeń, równanie 3 może być stosowane przy niskich poziomach naprężeń ( $\alpha\sigma < 0,8$ ), a równanie 4 jest odpowiednie dla wysokich poziomów naprężeń ( $\alpha\sigma < 1,2$ ), a  $n_1$  i  $b$  są stałymi materiałowymi. Wskaźnik naprężenia  $\alpha$  może być opisany jako [15]:

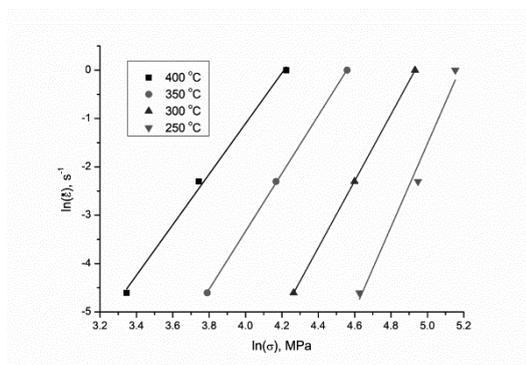
$$\alpha = \beta/n_1 \quad (5)$$

Aby zracjonalizować te równania, zastosowano logarytm naturalny z równania 3 i 4, i równania przyjmują postać:

$$\ln \dot{\epsilon} = n_1 \ln \sigma + \ln A_1 - Q/RT \quad (6)$$

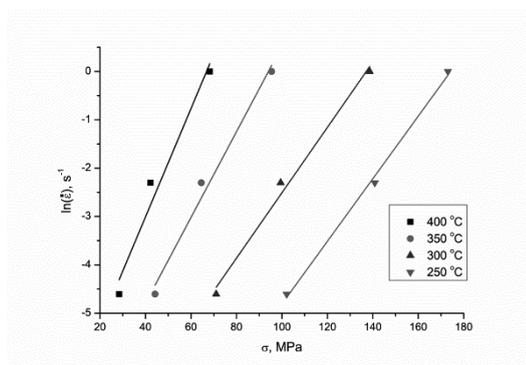
$$\ln \dot{\epsilon} = \beta \sigma + \ln A_2 - Q/RT \quad (7)$$

Wykorzystując naprężenia szczytowe,  $\sigma$ , po różnych warunkach odkształcenia i stosując metodę najmniejszych kwadratów do regresji liniowej, można było obliczyć średnie wartości  $n_1$  i  $\beta$ , tj.  $6,6777275$  i  $0,08323 \text{ MPa}^{-1}$ , a z wykresów  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$  (rys. 4) i  $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$  (rys. 5); odpowiednio,  $\alpha = \frac{\beta}{n_1} = 0,013384429 \text{ MPa}^{-1}$ .



Rysunek 4. Związek między  $\ln(\dot{\epsilon})$  i  $\ln(\sigma)$

Figure 4. The relationship between  $\ln(\dot{\epsilon})$  and  $\ln(\sigma)$



Rysunek 5. Związek między  $\ln(\dot{\epsilon})$  i  $\sigma$

Figure 5. The relationship between  $\ln(\dot{\epsilon})$  and  $\sigma$

Stosując logarytm naturalny po obu stronach równania 1, otrzymujemy równanie 8:

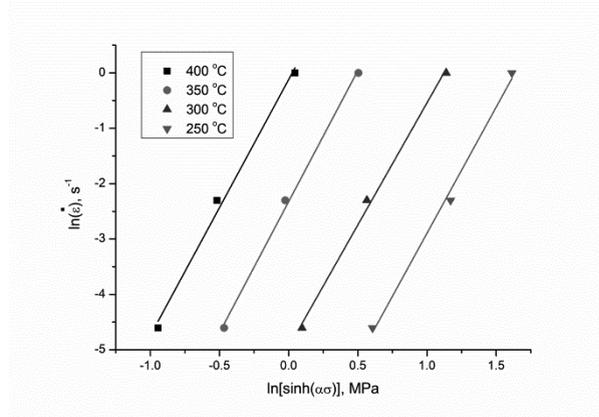
$$\ln \dot{\epsilon} = n \ln[\sinh(\alpha \sigma)] + \ln A - Q/RT \quad (8)$$

Zastępując  $\alpha$ , naprężenie szczytowe  $\sigma$  występujące w różnych stanach odkształcenia, i  $\dot{\epsilon}$ , oraz stosując metodę najmniejszych kwadratów do wykonania regresji liniowej, wykładnik naprężenia  $n$  można obliczyć jako 4,58128 z wykresów  $\ln \dot{\epsilon}$  i  $\ln[\sinh(\alpha \sigma)]$  podanych na rysunku 6. Aby otrzymać wartość  $Q$ , równanie 8 przekształcono w następujące równanie [16]:

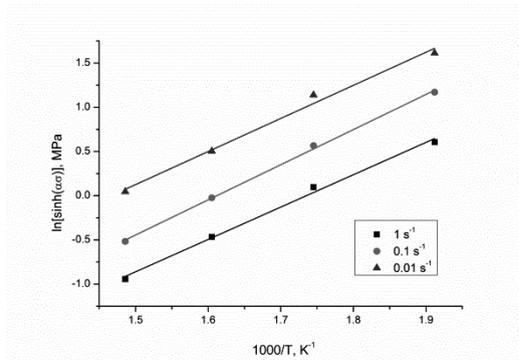
$$Q = RnS = R \left\{ \frac{\partial(\ln \dot{\epsilon})}{\partial \ln[\sinh(\alpha \sigma)]} \right\}_T \left\{ \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha \sigma)]}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} \right\}_{\dot{\epsilon}} \quad (9)$$

Średnia wartość  $s$  może być określona z wykresu przy użyciu  $\ln[\sinh(\alpha \sigma)] - 1000/T$  (rys. 7); dając wartość  $s$  równą 3,79199.

Kierując się równaniem 9, energią aktywacji deformacji Mg-4,5Li-1,5Al+0,2TiB  $Q$  można wyznaczyć jako 144,4322043 kJ/mol.



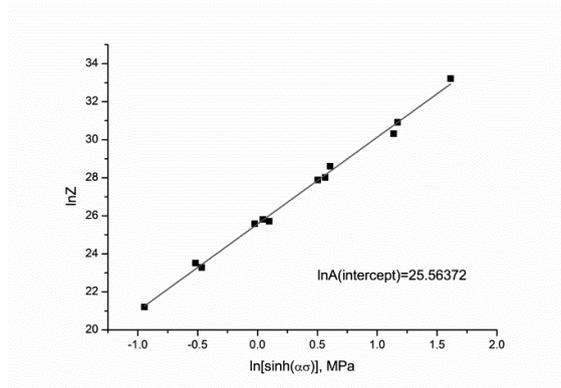
Rysunek 6. Zależność między  $\ln(\dot{\epsilon})$  and  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$   
 Figure 6. The relationship between  $\ln(\dot{\epsilon})$  and  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$



Rysunek 7. Zależność  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  od temperatury ( $1000/T \text{ K}^{-1}$ ).  
 Figure 7. The relationship between  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  over temperature ( $1000/T \text{ K}^{-1}$ )

Liniowa zależność pomiędzy  $\ln Z$  i  $\ln[\sinh(\alpha)]$  w Mg-4.5Li-1.5Al+0.2TiB jest obserwowana na Rys. 8. Intercept dopasowanej krzywej ( $\ln A$ ) wynosi 25,56372, a  $A$  jest równe 1.2652681011. Podsumowując, dodając wartości  $\alpha$ ,  $A$ ,  $n$  i  $Q$  do równania 2, można zaproponować model konstytutywny dla analizowanego stopu Mg-4,5Li-1,5Al+0,2TiB:

$$\dot{\epsilon} = 1.265268 \cdot 10^{11} [\sinh(0.013384429\sigma)]^{4.58128} \exp\left(-\frac{144432}{RT}\right) \quad (10)$$



Rysunek 8. Zależność między  $\ln Z$  i  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$   
 Figure 8. The relationship between  $\ln Z$  and  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ .

#### 4. WNIOSKI

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki jednoosiowego ściskania na gorąco odlewniczego stopu Mg-4,5Li-1,5Al modyfikowanego TiB w zakresie temperatur 250-400 °C z prędkością odkształcenia  $0,01^{-1}$ -  $1s^{-1}$ . Główne wnioski są następujące:

- Krzywe naprężenie-odkształcenie odlewanego stopu Mg-4,5Li-1,5Al+0,2TiB poddanego ściskaniu termicznemu charakteryzują się dynamicznym zmiękczeniem. Przy wzroście odkształcenia efekt utwardzania jest bardziej efektywny. Naprężenie rzeczywiste maleje wraz ze wzrostem temperatury przy tej samej prędkości odkształcenia. Ponadto, maksymalne naprężenie zmniejsza się wraz z obniżeniem prędkości odkształcenia w tej samej temperaturze.
- Energia aktywacji,  $Q$ , analizowanego stopu wynosi 144,34 kJ/mol. Korelacja pomiędzy naprężeniem płynięcia, temperaturą odkształcenia i prędkością odkształcenia została obliczona przy użyciu równania typu Arrheniusa z hiperboliczną funkcją sinusoidalną:

$$\dot{\epsilon} = 1.265268 \cdot 10^{11} [\sinh(0.013384429\sigma)]^{4.58128} \exp\left(-\frac{144432}{RT}\right)$$

#### PODZIĘKOWANIE

Mariusz Król jest stypendystą Międzynarodowego Funduszu Wyszehradzkiego, przyznanego na okres od września 2021 r. do czerwca 2022 r

#### LITERATURA

1. Yu, X.; Wang, J.; Zhang, M.L.; Yang, P.P.; Yang, L.H.; Cao, D.X.; Li, J.Q. One-step synthesis of lamellar molybdate pillared hydrotalcite and its application for AZ31 Mg alloy protection. *Solid State Sci.* 2009, 11, 376-381.
2. Jia, W.T.; Ma, L.F.; Le, Q.C.; Zhi, C.C.; Liu, P.T. Deformation and fracture behaviors of AZ31B Mg alloy at elevated temperature under uniaxial compression. *J Alloys Compd.* 2019, 783, 863-876.
3. Li, X.; Ren, L.; Le, Q.; Jin, P.; Cheng, Ch.; Wang, T.; Wang, P.; Zhou, X.; Chen, X.; Li, D. The hot deformation behavior, microstructure evolution and texture types of as-cast Mg-Li alloy. *J Alloy Compd.* 2020, 831, 154868.
4. Li, Y.; Guan, Y.; Zhai, J.; Lin, J. Hot Deformation Behavior of LA43M Mg-Li Alloy via Hot Compression Tests. *J. of Mater Eng and Perform.* 2019, 28, 7768-7781.
5. Cheng, Y.; Qin, T.; Wang, H.; Zhang Z. Comparison of corrosion behaviors of AZ31, AZ91, AM60 and ZK60 magnesium alloys. *T Nonferr Metal Soc.* 2009, 19/3, 517-524.
6. Król, M. Effect of grain refinements on the microstructure and thermal behaviour of Mg-Li-Al alloy. *J Therm Anal Calorim.* 2018, 133, 237-246 <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7223-x>.
7. Xu, W.; Birbilis, N.; Sha, G.; Wang, Y.; Daniels, J.E.; Xiao, Y.; Ferry, M. A High-Specific-Strength and Corrosion-Resistant Magnesium Alloy. *Nat Mater.* 2015, 14, 1229-1235.

8. Sun, Y.; Wang, R.; Ren, J.; Feng, Ch.P. Hot deformation behavior of Mg-8Li-3Al-2Zn-0.2Zr alloy based on constitutive analysis, dynamic recrystallization kinetics, and processing map. *Mech Mater.* 2019, 131, 158-168.
9. Dong, H.; Pan, F.; Jiang, B.; Zeng, Y. Evolution of microstructure and mechanical properties of a duplex Mg-Li alloy under extrusion with an increasing ratio. *Mater Design.* 2014, 57, 121-127.
10. Zhao, Z.; Xing, X.; Ma, J.; Bian L.; Liang, W.; Wang, Y. Effect of addition of Al-Si eutectic alloy on microstructure and mechanical properties of Mg-12wt%Li alloy. *J Mater Sci Technol.* 2018, 34/9, 1564-1569.
11. Zieliński, A.; Sroka, M.; Dudziak, T. Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 740H after Long-Term Service, *Materials.* 2018, 11, 2130, DOI:10.3390/ma11112130.
12. Ojdanic, A.; Horky, J.; Mingler, B.; Fanetti, M.; Gardonio, S.; Valant, M.; Sulkowski, B.; Schafler, E.; Orlov, D.; J. Zehetbauer, M. The Effects of Severe Plastic Deformation and/or Thermal Treatment on the Mechanical Properties of Biodegradable Mg-Alloys. *Metals-Basel* 2020, 10, 1064.
13. Cai, J.; Li, F.G.; Liu, T.Y.; Chen, B.; Hen, M. Constitutive equations for elevated temperature flow stress of Ti-6Al-4V alloy considering the effect of strain. *Mater Des.* 2011, 32, 1144-1151.
14. Dieter, E.G. *Mechanical Metallurgy*, 2nd ed., McGraw Hill Publishing, New York, 1976.
15. Askariani, S.A.; Pishbin, S.M.H. Hot Deformation Behavior of Mg-4Li-1Al Alloy via Hot Compression Tests. *J Alloy Compd.* 2016, 688, 1058-1065.
16. Liu, G.; Xie, W.; Hadadzadeh, A.; Wei, G.; Ma, Z.; Liu, J.; Yang, Y.; Xie, W.; Peng, X.; Wells, M. Hot deformation behavior and processing map of a superlight dual-phase Mg-Li alloy. *J Alloy Compd.* 2018, 766, 460-469.

## Opracowanie i wytworzenie metodą druku 3D termoplastycznej wkładki do trójdzielnej formy wtryskowej

A. Krzak <sup>a</sup>, M. Gocki <sup>a</sup>, S. Borek <sup>b</sup>, M. Podsiodło <sup>b</sup>, M. Bojdoł <sup>b</sup>, A.J. Nowak <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Doktorant Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych, ul Towarowa 7a, 44-100 Gliwice;

<sup>b</sup> Student Politechniki Śląski, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki;

<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 każdy z etapów proces projektowania i wytwarzania termoplastycznych wkładek do trójdzielnej formy wtryskowej wytwarzanych technologią druku 3D. Wkładki wykonano z komercyjnie dostępnych filamentów PLA oraz ABS. Wytworzone wkładki poddano badaniom eksploatacyjnym na wtryskarce tłokowej firmy ZAMAK Mercator będącej na wyposażeniu Laboratorium Naukowo-Dydaktycznym Nanotechnologii i Technologii Materiałowych Politechniki Śląskiej.

**Abstract:** The article describes each stage of the process of designing and manufacturing thermoplastic inserts for a three-part injection mould, produced with the use of 3D printing technology. The inserts are made of commercially available PLA and ABS filaments. The manufactured inserts were subjected to operational tests on a piston injection moulding machine by ZAMAK Mercator, which is basically equipped Scientific and Didactic Laboratory of Nanotechnology and Material Technologies at the Silesian University of Technology.

**Słowa kluczowe:** materiały polimerowe, druk 3D, formy wtryskowe, wtrysk.

### 1. WSTĘP

Formowanie wtryskowe jest jedną z najpopularniejszych metod przetwórstwa tworzyw sztucznych. W procesie wtryskiwania można uzyskać gotowe elementy o bardzo zróżnicowanym kształcie. W ten sposób uzyskuje się wiele wyrobów, które stosuje się jako elementy karoserii, sprzętu medycznego ale również gotowe zabawki i artykuły codziennego użytku. Ponadto produkty tego procesu posiadają bardzo wysoką powtarzalność co jest nieosiągalne przy innych metodach produkcji. Zaletą wtryskowego kształtowania materiałów polimerowych jest niezaprzeczalnie jego niskoenergetyczność i łatwość obsługi. Natomiast

wadą tego procesu są wysokie koszty zakupu form wtryskowych tradycyjnie wykonywanych z materiałów metalowych. Kosztowne formy wtryskowe eliminują tę technologię z produkcji małoseryjnej, działów B+R oraz klientów indywidualnych. Alternatywą dla tradycyjnych form wtryskowych są formy wytworzone technologią przyrostową druk 3D na bazie materiałów polimerowych [1-7].

Zastosowaniem do nowych aplikacji tworzyw polimerowych przetwarzanych w procesie technologii druku 3D jest szeroko wykorzystywany w przemyśle motoryzacyjnym. Za jego pomocą zostają wytworzone modele koncepcyjne nowych części karoserii. Dzięki technologii druku 3D przemysł motoryzacyjny w łatwy i tani sposób bada właściwości aerodynamiczne nowych projektów. Dodatkowo przemysł maszynowy coraz częściej wykorzystuje tę technologię do wytworzenia części mechanicznych, takich jak koła zębate lub łożyska. Zastosowanie bardzo wytrzymałych materiałów polimerowych pozwala na oszczędność finansową oraz ułatwienie procesu projektowania, czy wytwarzania takiego elementu. Próba wykorzystania tej technologii w opracowywaniu form wtryskowych może wpłynąć na obniżenie kosztów osprzętu tak popularnej metodzie przetwórczej polimerów, umożliwi też wykorzystanie jej w produkcji mało seryjnej [3, 8-12].

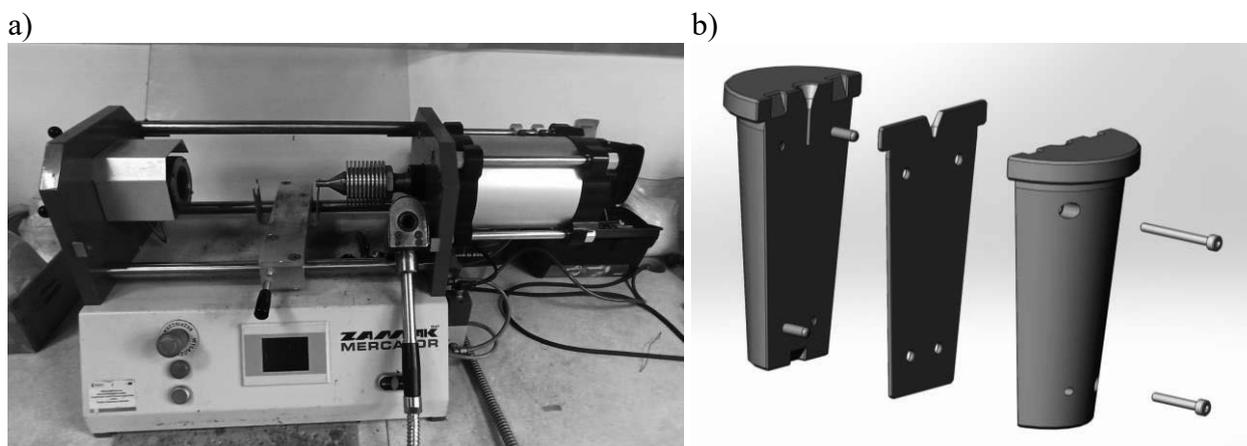
Celem pracy było zaprojektowanie oraz wykonanie metodą druku 3D wkładek do trójdzielnej formy wtryskowej, a następnie przetestowanie ich w warunkach zbliżonych do przemysłowych – wytworzenie wyprasek w procesie wtrysku na wtryskarce tłokowej firmy ZAMAK Mercator będącej na wyposażeniu Laboratorium Naukowo-Dydaktycznego Nanotechnologii i Technologii Materiałowych Politechniki Śląskiej.

## **2. OPRACOWANIE I WYTWARZANIE TERMOPLASTYCZNYCH WKŁADEK**

### **2.1 Projektowanie wkładek**

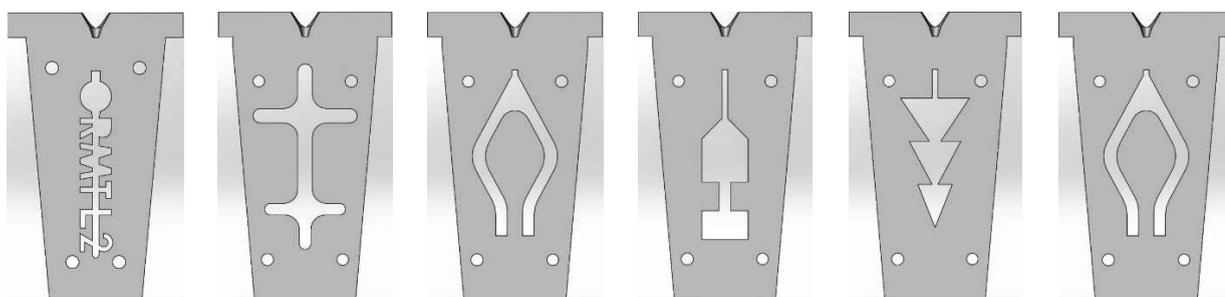
Pracę rozpoczęto od opracowania i zaprojektowania matrycy, stosowanej podczas procesu formowania wtryskowego. Zaprojektowana w pracy forma dedykowana jest wtryskarce tłokowej firmy ZAMAK Mercator (Rys. 1a), dlatego geometria zewnętrzna zamodelowanej matrycy powinna odpowiadać wymiarom gniazda formującego tego urządzenia. Projekty wkładek do formy wtryskowej zostały zaprojektowane w programie SolidWorks. Jest to aplikacja pozwalająca na projektowanie modeli 3D, program umożliwia łatwą zmianę wymiarów obiektu oraz modelowanie jego kształtu. Aplikacja została zaprezentowana po raz pierwszy w 1995 roku jako odpowiedź na inne programy CAD, takie jak CATIA oraz Autodesk Mechanical Desktop. Program posiada bardzo duże możliwości projektowe, intuicyjną obsługę oraz ogromną bibliotekę gotowych elementów. W podstawowych funkcjach programu znajdują się narzędzia do projektowania modeli 3D, konstrukcji blachowych oraz spawanych, tworzenia złożeń i modelowania form wtryskowych. Jedną z wad tego programu są wyższe wymagania sprzętowe niż konkurencyjnych aplikacji CAD[3].

Na rysunku 1b przedstawiono bazowy projekt formy trójdzielnej. W procesie projektowania przygotowano kilka wkładek o różnej geometrii gniazda formującego, tak aby w jak największym stopniu zweryfikować funkcjonalność zaproponowanego rozwiązania. Przykładowe projekty opracowanych wkładek przedstawiono na rysunku 2, każdy z kształtów cechuje się „jakimiś” właściwościami, które mogą pozwolić na ocenę jakości wtrysku z wykorzystaniem termoplastycznych wkładek. Dobrymi elementami weryfikującymi mogą być np. przewężenia, ostre krawędzie czy też liczne rozgałęzienia wymuszające zmianę kierunku płynięcia uplastycznionego materiału.



Rysunek 1. Zdjęcie a) wtryskarki firmy ZAMAK Mercator; b) zaprojektowanej formy trójdzielnej

Figure 1. Picture a) ZAMAK Mercator injection molding machines; b) design of the tripartite form



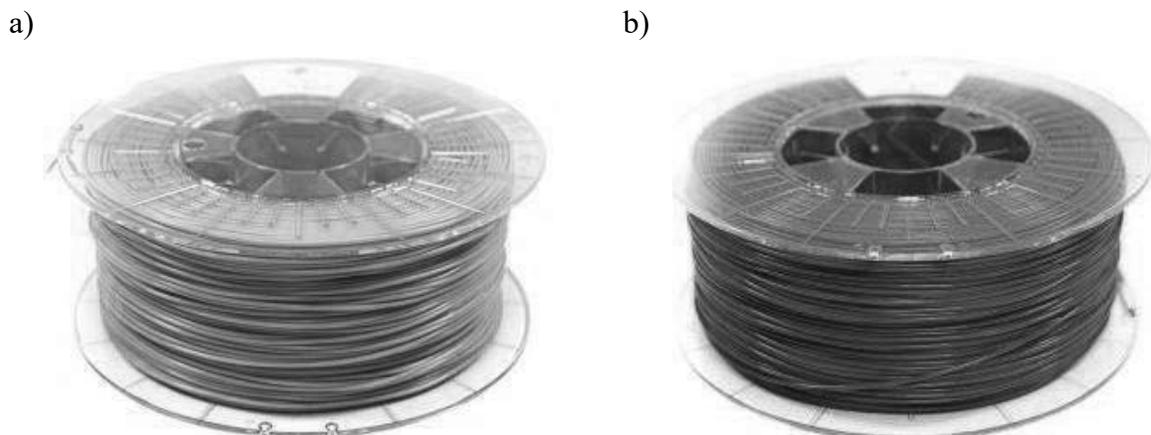
Rysunek 2. Przykłady zaprojektowanych wkładek

Figure 2. Examples of designed inserts

## 2.2 Wytypowany materiał

Do wytworzenia wkładek technologią druku 3D metoda FDM (z ang. *Fused Deposition Modelling*) wytypowano dwa komercyjnie dostępne na rynku materiały termoplastyczne polilaktyd (PLA) i akrylonitrylo-butadieno-styrenowy (ABS) firmy 3d Gence (Rys. 3). ABS to terpolimer akrylonitryl-butadien-styren, który jest polimerem bezpostaciowym i ma wiele odmian. Materiał ABS ma dobrą stabilność termiczną i średnią lepkość. Produkty formowane z ABS mają wysoką twardość powierzchni, stabilną strukturę wymiarową, wytrzymałość i odporność chemiczną oraz są łatwe do kształtowania i przetwarzania. Zakres temperatur plastyfikacji ABS wynosi od 180 do 280 ° C. PLA charakteryzuje się bardzo dobrą przezroczystością, wysokim połyskiem, dobrą barierą zapachową oraz barierą tlenową podobną do bariery polipropylenu (PP). W procesie produkcji tworzywa PLA istotną rolę odgrywa węgiel, który pobierany jest przez kukurydzę w procesie fotosyntezy z otoczenia. Następnie następuje rozkład kukurydzy na cukier prosty glukozę (Dextrose). Cukier ten, w obecności węgla, za pomocą procesów fermentacji, destylacji i polimeryzacji (przetwarzany jest w materiał termoplastyczny PLA). Dzięki procesowi polimeryzacji, materiał ten charakteryzuje się zbliżonymi właściwościami do standardowych termoplastów. Jego temperatura płynięcia wynosi 145÷155°C.

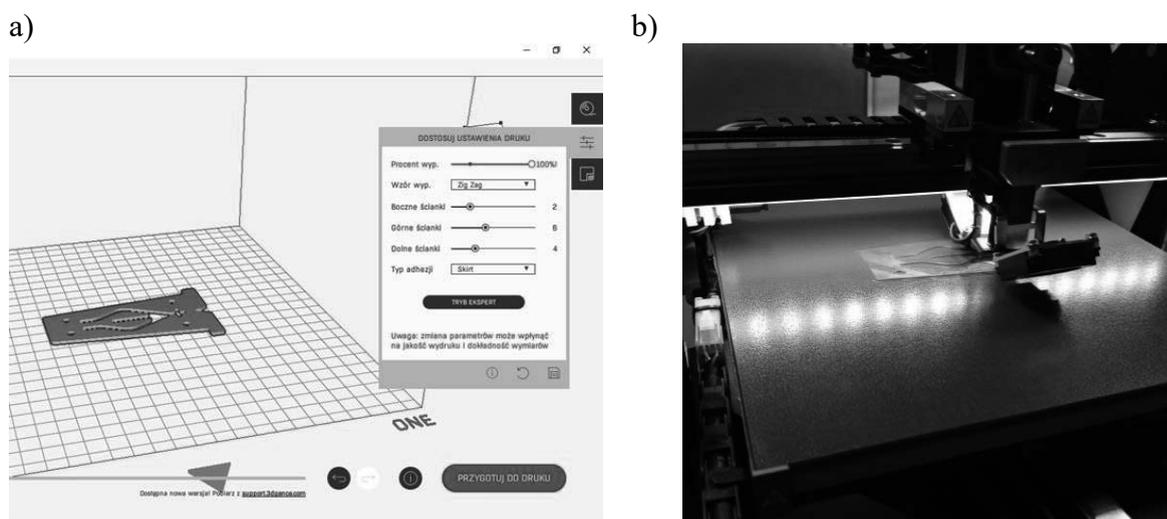




Rysunek. 3. Wykorzystany w pracy filament firmy 3DGence: a) ABS; b) PLA [8]  
 Figure 3. 3DGence filament used in the work: a) ABS; b) PLA [8]

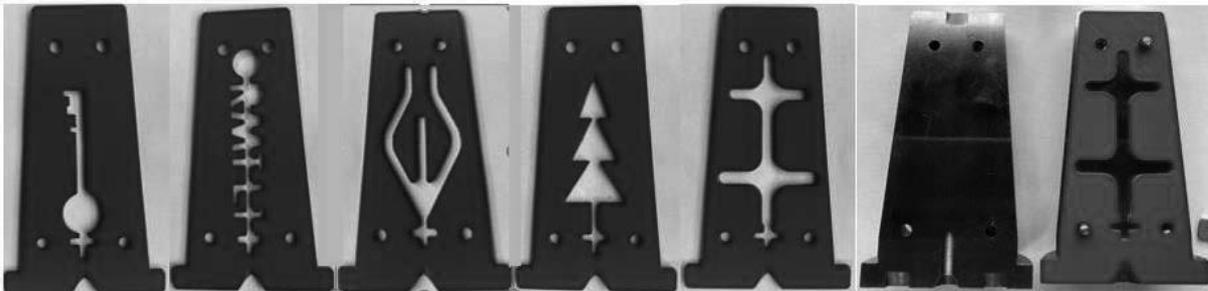
### 2.3 Wytwarzanie wkładek

Druk wkładek został zrealizowany na drukarce 3DGence One. Drukarka 3D Gence to profesjonalne urządzenie do wytwarzania elementów z materiałów termoplastycznych metodą FDM. Przed samym procesem drukowania opracowane w programie SolidWorks projekty wkładek musiały zostać przygotowane do druku w specjalistycznym oprogramowaniu 3D Gence Slicer (Rys. 4). Wpierw z oryginalnych plików projektowych zostały utworzone pliki w formacie STL. Następnie we wskazanym środowisku programowym przygotowano i zapisano na karcie SD pliki do wydruku. Kartę pamięci zawierającą tzw. pliki .gcode z modelami wytypowanych wkładek umieszczono w drukarce i uruchomiono druk (Rys. 4b). Wcześniej jednak profilaktycznie powierzchnię roboczą stołu drukarki oczyszczono alkoholem izopropylowym oraz nałożono klej adhezyjny w celu zapewnienia dobrej jakości połączenia drukowanej wkładki ze stołem drukarki. Przykładowe zdjęcia wydrukowanych wkładek przedstawiono na rysunku 5.

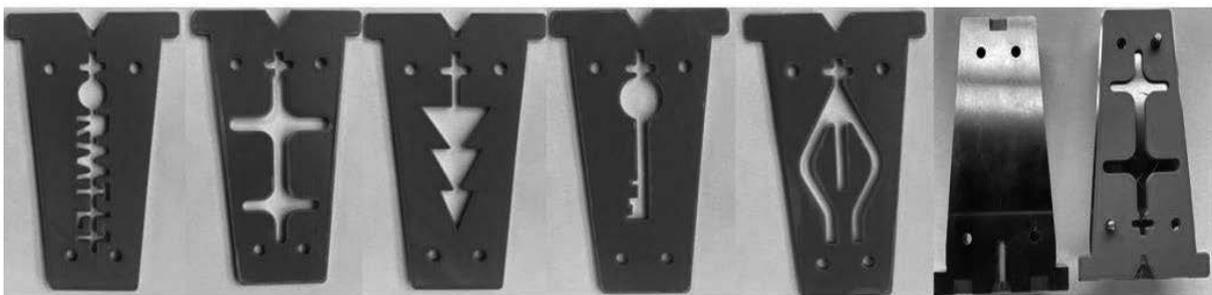


Rysunek 4. Wytwarzanie wkładki: a) przygotowanie druku w programie 3D Gence Slicer, b) druk wkładki do formy wtryskowej  
 Figure 4. Manufacturing of the insert: a) preparation of printing in the 3D Gence Slicer program, b) printing of the insert for the injection mold

a)



b)



Rysunek 5. Wkładki wytworzone w technologii druku 3D: a) PLA; b) ABS

Figure 5. Inserts manufactured in 3D printing technology: a) PLA; b) ABS

### 3. WTRYSK

Proces wtrysku został zrealizowany przy pomocy poziomej mikrowtryskarki tłokowej firmy Zamak MERCATOR (Rys. 1a). Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe wypraski. Wtrysk termoplastu wykonano pod ciśnieniem 5 bar. Do weryfikacji funkcjonalności opracowanych wkładek użyto dwóch komercyjnie dostępnych na rynku materiałów termoplastycznych: kopolimeru etylenu z octanem winylu (EVA) oraz polietylenu niskiej gęstości (LDPE).



Rysunek 6. Przykładowe zdjęcia wytworzonych wyprasek (EVA)

Figure 6. Exemplary photos of manufactured moldings (EVA)

Wytworzone wkładki zostały zastosowane jako środkowa część formy trójdzielnej. Temperatura formy dla polimeru EVA wynosiła 60 °C, natomiast dla LDPE wynosiła 50 °C. Temperatury formy dla poszczególnych polimerów były stałe, natomiast zmieniały się temperatury wtrysku tworzywa. Podczas pierwszej serii aplikacji tworzywa do formy temperatura wtrysku dla polimeru EVA wynosiła 170 °C, a w późniejszych seriach już 240 °C. W przypadku wtrysku polimeru LDPE do formy pierwotna temperatura wtrysku wynosiła 240 °C, a w późniejszych seriach 270 °C. Wzrost temperatury wtrysku polimerów przyczynił się do lepszego wypełniania gniazda formującego przez termoplast. Ciśnienie i temperatura materiału wtryskiwanego w niewystracający sposób pozwalała na wypełnianie wszystkich wkładek. Ponadto po kilku cyklach następuje degradacja cieplna wkładek wykonanych z wytypowanych materiałów polimerowych. Wkładki ulegają rozwarstwieniu w szczególności w punkcie wtrysku.

## 6. WNIOSKI

Mikrowtryskarka laboratoryjna ZAMAK MERCATOR generuje maksymalne ciśnienie wtrysku rzędu 5 barów. Podczas wtrysku tworzywo EVA dociera tylko do 75% długości formy. Jest to niezadowalający wynik, ponieważ ogranicza to wymiary pożądanej wypraski. Wypełnienie całej formy prawdopodobnie było by możliwe przy zastosowaniu wtryskarki przemysłowej, która wprowadza tworzywo pod ciśnieniem co najmniej 8 bar.

Zakres transportu tworzywa ogranicza również większy stopień skomplikowania kształtu formy. Przewężenia oraz skomplikowane wzory w projekcie modelu ograniczają transport tworzywa we wkładce.

W celu poprawy jakości wyprasek należy dokonać zmiany geometrii punktu wtrysku w projekcie wkładek. W przypadku wkładek polimerowych należy wydłużyć kanał doprowadzający uplastycznione tworzywo do gniazda formy (Rys. 7).



Rysunek 7. Wkładka do formy wtryskowej z zaznaczonymi miejscem modyfikacji kanału wtryskowego

*Figure 7. Inlay for the injection mold with marked places of modification of injection channel.*

Istotnym elementem na który należy zwrócić uwagę jest jakość powierzchni wkładki, mniejsza chropowatość wpływa na wyższą jakość detalu i ułatwia proces formowania.

Zastosowanie modyfikacji opracowanych wkładek polimerowych np. przez zastosowanie metalizacji chemicznej pozwoli przedłużyć ich żywotność i przewodność cieplną. Zapewni niską chropowatość powierzchni co ułatwi wypełnianie gniazda formy uplastycznionym termoplastem.

Analiza przepływu ciepła wykazała, że maksymalna temperatura w obszarze wkładki jest wprost proporcjonalna do temperatury wtrysku oraz odwrotnie proporcjonalna do przewodności cieplnej materiału wkładki.

Analiza mechaniczna dowiodła, że odkształcenia wypraski zwiększają się wraz ze wzrostem temperatury całego układu.

Realizując projekt badawczy w formie PBL wytworzono polimerowe wkładki dedykowane do formy trójdzielnej znajdującej się na wyposażeniu laboratorium RMTL-2 oraz serii wyprasek. Uczestnicy projektu nabyli wiedzę z zakresu przetwórstwa materiałów termoplastycznych, projektowania CAD, procesu wtrysku, analizy przepływu ciepła, czy odkształceń cieplnych oraz technologii przyrostowej – druk 3D. Realizacja projektu PBL umożliwiła realizację pełnego procesu technologicznego w skali laboratoryjnej z wykorzystaniem nowoczesnych technik komputerowych wspomagających projektowanie.



Unia Europejska  
Europejski Fundusz Społeczny



#### Uwagi ogólne:

Niniejsze opracowanie powstało dzięki realizacji projektu PBL pt. „Technologie symulacyjne w przetwórstwie tworzyw sztucznych” realizowanego w ramach programu Indywidualne Programy Studiów realizowane w formie Project Based Learning w ramach projektu: "Politechnika Śląska jako Centrum Nowoczesnego Kształcenia opartego o badania i innowacje" (V edycja).

## LITERATURA

1. G. Janowski, Charakterystyka mikroformowania wtryskowego. Formy wtryskowe, optymalizacja procesu, zastosowanie z wyszczególnieniem przemysłu samochodowego, Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe, nr 1-2, 2018, str. 48-51.
2. E. Bociąga, T. Jaruga, R. Sikora: Wybrane zagadnienia wtryskiwania precyzyjnego. Cz. II. Czynniki wpływające na jakość wyprasek precyzyjnych. Polimery, nr 54, 2009, 7-8, 522-529.
3. Przygotowanie i Nadzór Produkcji Wyrobów Wtryskiwanych (cz.I) Plastech 2005 ISBN 83-914434-7-7.
4. Plastics - the Facts 2016, Plastics Europe, Brussels – Belgium 2016, [www.plasticseurope.org](http://www.plasticseurope.org) (dostęp 18.02.2021)
5. J. Caban, M. Szala, J. Kęsik, Wykorzystanie druku 3D w zastosowaniach automotive, Autobusy, nr 6, 2017, str. 573-579.
6. Przemysł tworzyw sztucznych w Polsce, wydawnictwo Fundacja Plastics Europe, Warszawa 2012.
7. H. Zawistowski, D. Frenkler, Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych, Przetwórstwo tworzyw sztucznych, Reprint.
8. [https://www.sd3d.com/wp-content/uploads/2017/06/MaterialTDS-PLA\\_01.pdf](https://www.sd3d.com/wp-content/uploads/2017/06/MaterialTDS-PLA_01.pdf) (dostęp 20.02.2021)
9. <https://dielectricmfg.com/knowledge-base/abs/> (dostęp 20.02.2021)
10. <https://www.zamakmercator.pl/pl/oferta/mikrowtryskarki.html> (dostęp 15.02.2021)
11. <https://www.solidworks.pl> (dostęp 15.02.2021)
12. <https://symkom.pl/produkty/cfd/> (dostęp 16.02.2021)



## Zastosowanie druku 3D w dobie Przemysłu 4.0

K. Ksionsyk<sup>b</sup>, T. Janczak<sup>b</sup>, E. Jonda<sup>a</sup>, A. Kiljan<sup>a</sup>

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

<sup>b</sup> Student, Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Zarządzanie i Inżynieria Produkcji, e-mail: anna.kiljan@polsl.pl

**Streszczenie:** Głównym celem publikacji była charakterystyka filarów czwartej rewolucji przemysłowej oraz przyrostowych technologii wytwarzania wraz z prezentacją praktycznych przykładów zastosowania, a także określenie wpływu i roli omawianej technologii w ewolucji przemysłu. W pracy dokonano również przeglądu materiałów wykorzystywanych w procesie wytwarzania technikami addytywnymi oraz wskazano zalety i wady wynikające z ich zastosowania.

**Abstract:** The main purpose of the publication was to characterize the pillars of the fourth industrial revolution and additive manufacturing technologies along with the presentation of practical examples of application, as well as to determine the impact and role of the discussed technology in the evolution of industry. The work also reviews the materials used in the manufacturing process with additive techniques and indicates the advantages and disadvantages of using them.

**Słowa kluczowe:** technologie przyrostowe, druk 3D, przemysł 4.0, technologie przemysłu 4.0.

### 1. WSTĘP

Przemysł 4.0 to nie tylko automatyzacja i robotyzacja procesów produkcyjnych, ale także transformacja cyfrowa, wdrażanie nowoczesnego myślenia i organizacji firmy oraz przede wszystkim implementowanie nowoczesnych technologii takich jak np. druk 3D [24]. Pierwsza rewolucja przemysłowa miała miejsce w XVIII wieku i była ściśle związana z wykorzystaniem pary i mechanizacją produkcji. Od tej pory zamiast siły ludzkich mięśni do napędzania przędzalni zaczęto wykorzystywać silniki parowe. Druga rewolucja przemysłowa była związana ze wzrostem znaczenia elektryczności, a także wynalezieniem silnika benzynowego oraz Diesla. Trzecia rewolucja, dzięki upowszechnieniu komputerów pozwoliła wstępnie zautomatyzować pracę i procesy produkcyjne. Jednym z największych osiągnięć tej rewolucji jest wykorzystanie robotów wykonujących zaprogramowane sekwencje czynności bez konieczności interwencji ludzi. Niektórzy autorzy publikacji uważają, że druk 3D miał swój początek w trzeciej rewolucji przemysłowej (został on wynaleziony w 1984 r.). Zaistnienie

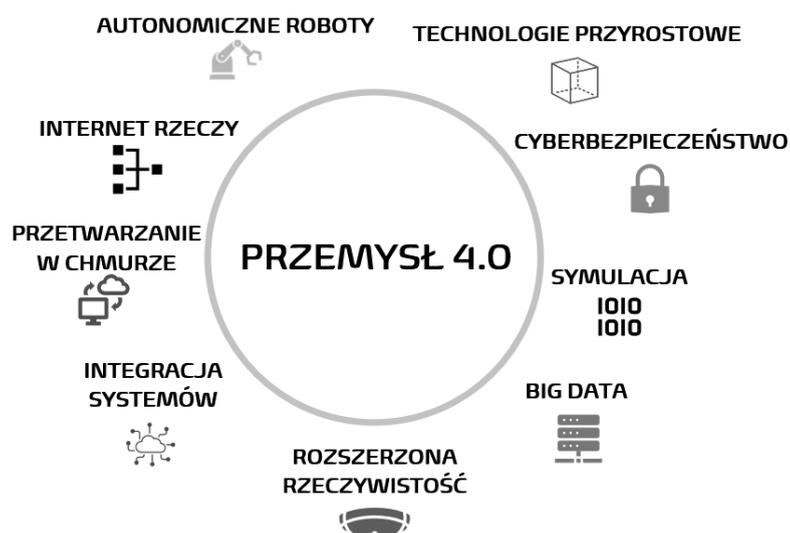
każdej ze wspomnianych rewolucji skutkowało niespotykanym w historii rozwojem technologicznym i ekonomicznym. Obecnie trwa czwarta rewolucja przemysłowa. Charakteryzuje się ona wykorzystaniem technologii informacyjnych i komunikacyjnych w przemyśle i określana jest mianem „Przemysłu 4.0”. Przemysł 4.0 składa się z wielu technologii, m.in. [1]: Internet Rzeczy, systemy cyberfizyczne, chmura obliczeniowa, analityka biznesowa, robotyka, druk3D, technologie addytywne oraz rozszerzona rzeczywistość. Głównym celem Przemysłu 4.0 jest nic innego, jak podniesienie wydajności produkcji. Wszystko dzięki integracji ludzi i maszyn za pośrednictwem inteligentnych systemów. Wiąże się to z wprowadzeniem korzystnych zmian w procesach zarządzania i wytwarzania. Zmiany te - choć początkowo mogą wydawać się trudne do wdrożenia - w rezultacie prowadzą do podniesienia efektywności całego zakładu. W celu zapewnienia optymalnej wydajności linii produkcyjnych wykorzystywana jest automatyzacja procesów produkcyjnych. Roboty przemysłowe używane są w wielu branżach oraz sektorach przemysłu. Korzystanie z najnowocześniejszej technologii pozwala w pełni dostosować rozwiązania automatyzacyjne do potrzeb każdej linii produkcyjnej z uwzględnieniem takich czynników, jak: wielkość przestrzeni, wydajność produkcji, ilość wymaganego personelu w obsłudze produkcji oraz limity finansowe przeznaczone na wdrożenie automatyzacji w danej jednostce [2,3].

## 2. FILARY PRZEMYSŁU 4.0

Wdrażanie koncepcji Przemysłu 4.0 w przedsiębiorstwach powoduje liczne korzyści obejmujące m.in.: zwiększenie wydajności wytwarzania i efektywności w zarządzaniu produkcją, możliwość optymalizacji kosztów produkcji oraz elastyczne reagowanie na indywidualne potrzeby klientów i wymogi rynku. W skład Przemysłu 4.0 wchodzi dziewięć filarów technologicznych, co przedstawiono na rysunku 1 [3]:

1. Big Data i analityka AI (ang. Artificial Intelligence) to tak zwany Internet zachowań lub Internet behawioralny. Polega na przechwytywaniu, gromadzeniu i analizowaniu dużej ilości danych z różnych źródeł w celu wspierania procesów decyzyjnych. Przykładem może być zastosowanie w oprogramowaniu CAD (ang. Computer Aided Design)/CAM (ang. Computer Aided Manufacturing), które pozwala na zredukowanie generowanych w procesie obróbki resztek materiału poprzez uczenie maszynowe [4].
2. Integracja systemów pozioma i pionowa: pierwsza z nich to połączenie wszystkich uczestników w całym cyklu życia produktu - od pozyskania surowców, aż po uzyskanie ostatecznego efektu, natomiast druga zakłada integrację wszystkich poziomów organizacji [5, 6].
3. Przetwarzanie w chmurze, to inaczej przechowywanie danych online, do których w dowolnym momencie może mieć dostęp wielu użytkowników [7].
4. Rzeczywistość rozszerzona oraz rzeczywistość wirtualna, to technologie łączące środowisko rzeczywiste z dodatkowymi informacjami generowanymi komputerowo [8].

5. Internet Rzeczy, jest tworzony przez urządzenia, posiadające zdolność do wzajemnego łączenia się, wymiany danych, a także do szybkiego reagowania na zmiany w otoczeniu bez udziału człowieka [9].
6. Autonomiczne roboty, to maszyny posiadające zautomatyzowaną i wbudowaną inteligencję. W przeciwieństwie do ludzi nie ograniczają ich zdolności fizyczne, jednakże aby osiągnąć maksymalną wydajność produkcji konieczna jest współpraca maszyny i człowieka [10].
7. Cyfrowy bliźniak, może być wirtualną symulacją prawdziwej maszyny, produktu, procesu, systemu, a nawet fabryki. Koncepcja wirtualnego bliźniaka pozwala na opracowanie i testowanie wszystkich faz cyklu życia produktu w środowisku wirtualnym [11].
8. Cyberbezpieczeństwo, ma duże znaczenie z uwagi na coraz większą integrację cyfrową i wykorzystanie zbiorów danych Big Data w Przemysle 4.0 oraz zapewnienie ochrony technologii informatycznych. Ogromne ilości danych, powinny być bezpiecznie przechowywane, a ich transmisja musi odbywać się bez żadnych zakłóceń i interwencji niechcianych użytkowników [12].
9. Technologie przyrostowe/drukowanie przestrzenne, inaczej druk 3D - symulacja dostępna w oprogramowaniu CAD daje możliwość sprawdzenia zgodności geometrii zaprojektowanego produktu z rysunkiem lub komponentu jeszcze przed jego wyprodukowaniem. Natomiast symulacja przebiegu procesu drukowania pomaga poprawić jego efektywność oraz zmniejszyć ilość powstających naddatków [13].



Rysunek 1. Graficzne przedstawienie dziewięciu technologicznych filarów przemysłu 4.0. [24].  
Figure 1. Graphical representation of the nine pillars of Industry 4.0.

## 2.1 Druk 3D jako istotna technologia przemysłu 4.0

Technologia druku 3D, nazywana także wytwarzaniem przyrostowym, polega na wytwarzaniu modelu poprzez warstwowe dodawanie materiału i tworzenie konstrukcji trójwymiarowej (3D). Jest to możliwe dzięki metodom przyrostowym (inaczej addytywnym), polegającym na nakładaniu materiału budulcowego lub łączeniu przygotowanych wcześniej materiałów. W tym celu należy najpierw zaprojektować i utworzyć model za pomocą oprogramowania typu CAD (ang. Computer Assisted Detection) - można wykorzystać do tego środowiska takie jak: Autodesk Inventor, Pro/Engineer, Solid Works itp. muszą one jednak mieć możliwość eksportu plików z zapisanymi bryłami projektu do jednego z formatów, które odczytuje oprogramowanie drukarki. Automatyczny zapis do pliku w formacie STL (ang. Stereolithography) aproksymuje ściany wirtualnego obiektu do siatki trójkątów, a określone oprogramowanie tworzy model warstwowy, do którego generowana jest ścieżka robocza zwana także 'G-codem'. Po dostarczeniu pliku do drukarki rozpoczyna się proces tworzenia modelu rzeczywistego. Dzięki możliwości łatwego edytowania modelu produktu, zainteresowani mogą mieć większy wpływ na produkt końcowy. Dynamicznie rozwijająca się technologia 3D ma szansę zrewolucjonizować wytwarzanie wysokiej jakości produktów, dlatego są podstawy do postawienia tezy, że technologia ta może w przyszłości być wiodącą technologią wykorzystywaną w przemyśle [14,15].

## 3. MATERIAŁY STOSOWANE W DRUKU 3D

Materiały wykorzystywane w technologiach przyrostowych dobierane są w zależności od wymagań stawianych przez potencjalnego odbiorcę gotowego elementu. Kryteriami doboru materiału są na przykład: mikroklimat, w jakim materiał będzie wykorzystywany, odporność na zużycie, czynniki zdrowotne takie, jak: toksyczność dla organizmu ludzi lub zwierząt, chropowatość powierzchni, zwilżalność, odporność na działanie wysokiej lub niskiej temperatury, zachowanie swoich własności mechanicznych niezależnie od czynników zewnętrznych, kolor, geometria modelu itp. [26].

Pomimo, że technologia druku 3D jest stosowana od niedawna, to na rynku już dziś dostępnych jest bardzo wiele materiałów, które mogą być wykorzystane do drukowania. Głównie są to tworzywa sztuczne, ale nie tylko, ponieważ wykorzystywane są także materiały mineralne oraz materiały pochodzenia roślinnego, zwierzęcego, a także metale [19, 26].

Należy wyróżnić kilka technologii druku dla poszczególnych materiałów, ponieważ nie każdy może być drukowany na jednego typu drukarce chociażby ze względu na formę wejściową materiału.

Materiał wykorzystywany w procesie tworzenia druków 3D dostarczany jest w formie [26]:

- płynnej,
- proszkowej,
- stałej,
- granulatu.

Podział ze względu na rodzinę materiałów:

- Tworzywa sztuczne:
  - ABS (Akrylonitryl-butadien-styren),
  - PLA (Polilaktyd),



- PC (Poliwęglan),
- Nylon,
- PVA (Polialkohol winylowy),
- Kopoliester XT,
- HIPS (High Impact Polystyren),
- TPU (Poliutyren termoplastyczny),
- TPE (Termoplastyczny elastomer poliestrowy).
- Materiały metalowe
  - stopy aluminium,
  - stal nierdzewna,
  - stopy tytanowe,
  - stopy kobaltowo-chromowe,
  - stopy niklowe,
  - srebro.
- Materiały żywiczne
  - żywice elastyczne,
  - żywice standardowe,
  - żywice o zwiększonej wytrzymałości,
  - żywice odlewnicze,
  - żywice modelarskie,
  - żywice stomatologiczne,
  - żywice biokompatybilne.
- Materiały szklane
  - szkło
- Materiały drewnopodobne
  - laywood (materiał, b w którego skład wchodzi 60% PLA oraz 40% pyłu drzewnego)
- Inne materiały
  - wosk,
  - czekolada,
  - laybrick (materiał, który jest mieszanką poliestru, naturalnych związków mineralnych i kredy),
  - ceramika,
  - beton.

#### 4. PRZYKŁADY WYKORZYSTANIA TECHNOLOGII DRUKU 3D

Druk 3D w przemyśle służy głównie do prototypowania elementów, które w kolejnych etapach ich wytwarzania będą produkowane seryjnie na liniach produkcyjnych. Przy jego użyciu wykonuje się także elementy małoseryjne (rys.3), a nawet jednostkowe (rys.1,2,4). Technika addytywnego wykonywania modeli znajduje zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, co przedstawiono na rysunkach 1 - 4.



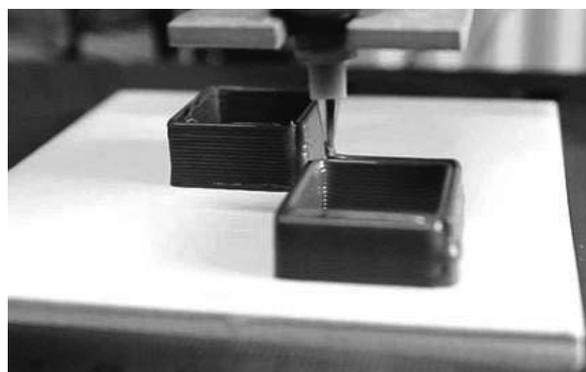
Rysunek 1. Sztuczne uzębienie wykonane w technologii SLA (utwardzanie żywicy) z wykorzystaniem żywicy biokompatybilnej [19]

*Figure 1. Artificial teeth made in the SLA technology with the use of a biocompatible resin*



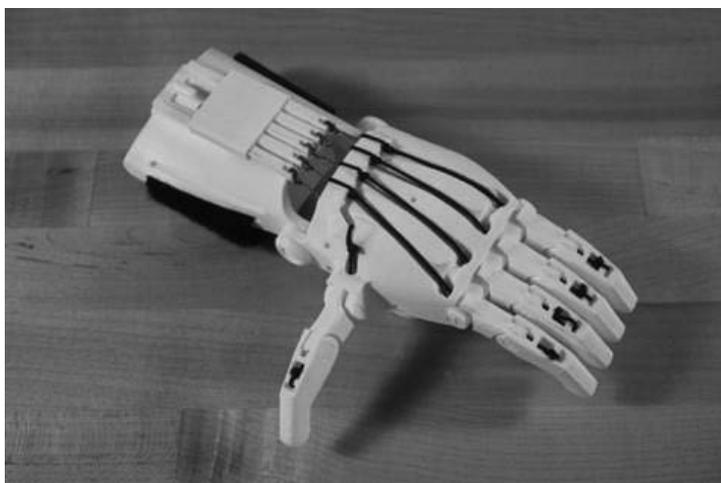
Rysunek 2. Pierścień wykonany w technologii SLM (spiekanie proszków) z wykorzystaniem proszków metali [20]

*Figure 2. The ring is made in SLM technology with the use of metal powders*



Rysunek 3. Drukowanie artykułów spożywczych z czekolady [21]

*Figure 3. Chocolate food printing*



Rysunek 4. Drukowana proteza dłoni [22]

Figure 4. Printed hand prosthesis

### 5. ZALETY I WADY STOSOWANIA DRUKU 3D

Technologie przyrostowe to techniki wytwarzania stosunkowo nowe, które stają się coraz bardziej popularne nie tylko, jako narzędzia wykorzystywane w procesach produkcyjnych, lecz coraz więcej osób prywatnych wykorzystuje potencjał drukarek 3D w gospodarstwach domowych. Jednakże, jak każde nowe rozwiązanie ma ono wady i zalety, które przedstawiono w tabelicy 1 [23].

Tablica 1 Zalety i wady zastosowania druku 3D [23,25]

ZALETY	WADY
Drukowanie obiektów o skomplikowanej geometrii, których wytworzenie z zastosowaniem innych metod jest nieekonomiczne, utrudnione, a w niektórych przypadkach niemożliwe.	Uplastycznianie tworzyw sztucznych powoduje uwalnianie się nieprzyjemnych, a czasami nawet toksycznych oparów.
Możliwość drukowania ruchomych elementów.	Nadmierny hałas emitowany podczas pracy drukarek.
Możliwość drukowania elementów z pustym wnętrzem.	Wysoki koszt samych drukarek.
Niskie koszty eksploatacyjne maszyn i materiałów.	W przypadku wystąpienia problemów związanych z procesem drukowania wyrób jest bezużyteczny i należy go zutylizować, a proces należy powtórzyć.
Do obsługi drukarki nie jest wymagana podstawowa wiedza techniczna.	Drukowanie elementów o skomplikowanej geometrii lub z materiałów specjalnych wymaga wiedzy specjalistycznej.
Krótki czas wytwarzania w porównaniu do obróbki elementów skrawaniem.	
Wysoko ekonomiczna możliwość prototypowania elementów	

## 6. PODSUMOWANIE

Trwająca obecnie czwarta rewolucja przemysłowa zmusza przedsiębiorstwa produkcyjne do poszukiwania coraz to nowszych rozwiązań oraz doskonalenia istniejących już procesów wytwarzania. Największym wyzwaniem w przypadku wdrożenia koncepcji przemysłu 4.0 jest permanentna dbałość o zachowanie równowagi między trzema elementami: nowymi technologiami, ciągłym szkoleniem pracowników oraz ich zdolnością i chęcią zaakceptowania zmian [27].

Do niedawna drukowanie przestrzenne było jedynie wyobrażeniem. W dalszym ciągu dla wielu osób możliwość tworzenia obiektów przy użyciu drukarki 3D jest zaskakującym rozwiązaniem produkcyjnym, pomimo tego, że pierwsze prace nad tą technologią były prowadzone już w 1984 r. W tej chwili z technologii przyrostowych korzysta coraz więcej przedsiębiorstw produkcyjnych, ponieważ pozwalają one na maksymalne ograniczenie odpadów. Pomimo tego, że druk 3D nie pozbawiony jest wad, ciągłe prace nad udoskonaleniem tej technologii dają możliwość zmniejszenia bądź nawet wyeliminowania tychże mankamentów. Tak samo, jak roboty zastąpiły w pewnej części pracę ludzkich rąk, tak i drukarki 3D mają ogromne szanse na zajęcie szczególnego miejsca w seryjnych procesach produkcyjnych.

## PODZIĘKOWANIA

Pracę zrealizowano w ramach kształcenia zorientowanego projektowo – PBL programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza w zakresie projektu pt.: „Technologie oraz funkcja Człowieka w Przemysle 4.0”.

## LITERATURA

1. M. Ratajczak, B. Woźniak-Jęchorek, Rewolucje przemysłowe i ich wpływ na rozwój ekonomii, Wydawnictwo Sejmowe, 2020, 26-35.
2. J. Pieriegud, Cyfryzacja gospodarki i społeczeństwa – wymiar globalny, europejski i krajowy, Publikacja Europejskiego Kongresu Finansowego, Gdańsk 2016, 22.
3. M. Götz, Przemysł czwartej generacji (przemysł 4.0) a międzynarodowa współpraca gospodarcza, *Ekonomista* 4, 2018
4. Y. Cui, S. Kara, Ka C. Cha, Manufacturing big data ecosystem: A systematic literature review, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 62: 101861, 2020.
5. T. Stock, G. Seliger, Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0, *Procedia CIRP*, 40, 2016, 536-541.
6. S. Erol, A. Jäger, P. Hold, K. Ott, W. Sihn, Tangible Industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production, *Procedia CIRP*, 54, 2016, 13-18.
7. E. Oztemel, S. Gursev, Literature review of Industry 4.0 and related technologies, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31, 2020, 127-182.
8. V. Paelke, Augmented Reality in the Smart Factory, Supporting Workers in an Industry 4.0 Environment, [w:] *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*, IEEE, Barcelona 2014.
9. H. Boyes, B. Hallaq, J. Cunningham, T. Watson, The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework, *Computers in Industry*, 101, 2018, 1-12.

10. B. Bayram, G. Ince, *Advances in Robotics in the Era of Industry 4.0*, [w:] Ustundag A., Cevikcan E. (red.), *Industry 4.0: Managing the Digital Transformation*, Springer, Cham 2018.
11. B. Rodič, *Industry 4.0 and the New Simulation Modelling Paradigm*, Organizacija, vol. 50, no. 3, 2017, 193-207.
12. *Przedsiębiorstwo 4.0 - Rekomendacje Dobrych Praktyk - Polsko-Niemiecka Izba Przemysłowa-Handlowa*; 2021
13. M. M. Gunal, *Simulation for the Better: The Future in Industry 4.0*, [w:] Gunal M. M (red.), *Simulation for Industry 4.0: Past, Present, and Future*, Springer, Cham 2019.
14. K. Cichoń, A. Brykalski, *Zastosowanie drukarek 3D w przemyśle*, Przegląd Elektrotechniczny, 2017
15. Ch. Fiał, M. Pieknik, *Druk 3D jako technologia przyszłości – część I*, *Technologia i Jakość Wytrobów* 65, 2020.
16. <https://b3d.com.pl/jakie-materialy-wykorzystuje-sie-w-druku-3d/> [Dostęp: 10.12.2021]
17. <https://thinkspace.pl/materialy-do-druku-3d/> [Dostęp: 10.12.2021]
18. <https://centrumdruku3d.pl/przeglad-dostepnych-rodzajow-zywic-w-niskobudzetowym-druku-3d-z-fotopolimerow/> [Dostęp: 10.12.2021]
19. <https://cadxpert.pl/materialy-do-druku-3d/formlabs-temporary-cb/> [Dostęp: 10.12.2021]
20. <https://przemyslprzyszlosci.gov.pl/specjalistyczny-druk-3d-w-technologii-slm-z-uzyciem-stali-stopow-a-nawet-zlota-i-srebra/> [Dostęp: 10.12.2021]
21. <https://www.foodnavigator-asia.com/Article/2015/06/29/Volunteers-required-for-exercise-test.-Reward-3D-printed-chocolate> [Dostęp: 10.12.2021]
22. <https://3dwpraktyce.pl/wp-content/uploads/2015/10/Raptor-Reloaded-640x427.jpg> [DOSTĘP: 13.12.2021]
23. <https://hive3d.pl/zalety-i-wady-druku-3d/> [DOSTĘP: 13.12.2021]
24. M. Śliwa E. Chodźko, *Edukacja w XXI wieku – teoria i metody badawcze*, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL, Lublin 2020.
25. <https://inzynieria.com/budownictwo/wiadomosci/43807,czy-wiesz-jakie-wady-i-zalety-ma-drukarka-3d> [DOSTĘP: 13.12.2021]
26. <https://centrumdruku3d.pl/jaki-wybrac-material-do-druku-3d/> [DOSTĘP: 13.12.2021]
27. G. Gunia, *Zintegrowane Systemy Informatyczne Przedsiębiorstw w Kontekście Przemysłu*

## Wpływ obróbki cieplnej na strukturę i własności użytkowe stali 60WCrV8

K. Kurka, M. Kciuk<sup>a</sup>, R. Babilas

<sup>a</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych  
email: monika.kciuk@polsl.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących wpływu obróbki cieplnej na strukturę i odporność korozyjną stali narzędziowej 60WCrV8. Badania metalograficzne ujawniające strukturę stali w stanie wyjściowym oraz po przeprowadzonej obróbce cieplnej przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopu świetlnego firmy Zeiss. Odporność korozyjną badano w 3,5% roztworze NaCl wykorzystując metodę grawimetryczną, z kolei badania po próbach korozyjnych, umożliwiające ocenę stanu powierzchni próbek, wykonano z wykorzystaniem mikroskopu świetlnego Leica.

**Abstract:** The article presents the results of research on the effect of heat treatment on the structure and corrosion resistance of 60WCrV8 tool steel. Metallographic tests revealing the structure of steel in the initial state and after heat treatment were carried out using a Zeiss light microscope. The corrosion resistance was tested in a 3.5% NaCl solution using a gravimetric method, while post-corrosion tests to assess the surface condition of the samples were carried out using a Leica light microscope.

**Słowa kluczowe:** obróbka cieplna, odporność korozyjna, stal narzędziowa

### 1. WSTĘP

Proces obróbki cieplnej wpływa na kształtowanie i ulepszenie własności mechanicznych oraz fizyko-chemicznych stali, dlatego też jest nieodzownym elementem w wielu gałęziach przemysłu [1]. Poddawane są mu stale narzędziowe stanowiące materiał przeznaczony do wytwarzania różnego rodzaju narzędzi.

Szczególną grupą stali narzędziowych są stale stopowe do pracy na zimno, w tym stal 60WCrV8. Należy ona do stali średniowęglowych i charakteryzuje się dużą zdolnością do cięcia jak i dużą odpornością na uderzenia przy jednoczesnym zachowaniu znacznej twardości oraz średniej odporności na ścieranie. Obecność węgla jak i pierwiastków stopowych wpływa dodatkowo na jej dużą hartowność istotną w czasie obróbki cieplnej, obejmującej hartowanie i niskie odpuszczanie, w wyniku której uzyskać można twardość wynoszącą 62,5 HRC [2-4].

Stale narzędziowe stopowe do pracy na zimno charakteryzują się jednak podatnością na oddziaływanie środowiska emulsji wodno-olejowych, a także działania atmosfery o dużej

wilgotności podczas transportu czy też składowania, stanowiących przyczynę występowania korozji elektrochemicznej. Ważne jest więc stosowanie odpowiednich procesów takich jak obróbka cieplna, wpływająca na polepszenie własności użytkowych stali [4-6].

## 2. MATERIAŁ BADAWCZY I METODYKA BADAŃ

Do przeprowadzenia badań wykorzystano stal narzędziową stopową do pracy na zimno o oznaczeniu 60WCrV8 oraz składzie chemicznym przedstawionym w Tabelicy 1.

Tablica 1. Skład chemiczny stali 60WCrV8

Table 1. Chemical composition of 60WCrV8 steel

Minimalna i maksymalna zawartość pierwiastków stopowych [%]							
C	Cr	W	V	Si	Mn	P	S
0,55	0,90	1,70	0,10	0,70	0,15	-	-
0,65	1,20	2,20	0,20	1,00	0,45	0,030	0,030

Stal narzędziowa poddana została obróbce cieplnej obejmującej hartowaniu oraz niskie odpuszczanie. Hartowanie zostało przeprowadzone z wykorzystaniem pieca firmy Nabertherm model HTCT 03/16-P330, z kolei proces odpuszczania wykonano za pomocą pieca Miditherm 200MP firmy Bego. Parametry procesu obróbki cieplnej zostały przedstawione w Tabelicy 2.

Tablica 2. Parametry obróbki cieplnej

Table 2. Parameters of the heat treatment

Operacja obróbki cieplnej	Temperatura [°C]	Czas [min]	Ośrodek chłodzący
Hartowanie	900	12	Olej hartowniczy w temperaturze pokojowej
Odpuszczanie	200	120	Powietrze

Badania metalograficzne zostały przeprowadzone na odpowiednio przygotowanych zglądach próbek stali w stanie wyjściowym oraz po przeprowadzonych operacjach obróbki cieplnej. Półki zostały zainkludowane na gorąco za pomocą żywicy fenolowej, szlifowane i polerowane z wykorzystaniem szlifierko-polerki Struers Tegamin-30, a następnie trawione za pomocą 4% nitalu w czasie 5 sekund.

Obserwacje metalograficzne struktury zostały przeprowadzone za pomocą mikroskopu świetlnego Axio Observer firmy ZEISS służącym do analizy obrazu przy powiększeniach 200x, 500x oraz 1000x.

Badania odporności na korozję zostały przeprowadzone dla materiału w stanie wyjściowym oraz po przeprowadzonych operacjach obróbki cieplnej w 3,5% roztworze NaCl z wykorzystaniem metody grawimetrycznej polegającej na wyznaczeniu ubytku masy  $V_C$  próbek oraz liniowej szybkości korozji  $V_P$ .

Ubytek masy wylicza się ze wzoru:

$$V_C = \Delta m / (S \cdot t) \quad (1)$$

gdzie:

$V_C$  – ubytek masy próbki [ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{doba})$ ]

$\Delta m$  – zmiana masy próbki [g]

$S$  – pole powierzchni całkowitej próbki poddanej działaniu czynnika korozyjnego [ $\text{m}^2$ ]

$t$  – czas trwania korozji [doba]

Szybkość korozji wylicza się ze wzoru:

$$V_P = V_C \cdot \alpha \quad (2)$$

$$\alpha = 365 / (1000 \cdot d) \quad (3)$$

gdzie:

$V_P$  – szybkość korozji [mm/rok]

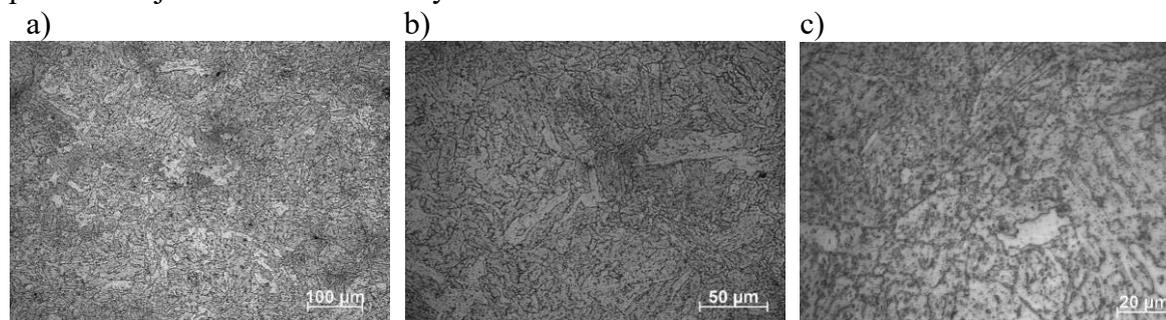
$V_C$  – ubytek masy próbki [ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{doba})$ ]

$\alpha$  – przelicznik, który uwzględnia gęstość stali 60WCrV8, wynoszącą  $7,95 \text{ g}/\text{cm}^3$

Po badaniach odporności na korozję przeprowadzona została kolejno obserwacja powierzchni próbek za pomocą mikroskopu świetlnego Leica wersji DVM6 A przy powiększeniu 20x oraz 100x.

### 3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Badania metalograficzne pozwoliły na określenie wpływu warunków obróbki cieplnej na strukturę stali 60WCrV8. Struktura w stanie wyjściowym (Rysunek 1) składa się z ferrytu oraz wydzielonych z austenitu węglików. Dodatkowo wydzielenia węglików ułożone są w postaci miejscowo rozmieszczonych w osnowie łańcuszków.

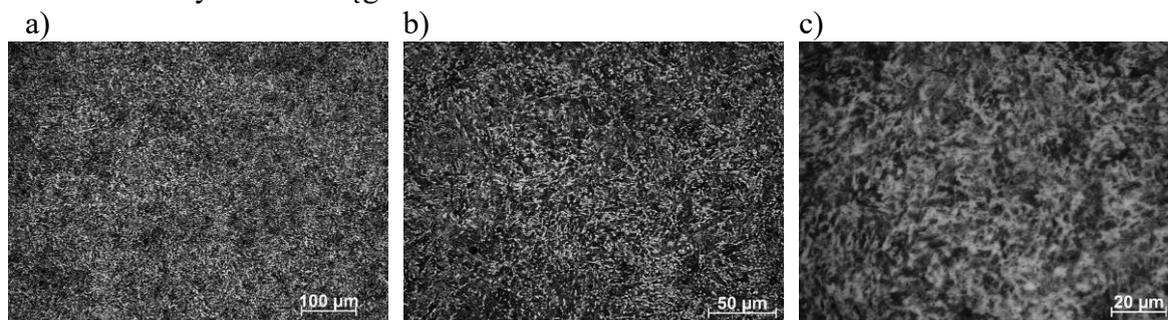


Rysunek 1. Mikrostruktura stali w stanie wyjściowym pod powiększeniem: a) 200x, b) 500x, c) 1000x

Figure 1. Microstructure of steel in initial state under magnification: a) 200x, b) 500x, c) 1000x



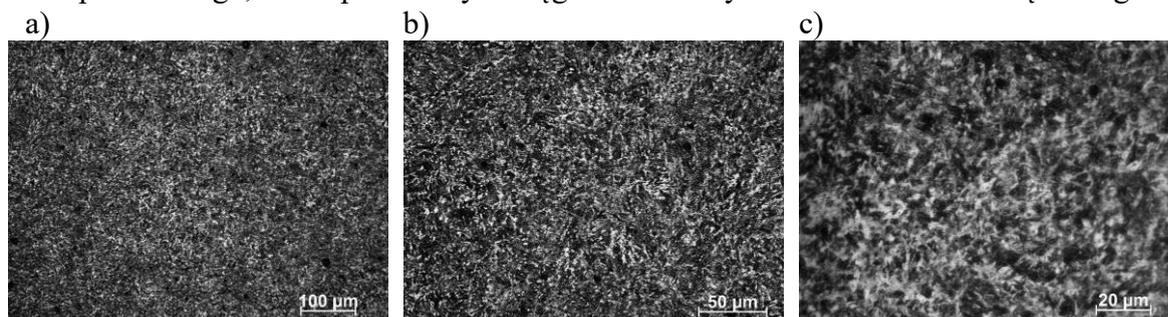
W strukturze próbek poddanych hartowaniu (Rysunek 2) widoczny jest martenzyt listwowy oraz austenit szczałkowy. Składnikami strukturalnymi są dodatkowe nierozpuszczone w czasie austenitowania węgliki wtórne.



Rysunek 2. Mikrostruktura stali po hartowaniu pod powiększeniem: a) 200x, b) 500x, c) 1000x

*Figure 2. Microstructure of steel after quenching under magnification: a) 200x, b) 500x, c) 1000x*

Struktura próbek poddanych odpuszczaniu (Rysunek 3) składa się z kolei z martenzytu niskoodpuszczonego, nierozpuszczonych węglików wtórnych oraz austenitu szczałkowego.



Rysunek 3. Mikrostruktura stali po hartowaniu pod powiększeniem: a) 200x, b) 500x, c) 1000x

*Figure 3. Microstructure of steel after quenching and tempering under magnification: a) 200x, b) 500x, c) 1000x*

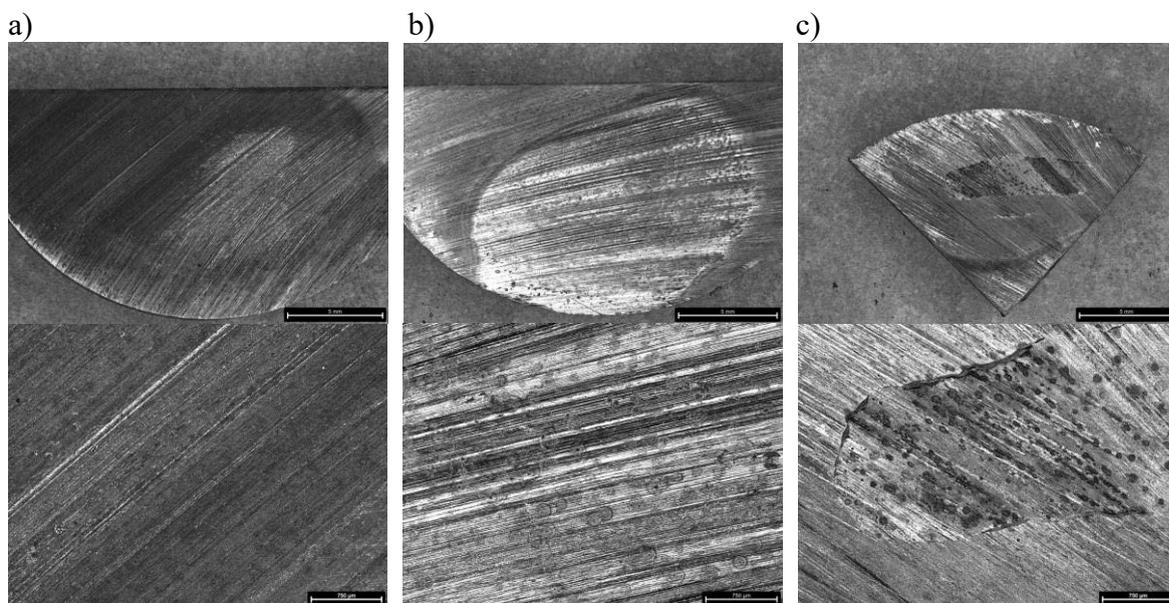
Obróbka cieplna wpłynęła również na odporność korozyjną analizowanego materiału. Obecne w roztworze jony chlorkowe wydłużają czas zwilżania, przenikają przez warstwę produktów korozji do powierzchni metalu gdzie przyspieszają korozyjne procesy elektrochemiczne oraz zwiększają agresywność elektrolitu. Są więc przyczyną ubytku materiału, jednak zaproponowana obróbka cieplna wpłynęła na ograniczenie miejsc inicjacji korozji, zmniejszając tym samym ubytek masy i szybkość korozji próbek. Średnie wartości ubytku masy próbek  $V_C$  oraz szybkości korozji  $V_P$ , wyliczone na podstawie danych przedstawionych w Tabelicy 3, osiągają największą wartość dla próbek w stanie wyjściowym i wynoszą odpowiednio 1,7372 g/(m<sup>2</sup>·doba) oraz 0,0798 (mm/rok). Uzyskane średnie wartości  $V_P$ , zgodnie z normą, klasyfikują materiał jako odporny na korozję, o stopniu odporności równym 5.

Tablica 3. Ubytek masy próbki i liniowa szybkość korozji po 7 dobach ekspozycji w 3,5% roztworze NaCl, dla  $\alpha=0,0459$

Table 3. Weight loss of the sample and linear corrosion rate after 7 days exposure in 3.5% NaCl solution, for  $\alpha=0.0459$

Oznaczenie próbki gdzie: W- w stanie wyjściowym H- po hartowaniu O- po hartowaniu i odpuszczaniu	Zmiana masy próbki [g]	Pole powierzchni całkowitej próbki [m <sup>2</sup> ]	Ubytek masy próbki V <sub>c</sub> [g/(m <sup>2</sup> ·doba)]	Szybkość korozji V <sub>p</sub> [mm/rok]
Próbka nr 1 W	0,0068	0,000713	1,3625	0,0626
Próbka nr 2 W	0,008	0,000703	1,6257	0,0746
Próbka nr 3 W	0,0047	0,000302	2,2233	0,1021
Próbka nr 1 H	0,008	0,000687	1,6635	0,0764
Próbka nr 2 H	0,0074	0,000732	1,4442	0,0663
Próbka nr 3 H	0,007	0,000675	1,4815	0,0680
Próbka nr 1 O	0,0072	0,000748	1,3751	0,0631
Próbka nr 2 O	0,009	0,000710	1,8109	0,0831
Próbka nr 3 O	0,0053	0,000660	1,1472	0,0527

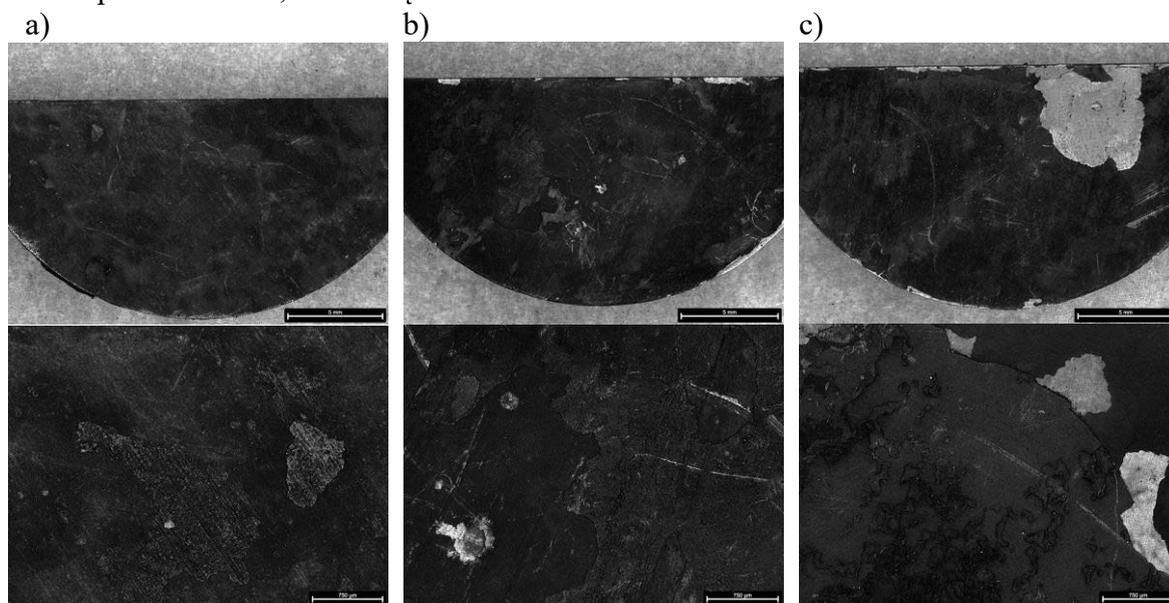
Oddziaływanie czynnika korozyjnego w postaci 3,5% roztworu NaCl wpływa na pojawienie się na powierzchni próbek zniszczeń korozyjnych, które w zależności od stanu próbki mają różny charakter. Na powierzchni próbek w stanie wyjściowym (Rysunek 4) zaobserwować można ogniska korozyjne w postaci plam, rys, wżerów, rozmieszczonych na całej powierzchni próbek, o największej kumulacji w miejscach największego ubytku materiału.



Rysunek 4. Powierzchnia próbek: a) nr 1, b) nr 2, c) nr 3, w stanie wyjściowym przy powiększeniu 20x i 100x

Figure 4. Surface area of sample: a) no 1, b) no 2, c) no 3, in the initial state at 20x and 100x magnification

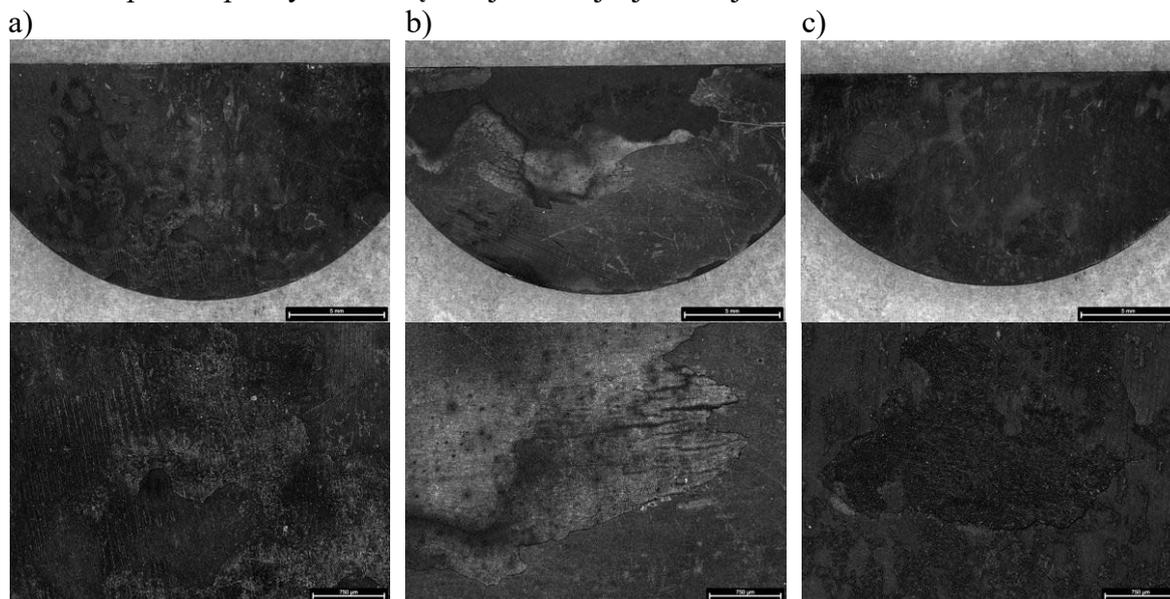
Zniszczenia korozyjne w przypadku próbek po hartowaniu (Rysunek 5) widoczne są głównie w postaci ubytków warstwy zahartowanej, mają charakter lokalny, miejscowo charakteryzują się znacznymi rozmiarami. Na powierzchni próbek zidentyfikowano dodatkowo brunatne przebarwienia, świadczące o obecności tlenków.



Rysunek 5. Powierzchnia próbek: a) nr 1, b) nr 2, c) nr 3, po hartowaniu przy powiększeniu 20x i 100x

Figure 5. Surface area of sample: a) no 1, b) no 2, c) no 3, after quenching at 20x and 100x magnification

Z kolei w przypadku próbek po hartowaniu i odpuszczaniu (Rysunek 6) wpływ czynnika korozyjnego objawia się również ubytkami materiału, jednak nie tak dużymi jak w poprzednich przypadkach. Wyjątek stanowi próbka numer 2 o znacznym ubytku masy. Widoczne na powierzchni próbek plamy stanowią miejsce inicjacji korozji.



Rysunek 6. Powierzchnia próbki: a) nr 1, b) nr 2, c) nr 3, po hartowaniu i odpuszczaniu przy powiększeniu 20x i 100x

Figure 5. Surface area of sample: a) no 1, b) no 2, c) no 3, after quenching and tempering at 20x and 100x magnification

Obróbka cieplna wpłynęła na ograniczenie wpływu czynnika korozyjnego, co przejawia się mniejszym ubytkiem masy próbek w stosunku do stanu wyjściowego. Pojawienie się niewielkiej ilości plam czy przebarwień na próbkach poddanych odpowiednim operacjom obróbki cieplnej jest efektem oddziaływania materiału z medium korozyjnym.

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

- Uzyskana w wyniku obróbki cieplnej struktura stali charakteryzuje się obecnością nierozpuszczonych i twardych węglików wtórnych ograniczających rozrost ziarn austenitu, wpływających tym samym na zwiększenie drobnoziarnistości stali oraz polepszenie jej odporności na ścieranie.
- Obróbka cieplna wpływa na poprawę własności użytkowych stali 60WCrV8 takich jak odporność na korozję. Próbki poddane operacjom hartowania i odpuszczania odznaczają się większą odpornością korozyjną na działanie jonów  $\text{Cl}^-$ , a co za tym idzie, mniejszymi wartościami  $V_C$  i  $V_P$ .
- Przeprowadzone badania po próbach korozyjnych wykazały występowanie zróżnicowanego charakteru uszkodzenia korozyjnego w zależności od stanu materiału.
- Poprawa odporności na korozję w wyniku obróbki cieplnej umożliwia stosowanie stali w środowiskach korozyjnie agresywnych.

**LITERATURA**

1. L.A. Dobrzański, Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, WNT, Gliwice 200.
2. K. Przybyłowicz: Metaloznawstwo, WNT, Warszawa 2007.
3. <https://akrostal.pl/stale/nz3-60wcrv81-2550/?print=pdf> (dostęp na dzień 04.01.2022).
4. Białecki M. „Stale narzędziowe. T. 2, Stale stopowe do pracy na zimno” Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1976.
5. T. Hryniewicz, Technologia powierzchni i powłok, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 1999.
6. L.A. Dobrzański, E. Hajduczek, J. Marciniak, R. Nowosielski: Metaloznawstwo i obróbka cieplna materiałów narzędziowych, WNT, Warszawa 1990.



28 stycznia 2022  
Gliwice

KATEDRA MATERIAŁÓW INŻYNIERSKICH I BIOMEDYCZNYCH  
WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY  
POLITECHNIKA ŚLĄSKA

## MIĘDZYNARODOWA STUDENCKA KONFERENCJA NAUKOWA

### Struktura i własności teksturowanych laserowo materiałów narzędziowych

N. Łopata<sup>a</sup>, D. Pakuła<sup>b</sup>

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

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

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono strukturę i wybrane własności poddanych teksturowaniu laserowemu materiałów narzędziowych, takich jak: węgliki spiekane H15X, węgliki spiekane H15X z powłoką  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$  oraz ceramika sialonowa. W celu przeprowadzenia analizy składu chemicznego zastosowano spektrometr dyspersji promieniowania rentgenowskiego. Obserwacji struktury dokonano za pomocą cyfrowego mikroskopu świetlnego. Analizę własności trybologicznych przeprowadzono przy zastosowaniu trybometru oraz profilometru. Dokonano także pomiarów twardości. Zaobserwowano, że wytworzona tekstura posiada geometrię kropkową. Stwierdzono również, że teksturowanie laserowe poprawiło odporność na zużycie ściernie badanych materiałów.

**Abstract:** The purpose of this paper is to investigate the structure and selected properties of laser texturing tool materials such as: cemented carbide H15X, cemented carbide H15X with  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$  coating and sialon ceramics. In order to analyze the chemical composition, an Energy Dispersive X-ray Spectrometer was used. The observation of the structure was done by digital optical microscope. The analysis of tribological properties was made with a tribometer and a profilometer. Hardness measurement was done too. It was observed that created texture have a geometry of the dot. It also was found that laser texturing improved the abrasion resistance of tested materials.

**Słowa kluczowe:** teksturowanie laserowe, węgliki spiekane, ceramika sialonowa

#### 1. WSTĘP

Trwałość narzędzi ma ogromny wpływ na koszt produkcji i jakość obrabianych elementów. Zastosowanie różnych metod obróbki powierzchniowej przyczynia się do poprawy własności trybologicznych materiałów narzędziowych. Na szczególną uwagę zasługuje laserowe teksturowanie powierzchni, które poprzez zmniejszenie obszaru styku między narzędziem a materiałem obrabianym zmniejsza tarcie wydłużając trwałość narzędzia. Teksturowanie

znajduje zastosowanie również do wytwarzania zasobników smarnych, także wpływających na redukcję tarcia [1, 2].

W pracy [3] zbadano wpływ teksturowania laserowego na własności trybologiczne węgliku krzemu. Wykazano, że zastosowanie obróbki laserowej zmniejszyło współczynnik tarcia o około 20%. W literaturze [4] przebadano również wpływ hybrydowej obróbki powierzchniowej na odporność na zużycie ściernie materiałów narzędziowych. Stwierdzono, że połączenie teksturowania laserowego oraz naniesienia powłoki TiAlN metodą PVD na stal narzędziową do pracy na zimno powoduje zwiększenie odporności na zużycie ściernie oraz wytrzymałości zmęczeniowej stali.

W pracach [5, 6] stwierdzono także korzystny wpływ teksturowania laserowego na odporność na zużycie ściernie węglików spiekanych H10S oraz ceramiki sialonowej z powłoką ALD+PVD.

## 2. MATERIAŁ DO BADAŃ

Materiałami narzędziowymi, które poddano teksturowaniu laserowemu w niniejszej pracy były: węgliki spiekane H15X, węgliki spiekane H15X z powłoką  $Al_2O_3+TiN$  oraz ceramika sialonowa.

Węgliki spiekane H15X o następującym składzie chemicznym: WC - 92,5%, Co - 7%, TiC+TaC+NbC - 0,5%, należą do grupy węglików spiekanych o symbolu K, czyli przeznaczonych do skrawania materiałów dających wiór krótki. Jego twardość wynosi około 1550 HV. Zastosowanie znajduje w szczególności do frezowania żeliwa, miedzi i jej stopów oraz stopów lekkich [7].

Powłoka azotku tytanu TiN charakteryzuje się wysoką twardością na poziomie 2400 HV oraz bardzo dobrą odpornością na zużycie ściernie. Z tego powodu znalazła szerokie zastosowanie jako warstwa na materiałach narzędziowych, takich jak stale narzędziowe do pracy na zimno i na gorąco, stale szybko tnące czy węgliki spiekane. Powłoki z azotku tytanu stosuje się również w celach dekoracyjnych ze względu na jego złotą barwę [8].

Zastosowanie międzywarstwy  $Al_2O_3$  zwiększa odporność na utlenianie w podwyższonych temperaturach, gdyż stanowi ona barierę cieplną oraz dyfuzyjną dla tlenu z atmosfery [6].

Ceramika sialonowa poprzez swoje własności, w tym wysoką twardość (1800 HV) znajduje zastosowanie jako materiał na narzędzia przeznaczone do frezowania i toczenia stali oraz stopów trudnoobrabialnych. Skład chemiczny sialonu  $\beta$  określony jest wzorem  $Si_{6-Z}Al_ZO_ZN_{8-Z}$ , gdzie liczba Z odpowiada liczbie atomów aluminium zastępujących atomy krzemu w sieci heksagonalnej odmiany alotropowej  $\beta$  azotku krzemu [9].

## 3. METODYKA BADAŃ

Obserwacje mikrostruktury badanych próbek oraz uszkodzeń powierzchni wynikających z przeprowadzonych badań trybologicznych dokonane zostały przy pomocy cyfrowego mikroskopu świetlnego Leica DVM6 przy zastosowanym powiększeniu 500x.

Detektor dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego EDS, będący zintegrowaną częścią wysokorozdzielczego skaningowego mikroskopu elektronowego Zeiss Supra 25, umożliwił zbadanie składu chemicznego próbek.

Badania twardości wykonano dynamiczną metodą Vickersa przy obciążeniu o wartości 0,4 N przy pomocy mikrotwardościomierza Shimadzu DUH 202. Rolę wglębnika pełnił

diamentowy ostrosłup o kącie między przeciwległymi ścianami równym  $136^\circ$ , a twardość określona została ze stosunku siły nacisku węgelnika do pola powierzchni bocznej odcisku.

Badanie odporności na zużycie ściernie przeprowadzone zostało metodą pin-on-disc za pomocą trybometru CSEM. Parametry badania były następujące:

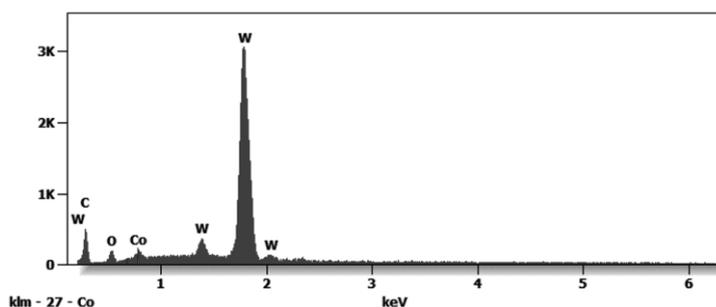
- przeciwpróbka: kulka o średnicy 6 mm wykonana z  $Al_2O_3$ ,
- siła nacisku przeciwpróbki: 5 N,
- promień tarcia: 5 mm
- prędkość liniowa: 0,1 m/s,
- temperatura otoczenia:  $20^\circ C$ .

W celu obserwacji profilu zużycia oraz wyznaczenia pola oraz objętości wytarcia zastosowano profilometr Sutronic+ firmy Taylor – Hobson.

#### 4. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Badanie składu chemicznego próbek wykonano za pomocą spektrometru EDS zintegrowanego z skaningowym mikroskopem elektronowym SEM.

Badanie jakościowe i ilościowe próbki z węglików spiekanych H15X przeprowadzono na obszarze o wymiarach ok.  $25 \mu m \times 20 \mu m$ . Na rysunku 1 przedstawiono pierwiastki wykryte podczas badania, natomiast tablica 1 przedstawia procentowy udział tych pierwiastków.



Rysunek 1. Widmo energii rozproszonego promieniowania rentgenowskiego, analiza obszaru na powierzchni węglików H15X

Figure 1. Dispersed X-ray energy spectrum, area analysis on the surface of H15X cemented carbides

Tablica 1. Stężenie procentowe pierwiastków węglików spiekanych H15X

Table 1. The percentage of the elements of H15X cemented carbides

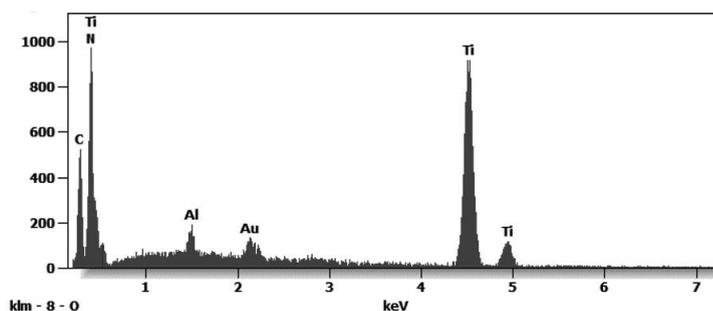
Pierwiastek	Stężenie masowe [%]	Stężenie atomowe [%]
C	4,4	35,7
O	1,9	11,3
Co	3,4	5,6
W	90,3	47,4

Analiza EDS badanego obszaru wykazała, że badany materiał zawiera głównie wolfram - 90,3%. Zgodnie z oczekiwaniami badanie wykazało również udział węgla, tworzącego liczne węgliki (głównie WC), oraz kobaltu stanowiącego osnowę.

W trakcie badania nie wykryty został udział pierwiastków, które powinny występować według literatury [7], takich jak: tytan, tantal czy niob. Wynikać może to ze zbyt małego ich udziału procentowego lub błędu pomiarowego jakim obarczone jest badanie, który występuje na skutek tego, że badany jest tylko reprezentatywny obszar próbki, a nie cała jej objętość.



Na rysunku 2 i w tabelicy 2 przedstawiono wyniki badania składu chemicznego wybranego obszaru na powierzchni pokrytego powłoką  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$  węgliku spiekane H15X.



Rysunek 2. Widmo energii rozproszonego promieniowania rentgenowskiego, analiza obszaru na powierzchni węglików H15X pokrytego powłoką  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$

*Figure 2. Dispersed X-ray energy spectrum, area analysis on the surface of H15X cemented carbides coating by  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$*

Tabela 2. Stężenie procentowe pierwiastków węglików spiekanych H15X pokrytego powłoką  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$  otrzymane w wyniku analizy EDS

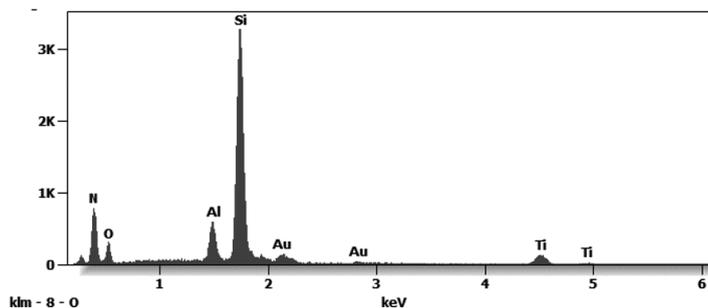
*Table 2. The percentage of the elements of H15X cemented carbides coating by  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$  obtained by EDS analysis*

Pierwiastek	Stężenie masowe [%]	Stężenie atomowe [%]
C	4,2	12,5
N	10,4	26,3
Al	1,2	1,6
Ti	79,6	58,8
Au	4,6	0,8

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono największy masowy udział tytanu oraz azotu (79,6% i 10,4%). Potwierdza to występowanie warstwy powierzchniowej w postaci powłoki TiN. Wykryty niewielki udział aluminium w składzie procentowym, świadczy o istnieniu międzywarstwy  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Przeprowadzone badanie mogło być obarczone błędem pomiarowym, wynikającym ze specyfiki preparatyki próbek do badań mikroskopowych przy pomocy mikroskopu SEM. Z tego powodu wykryte mogło zostać złoto, które choć nie występuje w materiale, stosowane jest do preparatyki materiałów nieprzewodzących prądu.

Za pomocą spektrometru EDS zbadano także skład chemiczny ceramiki sialonowej. Na rysunku 3 i w tabelicy 3 zaprezentowano wyniki przeprowadzonego badania.



Rysunek 3. Widmo energii rozproszonego promieniowania rentgenowskiego - SiAlON

*Figure 3. Dispersed X-ray energy spectrum, area analysis on the surface of sialon ceramics*

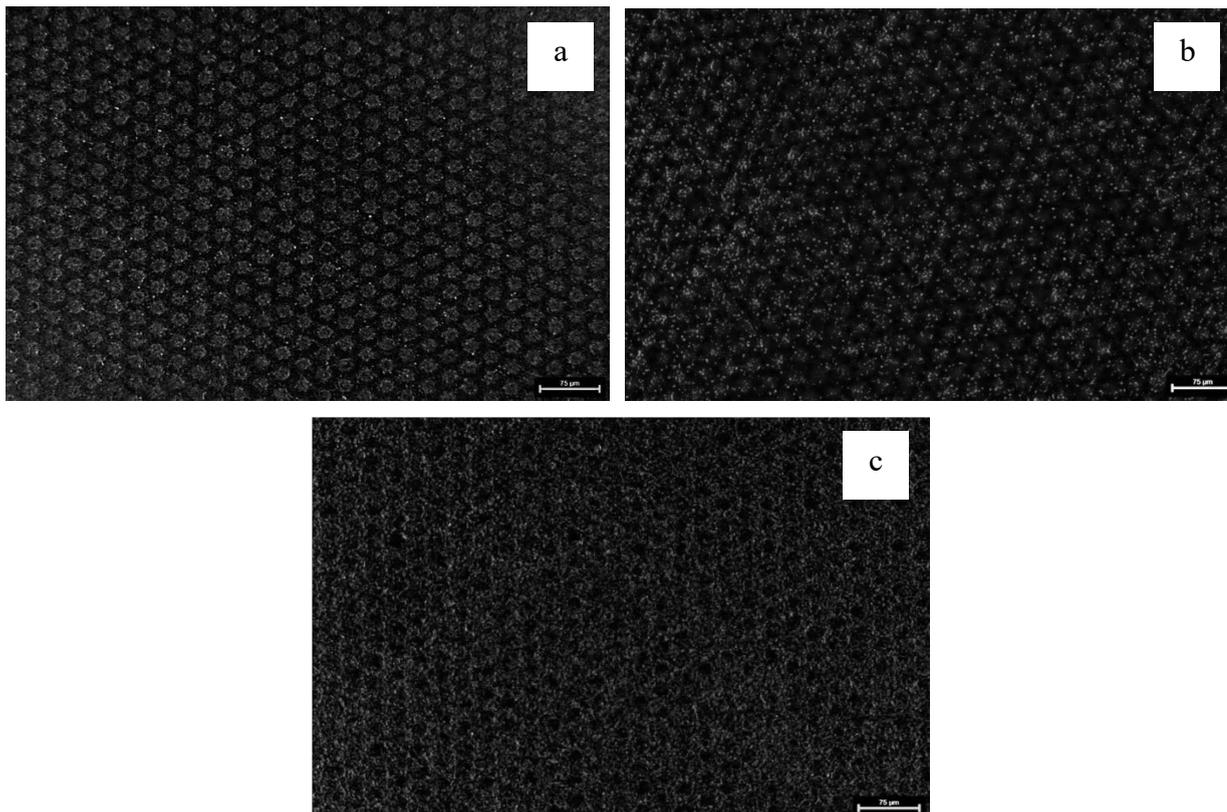
Tablica 3. Stężenie procentowe pierwiastków ceramiki sialonowej otrzymane z analizy EDS  
 Table 3. The percentage of the elements of sialon ceramics obtained by EDS analysis

Pierwiastek	Stężenie masowe [%]	Stężenie atomowe [%]
C	3,3	6,8
N	17,6	31,6
O	7,6	11,9
Al	5,3	5,0
Si	40,1	35,9
Ti	13,9	7,3
Os	5,0	0,7
Au	7,3	0,9

W oparciu o otrzymane w trakcie badania EDS wyniki stwierdzono występowanie pierwiastków, których udział był oczekiwany ze względu na znane dane literaturowe [9], czyli: krzemu (40,1%), azotu (17,6%), tlenu (7,6%) oraz aluminium (5,3%).

Występowanie pozostałych wykrytych pierwiastków może wiązać się z dużą porowatością ceramiki sialonowej, a tym samym jej predyspozycjami do gromadzenia zanieczyszczeń w porach otwartych na powierzchni materiału.

Badanie struktury powierzchni próbek teksturowanych wykonano przy pomocy cyfrowego mikroskopu świetlnego. Na rysunku 4 przedstawiono mikrostrukturę badanych próbek.



Rysunek 4. Obraz mikrostruktury teksturowanych: a) węglików spiekanych H15X, b) powłoki  $Al_2O_3+TiN$  naniesionej na węgliki spiekane H15X, c) ceramiki sialonowej. Pow. 500x  
 Figure 4. Microstructure of textured: a) H15X cemented carbides, b)  $Al_2O_3+TiN$  coating on H15X cemented carbides, c) sialon ceramics. Mag. 500x

W wyniku przeprowadzonych badań mikrostruktury zaobserwowano, że na każdej próbce wytworzona zastała tekstura kropkowa o uporządkowaniu dalekiego zasięgu. Tekstura na powierzchni węglików spiekanych oraz powłoki  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$  charakteryzuje się dużą jednorodnością. Natomiast poprzez dużą porowatość ceramiki sialonowej otrzymana na jej powierzchni tekstura nie jest całkowicie jednorodna.

Badania twardości wykonano metodą Vickersa przy obciążeniu 0,4 N. W tabelicy 4 przedstawiono wyniki pomiarów twardości oraz najistotniejsze parametry statystyczne.

Tablica 4. Wyniki pomiarów twardości wraz z podstawowymi parametrami statystycznymi  
Table 4. Hardness test results with basic statistical parameters

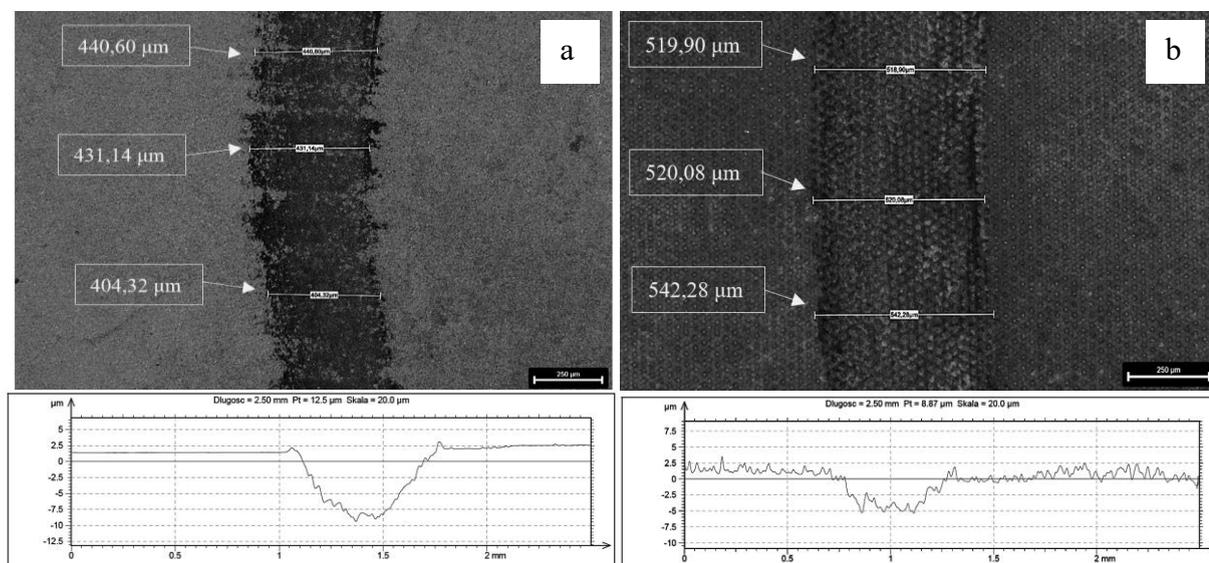
Próbka	Węgliki spiekane H15X	Ceramika sialonowa	Powłoka $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$
Jednostka Nr pomiaru	HV	HV	HV
1	1499	1698	2357
2	1533	1733	2432
3	1570	1770	2498
4	1632	1732	2348
5	1599	1699	2447
6	1498	1687	2378
7	1535	1735	2370
8	1611	1732	2391
9	1539	1769	2473
10	1569	1789	2413
Srednia	1558,5	1734,4	2410,7
Wariancja	1882,45	1028,44	2320,81
Odchylenie standardowe	43,39	32,07	48,17
Przedział ufności $1 - \alpha = 0,95$	$1527,46 < u$ $u < 1589,53$	$1711,46 < u$ $u < 1757,34$	$2376,24 < u$ $u < 2445,16$

W oparciu o wyniki badania twardości można stwierdzić, że zarówno węgliki H15X, jak i sialon charakteryzują się wysoką twardością, wynoszącą ponad 1500 HV, co jest bardzo istotną cechą w przypadku materiałów przeznaczonych na narzędzia. Najwyższą twardością, na poziomie 2410 HV, odznacza się powłoka  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$ , także uzasadnione jest stosowanie jej do pokrywania materiałów narzędziowych w celu polepszenia ich własności trybologicznych.

Wyliczone parametry statystyczne, w tym niewielkie odchylenia standardowe i wąskie zakresy przedziałów ufności, świadczą o dużej powtarzalności otrzymywanych wyników w kolejnych pomiarach dla każdego materiału, z czego można wywnioskować, że każdy z pomiarów wykonany został w sposób poprawny, a błędy pomiarowe były niewielkie.

Badania odporności na zużycie ściernie przeprowadzone zostały przy zastosowaniu metody pin – on – disc. Powstałe ślady wytarcia poddano obserwacjom na cyfrowym mikroskopie świetlnym za pomocą którego wykonano również pomiary szerokości wytarcia. Dodatkowo przy pomocy profilometru zbadano topografię profilu wytarcia oraz obliczono pole wytarcia.

Na rysunku 5 przedstawiono zdjęcia śladów wytarcia oraz profile wytarcia powstałe na węglkach spiekanych H15X nie poddanym i poddanym teksturowaniu laserowemu.



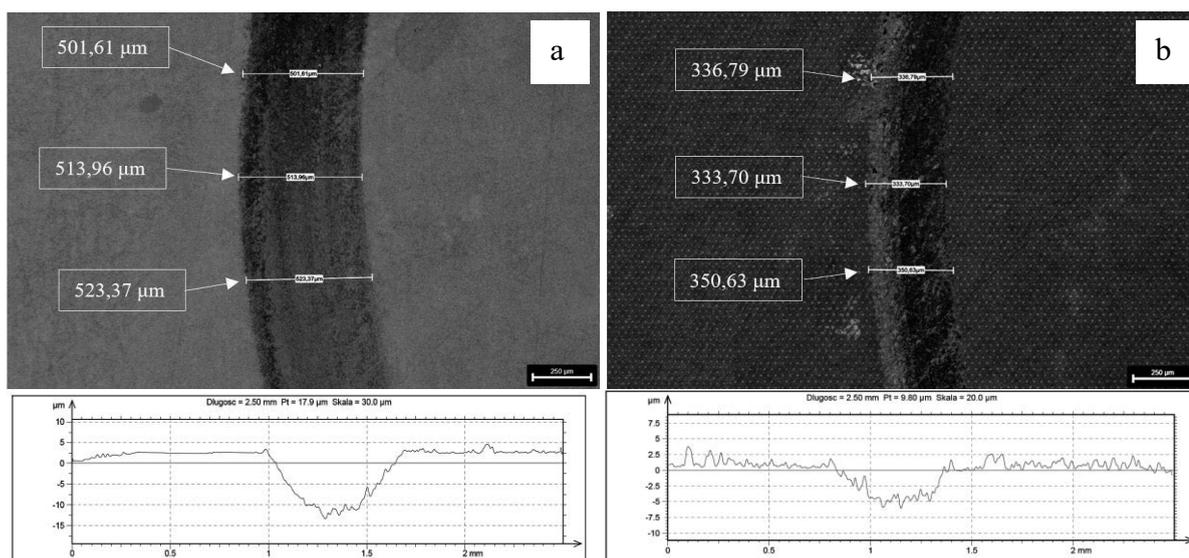
Rysunek 5. Ślady (pow. 200x) oraz profile wytarcia na powierzchni węglików H15X a) nieteksturowanego, b) teksturowanego

Figure 5. Wear tracks (mag. 200x) and wear on the surface of H15X cemented carbides a) non-textured, b) textured

Na podstawie przeprowadzonych badań trybologicznych zaobserwowano ślad wytarcia wytworzony na powierzchni nieobrobionych powierzchniowo węglików H15X. Jego szerokość wynosi średnio 425  $\mu\text{m}$ . Zmierzono również głębokość wytarcia, wynoszącą ponad 10  $\mu\text{m}$ .

Ślad wytarcia na powierzchni węglików poddanych teksturowaniu jest szerszy niż dla węglików nieteksturowanych o około 100  $\mu\text{m}$ . Natomiast na podstawie przebiegu profilu wytarcia stwierdzono, że głębokość wytarcia wynosi zaledwie 5  $\mu\text{m}$ .

Rysunek 6 przedstawia zdjęcia śladów wytarcia wraz z ich wymiarami oraz profile wytarcia na próbkach z węglików H15X pokrytego nieteksturowaną i teksturowaną powłoką  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$ .



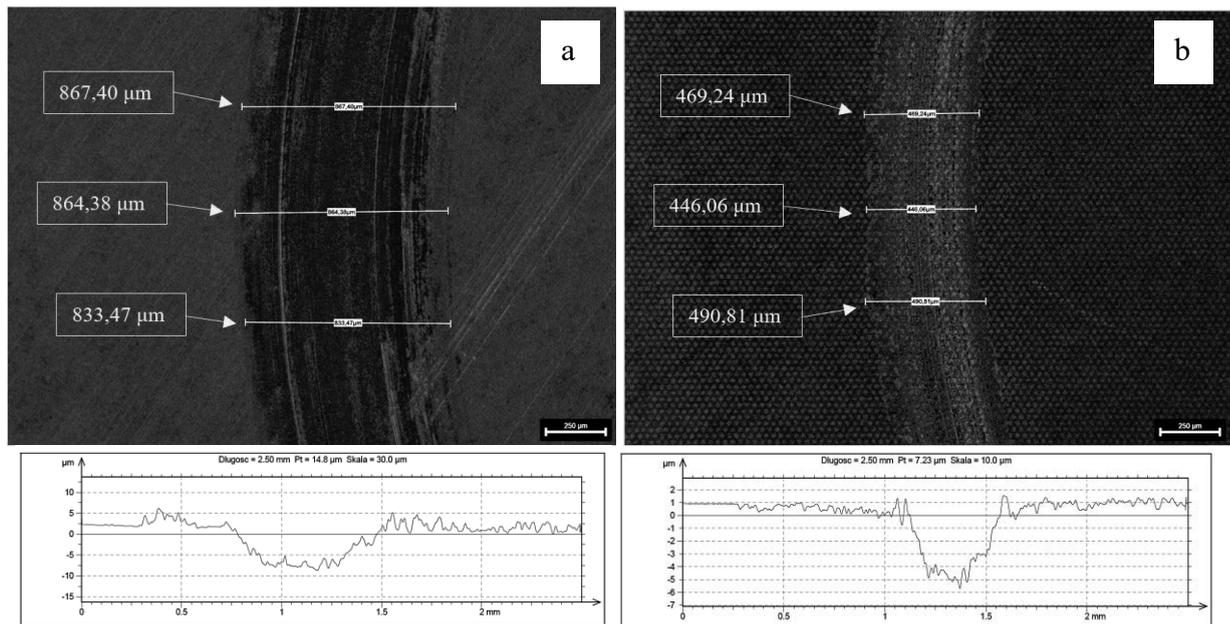
Rysunek 6. Ślady (pow. 200x) oraz profile wytarcia na powierzchni powłoki  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$  a) nieteksturowanej, b) teksturowanej

Figure 6. Wear tracks (mag. 200x) and wear profiles on the surface of  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$  coating a) non-textured, b) textured

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że średnia szerokość wytarcia na próbce nie poddanej teksturowaniu wynosi ok. 510  $\mu\text{m}$ . Zauważono, że podczas wykonywania badania metodą pin – on – disc, w miejscu styku przeciwpróbki z materiałem została całkowicie usunięta powłoka, a odsłonięte zostało podłoże z węglików H15X. Zmierzono również głębokość wytarcia wynoszącą 15  $\mu\text{m}$

Poddając badaniom próbkę teksturowaną zaobserwowano, że jej szerokość wytarcia jest znacznie niższa niż próbki nieobrobionej i wynosi średnio ok. 340  $\mu\text{m}$ . Identycznie jak w przypadku nieteksturowanej próbki uszkodzeniu w trakcie badań trybologicznych uległa powłoka. Określono również wartość głębokości wytarcia równą ok. 5  $\mu\text{m}$ .

Ślady wytarcia utworzone na ceramice sialonowej metodą pin – on – disc wraz z profilami wytarcia przedstawione zostały na rysunku 7.



Rysunek 7. Ślady (200x) oraz profile na powierzchni ceramiki sialonowej a) nieteksturowanej, b) teksturowanej

Figure 7. Wear tracks (mag. 200x) and wear profiles on the surface of sialon ceramics a) non-textured, b) textured

Na podstawie wykonanych badań stwierdzono, że ślady wytarcia powstałe na nieteksturowanej ceramice sialonowej mają bardzo niewyraźne granice, co wynikać może z dużej porowatości próbki, w tym również jej powierzchni. Wyznaczono także średnie wymiary wytarcia, takie jak szerokość i głębokość, równe odpowiednio 855  $\mu\text{m}$  i 10  $\mu\text{m}$ .

Obserwacjom poddano również ślady i profil wytarcia ceramiki sialonowej teksturowanej laserowo. Zauważono, że zmniejszyła się zarówno szerokość (470  $\mu\text{m}$ ) jak i głębokość (6  $\mu\text{m}$ ) wytarcia, a granice śladu wytarcia stały się wyraźne.

W tabelicy 5 przedstawiono pomiary szerokości wytarcia wraz z wartościami średnimi oraz odczytane z profilometru pola wytarcia i na podstawie tego wyliczone objętości wytarcia wszystkich badanych próbek.

Tablica 5. Pomiary szerokości śladów wytarcia powstałych w wyniku przeprowadzenia badania odporności na zużycie ściernie metodą pin – on – disc oraz wartości pola i objętości wytarcia uzyskane przy pomocy profilometru.

Table 5. Measurement of the width of the wear tracks resulting from the pin-on-disc wear resistance test and the values of the wear surface area and wear volume obtained with the use of a profilometer.

Próbka	Węgliki H15X	Węgliki H15X z teksturą	Węgliki H15X z powłoką Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiN	Węgliki H15X z powłoką Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiN i teksturą	Ceramika sialonowa	Ceramika sialonowa z teksturą
Średnia szerokość wytarcia [μm]	425,35	527,09	512,98	340,37	855,08	468,70
Pole wytarcia [μm <sup>2</sup> ]	5764	1741	7138	1945	5223	2100
Objętość wytarcia [mm <sup>3</sup> ]	0,45	0,14	0,56	0,15	0,41	0,16

W oparciu o dokonane badania trybologiczne stwierdzono, że w wyniku przeprowadzonej obróbki powierzchniowej, szerokość wytarcia na powierzchni próbki z węglików H15X z powłoką Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN oraz z ceramiki sialonowej uległa zmniejszeniu. Natomiast szerokość wytarcia na węglkach H15X zwiększyła się.

Na podstawie wyników badań wywnioskowano, że dla każdego materiału pole wytarcia uległo zmniejszeniu na skutek przeprowadzonego teksturowania laserowego (również dla próbki z węglików, dla której zwiększeniu uległa szerokość wytarcia). Największą zmianę o prawie 73% zaobserwowano dla węglików z nałożoną powłoką, a najmniejszą o ok. 60% dla ceramiki sialonowej. Stwierdzono także, że objętość zużycia każdej z próbek zmniejszyła się, dla ceramiki sialonowej ponad dwukrotnie, a dla węglików bez i z powłoką ponad trzykrotnie.

Z przeprowadzonych badań wynika, że teksturowanie laserowe badanych materiałów korzystnie wpłynęło na ich odporność na zużycie ściernie.

## 5. PODSUMOWANIE

W oparciu o przeprowadzone w pracy badania sformułowano następujące wnioski.

1. Skład chemiczny wszystkich poddanych analizie materiałów narzędziowych jest zgodny z danymi literaturowymi.
2. Struktura każdego materiału charakteryzuje się teksturą kropkową o uporządkowaniu dalekiego zasięgu. Tekstura na węglkach H15X oraz na powłoce Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN odznacza się dużą jednorodnością, natomiast tekstura wytworzona na ceramice sialonowej jest niejednorodna w wyniku dużej porowatości powierzchni materiału.
3. Twardość węglików H15X wyniosła 1559 HV a ceramiki sialonowej 1734 HV, co wskazuje na zasadność stosowania tych materiałów na narzędzia. Jeszcze wyższą twardością równą 2411 HV charakteryzuje się powłoka Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN, dzięki czemu z powodzeniem stosowana jest do pokrywania materiałów narzędziowych w celu polepszenia ich własności trybologicznych.

4. Teksturowanie laserowe wpłynęło na wzrost odporności na zużycie ściernie badanych materiałów narzędziowych. Objętość wytarcia w przypadku węglików H15X zmniejszyła się o prawie 70%, dla węglików H15X z powłoką o ponad 73%, natomiast dla ceramiki sialonowej o około 60%.

## **PODZIĘKOWANIA**

Autorzy pracy dziękują Dr P. Koźmín i Dr A. Čermák z firmy HOFMEISTER s.r.o, Pilsen, Czechy za wykonanie teksturowania laserowego.

## **LITERATURA**

1. T. Burakowski, W. Napadłęk, Rodzaje teksturowania laserowego w tribologii, *Tribologia* 4 (2010), 33-45.
2. T.L. See, *Laser surface texturing – fundamental study and applications*, Manchester 1824, Manchester, 2015.
3. J.K. Park, J.W. Yoon, M.Ch. Kang, S.H. Cho, Surface effects of hybrid vibration - assisted femtosecond laser system for micro - hole drilling of copper substrate, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 22(2012), 801-807.
4. M. Sedlacek, B. Podgornik, D. Cesnik, Influence of surface texturing sequence on fatigue life and tribological properties of coated tool steel, *Key Engineering Materials* 767(2018), 85-92.
5. D. Pakuła, M. Staszuk M. Dziekońska, P. Kozmin, A. Cermak, Laser micro – texturing of sintered tool materials surface, *Materials* 12(19):3152(2019), 1-11.
6. M. Staszuk, D. Pakuła, G. Chladek, M. Pawlyta, M. Pancielejko, P. Czaja, Investigation of the structure and properties of PVD coatings and ALD + PVD hybrid coatings deposited on sialon tool ceramics, *Vacuum* 154(2018), 272-284.
7. PN-88/H-89500 – Polska Norma, Węgliki spiekane. Gatunki.
8. [www.surftec.pl/powloki-pvd/oferta/tin/](http://www.surftec.pl/powloki-pvd/oferta/tin/) 2021.
9. L.A. Dobrzański, *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, Warszawa, 2002.

## Porównanie technologii prasowania i formowania wtryskowego proszku na przykładzie węgliku spiekanego

P. Malkusch<sup>a</sup>, N. Kos<sup>a</sup>, A. Pieczka<sup>a</sup>, W. Kurczak<sup>a</sup>, G. Matula<sup>b</sup>, K. Gołombek<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Studentka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych, email: paulmal043@student.polsl.pl; olka.pieczka@icloud.com; wiktur952@student.polsl.pl; natakos908@student.polsl.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych, email: grzegorz.matula@polsl.pl

<sup>c</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Laboratorium Badania Materiałów, email: klaudiusz.golombek@polsl.pl

**Streszczenie:** Celem badań było zastosowanie dwóch technologii formowania proszków: prasowania w matrycy oraz formowania wtryskowego proszku do wytwarzania materiałów narzędziowych opartych na węglkach spiekanych. W ramach badań dobrano odpowiednie proporcje węgliku K10 i innych materiałów oraz warunki wytwarzania gęstwy polimerowo-proszkowej, uformowanie jej w matrycach do formowania wtryskowego i opracowanie sposobu degradacji lepiszcza i spiekania. Tak wytworzone próbki poddano badaniom struktury i własności mechanicznych.

**Abstract:** The aim of the research was to apply two powder forming technologies: die pressing and powder injection moulding to produce carbide-based tool materials. The research involved selecting appropriate proportions of K10 carbide and other materials, as well as conditions for producing polymer-powder slurry, forming them in injection moulding and developing a method for binder degradation and sintering. The samples thus produced were subjected to structure and mechanical property tests.

**Słowa kluczowe:** metalurgia proszków, formowanie wtryskowe, węgliki spiekane

### 1. WSTĘP

Stały wzrost konsumpcji i zapotrzebowania na uniwersalne narzędzia potwierdza zasadność i aktualność prowadzenia badań związanych z wytwarzaniem materiałów narzędziowych ceramiczno-metalowych i wskazuje na atrakcyjność tej tematyki [1-7]. Jednym z nowoczesnych kierunków badań jest wykorzystanie techniki formowania wtryskowego w celu wytwarzania spiekanych materiałów narzędziowych. Techniki formowania i spiekania proszków, dają bardzo



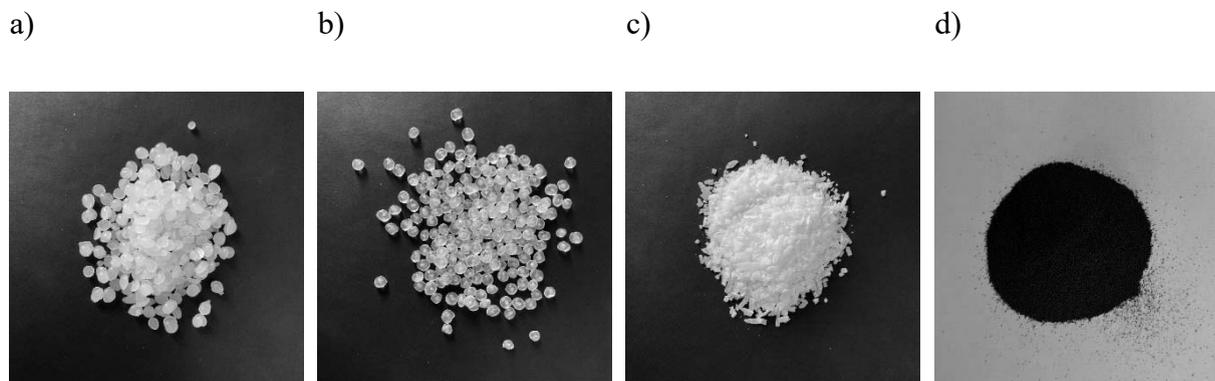
szerokie możliwości doboru składu chemicznego produkowanych kompozytów narzędziowych. Klasyczna metalurgia proszków, oparta na prasowaniu jednoosiowym i spiekaniu z ewentualnym izostatycznym dogęszczaniem w wysokiej temperaturze spiekania, nie pozwala na wytworzenie narzędzi o skomplikowanych kształtach. Dynamiczny rozwój technik formowania wtryskowego gęstwy polimerowo-proszkowej, umożliwia wytwarzanie stosunkowo niewielkich elementów o skomplikowanych kształtach i rozwiniętej powierzchni oraz pozwala na uzyskanie materiałów niewymagających obróbki plastycznej lub ubytkowej. Zastosowanie formowania proszków na bazie lepiszczy polimerowych, w szczególności formowania wtryskowego, stało się przedmiotem badań w wielu ośrodkach badawczo-naukowych i uniwersyteckich, co potwierdza zasadność stosowania formowania wtryskowego do wytwarzania materiałów narzędziowych w postaci np. nakładek na noże tokarskie [9-14]. Celem badań było zastosowanie dwóch technologii formowania proszków tj. prasowania w matrycy oraz formowania wtryskowego proszku do wytwarzania materiałów narzędziowych opartych na węglkach spiekanych.

## 2. MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

Celem badań było, określenie wpływu: zastosowania odpowiednich proporcji węgla K10 i innych materiałów (np. lepiszcza), różnych metod formowania proszków, a także warunków procesu (degradacji, spiekania) na strukturę oraz własności otrzymanych próbek. W celu wytworzenia próbek, zastosowano dwie metody formowania proszków, tj. prasowanie w matrycy oraz formowanie wtryskowe. Formowanie proszków, odgrywa kluczową rolę w całym procesie wytwarzania materiałów, metodą metalurgii proszków.

### 2.1. Materiał do badań

Do formowania, metodą prasowania w matrycy, użyto gotowego granulatu węgla K10, przedstawionego na rysunku 1d. Do formowania wtryskowego również zastosowano gotowy granulak węgla K10, lecz o zróżnicowanym udziale, który wynosił odpowiednio 62 oraz 64%. Oprócz gotowego granulatu węgla K10 zastosowano również parafinę (rys. 1a), polipropylen (rys. 1b) oraz kwas stearynowy (rys. 1c), którego udział również był zróżnicowany i wynosił: 2 oraz 6%.



Rysunek 1. Materiały do badań: a) parafina, b) polipropylen, c) kwas stearynowy, d) granulak węgla K10

Figure 1. Research materials: a) paraffin, b) polypropylene, c) stearic acid, d) K10 carbide granulate

## 2.2. Przygotowanie próbek prasowanych

Granulat proszku węgla K10 do prasowania w matrycy, odmierzono w pięciu porcjach. Odmierzoną porcję proszku wsypywano do matrycy (rys. 2a) o wymiarach  $\phi 11\text{mm}$ . Po umieszczeniu stempla górnego w matrycy, matrycę wraz z proszkiem umieszczono w prasie hydraulicznej (rys. 2b). Proszek zagęszczano pod ciśnieniem 535 MPa. Maksymalny czas nacisku stempla górnego na proszek, wynosił około 30 sekund. Po zakończeniu prasowania proszku, matrycę wyjęto z prasy. Po wyjęciu próbek z matrycy (rys. 3), wypraski przygotowane były do kolejnego etapu – spiekania.

a)



b)



Rysunek 2. a) Matryca do prasowania proszków, b) prasa hydrauliczna

Figure 2. a) powder pressing matrix, b) hydraulic press



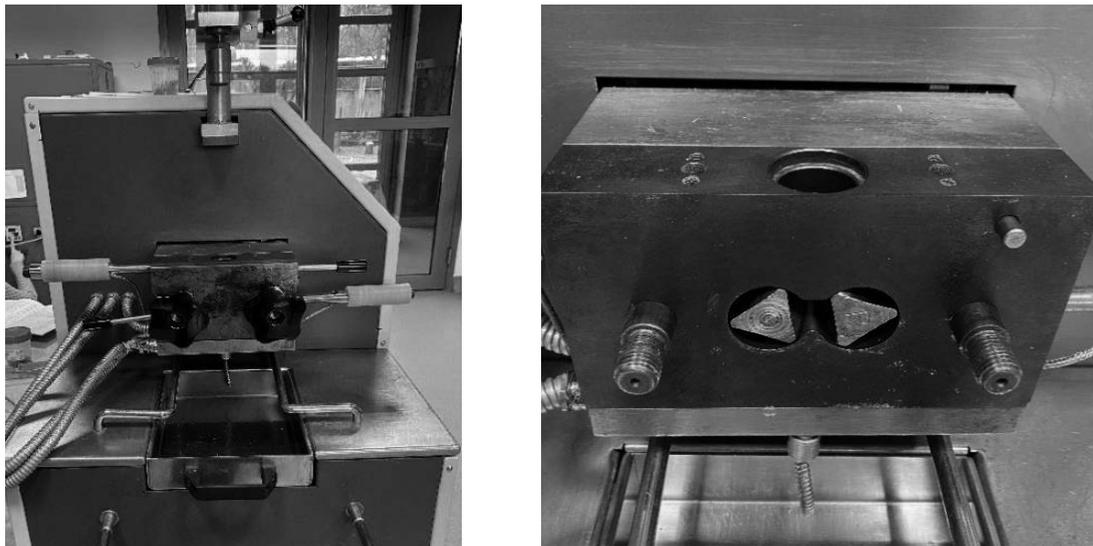
Rysunek 3. Próbkki formowane metodą prasowania w matrycy

Figure 3. Samples formed by pressing in a die

## 2.3. Przygotowanie próbek formowanych wtryskowo

W przypadku próbek formowanych wtryskowo, w pierwszej kolejności konieczne było wytworzenie mieszaniny polimerowo – proszkowej. Do przygotowania mieszaniny wykorzystano granulat proszku węgla K10, parafinę, polipropylen oraz kwas stearynowy. Każdy ze składników odpowiednio odważono. Kwas stearynowy dodawano w celu pokrycia węglików cienką warstwą, która poprawiała ich zwilżalność, w czasie mieszania z resztą

składników. Mieszaninę polimerowo proszkową wytwarzano w gniotowniku firmy Zamak Mercator (rys. 4), który posiada komorę o objętości 30 cm<sup>3</sup>.



Rysunek 4. Gniotownik firmy Zamak Mercator

Figure 4. Zamak Mercator crusher

Kolejnym etapem w procesie wytwarzania mieszaniny polimerowo – proszkowej, było uplastycznienie polipropylenu. Po uplastycznieniu polimeru, kolejnym krokiem było wsypanie granulatu proszku węgla K10, naprzemiennie z parafiną i kwasem stearynowym. Zасыpywanie w takiej kolejności, umożliwiło pokrywanie węglików, warstwą kwasu stearynowego. Mieszanie odbywało się w temperaturze 180°C, a ślimaki poruszały się z prędkością obrotową 20 obrotów/minutę. Zastosowany udział składników w mieszaninach przedstawiono w tablicach 1, 2 i 3.

Tablica 1. Poszczególne zawartości składników mieszaniny 64K10/2SA wykorzystanej do formowania wtryskowego

Table 1. Individual component contents of the 64K10/2SA mixture used for injection moulding

	<b>K10</b>	<b>PP</b>	<b>PW</b>	<b>SA</b>
<b>Gęstość [g/cm<sup>3</sup>]</b>	13,74	0,905	0,91	0,941
<b>Udział objętościowy [%]</b>	<b>64</b>	17	17	<b>2</b>
<b>Masa [g]</b>	263,808	4,616	4,641	0,565
<b>Masa całkowita [g]</b>	273,6291			

Tablica 2. Poszczególne zawartości składników mieszanki 62K10/2SA wykorzystanej do formowania wtryskowego

Table 2. Individual component contents of the 62K10/2SA mixture used for injection moulding

	<b>K10</b>	<b>PP</b>	<b>PW</b>	<b>SA</b>
<b>Gęstość [g/cm<sup>3</sup>]</b>	13,74	0,905	0,91	0,941
<b>Udział objętościowy [%]</b>	<b>62</b>	17	17	<b>2</b>
<b>Masa [g]</b>	255,564	4,616	4,641	0,565
<b>Masa całkowita [g]</b>	265,385			

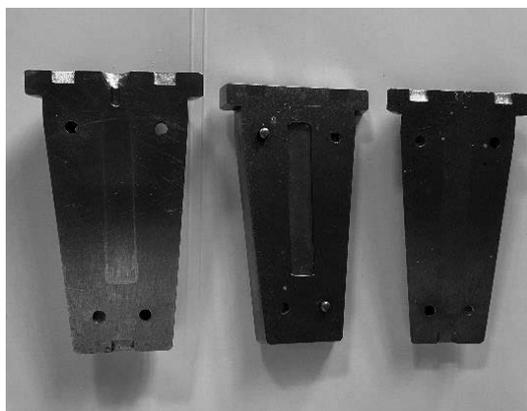
Tablica 3. Poszczególne zawartości składników mieszanki 64K10/6SA wykorzystanej do formowania wtryskowego

Table 3. Individual component contents of the 64K10/6SA mixture used for injection moulding

	<b>K10</b>	<b>PP</b>	<b>PW</b>	<b>SA</b>
<b>Gęstość [g/cm<sup>3</sup>]</b>	13,74	0,905	0,91	0,941
<b>Udział objętościowy [%]</b>	<b>64</b>	17	17	<b>6</b>
<b>Masa [g]</b>	263,808	4,616	4,641	1,694
<b>Masa całkowita [g]</b>	274,758			

Tak przygotowane mieszanki polimerowo – proszkowe, wykorzystano do formowania wtryskowego, które przeprowadzone zostało na wtryskarce firmy Zamak Mercator. W celu wytworzenia próbek, zastosowano matrycę, umożliwiającą formowanie próbek o długości 60, szerokości 10 i grubości 3mm (rys. 5a). Przyjęto następujące parametry wtrysku: czas wtrysku 3 sekundy, ciśnienie wtrysku 3 bar, temperatura wtrysku 180°C i temperatura formy 35°C. W wyniku formowania wtryskowego mieszanin polimerowo – proszkowych, wytworzono próbki, które przedstawia rysunek 5b.

a)



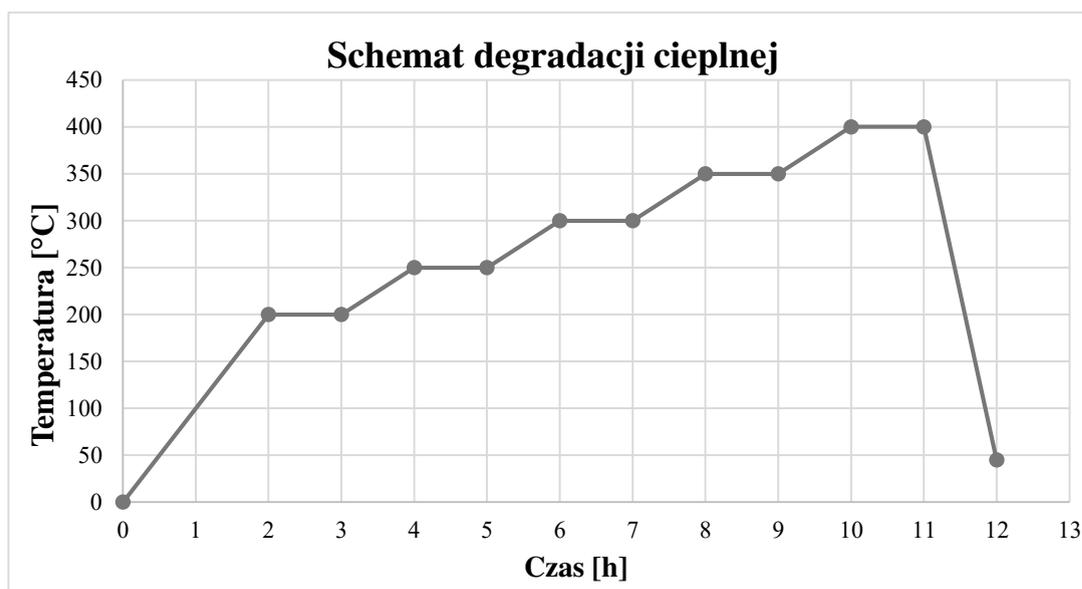
b)



Rysunek 5. a) Matryca do wytwarzania próbek, b) próbki wytworzone z procesie formowania wtryskowego

Figure 5. a) Sample production dies, b) samples made by the injection moulding process

Następnie próbki poddane zostały degradacji rozpuszczalnikowej w heptanie przez około 24 godziny. Degradację rozpuszczalnikową przeprowadzono w celu usunięcia jednego ze składników lepiszcza, przyczyniając się tym samym do otwarcia porów w całej objętości wypraski. Dzięki temu, możliwa jest znacznie szybsza degradacja cieplna, kolejnego składnika lepiszcza. Po degradacji rozpuszczalnikowej, próbki formowane wtryskowo, poddane zostały degradacji cieplnej w piecu firmy Czylok z przystankami izotermicznymi co 50°C od temperatury 200 do 450°C. Nagrzewanie z temperatury otoczenia do 200°C trwało dwie godziny, a wygrzewanie godzinę. Czas kolejnych etapów nagrzewania i wygrzewania wynosił godzinę. Po ostatnim wygrzewaniu w temperaturze 450°C próbki schłodzono przez godzinę do temperatury 45°C. Cykl degradacji cieplnej przedstawiono na rysunku 6.



Rysunek 6. Cykl degradacji cieplnej

Figure 6. Thermal degradation cycle

#### 2.4. Spiekanie próbek prasowanych i formowanych wtryskowo

Spiekanie zarówno próbek prasowanych, jak i formowanych wtryskowo wykonano w atmosferze argon – wodór. Próbkę spiekano w piecu rurowym firmy Czylok. W pierwszym etapie próbki nagrzewano w piecu do 200°C w ciągu godziny i wygrzewano w tej temperaturze przez godzinę. Następnie do określonej temperatury spiekania (wcześniej ustalonej) próbki nagrzewano przez dwie godziny, a kolejno wygrzewano w danej temperaturze przez pół godziny i chłodzono do 40°C w czasie dwóch godzin. Próbkę prasowaną spiekano w temperaturze 1300°C, 1320°C, 1340°C, 1360°C, 1380°C, natomiast spiekanie próbek formowanych wtryskowo odbywało się w temperaturze 1380°C, 1400°C oraz 1410°C.

#### 2.5. Metody badawcze

##### Pomiar gęstości

Badanie gęstości przeprowadzono metodą Archimedesusa. Pomiar wykonano na wadze analitycznej AS 110/C/2, która posiadała przystawkę, umożliwiającą pomiary zarówno na sucho, jak i na morko (z zanurzoną próbką w wodzie). Dla każdej próbki wykonano pomiary w powietrzu oraz w wodzie.

Z poniższego wzoru (1), wyznaczono gęstości próbek:

$$\rho = \frac{m_s}{m_s - m_w} \cdot \rho_{H_2O} \quad [g/cm^3] \quad (1)$$

gdzie:

$m_s$  – masa próbki na sucho [g],  
 $m_w$  – masa próbki w wodzie [g],  
 $\rho_{H_2O}$  – gęstość wody [ $g/cm^3$ ].

### Pomiar skurczu badanych materiałów

W celu pomiaru skurczu badanych próbek, przy pomocy suwmiarki zmierzono długości i szerokości spieków. Zależność opisującą zmianę wymiarów bądź objętości w porównaniu z objętością lub wymiarami przed spiekaniem, nazywamy skurczem materiału. Wyróżniamy skurcz liniowy, który określa zmniejszenie wymiarów materiału w wyznaczonym kierunku, który wyznacza się z poniższej zależności (2) [15]:

$$S_l = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

$S_l$  – skurcz liniowy [%],  
 $L_1$  – wymiary próbki przed spiekaniem [mm],  
 $L_2$  – wymiary próbki po spiekaniu [mm].

### Badanie wytrzymałości na zginanie

Pomiar statycznej wytrzymałości na zginanie wykonano z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej firmy Zwick/Roell Z020. Urządzenie wyposażono w przystawkę, która umożliwia trójpunktowe zginanie próbek. Naprężenie zginające badanych materiałów można obliczyć z (3) [16]:

$$\sigma_g = \frac{P \cdot l}{4 \cdot W_g} \quad (3)$$

gdzie:

$\sigma_g$  – naprężenie zginające [ $N/mm^2$ ],  
 $P$  – siła działająca na próbkę [N],  
 $l$  – odległość pomiędzy podporami [mm],  
 $W_g$  -wskaźnik przekroju prostokątnego [ $mm^3$ ].

Z poniższego wzoru (4), można obliczyć wskaźnik przekroju prostokątnego [16]:

$$W_g = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (4)$$

gdzie:

$b$  – szerokość próbki [mm],  
 $h$  – wysokość próbki [mm].

### Pomiar twardości

Pomiary twardości wykonano metodą Vickersa na urządzeniu firmy Future-Tech FM-700. Twardość mierzono przy obciążeniach 500 g. Wykonano po pięć pomiarów twardości dla każdej z próbek.

### Badania mikrostruktury

Obserwacje mikrostruktury próbek formowanych poprzez prasowanie oraz formowanie wtryskowe wykonano w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) SUPRA 35 firmy ZEISS, przy użyciu detekcji elektronów wstecznie rozproszonych (BSE, ang. Back Scattered Electrons) oraz elektronów wtórnych (SE, ang. Secondary Electrons). Dokonano również analizy składu chemicznego w wybranych mikroobszarach próbek z wykorzystaniem detektora EDS. Morfologie przełomów badanych próbek wykonano na mikroskopie stereoskopowym.

## 3. WYNIKI BADAŃ

### 3.1. Charakterystyka próbek wytworzonych do badań

W tabelicy 4 przedstawiono charakterystykę poszczególnych próbek wytworzonych do badań

Tablica 4. Charakterystyka próbek wytworzonych do badań

Table 4. Characteristics of samples prepared for testing

Material	Metoda formowania	Odparafinowanie/Degradacja	Temperatura spiekania
K10	Prasowanie w matrycy	Cieplne	1300°C
K10	Prasowanie w matrycy	Cieplne	1320°C
K10	Prasowanie w matrycy	Cieplne	1340°C
K10	Prasowanie w matrycy	Cieplne	1360°C
K10	Prasowanie w matrycy	Cieplne	1380°C
62K10/2SA	Formowanie wtryskowe	Rozpuszczalnikowa oraz cieplna	1400°C
64K10/6SA	Formowanie wtryskowe	Rozpuszczalnikowa oraz cieplna	1410°C
62K10/2SA	Formowanie wtryskowe	Rozpuszczalnikowa oraz cieplna	1410°C
64K10/2SA	Formowanie wtryskowe	Rozpuszczalnikowa oraz cieplna	1410°C
64K10/6SA	Formowanie wtryskowe	Rozpuszczalnikowa oraz cieplna	1380°C

### 3.2. Wyniki pomiaru gęstości

Tablica 5 przedstawia wyniki pomiaru gęstości próbek spiekanych. W tabelicy zawarto masę na sucho, na mokro oraz obliczoną gęstość badanych próbek.

Tablica 5. Wyniki pomiaru gęstości próbek spiekanych  
 Table 5. Density measurement results of sintered samples

Material	Masa na sucho	Masa na mokro	Gęstość
Prasowany węgiel K10 (spiekanie w 1300°C)	5,7956	5,3434	12,8165
Prasowany węgiel K10 (spiekanie w 1320°C)	5,8008	5,3485	12,8251
Prasowany węgiel K10 (spiekanie w 1340°C)	5,8443	5,4267	13,995
Prasowany węgiel K10 (spiekanie w 1360°C)	5,7803	5,3713	14,1328
Prasowany węgiel K10 (spiekanie w 1380°C)	5,7475	5,3593	14,806

### 3.3. Wyniki pomiarów skurczu materiałów

W tablicy 6 przedstawiono wyniki skurczu badanych materiałów. W celu pomiaru skurczu zmierzono szerokość próbek przed i po spiekaniu.

Tablica 6. Pomiar skurczu materiałów  
 Table 6. Measurement of material shrinkage

Material	Szerokość próbki przed spiekaniem [mm]	Szerokość próbki po spiekaniu [mm]	Skurcz materiału [%]
Prasowany węgiel K10 (spiekanie w 1300°C)	10,90	9,52	12,7
Prasowany węgiel K10 (spiekanie w 1320°C)		9,37	14,0
Prasowany węgiel K10 (spiekanie w 1340°C)		9,21	15,5
Prasowany węgiel K10 (spiekanie w 1360°C)		9,23	15,3
Prasowany węgiel K10 (spiekanie w 1380°C)		9,21	15,5
64K10/6SA (spiekanie w 1380°C)	10	7,98	20,2
62K10/2SA (spiekanie w 1400°C)		7,85	21,5
62K10/2SA (spiekanie w 1410°C)		7,82	21,8

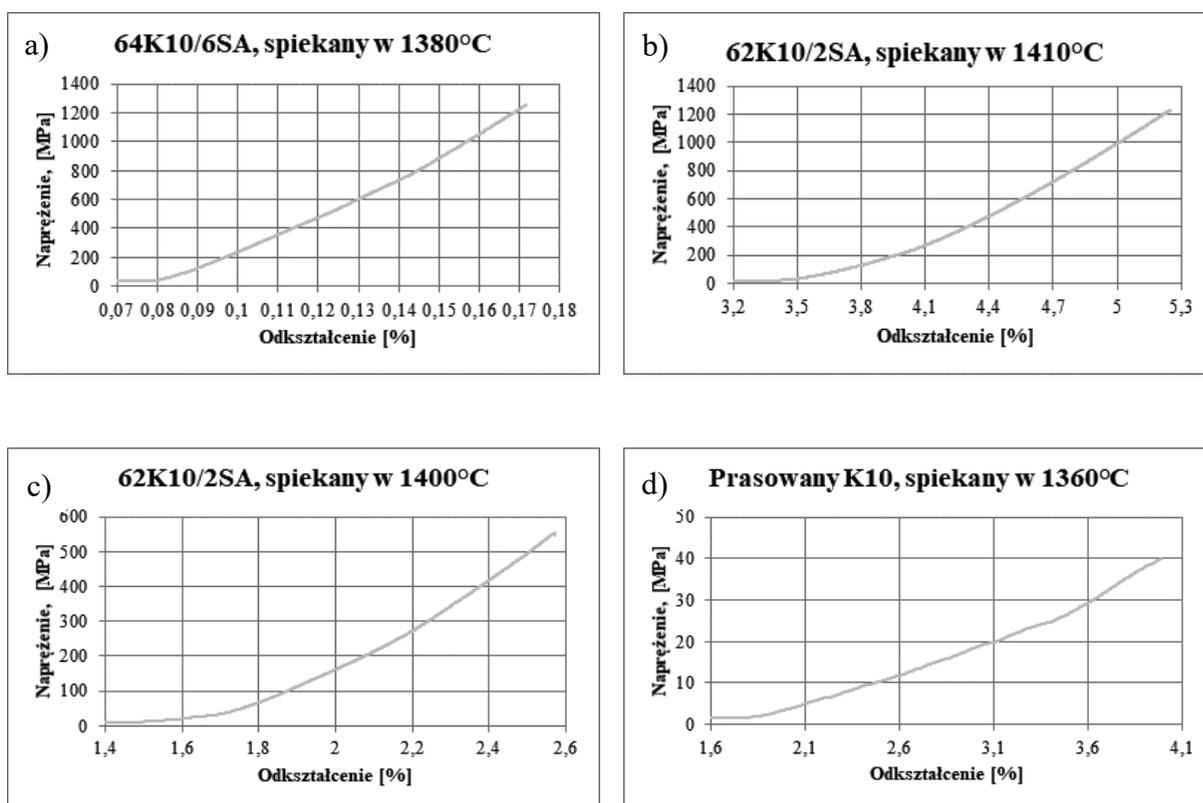
### 3.4. Wyniki badania wytrzymałości na zginanie

W tablicy 7 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na zginanie badanych materiałów, a na rysunkach 7 a – d przedstawiono wykresy zależności odkształcenia od naprężenia dla badanych próbek. Zdjęcia przełomów próbek po badaniu wytrzymałości na zginanie wykonano na mikroskopie stereoskopowym i przedstawiono na rysunku 8 a – d.



Tablica 7. Wyniki próby trójpunktowego zginania próbek  
 Table 7. Results of three-point bending flexure test of specimens

Material	Grubość [mm]	Szerokość [mm]	Wytrzymałość na zginanie [MPa]
64K10/6SA (spiekanie w 1380°C)	2,24	7,98	1254
62K10/2SA (spiekanie w 1410°C)	2,26	7,82	1228
62K10/2SA (spiekanie w 1400°C)	2,13	7,85	556
Prasowany węgiel K10 (spiekanie w 1360°C) - belka	4,72	9,39	40



Rysunek 7. Wykres zależności odkształcenia od naprężenia dla a) 64K10/6SA spiekanego w 1380°C, b) 62K10/2SA spiekanego w 1410°C, c) 62K10/2SA spiekanego w 1400°C, d) prasowanego węgla K10 spiekanego w 1360°C

Figure 7. Force-deformation diagram for a) 64K10 / 6SA sintered at 1380°C, b) 62K10/2SA sintered at 1410°C, c) 62K10/2SA sintered at 1400°C, d) pressed K10 carbide sintered at 1360°C

### 3.5. Wyniki pomiaru twardości

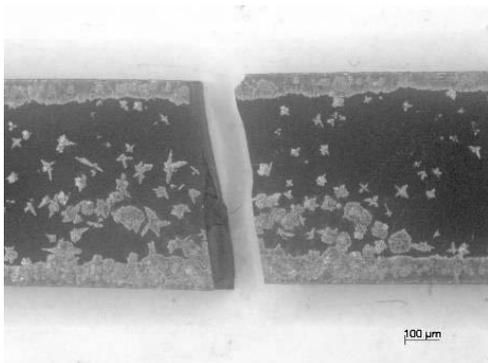
W tablicy 8 przedstawiono średnie wartości mikrotwardości badanych materiałów.

Tablica 8. Wyniki badań mikrotwardości

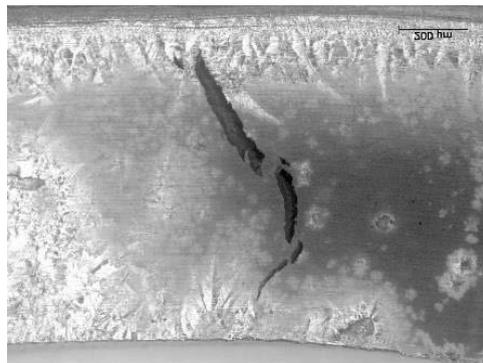
Table 8. Microhardness test results

Material	Twardość HV
Prasowany węgiel K10 (spiekanie w 1300°C)	368,6
Prasowany węgiel K10 (spiekanie w 1320°C)	468,7
Prasowany węgiel K10 (spiekanie w 1340°C)	953,9
Prasowany węgiel K10 (spiekanie w 1360°C)	1275,2
62K10/2SA (spiekanie w 1410°C)	1908,5
64K10/6SA (spiekanie w 1380°C)	1767,8

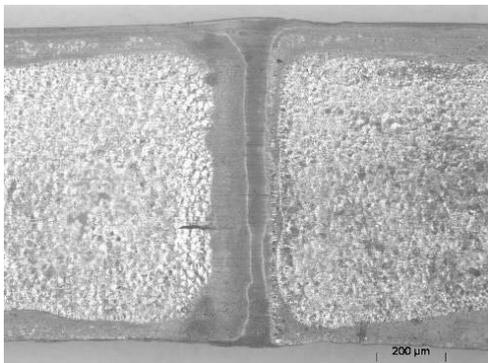
a)



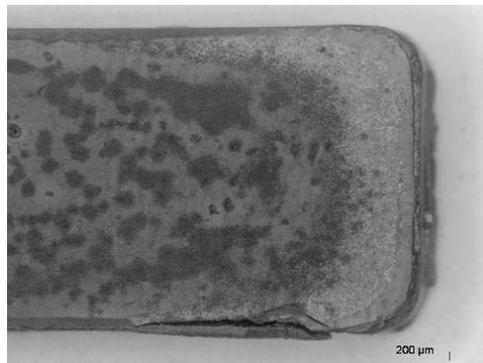
b)



c)



d)

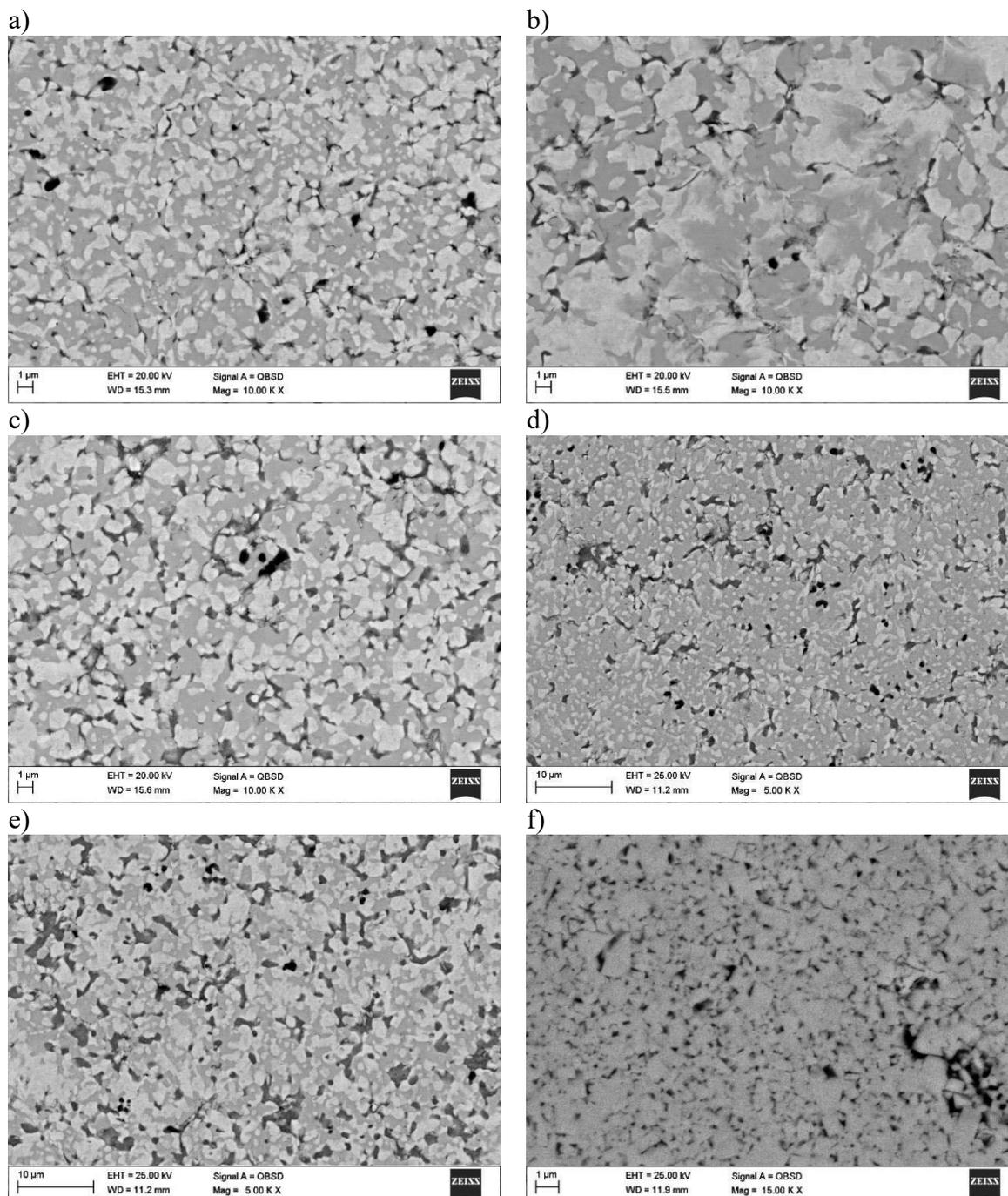


Rysunek 8. a) Powierzchnia próbki 62K10/2SA spiekanej w 1410°C, b) pęknięcia próbki 62K10/2SA spiekanej w 1410°C, c) defekty zaobserwowane w próbce 64K10/6SA spiekanej w 1410°C, d) pęknięcie w próbce 64K10/6SA spiekanej w 1380°C

Figure 8. a) Surface of sample 62K10/2SA sintered at 1410°C, b) cracks in sample 62K10/2SA sintered at 1410°C, c) defects observed in sample 64K10/6SA sintered at 1410°C, d) crack in sample 64K10/6SA sintered at 1380°C

### 3.6. Wyniki badań strukturalnych

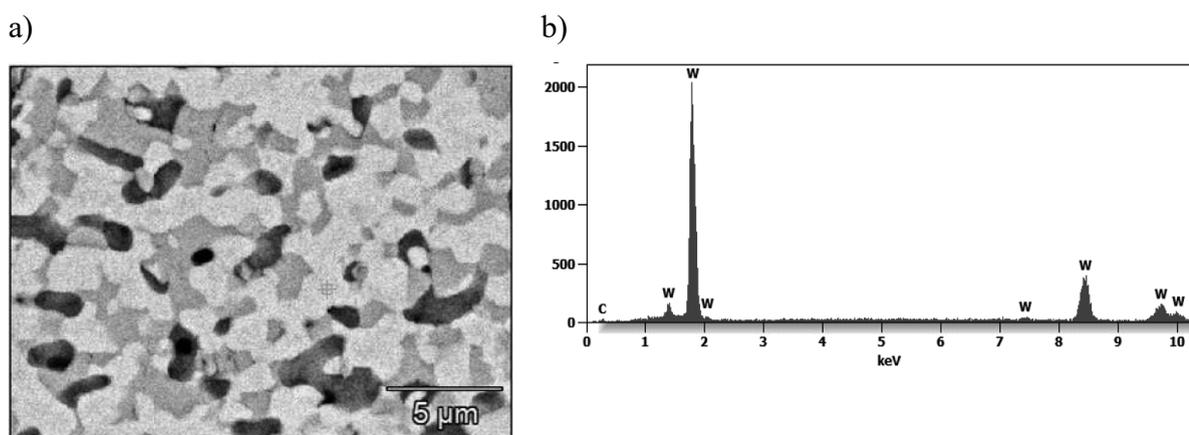
Na rysunkach 9 a – f przedstawiono mikrostruktury próbek formowanych poprzez prasowanie i oraz formowanych wtryskowo i spiekanych. Obserwacja mikrostruktury przeprowadzona była, przy użyciu detekcji elektronów wstecznie rozproszonych BSE,



Rysunek 9. Zdjęcia SEM a) Mikrostruktura próbki formowanej poprzez prasowanie matrycowe i spiekanej w temperaturze 1300°C, b) Mikrostruktura próbki formowanej poprzez prasowanie matrycowe i spiekanej w temperaturze 1320°C, c) Mikrostruktura próbki formowanej poprzez prasowanie matrycowe i spiekanej w temperaturze 1340°C, d) Mikrostruktura próbki formowanej poprzez prasowanie matrycowe i spiekanej w temperaturze 1360°C, e) Mikrostruktura próbki formowanej poprzez prasowanie matrycowe i spiekanej w temperaturze 1380°C, f) Mikrostruktura próbki 64K10/6SA formowanej wtryskowo i spiekanej w temperaturze 1380°C

Figure 9. SEM images a) The microstructure of the sample formed by matrix pressing and sintered at the temperature of 1300°C, b) The microstructure of the sample formed by matrix pressing and sintered at the temperature of 1320°C, c) The microstructure of the sample formed by matrix pressing and sintered at a temperature of 1340°C, d) Microstructure of a sample formed by matrix pressing and sintered at a temperature of 1360°C, e) Microstructure of a sample formed by matrix pressing and sintered at a temperature of 1380°C, f) Microstructure of the sample 64K10/6SA, injection molded and sintered at 1380°C

Analiza składu chemicznego wybranych mikroobszarów z wykorzystaniem detektora EDS, przedstawiona została na rysunkach 10 – 12, natomiast poszczególne udziały masowe i atomowe pierwiastków, w badanych obszarach zestawiono w tablicy 9 – 11.



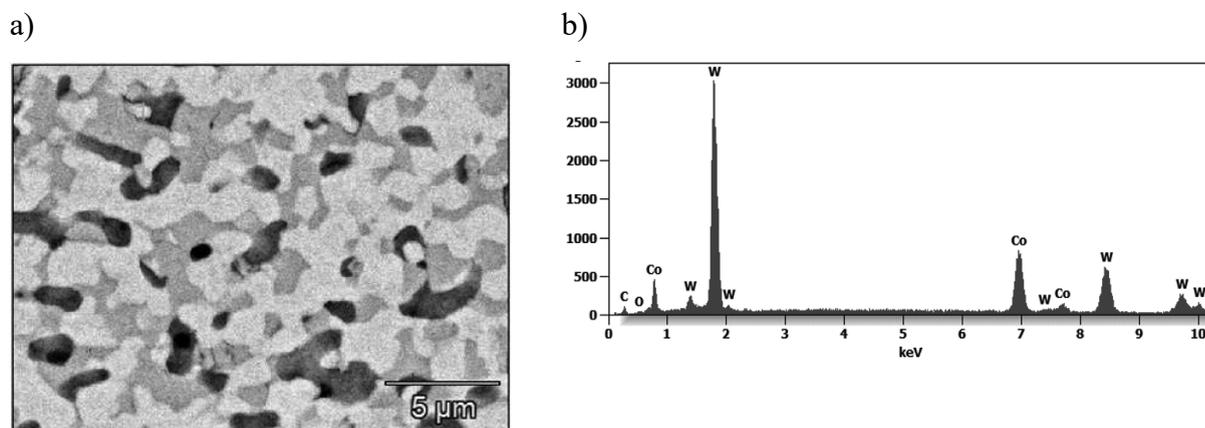
Rysunek 10. Widok: a) mikrostruktury badanego materiału, b) widmo analizy rentgenowskiej z zaznaczonego obszaru próbki formowanej poprzez prasowanie matrycowe i spiekanej w temperaturze 1380°C

Figure 10. View: a) microstructure of the tested material, b) X-ray analysis spectrum from the marked area of the sample formed by matrix pressing and sintered at 1380°C

Tablica 9. Udział masowy i atomowy pierwiastków struktury z rysunku 10

Table 9. Mass and atomic concentration of the elements of the structure from Figure 10

Pierwiastek	C	W
Udział masowy [%]	2,2	97,8
Udział atomowy [%]	25,9	74,1



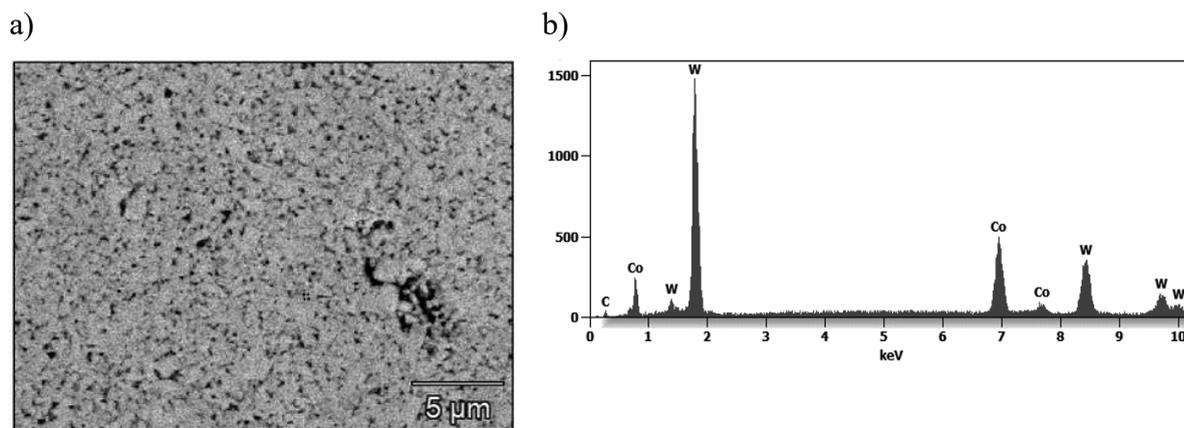
Rysunek 11. Widok: a) mikrostruktury badanego materiału, b) widmo analizy rentgenowskiej z zaznaczonego obszaru próbki formowanej poprzez prasowanie matrycowe i spiekanej w temperaturze 1380°C

Figure 11. View: a) microstructure of the tested material, b) X-ray analysis spectrum from the marked area of the sample formed by matrix pressing and sintered at 1380 °C

Tablica 10. Udział masowy i atomowy pierwiastków struktury z rysunku 11

Table 10. Mass and atomic concentration of the elements of the structure from Figure 11

Pierwiastek	C	O	Co	W
Udział masowy [%]	2,8	2,2	23,0	72,1
Udział atomowy [%]	20,0	12,1	33,9	34,1



Rysunek 12. Widok: a) mikrostruktury badanego materiału, b) widma analizy rentgenowskiej z zaznaczonego obszaru próbki 64K10/6SA formowanej wtryskowo i spiekanej w temperaturze 1380°C

Figure 12. View: a) microstructure of the tested material, b) X-ray analysis spectrum from the marked area of the 64K10 / 6SA sample, injection moulded and sintered at 1380°C

Tablica 11. Udział masowy i atomowy pierwiastków struktury z rysunku 12

Table 11. Mass and atomic concentration of the elements of the structure from Figure 12

Pierwiastek	C	Co	W
Udział masowy [%]	1,3	24,5	74,2
Udział atomowy [%]	11,9	44,7	43,4

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań, określono własności próbek wytworzonych dwiema metodami formowania, tj. poprzez prasowanie oraz formowanie wtryskowe. Dodatkowo, w przypadku próbek formowanych wtryskowo, ilość składników proszku węgla K10 oraz kwasu stearynowego, które wykorzystane były do przygotowania mieszaniny polimerowo – proszkowej, była zróżnicowana. W procesie wytwarzania próbek do badań, istotne było odpowiednie dobranie warunków prasowania, wytłaczania, formowania, degradacji lepiszcza oraz spiekania, które bezpośrednio miały oddziaływanie na jakość wytwarzanych próbek do badań.

Na podstawie przeprowadzonych badań pomiaru gęstości prasowanych próbek spiekanych, można stwierdzić, że wraz ze wzrostem temperatury spiekania, wzrasta równocześnie gęstość badanych materiałów (tab. 5). Największą gęstością, cechował się prasowany węgiel K10 spiekany w temperaturze 1380°C, którego wartość wyniosła 14,806 g/cm<sup>3</sup>. Natomiast najniższą gęstością odznacza się prasowany węgiel K10 spiekany w temperaturze 1300°C.

Najwyższymi wartościami wytrzymałości na zginanie, charakteryzowały się próbki formowane wtryskowo: 64K10/6SA spiekana w temperaturze 1380°C, której wartość wytrzymałości wynosi 1254 MPa oraz 62K10/2SA spiekana w temperaturze 1410°C, której wytrzymałość wynosi 1228 MPa (tab. 7). Wyższą wytrzymałością na zginanie odznaczała się, próbka spiekana w niższej temperaturze 1380°C, w porównaniu z próbką spiekaną w temperaturze 1410°C. Może się to wiązać z większym rozrostem ziaren w wyższej temperaturze, co bezpośrednio ma wpływ na zmniejszenie się własności wytrzymałościowych materiałów.

W przypadku próbki formowanej wtryskowo 62K10/2SA, spiekanej w temperaturze 1400°C, wartość wytrzymałości znacząco spadła i wynosi odpowiednio 556 MPa, prasowanego węgla K10, spiekanego w temperaturze 1360°C, poddana wytrzymałości na zginanie, osiągnęła wartość na poziomie, zaledwie 40 MPa. Spadek wartości wytrzymałości na zginanie badanych próbek, może wiązać się z defektami oraz pęknięciami w strukturze, które zaobserwowano na rysunkach 8 b-d. Takie wady, spowodowane mogły być, poprzez nieodpowiednie dobranie parametrów degradacji i/lub spiekania badanych materiałów. Na rysunkach 7 a-d przedstawiono poszczególne wykresy zależności odkształcenia od naprężenia, dla każdej z próbek, poddanej badaniu wytrzymałości na zginanie.

Na podstawie badań skurczu materiałów (tab. 6) stwierdzono, że większym skurczem odznaczają się próbki formowane wtryskowo. Największym skurczem odznaczyła się próbka 62K10/2SA spiekana w temperaturze 1410°C, który wynosi 21,8%. Najniższy skurcz zarejestrowano dla próbki prasowanego węgla K10, spiekanego w temperaturze 1300°C, który wynosi 12,7%. Próbki formowane wtryskowo odznaczają się większym skurczem w porównaniu do próbek prasowanych, ze względu na to, że materiały te posiadają odpowiednią ilość lepiszcza, którego nie stosowano w próbkach prasowanych.

W oparciu o przeprowadzone badania mikrotwardości spieków, można stwierdzić, że znacznie wyższą twardością odznaczają się próbki formowane wtryskowo. Zarówno w przypadku próbek prasowanych, ale również w przypadku próbek formowanych wtryskowo (tab. 8), wraz ze wzrostem temperatury spiekania, wzrasta również twardość badanych materiałów. Najwyższą twardością w przypadku próbek prasowanych, odznacza się węgiel K10 spiekany w temperaturze 1360°C, którego twardość wynosi 1275 HV, najniższą natomiast odznacza się węgiel K10 spiekany w temperaturze 1300°C, jego twardość wynosi 368 HV. W przypadku próbek formowanych wtryskowo, najwyższą twardością odznacza się próbka 62K10/2SA, spiekana w temperaturze 1410°C, jej wartość wynosi 1908 HV.

Rysunki 9 a-e przedstawiają strukturę próbek formowanych poprzez prasowanie w matrycy i spiekanych w różnej temperaturze. Zaobserwowano występowanie w strukturze badanych materiałów kilka obszarów o różnej morfologii i zmiennej zawartości pierwiastków wchodzących w skład węgla (obrazowanie z wykorzystaniem techniki BSE). Przeprowadzona analiza składu chemicznego w zaznaczonych obszarach (rysunek 10-11) węgla K10 prasowanego i spiekanego w temperaturze 1360°C, wykazała obecność typowych pierwiastków wchodzących w skład węglików spiekanych (tablica 9-10) tj. W, C i Co. W obszarach o ciemnym zabarwieniu stwierdzono ponadto występowanie tlenu, co świadczy o utlenieniu stref bogatych w kobalt. Na rysunku 12 przedstawiono strukturę próbki 64K10/6SA formowanej wtryskowo i spiekanej w temperaturze 1380°C. Próbka ta, charakteryzuje się bardziej jednorodną strukturą.

Na podstawie przeprowadzonych badań, bardziej korzystne własności obserwuje się dla próbek wytworzonych metodą formowania wtryskowego. Odpowiedni dobór składników do wytworzenia mieszaniny polimerowo – proszkowej, ma bezpośredni pozytywny wpływ na otrzymanie litych próbek tą metodą. Przy zastosowaniu tej technologii możliwa jest ciągła kontrola poszczególnych parametrów, na każdym z etapów produkcji. Możliwe jest również wytwarzanie materiałów np. o skomplikowanych kształtach. Często, w końcowym etapie produkcji, pomija się obróbkę wykańczającą, co bezpośrednio przekłada się na skrócenie czasu wytwarzania produktów tą technologią.

Badania potwierdziły, że materiał 64K10/6SA spiekany w temperaturze 1380°C, cechujący się najlepszą wytrzymałością na zginanie, jest najbardziej odpowiedni do zastosowania go w przypadku narzędzi eksploatowanych np. podczas toczenia czy frezowania, ponieważ narzędzia te powinny odznaczać się wysokimi własnościami mechanicznymi. Materiał 62K10/2SA spiekany w temperaturze 1410°C odznacza się najwyższą twardością.

Zgodnie z przeprowadzonymi badaniami, w oparciu o otrzymane wyniki badań, można wyciągnąć następujące wnioski:

- Gęstość materiałów prasowanych i spiekanych w różnej temperaturze zwiększa się, wraz ze wzrostem temperatury spiekania.
- Zastosowanie wyższej zawartości udziału zarówno proszku K10, ale także kwasu stearynowego, ma bezpośredni wpływ na zwiększenie własności wytrzymałościowych, węglików formowanych wtryskowo. Bezpośrednie oddziaływanie ma także dobór odpowiedni parametrów podczas degradacji lepiszcza i spiekania. Próbki prasowane odznaczają się niską wytrzymałością na zginanie.
- Próbki formowane wtryskowo cechują się, znacznie wyższym skurczem materiału, w głównej mierze poprzez zastosowanie lepiszcza, które nie jest stosowane w przypadku próbek prasowanych.
- Twardość próbek, zarówno prasowanych, ale także formowanych wtryskowo, zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury spiekania.

Uwagi ogólne: Publikacja powstała dzięki realizacji projektu finansowanego w ramach programu „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza” (konkurs II) pt. „Zastosowanie technologii formowania wtryskowego proszku do wytwarzania gotowych narzędzi w postaci płytek węglkowych” w ramach działań Studenckiego Koła Naukowego Inżynierii Powierzchni „Azotki” działającego przy Laboratorium Badania Materiałów na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

## LITERATURA

1. Biało D., Wytwarzanie kompozytów w procesach metalurgii proszków, *Kompozyty* 1, 2001 89-92.
2. Cyunczyk A., *Podstawy inżynierii spieków metalowych*, Rzeszów, 2000.
3. Dobrzański L.A., G. Matula, *Podstawy metalurgii proszków i materiały spiekane*, Open Access Library, Volume 8, 2012.
4. Dobrzański L.A., *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, WNT, Warszawa, 2002.
5. Nowacki J., *Spiekane metale i kompozyty z osnową metaliczną*, WNT, Warszawa, 2005.
6. Pater Z., *Podstawy metalurgii i odlewnictwa*, Politechnika Lubelska, Lublin, 2014.
7. Wysiecki M., *Nowoczesne materiały narzędziowe*, WNT, Warszawa, 1997.
8. Biało D., Skalski A., Paszkowski L., *Specyfikacja procesu formowania wtryskowego mikroelementów z proszków metali*, *Rudy i Metale Nieżelazne* 4, 2008, s. 241-245.
9. Czechowski J., *Stan obecny i perspektywy formowania wtryskowego ceramiki*, *Materiały Ogniotrwałe* 41, 1989, s. 122-125.
10. Dobrzański L.A., Matula G., Gołombek K., *Struktura i własności mechanicznie spiekanej stali szybko tnącej M2 i T15 wytwarzanej metodą formowania wtryskowego proszku*, *Proceeding of the International Conference „Materials, Mechanical and Manufacturing Engineering” M2E’2000*, 2000, Gliwice, s. 79-83.
11. Matula G., *Gradientowe warstwy powierzchniowe z węglkostali narzędziowych formowane bezciśnieniowo i spiekane*, Open Access Library, Volume 7, 2012.
12. Petzoldt F., *Metal injection moulding in Europe: ten facts that you need to know*, *Powder Injection Moulding International* 1/2, 2007, s. 23-28.
13. Piszczek T., *Formowanie wtryskowe proszków metali*, *Metalurgia Proszków* 1, 1991, s. 9-12.
14. Zbiński P., *Wtryskiwanie proszków metalowych i ceramicznych*, "Projektowanie i konstrukcje inżynierskie", 2021, nr 3/4, s. 18 – 30.
15. Jachowicz T., Godlewska A., *Skurcz przetwórczy wyprasek wtryskowych napełnionych włóknem szklanym*, *Postępy Nauki i Techniki*, Lublin, 2011.
16. Dobrzański L. A., *Metody badań metali i stopów. Badania własności fizycznych*, WNT, Warszawa, 1987.



## Investigation of product manufacturing by recycling from cable waste cross linked polyethylene

C. Meran<sup>1</sup>, Ö. Eren<sup>2</sup>, M. Ergin<sup>3</sup>, K. Erdoğan<sup>3</sup>, G. Akgül<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Prof.Dr., 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

The use of cables is increasing in the world, and in our country. It is aimed to obtain composite materials using epoxy as matrix material from cross-linked polyethylene, which produces tons of waste every year. In this context, it is aimed to evaluate the cable wastes that are thought to be recycled.

Waste cross-linked polyethylene cables were crushed in the crushing machine to obtain granules of approximately 5 mm. By keeping the parameters such as temperature, waiting time, epoxy amount and compression value constant, different granule amounts (250 g, 500 g, 750 g, 1000 g, 1500 g) were mixed with 150 g epoxy and poured into the molds.

The sample, which is 500 g of granules, is covered with glass fiber. 150 g of epoxy resin was impregnated on the glass fiber-coated sample, placed between the bags, and kept in a press at 60 °C for 1 day. The samples that reached the desired hardness value were cut to the specified dimensions and subjected to tensile test, thermal thermal conductivity and bending tests. As a result of the tests, polyester + epoxy mixture showed the best performance.

**Keywords:** Cross-linked polyethylene, XLPE, thermoset, recycling, composite.

## 1. INTRODUCTION

The aim of this study is to ensure the recycling of cables, which find use in almost every sector, after completing their life. The composite samples will be obtained by using epoxy and polyester resins as matrix materials, cable waste cross-linked polyethylene belonging to the thermoset arm of plastics as reinforcement material. The aim of study that obtain a new product by using cable waste plastics.

Tamboli et al. (2004) investigated the cross-linking of polyethylene and polypropylene. They realized that the crosslinking of polyethylene and polypropylene could be used in very interesting industrial applications. It has been determined that the strength and thermal properties of cross-linked polyethylene are better than standard polyethylene. Meran et al.

(2014) mixed the cross-linked polyethylene (XPE) foam wastes into the concrete mixture at different percentages and kept it for 7, 14 and 28-day cures. Najafgharehtapeh et al. (2017) investigated the effect of ambient temperature on electrofusion welded joints of polyethylene pipes used in natural gas and water distribution lines, and it was found that the strength of PE100 pipes joined at different ambient temperatures decreases with decreasing ambient temperature. Bedekovic et al. (2020), in their study on the electrostatic separation of aluminum from the recycling process residues; It was found that the location of the separator has a great effect on both the grade of the concentrate and the recovery, and the tumble speed itself and the interaction of the separator position and tumble speed also have a significant effect on the grade of the concentrate. Grimaud et al. (2018) focused on the determination and reduction of environmental impacts while recycling aluminum cables and benefited from the Life Cycle Assessment method. Studies have confirmed the great environmental benefits of recycled aluminum compared to primary aluminum. Li et al.(2021) used grafted UV absorbers as voltage stabilizers against degradation for high voltage cable insulation. In addition, voltage stabilizers, which are widely used to increase resistance to electrical afforestation degradation and degradation of cross-linked polyethylene (XLPE) insulation materials, are discussed. It has been observed that the effect of voltage stabilizers is significantly temperature dependent, the ability to increase the electric tree starting voltage weakens under high temperature, while the ability to inhibit the propagation of electric trees becomes stronger. Qudaih et al.(2011), in their study, mixed cross-linked polyethylene waste with pure LDPE in the extruder. They noticed that Si-XLPE infused into pure LDPE decreased the melting point due to increased waste. Finally, they concluded that at 15% mixing fraction, the results were: 17% increase in modulus of elasticity, 37.2% increase in yield stress, 22.4% increase in maximum tensile strength.

## 2. PLASTIC AND COMPOSITE MATERIALS

Plastics are materials that have been converted into a long chain structure called polymers, which are formed by combining monomers with covalent bonds. Thermoplastic is a general term used for polymers that can be reshaped by melting under the influence of heat. Due to their cross-linked nature, they cannot be melted with heat and decompose when heated to sufficiently high temperatures. XLPE cable, which is one of the medium voltage cables, means cross-linked polyethylene cable. The structure of the XLPE cable is highly resistant to wear and tear, and its insulation is compatible with high and low temperatures. Composite materials are a group of materials that are formed by combining at least two different materials for a specific purpose. The purpose of this assembly is to achieve a feature that is not present in the components. In other words, it is aimed to produce a material with superior properties from the components in the desired direction.

Epoxy resins are the most used flooring material recently. Epoxy resin, which provides an extraordinary resistance against external effects such as temperature, physical and chemical deformations, and humidity, is actually a long-lasting compound added to the substance called epoxy and further increasing the adhesion. The advantages of polyester resin can be listed as follows: Low viscosity, low cost, good environmental resistance, which allows the moisture of the reinforcements to be easily discharged. The disadvantages can be listed as follows: The high exothermic reaction during curing causes poor fiber/matrix bond strength, the system is prone to embrittlement.

### 3. MATERIAL AND METHODS

The composite material was obtained by combining cross-linked polyethylene cable wastes with resin to recycle. It is explained how these obtained materials are produced, and then the test methods applied to these materials are explained respectively.

Cables were broken with Zerre S 110V in Inan Machine. The broken cables have become granules. The whole state of the cable is shown in Figure 1a and the granular state of the cable is shown in Figure 1b.



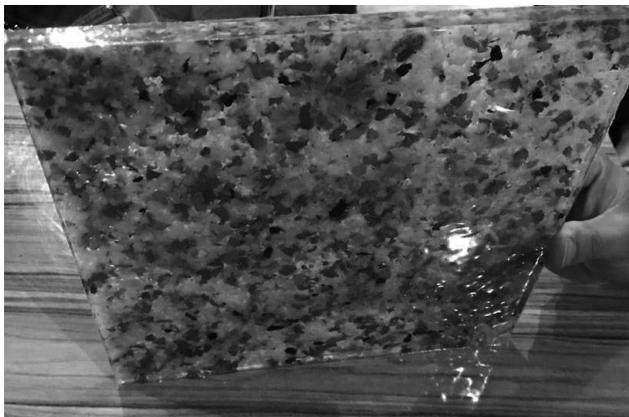
a) XLPE cables



b) XLPE granular

Figure 1: The view of XLPE wastes

Two chipboard molds with dimensions of 280 mm x 280 mm were prepared. 150 g epoxy 2/1 ratio (100 g epoxy, 50 g hardener) was mixed on the bottom layer of the first of the prepared molds and poured into the mold. It was waited in the sun for 2 hours for the poured resin to cure. Then, 125 g of XLPE granules and 150 g of epoxy were mixed and poured on it. After waiting under the sun for 2 more hours, 150 g of epoxy was poured on the last layer. This process was taken out of the mold after waiting for 2 days. It is shown in **Figure 2**.



a) Pure epoxy sample



b) Polyester + epoxy sample

Figure 2: The view of prepared samples used epoxy

150 g polyester, 1.5 g accelerator and 3 g hardener were weighed and mixed in the other mold prepared. This prepared admixture was poured into the mold. Since the curing time of the polyester resin is long, it was kept in the mold for 3 days. Then 125 g of XLPE granules were mixed with 150 g of epoxy and 40 g of calcite and poured. Then, 150 g of epoxy was poured on the top layer at a ratio of 2/1 (100 g epoxy, 50 g hardener). This process was removed from the mold after waiting for 5 days. It is shown in Figure 2. The obtained samples were prepared for tensile and bending tests by cutting three samples from each plate in the dimensions of 6 mm x 6 mm x 25 mm.

500 g of cable waste crushed in Inan Machine, Zerre S 110V machine in Nexans company was taken and 150 g epoxy was mixed in the ratio of 2/1 (100 g epoxy, 50 g hardener). Then, this mixture was pressed at 140 bar pressure and 60 °C in the Marestek 711123 machine in Nexans Denizli company. After waiting for 2 hours in the press, it was taken out of the mold. In order to reduce the curing time, it was kept in the SFL Advanced High Temperature & Environmental Systems oven in Pamukkale University Engineering Faculty Composite Materials Laboratory for 2 days at 35 °C. It is shown in Figure 3.

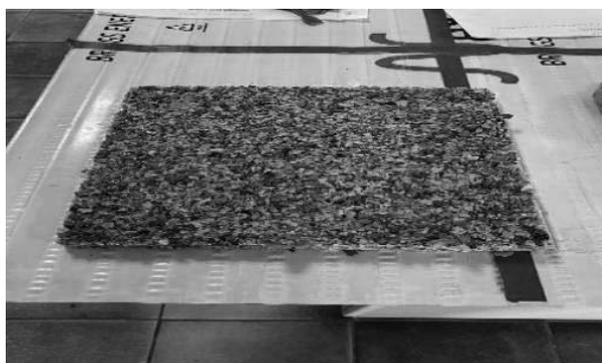


Figure 3: The view of prepared 500 g XLPE

By changing the amount of granules used and keeping other parameters constant, the experiment was carried out with granule weights of 250 g, 500 g, 750 g, 1000 g and 1500 g. The Parameters of the experiments performed are given in Table 3.1.

Table 3.1 Experimental parameters

<b>XLPE Granule Weight (g)</b>	<b>Standby Time In The Press (hour)</b>	<b>Compressive Temperature In The Press (°C)</b>	<b>Quantity Of Epoxy A (g)</b>	<b>Quantity Of Hardener (g)</b>
250	2	60	100	50
500	2	60	100	50
750	2	60	100	50
1000	2	60	100	50
1500	2	25	100	50

The best 500 g sample was taken from the prepared samples. Later, Triaxial Metyx fiberglass was supplied. This supplied glass fiber was wrapped in a 500 g sample, which is the best

sample in which the granules remained together without dispersion, three layers below and three layers above. During the coating process, a total of 300 g of epoxy resin was used, 150 g of epoxy resin each on the lower layer and the upper layer. Then it was put into a hot press set at 60 °C and kept in the press for one day.

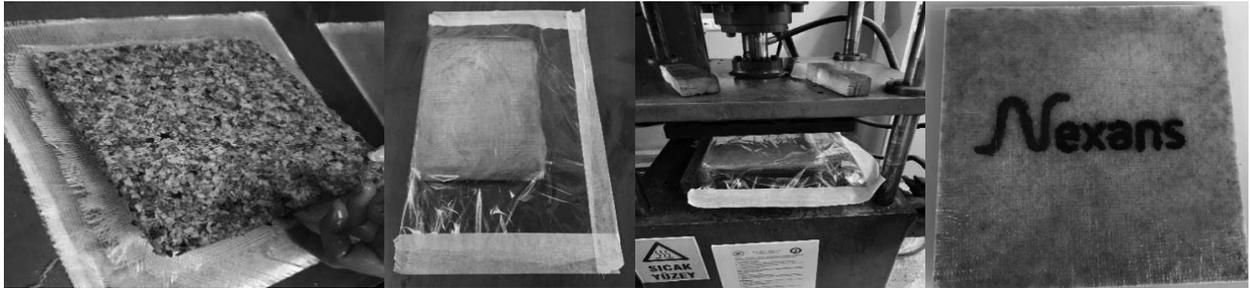


Figure 4: Preparation process of glass fiber coated sample

The curing time of the pure epoxy resin is two hours, but it is considered appropriate to wait for one day for better mechanical properties of the plate. The application process is shown in Figure 4.

#### 4. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, tensile and bending tests were performed on XLPE reinforced composite materials according to ASTM standards. Tensile tests were carried out at 1 mm/min speed according to ASTM D3039 / D3039M – 14 standard, tensile test was applied to 3 cut samples and average values were calculated. The obtained tensile test results are given in Figure 5. As a result of the experiments, it was observed that the mechanical properties of the polyester + epoxy mixture gave better results than the pure epoxy mixture, because the sample obtained in the polyester + epoxy mixture has a more homogeneous structure. In addition, it was observed that calcite, which is not present in the pure epoxy mixture, has a positive effect on the values of the sample.

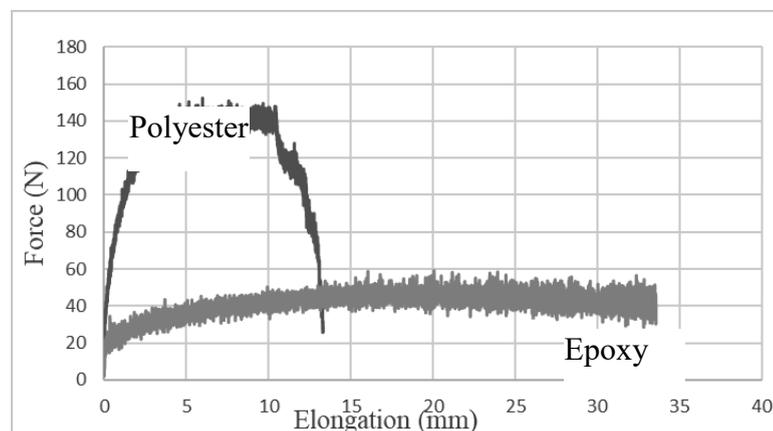


Figure 5: Tensile test results of pure epoxy mixture, and polyester + epoxy mixture sample.

As can be seen in Figure 5, the pure epoxy mixture started with approximately 20 N and reached a maximum value of 56 N after following a wavy curve increasing continuously. As

can be seen from the graph, precise measurement could not be made with the device because the curve obtained is far above the curve fluctuations that should be. In this context, it was deduced that the data obtained as a result of the experiment were not close to the truth. As can be seen in Figure 5, the polyester + epoxy mixture started with approximately 20 N and reached a maximum value of 150 N after following a wavy curve, increasing continuously. As can be seen in Figure 5, pure epoxy mixture and polyester + epoxy mixture are shown on the same graph and compared. Compared to the elongation parameter, pure epoxy mixture has a more ductile structure, while polyester + epoxy mixture has a more brittle structure. When viewed from the strength parameter, it is seen that the polyester + epoxy mixture carries about three times more load than the pure epoxy mixture.

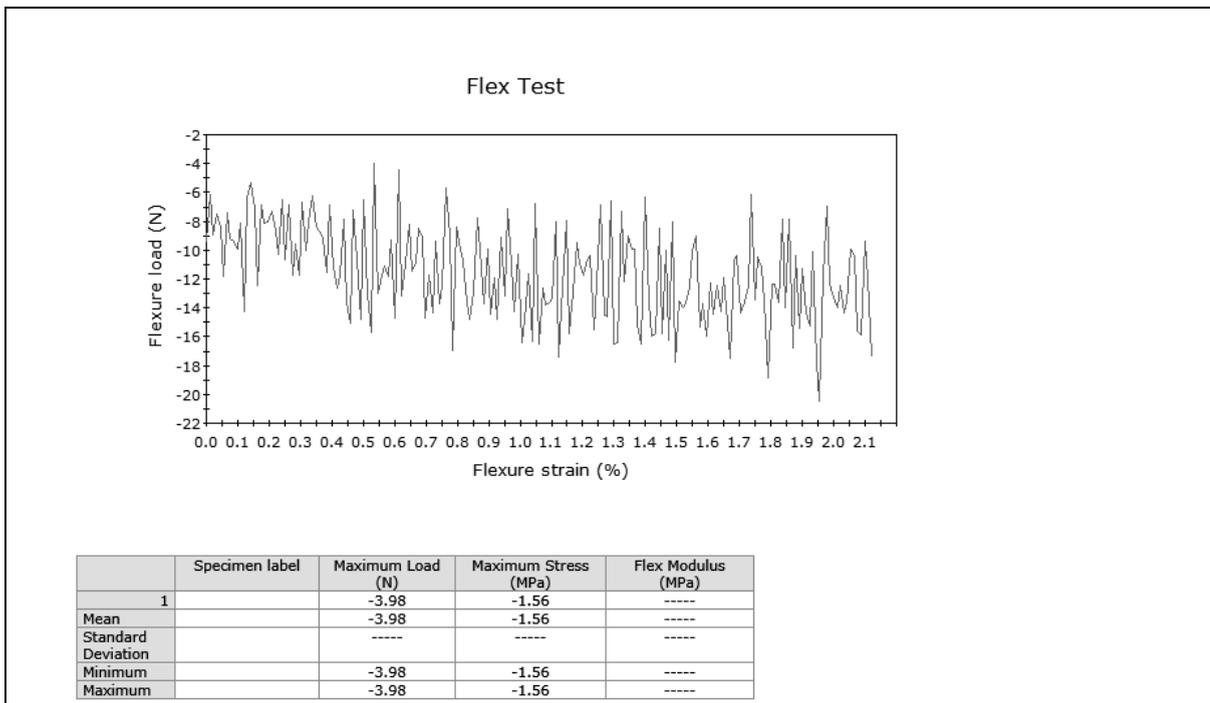


Figure 6: Bend test results

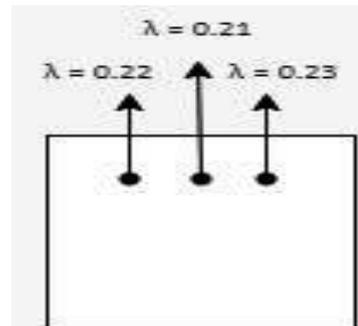
Bending tests were performed with ASTM 8801 device at a speed of 1 mm/min. Three point bending tests were carried out by attaching the apparatus to the jaws of this device. The distance between the lower supports used in the bending test was set to 100 mm. Two supports at the bottom and cylindrical bars with a radius of 3 mm at the end forcing bending at the top were used in the test. Although the composite materials we produce have high strength as a whole, it has been observed that the composite material does not give valid results when it is cut appropriately for testing. The bending test results are shown in Figure 6.

This test was calibrated with the QTM -500 Kyoto Electronics device and the reference apparatus “reference plate:  $\lambda = 0.0359 \text{ W/mK}$ ” and the heat transmission coefficient was measured. Values were read from 3 different points with a thermal conductivity measurement device from 500 g granules and 150 g epoxy composite board and 750 g granules and 150 g epoxy composite board, Figure 7. Based on TS 825 standards, it has been understood that if the heat transmission coefficient is around  $0.035 \text{ W/mK}$ , it is ideal as an insulation material and can be used up to 0.07. Measurements were taken from three different parts of the plate containing 500 g of granules and the average heat transfer coefficient was found to be 0.22

W/mK. Similarly, measurements were taken from three different places of the plate containing 750 g of granules and the average heat transfer coefficient was found to be 0.24 W/mK. It has been understood that the composite materials obtained in this state cannot be used as insulation material. Composite boards on which measurements were taken are shown in Figure 7.



500 g composite sample



750 g composite sample

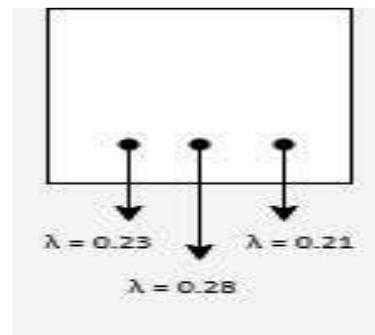


Figure 7: The view of heat transfer coefficient test with two different weight granules

## 5. CONCLUSION

The obtained results can be summarized as follows:

- Pure epoxy sample and epoxy-polyester sample put into the tensile test gave values of 56 N and 150 N, respectively.
- Valid results could not be obtained, since pure epoxy sample and epoxy-polyester sample, which were subjected to the bending test, gave lower values than the overall strength values when cut in dimensions to be tested.
- As a result of the tests, it was concluded that the samples can be used in places where very low thermal conductivity coefficient is not desired.
- The sample containing 250 g of granules from these plates could not be removed from the mold, although it was pressed 3 times. This is thought to be due to the high amount of epoxy.
- The plate with 500 g of granules showed the best adhesion.

- In the samples containing 750, 1000, 1500 g granules, it was observed that the granules had difficulty in adhering to each other in direct proportion with the increase in the amount of granules.

## REFERENCES

- 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.
- Tamboli, S., M., Mhaske, T., S., Kale., D., D., Crosslinked Polyethylene, Indian Journal Of Chemical Technology, Vol. 11, sayfa 853-564, 2004.
- Najafigharehtapeh A. and KAÇAR R., An effect of environment temperature and pre-heat treatment on the electrofusion welding of polyethylene natural gas pipes, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 33:2, 2017.
- Bedekovic, G., Trbovic, R., Electrostatic separation of aluminium from residue of electric cables recycling process, Waste Management 108 (2020) 21-27.
- Grimaud, G., Perry, N. and Laratte, B., Aluminium cables recycling process: Environmental impacts identification and reduction, Resources, Conservation & Recycling (2018)
- Li, C., Zhang, C., Zhao, H., Zhang, H., Wang, X. and Han, B., Grafted UV absorber as voltage stabilizer against electrical degradation and breakdown in cross-linked polyethylene for high voltage cable insulation, a Key Laboratory of Engineering.
- Qudaih, R., Janajreh, I. and Vukusic, S.E., Recycling of Cross-linked Polyethylene Cable Waste via Particulate Infusion, Department of Mechanical Engineering, Masdar Institute of Science and Technology, Abu Dhabi, UAE,2011.





## **Autonomous maintenance on wire drawing machine**

C. Meran <sup>1</sup>, K. Ilhan <sup>2</sup>, B. Can Tufekci <sup>3</sup>, V. Kaya <sup>3</sup>, Y. Senyildiz <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Prof.Dr., 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, an Autonomous Maintenance panel of the wire drawing machine was made. While the panel was being prepared, the fault records were examined, and the causes of the frequently encountered faults were investigated, and it was aimed to show how much more malfunctions can be prevented with autonomous maintenance after the problematic parts on the machine are corrected with appropriate improvement work. With the symbols and logos added to the board, efforts were made to provide a safer working environment for the operators, to see the positions to be controlled on the machine easily, and to enable the operators to recognize the machine they use and to intervene more easily.

**Keywords:** Autonomous maintenance, TPM, maintenance, Wire drawing machine

### **1. INTRODUCTION**

The aim of this study is to implement autonomous maintenance for a machine that is in the production area and frequently breaks down. By preparing a panel for autonomous maintenance, it is aimed to enable operators to perform autonomous maintenance on the machine. With Autonomous Maintenance, one of the 7 pillars of TPM, it is aimed to be one step ahead of rival companies in the competitive market. In addition, it aims to relieve the factory financially and to reduce the loss of time in the production of the factory. Autonomous maintenance, which started to be implemented in the field with simple steps, aims to help operators become more educated and expert in their field by increasing their knowledge and experience over time. It allows operators to adopt and better know the machine they use, allowing them to intervene in minor faults. It enables new operators to adapt to their jobs more easily and to catch up in a shorter time. It saves time and costs spent on training operators. It is also among the objectives of autonomous maintenance that the machine does not break down easily and that it provides a safer working area to the employees by increasing the occupational safety level in the work area.

Alsyouf (2007), To endow operators with knowledge about their equipment is a way to maximize their efficiency. Good management and effective maintenance policy can influence the productivity and profitability of a production process, and maintenance can now be seen as a profit generating function and not as a cost center. Gajdzik (2014), The main goal of autonomous maintenance is to reduce the number of equipment failures, and for that purpose employees should eliminate the anomalies of the machines. These anomalies are seen as minor flaws, abnormal operation of the equipment or even small errors that may appear on their machines. Sawhney (2009), When implemented fully, Autonomous Maintenance could dramatically improve productivity, quality and reduce costs. Autonomous Maintenance is an approach to eliminate/reduce losses in the plant (time & cost) and equipment management that involves all employees (officers, supervisors & operators) from production, maintenance and administration departments. Aziz (2014), the present mechanical industries are having high rivalries among them with very aggressive, challenging and difficult work environment. Hence it is important in any association to incorporate the upkeep work with specialized manufacturing capacities, customer satisfaction policy and quality.

## **2. THE AUTONOMOUS MAINTENANCE [URL1]**

Autonomous Maintenance is geared towards developing operators capable of performing small maintenance tasks, thereby enabling skilled maintenance personnel to spend time on more value-added activities and technical repairs. Operators are responsible for maintaining their equipment to prevent it from failing.

The origin of TPM can be traced back to 1951, when preventive maintenance was introduced in Japan. But the concept of preventive maintenance was taken from the USA. Nippondenso was the first company to introduce plant-wide preventive maintenance in 1960. Preventive maintenance is the concept where operators produce goods using machines and the maintenance group is tasked with maintaining these machines, but with Nippondenso's automation, maintenance has become an issue. Because more maintenance personnel were required. Therefore, the management decided that the routine maintenance of the equipment should be done by the operators. The maintenance group only took over the basic maintenance work.

## **3. WIRE DRAWING MACHINE**

As seen in Figure 1, the wire drawing machine consists of 6 main stations.

- Pulling Unit, - Tempering, - Tension Adjuster, - Double Collector, - Samp Collector, - Basket collector

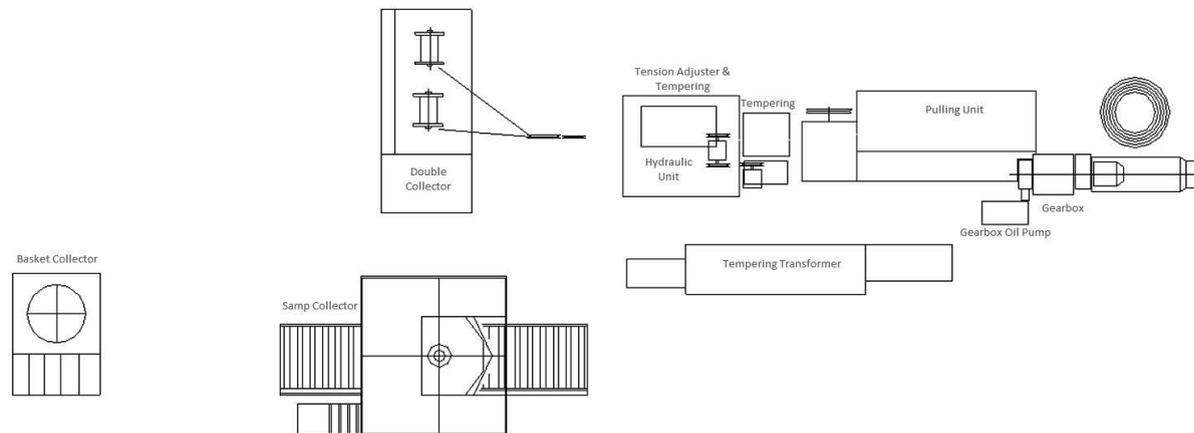


Figure 1: Sketch of wire drawing machine

First, the wire rod coming to the drawing unit is thinned by the pulleys rotating at different speeds in the drawing unit until the desired thickness is obtained. Then, in order to get rid of the deformation on the surface of the drawn wire, it goes to the wire tempering section and is tempered. While the tempered wire is hot, it is kept in a certain tension to prevent thinning and thickening in different places due to expansion and temperature-induced softening in the Tension Adjuster section. The hot wire, the thickness of which is maintained at a certain tension, is cooled and collected in the collectors according to the desired shape and turned into a product.

#### 4. EXAMINATION OF FAILURES

The fault records of the last 1 year for the wire drawing machine were requested from the factory. Common faults were identified through these fault records. The operators were asked which of the identified malfunctions and how they could intervene. A checklist was created from these extracted faults and shown to the responsible engineer. With the engineer adding a few controls, the necessary checklist for the autonomous maintenance board has emerged. Based on the breakdown records taken from the factory, the control frequency was determined for each one, considering the elapsed time between malfunctions. Afterwards, they were classified into 3 ways as daily, weekly and monthly.

The resulting checklist is as follows;

##### **Daily Checks:**

- Wear control of rolls
- Traction pulleys emulsion water control
- Main engine - transmission oil and sound control
- Control of tempering shows
- Double Collector pinole bolt control
- Leakage control of steam pipes
- Machine general air control

##### **Weekly Checks:**

- Diameter glass cleaning
- Towing pulleys control
- Temper stages operation control



be adjusted to indicate the sensory organ to be used in controls. A coloring system should be used to show that these checks should be made with the machine running or stationary. (3) A sketch should also be included to help find the place to be checked easily on the panel. (4) The name of the equipment to be checked on the machine is added. (5) These controls are just as important as their inspection. Since it is known that the responsible team leader in the factory goes around daily, the supervisory job can be given to the team leader. For this, a section should be reserved for the team leader in the table. (6) For a better understanding of the controls, a maintenance procedure should be put on the board where each control is explained in detail. (7) In addition, in order to see the benefit of autonomous maintenance, OEE and BDT charts can be prepared and the difference can be observed by following autonomous care. (8) If some faults recur, a recurring fault table is created in order to control it. (9) In order for the operators to be aware of their responsibility for autonomous maintenance, a commitment is made and this commitment is put on the board. (10) A list of operating operators is put. (11) Briefly, autonomous maintenance is mentioned. (12) Finally, it should be stated on the board whether the control is done or not.

## **6. CONCLUSION**

Autonomous maintenance used in factories today aims to ensure that the operators take ownership of the machine, understand and intervene in the machine's malfunctions, or notify the maintenance department to solve the problems more safely and without major losses. It has been observed that the improvements made with the autonomous maintenance applied in most sectors increase the efficient use of equipment and machines.

In this study, we have been instrumental in increasing our experience and practical knowledge in the field of business by using the theoretical knowledge we have learned during our education. Implementation of autonomous maintenance in the field has increased our engineering knowledge by enabling us, as engineer candidates, to experience maintenance techniques and the difficulty of group work in the field.

We have seen how critical the maintenance area, which is one of the important working areas of mechanical engineering, has a critical position in factories and requires long-term experience. As the working team, very good knowledge and experience has been obtained by following the footsteps of relevant and knowledgeable people, institutions and resources with years of experience in this field. This work has at least improved us in the sense of being able to think and interpret the problems in this field.

## **REFERENCES**

- Alsyouf, I. (2007). The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability. *International Journal of Production Economics*, 105(1), 70-78.
- Gajdzik, B. (2014). Autonomous and professional maintenance in metallurgical enterprise as activities within total productive maintenance. *Metalurgija*, 53(2), 269-272.
- Sawhney, R., Soundararajan, K. and Xueping, Li. Developing a value stream map to evaluate breakdown maintenance operations, *Inderscience Publishers, International Journal of Industrial and Systems Engineering*, Volume 4, Number 3. pp 229-240, 2009.

A. Azizi, Evaluation Improvement of Production Productivity Performance using Statistical Process Control, Overall Equipment Efficiency, and Autonomous Maintenance. Second International Materials, Industrial, and Manufacturing Engineering Conference, (2015).  
[http://www.plant-maintenance.com/articles/tpm\\_intro.shtml](http://www.plant-maintenance.com/articles/tpm_intro.shtml) [Url1]



## Improvement of key performance indicators in NEXANS maintenance management

C. Meran<sup>1</sup>, K. İlhan<sup>2</sup>, A. Yavaş<sup>3</sup>, E. Karahan<sup>3</sup>, Ş. Büke<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Prof.Dr., Pamukkale University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Denizli, Turkey, cmeran@pau.edu.tr

<sup>2</sup> Nexans Turkey Ind. and Trade I.C., Mechanical Engineer, Denizli, Turkey

<sup>3</sup> Student, Pamukkale University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Denizli, Turkey

### Abstract

In this study, the improvement of Key Performance Indicators (KPI) used by Nexans Company is emphasized. First of all, KPI data and fault records were obtained from Nexans Company for 20 Class A machines for the first 9 months of 2021. A decision matrix was created for the most important 6 KPIs and the most critical 5 machines were determined. graphics were created. Improvements have been made for the gearbox shaft failure of the machine numbered KB\_58/2 out of 5 machines with the fishbone diagram for the gearbox shaft failure and the 5 reason analysis. When the data of the last 3 months of 2021 were examined, it was observed that the gearbox shaft malfunction did not occur. Appropriate maintenance types have been suggested for the malfunctions of the other 4 machines.

**Keywords:** KPI, Maintenance, Root analysis,

## 1. INTRODUCTION

Nowadays, the importance of maintenance and repair is increasing in order to work with maximum efficiency, to increase profits, to prevent unnecessary stops, to protect facilities from major damages by turning small breakdown into major turning small breakdown. Every business has goals to be accomplished at the individual and team level to achieve its overall goals. There are KPI that they have created in line with these goals. In order to assign a KPI to a maintenance process, monitoring and measurement metrics are required. Data collection and measurement play an important role in determining the KPI. However, many businesses today are insufficient in collecting and measuring data. Therefore, KPI should be chosen carefully, and data should be collected correctly. KPI help determine the maintenance required and when necessary to improve performance.

## 2. MATERIAL AND METHOD

This study consists of five stages. The first stage made a general literature review on key performance indicators. Research has been done on KPI and types of maintenance. The Maintenance KPIs used by Nexans and the critical KPIs for Nexans was used in our further work. These; Number of Failures (N), Maintenance Time Spent(B), Down Time(DT), Open Time(OT), Mean Between Failures Time(MTBF), Mean Down Time(MDT), Break Down Time(BDT), Time to Repair(TTR), Mean Time to Repair(MTTR). In line with the data collected by Nexans from the SAP program, KPIs such as the number of malfunctions of the A-Class 20 machine for the first 9-months of 2021, the time spent by the maintenance person, the downtime, open time, KPIs such as Total Down Time (TDS), and the cost were examined.

Using these 6 KPIs, a decision matrix was created with the data of 20 machines. For each KPI, coefficients were assigned to a certain range of values. When these coefficients were added, the most important 5 machines appeared. In line with the data collected by Nexans in SAP, the fault records of 5 machines were examined. Fault definitions, which were written in a complex way, were grouped and arranged. The type of malfunction, the number of malfunctions, and the time in each machining area were analyzed and presented in a table and graphic. In which part of the machine the most malfunctions occurred and the types of malfunctions were determined, and these malfunctions focused on. These studies were carried out for the determined five machines. Since can fix the malfunctions in the machines named KB\_57/3 Steel Wire Armor Line, TC\_11 Coarse Wire Drawing Line, IK\_35 Sheath Line, and TC\_10 Coarse Wire can be fixed with planned maintenance, the focus has been on the gearbox failure in the drum 1 region of the KB\_58/2 Steel Armor Line machine. Fishbone, one of the problem-solving methods, focused on gearbox failure, and the five reason method was applied. The cause of the malfunction is determined, and a related report has been created. As a result of this report, the reasons causing the malfunction were resolved by taking steps. The data was obtained by examining the last three months of 2021, action steps yielded results. It was observed that significantly reduced the failures.

## 3. FINDINGS OBTAINED FROM NEXANS CABLE COMPANY

Nexans Company is located in Denizli using Break Down Time(BDT), Number of Failures (N), Total Down Time(TDS), Maintenance Time Spent(B), Open Time(OT), and Cost KPIs from the above mentioned KPIs. A decision matrix was created in **Table 1** with the data of the first nine months of Nexans 2021 to reach the five machines with the most malfunctions out of 20 machines in A-Class. For each A class 20 machine in **Table 1**; Total data for the first 9 months of 2021 are given for Failure Downtime Rate (BDT), Number of Failures (N), Total Downtime (TDS), Maintenance Time (B), Open Time (OT) and Cost KPIs.



Table 1: Decision matrix data

	CV_2	IK_31	IK_32	IK_34	IK_35
<b>BDT (%)</b>	0,43	0,95	1,31	0,76	0,92
<b>TDS (min)</b>	1250,58	3233,98	6083,63	2321,92	3769,68
<b>OT (min)</b>	315388,38	288050,38	299658,45	310963,18	319910,93
<b>B (min)</b>	280,75	51,43	93,54	169,50	171,80
<b>N</b>	57,00	18,00	42,00	64,00	83,00
<b>COST (TL)</b>	128331,00	46920,00	109833,00	55114,00	92851,00
	IK_36	IK_37	IK_38	IK_39	KB_51/2
<b>BDT (%)</b>	0,32	0,64	0,70	0,62	0,94
<b>TDS (min)</b>	2895,30	2166,92	2291,77	1930,17	2449,77
<b>OT (min)</b>	285274,38	358116,80	362183,97	308944,98	265333,85
<b>B (min)</b>	170,25	26,00	108,46	213,42	6,50
<b>N</b>	55,00	10,00	38,00	80,00	3,00
<b>COST(TL)</b>	36305,00	46714,00	41984,00	59038,00	23035,00
	KB_55	KB_57	KB_57/2	KB_57/3	KB_58/2
<b>BDT (%)</b>	3,57	0,74	1,37	2,16	4,01
<b>TDS (min)</b>	9661,03	1740,25	4669,40	6619,23	6134,07
<b>OT (min)</b>	243369,95	247283,12	354290,43	336531,62	153082,15
<b>B (min)</b>	42,83	13,00	90,75	111,50	139,75
<b>N</b>	20,00	5,00	30,00	46,00	57,00
<b>COST (TL)</b>	146776,00	57221,00	41265,00	152166,00	69752,00
	TB_23	TB_29	TC_10	TC_11	TB_23/2
<b>BDT (%)</b>	0,61	1,09	1,54	2,64	0,88
<b>TDS (min)</b>	1855,67	2399,83	11806,00	26894,35	6465,70
<b>OT (min)</b>	308514,33	221166,72	300820,58	286645,65	282394,20
<b>B (min)</b>	114,50	71,67	134,45	122,95	110,13
<b>N</b>	51,00	37,00	41,00	50,00	46,00
<b>COST (TL)</b>	34950,00	54789,00	162359,00	109012,00	40894,00

In Table 2 , appropriate value ranges are given according to the order of importance of the KPIs used in Nexans Company and appropriate coefficients from 1 to 5 are assigned to these value ranges.

Table 2: Decision matrix determined ranges

DETERMINED RANGES											
BDT		TDS		OT		B		N		MALİYET	
0,3	1	1500	1	250000	1	55	1	25	1	20000	1
0,6	2	3000	2	300000	2	110	2	45	2	40000	2
1,00	3	4500	3	350000	3	165	3	65	3	60000	3
2,00	4	6000	4	380000	4	220	4	80	4	80000	4
<2	5	<6000	5	<380000	5	<220	5	<80	5	<100000	5

Table 3: Decision matrix

DECISION MATRIX										
	CV_2	IK_31	IK_32	IK_34	IK_35	IK_36	IK_37	IK_38	IK_39	KB_51/2
<b>BDT</b>	2	3	4	3	3	2	3	3	3	3
<b>TDS</b>	1	3	5	2	3	2	2	2	2	2
<b>OT</b>	3	2	2	3	3	2	4	4	3	2
<b>B</b>	5	1	2	4	4	4	1	2	4	1
<b>N</b>	3	1	2	3	5	3	1	2	4	1
<b>COST</b>	5	3	5	3	5	2	3	3	3	2
<b>TOTAL</b>	<b>19</b>	<b>13</b>	<b>20</b>	<b>18</b>	<b>23</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>16</b>	<b>19</b>	<b>11</b>

DECISION MATRIX										
	KB_55	KB_57	KB_57/2	KB_57/3	KB_58/2	TB_23	TB_29	TC_10	TC_11	TB_23/2
<b>BDT</b>	5	3	4	5	5	3	4	4	5	3
<b>TDS</b>	5	2	4	5	5	2	2	5	5	5
<b>OT</b>	1	1	4	3	1	3	1	3	2	2
<b>B</b>	1	1	2	3	3	3	2	3	3	3
<b>N</b>	1	1	2	3	3	3	2	2	3	3
<b>COST</b>	5	3	3	5	4	2	3	5	5	3
<b>TOTAL</b>	<b>18</b>	<b>11</b>	<b>19</b>	<b>24</b>	<b>21</b>	<b>16</b>	<b>14</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>19</b>

The coefficients in the ranges determined in Table 2 were assigned in Table 3 for each KPI and machine with the help of a formula created in Excel program and the decision matrix was created. By summing these coefficients, the 5 machines that caused the most problems were reached. These 5 problematic machines are respectively: KB\_57/3, IK\_35, TC\_11, TC\_10, KB\_58/2. In Figure 1, the sequential column chart of the machines resulting from the matrix is given.

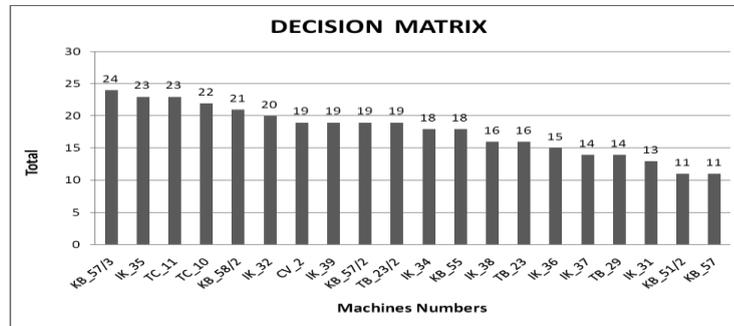


Figure 1: The order of importance graph of 20 class A machines as a result of the decision matrix

### 3.1 KB\_58/2 Stell Armour Line

Machine numbered KB58\_2; Steel Armor Line No. 6 consists of Steel Band Head, Electric Cabinet, Rolling Mill, Kapstan, Drum 1, Drum 2, Collector, Transmitter, Armor Wire Transfer Line, Armor Wire Collector 1 and Armor Wire Collector 2. Fault problems in each section are grouped according to their types. These fault types are given in Table 4 below in terms of number and time. As a result of the collected data, according to Table 4, it has been observed that the most malfunctioning part of the machine is the Drum 1 section in the first 9 months of 2021, with 42 units and 12585 minutes of failure. In Table 4, the total number of faults and fault time data in each part of the machine numbered KB58\_2 are given. The Figure 2 showed that 42 faults were detected in the Drum 1 section with 12585 minutes of fault. In Figure 2, the size of the balloons varies in direct proportion to the product of the time and number of times reached for each failure section, and the drum 1 section malfunction is seen.

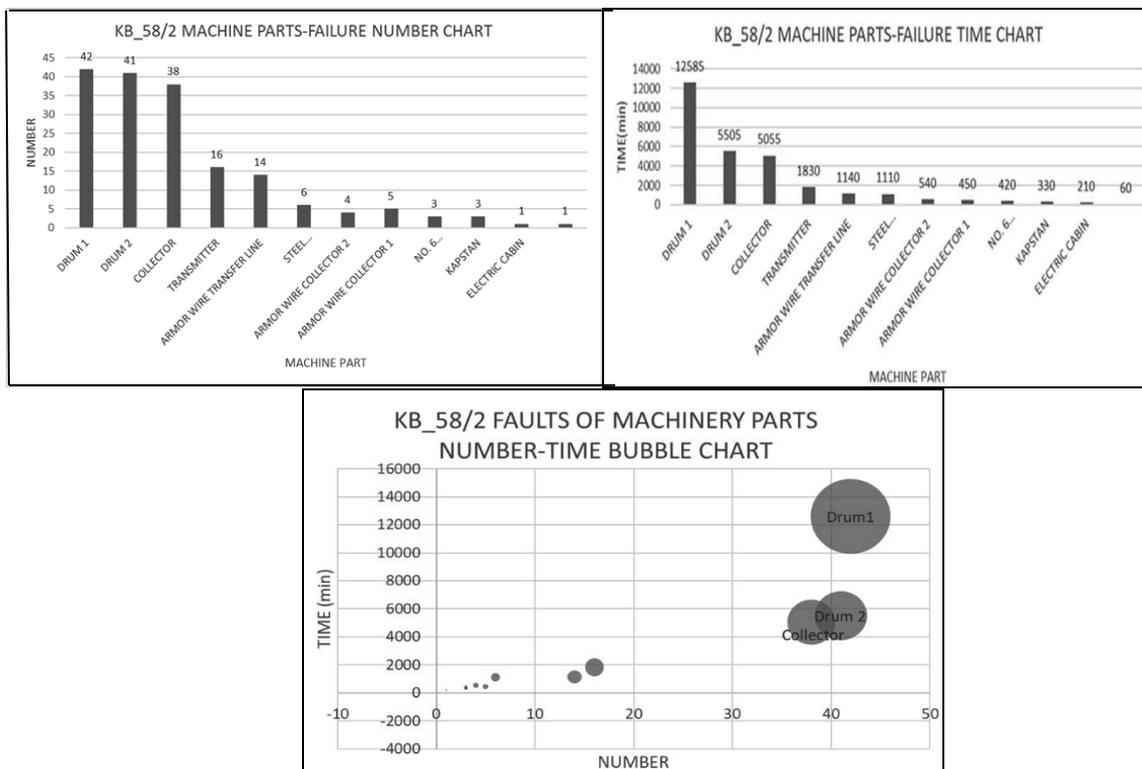


Figure 2: KB\_58/2 Machine parts-failure number, failure time, and bubble charts

Table 4: KB\_58/2, and KB\_58/2 general faulty type number and time

KB_58/2 Part	FAULTY TYPE	NUMBER	TIME (min)	KB_58/2 Part	FAULTY NUMBER	TIME (min)
KB_58/2 NO. 6 STEEL ARMOR LINE	Other	2	300	KB_58/2 DRUM 1	42	12585
	Railing	1	120	KB_58/2 DRUM 2	41	5505
KB_58/2 STEEL TAPE HEAD	Emergency stop	1	30	KB_58/2 COLLECTOR	38	5055
	Fixing	2	420	KB_58/2 TRANSMITTER	16	1830
	Strap	2	600	KB_58/2 ARMOR WIRE TRANSFER LINE	14	1140
	Pinole	1	60	KB_58/2 STEEL TAPE HEAD	6	1110
KB_58/2 ELECTRIC CABIN	Cable	1	210	KB_58/2 ARMOR WIRE COLLECTOR 2	4	540
KB_58/2 ROLLING MILL	Pinole	1	60	KB_58/2 ARMOR WIRE COLLECTOR 1	5	450
	Emergency stop	1	150	KB_58/2 NO. 6 STEEL ARMOR LINE	3	420
KB_58/2 KAPSTAN	Wire jamming	1	60	KB_58/2 KAPSTAN	3	330
	Protect	1	120	KB_58/2 ELECTRIC CABIN	1	210
	Hydraulic	3	240	KB_58/2 ROLLING MILL	1	60
KB_58/2 DRUM 1	Pneumatic	1	30			
	Shaft	1	60			
	Installation	12	1365			
	Gearbox	18	10290			
	Brake	3	210			
	Driver	1	90			
	Switch	1	120			
KB_58/2 DRUM 2	pinole	2	180			
	Router	2	90			
	Button	2	150			
	Installation	15	1275			
	Brake	2	180			
	Rolling mill	1	120			
	Hydraulic	1	120			
	Tapping	1	60			
	Engine	1	120			
	Pneumatic	1	120			
	Pinole	2	300			
	Sensor	1	120			
	Switch	1	120			
	Shaft	3	630			
KB_58/2 COLLECTOR	Gearbox	8	2100			
	Foot lowering	3	750			
	Other	1	60			
	Buton	2	150			
	Hydraulic	1	150			
	Brake	3	150			
	Walker	7	990			
	Panel	4	660			
	Cable	6	900			
	Meter disc	1	60			
KB_58/2 TRANSMITTER	Pinole	6	585			
	Reducer	2	180			
	Driver	2	420			
	Foot opening	2	300			
	Pinole	2	240			
	Brake	4	270			
	Cable	1	120			
KB_58/2 ARMOR WIRE TRANSFER LINE	Control	3	480			
	Driver	2	240			
	Reducer	1	120			
	Sensor	1	60			
	Hydraulic	1	240			
	Protection	2	120			
	Strap	4	300			
KB_58/2 ARMOR WIRE COLLECTOR 1	Meter disc	1	60			
	Fixing	2	180			
	Pinole	2	90			
	Router	1	60			
	Switch	1	90			
	Strap	3	240			
KB_58/2 ARMOR WIRE COLLECTOR 2	Router	1	120			
	Buton	1	90			
	Router	2	240			
KB_58/2 ARMOR WIRE COLLECTOR 2	Control	1	240			
	Walker	1	60			

It has been focused on the malfunctions in the Drum 1 section with 42 malfunctions and 12585 minutes of machine numbered KB\_58/2. As shown in Figure 3 malfunctions and 10290 minutes of malfunction, and a transmission malfunction were detected in the Drum 1 section. In Figure 3, the size of the balloons varies in direct proportion to the product of the time and number of times reached for each type of failure, and the transmission malfunction is visible. Problem-solving methods were applied in the next step for this fault type.

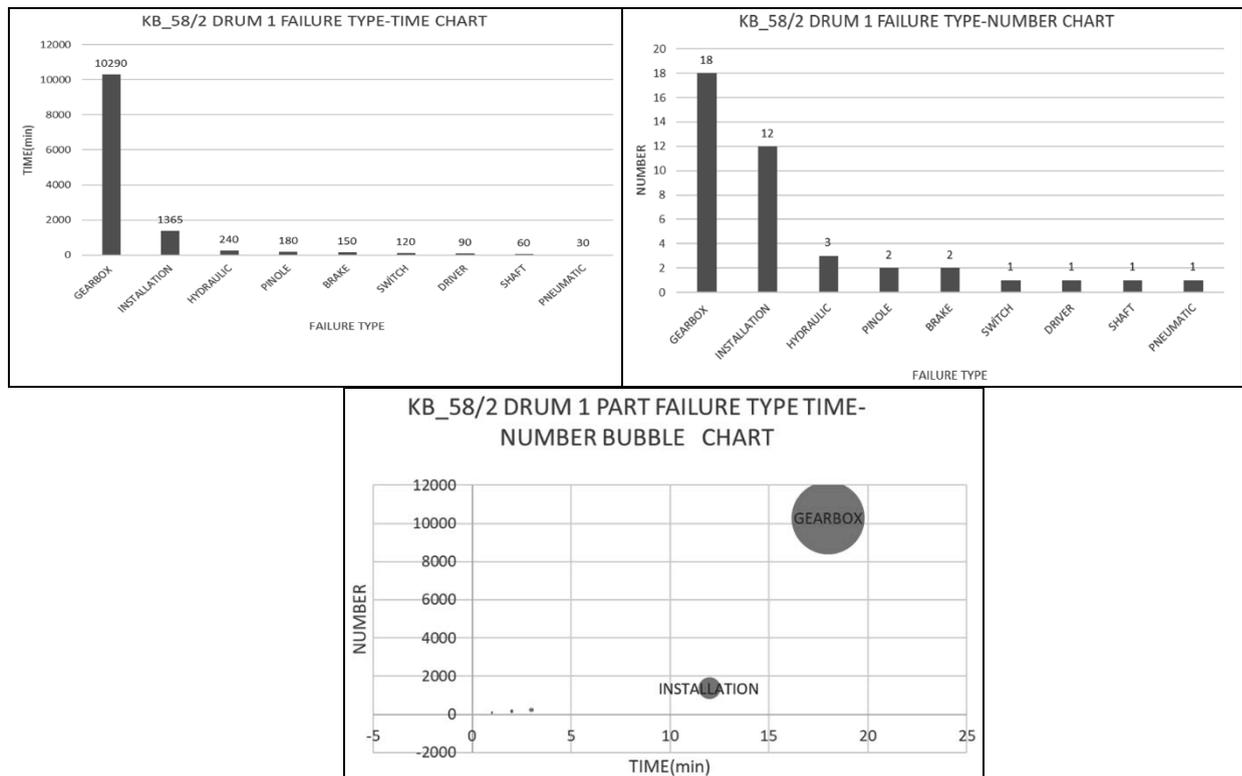


Figure 3: KB\_58/2 Drum 1 part failure type-time, and-number bubble chart

#### 4. PROBLEM – SOLVING METHODS FOR KB\_58/2 STEEL ARMOUR LINE

##### 4.1 Fishbone Diagram

The fishbone diagram for the machine named KB\_58/2 Steel Armor Line consists of the method, environment, human, material, and machine headings. The factors that may cause the gearbox shaft to break are examined under these headings. As a result of the examinations, in Figure 4, the factors that may cause this problem in the company are red, and the factors that do not cause it are green. For the factors in red, 5 Why method were also performed.

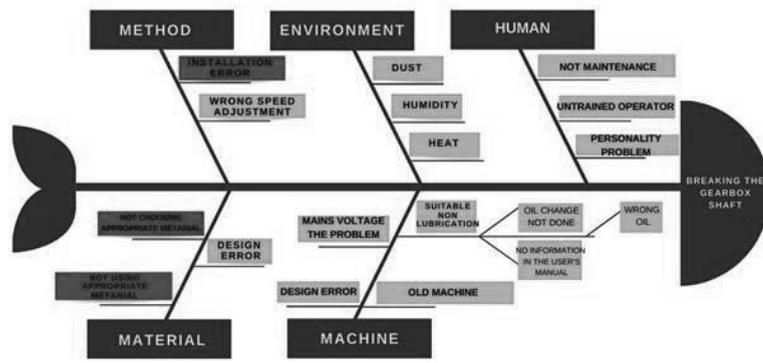


Figure 4: KB\_58/2 Fishbone diagram

**4.2 Why Method**

Among the factors in red color in the fishbone diagram, loading error, not choosing the appropriate material, and not using the proper material are examined in Figure 5 below with the analysis of 5 reasons. The root cause action table is given in Table 5.

1) Installation error 5 WHY analysis	2) Not choosing appropriate material 5 WHY analysis
<p><b>Problem:</b> Installation error</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>WHY? → The 1st and 2nd drums wind a different number of spools</li> <li>WHY? → The information is given on the a business card is like this</li> <li>WHY? → Required by the process</li> </ul>	<p><b>Problem:</b> Not Choosing Appropriate Material</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>WHY? → Wrong material selection of the company</li> <li>WHY? → Material selected according to the catalog</li> <li>WHY? → Material strength calculation has not been made</li> </ul>
<p><b>Solution:</b> Since it is mandatory due to the process, no solution proposal has been presented.</p>	<p><b>Solution:</b> Appropriate material and heat treatment will be determined by calculating strength.</p>
<p><b>3) Not using appropriate material 5 WHY analysis</b></p>	
<p><b>Problem:</b> Not Using Appropriate Materials</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>WHY? → The material was not of suitable hardness</li> <li>WHY? → Correct heat treatment not done</li> <li>WHY? → There was a supplier error</li> <li>WHY? → Material sent by the supplier not checked</li> <li>WHY? → The company has the necessary equipment didn't have</li> </ul>	
<p><b>Solution:</b> Obtaining the necessary equipment for spectrometric analysis.</p>	

Figure 5: 5 reasons analysis for 3 different failure

In Figure 6, the low-impact, difficult-easy grade graph of the actions to be taken as a result of root cause analysis is given. Number 1 bubble loading error, bubble number 2 not choosing the appropriate material, bubble number 3 represent the actions shown in Table 5 for the problems of not using the proper material. The action to be taken in number 1 is difficult, but if done, the effect will be moderate. If the action in number 2 is done quickly, the effect will be moderate. In number 3, the action to be taken is more accessible than the other actions. If done, more effective results will be obtained.

Table 5: The root cause for three reason

	REASON	ROOT CAUSE	ACTION	DEADLINE
1	INSTALLATION PROBLEM	Required by the process	No action will be taken	----
2	NOT CHOOSING APPROPRIATE MATERIAL	Material strength calculation has not been made	Strength calculation will be made. suitable material and heat treatment will be determined. University Collaboration (Different hardness materials will be tried.)	1 week
3	NOT USING APPROPRIATE MATERIAL	The company has the necessary equipment have	Obtaining necessary equipment for Spectral Analysis	3 weeks

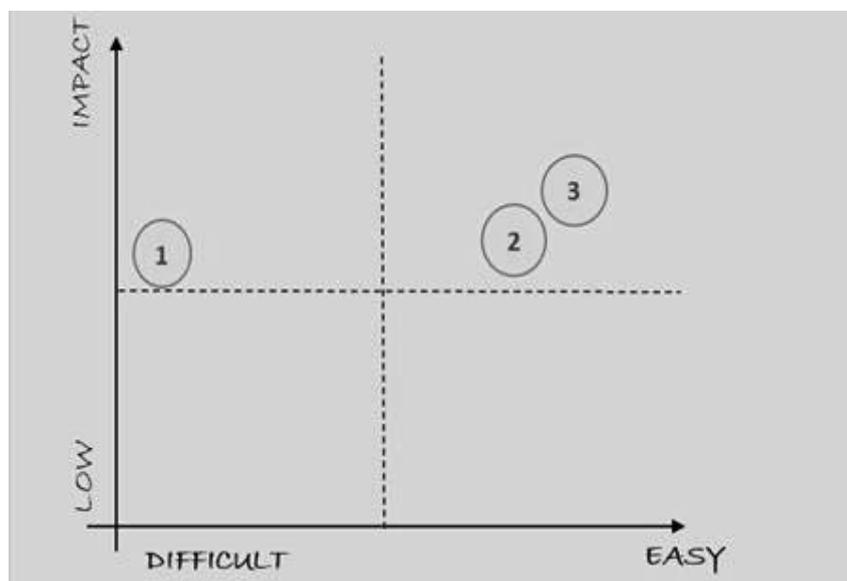


Figure 6: Root cause action chart

### 5. CONCLUSIONS

According to the five reasons analyses in Figures 7 of the machine named KB\_58/2 Steel Armor Line, failure to use suitable materials is one of the factors that cause the gearbox shaft to break. Recently due to increased gearbox shaft failures for sampling examination of shaft materials and hardness on October 5, 2021 fieldwork has started with the cooperation of the university. It is known that the company has agreements with the manufacturer to ship these gearbox shafts made of rehabilitated AISI 4140 (42CrMo4) steel. To determine whether these broken gearbox shafts are of this nature at university were analysed hardness, and spectral analyses.

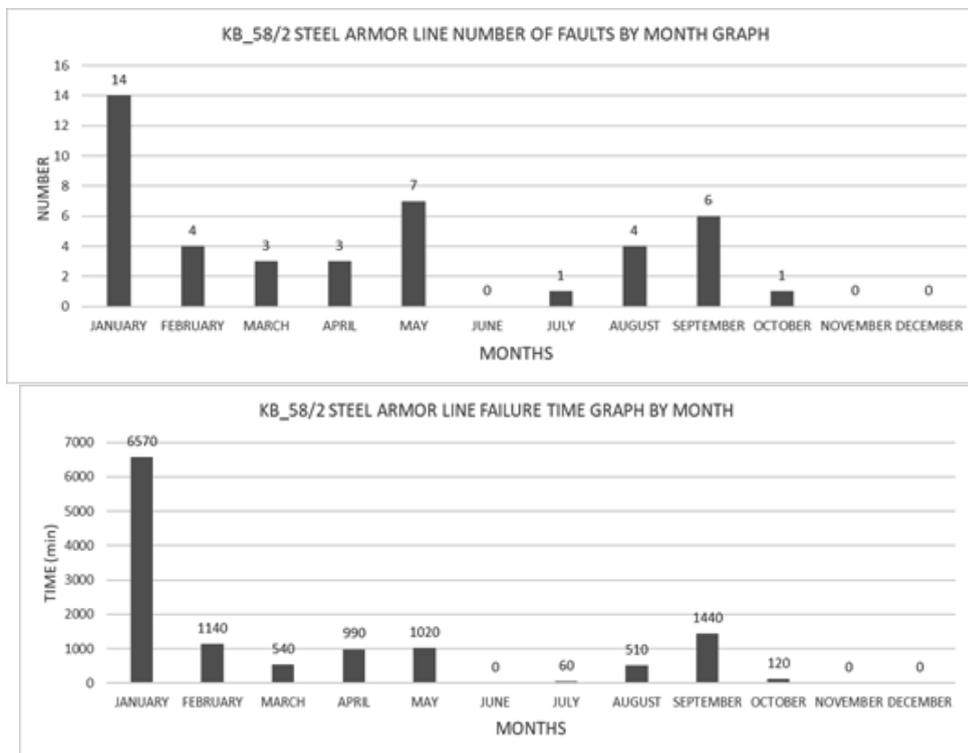


Figure 7: KB\_58/2 Steel Armor line number of faults, and failure time by month graph

Hardness measurement of gearbox shaft material samples done in cooperation with the university and spectral analyses have been performed. The steel supplied by the company from the supplier is not AISI 4140 steel and it has been determined to be E335-like steel called manufacturing steel. E335 steel is ordinary non-alloy steel and does not have the ability to harden. As a result of this report criminal proceedings have been taken against the supplier and the supplier has been changed. From new supplier the correct gearbox shaft material has been provided. In addition, the company said that the incoming shaft materials has been ordered a spectrometer analysis device to check its accuracy. In line with the studies carried out, has been taken action in September, and the results of the actions taken were seen in October. Figures 7 has column charts of the 12-month data of gearbox shaft failure. As seen in the above figures, a significant decrease in gearbox shaft failure was observed after September.

## REFERENCES

- Law, G., 2003: "Setting Performance Standarts for your Maintenance Contract", Maintenance Management Conference, Auckland, New Zeland.
- Meran, C., Güngör, A., Gültekin, E., Erol, SS., 2009: TMMOB Makina Mühendisleri Odası IV. Bakım Teknolojileri Kongre ve Sergisi, Denizli, Türkiye
- Mazlum, A., Determining., 2019: Of Key Performance Indicators In Business, İstanbul Ticaret Üniversitesi Girişimcilik Dergisi, Cilt.1 , Sayı.2,
- Ng K.K.H., Tang M.H.M., Lee C.K.M., "Design And Development Of A Performance Evaluation System For The Aircraft Maintenance Industry", Department of Industrial and Systems Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China



- Özyazar, Ö., Yardimci, İ., Vayvay, Ö., 2014 :“lojistik ve tedarik zinciri performans zinciri”, Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği,
- Varisco, M., Johnsson, C., Mejvik, C., Schiraldi, M., Zhu,L., 2018 :“KPIsforManufacturing Operations Management: drivingthe ISO22400 standardtowardspracticalapplicability”, IFAC-PapersOnLine, Volume 51, Issue 11, Pages 7-12
- Sénéchal, O., 2018: Performance Indicator Nomenclatures For Decision Making In Sustainable Condition Based Maintenance, ifacPapersOnline 51-11(2018) 1137-1142
- Amrina E., Yulianto A., Kamil I., ”Fuzzy Multi Criteria Approach For Sustainable Maintenance Evaluation In Rubber Industry”, 16TH Global Conference on Sustainable Manufacturing—Sustainable Manufacturing for Global Circular Economy
- Cavlak H., 2021: “Temel Performans Göstergeleri ile kritik başarı faktörleri ilişkisi: Bir Hava Yolu İşletmesi Uygulaması”, Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, Cilt: 43, Sayı: 1, ISSN: 2587-2672, ss/pp. 78-99]
- Chan, K. T., Lee, R. H. K., Burnett, J., 2001. “Maintenance Performance: A Case Study of Hospitality Engineering Systems,” *Facilities*, vol. 19, no. 13/14, p.494–504. doi:10.1108/02632770110409477.

## Aplikacja do akwizycji danych z EEG KT88-2400

D. Myszor<sup>a</sup>, M. Wieczorek<sup>b</sup>, M. Sujkowski<sup>c</sup>, E. Szmyt<sup>d</sup>, M. Zieliński<sup>b</sup>, T. Kukuczka<sup>e</sup>

<sup>a</sup> Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, Katedra Algorytmiki i Oprogramowania

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, Studenckie Koło Naukowe Wirtualnego Latania vFly

<sup>c</sup> Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej, Studenckie Koło Naukowe Wirtualnego Latania vFly

<sup>d</sup> Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej, Studenckie Koło Naukowe Wirtualnego Latania vFly

<sup>e</sup> Politechnika Śląska, Wydział Matematyki Stosowanej, Studenckie Koło Naukowe Wirtualnego Latania vFly

email: [dariusz.myszor@polsl.pl](mailto:dariusz.myszor@polsl.pl)

**Streszczenie:** W artykule opisano autorskie oprogramowanie do akwizycji danych z EEG KT88-2400 zaimplementowane przez członków Studenckiego Koła Naukowego Wirtualnego Latania vFly.

**Abstract:** The article presents software for the data acquisition from KT88-2400 EEG implemented by members of Virtual Flight Students Scientific Circle vFly.

**Słowa kluczowe:** EEG, BCI, interfejs mózg – komputer, KT88-2400

### 1. WSTĘP

Elektroencefalografia pozwalana na bezinwazyjne pozyskiwanie informacji o procesach zachodzących w korze mózgowej bazując na aktywności bioelektrycznej neuronów [1]. Można zauważyć istotny potencjał związany z wykorzystaniem EEG w interfejsach mózg – komputer (Brain Computer Interfaces – BCI). Interfejsy takie są szczególnie interesujące we wspomaganie osób z niesprawnościami do celów rehabilitacji a nawet komunikacji (np. klawiatury BCI) [2] [3]. Można wykorzystać szeroką gamę efektów związanych z aktywnością mózgu, aby umożliwić efektywne sterowanie różnorodnymi procesami m.in. [4]

- potencjały wywołane stanu ustalonego (SSEP) – to elektrofizjologiczne odpowiedzi wywołane przez oddziaływanie bodźcami o określonej częstotliwości, powodującego pojawienie się komponentu o częstotliwości odpowiadającej w określonych obszarach kory mózgowej. W zależności od charakteru oddziałującego bodźca wyróżniamy następujące

potencjały wywołane stanu ustalonego: wzrokowe (steady state visual evoked potentials SSVEP), słuchowe (steady state auditory evoked potentials, SSAEP) oraz czuciowe (steady state somatosensory evoked potentials, SSSEP). Istotną zaletą efektu SSEP jest niski czas reakcji na pojawienie się bodźca, w efekcie zapewniona jest wysoka przepustowość interfejsu mózg – komputer.

- Fala P300 – potencjał wywołany występujący w trakcie procesu podejmowania decyzji osiągający szczytową wartość w czasie od 250 do 500 ms po wystąpieniu reakcji na bodziec. Najłatwiej zaobserwować zjawisko tego typu, gdy użytkownik jest aktywnie zaangażowany w realizację zadania (np. wykrywanie podświetlenia zadanej wartości na ekranie) [5]. Ze względu na ograniczoną jakość sygnału pozyskiwanego przez EEG, zakłócenia oraz charakterystykę występowania fali P300 a także moc samej fali, wymagane jest wielokrotne powtórzenie eksperymentu i uśrednianie wyników co powoduje ograniczenia w przepustowości interfejsu mózg – komputer.
- synchronizacja i desynchronizacja związana z bodźcem (event-related synchronizations/desynchronizations, ERS/ERD) - efekt związany ze wzrostem lub spadkiem mocy sygnału w określonych pasmach częstotliwości i obszarach kory mózgowej wywołanych np. aktywnością mięśniową (ruchem kończyny) lub wyobrażeniem ruchu [6]. Zaletą jest możliwość wytrenowania generowania określonych efektów przy pomocy np. wyobrażeń ruchowych natomiast wadą jest ograniczona przepustowość implementowanego interfejsu.
- wolne potencjały korowe (slow cortical potentials, SCP) – powolne zmiany w aktywności elektromagnetycznej mózgu. Wytrenowana osoba może wywoływać takie zmiany na żądanie, pozwala to na proste podejmowanie decyzji. Wadą wykorzystania tego zjawiska jest czas reakcji, sygnały tego typu potrzebują od 1 sekundy do kilku sekund, aby w pełni się rozwinąć. Powoduje to niską przepustowość interfejsu.

Rozwój interfejsów mózg komputer jest możliwy także ze względu na rosnącą gamę budżetowych rozwiązań sprzętowych do akwizycji sygnałów. Tego typu urządzenia cechują się dobrą jakością, równocześnie są osiągalne dla zespołów badawczych a także kół naukowych.

## 2. SPRZĘT

Na rynku dostępnych jest wiele encefalografów, jednakże tylko kilka urządzeń cechuje się cenami pozwalającymi na ich łatwy zakup przez małe jednostki naukowe zainteresowane prowadzeniem badań tego typu (np. koła naukowe).

Budżetowe EEG charakteryzują się zróżnicowanymi możliwościami w obszarze jakości pozyskiwanego sygnału, częstotliwości pozyskiwania kolejnych ramek z danymi oraz wsparcia zapewnianemu użytkownikowi końcowemu. Istotnym ograniczeniem budżetowych EEG jest liczba obsługiwanych sygnałów wejściowych.

Urządzeniem chętnie wykorzystywanym przez społeczność BCI jest Emotiv EPOC+ [7], to 14 kanałowe, budżetowe EEG pozwalające na szybką akwizycję danych. Urządzenie to komunikuje się z komputerem bezprzewodowo, i pozwala na łatwą instalację na głowie użytkownika, natomiast istotną wadą jest brak możliwości zmiany ułożenia elektrod na głowie oraz ograniczenia programistyczne powodujące konieczność opłacania subskrypcyjnej licencji za oprogramowanie do akwizycji danych. Kolejnym urządzeniem wykorzystywanym często w

badaniach naukowych jest OpenBCI [8], to 8 lub 16 (w zależności od konfiguracji) kanałowe EEG pozwalające na bezprzewodową komunikację z komputerem (przez WiFi lub Bluetooth) i dowolną konfigurację ułożenia elektrod. Urządzenie to posiada także otwarte oprogramowanie zaimplementowane w języku Java oraz Python pozwalające na łatwą akwizycję danych i dostosowywanie procesu pozyskiwania do potrzeb prowadzonego badania. Wadą urządzenia jest akwizycja danych przez interfejsy bezprzewodowe w efekcie zdarzają się przypadki utraty części danych a także opóźnienia w dostawie kolejnych paczek z danymi, może powodować przekłamania w działaniu algorytmów analizujących.

Grupą urządzeń, które są bardzo interesujące z punktu widzenia badań w obszarze BCI, jest seria Contec KT88. Elektroencefalograf Contec KT88-2400 pozwala na wykorzystanie aż 19 kanałów EEG oraz 5 dodatkowych kanałów multi-parametrów (1 kanał EKG, 1 kanał EMG (np. do wykrywania aktywności mięśniowej), 2 kanały EOG (pozwalający na łatwą eliminację zakłóceń wynikających z aktywności powiek) i 1 kanał oddechu (SpO2)). Częstotliwość próbkowania wynosi 200Hz a precyzja próbkowania to 12bitów. Urządzenie, tak jak OpenBCI, wykorzystuje zestaw elektrod oraz dodatkowy czepek, który pozwala na pełną dowolność w konfiguracji elektrod na głowie. KT88-2400 łączy się z komputerem przy pomocy interfejsu USB, pozwala to, przy zastosowaniu odpowiedniego ekranowanego kabla dostarczanego z urządzeniem, na bezstratne dostarczanie danych w regularnych odstępach czasu do systemu przetwarzającego. Istotną zaletą urządzenia jest cena, która jest zbliżona do OpenBCI. W skład zestawu wchodzi urządzenie, elektrody, czepek, lampa błyskowa oraz kamera. W przypadku, gdy potrzebna jest większa liczba elektrod dostępne jest urządzenie KT88-3200 które potrafi obsłużyć 32 sygnały równocześnie. Dlatego też urządzenia te są rozsądnym wyborem dla grup dysponujących limitowanymi budżetami, ponieważ pod względem liczby elektrod i jakości pozyskiwanych sygnałów dorównują dziesięciokrotnie droższemu profesjonalnemu urządzeniu. Wadą urządzeń z serii Contec KT88 jest zamknięte oprogramowanie, kompatybilne z niewspieranymi już systemami operacyjnymi Windows XP oraz Windows 7.

### 3. OPROGRAMOWANIE

Oprogramowanie dostarczane z KT88-2400 posiada wiele opcji, które umożliwiają logowanie danych ich wizualizację oraz filtrację, lecz nie posiada możliwości rozszerzania o wtyczki i dodatkowe komponenty programistyczne umożliwiające realizację scenariuszy badawczych zgodnych z aktualnym zapotrzebowaniem. Co więcej kompatybilność oprogramowania ogranicza się do systemu Windows XP/ Vista/ 7. Dlatego też podjęto decyzję o implementacji oprogramowania w języku Python, które umożliwi akwizycję sygnałów z urządzenia oraz pozwoli na dalszą rozszerzalność pod kątem realizacji dowolnych typów badań np. analizę efektu SSVEP.

Zaimplementowane oprogramowanie kompatybilne jest z systemem operacyjnym Windows 7 / 8 / 10. W celu zapewnienia poprawności komunikacji urządzenia z systemem operacyjnym należy podłączyć urządzenie do portu USB 2.0 lub USB 3.0 komputera i zainstalować odpowiedni sterownik ze strony producenta. Następnie należy zminimalizować czasy opóźnień pozyskiwania danych z urządzenia przez system operacyjny, w tym celu należy uruchomić Manager urządzeń systemu Windows (Device Manager), zlokalizować port COM przypisany do EEG na liście i wyświetlić okno z właściwościami urządzenia, na zakładce Ustawienia portu

(Port Settings) należy wybrać przycisk Zaawansowane (Advanced) i w polu Czas opóźnienia (msec) (Latency Timer (msec)) należy podać wartość 1.

Następnie należy pobrać i uruchomić kod dostępny w repozytorium GitLab pod adresem: [git@gitlab.com:kt882400/kt882400acquisition.git](https://gitlab.com/kt882400/kt882400acquisition.git).

W pliku `Kt88DataReader` znajduje się klasa `Kt88DataReader`, która pozwala na pozyskiwanie danych z urządzenia, w tym celu należy wykorzystać konstruktor

```
kt_reader = Kt88DataReader(port='COM3', output_file_path='c:\\out' )
```

Parametry konstruktora:

- `port` jest nazwą portu com pod który podłączono urządzenie np. COM2.
- `output_file_path` – to ścieżka do pliku w którym będą zapisywane pozyskane dane.

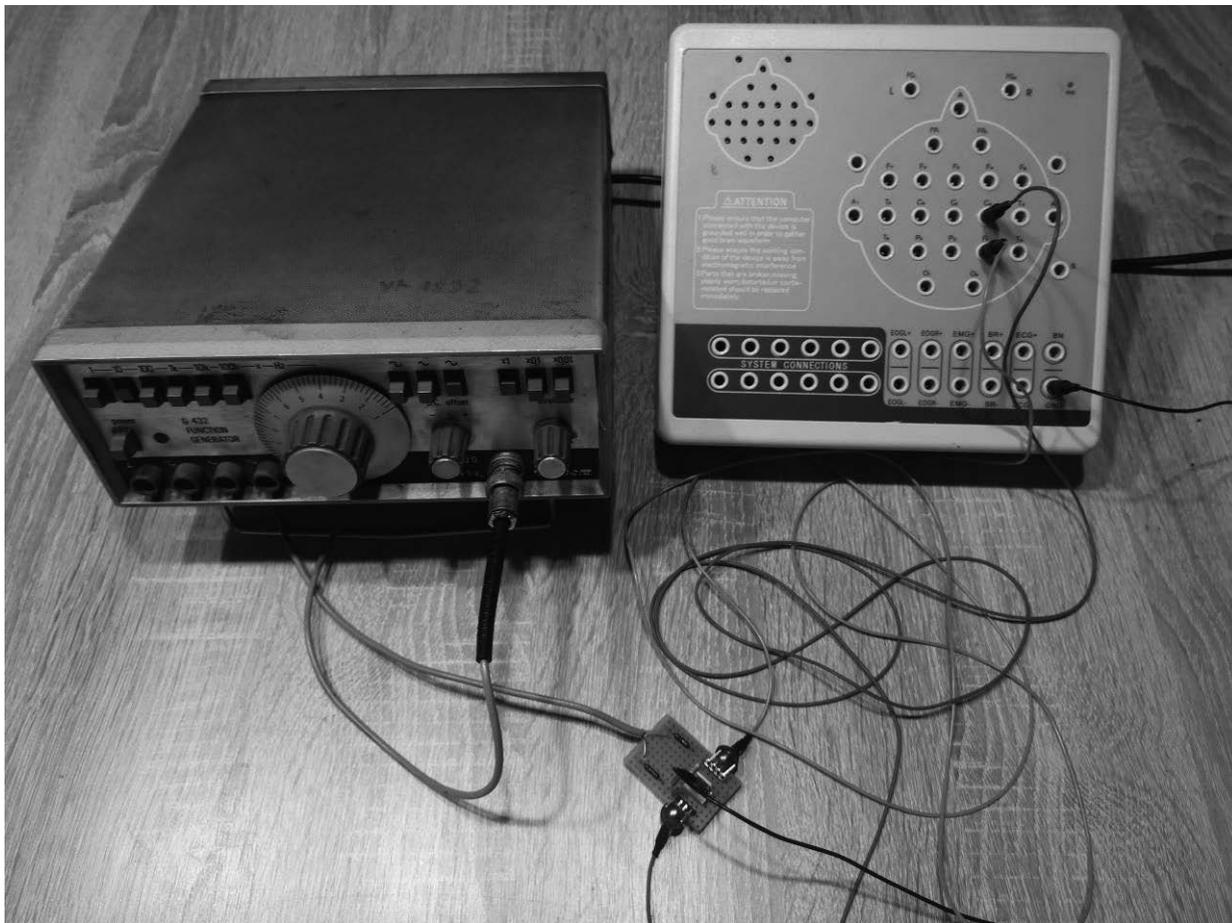
W celu akwizycji danych należy wykorzystać metodę `start_aquisition()`. Metoda ta wysyła paczkę inicjalizującą do EEG i rozpoczyna proces akwizycji oraz logowania danych.

Aplikacja zapisuje w pliku tekstowym binarny zrzut danych pozyskany z urządzenia. W kolejnych liniach znajdują się kolejne ramki z odczytami zwracanymi przez EEG. Każda ramka rozpoczyna się od ciągu kontrolnego, potwierdzającego prawidłowość uzyskanych danych.

Kod celowo zaimplementowano w postaci jednej klasy, którą można łatwo dodać do projektu realizującego badania. Klasę można łatwo rozszerzyć i dostosować pod kątem różnorodnych scenariuszy eksperymentalnych.

#### 4. TESTY

W trakcie testów oprogramowania wykorzystano generator fal sinusoidalnych (G432 Function Generator). Wyjście generatora podłączano pod indywidualne elektrody EEG i analizowano dane uzyskane w wynikowym pliku. Zestaw testowy przedstawiono na rys. 1. Dane walidowano pod kątem kompletności (stały rozmiar pozyskiwanych ramek z danymi, odpowiednia liczba ramek uzyskiwana na sekundę zgodnie ze specyfikacją KT88-2400) oraz odporności na zakłócenia w transmisji danych pomiędzy EEG i komputerem (w trakcie kilkugodzinnych eksperymentów, zaobserwowano kilka przypadków ramek, które były zbyt krótkie, zaimplementowany kod prawidłowo poradził sobie z takimi przypadkami). Przetestowano kod dla szerokiej gamy sygnałów z przedziału 1 – 30 Hz. Przeprowadzone analizy wykazały prawidłowość działania kodu.



Rysunek 1. Zestaw testowy, generator G432 oraz KT88-2400.

Figure 1. Test setup, function generator G432 and KT88-2400.

## 5. PODSUMOWANIE

W tekście przedstawiono oprogramowanie, którego zadaniem jest pozyskiwanie danych z urządzenia KT88-2400 – budżetowego EEG, dla którego producent nie udostępnia programistycznego API pozwalającego na łatwą akwizycję danych dla scenariuszy testowych wykraczających poza podstawowe funkcjonalności zamkniętej aplikacji dostarczanej wraz z urządzeniem. Zaimplementowano klasę w języku Python, umożliwiającą pobieranie danych i łatwą integrację z dodatkowym kodem, który może realizować rozszerzone funkcjonalności logowania i przetwarzania danych. Tym samym zniesiono ograniczenie wynikające z aplikacji dostarczanej przez producenta oraz rozwiązano problem braku wsparcia dla obecnie dostępnych wersji systemu operacyjnego Windows. Kod aplikacji udostępniono w otwartym repozytorium GitLab.

## LITERATURA

1. H.J. Craig, Electroencephalography: basic principles, clinical applications, and related fields. Neurology 67.11 (2006): 2092-2092.

2. D. Mattia, L. Astolfi, J. Toppi, M. Petti, F. Pichiorri i F. Cincotti, Interfacing brain and computer in neurorehabilitation, 4th International Winter Conference on Brain-Computer Interface (BCI), Yongpyong, 2016.
3. F. Pichiorri, G. Morone, M. Petti, J. Toppi, I. Pisotta, M. Molinari, S. Paolucci, M. Inghilleri, L. Astolfi, F. Cincotti i D. Mattia, „Brain-computer interface boosts motor imagery practice during stroke recovery,” *Annals of Neurology*, pp. 851-865, 2015.
4. C. S. Nam, A. Nijholt, F. Lotte, *Brain-Computer Interfaces Handbook: Technological and Theoretical Advances*, Boca Raton: CRC Press, 2018.
5. J. Polich, Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b, *Clinical Neurophysiology*, 118 (10): 2128–2148, 2007.
6. G. Pfurtscheller, A. Aranibar, Evaluation of event-related desynchronization (ERD) preceding and following voluntary self-paced movement, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 46, 138–146, 1979.
7. B. T. Nugraha, R. Sarno, D. A. Asfani, T. Igasaki, M. N. Munawar, Classification of Driver fatigue state based on EEG using Emotiv EPOC+, *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 86(3), 2016.
8. J. Frey, Comparison of a consumer grade EEG amplifier with medical grade equipment in BCI applications. In International BCI meeting, 2016.

## The calculation of technological efforts on the mechanism of slotted needles of basic knitting machines

V. Neimak <sup>a</sup>, O. Polishchuk <sup>a</sup>, T. Romanets <sup>a</sup>, A. Yerii <sup>a</sup>, M. Bonek <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Engineering Mechanics, Khmelnytskyi, Ukraine  
email: nejmakvit@gmail.com, opolishchuk71@gmail.com, tromanec@gmail.com,  
andrijerij@gmail.com

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

**Abstract:** The article considers a graph-analytical method for determining the technological efforts that have to be overcome by the mechanisms of the groove needles of basic knitting machines. The method is supplemented by the photometric method of fixing the position of the five-forming organs and warp threads at different positions of the main shaft and numerical modeling of technological efforts.

**Keywords:** basic knitting machines, numerical modeling, photometric method of fixing the position, five-forming organs, technological effort.

### 1. INTRODUCTION

The main issues of designing the knitting mechanism of basic knitting machines are [1]: determining the necessary movements of the five-forming bodies; development of combined graphs and cycle diagrams; design of articulated levers or gear-lever planetary mechanisms, determination of useful resistance forces, which have to be overcome by mechanisms; calculation of design parameters of mechanisms.

The forces of useful resistance that mechanisms have to overcome are mainly technological efforts. For the mechanism of grooved needles, the main technological forces are formed in the process of looping when the grooved needles interact with the warp threads.

### 2. OBJECTS AND METHODS OF RESEARCH

Analysis of the looping process [1, 2] shows that at different moments of looping, the nature of the interaction of looping organs with the warp threads changes, while the technological loads on the looping organs also change.

To determine the value of technological loads that occur during looping, in particular on grooved needles, the graphoanalytical method is used. The possibilities of using the



experimental method are limited by significant technological difficulties in fixing sensors on needles.

To develop design schemes, experimental studies of the interaction features of grooved needles with warp threads in different periods of looping were previously carried out with accurate fixation of the main shaft rotation angle. The experimental studies were based on the photometric method of fixing the position of looped organs and warp threads at different positions of the main shaft, namely every  $15^\circ$ . To determine the geometric parameters, the loop-forming bodies were fixed in a metric system using rigidly fixed rulers.

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

In fig.1 presents samples of photometric drawings in the most characteristic periods of looping, reflecting the features of interaction of grooved needles with warp threads.

The photos show that the active contact of the grooved needles with the warp threads begins from the moment the warp threads fall under the hook of the grooved needle. According to works in the field of the basics of knitting production [1, 3] and the results of the experiment, the warp threads fall under the hook of the grooved needle during pressing, and for BKM «Kokett-2» this occurs when the main shaft is rotated by  $300^\circ$  (fig.1, d). With further rotation of the main shaft, the degree of contact increases due to changes in the contact geometry. All this leads to an increase in the technological load of the warp threads on the grooved needles, and the maximum value of this load falls on the process of forming the loop and drawbar, when the angle of rotation of the main shaft reaches  $300^\circ - 360^\circ$  (fig.1, e, g). Further, the technological load decreases, and when the angle of rotation of the main shaft  $45^\circ$  approaches the minimum value.

Based on the design features of BKM «Kokett-2» and experimental data, calculation schemes have been developed for determining technological loads that reflect the main characteristic moments of interaction of the base threads with grooved needles, namely at the moments of:

- the cob to the contact of the hook of the grooved heads with the threads of the base (the angle of rotation of the main shaft  $\gamma = 300^\circ$ ) - fig. 2;
- when the grooved needle passes half of the culling depth segment (the angle of rotation of the main shaft  $\gamma = 330^\circ$ ) fig.3;
- in the lowest position of the grooved needle ( angle of rotation of the main shaft  $\gamma = 360^\circ$ ) - fig.4.

The choice of three characteristic positions will allow us to use the approximation method to construct the function of dependence of the technological load of the warp threads on the grooved needles during looping.

When calculating the technological loads of warp threads on grooved needles the following assumptions are made:

- due to the cyclical movement of warp threads along the surface of the grooved needle hook, the thread tension to the right and left of the hook is the same;
- the weight of the warp threads in the filling system does not affect their tension;
- the thread is placed at the shortest distance between the characteristic points of the loop-forming organs;



Figure 1. The process of looping on BKM «Kokett-2» at the moments of: a) guy-the angle of rotation of the main shaft  $\alpha = 0^\circ$ ; b) laying -  $\alpha = 165^\circ$ ; c) removal -  $\alpha = 255^\circ$ ; d) pressing -  $\alpha = 300^\circ$ ; e) culling -  $\alpha = 330^\circ$ ; g) forming  $\alpha = 345^\circ$

- the scheme of culling the warp thread when the comb of the ear needles is shifted follows the 10 th option [4].

Fig. 2 shows the calculated scheme of interaction of the warp thread with the looped organs at the time of contact of the hook of the grooved needle with the warp thread.

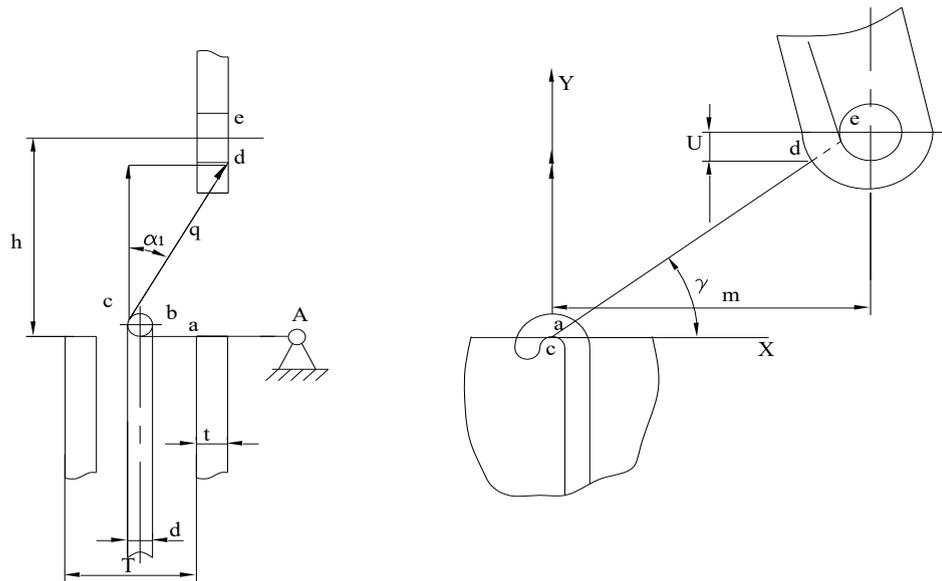


Figure 2. Calculation scheme of interaction of the warp thread with the looped organs at the time of contact of the grooved needle hook with the warp thread

The total force acting on the grooved needles from the tension side of the warp threads is formed by their tangent components from the eyelets  $q_{1B(I)}$  and from the main plate side  $q_{1II(I)}$ :

$$p_I = q_{1B(I)} + q_{1II(I)} \cdot (1)$$

Tension of the warp threads from the side of the eyelets:

$$q_{1B(I)}^I = q_I \times \sin \gamma_I \times \cos \alpha_{1(I)}, (2)$$

where  $\gamma_1 = \arctg \frac{h - \frac{d}{2}}{m - r_2}$ ;  $\alpha_{1(I)} = \arctg \frac{T + t + d}{2h - d}$ .

The tension of the warp threads from the main plate side in the first position is zero.

Fig. 3 shows the calculated scheme of interaction of the warp thread with the looped organs at the time when the grooved needle passes half the culling depth.

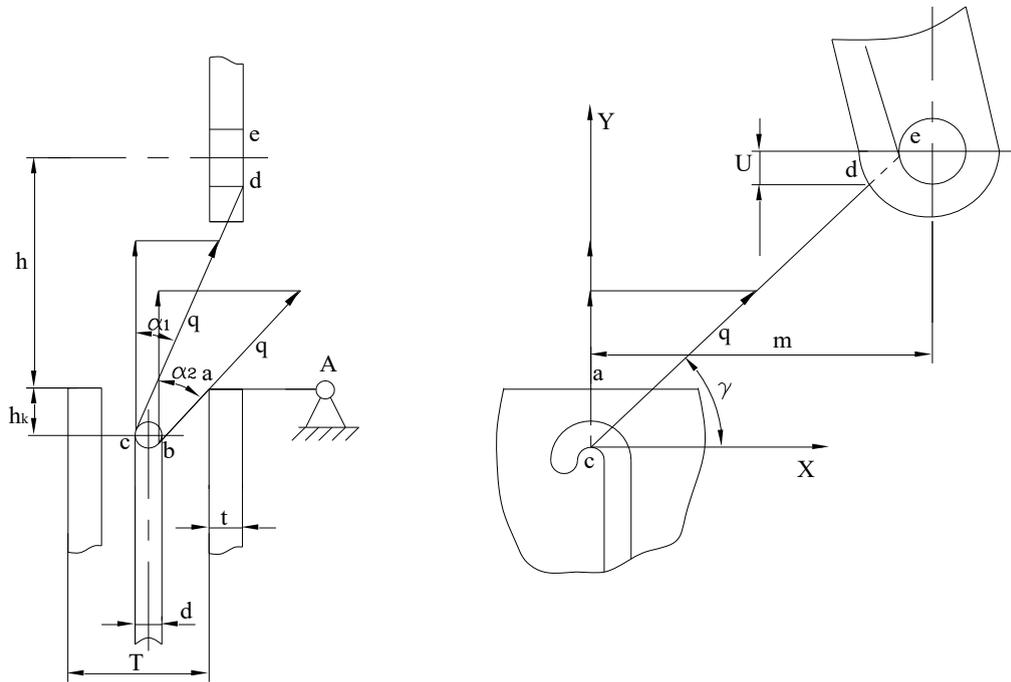


Figure 3. Calculation scheme of interaction of the warp thread with the looped organs at the time of passing half the culling depth by the grooved needle

The total force acting on the grooved needles from the tension side of the warp threads is formed by their tangent components from the eyelets  $q_{1B(II)}$  and from the main plate side

$q_{1II(II)}$ :

$$P_{II} = q_{1B(II)} + q_{1II(II)}. \quad (3)$$

Tension of the warp threads from the side of the eyelets:

$$q_{1B}^{II} = q^{II} \times \sin \gamma_{II} \times \cos \alpha_1^{II}, \quad (4)$$

where  $\gamma_{II} = \arctg \frac{h + \frac{h_k}{2}}{m - r_2}$ ;  $\alpha_{1(II)} = \arctg \frac{T + t + d}{2h + h_k}$ .

Tension of the warp threads from the main plate side:

$$q_{1II(II)} = q \times \cos \alpha_{2(II)}, \quad (5)$$

where  $\alpha_{2(II)} = \arctg \frac{T - t - d}{h_k}$ .

In fig.4 shows the calculated scheme of interaction of the warp thread with looped organs in the lowest position of the grooved needle.

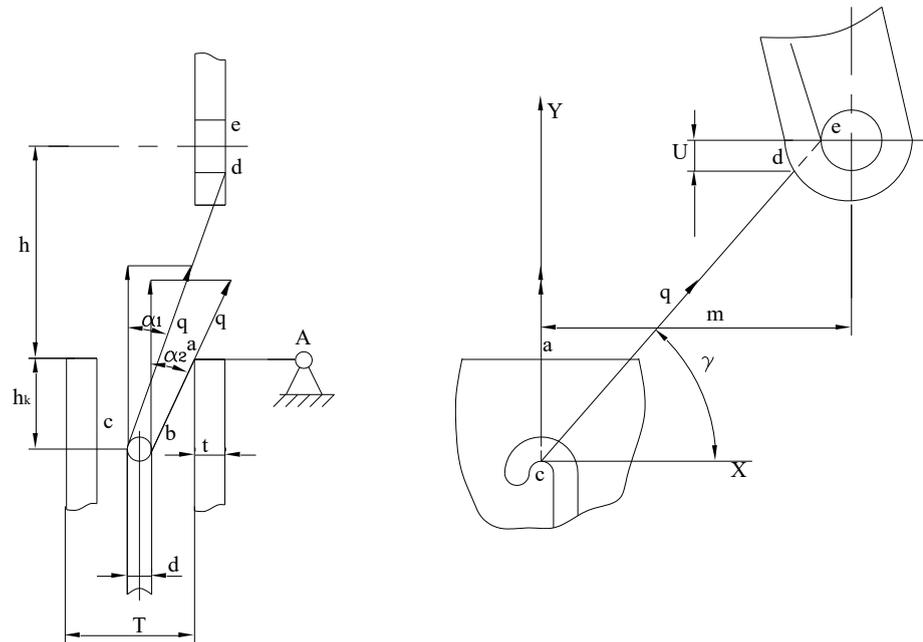


Figure 4. Calculation scheme of interaction of the warp thread with looped organs in the lowest position of the grooved needle

The total force acting on the grooved needles from the tension side of the warp threads is formed by their tangent components from the eyelets  $q_{1B(III)}$  and from the main plate side

$q_{1П(III)}$ :

$$P_{III} = q_{1B(III)} + q_{1П(III)}. \quad (6)$$

Tension of the warp threads from the side of the eyelets:

$$q_{1B(III)} = q_{III} \times \sin \gamma_{III} \times \cos \alpha_{1(III)}, \quad (7)$$

where  $\gamma_{III} = \arctg \frac{h + h_k}{m - r_2}$ ;  $\alpha_{1(III)} = \arctg \frac{T + t + d}{2(h + h_k)}$ .

Tension of the warp threads from the main plate side:

$$q_{1П(III)} = q \times \cos \alpha_{2(III)}, \quad (8)$$

where  $\alpha_{2(III)} = \arctg \frac{T - t - d}{2h_k}$ .

The analysis of the obtained equations shows the possibility of obtaining a generalized mathematical model for determining the total force acting on the grooved needles from the



The equations are valid in the range of changes in the coefficient  $b$  from  $-\frac{d}{2h}$  (the moment of contact of the hook of the grooved needle with the warp thread) to -1 (the moment when the grooved needle is lowered to the lowest position).

Analysis of the waveforms of the tension of the warp threads presented in a number of studies has shown that within the cycle, the tension value changes, while at the time of loop formation, this value is maximum. In fig.5 the presented waveform of tension of the upper base threads is characteristic of BKM «Kokett-2». It is used to obtain the values of the tension of the warp threads when calculating the total force acting on the grooved needles from the side of the tension of the warp threads.

Initial data typical for BKM «Kokett-2»:  $r_2 = 0,75$  mm;  $T = 0,908$  mm;  $t = 0,18$  mm;  $d = 0,5$  mm;  $h = 7,0$  mm;  $h_k = 1,8$  mm;  $m = 9,0$  mm;  $q_I = 2$  cH;  $q_{II} = 2,5$  cH;  $q_{III} = 3,4$  cH.

In the course of calculations, it is established that:

- at the beginning of the contact of the hook of the grooved needles with the warp threads (the angle of rotation of the main shaft  $\gamma = 300^\circ$ ), the total force acting on the grooved needle from the tension side of the warp threads is 1.25 cH;

- when the grooved needle passes half of the culling depth segment (the angle of rotation of the main shaft  $\gamma = 330^\circ$ ), the total force acting on the grooved needle from the tension side of the warp threads is 4.21 cH;

- in the lowest position of the grooved needle (the angle of rotation of the main shaft  $\gamma = 360^\circ$ ), the total force acting on the grooved needle from the tension side of the warp threads is 5.85 cH.

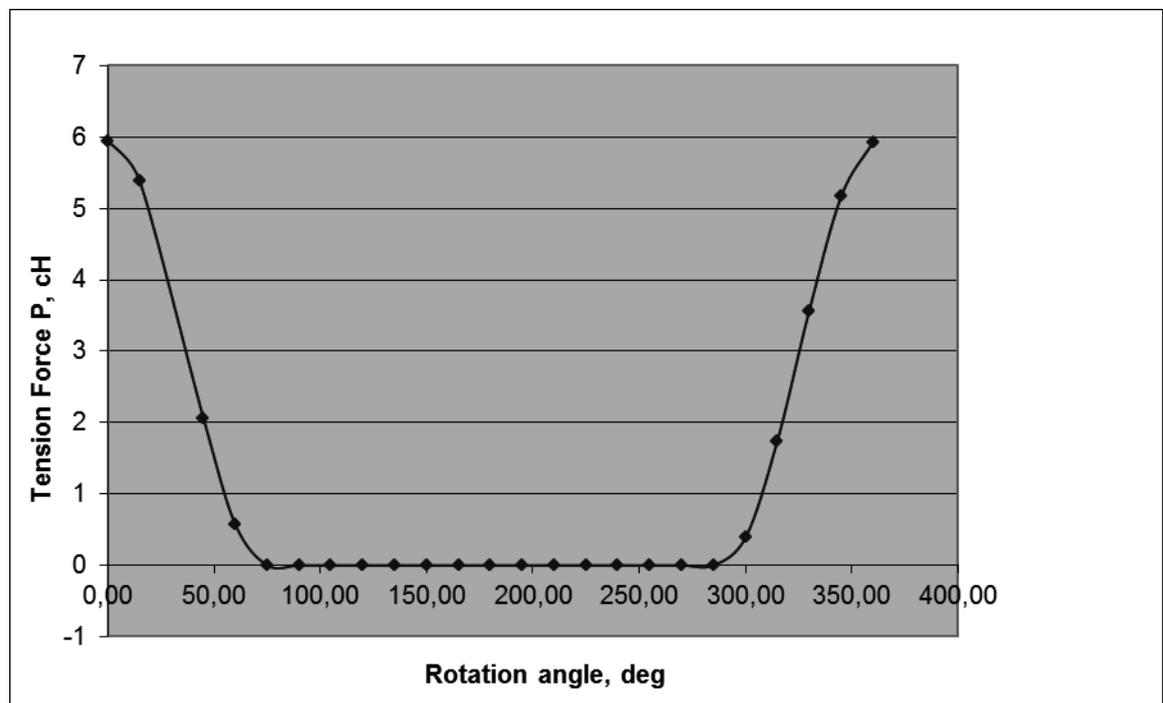


Figure 6. The value of the force acting on the grooved needles and formed by the tension of the warp threads

Based on the obtained data, graphical dependences of the total force acting on the grooved needle from the tension side of the warp threads on the angle of rotation of the main shaft are constructed (fig.6).

The resulting graphical dependence can be represented in the form of a mathematical dependence of the force acting on the grooved needles and formed by the tension of the warp threads on the angle of rotation of the main shaft of the BKM:

$$\begin{cases} \text{when } 0 < \phi \leq 75^\circ & y = 2,95 \left( \cos \left( \frac{\pi}{75} \cdot \phi \right) + 1 \right); \\ \text{when } 75^\circ < \phi \leq 285^\circ & y = 0; \\ \text{when } 285^\circ < \phi \leq 360^\circ & y = 2,95 \left( \cos \left( \frac{\pi}{75} \cdot \phi + \frac{\pi}{180} \cdot 210 \right) + 1 \right). \end{cases} \quad (12)$$

#### 4. CONCLUSIONS

The obtained dependences of the force acting on the grooved needles and the tension of the warp threads formed on the angle of rotation of the main shaft are the initial data for conducting studies of the mechanism of grooved needles using modern computer programs, in particular CosmosMotion.

#### BIBLIOGRAPHY

1. F. A. Moiseenko, Design of knitting machines: textbook for universities, Kharkiv, OsnovaPubl., 1994, 336 p.
2. B. A. Kuznetsov, Calculation and design of the loop-forming system of basic machines, Moscow, Legprombytizdat Publ., 1989, 152 p.
3. M. Katzenelenbogen, L. D. Verkhovina, Design, operation and maintenance of warp knitting machines, Moscow, Light and food industry, 1982, 304 p.
4. G. B. Paraska, V. M. Khomyak, Investigation of the influence of the direction of shift of abalone needles on the thread consumption function of a warp knitting machine, Izv. Universities, Light industry technology, 1986, No. 1, P. 101-106.



## **Konwencjonalne materiały narzędziowe (stal) oraz materiały narzędziowe o osnowie fazy wiążącej (węgliki spiekane, cermetale) oraz obróbka powierzchniowa tych materiałów**

M. Olszowska <sup>a</sup>, A. Kloc-Ptaszna <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny  
email: magdols407@student.polsl.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych  
email: anna.kloc-ptaszna@polsl.pl

**Streszczenie:** W artykule opisano charakterystykę, własności i zastosowanie stali narzędziowych, węglików spiekanych i cermetali narzędziowych na podstawie aktualnie obowiązującej literatury. Następnie przedstawiono metody obróbki powierzchniowej poprawiającej własności użytkowe elementów wytworzonych z tych materiałów, takich jak osadzanie powłok czy obróbka laserowa.

**Abstract:** The article describes the characteristics, properties and application of tool steels, sintered carbides and cermets based on the applicable literature. Then presented the methods of surface treatment improving the functional properties of elements made of these materials, such as coating deposition or laser processing.

**Słowa kluczowe:** stal narzędziowa, węgliki spiekane, cermetale narzędziowe, obróbka powierzchniowa, PVD, obróbka cieplno-chemiczna, obróbka laserowa

### **1. WSTĘP**

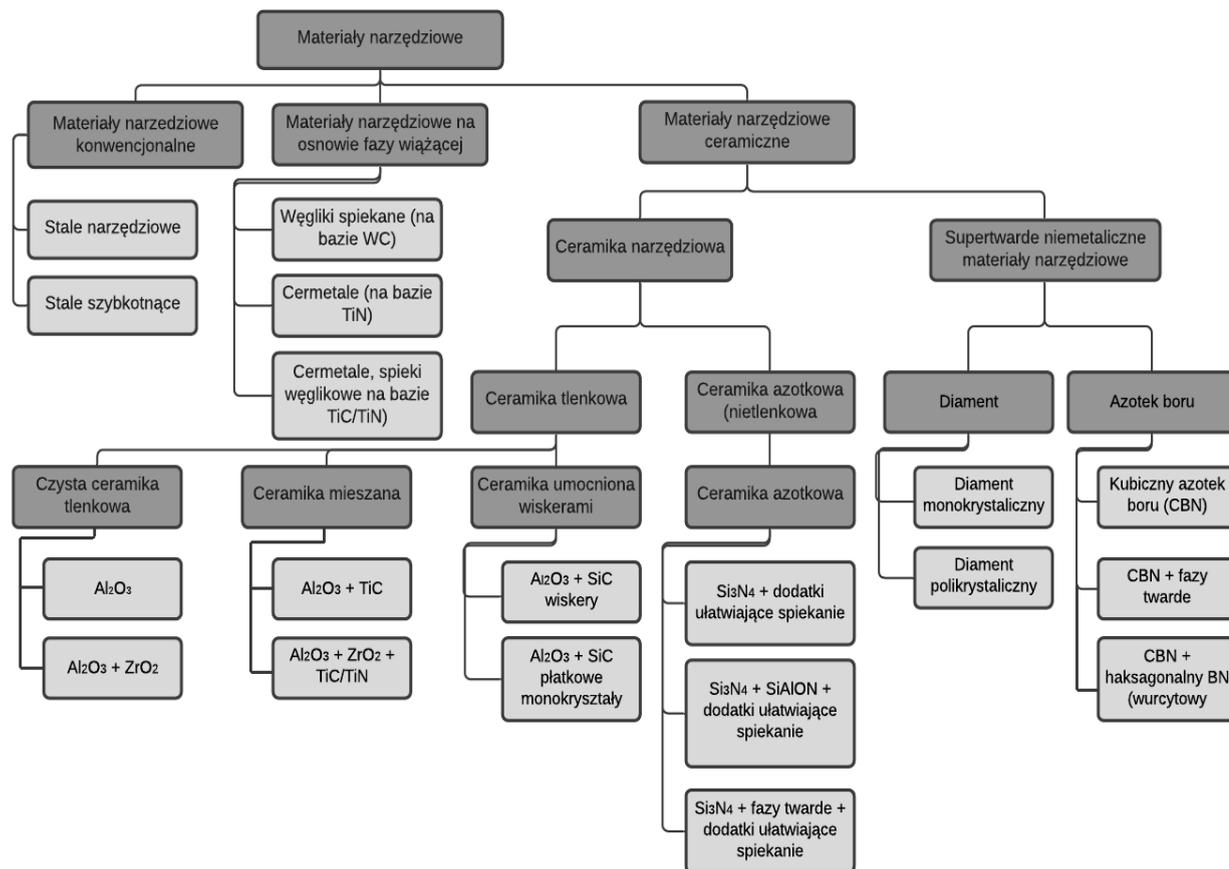
Stale szybko tnące oraz węgliki spiekane są obecnie jednymi z najczęściej wykorzystywanych materiałów narzędziowych [1]. Obok nich szerokie zastosowanie znajdują również pozostałe stale narzędziowe, czy cermetale należące do grupy materiałów narzędziowych o osnowie fazy wiążącej [1,2]. Te materiały wykorzystywane są w przemyśle głównie do produkcji narzędzi skrawających, od których wymaga się specjalnych własności takich jak m.in. wysoką twardość, która musi znacznie przewyższać twardość obrabianego materiału, wysoką odpornością na zużycie ścierne i adhezyjne, czy odporność na skrawanie w podwyższonych temperaturach [1]. Te oraz inne właściwości są niezbędne do wyprodukowania dobrego i ekonomicznego narzędzia skrawającego. Niestety wymienione materiały pomimo swojej wysokiej twardości i relatywnie dobrej odporności na ścieranie

zużywają się dosyć szybko. Poprawę własności tych materiałów można uzyskać stosując odpowiednio dobraną obróbkę powierzchniową, która głównie polega na osadzaniu powłok przeciwzużyciowych z twardych materiałów. Stosowanie takiej obróbki znacznie zwiększa twardość powlekanych narzędzi oraz zmniejsza ich zużycie ściernie co przekłada się na dłuższą ich żywotność [1,4,13].

W artykule przedstawiono przegląd materiałów narzędziowych konwencjonalnych (stali) oraz na osnowie fazy wiążącej (węglików spiekanych, cermetali), opisano ich własności, zastosowanie oraz obróbkę powierzchniową poprawiającą ich własności użytkowe na podstawie najnowszej literatury.

## 2. KONWENCJONALNE MATERIAŁY NARZĘDZIOWE (STAL)

**Materiały narzędziowe** to materiały stosowane do produkcji narzędzi skrawających. Zastosowane podczas obróbki narzędzia skrawające mają decydujący wpływ na jakość obrabianego przedmiotu, jego dokładność i cechy użytkowe, a także w dużym stopniu na wydajność obróbki oraz jej finalny koszt [1]. Istnieje kilka podziałów materiałów narzędziowych m.in. ze względu na rodzaj obróbki do jakiej są przeznaczone, materiału z jakiego są wykonane (Rysunek 1) oraz w jakich warunkach będą pracować [2].



Rysunek 1. Przegląd nowoczesnych materiałów narzędziowych [1,2]

Figure 1. Review of modern tool materials [1,2]

Ze względu na charakter pracy, jak i różnorodność mechanizmów powstałych podczas zużycia, którym podlegają ostrza narzędzi skrawających, jakość materiałów narzędziowych powinna spełniać odpowiednie wymagania, a w tym celu materiały powinny charakteryzować się następującymi własnościami:

- dużą twardością (znacznie większą od obrabianego materiału),
- dużą wytrzymałością na ściskanie, rozciąganie, skręcanie i zginanie,
- wysoką odpornością na zużycie (ścierne, adhezyjne, dyfuzyjne i chemiczne),
- dużą udarnością,
- dużą odpornością na zmęczenie mechaniczne i cieplne,
- znaczną odpornością na zmianę zdolności skrawnych w podwyższonej temperaturze,
- dobrą przewodnością cieplną i wysokim ciepłem właściwym,
- stabilnością krawędzi skrawających,
- dużą ciągliwością.

Żaden materiał narzędziowy nie spełnia jednocześnie wszystkich wymienionych właściwości tym bardziej, że niektóre z nich wzajemnie się wykluczają. W konsekwencji prowadzi to do ustalenia zakresu zastosowań określonych grup materiałów, w przypadku których minimalizacja zużycia, a w konsekwencji okres trwałości, stanowią podstawowe kryterium doboru określonego rodzaju materiału [1].

## 2.1 Stale narzędziowe

**Stale narzędziowe** są przeznaczone do wyrobu wszelkiego rodzaju narzędzi służących do obróbki różnych materiałów drogą skrawania lub obróbki plastycznej oraz narzędzi pomiarowych i sprawdzianów. Cechują się większą zawartością węgla i pierwiastków stopowych w porównaniu do stali konstrukcyjnych (zwłaszcza węglotwórczych).

Z racji przeznaczenia stalom narzędziowym stawia się określone wymagania. Takie stale powinny charakteryzować się możliwie dużą twardością i odpornością na ścieranie. Na takie właściwości szczególnie wpływają dodatki stopowe, które w stalach narzędziowych tworzą złożone węgliki. Od stali narzędziowych wymaga się również ciągliwości (w przypadku stali pracujących w warunkach obciążeń dynamicznych) oraz zachowanie tych właściwości w wysokich temperaturach (szczególnie jeżeli chodzi o twardość), ze względu na wydzielanie się dużych ilości ciepła na skutek tarcia podczas skrawania [4]. Podział stali narzędziowych przedstawiono na Rysunku 2.



Rysunek 2. Podział stali narzędziowych [3]

Figure 2. Classification of tool steels [3]

## 2.2 Niestopowe stale narzędziowe do pracy na zimno

Niestopowe stale narzędziowe do pracy na zimno są przeznaczone na narzędzia, które pracują w stosunkowo niskich temperaturach gdyż ogrzane tracą swoją twardość już od około 200°C. Stale węglowe stosuje się do wyrobu narzędzi przeznaczonych do obróbki materiałów z niewielką szybkością skrawania, przy czym narzędzie powinno mieć prosty kształt. Podstawowe wymagania stawiane stalom narzędziowym do pracy na zimno to wysoka twardość wynosząca około 60 HRC, która wynika z dużej zawartości węgla w stali oraz odpowiedniej obróbki cieplnej, odporność na ścieranie, która ma za zadanie chronić narzędzia przed niszczącym działaniem sił tarcia, ciągliwość i wytrzymałość zabezpieczające narzędzia przed pękaniem przy obciążeniach dynamicznych oraz odpowiednia hartowność gwarantująca uzyskanie żądanej warstwy zahartowanej [5].

Wytworzone narzędzia ze stali węglowych poddaje się hartowaniu i odpuszczaniu. Austenitizowanie przeprowadza się w temperaturach 30-50°C powyżej linii  $Ac_3$  (stale podeutektoidalne) i  $Ac_1$  (stale eutektoidalne i nadeutektoidalne). Bardzo intensywne chłodzenie narzędzi podczas hartowania, w wodzie lub w solance, wywołuje znaczne naprężenia w stali i może spowodować odkształcenia trwałe narzędzi (paczenie) oraz pęknięcia hartownicze. Po hartowaniu stal uzyskuje strukturę martenzytyczną, a nadeutektoidalna - martenzytyczną z cementytem wtórnym. Odpuszczanie stali przeprowadza się w celu usunięcia naprężeń w zakresie temperatur 180-300°C [5].

## 2.3 Stopowe stale narzędziowe do pracy na zimno

Stopowe stale narzędziowe do pracy na zimno przeznaczone są na narzędzia pracujące w temperaturach nie przekraczających 200-250°C. Są to stale wysokowęglowe o zawartości węgla od 0,75-2,10% lub średniowęglowe o zawartości węgla około 0,5%. Głównymi dodatkami stopowymi są chrom, wanad i wolfram ale ponadto występują dodatki takie jak mangan, krzem, nikiel i molibden. Suma dodatków stopowych tego rodzaju stali nie przekracza kilkunastu procent. Stale wysokowęglowe służą głównie do wyrobu narzędzi skrawających, dlatego wymaga się od nich przede wszystkim wysokiej twardości i odporności na ścieranie. Stale średniowęglowe natomiast stosuje się na narzędzia odporne na obciążenia dynamiczne [5].

Narzędzia ze stali stopowych do pracy na zimno hartowane są z temperatur 30-50°C powyżej  $Ac_1$ , w wypadku stali nadeutektoidalnych, a stali ledeburtycznych z temperatur 30-50°C powyżej  $Ac_{cm}$ . Nagrzewanie narzędzi ze stali wysokostopowych o skomplikowanych kształtach przeprowadza się kilkustopniowo dla zminimalizowania naprężeń cieplnych. W stalach nadeutektoidalnych podczas austenitizowania stopowe węgliki wtórne pozostają nie rozpuszczone. W stalach ledeburtycznych natomiast węgliki wtórne rozpuszczają się w austenicie całkowicie lub w większości, zaś stopowe węgliki pierwotne pozostają nie rozpuszczone. Temperatura i czas austenitizowania narzędzi ze stali stopowych do pracy na zimno są dobrane w taki sposób, aby pozostawić pewną część węglików nie rozpuszczonych w austenicie, co zapewni drobnoziarnistość struktury oraz wyższą odporność na ścieranie narzędziom. Jednocześnie zbyt małe nasycenie austenitu pierwiastkami stopowymi mogłoby zmniejszyć hartowność i obniżyć właściwości mechaniczne stali po obróbce cieplnej [5].

### 2.3 Stopowe stale narzędziowe do pracy na gorąco

Stale narzędziowe stopowe do pracy na gorąco przeznaczone są na narzędzia pracujące do około 600°C przy dużych obciążeniach statycznych lub dynamicznych. Głównie służą do wytwarzania narzędzi do przeróbki plastycznej metali na gorąco. Ponieważ w tym stanie przerabiany metal jest plastyczny, narzędzia nie muszą odznaczać się tak dużą twardością i odpornością na ścieranie jak narzędzia do pracy na zimno. Muszą posiadać natomiast wysoką wytrzymałość w temperaturze pracy, z czym wiąże się odporność na odpuszczanie, odporność na obciążenia dynamiczne, na zmęczenie cieplne, odporność na ścieranie w podwyższonych temperaturach i odporność korozyjną. Stale narzędziowe stopowe do pracy na gorąco zawierają od 0,25% do 0,6% węgla. Suma pierwiastków stopowych, głównie chromu, molibdenu, wolframu, wanadu a ponadto niklu, manganu, krzemu, i kobaltu nie przekracza kilkunastu procent [5].

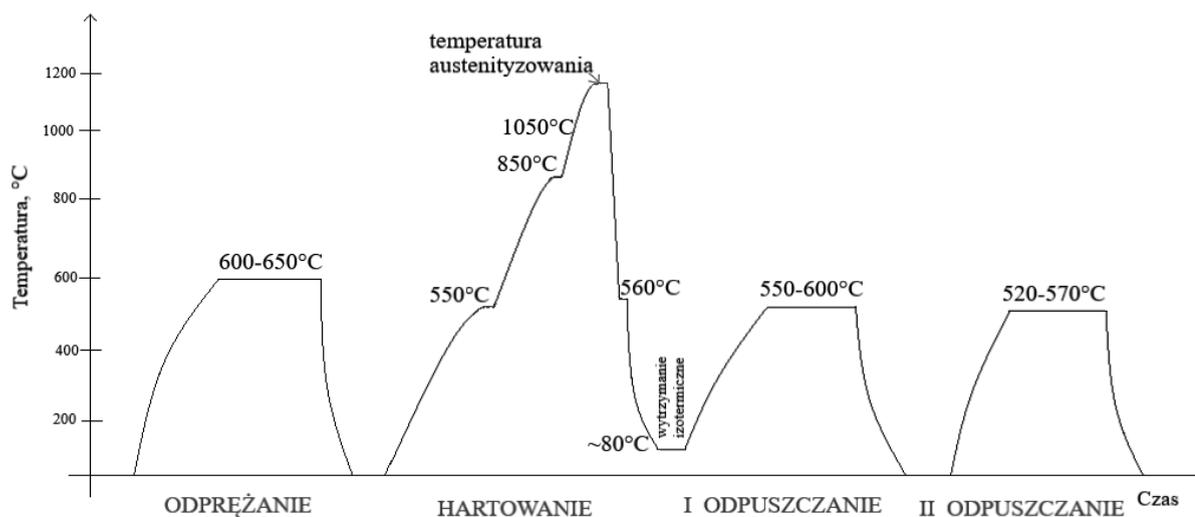
Narzędzia do pracy na gorąco ze stali niskostopowych hartuje się z temperatury 850-900°C, a wysokostopowych z temperatury 1050-1150°C. Temperatura austenitzowania stali wysokostopowych, zawierających więcej trudno topliwych stopowych węglików, jest wyższa dla rozpuszczenia wystarczającej ich ilości w austenicie. Nagrzewanie do hartowania, szczególnie dużych narzędzi, prowadzi się stopniowo z małymi szybkościami. Z uwagi na zwykle duże wymiary narzędzi czas austenitzowania może dochodzić do kilku godzin. Chłodzenie przeprowadza się w oleju lub powietrzu. Po hartowaniu stal uzyskuje strukturę martenzytu z niewielką ilością austenitu szczątkowego i węglnikami stopowymi, nie rozpuszczonymi podczas austenitzowania. Odpuszczanie stali niskostopowych następuje w zakresie 450-550°C, a wysokostopowych od 450-700°C. Po odpuszczaniu struktura składa się z martenzytu odpuszczonego z drobnodispersyjnymi węglnikami wydzielonymi podczas odpuszczania i większymi, skoagulowanymi, nie rozpuszczonymi podczas austenitzowania [5].

### 2.4 Stale szybko tnące

Stale szybko tnące stosowane są na narzędzia skrawające z dużymi szybkościami, podczas których temperatura ostrza może osiągnąć 600-650°C. W tak trudnych warunkach pracy stale te muszą odznaczać się zdolnością zachowywania dużej twardości i odporności na ścieranie dzięki niewrażliwości na odpuszczające działanie podwyższonych temperatur. Właściwości stali szybko tnących wynikają zarówno z ich specyficznego składu chemicznego, jak i obróbki cieplnej. Wysoka zawartość węgla, 0,75-1,45%, oraz dodatków stopowych łącznie przekraczająca nawet 25%, jest tak dobrana, by w temperaturze otoczenia w stanie wyżarzonym pierwiastki te były prawie całkowicie związane w węglkach, a węgliki występowały w ilości przekraczającej ich rozpuszczalność w czasie austenitzowania. Wtedy węgliki te zapobiegają rozrostowi ziarn w wysokiej temperaturze i zwiększają odporność na ścieranie stali po zahartowaniu. Składniki stopowe, które zwiększają odporność na odpuszczanie, są pierwiastkami tworzącymi trwałe węgliki: Cr, W, Mo i V. Pierwiastki te hamują spadek twardości w podwyższonych temperaturach odpuszczania wskutek zjawiska twardości wtórnej. Podstawowymi składnikami stali szybko tnących są: wolfram i molibden. W zależności od rodzaju i zawartości pierwiastków stopowych stale szybko tnące można

podzielić na: wolframowe, molibdenowe i kobaltowe. Stale szybko tnące po odlaniu mają strukturę ledeburtyczną. Celem rozbicia siatki eutektyki przeprowadza się kucie w zakresie temperatur 1150-900°C. Wielokrotne przekucie powoduje rozdrobnienie i równomierne rozmieszczenie węglików w ferrycie stopowym, co korzystnie wpływa na właściwości użytkowe stali. Następnym zabiegiem jest wyżarzanie zmiękczające w 800-850°C, w czasie do kilkunastu godzin, które wywołuje zmniejszenie twardości poniżej 300 HB. Struktura stali szybko tnących w stanie wyżarzonym składa się z ferrytu stopowego i równomiernie rozłożonych sferoidalnych węglików stopowych, stanowiących około 30% objętości. Wyróżnia się duże węgliki pierwotne utworzone podczas krzepnięcia stali oraz małe wtórne, wydzielone w wyniku zmniejszania ich rozpuszczalności w austenicie [5].

Narzędzia ze stali szybko tnących poddaje się hartowaniu i odpuszczaniu według schematu przedstawionego na Rysunku 3. Podgrzewanie narzędzi do hartowania przeprowadza się dwustopniowo lub trójstopniowo z wytrzymaniem w temperaturze 550°C i 850°C. Temperatura austenitowania jest o około 50÷70°C niższa od temperatury solidusu i wynosi ok. 1280°C. Tak wysoka temperatura umożliwia rozpuszczanie węglików i nasycenie austenitu węglem i pierwiastkami stopowymi. Czas austenitowania wynosi 80-150s i jest niezależny od wielkości narzędzia. Zbyt wysoka temperatura austenitowania lub przedłużony czas powoduje wzrost ziarn austenitu, zwiększenie ilości austenitu szczytkowego i w konsekwencji obniżenie twardości po zahartowaniu. Ponadto stwarza niebezpieczeństwo nadtopienia ostrych krawędzi narzędzia. Zbyt niska temperatura austenitowania nie zapewnia prawidłowego rozpuszczania węglików w osnowie, co powoduje mniejszą twardość stali po odpuszczeniu. Austenitowanie przeprowadza się zwykle w kąpielach solnych [5].



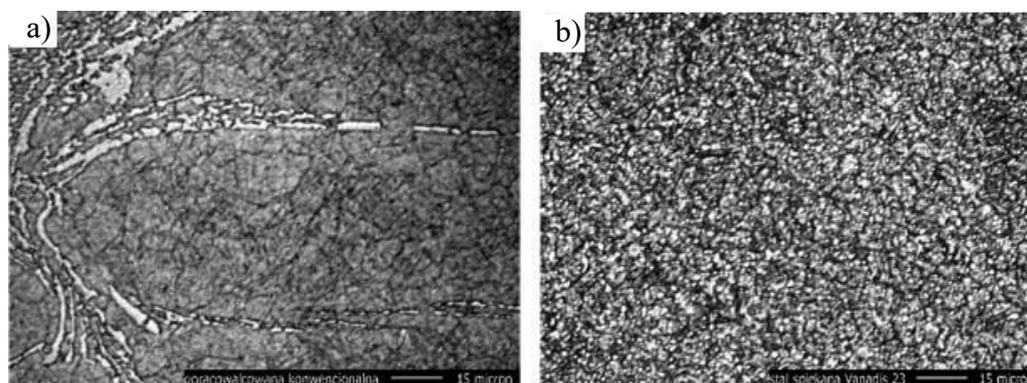
Rysunek 3. Przykładowy schemat obróbki cieplnej stali szybko tnącej [5,9]

Figure 3. An exemplary diagram of the heat treatment of high-speed steel [5,9]

## 2.6 Spiekane stale szybko tnące

Spora część stali narzędziowych stopowych jest wytwarzana rozwiniętymi metodami metalurgii proszków. W ten sposób wytwarza się głównie spiekane stale szybko tnące, ale także stale narzędziowe stopowe do pracy na zimno oraz niektóre stale na matryce do przetwórstwa materiałów polimerowych. Stale wytworzone tą technologią, w tym głównie spiekane stale szybko tnące, cechują się strukturą z o wiele bardziej równomiernym rozłożeniem węglików w osnowie od gatunków konwencjonalnych [6].

Struktura konwencjonalnych stali szybko tnących charakteryzuje się zwykle nierównomiernym rozkładem, wymiarami i pasmowością węglików (Rysunek 4a) [1]. W spiekanych stalach szybko tnących nie ujawnia się segregacja węglików (Rysunek 4b), gdyż nie występują w nich duże węgliki, które w stalach konwencjonalnych pochodzą z węglików dendrytycznych rozbitych w trakcie obróbki plastycznej. Taka równomierna struktura występująca w spiekanych stalach szybko tnących ułatwia ich obróbkę cieplną [6]. Porównanie mikrostruktur konwencjonalnej oraz spiekanej stali szybko tnącej przedstawiono na Rysunku 4.



Rysunek 4. Obrazy elektronów wtórnych zglądów stali szybko tnącej: a) konwencjonalnej walcowanej na gorąco, b) spiekanej [7]

*Figure 4. Images of secondary electrons of high-speed steel: a) conventional hot-rolled, b) sintered [7]*

Spiekane stale szybko tnące są poddawane obróbce cieplnej, polegającej na hartowaniu i co najmniej dwukrotnym odpuszczaniu, analogicznej jak stale konwencjonalne. Podczas obróbki tej w stalach spiekanych zachodzą analogiczne przemiany fazowe, jak w stalach konwencjonalnych o identycznym składzie chemicznym [6].

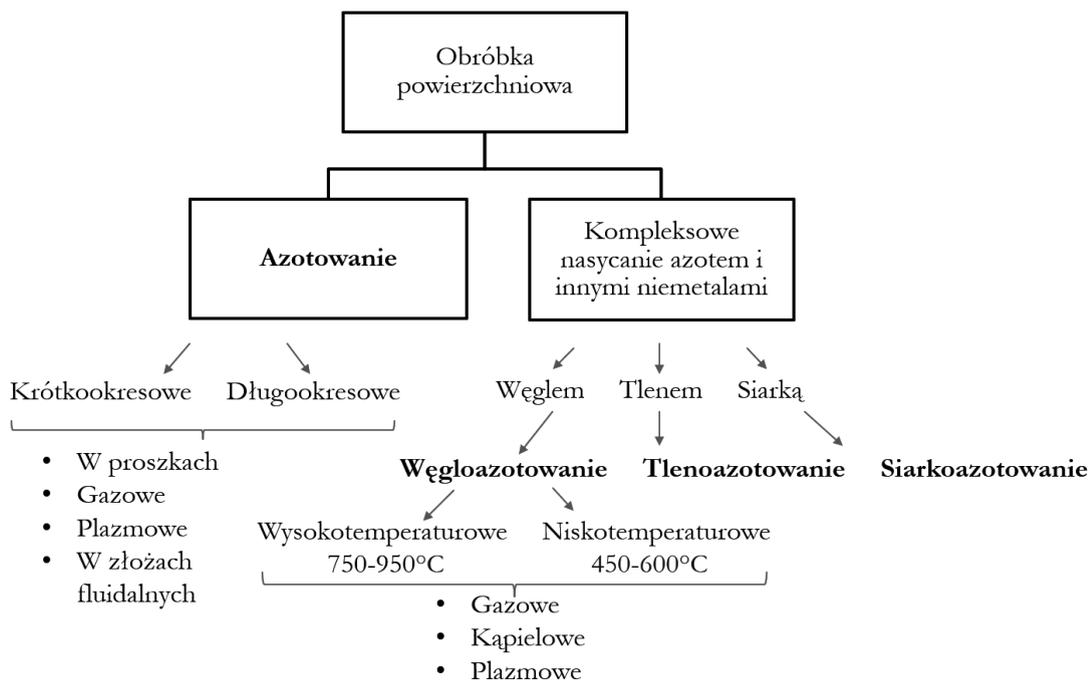
## 3. OBRÓBKA POWIERZCHNIOWA KONWENCJONALNYCH MATERIAŁÓW NARZĘDZIOWYCH

Podczas intensywnej pracy narzędzia ze stali szybko tnącej mogą ulec lokalnemu nagraniu nawet do około 900°C, co powoduje zmniejszenie twardości i odporności na ścieranie, zwiększenie deformacji plastycznej i finalnie stępienie ostrza. Wymagania stawiane materiałom narzędziowym dotyczą przede wszystkim zachowania możliwie dużej twardości i odporności na ścieranie w wysokich temperaturach obróbki [1]. W tym celu stosuje

się rozmaite metody obróbki powierzchniowej materiałów narzędziowych, które mają zapewnić te cechy narzędziom i finalnie przełożyć się na ich dłuższą eksploatację. Metodami takimi może być osadzanie powłok przeciwzużyciowych, osadzanie warstw za pomocą obróbki cieplno-chemicznej oraz połączenie tych dwóch metod w formie obróbki hybrydowej powierzchni [1,4,13].

### 3.1 Konwencjonalna obróbka cieplno-chemiczna

Jedną z metod zwiększania odporności na ścieranie i oddziaływanie wysokiej temperatury może być nowo konstytuowana warstwa wierzchnia. Narzędzia ze stali szybko tnących najczęściej są poddawane niskotemperaturowym procesom azotowania i jego pochodnym. Obróbce tej poddaje się głównie narzędzia wielostrzowe wykonane z konwencjonalnych, jak i spiekanych stali szybko tnących [1]. Azotowanie jest stosunkowo tania i skuteczną techniką termochemicznej inżynierii powierzchni do modyfikacji powierzchni stali i innych materiałów. Obecnie jedną z popularniejszych metod jest azotowanie plazmowe, które wyparło metody konwencjonalne jak azotowanie w kąpielach solnej czy w ośrodku gazowym [9].



Rysunek 5. Schemat podziału obróbki powierzchniowej na azotowanie oraz kompleksowe nasycanie azotem i innymi niemetalami z uwzględnieniem metod wytwarzania danych warstw [8]

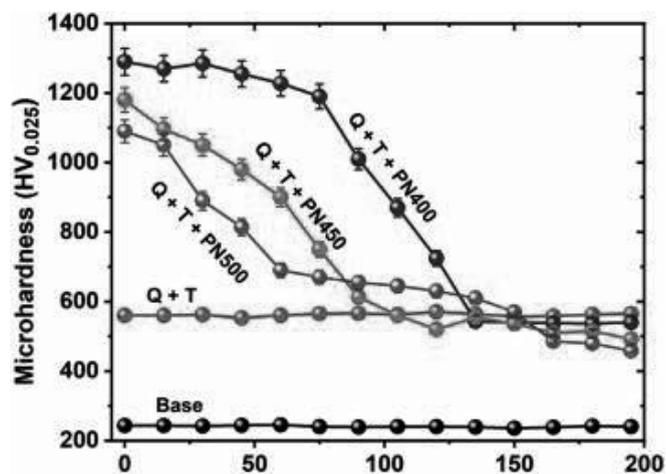
Figure 5. Scheme of division of surface treatment into nitriding and complex saturation with nitrogen and other non-metals, taking into account the methods of creating layers [8]

Azotowanie polega na nasycaniu warstwy powierzchniowej stali azotem podczas wygrzewania obrabianego przedmiotu przez określony czas w ośrodku zawierającym wolne atomy azotu. Operacja ta jest wykonywana w temperaturze niższej od  $Ac_1$ . Azotowanie może



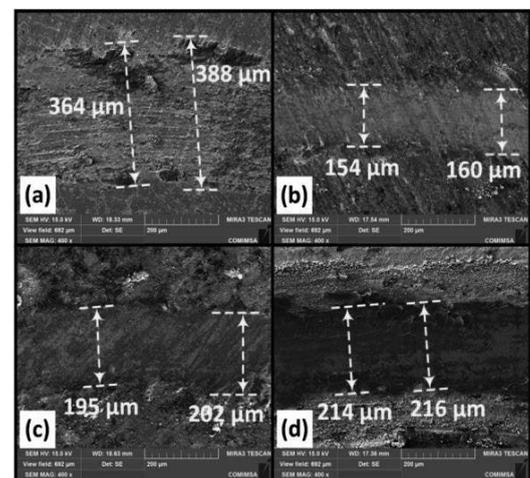
być krótkookresowe (czas trwania wynosi od kilkunastu minut do kilku godzin) lub długookresowe (czas trwania wynosi kilkadziesiąt godzin). Dodatkowo oprócz konwencjonalnego azotowania coraz szersze znaczenie praktyczne zyskują procesy technologiczne kompleksowego nasycania azotem i innymi niemetalami m.in.: węglem, tlenem i siarką (Rysunek 5) [8].

Azotowanie prowadzi do zwiększenia twardości powierzchni materiału co znacznie wpływa na jego finalne zużycie. Wzrost twardości w wyniku obróbki wtórnej azotowania plazmowego po hartowaniu i odpuszczaniu spowodowany jest dyfuzją azotu w narzędziu i powstawaniem twardych faz azotkowych [11]. Na Rysunku 6 przedstawiono profil zmienności mikroztwardości w głąb materiału stali narzędziowej AlSi M2 dla próbek, które były hartowane i odpuszczane (Q+T), hartowane, odpuszczane i azotowane plazmowo (Q+T+PN) w różnych temperaturach obróbki: 400°C (Q+T+PN400), 450°C (Q+T+PN450), 500°C (Q+T+PN500) oraz dla materiału podstawowego [11].



Rysunek 6. Ślady zużycia a) próbki podstawowej i próbek azotowanych w różnych temperaturach b) 400 °C, c) 450 °C i d) 500 °C [11]

*Figure 7. Wear tracks of (a) base sample and nitrided samples at various temperatures (b) 400 °C, (c) 450 °C and (d) 500 °C [11]*



Rysunek 7. Zmienność mikroztwardości wraz z głębokością różnych poddanych obróbce próbek [11]

*Figure 6. Microhardness variation with depth of various treated samples [11]*

Jak można zaobserwować (Rysunek 6) w badaniu [11] wykazano że azotowanie plazmowe stali narzędziowej ma znaczny wpływ na jego twardość powierzchniową. Podczas badania [11] zużycia ściernego (Rysunek 7) można zaobserwować, że dla próbki podstawowej ślad zużycia był największy, co potwierdza, że azotowanie ma znaczny wpływ na poprawę zużycia powierzchni komponentów wykonanych ze stali narzędziowych.

### 3.2 Osadzanie powłok przeciwzużyciowych

W celu polepszenia właściwości eksploatacyjnych narzędzi ze stali szybkoobrotowych można stosować osadzanie powłok przeciwzużyciowych za pomocą różnych technologii. Początkowo stosowane były głównie twarde warstwy TiC i TiN nakładane techniką CVD. Jednakże lepszą metodą wkrótce okazało się stosowanie technologii PVD ze względu na brak konieczności wykorzystywania wysokich temperatur podczas procesu, która w przypadku CVD była znacznie wyższa od temperatury odpuszczania stali szybkoobrotowych [1].

Najważniejsze powłoki stosowane w procesach obróbki skrawaniem dla narzędzi ze stali szybkoobrotowych przedstawiono w Tabeli 1. Zwykle zastosowanie prostej warstwy TiN na wiertła kręte ze stali szybkoobrotowej, zwiększają okres trwałości przy obróbce stali konstrukcyjnej chromowo-molibdenowej 40HM, z prędkością skrawania  $v_c=40\text{m/min}$ , o około 500% w porównaniu z wiertłami azotowanymi i o około 700% w porównaniu z wiertłami bez powłoki [1].

Tabela 1. Wybrane właściwości fizyczne i mechaniczne najważniejszych powłok stosowanych w procesach obróbki skrawaniem dla narzędzi ze stali szybkoobrotowych [1]

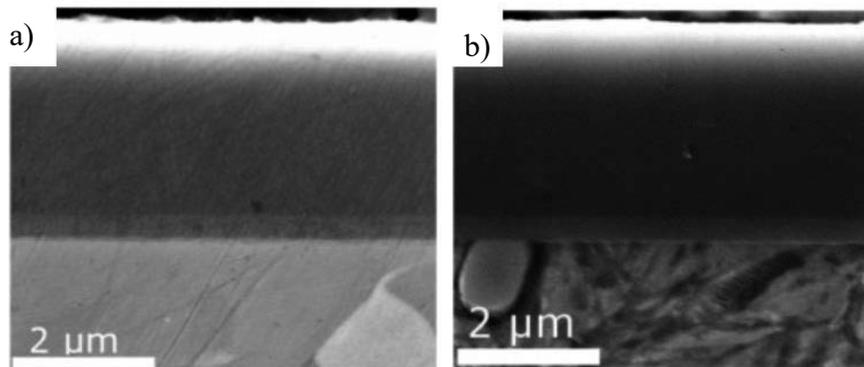
*Table 1. Selected physical and mechanical properties of the most important coatings used in machining processes for high-speed steel tools [1]*

Rodzaj powłoki	TiN	Ti(Al,N)	Ti(C,N)	CrN
Proces	PVD	PVD	PVD	PVD
Temperatura procesu, °C	450-500	350	450-500	<500
Podłoże	stal szybkoobrotowa, węgliki spiekane	stal szybkoobrotowa, węgliki spiekane	stal szybkoobrotowa, węgliki spiekane	stal szybkoobrotowa
Kolor powłoki	złoty	czarny	fioletowy	szary
Grubość powłoki, $\mu\text{m}$	1,5-3	1,5-3	4-8	1-3
Twardość w temperaturze 273K, HV0,05	2200-2300	2700-3300	3000	1750
Współczynnik tarcia w parze ze stalą (na sucho)	0,4	0,3-0,4	0,25-0,4	0,5

### 3.3 Hybrydowa obróbka powierzchni

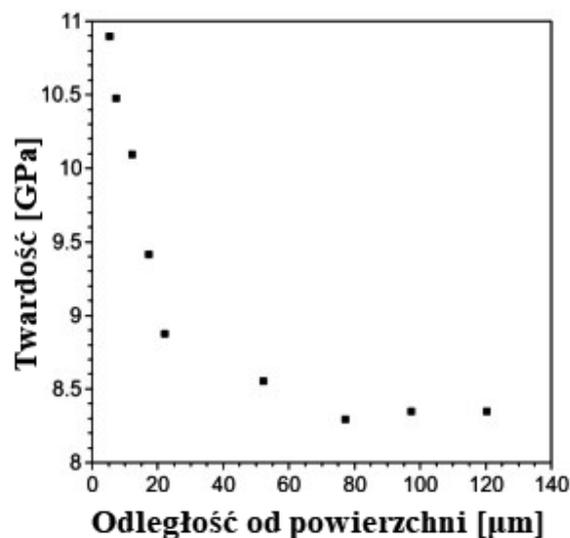
Obróbka hybrydowa powierzchni polega na modyfikacji warstwy wierzchniej za pomocą różniących się od siebie technologii. Ten rodzaj obróbki łączy ze sobą właściwości otrzymane różnymi metodami osadzania warstw i ma na celu otrzymanie warstwy hybrydowej o cechach lepszych w porównaniu do konwencjonalnej obróbki. Przykładem jest osadzanie warstwy azotowanej na powierzchnię narzędzi ze stali narzędziowych oraz późniejsze osadzanie na nią powłok metodami PVD. Powłoki składające się z azotowanego podłoża stalowego i twardej powłoki PVD mogą wykazywać wysoką twardość i wysokie właściwości ściernie powłok PVD w połączeniu ze zwiększoną odpornością zmęczeniową i właściwościami przenoszącymi obciążenia azotowanego podłoża [12].

W pracy [12] zbadano właściwości powłok osadzonych na stal szybko tnącą HSS-M2, które zostały poddane azotowaniu plazmowemu oraz powleczone TiAlN metodą PVD. Na Rysunku 8 przedstawiono zdjęcia przełomów stali z powłoką TiAlN oraz powłoką azotowaną + TiAlN. Na Rysunku 9 przedstawiono wykres profilu twardości w zależności od głębokości próbki. Można zaobserwować, że powłoka TiAlN osadzona metodą PVD wykazuje wysoką twardość. W badaniu [12] przetestowano również wytrzymałość wytworzonych próbek, które stanowiły wiertła. Testy wykazały, że wiertła poddane obróbce hybrydowej zapewniły ponad dwukrotnie większą średnią trwałość wiertel od tych z osadzoną wyłącznie powłoką TiAlN. Mikroskopia elektronowa przeprowadzona po przetestowaniu wiertła aż do jego uszkodzenia wykazała rozległe odkształcenia plastyczne i rozwarstwienie na przekroju poprzecznym wiertła z samą powłoką TiAlN. W przeciwieństwie do tego odkształcenie plastyczne nie było zauważalne w przekroju poprzecznym wiertła poddanego azotowaniu i osadzeniu powłoki TiAlN metodą PVD, a rozwarstwienie zostało znacznie zmniejszone [12].



Rysunek 8. Obraz SEM przekroju poprzecznego stali M2 a) z osadzoną powłoką TiAlN za pomocą technologii PVD, b) azotowanej z osadzoną powłoką TiAlN za pomocą technologii PVD [12]

*Figure 8. SEM image of the cross-section of M2 steel a) with the deposited TiAlN coating using the PVD technology, b) nitriding with the deposited TiAlN coating using the PVD technology [12]*



Rysunek 9. Mikrotwardość przekroju poprzecznego stali M2 azotowanej z powłoką PVD TiAlN mierzona w funkcji głębokości od podłoża [12]

Figure 9. Cross-section microhardness of M2 nitrided steel with PVD TiAlN coating, measured as a function of depth from the substrate [12]

#### 4. MATERIAŁY NARZĘDZIOWE O OSNOWIE FAZY WIĄŻĄCEJ (WĘGLIKI SPIEKANE, CERMETALE)

##### 4.1 Węgliki spiekane

Do podstawowych materiałów narzędziowych wytwarzanych metodami metalurgii proszków zalicza się węgliki spiekane. Należą one do najczęściej stosowanych materiałów na ostrza skrawające, szczególnie na ostrza przeznaczone do operacji toczenia i frezowania [13]. Węgliki spiekane składają się w 70-96% z węglików metali trudno topliwych, głównie wolframu, a także tantalu, tytanu, niobu, oraz z metalu wiążącego, którym jest zazwyczaj kobalt, niekiedy molibden, nikiel, a rzadko żelazo [10, 13].

Tabela 2. Podział węglików spiekanych typu WC-Co ze względu na rozmiar cząsteczek WC [13]

Table 2. Classification of WC-Co type cemented carbides due to the size of WC particles [13]

Grupa	Średnica cząsteczek WC
gruboziarniste	3-30 μm
standardowe	1,5-3 μm
drobnoziarniste	0,5-1,5 μm
ultradrobnoziarniste	0,2-0,5 μm
nanoziarniste	20-200 nm

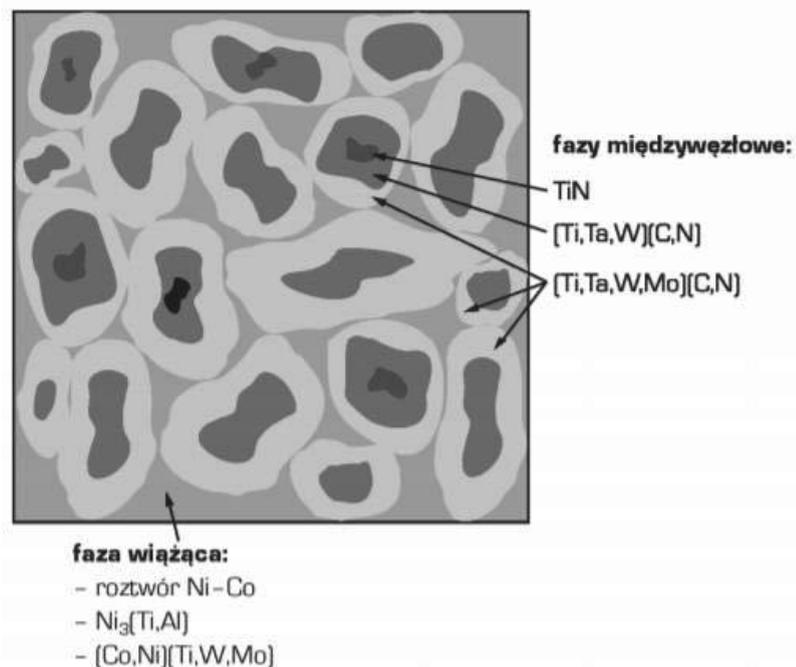
Takie węgliki typu WC-Co są bardzo odporne na działanie wysokiej temperatury [13]. Węgliki spiekane można podzielić według ich zastosowania oraz według rozmiarów cząsteczek WC (Tabela 2).

Wielkość ziarna WC ma olbrzymi wpływ na właściwości ostrzy z węglików spiekanych, a szczególnie na ich wytrzymałość na zginanie i twardość. Gdy średnica cząstek WC jest większa niż  $1,5 \mu\text{m}$ , obserwuje się wzrost wytrzymałości na zginanie i spadek twardości ostrza z węglika spiekaneego wraz ze wzrostem rozmiarów ziaren. Gdy natomiast ziarna WC mają średnicę mniejszą niż  $1,5 \mu\text{m}$  obserwuje się jednoczesny wzrost wytrzymałości na zginanie i twardości ostrza z węglika spiekaneego, tym większy, im mniejsze jest ziarno [13].

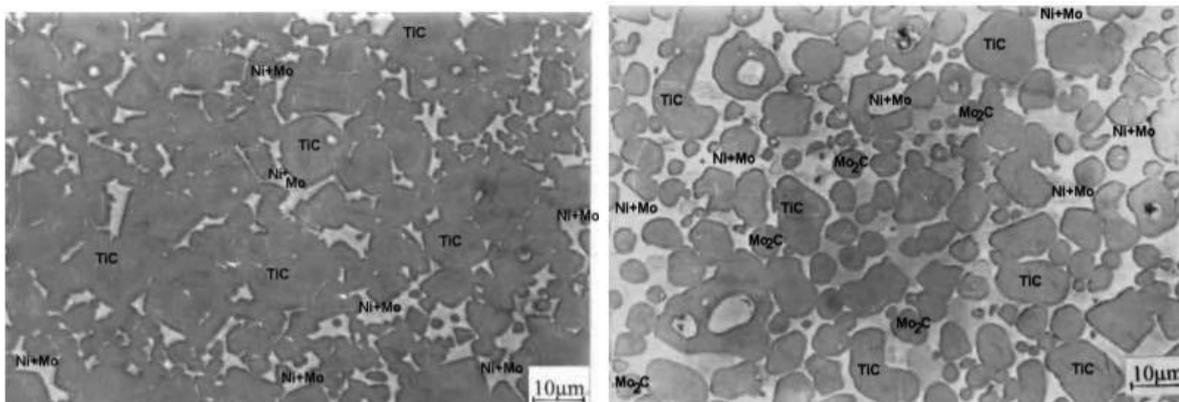
#### 4.2 Cermetale narzędziowe

Cermetale narzędziowe zalicza się, jak węgliki spiekane, do grupy spiekanych materiałów narzędziowych. Głównymi składnikami ceramicznymi współczesnych cermetali narzędziowych są przede wszystkim węgiel tytanu TiC, azotek tytanu TiN oraz węglikoazotek tytanu Ti(C,N). Stosowane mogą być również dodatki w postaci złożonych metali przejściowych takich jak: (Ti,Ta)N, (Ti,W)C, (Ti,Mo)C czy (Ti, Ta, Mo, W, Nb)(C,N) [13].

W cermetach narzędziowych funkcję wiążącą pełni faza metaliczna, składająca się najczęściej z kobaltu i niklu. Ta grupa materiałów narzędziowych posiada charakterystyczną strukturę rdzeniowo-płaszczową (Rysunek 10). Faza niklowo-kobaltowa, dobrze przylegająca do cząsteczek ceramicznych, zapewnia oprócz silnego wiązania, dobrą ciągliwość materiału. Podobnie jak w przypadku węglików spiekanych, wzrost stężenia kobaltu w fazie wiążącej powoduje zmniejszenie odporności na zużycie ścierne spiekanych cermetali narzędziowych [13].



Rysunek 10. Schematyczna struktura rdzeniowo-płaszczowa cermetu narzędziowego [6]  
 Figure 10. Schematic core-shell structure of a tool cermet [6]



Rysunek 11 Mikrostruktura cermetu o składzie: a) 55% masy TiC oraz 45% masy mieszaniny Ni+Mo (55;45), 55% masy mieszaniny TiC i Mo<sub>2</sub>C (75;25) oraz 45% masy mieszaniny Ni+Mo (55;45) [14]

*Figure 11. Cermet microstructure with the following composition: a) 55% by weight of TiC and 45% by weight of the Ni + Mo mixture (55; 45), 55% by weight of the mixture of TiC and Mo<sub>2</sub>C (75; 25) and 45% by weight of the Ni + Mo mixture (55; 45) [14]*

Spiekane cermetale narzędziowe znalazły swoje zastosowanie głównie w produkcji wielostrzowych płytek skrawających. W porównaniu z węglnikami spiekany cermetale charakteryzują się większą twardością w podwyższonej temperaturze oraz wyższą odpornością na utlenianie. Dzięki tym właściwościom ostrza cermetowe pozwalają na skrawanie z większą prędkością niż płytki wykonane z węglików spiekanych. Do innych zalet cermetali narzędziowych można zaliczyć ich dobre właściwości tribologiczne (mały współczynnik tarcia o stal), stosunkowo dużą odporność chemiczną oraz relatywnie niską cenę podstawowych składników (Ti, C, N) w porównaniu z głównymi komponentami węglików spiekanych (WC, Co) [13].

## 5. OBRÓBKA POWIERZCHNIOWA MATERIAŁÓW NARZĘDZIOWYCH NA OSNOWIE FAZY WIĄŻĄCEJ

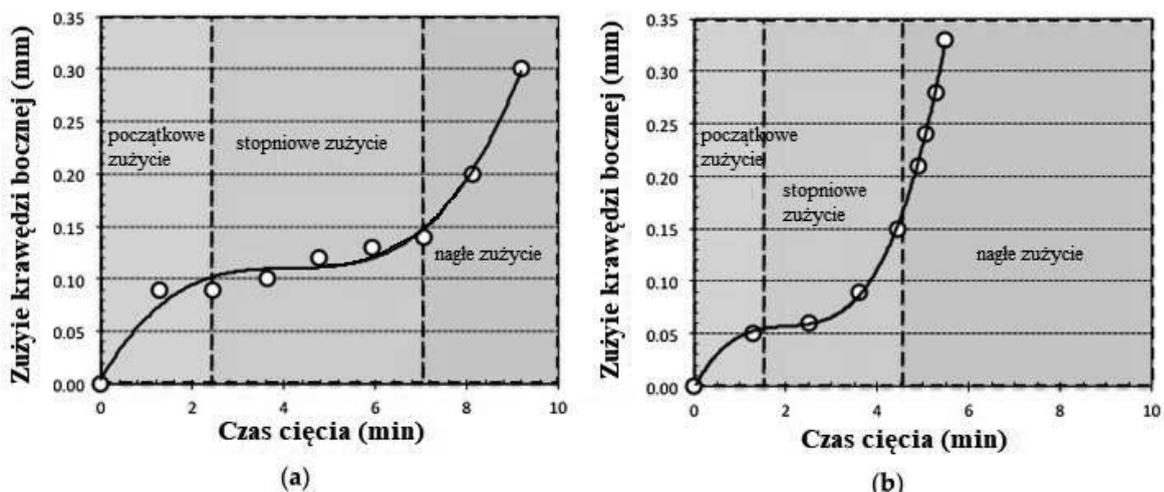
Podczas intensywnej pracy narzędzia z węglików spiekanych i cermetali narzędziowych mogą ulegać zużyciu ściernemu oraz finalnie zniszczeniu. W celu poprawienia żywotności narzędzi wykonanych z tych materiałów stosuje się ich obróbkę powierzchniową składającą się głównie z osadzania twardych warstw metodami PVD i CVD, które mają zapewnić poprawę własności tribologicznych i przełożyć się na dłuższą żywotność powleczonych narzędzi. W przypadku węglików spiekanych powszechna jest również obróbka laserowa powierzchni, która ma na celu zapewnić lepszą przyczepność osadzonej powłoki do podłoża [1,4,13,15,18].

### 5.1 Obróbka powierzchniowa węglików spiekanych

Węgliki spiekane przeznaczone do pokrywania mają odmienny skład od węglików konwencjonalnych. W kobaltowej osnowie stężenie wolframu powinno być możliwie małe (<3%), a zawartość TiC powinna być niewielka (0-5%), aby zapewnić dobrą ciągliwość. Przeważna część narzędzi pokrytych twardymi warstwami jest przeznaczona do skrawania

ciągłego, czyli toczenia [1]. Narzędzia z węglików spiekanych należą obecnie do grupy najczęściej stosowanych materiałów do obróbki materiałów trudnoobrabialnych ze względu na ich stosunek wydajności do ceny. Obecnie około 75-85% narzędzi z węglików stosowanych w przemyśle jest powlekanych. Najczęściej stosowanymi materiałami na pokrycia obecnie są TiC, TiN, TiCN, TiAlN oraz Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [15].

W pracy [15] zbadano zużycie powłok wielowarstwowych osadzonych metodą CVD oraz powłoki jednowarstwowej osadzonej metodą PVD. Metodą CVD osadzono wielowarstwową powłokę składającą się z warstwy zewnętrznej TiN, warstwy pośredniej Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oraz warstwy TiCN łączącej materiał rodzimy z powłoką. Metodą PVD została osadzona powłoka jednowarstwowa składająca się z TiCN. Zbadano górną granicę skrawania (Rysunek 12), ponieważ skrawalność przekłada się na produktywność. Dla narzędzia powlekanego CVD górna granica skrawania została osiągnięta dla prędkości posuwu 75 m/min, przy posuwie 20 mm/obr i głębokości skrawania 2 mm. Dla narzędzia powlekanego PVD górna granica skrawania została osiągnięta dla prędkości posuwu 75 m/min, przy posuwie 0,15mm/obr i głębokości skrawania 1,5mm. Można więc zauważyć, że wielowarstwowa powłoka osadzona metodą CVD różni się minimalnie od jednowarstwowej powłoki PVD, a obie osadzone powłoki znacznie wydłużają czas użytkowania powleczonego narzędzia.

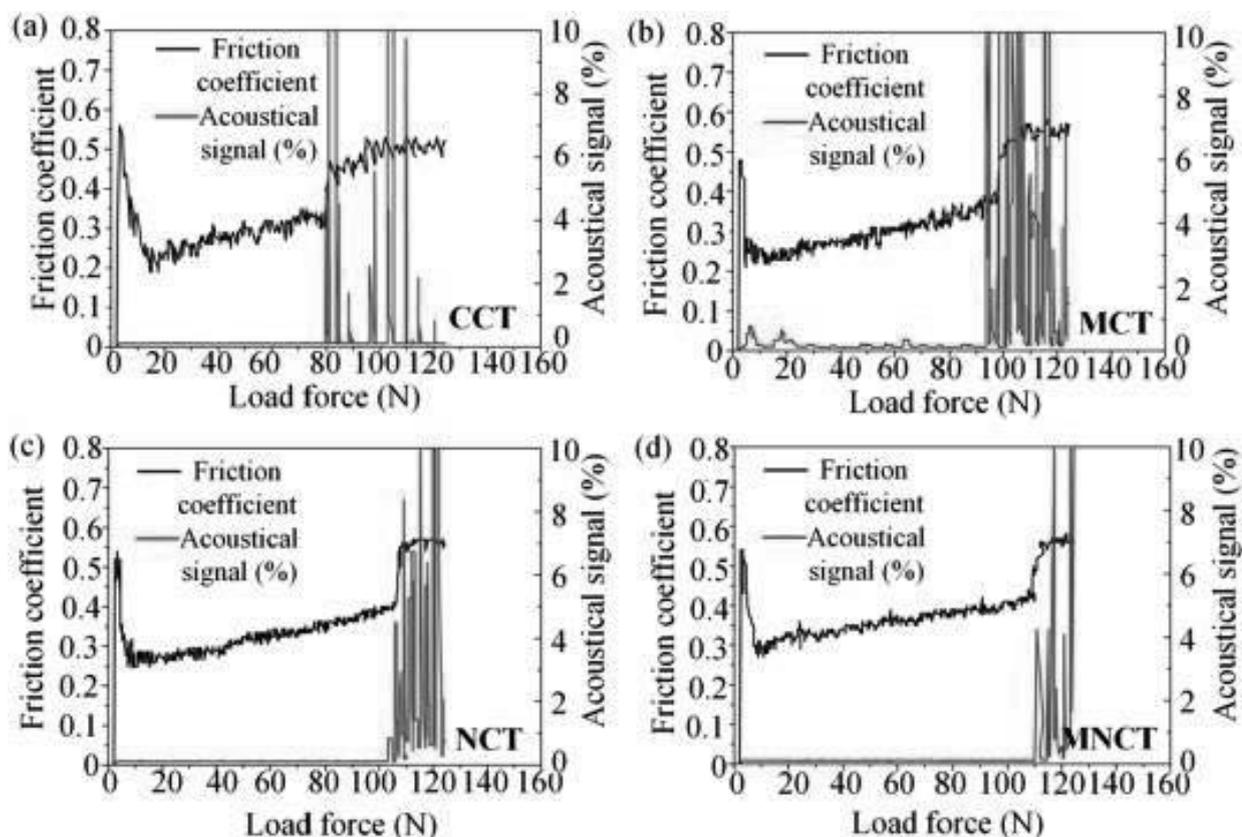


Rysunek 12. Zużycie powierzchni krawędzi bocznej narzędzia z węglika spiekanego a) pokrytego wielowarstwową powłoką CVD, b) pokrytego jednowarstwową powłoką PVD [15]  
 Figure 12. The flank wear of a cemented carbide tool a) covered with a multi-layer CVD coating, b) covered with a single-layer PVD coating [15]

Powlekanie narzędzi z węglików spiekanych niewątpliwie poprawia ich własności tribologiczne. Odpowiedni dobór materiału powłokowego oraz technologii powlekania ma duże znaczenie jeżeli chodzi o finalne własności powłoki. Istotnym czynnikiem wpływającym na żywotność powłoki jest jej przyczepność do podłoża [16]. Jedną z metod poprawy przyczepności powłok do podłoża z węglika spiekanego jest jego obróbka laserowa polegająca na laserowym teksturowaniu powierzchni. Taki zabieg zapewnia uzyskanie pożądanej topografii powierzchni o ulepszonych własnościach adhezyjnych [17].

Na wykresach (Rysunek 13) przedstawiono wyniki testu zarysowania [18], w którym porównano trzy rodzaje tekstur na powierzchni węglika spiekanego WC-Co. W celu

przeprowadzenia tego badania wykonane zostały cztery próbki: konwencjonalną pokrytą TiAlN (CCT), teksturowaną w mikroskali pokrytą TiAlN (MCT), teksturowaną w nanoskali pokrytą TiAlN (NCT) oraz teksturowaną w mikro/nanoskali (MNCT) pokrytą TiAlN. Siła adhezji pomiędzy powłokami TiAlN a podłożami próbek teksturowanych laserowo była znacznie lepsza niż w przypadku próbki standardowej ze względu na większe mechaniczne przyleganie powłok do podłoża (chropowatość powierzchni). W przeprowadzonym badaniu [18] tekstura w skali mikro/nano była najskuteczniejsza podczas zwiększania obciążenia krytycznego.



Rysunek 13. Krzywe współczynnika tarcia i sygnału akustycznego różnych próbek w testach zarysowania: (a) CCT; (b) MCT; (c) NCT; oraz (d) MNCT [18]

Figure 13. The curves of friction coefficient and acoustical signal of different samples in scratch tests: (a) CCT; (b) MCT; (c) NCT; and (d) MNCT [18]

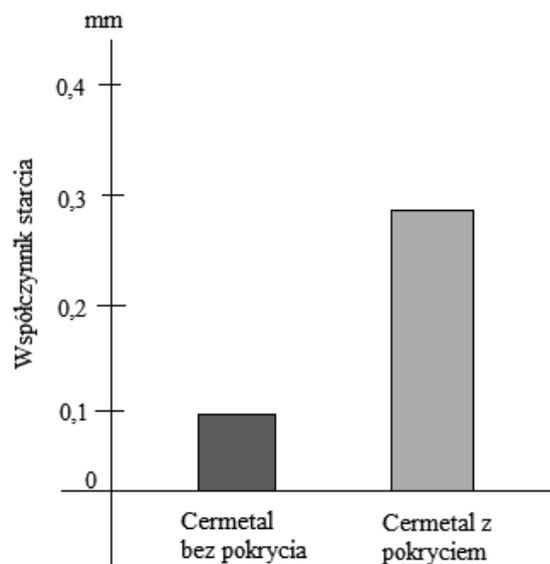
## 5.2 Obróbka powierzchniowa cermetali narzędziowych

Cermetale narzędziowe podobnie jak węgliki spiekane są najczęściej pokrywane twardymi warstwami. Najczęściej stosowane są pokrycia wielowarstwowe TiN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN, nakładane techniką PVD lub metodą PACVD. Konwencjonalna technika CVD, stosowana do węglików spiekanych, nie znajduje w tym przypadku zastosowania ze względu na whiskerowy charakter wzrostu warstwy. Porównawcze badania właściwości skrawnych pokrytych oraz nie pokrytych cermetali (Rysunek 14) wykazały w czasie toczenia stali 20HM około



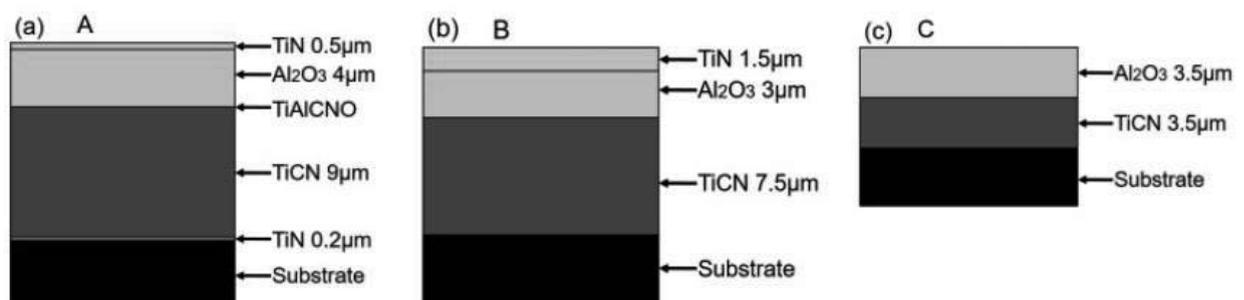
200-procentowy wzrost odporności na zużycie ściernie powierzchni przyłożenia płytek narzędziowych [1].

Osadzanie powłok przeciwzużyciowych na cermetale narzędziowe nie jest tak powszechne i dobrze zbadane jak w przypadku stali narzędziowych czy węglików spiekanych i obecnie ciągle prowadzone są badania na ten temat [19]. W pracy [19] jako obiekt badań wykorzystano trzy powłoki kompozytowe CVD naniesione na podłoże cermetalowe na bazie TiC. Naniesiono następujące powłoki: TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN (A), TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN (B) oraz TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C). Schemat ideowy trzech zastosowanych powłok przedstawiono na Rysunku 15.



Rysunek 14. Wysokość tarcia przy toczeniu wykańczającym podpory kołnierzej ze stali zbliżonej do 20HM cermetalem z pokryciem TiN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN osadzonym metodą PACVD oraz cermetalem bez pokrycia [1]

Figure 14. Friction height in finishing turning of a flange support made of steel close to 20HM with cermet with TiN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN coating deposited by PACVD method and cermet without coating [1]



Rysunek 15. Schemat ideowy budowy trzech powłok kompozytowych TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN (A), TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN (B) oraz TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C) [19]

Figure 15. Schematic diagram of the structure of three composite coatings TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN (A), TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN (B) and TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C) [19]

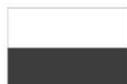
Zastosowana wewnętrzna warstwa TiN jest używana jako warstwa adhezyjna, powłoka TiCN jest używana jako warstwa odporna na zużycie, a  $Al_2O_3$  jest stosowana jako warstwa izolacji cieplnej i odporności na utlenianie [19]. W badaniu najlepsze własności adhezyjne wykazała powłoka A [19], która posiadała najwięcej warstw przejściowych, które mają znaczny wpływ na przyczepność powłoki do podłoża [16].

## PODSUMOWANIE

Obecnie materiały narzędziowe stanowią ważną grupę materiałów inżynierskich. Wśród nich znajdują się materiały najczęściej stosowane w przemyśle takie jak stale narzędziowe czy węgliki spiekane oraz rzadziej stosowane cermetale narzędziowe. Szerokie wykorzystanie tych materiałów w przemyśle przekłada się na dążenie do znacznej poprawy ich żywotności, którą można osiągnąć poprzez zastosowanie odpowiedniej obróbki powierzchniowej. Dobrze przeprowadzona obróbka powierzchniowa stali narzędziowych, węglików spiekanych i cermetali narzędziowych może przyczynić się do znacznej poprawy ich własności tribologicznych, a co za tym idzie wydłużeniem pracy narzędzi wykonanych z tych materiałów i obniżeniem finalnych kosztów ich eksploatacji.

## ACKNOWLEDGMENT

Publikacja współfinansowana przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach projektu „Politechnika Śląska jako Centrum Nowoczesnego Kształcenia opartego o badania i innowacje” nr POWR-03.05.00-00-Z098/17/00.



Rzeczpospolita  
Polska

Unia Europejska  
Europejski Fundusz Społeczny



## LITERATURA

- [1] M. Wysiecki, Nowoczesne materiały narzędziowe, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1997
- [2] L.A. Dobrzański, D. Pakuła, M. Staszuk, A. D. Dobrzańska-Danikiewicz, Struktura i własności wieloskładnikowych powłok na węglkach spiekanych oraz ceramice azotkowej i sialonowej, Gliwice: Open Access Library, 2015
- [3] PN-EN ISO 4957:2018.
- [4] K. Przybyłowicz, Metaloznawstwo, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1999
- [5] J. Hucińska, M. Głowacka, Metaloznawstwo, Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 1995
- [6] L.A. Dobrzański, G. Matula, Podstawy metalurgii proszków i materiały spiekane, Gliwice: Open Access Library, 2012
- [7] M. J. Kupczyk, J. Komolka, M. Jenek, Badania porównawcze wybranych właściwości ostrzy skrawających z kutyh, walcowanych i spiekanych stali szybko tnących, Mechanika 89, 3/17, 2017, s. 343-352
- [8] L. A. Dobrzański, A. D. Dobrzańska-Danikiewicz, Kształtowanie struktury i własności

powierzchni materiałów inżynierskich, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice: 2013

- [9] L. A. Dobrzański, Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa: 2002
- [10] L. A. Dobrzański, E. Hajduczek, J. Marciniak, R. Nowosielski, Metaloznawstwo i obróbka cieplna materiałów narzędziowych, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1990
- [11] A.G.F. Araújo, M. Naeem, L.N.M. Araújo, T.H.C. Costa, K.H. Khan, J.C. Díaz-Guillén, Javed Iqbal, M.S. Liborio, R.R.M. Sousa, Design, manufacturing and plasma nitriding of AISI-M2 steel forming tool and its performance analysis, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 9, Issue 6, 2020, Pages 14517-14527, DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.10.048.
- [12] A.F. Rousseau, J.G. Partridge, E.L.H. Mayes, J.T. Toton, M. Kracica, D.G. McCulloch, E.D. Doyle, Microstructural and tribological characterisation of a nitriding/TiAlN PVD coating duplex treatment applied to M2 High Speed Steel tools, *Surface and Coatings Technology*, Volume 272, 2015, Pages 403-408, DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.03.034.
- [13] M. J. Kupczyk, Inżynieria Powierzchni, Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2015
- [14] L. Jaworska, B. Smuk, D. Królicka, J. Wszolek, Tworzywa cermetalowe przeznaczone na ostrza narzędzi skrawających, *Kompozyty*, 5(2005)3, 21-25
- [15] A. Ginting, R. Skein, D. Cuaca, Herdianto, Pieter, Z. Masyithah, The characteristics of CVD- and PVD-coated carbide tools in hard turning of AISI 4340, *Measurement*, Volume 129, 2018, Pages 548-557, DOI: 10.1016/j.measurement.2018.07.072.
- [16] M. Olszowska, J. Pałachniak, M. Staszuk, Przyczepność powłok do podłoża jako główny czynnik determinujący ich własności użytkowe, *Prace Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych*, 2021, 319-338
- [17] Davi Neves, Anselmo Eduardo Diniz, Milton Sérgio Fernandes Lima, Microstructural analyses and wear behavior of the cemented carbide tools after laser surface treatment and PVD coating, *Applied Surface Science*, Volume 282, 2013, Pages 680-688, DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.06.033
- [18] Kedong Zhang, Jianxin Deng, Xuhong Guo, Lining Sun, Shuting Lei, Study on the adhesion and tribological behavior of PVD TiAlN coatings with a multi-scale textured substrate surface, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Volume 72, 2018, Pages 292-305, DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2018.01.003

## Výroba primárneho hliníka a jeho zliatin

I. Petrisková<sup>a\*</sup>, L. Kuchariková<sup>a</sup>, E. Tillová<sup>a</sup>, L. Pastierovičová<sup>a</sup>, M. Mazur<sup>b</sup>, M. Bonek<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, Gliwice, Poland

\*email: petriskova@stud.uniza.sk

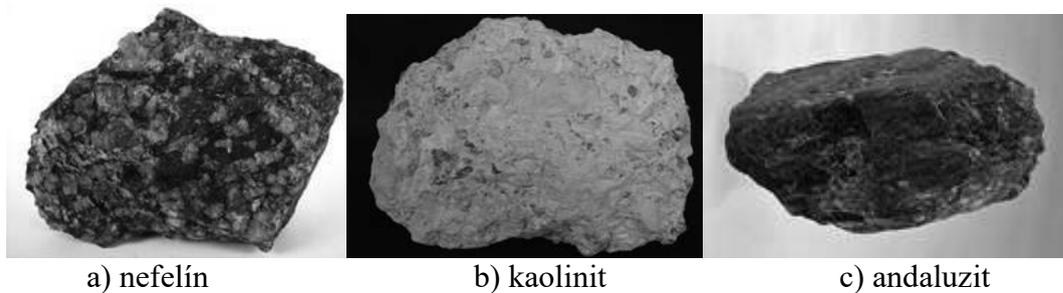
**Abstrakt:** Hliník je veľmi univerzálny kov, s čím je spojené jeho využitie v každom odvetví priemyslu. Článok je zameraný na výrobu čistého hliníka ako aj jeho zliatin z rudy. Výroba Al a jeho zliatin z rudy sa nazýva primárna výroba, ktorú možno uskutočniť výrobou oxidu hlinitého Bayerovým, t. j. hydrometalurgickým spôsobom. Po výrobe oxidu hlinitého nasleduje elektrolýza, ktorej produktom je hliník o čistote približne 99 %. Vyrobený čistý Al sa následne využije na výrobu samotných Al zliatin na tvárnenie alebo na odliatky.

**Kľúčové slová:** hliník, zliatiny hliníka, primárna výroba Al.

### 1. Úvod

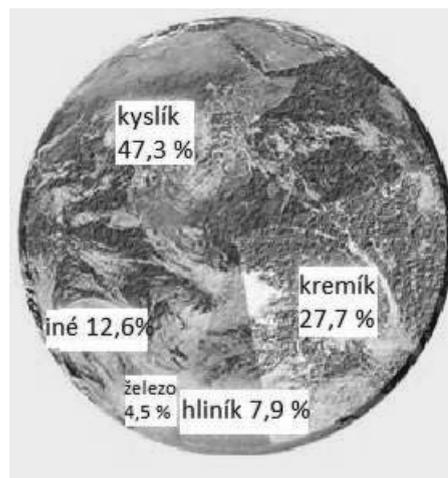
Hliník je jedným z najpočetnejších prvkov v zemskej kôre a jedným z najpoužívateľnejších kovov v modernej civilizácii, vďaka jeho vlastnostiam ako sú napr. odolnosť proti korózii, ľahká tvárnosť, nízka hustota. Preto je ideálnym materiálom na výrobu komponentov najmä pre letecký a automobilový priemysel. Takže využívaním hliníkových zliatin je možné znížiť spotrebu energie a paliva a s tým spojené znižovanie emisií. Výroba je však veľmi energeticky, technologicky aj materiálovo náročná. Získanie čistého hliníka a konečného výrobku požadovanej kvality zahŕňa v sebe množstvo krokov a operácií, ktoré so sebou nesú aj environmentálne problémy a teda vznik veľkého množstva rôznych odpadov a vedľajších produktov [1-2].

Hliník možno nájsť najmä v zlúčeninách, pretože reaguje s vodou a vzduchom a tak vytvára oxidy a hydroxidy [2]. Existuje približne v 250-tich rôznych mineráloch, ako napríklad nefelín, kaolinit, andaluzit a pod. (obr. 1), čo ho radí medzi tretí najrozšírenejší kov v zemskej kôre (7,9 % - obr. 2). Korund je čistá, kryštalická modifikácia oxidu hlinitého, nejedná sa však o potrebnú čistú  $\alpha$  fázu, v pôde sa vyskytuje len zriedka väčšinou vo forme rubínov [3].



Obrázok 1. Príklady minerálov [4-6]

Figure 1. Minerals for Al production [4-6]



Obrázok 2. Hliník - tretí najrozšírejší prvok v zemskej kôre [7]

Figure 2. Al, the third most abundant element in the earth's crust [7]

Patrí k najmladším priemyselne vyrábaným kovom, keďže sa vyrába od roku 1886. Ako prvý existenciu hliníka potvrdil Humphry Davy v roku 1807. Za objaviteľa sa však považuje nemecký chemik Fridrich Wohler, ktorý po prvý krát v roku 1845 získal 10-15 mg guľôčok hliníka a opísal jeho vlastnosti [1, 8-9]. V roku 1886 bola vynájdená moderná elektrolytická redukcia oxidov hliníka, ktorá zmenila postavenie hliníka ako priemyselného kovu [10].

Ekonomicky najvýznamnejšou, využiteľnou rudou pre výrobu hliníka je bauxit. Až 99 % svetovej produkcie primárneho hliníka je z rudy bauxitu. Môže mať rôzne farby, červenohnedú, bielu, krémovú alebo žltohnedú. Bauxit spravidla obsahuje oxid hlinitý (40 – 60 %) vo forme hydratovaných fáz (hlinité minerály) ako je boehmit ( $\text{AlOOH}$ ), gibbsit ( $\text{Al(OH)}_3$ ) a diaspor ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Zvyčajne sa v týchto zlúčeninách vyskytujú aj menšie množstvá železa, kremíka a ďalších nečistôt [1].

Prvý krát sa bauxit ťažil v 19. storočí vo Francúzku [8]. Neskôr začalo mnoho krajín hľadať ložiská týchto rúd na svojom území. Globálna ťažba sa tak začala postupne zvyšovať.

## 2. Výroba primárneho - čistého Al

Primárna výroba hliníka a jeho zliatin zahŕňa ťažbu potrebnej suroviny na výrobu oxidu hlinitého. V súčasnosti ako bolo spomínané vyššie, sa najčastejšie využíva bauxitová ruda.

Ďalej je potrebné oxid hlinitý z tejto rudy extrahovať, v značnej miere sa tento proces uskutočňuje hydrometalurgickým zásaditým spôsobom (Bayerova metóda).

Ďalšie spôsoby výroby oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) z rúd obsahujúcich hliník sú [1,11]:

- zo surovín kyslými metódami = spracovanie rudy roztokom anorganických kyselín ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$  a podobne). Patrí však k metódam ekonomicky a prevádzkovo nevýhodnejším;
- suchým spekacím spôsobom, ktorý sa v súčasnosti už nevyužíva najmä z ekonomického hľadiska, ale pri niektorých typoch je jedinou možnosťou.

Po extrakcii nasleduje výroba čistého hliníka elektrolýzou - metóda redukcie oxidu hlinitého v rozpustenom kryolite sodnom. Oba procesy sú energeticky veľmi náročné. Žiaľ dodnes sa nenašiel spôsob prvovýroby hliníka, ktorý by nebol tak ekonomicky a energeticky náročný. Posledným komplexným krokom je tavenie, legovanie a rafinácia roztaveného hliníka za účelom získania zliatin so špecifickými vlastnosťami a odlievanie do polotovarov.

## 2.1 Postupy výroby $\text{Al}_2\text{O}_3$

### 2.1.1. Hydrometalurgický spôsob výroby $\text{Al}_2\text{O}_3$

Najviac využívaný spôsob, tzv. Bayerova metóda sa nazýva podľa vynálezcu Karla Josefa Bayera. Tento koncept výroby z 19-teho storočia sa s minimálnymi zmenami používa dodnes [2]. Najvhodnejší pre túto metódu je tzv. gibbsitový bauxit (obr. 3), pretože je z hľadiska opracovania najhospodárnejší (patrí k hlinitým minerálom s najmenšou tvrdosťou) [3].



a) gibbsitový bauxit



b) oxid hlinitý extrahovaný z bauxitu

Obrázok 3 Vstupná a výstupná surovina [12-13]

Figure 3. Input and output raw material [12-13]

Bayerova metóda je zásaditý hydrometalurgický proces, pri ktorom sa upravená ruda bauxitu lúhuje v hydroxide sodnom pri zvýšených teplotách (do  $300\text{ }^\circ\text{C}$ ) a tlakoch ( $1,5\text{ MPa}$  -  $15\text{ MPa}$ ) a vhodných atmosférických podmienkach v závislosti od typu rudy a zvolenej technológie (obr. 4) [2]. Tento proces prebieha v zariadeniach nazývané autoklávy (obr. 5) [2].

Obrázok 4. Základné operácie výroby  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Bayerovou metódou [1]

Figure 4. Basic operations of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  production by the Bayer method [1]

Upravený bauxit mletím a drvením, homogenizovaný s recyklovaným roztokom a s prídavkom vápna reaguje s hydroxidom sodným a produktom sú [3]:

- pre gibbsitické bauxity:



- pre boehmitické bauxity:



- pre diasporické bauxity:



Obrázok 5. Príklad autoklávu [1]

Figure 5. The example of autoklav [1]

Časť oxidov hliníka ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ktoré sú viazané na oxidy kremíka ( $\text{SiO}_2$ ) tvorí sodno-hlinitý silikát, ktorý je v hydroxide sodnom nerozpustný a prechádza do červeného kalu [1]. Ten obsahuje okrem sodno-hlinitého silikátu aj nerozpustné zvyšky oxidov kremíka, železa, vápnika a iných [3]. Tieto kaly sa umiestňujú na dne autoklávu a patria k nebezpečným odpadom.

Pre výrobu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  použiteľného pre elektrolyzný proces výroby Al sa vzniknutá suspenzia postupne čistí a to procesom rýchleho ochladenia roztoku hlinitanu sodného pod  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Červený kal sa odstraňuje filtračnými jednotkami a postupuje na protiprúdne premývanie vodou alebo tlakovú filtráciu, kedy sa získava hlinitan sodný ( $\text{NaAlO}_2$ ). Následnou

precipitáciou hlinitanu sodného vzniká hydroxid hlinitý ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), ten sa usadzuje na dne nádrže a odstraňuje. Výsledným produktom kalcinácie o teplote do  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ , je oxid hlinitý s čistotou približne 99 % [1,3].

Bayerova metóda produkuje tonu oxidu uhličitého na tonu vyrobeného oxidu hlinitého a viac ako polovicu výsledného produktu tvorí odpad - červený kal. Približne 30 % výrobných nákladov predstavuje energia, ktorá sa spotrebúva. Energeticky najnáročnejšia časť procesu je lúhovanie, množstvo energie závisí potom od typu rudy a teplôt lúhovania na to potrebných [2].

### 2.1.2. Kyslá metóda výroby $\text{Al}_2\text{O}_3$

Pri kyslých spôsoboch výroby sa oxid hlinitý mení na hlinitú soľ vplyvom roztoku anorganických kyselín ako napr.  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$  a pod. [1]. Zo získanej soli sa uvoľňuje hydroxid hlinitý a jeho vyžiháním vznikne oxid hlinitý. Nevýhodou kyslých metód je požiadavka pre používanie špeciálnych zariadení odolných voči kyselinám - t. j. prinášajú väčšie výdavky na vybavenie, vyššie bezpečnostné opatrenia pri práci a ďalšie náklady spojené s komplexnejším čistením produktu [11].

### 2.1.3. Spekacia metóda

Využíva sa najmä pri menej kvalitných bauxitových rudách (s vyšším obsahom  $\text{SiO}_2$ ). Podstatou je spekanie bauxitu so sódou a s vápencom do teplôt okolo  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  -  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ . Tak vzniká hlinitan sodný, dobre rozpustný vo vode [3]. Hlinitan sodný ďalej prechádza lúhovaním, kedy sa získava hlinitanový roztok. Rovnako ako pri Bayerovej metóde, odstránenie nežiadúcich oxidov kremíka sa dosahuje desilikáciou, ktorá prebieha v autokláve [1]. Pri tomto procese vzniká hnedý kal, ktorý tak ako aj červený kal obsahuje látky nebezpečné pre životné prostredie. Hydroxid sodný sa z hlinitanového roztoku oddeľuje karbonizáciou sa pomoci oxidu uhličitého. Hydroxid hlinitý po filtrácii a premytí postupuje na kalcináciu [3].

Červený a hnedý kal produkovaný pri týchto procesoch predstavujú nebezpečný odpad pre životné prostredie. Nebezpečenstvo predstavuje najmä množstvo alkálií, ktoré tento odpad obsahuje. V odpade sú ďalej prítomné stopové množstvá prvkov ako sú V, Ga, Pb, Ni, Cu, Mn, Zn a pod. [14]. Existuje však riziko presakovania do podzemnej vody. Okrem spomenutých anorganických zlúčenín sa v odpadovom bahne nachádzajú aj mnohé organické zlúčeniny (polyhydroxikyseliny, alkoholy, fenoly). Ich prítomnosť súvisí s produktami rozkladu vegetácie. Napriek tomu tieto kaly našli uplatnenie v rôznych odvetviach priemyslu (tab. 1) [14].

Tabuľka 1. Oblasti využitia odpadových kalov pri výrobe  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [14]

Table 1. Areas of utilization of sewage sludge in production  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [14]

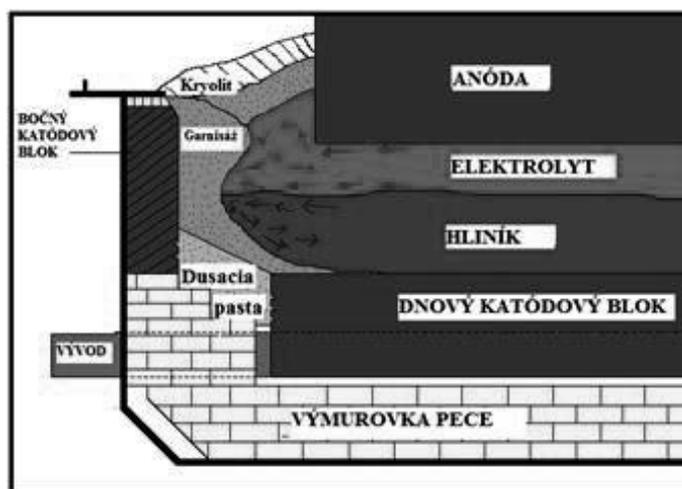
Oblasť spracovania	Procesy	Produkt
Metalurgia	Sušenie, redukcia	Výroba ocele, taviace činidlo
Stavebný priemysel	Sušenie, spekanie, žihanie	Výroba $\text{Al}_2\text{O}_3$ cementov
	Adícia	Výroba betónových plnív
	Sušenie, lisovanie, vypaľovanie	Výroba tehál
	Sušenie, granulácia	Agregáty, špeciál. cementov
Sklársky a keramický priemysel	Adícia	Výroba skla
	Sušenie, peletizácia, žihanie	Výroba keramiky



<b>Chemický priemysel</b>	Chemická úprava	Katalyzátor
	Sušenie a chemické spracovanie	Výroba adsorbentov, pigmentov, náplň do živíc plnivo pri výrobe plastov
<b>Poľnohospodárstvo</b>	Adícia do pôdy	Zlepšenie vlastností
	Neutralizácia, adsorpcia	Remediácia pôd
<b>Vodárenstvo</b>	Adsorpcia	Odstránenie vodnej fázy a ďalších nežiadúcich zložiek
<b>Iné</b>	Sušenie a chemické spracovanie	Filtračný materiál
	Zmiešanie s Ba soľami	Ochranný štít pred RTG

## 2.2. Elektrolýzny proces výroby Al

Elektrolýzna výroba Al alebo Hall - Héroultov elektrolýzny proces, je metóda redukcie oxidu hlinitého v rozpustenom kryolite sodnom, ktorú v roku 1886 nezávisle od seba patentovali Američan Charles Hall a Francúz Paul Héroult, Bol to prelomový objav, keďže metódy na rovnakom princípe sa v priemyselnej výrobe používajú dodnes. Elektrolýza prebieha v elektrolýznych oceľových peciach (elektrolýzéroch, obr. 6), ktoré sú zvnútra obložené žiaruvzdorným izolačným materiálom a uhlíkovou výmurovkou [2].



Obrázok 6. Profil rezu elektrolýzéra [1]

Figure 6. Electrolyser section profile [1]

V týchto peciach sa nachádza vopred vypálená uhlíková anóda alebo Soderbergová anóda, ponorená do roztaveného kúpeľa (elektrolyt) a uhlíková katóda tvoriaca dno elektrolýzéra. Kúpeľ tvorí roztavená soľ kryolit  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  (hexafluorohlinitan sodný), do ktorej sa dávkuje oxid hlinitý a prídavky na modifikáciu vlastností elektrolytu, na báze fluoridov a chloridov sodíka, horčíka, vápnika a pod. Zároveň sa do kúpeľa pridáva podľa potreby fluorid hlinitý, ktorý je zložkou elektrolytu [1, 15]. Dominantnú zložku elektrolytu tvorí už spomínaný kryolit (približne 80 %), ktorý má jedinečnú schopnosť rozpúšťať oxid hlinitý, 10 - 12 % tvorí fluorid hlinitý ( $\text{AlF}_3$ ), 4 - 7 % fluorid vápenatý ( $\text{CaF}_2$ ) a 2 - 4 % tvorí oxid hlinitý, ktorý sa postupne pridáva po malých množstvách [2].

Stabilné zloženie elektrolytu je dôležité. Počas normálneho priebehu procesu má pomerne stabilnú teplotu od 955 °C do 965 °C. Má nižšiu hustotu, asi 2,1 g.cm<sup>-3</sup>, ako roztavený hliník (2,3 g.cm<sup>-3</sup>). Preto elektrolyt vždy pláva na povrchu roztaveného kovu. Počas samotného procesu elektrolýzy sa elektrolyt nespotrebováva, k menším stratám dochádza pri reakcii AlF<sub>3</sub> s oxidovými nečistotami v prídavkoch oxidu hlinitého, pri odparovaní, hydrolýzou vodnej pary a penetráciou katódovej výstelky. Elektrolyt slúži na prenos elektrického prúdu medzi anódou a katódou, tvorí fyzické oddelenie medzi katodicky vyrobeným hliníkovým kovom a anodicky produkovaným CO<sub>2</sub>, čím sa predchádza tzv. spätnej reakcii [2].

Pôsobením jednosmerného elektrického prúdu a nastaveného napätia na elektrolýzéri (4,1 V) sa kyslík z oxidu hlinitého usadzuje na uhlíkovej anóde a uvoľňuje sa ako oxid uhličitý, zatiaľ čo tekutý kovový hliník smeruje na dno ku katóde. Primárny hliník vychádzajúci z pece má čistotu približne 99 %. Po stranách sa na výmurovke vytvorí vrstva stuhnutého kryolitu (tzv. garnisáž), ktorá tepelne a elektricky chráni bočné bloky výmurovky [1].

Samotný proces elektrolýzy je pomerne zložitý. Od okamihu nasýpania oxidu hlinitého do kryolitu, nastáva celý rad reakcií medzi komplexnými aniónmi, ktoré sa vytvárajú pri disociácii kryolitu, oxidu hliníka a fluoridov. Pre popis tohto procesu sa používajú najmä základné anódové a katódové reakcie. Všeobecne elektrolýza prebieha podľa nasledovných reakcií [3]:



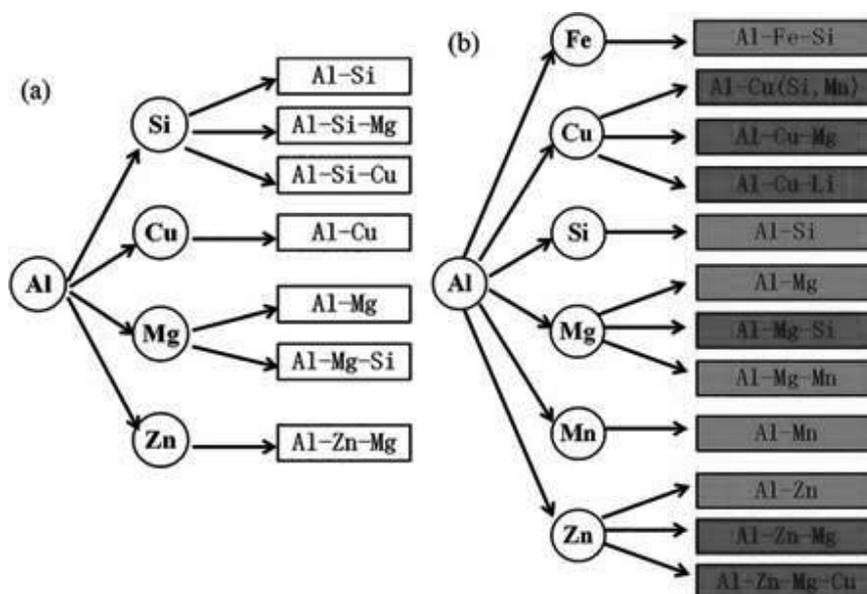
### 3. Primárna výroba Al zliatin

Čistý hliník je pre konštrukčné využitie príliš slabý, v technickej praxi najmä v automobilovom a leteckom priemysle sa čoraz viac uplatňujú zliatiny hliníka [9]. Po elektrolýze preto nasleduje výroba samotných hliníkových zliatin. Čistý hliník z elektrolýzy prechádza do taviaco - ustáľovacích pecí. Ďalej sa do pece pridávajú rozličné prísadové prvky s cieľom získať zliatiny s požadovanými vlastnosťami. Ako hlavné prísady sa aplikujú: kremík, meď, horčík, lítium, mangán, zinok [9-10]. Obsah pece je potrebné neustále premiešavať aby sa dosiahlo rovnomerné rozloženie. Nečistoty a nerozpustné častice (stery) sa odstraňujú [16].

Prísadové prvky zlepšujú mechanické vlastnosti, zlievateľnosť, odolnosť proti korózii a pod. Široký sortiment možných zliatin (obr. 8) tak dovoľuje pripraviť materiály rôznych vlastností, čo spolu s jeho dostupnosťou umožňuje široké uplatnenie v priemysle [10].

Základné rozdelenie Al zliatin tak v súčasnosti je [9] (obr. 7):

- z hľadiska technológie výroby:
  - zlievarenské hliníkové zliatiny;
  - zliatiny na tvárnenie;
- z hľadiska zvýšenia mechanických vlastností:
  - vytvrditeľné;
  - nevytvrditeľné.



Obrázok 7. Rozdelenie zliatin hliníka: a) zlievarenské zliatiny, b) vytvrditeľné (červená farba) a nevytvrditeľné (modrá farba) zliatiny na tvárnenie [17]

Figure 7. The Al alloys: a) cast al alloys, b) heat-treatable (red) and no heat-treatable (blue) wrought A alloys [17]

Z pripravenej tavby sa zliatiny zlievajú do polotovarov v tvare čapov alebo tyčí (obr. 8a) na prietlačné lisovanie alebo ingotov na ďalšie odlievanie (obr. 8b). Väčšina takýchto odliatkov prejde ešte homogenizáciou. Zahriatím na teplotu približne 580 °C a následným rýchlym ochladením sa upravuje mikroštruktúra výsledných Al-zliatin. Daný kov potom postupuje na spracovanie pre dosiahnutie požadovaného tvaru [15].

## Záver

Proces primárnej výroby Al nie je ekologický proces výroby, nakoľko dochádza nielen k ťažbe rudy pre jeho výrobu, ale pri výrobe oxidu hlinitého a jeho následnom spracovaní sa vytvára veľmi toxický kal. Aj keď v súčasnosti existuje využitie niektorých druhov kalu v rôznych odvetviach priemyslu, aj tak primárna výroba hliníka a jeho zliatin patrí k veľkým znečisťovateľom životného prostredia, ako aj k veľkým spotrebiteľom energie. Je preto nevyhnutné využívať iné metódy výroby hliníka a jeho zliatin, nakoľko v súčasnej dobe 21. storočia je viac ako nevyhnutné dbať na ekologickosť priemyselnej výroby.

## Podakovanie

Článok bol riešený ako súčasť projektu *KEGA 016ŽU-4/2020 s názvom „Zvýšenie kvality a inovácia vzdelávania v bakalárskych študijných programoch na SjF UNIZA“*. Dielo vzniklo ako súčasť projektovo orientovaného vzdelávania - PBL, v súťaži V v rámci programu Iniciatíva excelentnosti – Politechnika Śląska, Gliwice.

## LITERATÚRA

1. Miškuřová, D. Oráč, M. Laubertová, Environmentálne aspekty výroby ľahkých kovov. Vol.1 Košice: Equilibria, 2013. ISBN 978-80-8143-083-1.

2. H. Kvande, Occurrence and production of aluminum. The lightest metal: Science and technology from Lithium to Calcium: John Wiley and sons. 2015. ISBN978-1-118-703-8-1.
3. Š. Michna, I. Lukáč a kol., Encyklopedie hliníku. Prešov: Adin s.r.o, 2005.722s. ISBN 80 - 89041 - 88 - 4.
4. J. Jirásek, Zrna světle šedého nefelínu. 2006. [online].  
<http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/rudy/nefel%C3%ADn.html>.
5. J. Jirásek, Šedobílý kaolín. 2006. [online]. <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/nerudy/kaolinit.html>.
6. Wikipedia. Andaluzit. [online]. <https://sk.wikipedia.org/wiki/Andaluzit>
7. Greener-industry. [online].  
[http://www.greenerindustry.org.uk/pages/aluminium/aluminium\\_1annual.htm](http://www.greenerindustry.org.uk/pages/aluminium/aluminium_1annual.htm).
8. F. Mazzolani, Aluminium alloy structures. Vol. 2. Londýn, Velká Británie : University press Cambridge, 1995. 713s. ISBN 0419177701.
9. E. Tillová, M. Chalupová, Štruktúrna analýza zliatin Al-Si. Žilina : EDIS, 2009. 191 s. ISBN 978-90-554-0088-4.
10. J. Dwight, Aluminium design and construction. Vol. 1, Londýn : CRC Press, 1998.320s. ISBN 9780429216558.
11. D. Kashcheev, K. G. Zemlyanoi, K. O. Stepanova, Acidic methods of alumina production (review). Refractories and industrial ceramics. 2019, Vol. 60, p. 237-242
12. Minerals. Bauxit. [online]. <https://www.minerals.net/mineral/bauxite.aspx>.
13. Totdiamant. Oxid hlinitý. [online]. <http://www.totdiamant.com/polvos-abrasivos.htm>.
14. M. Schwarz, Possibilities of Exploration of Bauxite Residue from Alumina Production. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2012, p. 314. ISBN 0-7923-0712-7.
15. Slovalco. Výroba hliníka. [online]. <http://www.slovalco.sk/o-slovalcu/vyroba-hlinika/>.
16. T. Havlík, A. Miškuřová, Spracovanie a recyklácia hliníkových odpadov. Košice: Equilibria, 2013. s. 384. ISBN 978-80-8143-080-0.
17. J. Zhang, B.A. Song a kol., A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends. Journal of Materials , Science and Technology. Elsevier. 2018, s. 270 - 284.

## System of adaptive frequency control of speed of rotation of the asynchronous three-phase electric motor of the drive of the rotary crusher for crushing of polymeric materials

A. Polishchuk<sup>a</sup>, O. Misiats<sup>b</sup>, A. Pervak<sup>c</sup>, V. Grudinin, M. Skyba, M. Bilewicz<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Engineering Mechanics, Khmelnytskyi, Ukraine  
email: andrepol215@gmail.com.

<sup>b</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Engineering Mechanics, Khmelnytskyi, Ukraine  
email: misiats@bigmir.net.

<sup>c</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Engineering Mechanics, Khmelnytskyi, Ukraine  
email: pervak.2003@gmail.com.

<sup>d</sup> Department of Engineering Materials and Biomaterials, Faculty of Mechanical Engineering, Silesian Technical University, Gliwice, Poland

**Abstract:** The analysis of a design and the principle of work of modern rotary crushers for crushing of waste of polymeric materials is carried out. Ways of possible improvement of the existing equipment for crushing of waste of polymeric materials are defined. The principles of automation of the rotary crusher drive are formulated. The structural scheme of the frequency control system of the rotor crusher drive is developed. The analysis of operation of asynchronous three - phase motors at frequency control of speed of rotation is carried out. The mechanical characteristics of the electric drive of the rotary crusher are determined. The methodological and theoretical bases of the study are the main provisions of strength of materials, theoretical mechanics and the theory of electric drive. The paper for the first time uses a comprehensive approach to the study of the grinding process of polymeric materials, which takes into account the dependence of their physical and mechanical properties on the conditions of the process, as well as kinematic and electrical characteristics of the equipment. The object of research is the technological process of mechanical grinding of light industry waste in rotary crushers. The subject of the study is the electric drive of a rotary crusher for processing polymer waste. The expression for calculation of mechanical characteristics of asynchronous electric motors according to their passport data is received that allows to calculate modes of work of drives of crushers at various power frequencies and various control laws. The use of frequency control of the electric drive of the rotary crusher for the processing of waste polymeric materials from light industry will increase the reliability of its operation. The research results can be used in the design of new and modernization of existing structures of rotary crushers for grinding waste polymeric materials.

**Keywords:** electric motor, grinding, polymers, waste, drive, frequency control, rotary crusher, mechanical characteristics.

## 1. INTRODUCTION

To date, there are more than 400 different types of plastic waste. A universal solution to the environmental problem has not been found, so the idea of a radical solution to the problem of waste remains relevant [1-4]. Due to the specific properties of polymeric materials that are not subject to rot, corrosion, and combustion also produces toxic ash and gases such as ammonia, nitrogen oxides, hydrogen chloride, dioxin - the problem of their disposal is primarily environmental [5 -8]. At the same time, economic problems arise, as the need to reduce the cost of raw materials for the production of polymers is gradually increasing [9, 10].

The most common representative of equipment for processing waste materials of light industry in Ukraine is a rotary crusher, which can also be used for processing waste from other industries - chemical, food, etc. [11-13].

Currently, there are a number of issues related to the energy efficiency of waste processing processes and the durability of rotary crushers, as unstable modes of operation of rotary crushers are accompanied by significant dynamic loads on the working bodies [14-15].

Improving rotary crushers and their electric drive systems, taking into account the physical and mechanical properties of crushed materials is an urgent task, as the processing of waste materials from light industry can save money and increase the environmental friendliness of production [11].

Improving the electric drive of the crusher is possible by developing a system of adaptive control of its asynchronous motor.

## 2. OBJECT AND METHODS OF RESEARCH

The object of research is the technological process of mechanical grinding of waste materials from light industry in rotary crushers. In solving the problems, the basic provisions of material resistance, theoretical mechanics and the theory of electric drive were used.

## 3. SETTING OBJECTIVES

Given the urgency of improving the electric drive systems of rotary crushers for processing waste materials from light industry, the task of research is to develop an adaptive control circuit for the rotary crusher motor, which will adjust the speed of the crusher rotor, and ideally automatically adjust the load capacity of the crusher, which is spent on waste shredding.

## 4. RESULTS AND DISCUSSION

For adaptive control of the rotor crusher drive during grinding of wastes of polymeric materials of light industry productions the structural scheme is offered, which is presented in Figure 1.

In accordance with the block diagram (Fig. 1), the drive control system is powered by a three-phase network with a phase voltage of 380 V, a frequency of 50 Hz. Power is supplied to a rectifier that generates the DC current required for the inverter frequency converter, which generates a three-phase current that can have different values of phase voltage  $U_f(f)$  and frequency  $f$ . A current sensor is installed at the power input of the motor, which generates a signal at its output, the level of which depends on the moment of resistance on the motor shaft. The current sensor signal is the main control indicator for adaptive determination of supply

frequency and phase voltage. The main control element of the system is the microcontroller unit, which in accordance with the recorded program determines the required power supply mode of the motor and controls the operation of the frequency inverter.

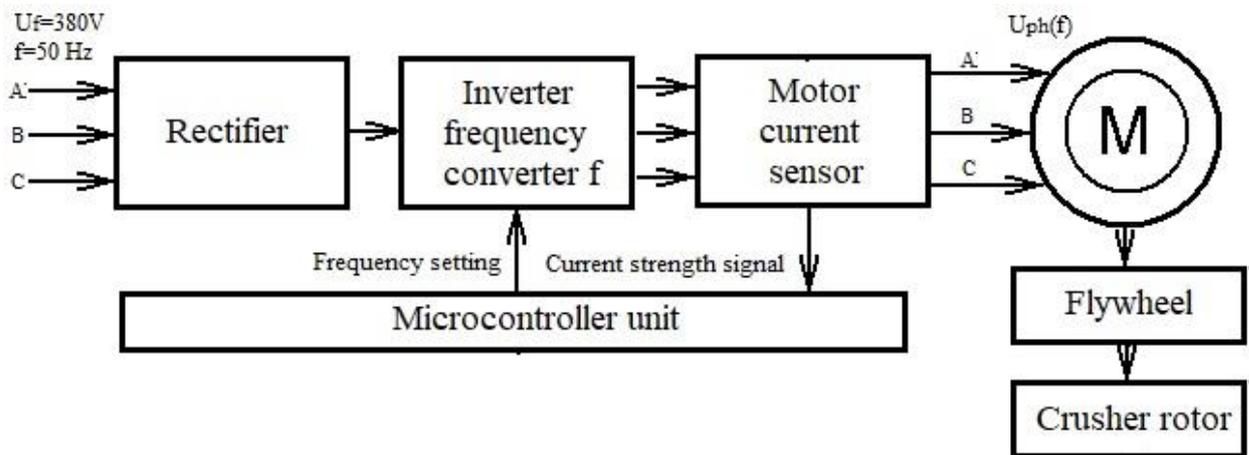


Figure 1 - Block diagram of the adaptive control system of the rotary crusher drive

During frequency control of the speed of an induction motor, the frequency  $f$  and the amplitude  $U$  of the supply voltage must change at the same time. The ratio of supply voltage and frequency can be determined by different laws. The simplest is the linear law of frequency control of the speed of an induction motor, which is also called Kostenko's law:

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1n}}{f_{1n}} = const. \quad (1)$$

According to (1) the frequency should change in proportion to the voltage change. This provides a constant value of the critical moment and a constant nominal magnetic flux with a wide range of speed control from zero to maximum. Most often, the maximum is the nominal speed, which corresponds to the nominal voltage of the stator. Increasing the voltage above the nominal is limited by the electrical resistance of the winding insulation. The family of artificial mechanical characteristics that have parallel working areas is presented in Figure 2.

The considered law of frequency control of speed of the induction motor is the basic. Its advantage is a smooth change of speed from zero to maximum (nominal) with constant rigidity of mechanical characteristics and overload capacity of the engine. The control range is 5... 10 for open systems and 1000 and more for closed ones. It is called "control in the first zone with a constant torque of the engine". The disadvantage is the relative complexity and high cost of the frequency converter.

For fans and pumps whose static moment is proportional to the square of the speed  $M_c \cong \omega^2$ , the following frequency control law applies:

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \frac{U_{1n}}{f_{1n}^2} = const, \quad (2)$$

at which the critical moment of the engine decreases in proportion to the square of the speed  $M_k \cong \omega^2$ .

To control the speed with the full power of the engine, but with a weakening of the magnetic flux and, accordingly, a decrease in the critical moment of the engine applies the management law:

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{f_{1n}}} = const. \quad (3)$$

In this case, the torque of the motor changes inversely proportionally, and the synchronous speed is proportional to the frequency, so the power as their product remains unchanged.

Consider the replacement scheme of an induction motor (Fig. 2) and obtain a formula for constructing the mechanical characteristics of the drive.

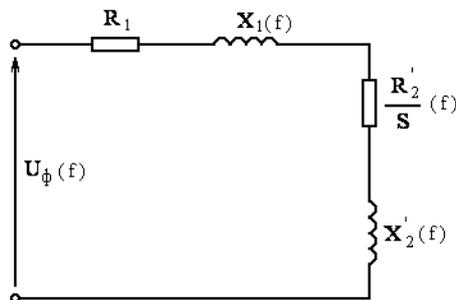


Figure 2 - Scheme of substitution of an asynchronous motor:  $U_{\phi}$  - a phase supply voltage;  $X_1$  - inductive resistance of the stator;  $R_1$  - active resistance of the stator;  $R'_2$  - active rotor resistance;  $X'_2$  - inductive resistance of the rotor, brought to the stator winding

According to the substitution scheme presented in Figure 2, the rotor current is determined by the following dependence:

$$I'_2 = \frac{U_{1ph}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + X_k^2}}, \quad (4)$$

where  $X_k = X_1 + X'_2$  - total inductive resistance.

The active electromagnetic power of the three-phase AM, which is transmitted to the rotor through an air gap, from one side is equal to:

$$P_{12} = \frac{3(I'_2)^2 R'_2}{s} = \frac{3U_{1ph}^2 \frac{R'_2}{s}}{(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + X_k^2},$$

and from the other



$$P_{12} = M \omega_c.$$

After comparing these capacities, an equation of electromagnetic moment of asynchronous engine is obtained:

$$M = \frac{3U_{1ph}^2 R_2'}{\omega_c s \left( (R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + X_k^2 \right)}. \quad (5)$$

As can be seen from the expression (5), the moment of an asynchronous motor depends on the square of the stator voltage, so the AM is very sensitive to a decrease in the supply voltage.

Expression for the launcher of the engine is obtained from (5) when sliding  $s=1$ :

$$M_n = \frac{3U_{1ph}^2 R_2'}{\omega_c \left( (R_1 + R_2')^2 + X_k^2 \right)}. \quad (6)$$

The function (5) has a sliding extremum points that can be found by equating a relation  $dM/ds$  to zero. This will be a critical engine slide:

$$s_{k1,2} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}. \quad (7)$$

Critical slip meets a critical moment:

$$M_{k1,2} = \pm \frac{3U_{1ph}^2}{2\omega_c (\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2})}. \quad (8)$$

In equations (7) and (8) sign "-" is taken if the engine speed is larger than synchronous speed  $\omega > \omega_c$ .

Taking into account the formulas for critical sliding (7) and critical moment (8), the equation of the engine of the engine (5) is converted into a Klossa formula, which is used for analytical construction of mechanical characteristics AM:

$$M = \frac{2M_k \left( 1 + s_k \frac{R_1'}{R_2'} \right)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 s_k \frac{R_1'}{R_2'}}. \quad (9)$$

Medium and high power motors have a value of resistance  $R_l$  much less than other electrical resistances of the motor, so it is often neglected  $R_l=0$  and the formulas of critical slip, torque and Kloss are greatly simplified:

$$s_k \approx \pm \frac{R_2'}{X_k};$$

$$M_k \approx \pm \frac{3U_{1ph}^2}{2\omega_c X_k};$$

$$M \approx \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}};$$

and there is a simple expression for finding the critical slip of the engine:

$$s_k \approx s_n (\lambda_m \pm \sqrt{\lambda_m^2 - 1}), \quad (10)$$

where  $\lambda_m = \frac{M_k}{M_n}$  – the ratio of the critical moment to the nominal.

Speed characteristics can be obtained based on the expression for the current  $I_2'$ . Calculate the electromechanical characteristics for different frequencies of supply voltage:

$$I_2' = \frac{U_{ph}(f)}{\sqrt{\left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{s(f)} \right)^2 + (X_k f^*)^2 \right]}}, \quad (11)$$

where  $U_{ph}(f)$  - phase voltage at a given frequency;  $S(f)$  is the slip at a given frequency.

We use the following formulas to determine the unknown parameters of the substitution scheme:

Critical slip  $S_k$ :

$$s_k \approx s_n (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) = 0,029 \cdot (2,2 + \sqrt{(2,2)^2 - 1}) = 0,12. \quad (12)$$

where  $S_n$  - nominal slip;  $\lambda_m$  - overload factor.

Inductive phase resistance of short circuit  $x_k$ :

$$x_k = \sqrt{\frac{R_2'^2}{S_k^2} - R_1^2}. \quad (13)$$

The phase voltage must change according to a certain law with changing frequency. Depending on the type of moment of resistance, the proportions are often observed:

$$\frac{U_{ph}}{f} = const, \quad \text{and} \quad \sqrt{\frac{U_{ph}}{f}} = const. \quad (14)$$

In our case, we do not change the power frequency at a constant mode of operation of the motor, and set it two fixed speeds. In addition, we cannot increase the supply voltage above the nominal when adjusting the speed up from the nominal. Therefore, we assume that the phase voltage  $U_{ph}(f)$  with increasing frequency remains 380 V, and at speeds less than the nominal motor is powered by low voltage, the value of which is within:

$$U_{ph.n} \frac{f_i}{50} \leq U_{ph} \leq U_{ph.n} \sqrt{\frac{f_i}{50}}. \quad (15)$$

For power frequency 30 Hz  $U_{ph}=280\dots310$  V. Varying the phase voltage within these limits will allow you to select the required mechanical characteristics of the motor.

Sliding at a given frequency can be found by the formula:

$$S(f) = \frac{\omega_0 \cdot f^* - \omega}{\omega_0 \cdot f^*}, \quad (16)$$

where  $\omega_{0n}$  - rated speed;  $f^* = f_i/f$ ; ( $f$  - set frequency of supply voltage;  $f_i$  - changing frequency).

As a result of substituting expression (16) in (12) we obtain the final expression for the speed characteristic:

$$I_2' = \frac{U_{ph}(f)}{\sqrt{\left[ \left( R_1 + \frac{R_2' \omega_{on} f^*}{\omega_{on} f^* - \omega} \right)^2 + (x_k f^*)^2 \right]}}. \quad (17)$$

Substituting different values of the frequency of the supply voltage and the speed from 0 to  $\omega_0$  in formula (17), we obtain the value of the current  $I_2'$  for the speed characteristics at different frequencies.

Let's write expressions for the moment of AM, substituting in it values of parameters taking into account frequency of supply voltage:

$$M = \frac{3U_{ph}^2(f) \frac{R_2}{S(t)}}{\omega_0(f) \left( \left( R_1 + \frac{R_2'}{S(t)} \right)^2 + X_k^2(f) \right)} . \quad (18)$$

As a result of the transformations of the expression (18), substituting it (16), we obtain a final expression for the construction of a mechanical characteristic:

$$M = \frac{3 \left( U_{ph.n}^2 \sqrt{f^*} \right)^2 \frac{R_2' \omega_{0n} f^*}{\omega_{0n} f^* - \omega}}{\omega_{0n} f^* \left( \left( R_1 + \frac{R_2' \omega_{0n} f^*}{\omega_{0n} f^* - \omega} \right)^2 + (x_k^2 f^*)^2 \right)} . \quad (19)$$

Substituting various values of the frequency of supply voltage, and the speed of 0 to  $\omega_0$  formula (19), we obtain the value of the moment for mechanical characteristics of electric motors at different frequencies.

In the drive of a rotary crusher, requiring an improvement, an asynchronous three-phase engine with a short-circuited rotor AIR100S4U2, which has the following characteristics [16]:

- - nominal voltage of 380 V;
- - power of 3 kW;
- - power coefficient of 0.82;
- - frequency of 1420 rpm.;
- - nominal current 7.2 A
- - nominal moment of 12 Hm;
- - multiplicity exceeding 2,3.

The calculations are carried out using the MathCad software.

In Figure 3 shows the mechanical characteristics of the electric motor 4A50V2U3 with a synchronous rotational frequency of 3000 rpm at different power supply by law control  $U_{ph} / f = const$ .

In Figure 4 shows the mechanical characteristics of the electric motor 4A100B2U3 with a synchronous rotation frequency of 3000 rpm at different power frequencies by the control law  $U_{ph} / f^2 = const$ .

In Figure 5. The mechanical characteristics of the electric motor 4A50B2U3 with a synchronous rotation frequency of 3000 rpm at different power transmission frequencies are presented  $\sqrt{U_{ph} / f} = const$ .

To obtain the working points of the electric drive with different laws, it is possible to consider the moment of resistance to the shaft crusher in the first approximation.

From the graphs received, the mechanical characteristics of the electric motor can be seen that under the law of management  $U_{ph} / f = const$  (Fig. 3) The work of the drive crusher is not effective in the entire power supply range, since the maximum "rollover" of the asynchronous

engine does not change. And for the work of the crusher, in the occurrence of peak excess of the moment it is a decisive factor.

Under management law  $U_{ph} / f^2 = const$  (Fig. 4), operation is not possible because in this case its moment of resistance will be in dangerous areas of characteristics at frequencies of supply below nominal. This law is more suitable for fan devices when the moment of resistance is proportional to the square of the speed.

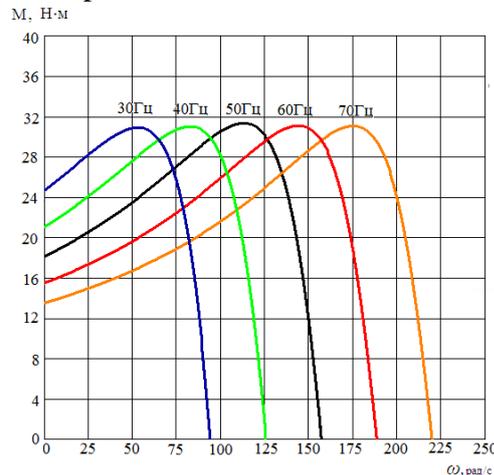


Figure 3 - Mechanical characteristics of the electric motor 4A50V2U3 with synchronous speed of 3000 rpm at different power frequencies according to the control law  $U_{ph} / f = const$

Under management law  $\sqrt{U_{ph}} / f = const$  (Fig. 5) the work of crushers will be most effective, since its moment of resistance will be in safe areas of characteristics with all set power frequencies.

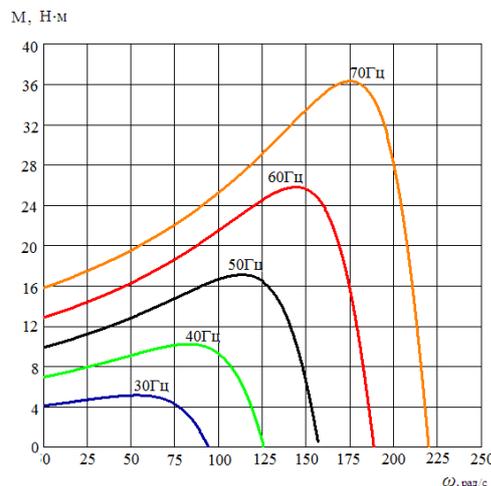


Figure 4 - Mechanical characteristics of the electric motor 4A50V2U3 with a synchronous rotation frequency of 3000 rpm at different power frequencies by law control  $U_{ph} / f^2 = const$

The programmable control device (microcontroller block) must perform the following algorithm:

- engine starts with a minimum power supply (30 Hz). In this mode, the engine moment is maximum, and the speed is small, which promotes the "soft" dispersal of the rotor with a flywheel (with such a drive, the flywheel can even be increased);

- after accelerating the drive to the established speed (Fig. 3), the frequency must be raised to the nominal (50 Hz). This is the average drive mode.

- when loading the polymer waste in the crusher, the moment of resistance increases and if it starts to exceed the maximum value for the mode of operation with a nominal speed, the control unit must reduce the power frequency. And if the moment decreases, then you need to increase the frequency.

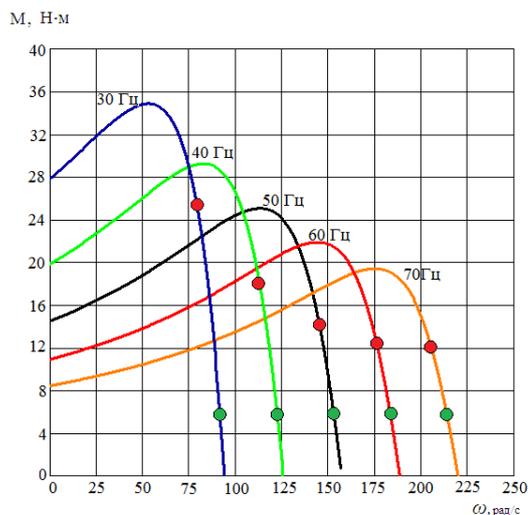


Figure 5 - Mechanical characteristics of the electric motor 4A50V2U3 with a synchronous rotational frequency of 3000 rpm at different power supply by law control  $U_{ph} / f^2 = const$

It should be noted that according to the dependence of the cutting force from speed, the moment of resistance at larger rotational frequencies will be less. This is consistent with characteristics in Figure 5.

To avoid the control principle on the characteristics (Fig. 5), the markers of a dangerous exceeding moment at different frequencies (red dots) and markers that determine the possibility of transition to a higher rotational speed (green dots). With an increase in the moment to the "red" level, the drive must go to a lower rotation frequency, and when reaching the "green" level - to larger. When reaching a "red" level at a minimum frequency, a team is submitted to an emergency stop of an electric motor and it is deemed. This will provide its reliable protection against "rollover".

Plots between "red" and "green" markers determine the working mechanical characteristics of the drive of the crusher, in which it works in normal mode.

## 5. CONCLUSIONS

When using rotary crushers for the processing of polymeric waste materials of light industry, periodically occurs peak growth of the need to resistance, which in the case of frequent repetition lead to a fall in the kinetic energy of the rotor masses and stop the electric motor as a result of "rolling" (excess of the critical moment).

An expression was obtained for calculating the mechanical characteristics of asynchronous electric motors for their passport data, which allows you to calculate the operating modes of the drives of crushers at different power frequencies and various management laws.

It is established that the most suitable control of the frequency and phase voltage of an asynchronous electric motor drive of a rotary crusher for the processing of waste of polymeric materials of light industry production is the ratio  $\sqrt{U_{ph}/f} = const$ .

Using frequency control by electric drive rotary crusher for recycling of polymeric materials of light industry production will lead to increased reliability of its work.

## BIBLIOGRAPHY

1. The state of the question of waste and modern methods of processing: a textbook, G.K. Lobacheva, V.F. Zheltobryukhov, I.I. Prokopov, A.P. Fomenko, Volgograd, VolGU, 2005, 176 p.
2. Ecological management: a textbook, V.F. Semenov, O.L. Mikhailyuk, T.P. Galushkina and others, edited by V.F. Semenov, O.L. Mykhailyuk/ - K, Center for Educational Literature, 2004, 407 p.
3. Grinin A.S. Industrial and household waste: Storage, utilization, processing, A.S. Grinin, V.N. Novikov, M, FAIR-PRESS, 2002, 336 p.
4. Waste management and management. Part 4. Technologies of processing of solid household waste: textbook, V.G. Petruk, I.V. Vasylykivsky, V.A. Ishchenko, R.V. Petruk, Vinnytsia, VNTU, 2013, 234 p.
5. Shtripling L.O., Fundamentals of wastewater treatment and solid waste processing: textbook, L.O. Stripling, F.P. Turenko, Omsk, OmGTU, 2005, 192 p.
6. Krivoshein D.A., Fundamentals of environmental safety of production: textbook, manual, D.A. Krivoshein, V.P. Dmitrenko, N.V. Fedotova. SPB, Lan, 2015, 336 p.
7. Wastes of production and consumption and their impact on soils and natural waters: a textbook, V.M. Savitsky, V.K. Khilchevsky, O.V. Chunaryov, M.V. Yatsyuk, Kyiv, Publishing and Printing Center "Kyiv University", 2007, 152 p.
8. Smetanin V.I. Protection of the environment from production and consumption wastes, V.I. Smetanin, - M, Kolos, 2000, 232 c.
9. Klinkov A.S., Utilization and secondary processing of polymeric materials: textbook, A.S. Klinkov, P.S. Belyaev, M.V. Sokolov, Tambov, TSTU, 2005, 80 p.
10. Processing of rubber waste and thermoplastic materials: monograph, O.P. Burmistenkov, V.P. Misiats, I.V. Panasyuk, B.M. Zlotenko, - K, Cathedra, 2012, 240 p.
11. Rubanka M.M., Waste of light industry, types of recycling and the follow-use, M.M. Rubanka, V.P. Misiats, Bulletin of the Kyiv National University of Technology and Design, 2015, № 4 (88), P. 34-39.
12. Salenko Y.S. Equipment for grinding materials: crushers and mills: textbook, Yu.S. Salenko, Kremenchuk, KDPU, 2008, 100 p.
13. Borshchev V.Ya., Equipment for grinding materials: crushers and mills: a textbook, V.Ya. Borshchev, Tambov, TSTU, 2004, 75 p.
14. Rubanka M.M., Experimental researches of rotor crusher dynamics are for recycling of light industry wastes, M.M. Rubanka, V.P. Misiats, Bulletin of the Kyiv National University of Technology and Design, "Technical Sciences" series, 2016, № 1 (94), P. 27-35.

15. Belov M.P., Novikov A.D. Automated electric drive of standard production mechanisms and technological complexes / M.P. Belov, A.D. Novikov, 3rd ed., Ext. and rework, M, Academic, 2007, 576 p.
16. Series 4A Induction Motors, Handbook, A.Ye. Kravchik, M.M. Delaf, V.I. Afonin, E.A. Sobolenskaya, M, Energoizdat, 1982, 504 p.





## Generalized classification filament for 3D-printing

A. Polishchuk<sup>a</sup>, V. Grudinin<sup>b</sup>, O. Polishchuk<sup>c</sup>, P. Maidan<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Engineering Mechanics, Khmelnytskyi, Ukraine  
email: andrepol215@gmail.com.

<sup>b</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Engineering Mechanics, Khmelnytskyi, Ukraine  
email: vovagrudinin1@gmail.com .

<sup>c</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Engineering Mechanics, Khmelnytskyi, Ukraine  
email: opolishchuk71@gmail.com.

<sup>d</sup> Khmelnytskyi National University, Faculty of Engineering Mechanics, Khmelnytskyi, Ukraine  
email: gugenot@i.ua.

**Abstract:** This article is devoted to the analysis and classification of varieties of filaments used for modern 3D printing and their use in light, shoe industry, engineering and other industries. Modern inventions and developments are not in place and 3D technology is a vivid example. 3D printing is one of the most revolutionary technologies of our time and one of the forms of additive technology, where a three-dimensional object is created by applying successive layers of material. In this article we consider the most popular types of materials that are present in the modern industrial market. Many types and subspecies of additive materials for printing are described. For the first time, a 3D material classification scheme has been drawn up, which gives a complete picture and description of each type, purpose, etc. The potential of 3D technology development is really high and is capable of speeding up scientific and technological progress. Thanks to 3D printing, experts from different industries will be able to study the market as much as possible, they can prepare prototypes of products, and also create several variants of prototypes of the same product at the same time. The application of 3D printing technology in various industries is a huge leap forward, capable of solving various problems and raising it to a qualitatively new level. A generalized table of filaments has been created in groups depending on the mechanical, technical properties and applications of different manufacturers. Also, in order to facilitate the selection of filaments for printing at the product design stage, and based on the technical characteristics and application areas of the 3D filaments under consideration, a table with recommendations for their use for the manufacture of parts and products in various industries in the modern labor market was compiled.

**Keywords:** filaments, 3D technologies, 3D-printing, polymer materials.

## 1. INTRODUCTION

In today's world, additive technologies are used in various industries. World trends periodically hit with news about how weapons, human organs, clothing, home, and cars were printed on a 3D printer. The potential for the development of these technologies is really high and can accelerate the development of scientific and technological progress. Scientific laboratories using developed filaments and 3D printers create various parts and products in the field of mechanical engineering, architecture, jewelry, medicine, design and innovative materials and fabrics for the manufacture of light industry products [1].

## 2. FORMULATION OF THE PROBLEM

The range of materials for 3D printing is quite diverse. As a rule, thermoplastics are used for printing, but there are exceptions - composite materials that contain various additives, but created, again, on the basis of thermoplastics. The raw materials for creating filaments for 3D printing are various polymeric materials such as homo- and co-polymers.

The use of 3D devices opens up new opportunities in various industries, including: engineering; architecture; medicine; heavy, textile, food and jewelry industries, etc. Material in 3D printing, as in any creative activity, is one of the most important elements. Not only mechanical and chemical properties of the future product, but also its aesthetic value depend on the material. And in order to choose the right material for 3D printing to achieve a task, you need to understand what are the types of filaments, what are their properties and operating conditions and how they relate to the needs, quality and method of printing, material scope and application. To answer these and other questions, you need to consider the main types of 3D filaments and their technical characteristics. Therefore, this article will provide a detailed overview of filaments for 3D printing produced by different manufacturers, their properties and applications.

The aim of the article is to compile a generalized classification of filaments for 3D printing by the main groups of their purpose, summary of characteristics that characterize them in a single table and provide recommendations for choosing 3D plastics for the manufacture of certain products or parts.

## 3. PRESENTING MAIN MATERIAL

Modern 3D-printing systems allow you to quickly and efficiently solve a wide range of tasks facing engineers, designers, technologists in the engineering industry and light industry. 3D printers are becoming indispensable both at the stage of creating conceptual designs and for the production of finished products.

All consumables are divided into two groups: materials for 3D printing using FDM technology and materials for 3D printing using SLA technology. FDM technology is the most popular, so the choice of materials for 3D printers is the widest. Therefore, in more detail in this article will be considered materials for FDM 3D printing.

Depending on the specialization, materials for FDM 3D printing can also be divided into several groups, each of which is designed to perform certain technological tasks.

1. *Filaments of general purpose.* Used to create products that are not exposed to significant mechanical, thermal and other types of loads and which are used most often. General purpose filaments include the most common in the Ukrainian market 3D plastic ABS and PLA.

*3D plastic ABS (acrylonitrile butadiene styrene)*. One of the most popular materials for FDM 3D printing. This type of plastic is manufactured by many manufacturers, including MonoFilament (Ukraine), 3Dplast (Ukraine), 3DDevice (China), Verbatim (China), etc. But plastics from different manufacturers differ in the difference of basic technical characteristics. This material is better than other materials is subjected to mechanical and chemical treatment. Allows you to print at high speed.

Main properties: impact resistance, rigidity, heat resistance, durability, moisture resistance; resistance to some acids and oils, solubility in acetone, has a wide range of operating temperatures of finished products (from  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $+90^{\circ}\text{C}$ ). The main disadvantages are: instability to organic solvents, low light fastness, the need to heat the platform to prevent deformation of the models during 3D printing.

It is used for the manufacture of: housings, fasteners and parts for various equipment; mechanical parts that work without significant loads; interior and exterior car parts; decorative and decorative-applied products; prefabricated dimensional products, stands, containers, etc. Due to its properties it is a good material for prototyping.

*3D plastic ABS +*. This is a new polymer monofilament designed for better 3D printing. The modified formula of ABS + plastic has a number of advantages in comparison with usual ABS plastic.

Its advantages in comparison with ABS plastic include: better adhesion of layers; sticking even to a cold table; higher strength; resistant to acids; durability; moisture resistance of finished products; non-toxicity; less shrinkage during printing, etc. Lower printing temperature avoids problems of adhesion to the base, delamination and deformation of the finished model, which in turn affects the quality of finished products, meets the specified size, size and shape [2].

*3D plastic PLA (polylactide)*. The second most popular material for FDM 3D printing. Environmentally friendly, biodegradable plastic based on lactic acid polymers. It is used for products with the increased sanitary requirements, and also with high requirements to accuracy and detail. It lends itself well to machining, but is inferior to ABS in this plastic. This type of plastic is manufactured by many manufacturers, including MonoFilament (Ukraine), 3Dplast (Ukraine), 3DDevice (China), Verbatim (China), etc. But plastics from different manufacturers differ in the difference of basic technical characteristics. For example, PLA plastic from 3DDevice has a silky appearance.

Main properties: non-toxicity and safety (absence of toxins during printing does not harm human health); biodegradability; economy during printing, due to low melting point of the material, no deformation during cooling; preserving color saturation, etc. [2]. When using PLA Lowcost, PLA Silk plastics when printing, it is possible that the platform does not heat up due to their better adhesion properties to the work surface.

It is used for making: children's and disposable tableware; children's toys; medical supplies; artistic and decorative products that do not need after printing; food packaging, containers for food (such as refrigerators) and medicines; souvenirs; plafonds; details of refrigerating chambers; products in various design projects, etc. It is also used to print various product prototypes that have been in use for a long time.

*3D plastic PLA +*. In essence, it is an optimized PLA plastic with improved properties. It is characterized by increased strength and the fact that it better tolerates mechanical action. In addition, PLA + plastic is more resistant to cracking. This effect is achieved by including in the material auxiliary bio-polyester mixtures. Despite this, the plastic did not lose the basic properties of PLA and remained safe and non-toxic. Plastic is not prone to the main problems

of "parent" material and is suitable for all models of 3D printers running on FDM printing technology [3].

2. *Technical plastics*. Plastics of this group are mainly used for the manufacture of parts of mechanisms, structural elements and other high-strength and wear-resistant products. Technical plastics that are manufactured and widely used in 3D printing, according to their technical characteristics and properties can be divided into two groups I - strong and II - flexible.

Group I includes the following types of filaments: PET, PETG, PC, PBT, Nylon, PEEK, Carbon Fiber, CoPET, POM, PP. In turn, the II group includes: Elastan, Platan, Filaflex, Primalloy, TPU, ColorFabb.

Consider the technical characteristics and areas of application of filaments, which are classified in group I.

3D plastic PET (polyester). One of the most common thermoplastics in the industry, which has found application in 3D printing. It is used for products in contact with food [3].

Main properties: strength; elasticity; viscosity; durability; heat resistance; resistance to the majority of acids; good dielectric. Used for the manufacture of: gears and parts of mechanical gears; structural elements that are subjected to dynamic loads; containers for food and utensils; light transmitting elements; buildings of equipment; decorative translucent products; electrical fittings; various medical containers, etc.

3D plastic PETG. This is a modified version of PET plastic. Due to the addition of glycol to the main substance a completely new material with other properties is obtained. PETG does not crystallize when heated because it has a more amorphous structure. This is a technical plastic that surpasses the characteristics of the above plastics PLA and ABS. Although the properties are closer to ABS plastic. It is practically not subject to shrinkage and deformation during cooling, has high mechanical strength, rigidity and resistance to a wide range of temperatures. The material is durable and has a high toughness. This plastic is recognized as safe in contact with food.

All the features listed above make it the best option for a variety of applications. Due to its high toughness, PETG is an indispensable material for the production of products that are subject to mechanical impact. And thanks to high transparency it is suitable for creation of decorative products. Excellent mechanical properties make PETG ideal for the technical field where it is used.

3D plastic PETG. This is a modified version of PET plastic. For PA3D plastic PETG Clear. This is transparent plastic, which is a type of PETG plastic. Traditionally, this plastic is used to make plastic bottles and other food containers. It has a high degree of transparency, strength and lightness. Finished products are transparent as glass and easy to machine.

CoPET plastic (*polyethylene terephthalate*). This is a modified version of PET plastic. This is a new reinforced material, which is a strong, fire-resistant amorphous material with a smooth surface and has a high degree of transparency with uniform light scattering. CoPET is the only plastic that can be deformed in the cold state without cracking. This is an optimized material that is suitable for 3D printing on most desktop 3D printers. Finished CoPET plastic products respond well to machining (drilling, grinding, painting, varnishing, etc.). Operating temperature range - from  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $+70^{\circ}\text{C}$ . It can be hardened, after which the maximum operating temperature rises to  $220^{\circ}\text{C}$ .

The main advantages of this plastic are: impact resistance; not solubility in water; resistance to saline and alkaline solutions, fats and oils; no internal pores in the material; glossy surface of finished products; high adhesion between layers; excellent adhesion to the table; products do

not crack after printing; non-toxicity. Used for making: water bottles and carbonated beverages; technical products, one of the requirements for which will be uniform light transmission.

*3D plastic PC (polycarbonate).* One of the strongest materials for FDM 3D printing. It is used for the manufacture of high-strength products that work under high load. Harder and stronger than PET, but less viscous.

Main properties: high strength; hardness; elasticity; durability; heat resistance; durability; resistance to acids; environmental friendliness. Used for the manufacture of: gears and parts of mechanical gears; structural elements operating under static loads; protective equipment; light transmitting elements; food containers; goggles; impact of strong glass, etc.

*3D plastic PBT (polybutylene terephthalate).* It is a polymer that crystallizes and belongs to the complex saturated polyesters. It has become widespread as a structural plastic. The use of polybutylene terephthalate as a structural thermoplastic material is associated with its basic properties and the possibility of various modifications of the material.

*3D plastic Nylon (nylon).* One of the most attractive materials for 3D printing of technical products. Nylon (PA6) refers to structural (engineering) polymeric materials. It is a hard plastic that crystallizes and has high tensile strength and wear resistance. It has a high softening temperature and elasticity at low temperatures, can withstand steam sterilization, heated to 140 ° C. This allows you to use it in conditions with temperature differences in a wide range.

It is used in industry for the production of parts that work under high loads, as well as for the manufacture of high-strength cables, fabrics, strings of musical instruments. In the light industry it is used for production of details of clothes. It has high tribological properties - low coefficient of friction and resistance to abrasive wear, which allows the use of nylon in friction pairs. This is the best option for its various applications.

Main properties: high strength, including tensile strength; flexibility; elasticity; durability. It has exceptional antifriction properties. It is used for the manufacture of: gears and parts of mechanical gears operating at high speeds, including parts of friction pairs; structural parts operating in the mode of dynamic and static loading; plastic parts of car mechanisms (dampers, levers, bushings, gears); protective containers, wiring accessories; items of clothing, etc.

*3D plastic PEEK (polyetheretherketone).* Due to its unique properties, PEEK has many advantages over other polymers and can be used as a metal substitute. Different designs can be applied to PEEK material, and it, unlike metal, is not subject to corrosion. Low density (twice less than that of aluminum) allows you to reduce the weight of any model.

Its main properties are: the ability to withstand high pressures, excellent frictional behavior, low flammability, excellent strength, rigidity and chemical resistance. Is an excellent dielectric [3].

Thus, PEEK is used in such industries as automotive, electronics, semiconductors, mechanical engineering and more. In FDM 3D printing, PEEK is especially suitable for the production of small series, or for the production of special designs, prototypes. In the mechanical engineering and automotive industries can be used for the manufacture of rolling and plain bearings, valves, thrust washers, piston rings, insulating layers, gears, bushings, pump housings, dosing pistons, lampholders, electric plugs. Due to the fact that this material is refractory, does not emit gases, can be insulated or conduct electricity, it can be used for the manufacture of products and parts in the field of semiconductors and electrical engineering. Due to its heat resistance and impact resistance, it is an indispensable material for many industries.

*3D plastic Carbon Fiber.* This is a unique polymer-based material with the addition of carbon fiber. Due to this, the output is a strong and light polymer. Due to the lower weight of

the products of this material can be used as analogues of finished products where you need a lightweight version. In terms of weight, carbon plastic is much more advantageous than traditional materials [3].

Main properties: high strength, stability; resistance to mechanical influences; light weight of the product at high rigidity; small shrinkage; resistance to UV radiation, temperature and mechanical effects. It is used for the manufacture of: various engineering parts; radio and electrical products; screens that absorb electromagnetic radiation; body parts and interior; exclusive details of prefabricated bicycles, etc.

*3D plastic Carbon Fiber XT-CF20*. This is a kind of 3D plastic Carbon Fiber. This is the first development from the European company ColorFabb, designed for the manufacture of high rigidity parts. This plastic is a combination of carbon fiber (20%) and a composite material based on a complex copolyester. This combination provides high strength, light weight and a pleasant matte surface of printed products.

Main properties: high toughness; high melt strength; high flexural modulus (2 times higher than the same value for PLA plastic); moderate elongation at break; high temperature of glass transition; good dimensional accuracy and stability. Used for the manufacture of: functional modules and prototypes; various finished products.

*3D plastic POM (polyacetal)*. Unlike other plastics, polyacetal combines high stiffness and sufficient hardness of the polymer monolith with good resistance to dynamic, especially shock loads. It does not lose its properties even at low temperatures.

The main advantages of this filament are: high strength, viscosity, rigidity; durability; resistance to various oils, friction and shock loads; not harmful. Superior in its physical and mechanical properties to NYLON. It is used for the manufacture of: various technical products; high-strength parts with low coefficient of friction; gears, inserts of sliding bearings; car parts; housings of electrical appliances, electrical parts and fittings; fibers; products for food equipment and medicine, etc.

*3D plastic PP (polypropylene)*. This is one of the most popular types of plastic in the industry. It is actively used for the manufacture of utensils and any mechanisms that are somehow involved in the cooking process (mechanisms, shapes, packaging, etc.). In addition, this plastic is indispensable for the manufacture of children's toys. It has high mechanical characteristics.

Main properties: high tensile strength during tensile; hardness; reliability; durability; flexibility and elasticity; low vapor and gas permeability; resistance to acids, alkalis and organic solvents, temperature changes, multiple bends and UV radiation; small mass; high degree of transparency. Used for making: utensils; food packaging; bottles; kitchen and household products.

Consider the technical characteristics and applications of filaments, which are classified in group II.

*3D plastic Elastan (elastane)*. The main feature of this material is its high elasticity, which is lacking in most other materials. The material has a shape memory effect, ie the ability to return to its original shape after deformation and high wear resistance, which is perfect for making garments, including shoes. Also, this filament is used in almost all industries [2].

Main properties: elasticity; elasticity; impact resistance; tensile strength; flexibility; resistance to water erosion, UV radiation, radiation, solvents and fuels [2]. It is used for the manufacture of: damping, sealing, anti-vibration elements of parts of mechanisms and equipment; protective elastic shockproof containers, covers, pads; anti-slip elements; decorative and decorative-applied products.

*3D plastic Plastan (plastan)*. It is a transparent plastic with an amorphous polymer structure, with characteristic plastic properties. It has high elasticity with high strength. It lends itself well to mechanical processing. In the process of printing there is no deformation shrinkage, no warping and delamination.

Main properties: elasticity; flexibility; plasticity; heat resistance; resistance to UV radiation, radiation and solvents. It is used for the manufacture of: solid gears and parts of mechanical gears; sealing and compression elements of mechanisms (gaskets, rings of inserts, etc.); damper and vibration damping elements; protective elastic strong containers, covers, overlays and packing; anti-slip elements [2,4].

*Filaflex 3D plastic*. It is an elastic material that allows you to create flexible parts for many industries. Its feature is that it does not lose shape when stretched and has high tensile strength.

Main properties: resistance to mechanical loads; high tensile strength; does not lose shape when stretched; not destroyed by solvents; does not react with various oils, has high wear resistance. It is used for the manufacture of: clothing, footwear, leather goods; watch accessories; complex 3D models in combination with ordinary PLA plastic.

*3D plastic Primalloy*. It is a soft rubber material based on polyester with increased heat resistance, mechanical strength, abrasion resistance, action of oils and petroleum products. It is a high-performance polyester material based on thermoplastic elastomer (TPE), which consists of a mixture of crystalline polyester block (mainly PBT polybutylene terephthalate) and a thin layer of polyester block (mainly polytetramethylene ether glycol). This mixture gives the details printed by this plastic, unique flexibility without loss of durability. It is a strong thermoplastic elastomer (TPEE), which has greater strength and elasticity compared to traditional thermoplastic elastomers. Extremely precise diameter and homogeneous structure of plastic fiber ensure smooth work with the material.

Main properties: elasticity; high mechanical strength; durability; homogeneity of the material. The disadvantages of this plastic include the fact that the plastic emits a specific odor during printing, and before printing you need to cover the platform with polyamide film, and the part itself after printing to cool with air conditioning. It is used for the manufacture of rubber products, flexible parts in various industries.

*3D plastic TPU (thermoplastic polyurethane)*. In traditional industry, this is a fairly common material used to make a wide range of different products. TPU plastic came to 3D printing relatively recently, and has not yet gained enough popularity. However, due to its physical and mechanical properties, this polymer is very interesting. It is quite strong at high flexibility, and at cooling practically does not give shrinkage. It is one of the types of flexible 3D plastics and is suitable for use in various models of 3D printers. This material practically does not stratify, has excellent adhesion between layers. However, due to the high flexibility of 3D printing, it may require some effort and special settings of the 3D printer.

Main properties: abrasion resistance; durability; elasticity and resilience; resistance to oils; withstands low temperatures. Of the disadvantages of the polymer is the difficulty in processing after manufacture (it is practically not amenable to grinding, painting, etc.). It is used for the manufacture of flexible and at the same time durable parts that can withstand ambient temperatures up to 80 °C.

*ColorFabb XT Clear 3D plastic*. This is a great alternative to PLA plastic. This plastic can be used even on 3D printers without heating the table. The main component of this plastic is PETG plastic, which is characterized by great durability and high melting point. The material has a certain elasticity, which depends on the thickness. If the printed part is bent but not

broken, it will return to its original shape. The surface of the models is a bit glossy, which can be very attractive in some cases.

Main properties: high rigidity; transparency; strength; has heat-shrinkable plastic-like PLA, the ability to print on a cold platform, resistance to high temperatures (not afraid of high temperatures in the home). It is used for the manufacture of products for household purposes and food containers.

3. *Specific materials.* This is a group of unique 3D filaments that have properties not inherent in ordinary plastics. This group includes the following types of 3D materials: T-Glase; ABS Conductive; PET fluorescent plastic; polylactocapron PLC; 3D refractory plastic; Color Changing Filamet.

*3D plastic T-Glase.* This is a quality material for 3D printing of American production. Plastic for the T-Glase 3D printer is a low-temperature material with a high degree of transparency as well as high rigidity. This plastic can come into contact with food and can be used to make food containers. At the same time during 3D printing the material does not emit odors and vapors.

Main properties: high strength and transparency; low shrinkage, non-toxicity and safety; the ability to recycle plastic waste into a new plastic thread. It is used for the manufacture of: parts for various engineering tasks and the creation of functional elements; food containers; containers for liquids and food.

*3D plastic PET fluorescent.* This is a quality material for 3D printing.

Main properties: increased strength; durability and wear resistance; non-toxicity; moisture resistance; heat resistance; resistance to acids and oils; solubility in acetone. The disadvantages are: instability to organic solvents, low light fastness, low adhesion between the layers of the part, poorly tolerates the effects of ultraviolet radiation. It is used for the manufacture of various industrial and durable parts.

*3D plastic ABS Conductive.* It is a high-quality material that conducts electricity and has anti-static properties. It has a standard base, but it is accompanied by electrically conductive components and carbon fibers.

Main properties: current conductivity 1000 Ohm / cm; excellent mechanical and impact strength; resistance to high and low temperatures; printing with the usual settings of ABS plastic. It is used for the manufacture of various industrial and electrically conductive parts and for shielding electromagnetic interference.

*3D plastic PLC (polycaprolactone).* This is a novelty in 3D printing, which has atypical properties for this field. 3D plastic has unusual properties. Due to its high elasticity and low melting point, it can be used as a modeling material. 3D PLC plastic is a biodegradable photopolymer of great interest to the medical industry. It completely decomposes under the influence of ultraviolet light, high temperatures, microorganisms and radiation. Suitable for use in a 3D pen.

Main properties: elasticity; biodegradability; environmental friendliness and safety; not strong. It is used for making: clothes and shoes; food containers and other elements that involve close contact with the human body.

*3D plastic is fireproof.* This plastic is a modified ABS with special substances that provide material protection against fire. It goes out within 10 seconds after removing the fire source. It will be an excellent choice for the production of various products that require fire resistance. The houses added to the 3D plastic do not contain halogen. The characteristics of refractory plastic is practically no different from conventional ABS. In 3D printing, refractory ABS plastic can cause certain compounds. If necessary, you can use a special glue for ABS.



Main properties: high interlayer adhesion; excellent quality and smooth surface of 3D printed products. Used for the manufacture of refractory products for various industries.

*3D plastic Color Changing Filament.* This plastic has excellent thermal properties. It is able to change color under the action of temperature. Used for the manufacture of: products in various design projects; decorative products and decor elements; heat-resistant parts for various industries.

4. *Decorative plastics.* This is a group of plastics designed specifically for the manufacture of decorative products. Some of them allow to imitate traditional materials (bronze, wood, aluminum, etc.). Decorative plastics can be divided into two groups: I - wooden plastics; II - metallized plastics.

Group I includes Wood and BambooFill plastics that mimic wood.

*3D plastic BambooFill.* This is a high quality plastic that mimics wood. The plastic consists of a finely divided wood powder and a polymeric binder similar in properties to PLA plastic. With a certain mode of 3D printing, allows you to simulate the texture of natural wood: annual rings, bark and more. Good for polishing and other types of machining.

The main properties are similar to PLA plastic. It is used for the manufacture of: products that mimic wood; decorative and decorative-applied products.

*3D plastic Wood.* This plastic is one of the unique materials for printing on a 3D printer. It consists of wood dust and polymeric binder. The amount of wood dust in this material reaches 70%, which gives it a pleasant texture and characteristic color. Poplar wood dust is mainly used. In terms of characteristics, this consumable resembles PLA plastic and melts in the same temperature range (170-230 ° C).

Main properties: moisture resistance, non-toxicity. If necessary, the finished products are well sanded and varnished, which retains their properties for a long time. The higher the operating temperature when printing, the darker the model. It is used for the manufacture of: decorative objects; layouts; accessories for repair of wooden products, furniture, etc.

The second group includes metallized plastics such as: BronzeFill, PLA Aluminum, PLA Brass, PLA Copper. Each of the species has its own characteristics due to the addition of different particles of metal dust.

*3D plastic BronzeFill.* This plastic imitates bronze. It consists of a fine bronze powder and a polymer connector similar to PLA plastic. Due to the good electrical conductivity, allows you to include products in electrical circuits. After polishing, the metal shines. Good for mechanical and chemical treatment.

The main properties are similar to PLA plastic. It is used for the manufacture of decorative and decorative-applied products [4].

*Aluminum 3D plastic (PLA Aluminum).* Metallized plastic for printing on a regular 3D printer. This plastic imitates aluminum. It contains ordinary PLA plastic as a binder and about 30% aluminum powder. As various functional details it is better not to apply, because of PLA plastic in its structure.

The main properties are similar to PLA plastic. It is used for the manufacture of decorative and decorative-applied products.

*Brass 3D plastic PLA Brass.* This plastic imitates brass. It contains ordinary PLA plastic and about 30% brass powder. Due to the addition of metal powder, the filament has greater strength than ordinary PLA plastic, but it is still better not to use it to create various technical components.

Main properties: low shrinkage when cooled; high strength; low elasticity; possibility of printing on a cold platform. In terms of properties and parameters it is almost indistinguishable

from PLA, but the appearance of the parts resembles real metal products, especially after grinding and polishing. It is used for the manufacture of decorative products.

*3D Plastic PLA Copper.* Like most metallized polymers, it consists of PLA plastic as a binder and copper metal powder. This plastic mimics copper. It is better not to use it as various functional details, due to the presence of PLA plastic in its composition. The lung is processed by mechanical methods. As a result of processing of products from such material it is possible to achieve practically glossy surface with metal outflow. The processed models differ little from real copper products [5].

The main properties are similar to PLA plastic. It is used for the production of decorative products, toys and souvenirs.

*4 Supporting materials.* This is a group of plastics used to build auxiliary technological elements required for 3D printing of products with complex spatial configuration. Such items are removed after printing. Since 3D-printing is carried out in layers, there are situations when the construction of the next layer there are parts that exceed the dimensions of the previous one. To prevent such parts from "hanging in the air", special supports and substrates are first printed under them. For this purpose, the two most effective and universal types of auxiliary plastics PVA and HIPS are used.

*3D plastic PVA (polyvinyl acetate (PVA)).* This is a water-soluble translucent material based on vinyl acetate. In everyday life it is known as PVA glue.

Main properties: non-toxic, water-soluble. Used to make supports and substrates for printing complex objects; prototypes because it retains well when printing the specified size.

*HIPS plastic (polystyrene).* It is a thermoplastic polymer based on styrene. Soluble in organic solvent limonene. It does not have any outstanding mechanical properties, but it is absolutely indispensable when printing two or more extruders, as a material for creating soluble supports and adhesions. It is thanks to him that it is possible to create as many complex objects as you like, especially those where one object is inside another [5].

Main properties: low shrinkage, fragility; insoluble in water; high-quality transfer of the set sizes; non-toxicity and safety; does not warp or crawl. Used for the manufacture of: supports and adhesions for printing complex objects; prototypes because it retains well the specified dimensions when printing; products that come into contact with food.

This is not a complete list of current modern 3D materials, but only a small part of them. There are other materials for 3D printing that are not included in the review in this article, such as: COLORFUL, GLOW, ABS Antistatic, CERAMIC, GLASSFIL, etc. Their properties, technical characteristics and areas of application will be discussed in the following works.

#### 4. THE RESULT OF WORK

On the basis of the review of 3D filaments we will make their generalized classification (Fig. 1) by groups depending on mechanical and chemical properties, purpose and areas of application and a summary table with their main technical characteristics (Table 1).

The presence of the summary of basic technical characteristics will allow faster selection of 3D materials for 3D printing, depending on the purpose and operating conditions, and carry out their simultaneous comparative analysis.

Based on the data in this table, we can conclude that all materials for 3D printing are different from each other, the material of the thread can have a variety of properties. The filament may be brittle or strong, flexible or hard, smooth or rough, heavy or light, etc.

Plastic thread can be of two standard diameters: 1.75 and 3 mm. Of course, they are not interchangeable, and the choice of the desired diameter should be specified according to the specification of the printer. Plastic thread can be from different manufacturers. These may be well-known global brands, but also manufacturers of unknown origin and undetermined quality. For each type of material, the operating temperature to which the material in the printhead must be heated and the heating temperature of the work platform (platform) must be known for better adhesion of the first layer. These values are not always the same for any sample of yarn made of the same type of material. Therefore, the table shows the approximate range. Optimal temperatures should be indicated on the coil label or in the accompanying document, but this is not always the case and often has to be selected experimentally.

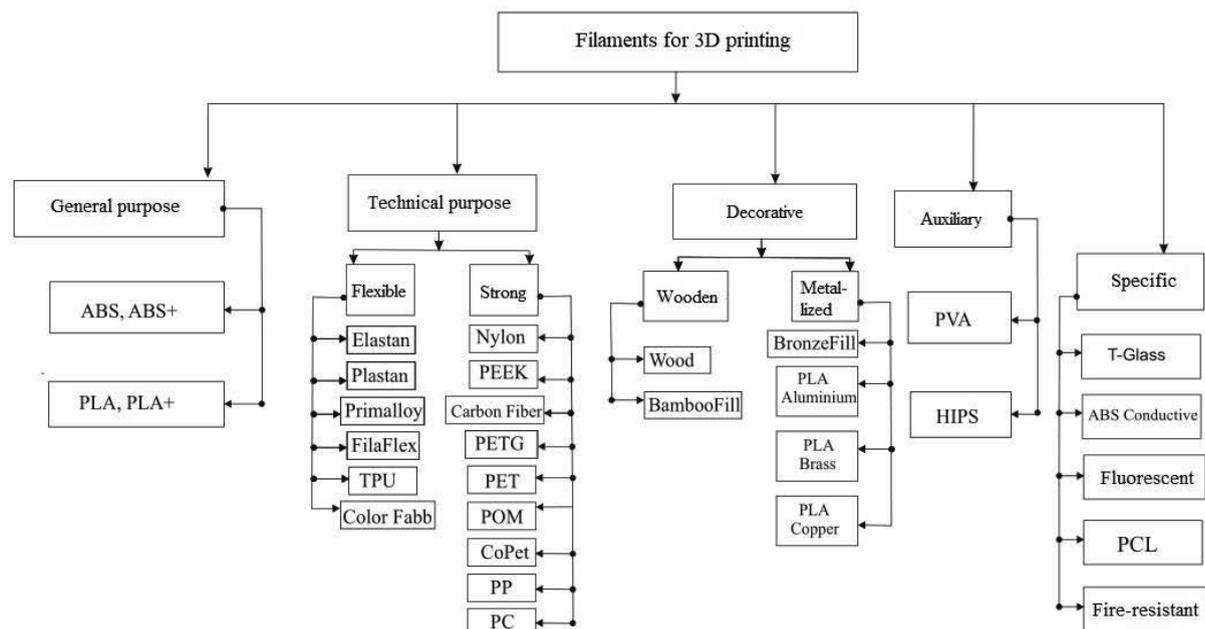


Figure 1 - Generalized classification of 3D materials

Table 1 - The main technical characteristics of 3D filaments

№	Material	Technical characteristics of filaments										Producer
		Density, g/cm <sup>3</sup>	Strength limit, MPa	Modulus of elasticity, MPa	Rel. length tensile, %	Molding shrinkage, %	Surface resistance, %	Extruder temperature at printing, °C	Table temperature at the press, °C	Print speed, mm/s	Diameter of a thread of plastic, mm	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	ABS	1.04	38	2700		0,4		210-270	1100	440-70	1,75; 3	Esun, China
2	ABS+	1,06	38	2800	4	0,1		215-230	895	440-80	1,75;3	MonoFilament, Ukraine
3	PLA	1,2	40	2265	5			210-255	1100-120	440-70	1,75; 3	3DDevice, China
4	PET fluorescent	1,04	36	2265	4			210-245	1100-120	440-70	1,75	3DDevice, China

5	ABS Conductive	1,15	45	2000	10		$10^3-10^5$	210-270	1100	440-70	1,75	3DDevice, China
6	Carbon Fiber	1,11	44	4018	18		більше $10^{10}$	220-240	1100-110	540-70	1,75	ColorFab, Netherlands

Continuation of Table 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
7	Carbon Fiber XT-CF20	1,3	76			0,2	$10^9$	240-260		440-70		ColorFab, Netherlands
8	Carbon Esun EPA-CF	1,14	63,9	4387	4		$10^{10}$	240-260	660	40-60	1,75	Esun, China
9	PLA+	1,24	60		29	-		205-250	680	440-60	1,75; 3	Esun, China
10	Bronze Fill	3,9						195-220	50-60		1,75; 2, 85	ColorFab, Netherlands
11	PETG Clear	1,38	55-57	280-3100				210-220	50	40-60	1,75; 3	3DDevice, China
12	PLA Aluminium	1,29						190-230	060	340-150	1,75; 3	3DDevice, China
13	PEEK	1,4	200	3600	25	0,1	$3 \times 10^6$	380			1,75	3DDevice, China
14	CoPET	1,27	70	2100	5	0,2		230-240	470	440-60	1,75	MonoFilament, Ukraine
15	POM	1,41	65,5	2758	0		$10^3-10^5$	250-270			1,75	3DDevice, China
16	Primalloy	1,09	85		990			210-235	450		1,75	Verbatim, Japan
17	TPU	1,25	79,97					200-220	8100	340-50	1,75	3DDevice, China
18	HIPS	1,05		2400		0,8		230-240	9100	340-60	1,75; 3	MonoFilament, Ukraine
19	PLC	1,16	29		11			70-100			1,75	Esun, China
20	FCoPet	1,27	570	2100				2230-240	440-70	440-60	11,75	MonoFilament, Ukraine
21	Flex	1,2	35		5			220-250	1100-110		1,75	3DDevice, China
22	PET	1,38	55-75	3000				210-230	890	440-60	1,75	3DDevice, China
23	Bronze Fill	1,2						190-210	990	440-60	1,75	Esun, China

Ideally, the object should be designed for a specific material. For example, if it is known that the 3D model will be printed from PLA plastic, it is necessary to follow specific recommendations when designing a product from this material (for example, support of overhanging parts, strengthening protruding elements, smoothing corners, etc.). The choice of materials for printing determines some of the basic design principles that must be considered. Adhering to design rules for a particular material is important for successful printing. For this purpose it is necessary to use the reference literature, in particular the data given in table 1.

In order to facilitate the choice of polymers at the design stage of the product, based on the technical characteristics and areas of application of the considered 3D filaments, a table with recommendations for their use for the manufacture of parts and products in various industries (Table 2).

Table 2 - Recommendations for use for the manufacture of parts and products in various industries

No	Product part name	Used material
1	Sewing products: clothing details, sewing accessories	Elastan, PLC, Nylon
		ABS, HIPS, PC, PLC
2	Shoe products	PLA, PLA+, Filaflex, PLC, TPU
3	Industry engineering: parts housings, gears and details of mechanical transfers, threaded connections, electrical devices, boards, bearings, sliding parts, gears	ABS, CoPet, ABS <sup>+</sup>
		PET, PC, PBT, Nylon, Plastan, ABS
		PC, PBT
		ABS Conductive
		POM, Nylon, PET fluorescent .
4	Details of cars, planes	Carbon Fiber XT-CF20, Carbon Fiber, PC
5	Details of refrigerators	PLA, PET, PEEK
6	Mechanical units, product housings	Carbon Fiber XT-CF20, Carbon Fiber, PET, CoPet
7	Electronics, electrical fittings	PET, PEEK, POM, HIPS, ABS Conductive, Nylon
8	Heat-resistant materials	PC, ABS Conductive PET fluorescent , PET, Nylon, PEEK
9	Conductive materials	ABS Conductive, BronzeFill, BambooFill
10	Refractory materials	refractory ABS, PEEK
11	Details for imitation of wooden surfaces	BambooFill
12	Details for imitation of metal surfaces	BronzeFill, PLA Aluminium, PLA Brass, PLA Copper
13	Household products	PETG Clear, PLC, PP, T-Glace
14	Accessories	Color Changing
15	Wear-resistant materials	TPU, PET, Primalloy, PEEK

## 5. CONCLUSIONS

This article discusses the main types of 3D filaments used for 3D printing using FDM technology. The analysis of their main properties, technical characteristics and areas of application is carried out. Based on the analysis, a generalized classification of filaments for 3D printing by the main groups of their purpose, summarizes the characteristics that characterize them in a single table and provides recommendations for choosing certain types of 3D plastics for products or parts in various industries.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Additive technologies and 3D printing, [Electronic resource], Access mode, <http://www.forbes.ru/tehnologii/342687-additivnye-tehnologii-i-3-d-pechat-v-poiskah-sfer-primeneniya>.
2. MonoFilament, [Electronic resource], Access mode:file, <file:///C:/Users/.../MonoFilament.html>.
3. 3D Device, [Electronic resource, Access mode, file:/// [https://3ddevice.com.ua/shop/3d-plastic/?gclid=Cj0KCQjw4eXPBRcARIsADvOjY3\\_AYefJoNJ3pH5JFBmTwIATP1oTL0gNa7QAEyw6jIT4CYyWjwZQkgaAssoEAL](https://3ddevice.com.ua/shop/3d-plastic/?gclid=Cj0KCQjw4eXPBRcARIsADvOjY3_AYefJoNJ3pH5JFBmTwIATP1oTL0gNa7QAEyw6jIT4CYyWjwZQkgaAssoEAL) html
4. Shoe print printer, [Electronic resource], Access mode, <http://3dmag.org/ru/blog/3d-printing/869.html>.
5. 3D Device, [Electronic resource], Access mode, file:/// <https://3ddevice.com.ua/shop/metallizirovannye-plastiki>



28 stycznia 2022  
Gliwice

KATEDRA MATERIAŁÓW INŻYNIERSKICH I BIOMEDYCZNYCH  
WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY  
POLITECHNIKA ŚLĄSKA

## MIĘDZYNARODOWA STUDENCKA KONFERENCJA NAUKOWA

### Optimization of the titanium oxide deposition process for photovoltaic applications

L. Poniewiera<sup>a</sup>, A. Rishko<sup>b</sup>, D. Sudak<sup>a</sup>, D. Kula<sup>a</sup>, W. Barczyk<sup>a</sup>, A. Drygala<sup>c</sup>, M. Fijałkowski<sup>d</sup>, S. Leszc<sup>e</sup>, K. Gołombek<sup>e</sup>, M. Kremzer<sup>f</sup>

<sup>a</sup> student, Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 18a Konarskiego Str., 44-100 Gliwice, Poland

<sup>b</sup> student, Technical University of Liberec, Department of Advanced Materials, Institute for Nanomaterials, Advanced Technologies and Innovation, , 461 17 Liberec, Czech Republic

<sup>c</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials, 18a Konarskiego Str., 44-100 Gliwice, Poland

<sup>d</sup> Technical University of Liberec, Department of Advanced Materials, Institute for Nanomaterials, Advanced Technologies and Innovation, 461 17 Liberec, Czech Republic

<sup>e</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Materials Research Laboratory, 18a Konarskiego Str., 44-100 Gliwice, Poland

<sup>f</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:** Barwnikowe ogniwa fotowoltaiczne (DSSCs) to jedne z najbardziej obiecujących urządzeń fotowoltaicznych nowej generacji ze względu na ich niskie koszty, nieskomplikowaną technologię wytwarzania oraz przyjazny dla środowiska charakter, co sprawia, że są konkurencyjne w stosunku do konwencjonalnych krzemowych fotoogniw. Fotoanoda DSSCs pełni ważne funkcje, reguluje gromadzenie i transport fotowzbudzonych elektronów z barwnika do obwodu zewnętrznego, a także stanowi rusztowanie dla adsorbowanych molekuł barwnika. W ramach niniejszej pracy określono wpływ temperatury wygrzewania fotoanody wykonanej z tlenku tytanu na własności fotowoltaiczne barwnikowych ogniw słonecznych. Analizie poddano morfologię powierzchni i strukturę cienkich warstw TiO<sub>2</sub> przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) i spektroskopii Ramana, natomiast własności elektryczne wytworzonych DSSCs określono na podstawie zmierzonych charakterystyk I-U.

**Abstract:** Dye-sensitized solar cells (DSSCs) have been recognized as the promising candidates for next-generation solar cells because of their low cost, simple fabrication methodology, and environmental friendly nature, which make it a strong competitor to the conventional silicon-based solar cell. Photoanode of DSSCs plays important functions, namely governs the collection and transportation of photo-excited electrons from dye to external circuit

as well as acts as a scaffold layer for adsorbed dye molecules. In this study, the effect of different heating temperatures of titanium oxide photoanode on photovoltaic properties of dye-sensitized solar cells was investigated. The surface morphology and structure of the TiO<sub>2</sub> thin layer were studied using scanning electron microscopy (SEM) and Raman spectroscopy, while the electrical properties of the produced DSSCs were determined on the basis of the measured I-V characteristics.

**Keywords:** photovoltaics, dye-sensitized solar cells, photoanode, titanium oxide, heating temperature

## 1. INTRODUCTION

Solar energy and other renewable energy sources are becoming more and more popular due to increasing demand of energy caused by depletion of fossil fuels. Energy gathered from solar radiation is pollution free and it exceeds much more than people on Earth are able to use [1]. Photovoltaic effect was discovered by French physicist A.E. Becquerel while experimenting with a solid electrode in an electrolyte solution. He observed a voltage develop when light fell upon the electrode. Among Becquerel there are many scientists that contributed to the photovoltaic cells we know today. First photovoltaic cells were applied in Vanguard I satellite in United States and they were working for 6 years [2]. Silicon based solar cells are commonly used around the world, but due to unique advantages of dye-sensitized solar cells (DSSCs) they open a new way of their application in everyday objects [3]. Technology of dye-sensitized solar cells is constantly developing, most researches are made towards increasing its efficiency and lowering the cost of production. Currently the highest efficiency achieved in DSSCs is around 15% [4]. Main advantage of dye-sensitized solar cells is their transparency and possibility to make them from elastic materials which increases the range of their application. Main advantages of DSSCs [5-8]:

- low production cost – in comparison to silicon based solar cells they are made from cheaper materials and energy used in DSSCs production process is significantly lower,
- possibility of making bent and elastic cells – semi-conductive material used in dye-sensitized solar cells can be made from different types of transparent materials, including elastic ones, which creates wider range of application,
- good price to efficiency ratio – considering price of production of DSSCs and their efficiency, they have higher price to efficiency ratio than I and II generation of solar cells,
- DSSCs can work under adverse conditions – they can convert energy under wide angle, and low intensity of solar radiation,
- high service life – in comparison to silicon based solar cells, DSSCs are more resistant to solar degradation,
- possibility of using different color – titanium-dioxide used in DSSCs can be sensitized with different dyes.

Advantages of dye-sensitized solar cells creates wide range of possible applications. At the moment they are being used and tested as building materials for example: as transparent awning; glass facades; windows; and so on. Automotive and aviation industries are also interested in application of DSSCs in their prototypes. Different colors and transparency level makes dye-sensitized solar cells attractive use in decorations [3,8].



The general structure of DSSCs comprises a photoanode as a working electrode, a counter electrode and electrolyte filled the space between them (Fig.1). The TCO (transparent conducting oxide) substrate is an important component for dye-sensitized solar cells. It should have high transmission, good conductivity, and promote good adhesion for the deposited layers. More than 80% transparency, it is necessary for the substrate to allow the passage of optimal solar radiation to the effective surface of the cell. For effective charge transfer and reduced energy loss, the substrate should have high electrical conductivity. Most often, fluorine-doped tin oxide (FTO) and indium-doped tin oxide (ITO) are used as conductive substrates in DSSCs [9].

Working electrode are prepared by deposition a thin oxide layer of semiconducting materials such as  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{ZnO}$  and  $\text{SnO}_2$  (n-type) onto FTO or ITO substrate. These oxides have a wide energy band of 3÷3.3 eV [10]. Due to the fact that it is non-toxic, cheap and easily accessible,  $\text{TiO}_2$  is most often used as a semiconductor material in DSSCs. However, these semiconducting layers absorb only a small fraction of light; therefore these working electrodes are then immersed in the dye. Due to the highly porous structure and the large electrode surface, a high number of dye molecules covalently bind to the nanocrystalline  $\text{TiO}_2$  surface, which subsequently leads to an increase in light absorption [7]. Dye should have the following physical and electrochemical properties [5,11]:

- should be luminescent,
- absorption spectra of the dye should cover the ultraviolet and visible radiation (UV-Vis) and near infrared (NIR) regions,
- highest occupied molecular orbital HOMO should be located far from the surface of the  $\text{TiO}_2$  conduction band, and the lowest unoccupied molecular orbital LUMO should be located as close as possible to the  $\text{TiO}_2$  surface,
- the rim of the dye should be hydrophobic in order to increase the long-term stability of the cells, since it results in a minimized direct contact between the electrolyte and the anode,
- molecular orbital HOMO should be situated lower than that of redox electrolytes.

Electrolytes in DSSCs are responsible for the regeneration of the dye adsorbed on mesoporous  $\text{TiO}_2$  layer and charge transport between working and counter electrode. Regeneration of excited dyes was performed by using  $I^-/I_3^-$  redox couple dissolved in an organic solvent. The electrolyte should [11]:

- be able to effectively regenerate the oxidized dye,
- have long-term chemical, thermal and electrochemical stability,
- be non-corrosive with DSSC elements,
- create an effective contact between the photoanode and counter electrode,
- be able to permit fast diffusion of charge carriers and enhance conductivity.

Absorption spectra of the electrolyte should not overlap with the absorption spectra of the dye.

The counter electrode in DSSC gathers electrons from the external circuit and catalyzes the redox reduction in the electrolyte, which has a significant influence on the photovoltaic performance, long-term stability and cost of the device. The counter electrode is usually prepared using platinum or carbon [12,13]. Platinum counter electrodes have consistently shown excellent electrocatalytic performance and holds the record of the highest power conversion efficiency for dye-sensitized solar cells [9,12].

Efficiency of dye-sensitized solar cells is highly dependent on the quality of the materials and its structure. One of the main components for DSSC is semiconductor material photoanode which will provide the pathway for electron transportation and thus determine the energy

conversion efficiency of solar cell. The most commonly used material for the photoanode is titanium dioxide.  $\text{TiO}_2$  is metal oxide semiconducting material used in a wide range of common and high-tech applications. It is cheap, chemically stable, abundant, non-toxic and bio-compatible with wide bandgap material that is existed in three crystalline phase; rutile, anatase and brookite [7,9,11].

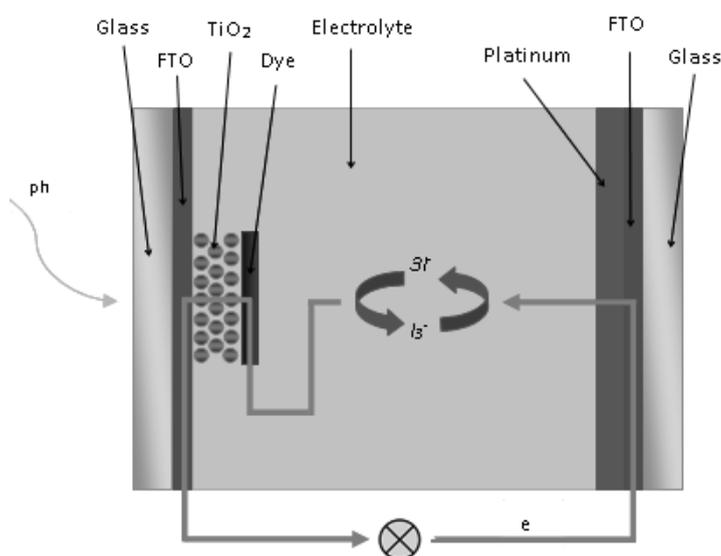
In this work the influence of  $\text{TiO}_2$  heating temperature (between  $350^\circ\text{C}$  to  $550^\circ\text{C}$ ) on photovoltaic properties of dye-sensitized solar cells was studied. Titanium oxide was deposited using screen printing method. Characterizations of the deposited  $\text{TiO}_2$  thin layer were executed on their surface morphology and structural property. Additionally the electrical properties (in particularly energy conversion efficiency) of produced DSSCs was determined.

## 2. MATERIALS AND METHODS

In this work the DSSCs photoanode consisting of the following elements was produced (Figure 1):

- glass plates with FTO (fluorine doped tin oxide layer) ( $7 \Omega/\text{sq}$  resistivity, Sigma Aldrich),
- screen-printed  $\text{TiO}_2$  thin layer from 18NR-T paste with adsorber N 719 dye (di-tetrabutylammonium cis-bis (isothiocyanato) bis (2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylato) ruthenium (II)).

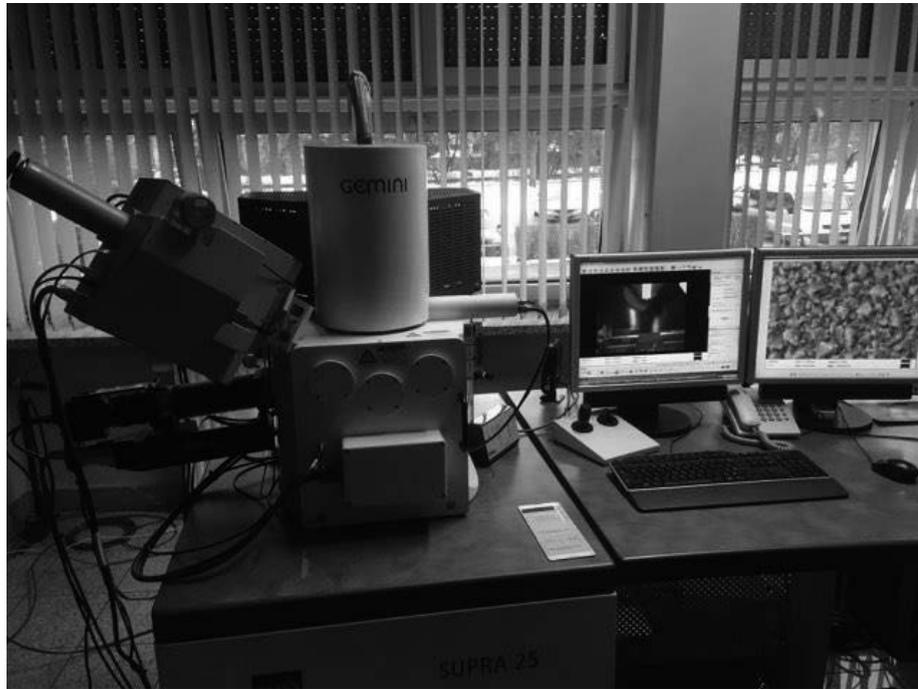
The heating temperature of  $\text{TiO}_2$  thin layer was varied from  $350^\circ\text{C}$  to  $550^\circ\text{C}$ . The platinum based counter electrodes were also prepared by screen printing method following by thermal treatment at a temperature of  $450^\circ\text{C}$ . In this study the iodide/tri-iodide redox couple (EL-HSE high stability electrolyte, Sigma Aldrich) was used. The technology of DSSCs in detail was presented in the work [10]. The produced DSSCs is shown in Figure 2. Topography of the  $\text{TiO}_2$  thin layer were analyzed using Zeiss Supra 25 scanning electron microscopy SEM (Figure 3). Raman spectra of the  $\text{TiO}_2$  samples were taken with a DXR (Thermo Scientific, USA) Raman microscope equipped with an Olympus MPlan objective x10 with excitation laser wavelength of 532 nm.



Rysunek 1. Schemat budowy i zasady działania DSSC  
Figure 1. Scheme of structure and working principle of manufactured DSSCs

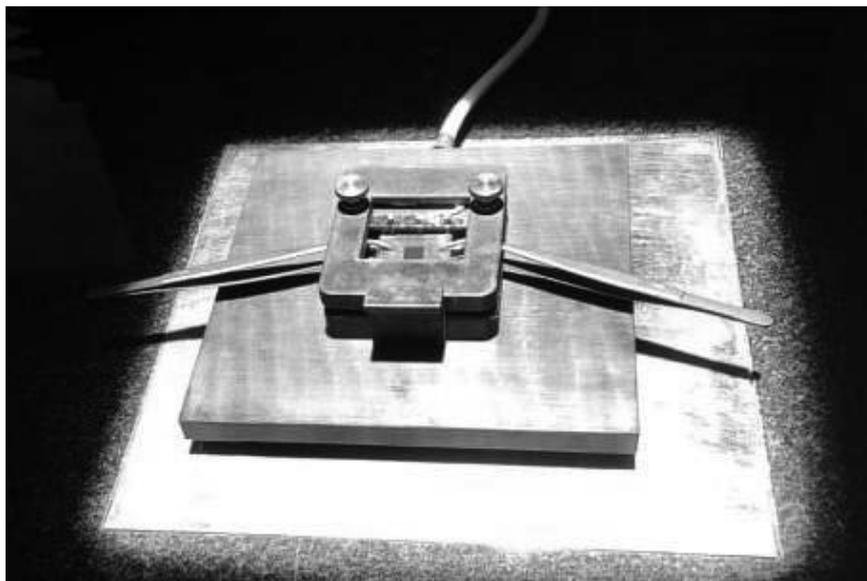


Rysunek 2. Wytworzone DSSC  
Figure 2. DSSC obtained in this experiment



Rysunek 3. Zeiss Supra 25 scanning electron microscopy SEM  
*Figure 3. Zeiss Supra 25 scanning electron microscopy SEM*

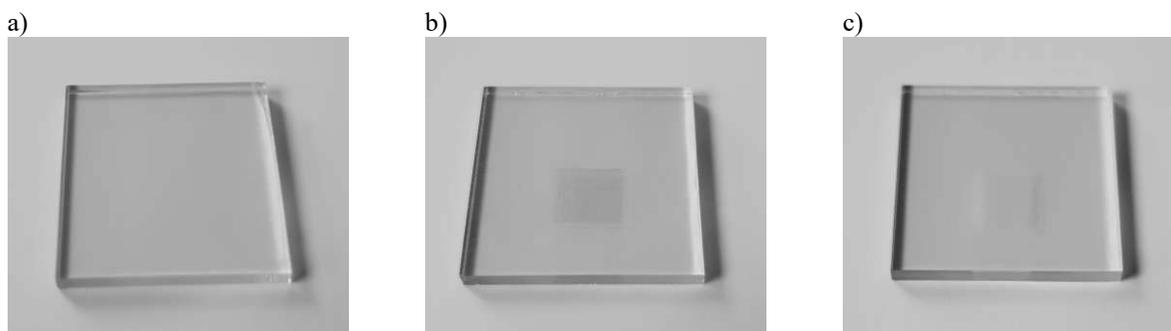
The electrical parameters of the manufactured DSSCs were characterized by measurements of current-voltage (I-V) characteristics (Figure 4) using a PV Test Solutions Tadeusz Żdanowicz Solar Cell I-V Tracer System and a Keithley 2400 source meter under standard AM 1.5 radiation and light intensity  $1000 \text{ W/m}^2$ .



Rysunek 4. Pomiar charakterystyk prądowo-napięciowych  
*Figure 4. Measurements of current-voltage characteristics*

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

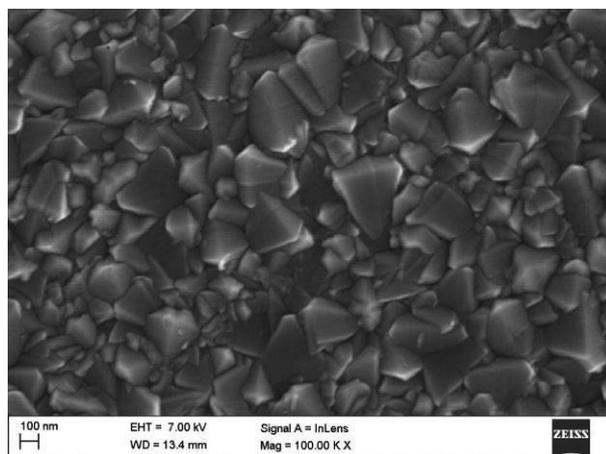
Figure 5 shows the substrate (glass plate with one side deposited FTO film) without and with a TiO<sub>2</sub> thin layer before and after heating. It was found that the surface of the TiO<sub>2</sub> thin layer before heating is homogeneous, light yellow in color. After heating, the color of the layer changes to semitransparent white.



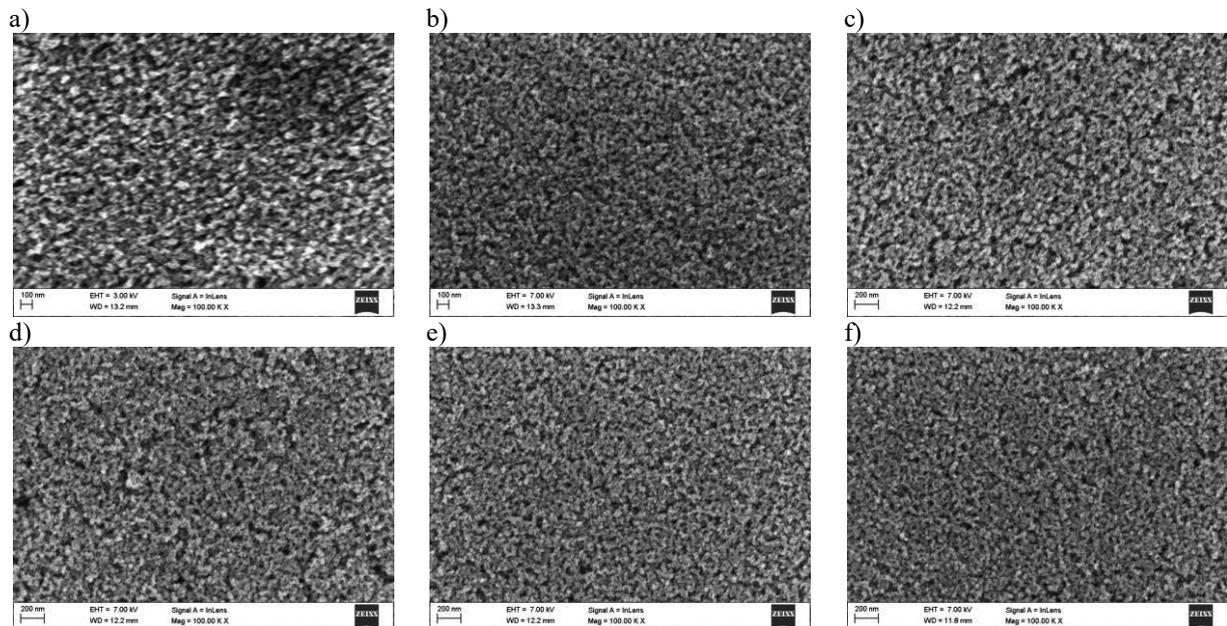
Rysunek 5. Płytki szklane z jednostronnie naniesioną warstwą FTO a) bez warstwy TiO<sub>2</sub> b) z warstwą TiO<sub>2</sub> przed wygrzaniem, c) z warstwą TiO<sub>2</sub> po wygrzaniu w 500°C  
 Figure 5. Glass plates with one side deposited FTO a) without TiO<sub>2</sub> thin layer b) with TiO<sub>2</sub> thin layer before heating c) with TiO<sub>2</sub> thin layer after heating at a temperature of 500°C

The scanning electron microscopy (SEM) topography of substrate without and with the TiO<sub>2</sub> thin layer screen-printed on FTO coated glass before and after heating are shown in Figure 6 and 7. It can be observed the FTO grains are closely packed, their size is in the range of 20÷250 nm. The TiO<sub>2</sub> thin layer are uniformly deposited on the substrate, it has a porous structure. The particles form uniformly distributed agglomerates TiO<sub>2</sub>. Moreover, the TiO<sub>2</sub> structure for the samples heated at 500°C and 550°C is more dense, the pore size is smaller.

During the dyeing process, all samples showed good adhesion to FTO-coated glass with one exception - the unheated TiO<sub>2</sub> layer detached from the substrate.

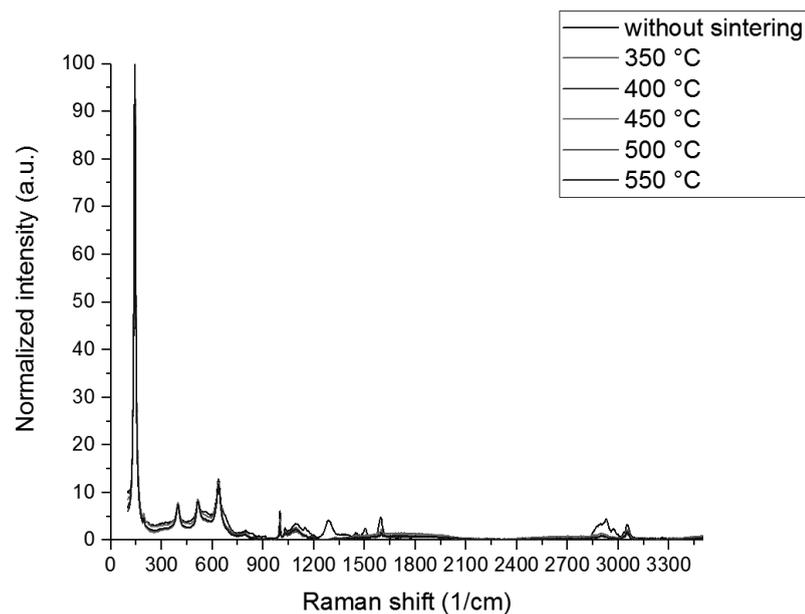


Rysunek 6. Topografia powierzchni płytki szklanej pokrytej FTO (SEM)  
 Figure 6. SEM surface topography of the FTO coated glass



Rysunek 7. Topografia powierzchni płytki szklanej pokrytej FTO z naniesioną warstwą  $\text{TiO}_2$  a) bez wygrzewania oraz po wygrzewaniu w temperaturze b)  $350^\circ\text{C}$ , c)  $400^\circ\text{C}$ , d)  $450^\circ\text{C}$  e)  $500^\circ\text{C}$ , f)  $550^\circ\text{C}$

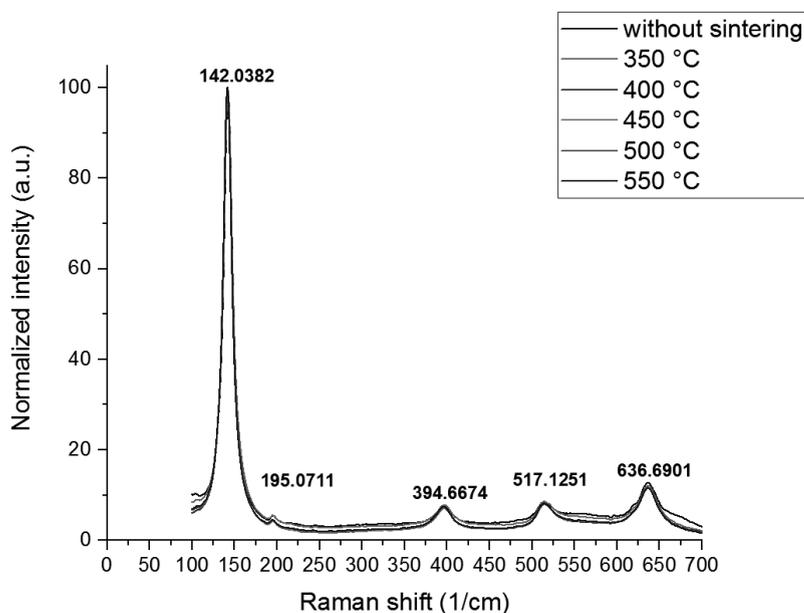
Figure 7. SEM surface topography of the FTO coated glass with deposited  $\text{TiO}_2$  thin layer a) without heating and after heating at a temperature of b)  $350^\circ\text{C}$ , c)  $400^\circ\text{C}$ , d)  $450^\circ\text{C}$  e)  $500^\circ\text{C}$ , f)  $550^\circ\text{C}$



Rysunek 8. Widmo Ramana naniesionej metodą sitodruku warstwy  $\text{TiO}_2$  wygrzewanej w różnej temperaturze

Figure 8. Raman spectra of screen printed  $\text{TiO}_2$  films heated at different temperatures

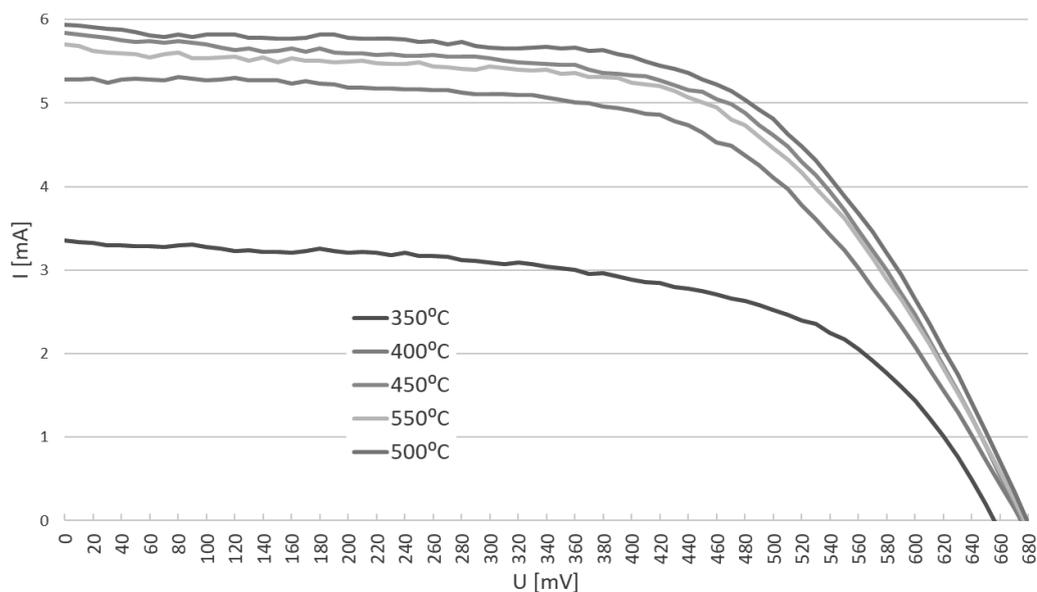
Figure 8 shows Raman spectra of screen printed TiO<sub>2</sub> films heated at different temperatures. Raman peaks were normalized to the highest peak 142 cm<sup>-1</sup> obtained during measurement. The Raman peaks were received as E<sub>g</sub>, E<sub>g</sub>, B<sub>1g</sub>, A<sub>1g</sub> + B<sub>1g</sub> and E<sub>g</sub> modes of anatase phase (Figure 9). Peaks corresponded to the following values: 142 cm<sup>-1</sup>, 195 cm<sup>-1</sup>, 395 cm<sup>-1</sup>, 517 cm<sup>-1</sup>, 637 cm<sup>-1</sup>. These peaks closely coincided with the peaks obtained in studies [14], where peaks of 142 cm<sup>-1</sup>, 195 cm<sup>-1</sup>, 395 cm<sup>-1</sup>, 517 cm<sup>-1</sup> and 639 cm<sup>-1</sup> were reported. Figure 9 shows, that all samples closely corresponding with modes of anatase phase.



Rysunek 9. Widmo Ramana z zaznaczonymi pikami anatazu  
Figure 9. Raman spectra with peak position of anatase

The most symbolic indicator used to assess and compare PV technologies is certainly the conversion efficiency, expressing the ratio between solar energy input and electrical energy output. Efficiency aggregates many constituting parameters of the system, such as the short-circuit current  $I_{sc}$ , the open-circuit voltage  $V_{oc}$ , current and voltage for which the power  $P_m$  reaches its maximum value (at  $I_m$  and  $V_m$ ), the fill factor  $FF$ , and conversion efficiencies  $E_{ff}$ , which in turn depend on the fundamental properties of the material.

The current-voltage ( $I-V$ ) characteristics of the DSSCs based on TiO<sub>2</sub> photoanodes heated at different temperatures are presented in Figure 10, and the determined electrical properties are listed in Table 1. It was found that the highest efficiency of 5.62% was obtained for a dye-sensitized solar cell with a photoanode heated at temperature of 500°C. With the increase of the heating temperature of the photoanode up to the 500°C, the other electrical parameters of DSSCs also improve. These results indicate that the efficiency of DSSCs is mainly determined by the short-circuit photocurrent density. Electrical properties obtained for solar cells with photoanode are significantly lowest after heat treatment at 350°C than heated at higher temperature (Table 1).



Rysunek 10. Charakterystyki prądowo-napięciowe barwnikowych ogniw fotowoltaicznych z fotoanodą wykonaną na bazie  $\text{TiO}_2$  wygrzewaną w różnej temperaturze

Figure 10. The  $I$ - $V$  characteristics of the DSSCs based on  $\text{TiO}_2$  photoanode heated at different temperatures

Tablica 1. Własności elektryczne barwnikowych ogniw fotowoltaicznych z fotoanodą wykonaną na bazie  $\text{TiO}_2$  wygrzewaną w różnej temperaturze

Table 1. Electrical properties of dye-sensitized solar cells based on  $\text{TiO}_2$  photoanode heated at different temperatures

Heating temperature of $\text{TiO}_2$	Electrical properties				
	$V_{oc}$ [mV]	$I_{sc}$ [mA]	FF	$P_m$ [mW]	$\eta$ [%]
350°C	656.15	3.37	0.57	1.26	2.94
400°C	674.58	5.38	0.58	2.10	4.87
450°C	675.51	5.82	0.59	2.34	5.42
500°C	678.91	5.86	0.61	2.42	5.62
550°C	677.03	5.61	0.60	2.27	5.22

#### 4. CONCLUSIONS

Dye-sensitized solar cell imitates the photosynthesis process seen in plant cell to produce energy. This type of solar cell is considered to be one of the most promising, current technological developments that meets the requirement of cost-effective green energy technology. The DSSC works as a photo-electrochemical device, where the generation and transfer of electrons are caused by the combined effect of the photon energy and the chemical reactions. One of the main components of DSSCs is semiconductor photoanode which will

provide the pathway for electron transfer and thus determine the energy conversion. Titanium dioxide offers some unique properties making it the preferred semiconductor for dye-sensitized solar cells. This material is stable (even under extreme condition), cheap, easily obtained and non-toxic. This manuscript emphasizes the best heating temperature for commercialized TiO<sub>2</sub>, where the temperature varies from 350°C to 550°C. The DSSCs with screen-printed TiO<sub>2</sub> thin layer heated at 500°C achieved the maximum efficiency value of 5,62%. The vehicle of the paste burns away, leaving the titania nanoparticles sintered together. This process ensures electrical contact between particles and good adhesion to the FTO coated glass substrate. The semiconductor has the porous structure with high surface area which facilitates the adsorption of the dye on its surface. Raman spectroscopy revealed the presence of anatase TiO<sub>2</sub> which is preferred over other polymorphs for solar cell applications because of its potentially high conduction band edge energy and low recombination rate of electron–hole pairs.

## REFERENCES

1. K. Ramalingam, C. Indulkar, *Solar Energy and Photovoltaic Technology, Distributed generation systems: design, operation and grid integration* 69 (2017)
2. M.V Dambhare, B. Butey and S.V. Moharil, *Solar photovoltaic technology: A review of different types of solar cells and its future trends, Journal of Physics: Conferences Series*, 1914 (2021) 1-16
3. M. Bagher, M. Vahid, M. Mohsen, *Types of Solar Cells and Application, American Journal of Optics and Photonics* 5 (2015) 94-113
4. N. Papageorgiou, *Dye-sensitized solar cells rival conventional cell efficiency, EPFL*, <https://actu.epfl.ch/news/dye-sensitized-solar-cells-rival-conventional-ce-2/>, 2013
5. R. Singh, *Dye-sensitized Solar Cell Technology: Recent Development and Advancement, Low Carbon Energy Supply* (2018) 221-250
6. M. Szindler, M. Szindler, *Barwnikowe ogniwa fotowoltaiczne z polielektrolitem, Przegląd Elektrotechniczny R94* 8 (2018) 32-34
7. K. Siuzdak, M. Klein, K. Łapiński, A. Cenian, *Barwnikowe ogniwa słoneczne, Rynek Energii* 5 (2015) 75-83
8. ML System, *Fotowoltaiczne moduły drukowane*, <https://mlsystem.pl/dssc/>, 2020
9. 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 (2016) 803-806
10. L. Poniewiera, K. Ksionsyk, D. Sudak, T. Janczak, W. Barczyk, A. Zdonek, A. Zarychta, S. Lesz, A. Drygała, *Technologia wytwarzania ogniwo fotowoltaicznych uczulanych barwnikiem, TalentDetector' 2021 Summer Studencka Konferencja Naukowa* (2020) 365-372
11. K. Sharma, V. Sharma, S. Sharma, *Dye-Sensitized Solar Cells: Fundamentals and Current Status. Nanoscale Research Letters* 13, 381 (2018)
12. A. Iefanova, U. Gautam, P. Poudel, D. Davoux, *Low cost platinum counter electrode for dye-sensitized solar cells, Proceedings of 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* (2013) 2716-2719
13. M. Klein, K. Siuzdak, A. Cenian, *Barwnikowe ogniwa słoneczne z przeciwelektrodą grafenową* 1-4 (2014) 5-9
14. N. Musila, M. Munji, J. Simiyu, E. Masika, R. Nyenge, M. Kineene, 2018. *Characteristics of TiO<sub>2</sub> compact layer prepared for DSSC application, Path of Science* 4/10 (2018) 3006–3012





## Wpływ teksturowania laserowego na powierzchnię materiałów.

X. Poppe<sup>a</sup>, M. Polok-Rubiniec<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Studentka kierunku Inżynieria Materiałowa na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej  
email: xymepop628@student.polsl.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych  
email: magdalena.polok-rubiniec@polsl.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono metody teksturowania laserowego oraz opisano najpopularniejsze struktury geometryczne wykonywane obecnie w przemyśle. Omówiono także najważniejsze aspekty narzędzia wykorzystywanego podczas teksturowania, działanie laserów. Przedstawiono przykłady zastosowań laserowej obróbki powierzchni w różnych dziedzinach przemysłu.

**Abstract:** *In this article the definition of the laser texturing process and its types are discussed, and the most popular geometric structures executed in the industry are described. The most important aspects of the tool used for texturing are explained – the definition of ‘laser’ and how it works. Examples of laser texturing applications in different industrial fields are mentioned.*

**Słowa kluczowe:** Laser, obróbka powierzchniowa, teksturowanie powierzchni

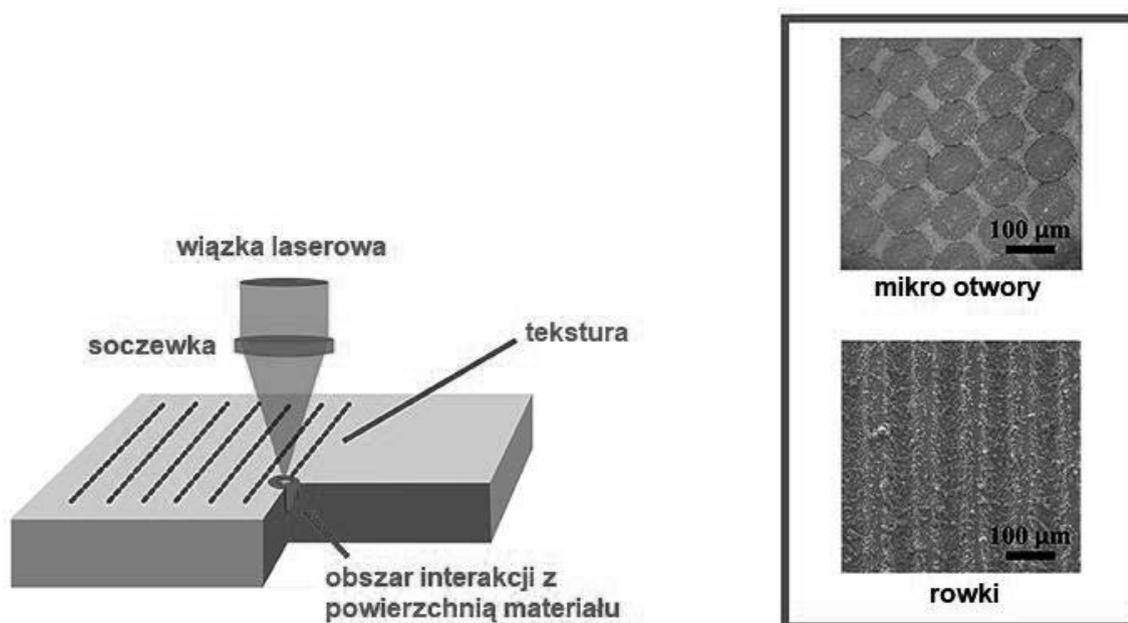
### 1. WSTĘP

Technologia w obecnych czasach pozwala na wykonywanie niezwykle dokładnych oraz powtarzalnych procesów. Jednym z nich jest mikroobróbka laserowa, która z biegiem czasu zdobywa większą popularność i staje się coraz bardziej ogólnodostępna. Zalicza się do niej cięcie i łączenie materiałów, nakładanie powłok oraz modyfikację powierzchni, będącą najbardziej rozbudowaną kategorią obróbki laserowej. W jej skład wchodzi trzy rodzaje procesów: modyfikacja poprzez podgrzewanie, topienie lub odparowywanie. W ramach pierwszego z nich możliwe jest utwardzanie lub koloryzowanie powierzchni oraz usuwanie farby. Topienie umożliwia *remelting* (ponowne przetopienie w celu zmiany struktury krystalicznej), *alloying* (stopowanie) oraz *cladding* (nakładanie warstwy ochronnej). Odparowywanie z kolei pozwala na oczyszczenie powierzchni, proces utwardzania uderzeniowego (*shock hardening*) oraz na teksturowanie, będące głównym tematem pracy. Teksturowanie laserowe powierzchni (z ang. *Laser Surface Texturing*) jest procesem

przeprowadzanym w celu poprawy własności tekstury za pomocą nadawania jej zadanej tekstury [1,2].

## 2. TEKSTUROWANIE LASEROWE

Teksturowanie powierzchni (*LST*) jest jednym z rodzajów obróbki laserowej. Należy do grupy procesów obróbki ubytkowej, gdzie poprzez użycie lasera materiał jest usuwany i odparowywany. Obszary usuniętego materiału mają wymiary rzędu mikro- lub milimetrów, dlatego nazywane są mikro lub nano wgłębieniami. W ten sposób powierzchni materiału nadaje się zadaną strukturę geometryczną w postaci rowków, otworów, szewronów lub innych dowolnych wzorów. W krystalografii jako teksturę rozumie się uprzywilejowaną przestrzenną wzajemną orientację krystalitów, rozmieszczenie składników oraz stopień ich wykryzalizowania, układ i kształt ziaren, włókien lub warstw w budowie wewnętrznej danego materiału polikrystalicznego [2,3,4]. Schemat procesu teksturowania laserowego przedstawiono na rysunek 1.



Rysunek 1. Schemat procesu teksturowania laserowego [5]

Figure 1. Laser texturing [5]

Ze względu na wygląd zewnętrzny struktur geometrycznych, można wyróżnić:

- mikro-otwory, do których należą dziurki i dołeczki (ang. *dimples*) – otrzymywane poprzez skupienie lasera w jednym punkcie i wysyłanie impulsów aż do otrzymania pożądanej głębokości otworu,
- *cross-hatch* – struktura przypominająca pudełko na jajka, otrzymywana poprzez poruszanie wiązką laserową wzdłuż linii kwadratowej siatki,
- *free-form* – forma dowolna – otrzymywana poprzez usuwanie materiału z powierzchni zgodnie z zaprojektowanym modelem,
- LIPSS (*Laser Induced Periodic Surface Structures*) – struktura periodyczna przypominająca fale, których rozmiar odpowiada długości fali wiązki lasera [6,7].

## Rodzaje teksturowania laserowego

Wyróżnia się dwa główne rodzaje teksturowania: objętościowe (tworzenie uporządkowanej struktury w określonej objętości) oraz powierzchniowe (nadawanie uporządkowanego rozmieszczenia składników warstwy wierzchniej lub powłoki). Następnie, teksturowanie dzieli się na odmiany:

należące do objętościowego rodzaju teksturowania:

- zależne od orientacji krystalitów:
  - osiowe – wzdłuż kierunku,
  - płaskie – wzdłuż płaszczyzny,
- zależne od przyczyny powstawania tekstury:
  - odlewnicze – kierunkowy odpływ ciepła podczas stygnięcia odlewu,
  - odkształceniowe – kierunkowe działanie sił podczas odkształcenia plastycznego,
  - rekrytalizacyjne – zależne od tekstury odkształcenia, składu stopu i temperatury wyżarzania podczas rekrytalizacji.

należące do powierzchniowego rodzaju teksturowania:

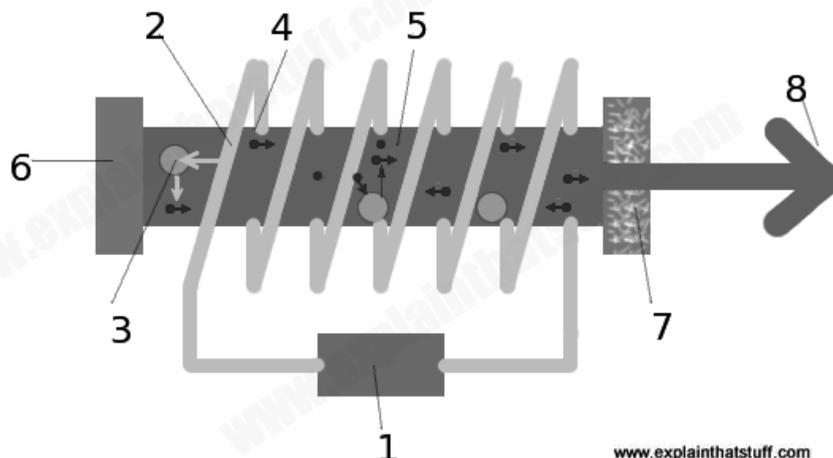
- bezubytkowe – materiał nie jest usuwany, zmienia się jedynie jego struktura w wyniku przemian fazowych,
- nadmiarowe – w obszar interakcji wiązki lasera z materiałem zostaje doprowadzony składnik stopowy poprzez wdmuchanie go do jeziora laserowego lub naniesienie powłoki,
- ubytkowe – materiał zostaje usuwany z powierzchni w wyniku odparowania i ablacji materiału [4,8].

Teksturowanie umożliwia poprawę użyteczności eksploatacyjnej elementów. Jednym ze sposobów jest zmniejszenie tarcia, a więc również ich zużycia. Łączy się też to ze zwiększeniem smarowności oraz nośności pary ślizgowej [2,9,10]. Naniesiona tekstura ma też wpływ na własności adhezyjne powierzchni – poprzez odpowiednią wartość kąta zwilżania możliwe jest stworzenie powierzchni hydrofilowych („lubiących wodę”) lub hydrofobowych („niełubiących wody”). Cecha ta jest szczególnie istotna przy nakładaniu powłok, łączeniu materiałów czy w technikach drukarskich [11,12]. Ponadto, teksturowanie może nadawać też walory estetyczne w postaci powtarzalnego wzoru lub zostać wykorzystane do znakowania czy opisywania elementów, na przykład za pomocą logo firmy czy numerem seryjnym. W ten sposób możliwe jest znalezienie zastosowania procesu teksturowania niemal w każdej dziedzinie przemysłu [4].

## 3. DZIAŁANIE LASERA

Słowo „laser” jest akronimem pochodzącym z języka angielskiego – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, co przekłada się na „wzmocnienie światła poprzez wymuszoną emisję promieniowania”. Laser jest więc generatorem światła o długości fali z zakresu od podczerwieni do ultrafioletu, a czasem nawet promieniowania rentgenowskiego X. Światło to następnie jest wzmocnione i wyemitowane jako wiązka spójnego promieniowania [13,14].

Działanie lasera opisano na podstawie najpopularniejszego rodzaju lasera – lasera stałego (o ośrodku czynnym w stanie stałym). Wytwarzanie wiązki laserowej przedstawiono na rysunku 2 i omówiono na jego podstawie etapy wytwarzania [15].



Rysunek 2. Uproszczony schemat działania lasera [15]

Figure 2. Generating a laser beam – a schematic representation [15]

1. Światło zaczyna pulsować w świetliku rurowym (2) za sprawą włączenia się i wyłączenia źródła prądu o wysokim napięciu (1).
2. Fotony pompowane są do kryształu (4) lasera przez pulsację światła.
3. Fotony dostarczone do układu są absorbowane przez atomy (3) kryształu, przez co atomu te przechodzą w stan wzbudzony, a po chwili wracają do stanu podstawowego, emitując nowe fotony (5).
4. Proces wzbudzania atomów jest stale powtarzany poprzez ruch nowo wyemitowanych fotonów przemieszczających się wewnątrz kryształu. Gdy jednak foton uderzy w już wcześniej wzbudzony atom, ten emituje później dwa nowe fotony zamiast jednego.
5. Przemierzające się fotony są odbijane przez znajdujące się w układzie lustro: pełne (6) – odbijające wszystkie fotony oraz częściowe (7) – odbijające tylko część. Proces wzbudzania atomów nadal powtarza się w pętli.
6. Fotony, które zostały przepuszczone przez lustro częściowe (7), opuszczają kryształ w formie skupionej wiązki lasera (8) [14,15,16].

#### 4. RODZAJE LASERÓW I PARAMETRY OBRÓBKI LASEROWEJ

Klasyfikacja laserów ze względu na rodzaj ośrodka czynnego [15,18]:

- stałe (*solid-state lasers*) – ośrodkiem czynnym jest ciało stałe w postaci kryształu lub szklanej pałeczki (*glass rod*) owinięte świetlikiem rurowym, przez który przechodzą fotony,
- ciekłe (*liquid dye lasers*) – ośrodkiem czynnym jest roztwór barwnika organicznego w przezroczystym, nieaktywnym ośrodku ciekłym, na przykład w metanolu, glicerolu lub w wodzie, a medium pompowane jest za pomocą lampy łukowej, błyskowej lub innego lasera,
- gazowe – ośrodkiem czynnym jest związek chemiczny, w którym atomy wprawiane są w ruch poprzez prąd elektryczny; należą do nich lasery atomowe, jonowe, molekularne oraz ekscymerowe,
- półprzewodnikowe – ośrodkiem czynnym jest półprzewodnik,
- inne – takie, których nie można zaliczyć do żadnej z powyższych kategorii; należy do nich na przykład laser wolnoelektronowy.

Lasery można podzielić także ze względu na moc wiązki im odpowiadającą [17]:

- lasery niskoenergetyczne (miękkie – *soft lasers*),
- średnioenergetyczne (*mid lasers*),
- wysokoenergetyczne (twarde – *hard lasers*).

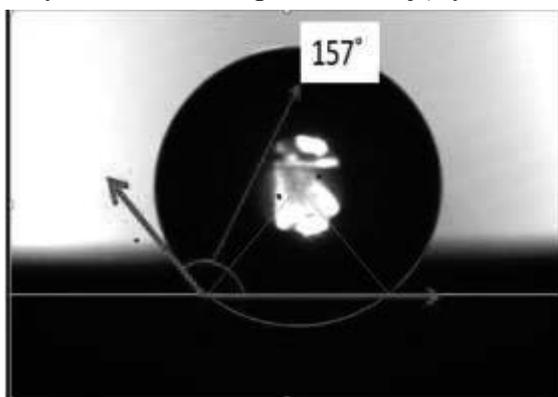
Dobór parametrów procesu obróbki laserowej bezpośrednio wpływa na jego wydajność oraz jakość wykonanego elementu, za którą uważa się dokładność odwzorowania zaplanowanej geometrii. Wyróżnia się osiem parametrów procesu mikroobróbki laserowej:

- typ lasera – wybrany spośród wyżej wymienionych laserów z danym ośrodkiem czynnym [1],
- moc i gęstość mocy wiązki – wymagana jest odpowiednia moc wiązki, by była w stanie stopić materiał oraz by zrekompensować straty w postaci odbicia się wiązki od powierzchni i „rozchodzenia się” energii wewnątrz materiału ze względu na jego przewodność cieplną; powiązana z nią gęstość mocy jest stosunkiem mocy do pola powierzchni plamki lasera [1],
- wielkość plamki (średnica wiązki) – pozwala na zdefiniowanie pola powierzchni wiązki, wpływa bezpośrednio na głębokość i szerokość warstwy topionej [1],
- konfiguracja wiązki (kształt wiązki) – inaczej profil wiązki, czyli kształt, który zostaje odwzorowany na powierzchni materiału; istnieją cztery możliwe konfiguracje wiązki:
  - Gaussa – skupienie wiązki z rozkładem natężenia promieniowania zgodnym z rozkładem normalnym (funkcją Gaussa),
  - wielomodowa (*multimode*) – wiązka złożona z kilku fal światła, czego wynikiem jest większa średnica wiązki,
  - kwadratowa (lub prostokątna) – odpowiednio w kształcie kwadratu lub prostokąta,
  - top-hat – odzwierciedlająca owalny dysk [20],
- prędkość skanowania – prędkość relatywna pomiędzy wiązką lasera a elementem obrabianym; ma wpływ na czas i stopień dyfuzji składników oraz głębokość, szerokość i kształt wtopienia [1],
- czas i energia oddziaływania wiązki – czas powiązany jest z prędkością skanowania: im mniejsza prędkość, tym dłuższy czas oddziaływania (wyjątkiem jest przejście pulsacyjne lasera, które pozwala zachować niską prędkość oraz krótki czas oddziaływania); energia oddziaływania wiązki jest ściśle powiązana z dobraną wcześniej mocą wiązki lasera [1],
- rodzaj gazu osłonowego – gaz osłonowy pełni trzy funkcje: chroni przed utlenianiem i innymi reakcjami warstwy wierzchniej z otoczeniem, chroni układu optycznego przed rozproszeniem wiązki przez opary oraz zapewnia stabilność procesu; najczęściej stosuje się gazy osłonowe w postaci czystych gazów (helu, argonu, azotu lub dwutlenku węgla) oraz mieszanki 20% He – 80% Ar [21],
- sposób podawania składnika stopowego – w przypadku laserowego stopowania, napawania i nakładania powłok stosuje się jedną z dwóch metod podawania materiału dodatkowego:
  - osadzanie wstępne – warstwa materiału nałożona jest przed wykonaniem procesu poprzez elektroplaterowanie, natryskiwanie termiczne lub odparowywanie próżniowe,
  - ko-depozycja – materiał (np. drut, pręt lub proszek) dostarczany jest do obszaru stopionego w trakcie wykonywanego procesu [1].

## 5. ZASTOSOWANIE TEKSTUROWANIA LASEROWEGO W PRZEMYSŁE

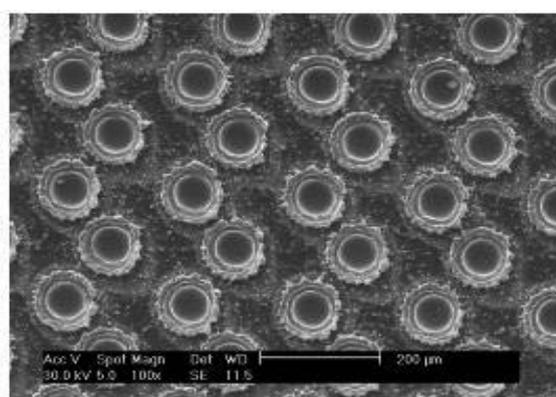
Teksturowanie znalazło swoje zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu. Jednym z przykładów jest możliwość utworzenia super-hydrofobowej powierzchni za pomocą nanosekundowego pulsacyjnego lasera. Powierzchnia uzyskana w tej operacji wykazywała dużą twardość, odporność na zużycie oraz umiejętność samooczyszczania. Było to możliwe dzięki wytworzeniu tekstury, której kąt zwilżania wahał się pomiędzy wartościami  $153^\circ$  a  $157^\circ$  (Rys. 3), co oznacza silną hydrofobowość powierzchni [12]. Zaaplikowanie takiego materiału mogłoby znaleźć swoje zastosowanie szczególnie w mikroelektronice, medycynie, optyce oraz branży kosmicznej. Innymi przykładami są poprawa funkcjonalności podwozia – modyfikacji jego elementów – czy też poprawa własności trybologicznych narzędzi lub elementów konstrukcji, takich jak koła zębate w celu zmniejszenia tarcia, zwiększenia odporności na zużycie oraz poprawienia wymiany ciepła pomiędzy elementami. Biorąc pod uwagę elementy układów elektronicznych, zmniejszone tarcie zmniejsza też wpływ prędkości działania na tarcie w nośnikach magnetycznych. W dziedzinie medycyny, teksturowanie znalazło zastosowanie przy obróbce protez i implantów, których rozmiar, a często również i rodzaj materiału, nie pozwala na konwencjonalne metody obróbki powierzchni. W ten sposób, za pomocą mikroobróbki laserowej można uzyskać oczekiwane własności: odporność korozyjną, biokompatybilność oraz duży stosunek wytrzymałości do wagi [22,23]. Kolejnym przykładem w przemyśle jest użycie powstałych struktur geometrycznych jako mikro- i nanozasobników oleju (Rys. 4) w celu zmniejszenia tarcia elementów [24,25]. Przykładowe elementy zmodyfikowane za pomocą teksturowania laserowego przedstawia rysunek 5.

Teksturowanie ubytkowe, zwane też grawerowaniem, jest bardzo popularną metodą znakowania, opisywania oraz nadawania estetycznych walorów powierzchni. Jest ona możliwa do wykonania w sposób konwencjonalny, jednakże użycie lasera spowodowało znaczne przyspieszenie procesu oraz pozwoliła na modyfikację powierzchni szerokiej gamy materiałów, począwszy od metali i ich stopów, a kończąc na tworzywach sztucznych, skórze czy nawet szkłe i drewnie. Powierzchnia poddana takiej obróbce ma też dużo lepszą odporność na zużycie. W przemyśle najczęściej spotyka się wygrawerowane loga firm na wytworzonych przez nie elementach oraz ich numery seryjne, a nawet kody QR. Estetyczne walory nadawane są poprzez wyrycie wzorów na powierzchni elementów [26]. Przykłady grawerowania na różnych materiałach przedstawiają rysunki 6-8.



Rysunek 3. Wskazanie pomiaru kąta zwilżania -  $157^\circ$  [12]

*Figure 3. Measurement indication of contact angle equal to  $157^\circ$  [12]*



Rysunek 4. Zasobniki olejowe w kształcie półkasz [24]

*Figure 4. Half-shell-shaped oil tanks [24]*



Rysunek 5. Przykładowe zastosowania teksturowego w przemyśle [23]

Figure 5. Examples of laser texturing applications in the industry [23]



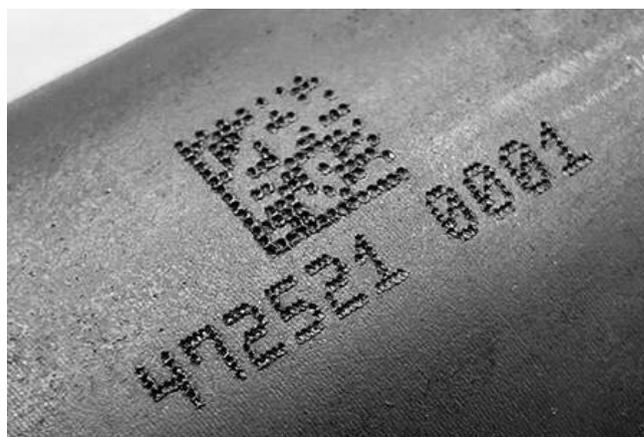
Rysunek 6. Wygrawerowane logo firmy na drewnie [27]

Figure 6. Engraved logo on wood [27]



Rysunek 7. Wygrawerowany wzór na skórze [28]

Figure 7. Engraved pattern on leather [28]



Rysunek 8. Wygrawerowany kod QR oraz numer seryjny stalowego elementu [29]

Figure 8. Engraved QR code and serial number on a steel element [29]

**LITERATURA**

1. J. D. Majumdar, Laser Surface Engineering, SpringerReference, Berlin, 2014
2. P. Sęk, B. Antoszewski, Powierzchnia z teksturą - topografia i energia powierzchniowa., Postępy Nauki i Techniki, nr 6, 2011, str. 88-95
3. V. Kumar, R. Verma, S. Kango, V.S. Sharma, Recent progresses and applications in laser-based surface texturing systems., Materials Today Communications, Volume 26, 2021.
4. T. Burakowski, W. Napadłek, Rodzaje tekstutowania laserowego w tribologii., Tribologia, nr 4, 2010, str. 33-45
5. A. Riveiro, Laser Surface Texturing of Polymers for Biomedical Applications, 2018.
6. Domena Lightmotif (<https://www.lightmotif.nl/texturing/>) [dostęp 22.10.2021 r.]
7. J. Heitz, B. Reisinger, M. Fahrner, C. Romanin, J. Siegel, V. Svorcik, Laser-induced periodic surface structures (LIPSS) on polymer surfaces. International Conference on Transparent Optical Networks, 2012.
8. Encyklopedia Techniki – Metalurgia, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice, 1978.
9. P. Sęk, B. Antoszewski, Influence of laser beam intensity on geometry parameters of a single surface texture element. Archives of Metallurgy and Materials, No.3, September 2015.
10. B. Antoszewski, N. Radek, S. Tofil, J. Bronček, Dobór parametrów laserowej mikroobróbki powierzchniowej elementów panewek brązowych. Politechnika Świętokrzyska, 2017.
11. B. Antoszewski, N. Radek, Ocena wpływu zwilżalności na właściwości tribologiczne powierzchni z teksturą. Tribologia, nr 3, 2012, str. 13-20.
12. G. Dongre, A. Rajurkar, R. Raut, S. Jangam, Preparation of super-hydrophobic textures by using nanosecond pulsed laser, Materials Today: Proceedings, 2021, Volume 42, Part 2, Pages 1145-1151.
13. W.D. Callister Jr., D.G. Rethwisch, Materials Science and Engineering. An Introduction. Eight Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2010, USA
14. A.E. Siegman, Lasers. University Science Books, 1986, USA
15. Domena explainthatstuff – How do lasers work? – schemat działania lasera (<https://www.explainthatstuff.com/lasers.html>) [dostęp: 27.11.2021 r.]
16. D. Bonamy, Technical English 4. Course Book, Pearson Education Limited, 2011, Wielka Brytania, Chapter 1-3 Innovations. Lasers., Pages 8-9.
17. R. Fidytek, Rodzaje laserów i ich zastosowanie. [dostęp: 27.11.2021 r.]
18. O. Svelto, Principles of Lasers. Fifth Edition. Springer, 2010, Włochy
19. Praca zbiorowa: Encyklopedia Fizyki. T. 3. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1974
20. M. Bonek, Wykład z przedmiotu Laserowa obróbka powierzchniowa, Politechnika Śląska, Gliwice
21. Domena Prima Power LASERDYNE – dobór gazu osłonowego (<https://www.primapowerlaserdyne.com/selecting-and-delivering-shield-gas-in-laser-welding/>) [dostęp: 3.12.2021 r.]
22. A. Bharatish, G.R. Rajkumar, P. Gurav, G. Satheesh Babu, H.N. Narasimha Murthy, M. Roy, Optimization of laser texture geometry and resulting functionality of nickel aluminium bronze for landing gear applications, International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, Volume 4, Issue 3, 2021, Pages 346-357.



23. B. Mao, A. Siddaiah, Y. Liao, P.L. Menezes, Laser surface texturing and related techniques for enhancing tribological performance of engineering materials: A review, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 53, 2020, Pages 153-173.
24. T. Burakowski, W. Napadłek, Mikroobróbka laserowa – możliwości zastosowań w przemyśle. *Prace Instytutu Elektrotechniki*, Tom Z. 245, 2010, str. 233-246.
25. W. Napadłek, A. Laber, Teksturowanie laserowe nanokrystalicznych napoin. *Problemy Eksploatacji*, nr 2, 2012, str. 117-123.
26. Domena Laserax (<https://www.laserax.com/blog/how-laser-engraving-work>) [dostęp 5.01.2022 r.]
27. Domena Golden Laser (<https://www.goldenlaser.cc/news/laser-engraving-wooden-trophies-custom-gifts-for-honor>) [dostęp 5.01.2022 r.]
28. Domena Trotec Laser (<https://www.troteclaser.com/en/applications/leather/>) [dostęp 5.01.2022 r.]
29. Domena Cajo Technologies, wpis z bloga Markings on mild steel ([https://cajotechnologies.com/blog\\_news/heat-number-markings-through-scale-formation-to-mild-steel/](https://cajotechnologies.com/blog_news/heat-number-markings-through-scale-formation-to-mild-steel/)) [dostęp: 5.01.2022 r.]

## Badania wstępne złącza spawanego wykonanego ze stali Super 304H

T. Puszczalo<sup>a</sup>, M. Sroka<sup>b</sup>, A. Zieliński<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Zakład Remontów Energetycznych, Katowice, Doktorant wdrożeniowy  
email: Tomasz.Puszczalo@polsl.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, email: Marek.Sroka@polsl.pl

<sup>c</sup> Instytutu Metalurgii Żelaza, Gliwice, email: imz@imz.pl

**Streszczenie:** Celem pracy były badania wstępne złącza spawanego wykonanego ze stali Super 304H, a w szczególności badania mikrostruktury w stanie wyjściowym oraz określenie kierunku badań zmierzających do oceny trwałości eksploatacyjnej złącza.

**Abstract:** The aim of this work was to conduct preliminary studies of a welded joint made of super 304H steel, in particular to study the microstructure in its initial state and to determine the direction of research aimed at assessing the service life of the joint.

**Słowa kluczowe:** trwałość eksploatacyjna, złącze spawane, stal Super 304H

### 1. WSTĘP

Zapotrzebowanie na energię elektryczną na świecie ciągle wzrasta i jest bezpośrednio związane z rozwojem gospodarczym państw, produkcją przemysłową, energochłonnością oraz zarządzaniem energią [1,2]. Gospodarki na całym świecie są silnie zależne od energii, a głównymi jej źródłami są elektrownie konwencjonalne, z których ~40% stanowią jednostki opalane węglem [3]. Energetyka krajowa, pomimo coraz bardziej zaostrzonych przez Unię Europejską kryteriów ekologicznych, na długie lata będzie jednak oparta na spalaniu węgla ze stopniowym ograniczeniem jego udziału w tzw. miksie energetycznym [4].

PEP zakłada, że spadek produkcji energii elektrycznej z wykorzystaniem paliw kopalnych zmniejszy się z obecnych 76% do około 56% w roku 2030. Pokazuje to, że energetyka wysokotemperaturowa przez co najmniej kolejne 20 lat pozostanie jednym z podstawowych źródeł energii w Polsce [4,5]. W związku z tym na przestrzeni ostatnich lat w energetyce konwencjonalnej wprowadzono szereg zmian wynikających z uwarunkowań zarówno ekonomicznych, jak i ekologicznych. Głównym wyzwaniem stało się podnoszenie sprawności bloków energetycznych. Cel ten realizowany jest m.in. poprzez podnoszenie parametrów pary, co z kolei zdeterminowało wprowadzenie nowych gatunków materiałów.

Nowoczesność technologii energetycznych można określić na podstawie dwóch głównych parametrów: sprawności bloku i związanej z tym ilości szkodliwych dla środowiska emisji zanieczyszczeń [6]. Aby obniżyć poziom CO<sub>2</sub> w atmosferze i oszczędzać paliwa kopalne

konieczne jest zwiększenie efektywności produkcji energii elektrycznej. Wymusza to rozwój nowych stali i stopów do pracy w podwyższonej i wysokiej temperaturze. Materiały stosowane do budowy elementów kotłów muszą zapewniać stabilne zachowanie właściwości mechanicznych: granicy plastyczności, wytrzymałości na pełzanie, niskiej podatności na wzrost kruchości czy odporności na korozję w czasie do 200 000 h. Jest to możliwe dzięki zachowaniu stabilnej struktury materiału oraz właściwości fizycznych w czasie jego eksploatacji [7].

Obecnie realnym kierunkiem rozwoju energetyki krajowej jest modernizacja starych bloków o podwyższonych parametrach pary ( $>25$  MPa/ $570^{\circ}\text{C}$ ) o sprawności 40% i budowa nowoczesnych bloków o parametrach nadkrytycznych ( $>29$  MPa/ $600^{\circ}\text{C}$ ) i sprawności 45% netto [8]. Stal Super 304H stosowana jest do budowy elementów ciśnieniowych kotłów o nadkrytycznych parametrach pracy, przede wszystkim na elementy przegrzewaczy pary, w tym głównie na węzownice najwyższych stopni [9]. Rury ze stali Super 304H wykazują również wysoką odporność na utlenianie [10].

## 2. METODYKA I CEL BADAŃ

Celem pracy były badania wstępne złącza spawanego wykonanego ze stali Super 304H, a w szczególności badania mikrostruktury materiału w stanie dostawy. Określono również kierunek badań zmierzających do oceny trwałości eksploatacyjnej złącza spawanego wykonanego ze stali Super 304H, którą definiuje się jako zdolność materiału do zachowania wymaganych własności użytkowych do chwili osiągnięcia umownego stanu granicznego, w którym dalsza eksploatacja wiąże się z ryzykiem jego zerwania.

W wymiarze praktycznym, w przypadku węzownic ostatnich stopni przegrzewaczy kotłów parowych wykonanych ze stali Super 304H, zerwanie oznacza awaryjne odstawienie bloku energetycznego. Niesie to za sobą konsekwencje w postaci długotrwałej, nieplanowanej przerwy w produkcji energii elektrycznej i cieplnej. W związku z powyższym wysoce pożądana jest wiedza pozwalająca na określenie przedziałów czasowych bezpiecznej eksploatacji wysokosprawnych bloków energetycznych, pracujących w parametrach nadkrytycznych, stanowiących niejednokrotnie stabilną podstawę systemów energetycznych.

## 3. PRZEDMIOT BADAŃ

Przedmiotem badań są próbki z żarowytrzymałej stali austenitycznej powstałej w wyniku modyfikacji składu chemicznego klasycznej stali typu 18/8. W tablicy 1 przedstawiono nominalny skład chemiczny stali Super 304H. Materiał ten charakteryzuje się wysoką zawartością chromu i niklu, oraz dodatków wpływających na stabilizację struktury niobu, miedzi i azotu. Negatywny wpływ na właściwości wytrzymałościowe mają natomiast siarka i fosfor, których obecność w stopie uważa się za jego zanieczyszczenie, mogące prowadzić do zmniejszenia plastyczności stali. Duże wtrącenia niemetaliczne przyczyniają się do kruchości materiału [11].

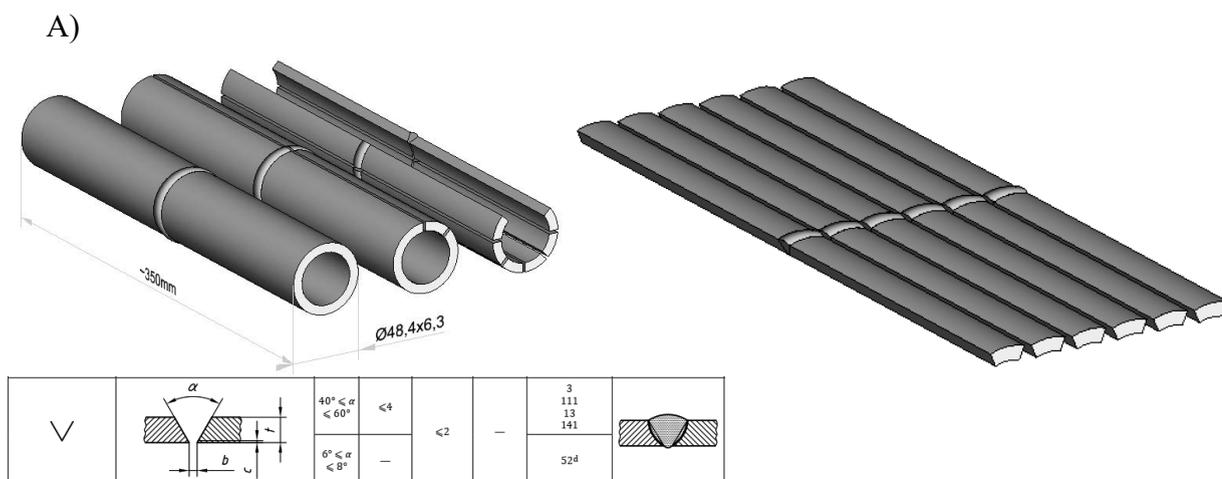
Tablica 1. Nominalny skład chemiczny stali Super 304H (% masy) [12]

Table 1. Nominal chemical composition of Super 304H steel (wt. %) [12]

Skład chemiczny stali Super 304H (% masy)											
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Nb	B	N	Al
0,7	max.	max.	max.	max.	2,5	17,0	7,5	0,3	0,001	0,05	0,003
0,13	0,3	1,00	0,040	0,010	3,5	19,0	1,5	0,6	0,010	0,12	0,030

### 3.1. Przygotowanie próbek

Próbki do badań laboratoryjnych pobrane zostały z rur  $\text{Ø}48,4 \times 6,3$  wykonanych ze stali Super 304H. Odcinki rur zostały połączone parami za pomocą spoin obwodowych, zgodnie z opracowaną technologią spawania. Spoiny przebadano w kierunku wykrycia niezgodności spawalniczych za pomocą zestawu badań nieniszczących; objętościowych i powierzchniowych. Pozytywna weryfikacja spoin pozwoliła na wycięcie próbek (rys.1).



B)





Rysunek 1. Próbkki do badań (A – schemat, B – zdjęcia rzeczywiste)

Figure 1. Samples for testing (A - diagram, B - actual photos)

Pozyskane próbki do badań podzielono na dwie grupy:

- Próbkki z materiału w stanie dostawy – stan wyjściowy.
- Próbkki poddawane starzeniu na podstawie kryteriów temperatury i czasu wg tablicy 2

Tablica 2. Oznaczenie próbek poddawanych starzeniu

Table 2. Marking of samples subjected to aging

Oznaczenie próbki	Temperatura wyżarzania [°C]	Czas wyżarzania [h]
1.304H.ZS.T1	700	1 000
2.304H.ZS.T1		
3.304H.ZS.T1		
4.304H.ZS.T1	700	3 000
5.304H.ZS.T1		
6.304H.ZS.T1		
7.304H.ZS.T2	700	5 000
8.304H.ZS.T2		
9.304H.ZS.T2		
10.304H.ZS.T2	700	10 000
11.304H.ZS.T2		
12.304H.ZS.T2		
1.304H.ZS.T3	750	1 000
2.304H.ZS.T3		
3.304H.ZS.T3		
4.304H.ZS.T3	750	3 000
5.304H.ZS.T3		
6.304H.ZS.T3		
7.304H.ZS.T4	750	5 000
8.304H.ZS.T4		
9.304H.ZS.T4		
10.304H.ZS.T4	750	10 000
11.304H.ZS.T4		
12.304H.ZS.T4		

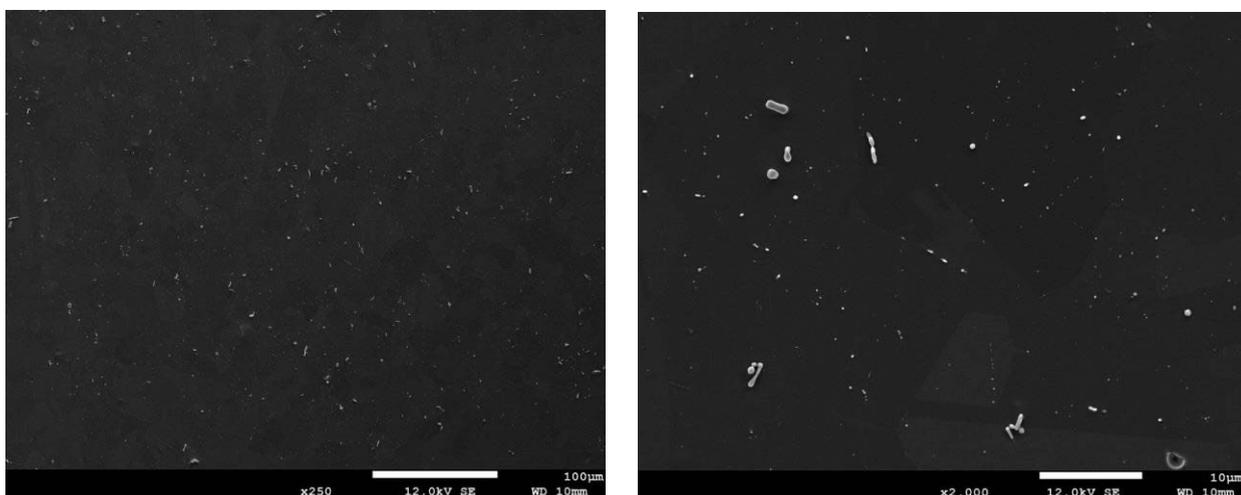
W kolejnym etapie badań próbki poddawane starzeniu umieszczone zostały w piecach przeznaczonych do wyżarzania na podstawie przyjętego kryterium temperatury i czasu (tablica 2). Starzenie próbek ma na celu zasymulowanie rzeczywistych warunków pracy. Wyżarzarki zlokalizowane są w laboratorium w Łukasiewicz -Instytucie Metalurgii Żelaza w Gliwicach.



Rysunek 2. Piec do wyżarzania  
*Figure 2. Annealing furnace*

### 3.2. Badania mikrostruktury stali super 304h w stanie dostawy

Badania mikrostruktury przeprowadzono przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) Inspect F na zglądach trawionych elektrolitycznie



Rysunek 3. Mikrostruktura stali super 304H stanie dostawy, SEM  
*Figure 3. Microstructure of super 304H steel in delivery condition, SEM*

W stanie dostawy badana stal charakteryzuje się drobnoziarnistą austenityczną strukturą o wielkości ziarna o numerze 7-9 według wzorców ASTM (rys. 3) oraz widocznymi bliźniakami wyżarzania o granicach koherentnych jak i niekoherentnych i pojedynczymi pierwotnymi wydzieleniami NbCN (MX) zróżnicowanej wielkości, rozmieszczonymi wewnątrz ziaren. Drobnoziarnista struktura zapewnia stali dobre właściwości ciągliwe wyrażane udarnością, a także wytrzymałościowe i plastyczne. Ponadto pozytywnie wpływa na odporność na utlenianie w porównaniu do stali gruboziarnistych

#### 4. KIERUNEK BADAŃ

Podczas projektowania urządzeń energetycznych należy wziąć pod uwagę nie tylko właściwości mechaniczne stali określone przez jej producenta ale również zagadnienia, które dotyczą montażu danego urządzenia. Kwestią nadrzędną jest więc spawalność wybranego rodzaju stali, rozumiana jako wykonanie złącza spawanego, charakteryzującego się określonymi właściwościami fizycznymi, które umożliwiają jego obciążenie założone w projekcie. Ze spawalnością stali związane są warunki takie jak: obróbka cieplna przed i po spawaniu, metoda przygotowania elementów, które mają zostać zespane, istotne cechy procesu spawalniczego.

Drogą do osiągnięcia wyznaczonego celu będą badania wytrzymałościowe, w tym statyczne próby rozciągania, badania twardości, udarności oraz przyspieszone próby pełzania zarówno na próbkach z materiału w stanie dostawy jaki i próbkach poddanych starzeniu.

Spośród wszystkich właściwości mechanicznych najbardziej istotne i decydujące o przydatności do eksploatacji w warunkach temperaturowo-naprężeniowych są właściwości wyznaczane w próbie pełzania. Wytrzymałość na pełzanie, będącą podstawą do obliczeń projektowych, decyduje o zdolności do przenoszenia obciążeń eksploatacyjnych elementów wykonanych z badanej stali. Długotrwała eksploatacja powoduje obniżanie się czasowej wytrzymałości na pełzanie. Niezbędną jest zatem znajomość dla różnych stanów materiału po różnym czasie eksploatacji. Wartości tej obniżonej wytrzymałości na pełzanie, definiuje trwałość resztkowa lub resztkowa wytrzymałość na pełzanie [4].

Uzupełnienie badań wytrzymałościowych będą stanowić badania makro i mikroskopowe procesów wydzieleniowych zachodzących w mikrostrukturze stali z wykorzystaniem skaningowej i transmisyjnej mikroskopii elektronowej

Wyniki badań posłużą Firmie ZRE Katowice S.A., do dalszego zwiększania własnych kompetencji w zakresie projektowania, wytwarzania, diagnostyki oraz remontów obiektów energetycznych.

Umiejętność oceny trwałości resztkowej rurociągów pracujących w istniejących kotłach wysokosprawnych bloków energetycznych pozwoli na oszacowanie przewidywanego czasu dalszej eksploatacji oraz planowanie odstawienia bloku energetycznego do celów remontowych.

#### 5. PODSUMOWANIE

Niniejsze badania wpisują się w nowe kierunki rozwoju polskiej elektroenergetyki, takie jak projekt strategii energetycznej kraju do roku 2040 (Ewolucja krajowego systemu energetycznego).

Pogłębienie wiedzy praktycznej znajdującej zastosowanie zarówno w zakresie określania czasu bezpiecznej eksploatacji jak i planowaniu odstawień kotłów energetycznych do celów remontowych.

Zacieśnienia współpracy pomiędzy jednostkami naukowo-badawczymi i zakładami specjalizującymi się w dziedzinie szeroko pojętej energetyki jakim jest ZRE Katowice S.A. przed którym stoją wyzwania związane kierunkami rozwoju współczesnej energetyki pod kątem stosowania nowoczesnych materiałów.

Aby zagwarantować bezpieczeństwo energetyczne kraju, w którym elektrownie oparte są na spalaniu surowców kopalnych, niezbędne jest ciągle udoskonalanie oraz zwiększanie sprawności urządzeń energetycznych. Zadanie to może być zrealizowane przez stosowanie coraz nowocześniejszych stali i stopów, które umożliwią podniesienie parametrów pracy kotłów i zapewnią bezpieczną oraz bezawaryjną pracę przez długi czas [2, 13].

Produkcja i prawidłowe działanie maszyn energetycznych byłoby niemożliwe bez zastosowania odpowiednich materiałów, odpornych na specyficzne warunki, w tym wysokie ciśnienie i temperaturę. Nowatorskie rozwiązania w zakresie materiałów używanych do produkcji urządzeń są podstawą rozwoju w przemyśle energetycznym, zarówno na etapie budowania obiektów, jak również ich późniejszej eksploatacji. Dobra stal dla energetyki charakteryzuje się więc wysokimi właściwościami wytrzymałościowymi.

## LITERATURA

1. M. Gątarek, J. Słania, G. Golański, R. Krawczyk, P. Urbańczyk, Ł. Rawicki, Spawanie złączy doczołowych jednorodnych ze stali Super 304H, *Przegląd Spawalnictwa*, 88 4 (2016) 31-34.
2. P. Zbroja, A. Ziewiec, E. Tasak, Skłonność do pęknięć gorących austenitycznej stali Super 304H przeznaczonej do pracy w podwyższonej temperaturze, *Weld. Tech. Rev.*, 84 1 (2012) 10-14.
3. T. Dudziak, E. Rząd, G. Golański, M. Solecka, Ł. Boroń, P. Wieczorek, Effect of aging process on steam oxidation behaviour of austenitic steels Super 304H and HR3C, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 191 (2021) 104344.
4. A. Zieliński, Trwałość eksploatacyjna żarowytrzymałych stali o osnowie austenistycznej, *Monografie IMŻ*, 16, 2021.
5. Polityka energetyczna Polski PEP2040.
6. A. Zieliński, Trwałość eksploatacyjna żarowytrzymałych stali o osnowie ferrytycznej w warunkach długotrwałego oddziaływania temperatury, *Monografia Nr 7*, Gliwice 2016.
7. A. Zieliński, M. Sroka, A. Hernas, M. Kremzer, The effect of long-term impact of elevated temperature on changes in microstructure and mechanical properties of HR3C steel, *Arch. Metall. Mater.*, 61, 2 (2016) 761–766.
8. A. Hernas, T. Wala, M. Staszewski, Charakterystyka i dobór stali na przegrzewacze o nadkrytycznych parametrach pary, *Inżynieria Materiałowa*, 30, 3 (2009) 143-151.
9. A. Zieliński, R. Wersta, Struktura stali S304H po 10 000 godzin starzenia, *Energetyka*, 11 (2018) 648-650.
10. A. Iseda, H. Okada, H. Semba, M. Igarashi Long term creep properties and microstructure of SUPER304H, TP347HFG and HR3C for A-USC boilers, *Energy Materials*, 2:4 (2007) 199-206.



11. J. Ćwiek, Evaluation of microstructure and mechanical properties of a steam turbine casing after long-term service, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 49 (2011) 27-34.
12. VdTÜV-Werkstoffblatt 550 - Warmfester Walz- und Schmiedestahl X10CrNiCuNb18-9-3 (1.4907), 2012.
13. A. Hernas, *Trwałość i niszczenie elementów kotłów i turbin parowych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.



28 stycznia 2022  
Gliwice

KATEDRA MATERIAŁÓW INŻYNIERSKICH I BIOMEDYCZNYCH  
WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY  
POLITECHNIKA ŚLĄSKA

## MIĘDZYNARODOWA STUDENCKA KONFERENCJA NAUKOWA

### Rodzaje hybrydowych obróbek powierzchniowych materiałów metalowych i ceramicznych

M. Radoń<sup>a</sup>, M. Staszuk<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Inżynieria Materiałowa, specjalizacja Automatykacja i Robotyzacja Procesów Spawalniczych  
email: materad250@student.polsl.pl

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

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono najważniejsze informacje dotyczące hybrydowej obróbki warstw powierzchniowych. Opisano metody hybrydowe wytwarzania warstw powierzchniowych oraz przykładowe warstwy powierzchniowe wraz z porównaniem ich własności na podstawie dostępnych źródeł literaturowych.

**Abstract:** The article presents the most important information on the hybrid surface layer treatment. Hybrid methods and exemplary surface layers have been described, along with a comparison of their properties based on the available literature sources.

**Słowa kluczowe:** powłoki hybrydowe, warstwy hybrydowe, azotowanie, PVD, CVD, ALD

#### 1. Wprowadzenie

Szybkie tempo rozwoju nauki oraz techniki, a także rosnące wymagania jakościowe nowoczesnych gałęzi przemysłu powodują nieustanne prace nad tworzeniem nowych oraz mieszanych technologii, które umożliwiają stosowanie wielu czynników jednocześnie, co bezpośrednio przekłada się na wzrost efektywności obróbki powierzchniowej poprzez poprawę własności użytkowych obrabianego materiału. Do jednych z najbardziej znanych, a także najczęściej wykorzystywanych, technologii mieszanych, tzw. hybrydowych, należą procesy wytwórcze warstw powierzchniowych, które wskutek synergicznego efektu połączenia dwóch odrębnych procesów dają możliwość uzyskiwania warstw typu duplex o lepszych własnościach niż w przypadku zastosowania pojedynczych procesów. Opisywane warstwy hybrydowe charakteryzują się znacznym wzrostem odporności na zużycie ścierne, korozyjne, wysoką temperaturę, a także znaczną poprawą odporności na duże obciążenia mechaniczne [1,2,3].

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie aktualnego stanu wiedzy, na podstawie przeglądu piśmiennictwa, dotyczącego technologii hybrydowych warstw powierzchniowych oraz wpływu warunków wytwarzania warstw na strukturę i własności użytkowe.

## 2. Hybrydowe technologie obróbki powierzchniowej

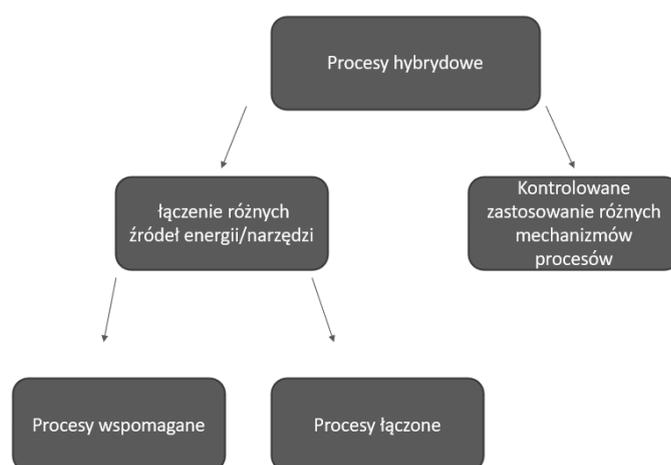
Nowoczesne techniki wytwórcze skupiają się przede wszystkim na wzroście efektywności oraz aspekcie jakościowym. W wyniku tego wzrosło zainteresowanie łączonymi technologiami, których celem jest obróbka przedmiotów o skomplikowanych kształtach lub powierzchniach, a także zwiększenie wytrzymałości materiału. Realizuje się to poprzez wytworzenie synergicznej warstwy kompozytowej o własnościach nieosiągalnych dla znanych pojedynczych technologii. Do technologii hybrydowych należą np.: azotowanie, nanoszenie powłok PVD oraz nawęglanie wraz z nanoszeniem powłok CVD [4].

### 2.1 Klasyfikacja obróbki hybrydowych procesów wytwórczych

Wśród hybrydowych metod można wyszczególnić procesy oparte na łączeniu różnych narzędzi, źródeł energetycznych oraz przemyślane stosowanie różnych mechanizmów procesowych tj; kształtowanie ubytkowe oraz plastyczne [5]. Opisywana klasyfikacja została przedstawiona w sposób schematyczny na (rys. 1).

W przypadku grupy łączonych źródeł energii, a także narzędzi, dzielą się na dwie podstawowe podgrupy do których należą:

- procesy wspomagane w trakcie których najczęściej wykorzystuje się drgania ultradźwiękowe o częstotliwości (0,1-80kHz) i amplitudzie (1-200 $\mu$ m),
- procesy łączone, które w wyniku różnych konfiguracji procesowych oddziałują jednocześnie w celu usunięcia lub osadzenia materiału (kształtowanie addytywne wraz z obróbką CNC, osadzanie powłok PVD i ALD).

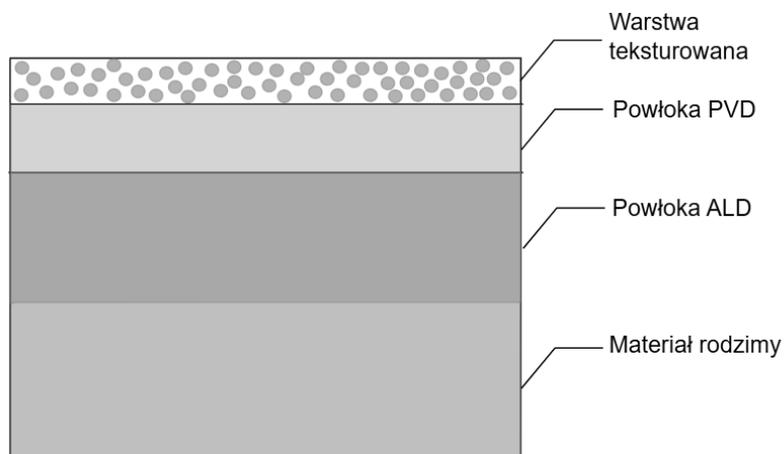


Rysunek 1 Klasyfikacja procesów hybrydowych ze względu na zastosowanie procesów wytwórczych [5]

Figure 1 Classification of hybrid processes due to the use of manufacturing processes [5]

### 3. Hybrydowe warstwy powierzchniowe

Rozwój hybrydowych technologii obróbek powierzchniowych przyczynił się także do rozwoju twardych przeciwzużyciowych powłok o złożonej budowie. Efektem tych działań jest powstanie nowych powłok o właściwościach przewyższających warstwy powierzchniowe uzyskiwane technologiami tradycyjnymi. Ich celem jest zwiększenie odporności na działanie wielu czynników zewnętrznych jednocześnie tj; odporność na wysoką temperaturę lub oddziaływanie kwasów i zasad [2]. Schemat nr 2 przedstawia budowę powłoki hybrydowej.



Rysunek 2 Schemat przedstawiający budowę powłoki hybrydowej [14]  
*Figure 2 Diagram showing the construction of hybrid coating [14]*

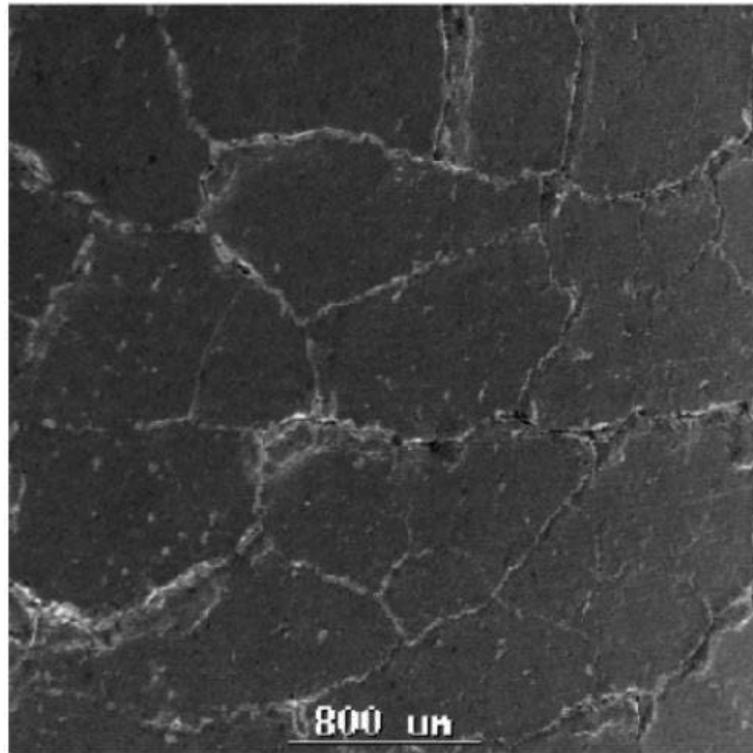
### 4. Charakterystyka warstw wytworzonych metodami hybrydowymi

Warstwy wytworzone metodami hybrydowymi cechują się możliwością sterowania poszczególnymi mechanizmami zachodzącymi w trakcie wzrostu powłoki (krystalizacja, kondensacja) oraz właściwościami poprzez zastosowanie odmiennych technologii osadzania warstw powierzchniowych. Elementy poddane niekonwencjonalnemu osadzaniu powłok charakteryzują się znacznie lepszą odpornością na działanie własności trybologicznych oraz trudnych warunków pracy do których należą m.in. wysoka temperatura, mieszany rodzaj tarcia a także wymagania związane z wysoką odpornością chemiczną. Dlatego dzięki możliwości uzyskania wysokiej odporności na działanie powyższych czynników powłoki hybrydowe znalazły szerokie spektrum zastosowań w medycynie, przemyśle kosmicznym, lotniczym, narzędziowym a także optoelektrycznym [1,2,4].

### 5. Warstwa Azotowana/powłoka CrN

Do jednych z najbardziej znanych oraz szeroko wykorzystywanych obróbek powierzchniowych należy połączenie procesu azotowania wraz z procesem osadzania twardych przeciwzużyciowych powłok poprzez zastosowanie metody PVD. Efektem powyższego połączenia jest powłoka hybrydowa złożona z warstwy azotowanej oraz osadzonej bezpośrednio na niej powłoki CrN naniesionej poprzez łukowo-jarzeniową metodę PVD (rys. 3). Opisywana warstwa została naniesiona w celu wydłużenia okresu eksploatacji matrycy kuźniczej. Dlatego poprzez zastosowanie warstwy azotowanej w znacznym stopniu

wzrosła twardość powierzchni oraz odporność podłoża na odkształcenie plastyczne (Tablica 1). Znaczącą rolę w powyższym połączeniu odgrywa powłoka CrN która stanowi barierę izolującą podłoże przed szkodliwymi czynnikami zewnętrznymi. Poprzez zastosowanie efektu synergii warstwa azotowana zabezpiecza powłokę azotku chromu przed utratą adhezji oraz wewnętrznej spójności strukturalnej [2].



Rysunek 3 Topografia czopa matrycy pokrytego warstwą azotowaną/CrN z widocznymi pęknięciami po wykonaniu 2000 sztuk odkówek [2]

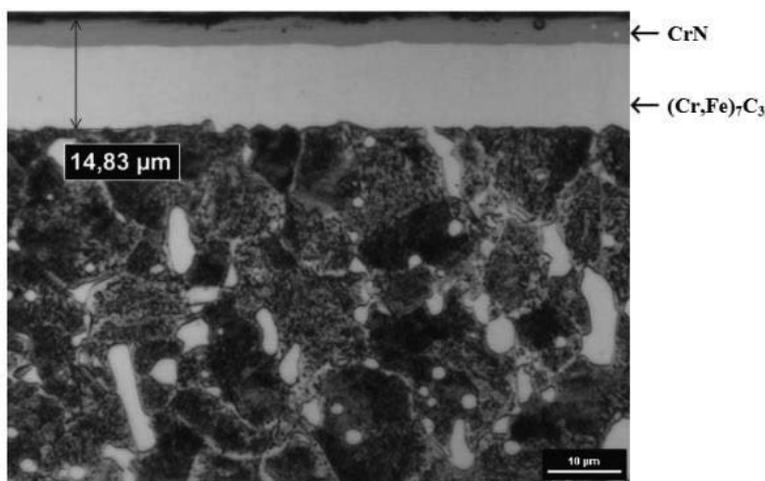
*Figure 3 Topography of the die spigot covered with a nitrided / CrN layer with visible cracks after making 2000 forgings [2]*

## 6. Warstwa hybrydowa typu CrC+CrN

Warstwy hybrydowe CrC+CrN znajdują zastosowanie w trakcie zabezpieczania matryc kuzniczych przeznaczonych do pracy na gorąco. Warstwy te charakteryzują się wysoką mikrotwardością sięgającą ok 2000HV<sub>0.2</sub>, odpornością trybologiczną, odpornością na działanie wysokiej temperatury oraz obciążeń mechanicznych (Tablica 1).

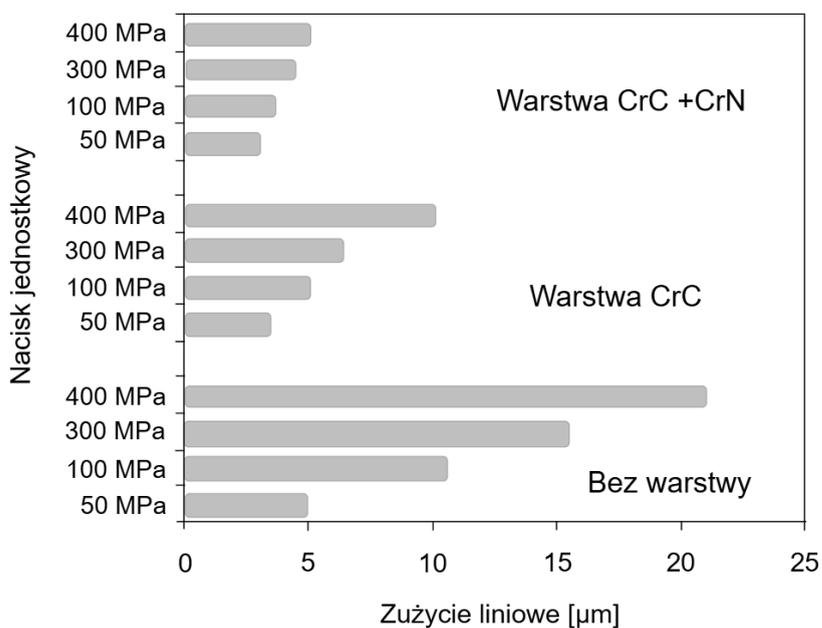
Powyższa hybryda została osadzona na powierzchni stali X210Cr12 poprzez zastosowanie chromowania próżniowego w celu osadzenia warstwy CrC (rys. 4). Na powierzchni stali narzędziowej zaobserwowano występowanie nadeutektycznego węgla pierwotnego (Cr,Fe)<sub>7</sub>C, który następnie został pokryty powłoką CrN poprzez zastosowanie metody łukowo-próżniowej PVD [3].

Efekt synergii powyższej hybrydy wykazał ponad dwukrotny wzrost odporności na zużycie ściernie w porównaniu do pojedynczej węglkowej co świadczy o bardzo dobrych własnościach trybologicznych (rys. 5).



Rysunek 4 Mikrostruktura stali X210Cr12 z warstwą hybrydową typu CrC+CrN. Traw. 2%HNO [3]

Figure 4 X210Cr12 steel microstructure with a CrC + CrN hybrid layer [3]



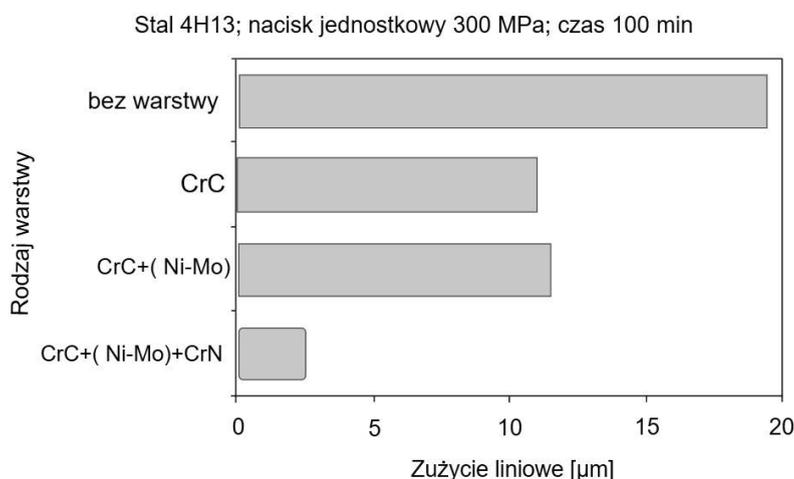
Rysunek 5 Zużycie liniowe próbek ze stali X210Cr12 z warstwami hybrydowymi typu CrC+CrN, warstwami węglkowymi typu CrC oraz próbek ze stali bez warstw, tylko po obróbce cieplnej, dla różnych nacisków jednostkowych [3]

Figure 5 Linear wear of X210Cr12 steel samples with CrC + CrN hybrid layers, CrC type carbide layers and steel samples without layers, only after heat treatment, for different unit pressures [3]

## 7. Warstwa hybrydowa typu CrC+(Ni-Mo)+CrN

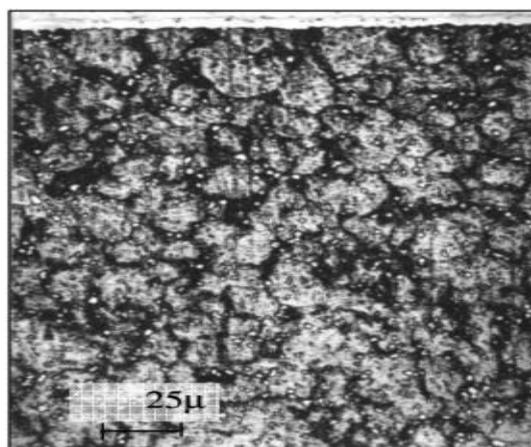
Warstwy hybrydowe typu CrC+(Ni-Mo)+CrN cechują się bardzo dobrą odpornością ścierną sięgającą od 8-10 razy w porównaniu do materiału wyjściowego (rys. 6). Powyższe wartości

uzyskano w wyniku trój etapowej obróbki powierzchniowej w skład której wchodzi; obróbka galwaniczna, chromowanie próżniowe oraz obróbka PVD [6]. Na powierzchni stali 4H13 poprzez obróbkę galwaniczną osadzono powłokę ze stopu Ni-Mo następnie w wyniku chromowania próżniowego została naniesiona powłoka CrC, dodatkowym procesem było wykonanie obróbki cieplnej w celu polepszenia własności podłoża. Ostatnim etapem tworzenia warstwy hybrydowej było naniesienie powłoki CrN metodą łukową PVD. Skoncentrowano się nad modyfikacją budowy chromowanych warstw węglkowych typu  $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}$  w celu zwiększenia odporności korozyjnej oraz zwiększenia odporności na zużycie przez tarcie powłoki CrN (Tablica 1).



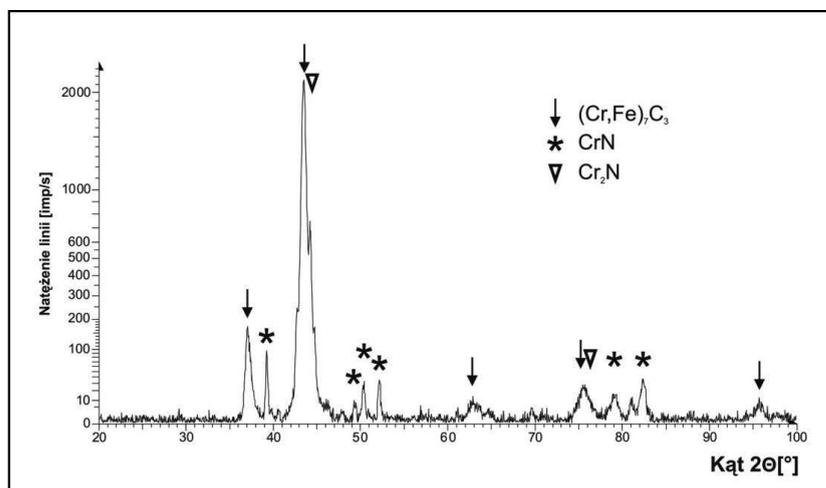
Rysunek 6 Zużycie liniowe próbek z warstwami węglkowymi typu CrC, duplex typu CrC + (Ni-Mo) i hybrydowymi typu CrC+(Ni-Mo)+CrN oraz próbek bez warstwy poddanej ulepszeniu cieplnemu, dla nacisku jednostkowego 300 MPa [6]

Figure 6 Linear wear of samples with CrC type carbide layers, CrC + (Ni-Mo) duplex layers and CrC+(Ni-Mo)+CrN hybrid layers and samples without a heat-treated layer, for a specific pressure of 300 MPa [6]



Rysunek 7 Mikrostruktura warstwy węglkowej wytworzonej na stali 4H13 [6]

Figure 7 The microstructure of the carbide layer produced on the 4H13 steel [6]

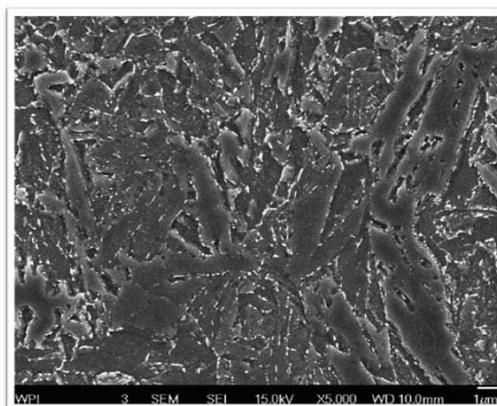


Rysunek 8 Dyfraktogram warstwy hybrydowej typu CrC+(Ni-Mo)+CrN [6]

Figure 8 Hybrid layer diffractogram of the CrC + (Ni-Mo) + CrN [6]

## 8. Teksturowanie laserowe sworzni tłokowych wykonanych ze stali 20MnCr5 poddanej nawęglaniu oraz hartowaniu indukcyjnemu

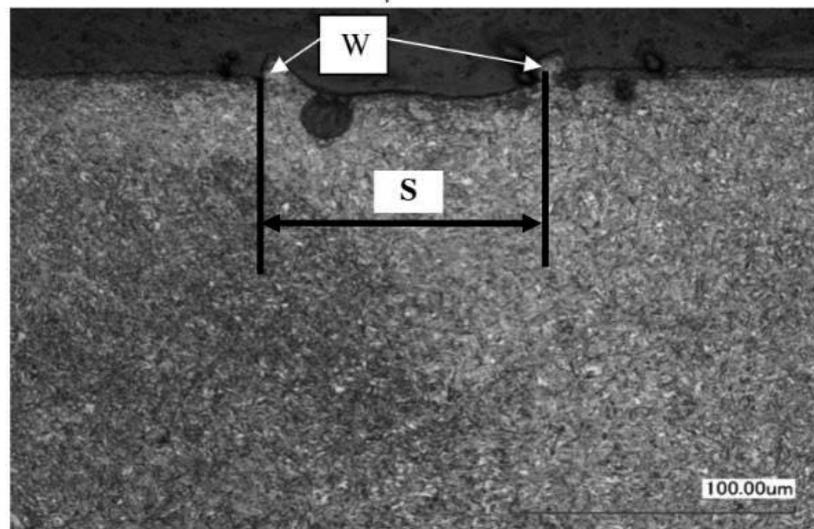
Powyższe zabiegi zostały przeprowadzone na sworzniu tłokowym wykonanym ze stali 20MnCr5, a następnie poddanemu operacjom obróbki cieplnej oraz obróbki cieplno-chemicznej w celu podwyższenia właściwości eksploatacyjnych [7]. Sworznie tłokowe ze względu na obciążenie w sposób cykliczny dużymi siłami powinny być wytwarzane z materiałów, które cechują się dużą twardością warstwy wierzchniej, odpornością na zużycie przez tarcie, odpornością na zmęczenie oraz co najważniejsze plastycznym i odpornym na obciążenia dynamiczne rdzeniem (rys. 11). Takie warunki spełniają stale stopowe które mogą być poddawane obróbce cieplnej lub cieplno-chemicznej (rys. 9). Przeprowadzenie zabiegu teksturowania laserowego miało na celu wytworzenie mikrozasobników olejowych których zadaniem jest gromadzenie czynnika smarującego w celu przeciwdziałania gwałtownemu zaniku smarowania pomiędzy sworzniem a korbwodem (rys 10).



Rysunek 9 Mikrostruktura stali 20MnCr5 poddanej nawęglaniu [8]

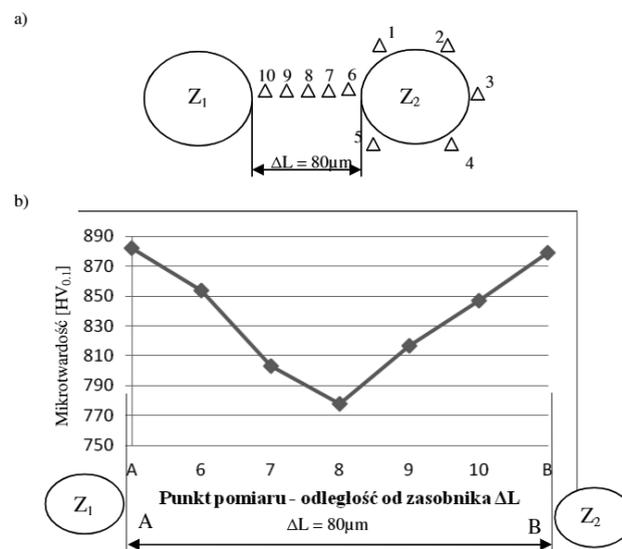
Figure 9 The microstructure of 20MnCr5 steel subjected to carburization [8]





Rysunek 10 Mikrostruktura stali 20MnCr5 poddanej nawęglaniu i hartowaniu indukcyjnemu z widocznym przekrojem poprzecznym mikrozasobnika olejowego: W-wypływka, S-szerokość zasobnika [7]

Figure 10 The microstructure of 20MnCr5 steel subjected to carburization and induction hardening with a visible cross-section of the oil micro-accumulator: W-discharge, S-width of the container [7]

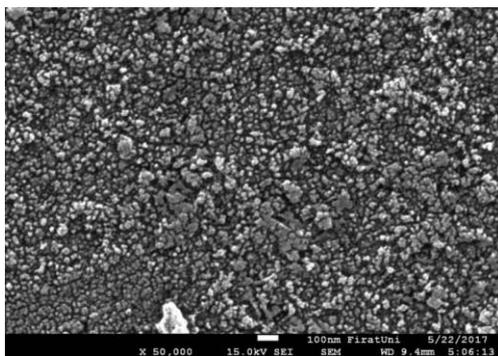


Rysunek 11 a) Schemat pomiaru mikrotwardości warstwy wierzchniej sworznia tłokowego w strefie mikrozasobników smarnych b) rozkład mikrotwardości [7]

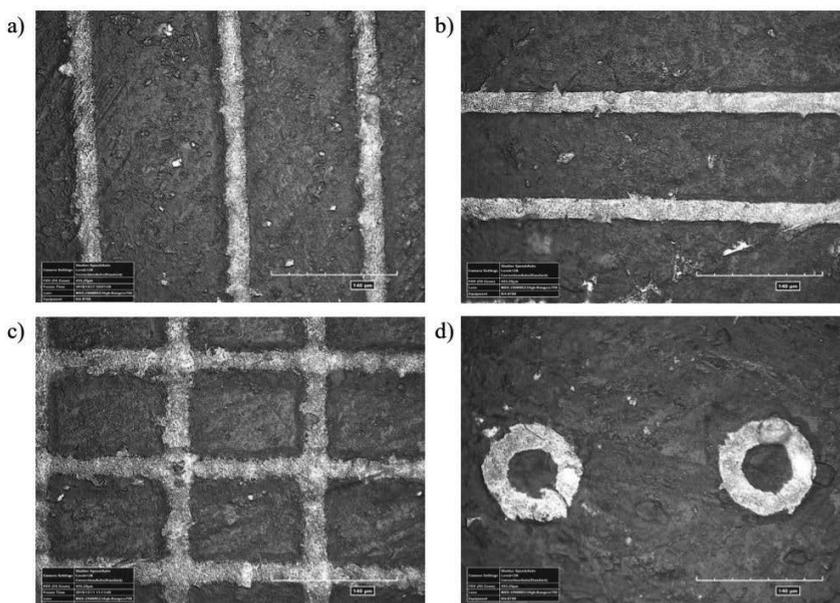
Figure 11 a) Scheme of microhardness measurement b) microhardness distribution [7]

## 9. Powłoka DLC + Laserowe teksturowanie

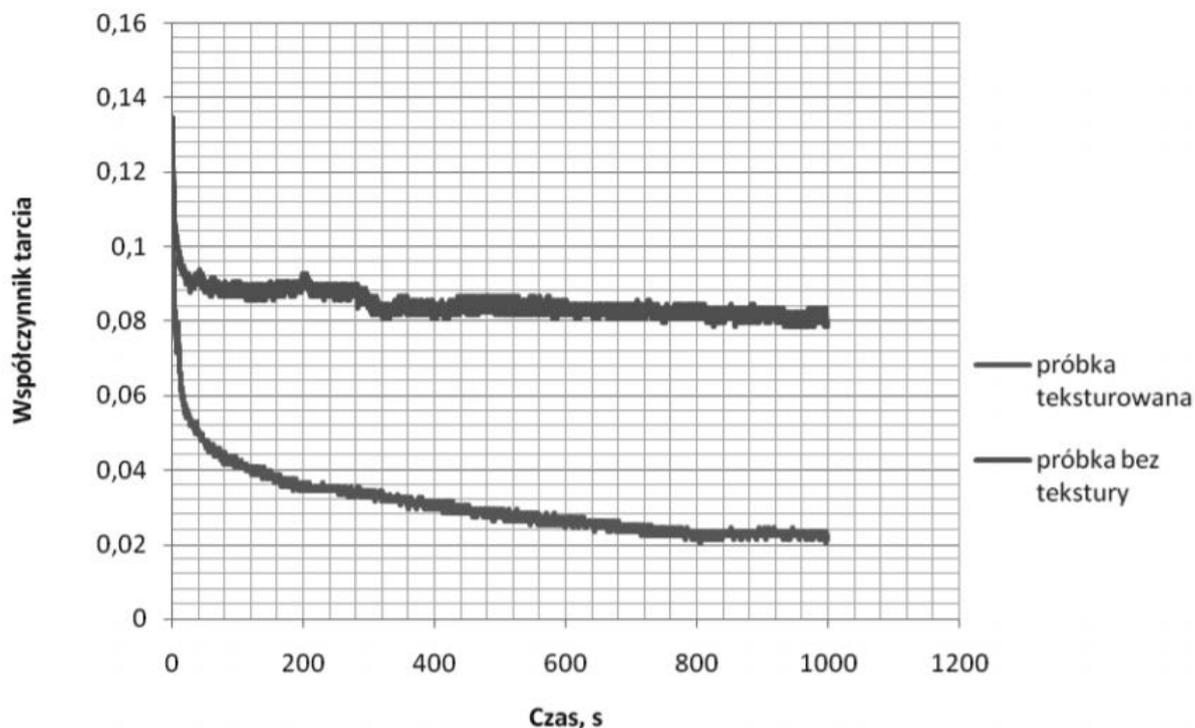
Powłoka DLC zawdzięcza swoją popularność ze względu na swoje bardzo dobre własności trybologiczne (rys. 12). Ze względu na swoją specyficzną budowę w skład której wchodzi: węgiel, wodór oraz wolfram charakteryzuje się ona stosunkowo niskim współczynnikiem tarcia, biokompatybilnością oraz odpornością na działanie wszelakich kwasów i zasad. Powyższe własności trybologiczne sprawiły wzrost popularności zastosowania powłoki DLC w przemyśle motoryzacyjnym, spożywczym, narzędziowym a także medycznym. W trakcie osadzania powłoki na podłożu stali 4H13 przy pomocy procesu PVD zdecydowano o modyfikacji powłoki Cr w celu zwiększenia adhezji do podłoża. Powierzchnia powłoki została dodatkowo poddana teksturowaniu laserowemu mając na celu wytworzenie mikrozasobników smarnych (rys. 13), które przyczyniają się do zmniejszenia zużycia trybologicznego (rys. 14) oraz wzrostu twardości powłoki [9].



Rys 12 Topografia powierzchni powłoki DLC [10]  
*Figure 12 DLC coating surface topography [10]*



Rys 13 Zdjęcia wykonanych tekstur w powiększeniu 700x [9]  
*Figure 13 Photos of the textures made at a magnification of 700x [9]*

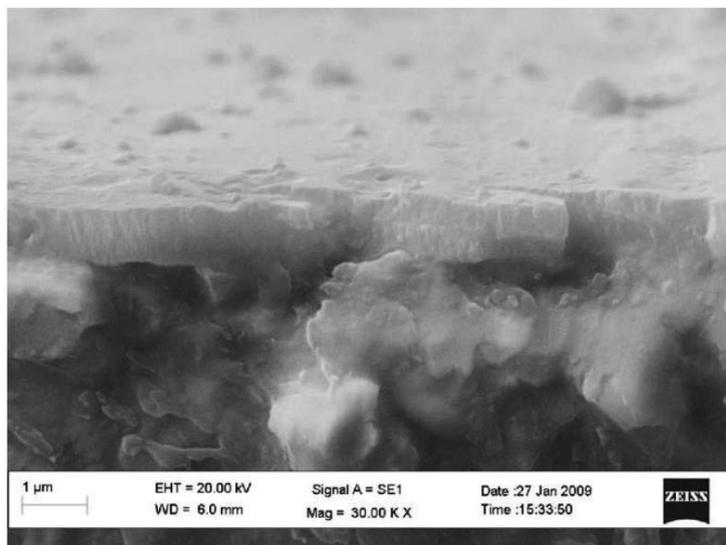


Rys 14 Wykres współczynnika tarcia funkcji czasu dla próbki teksturowanej i nieteksturowanej w warunkach smarowania [9]

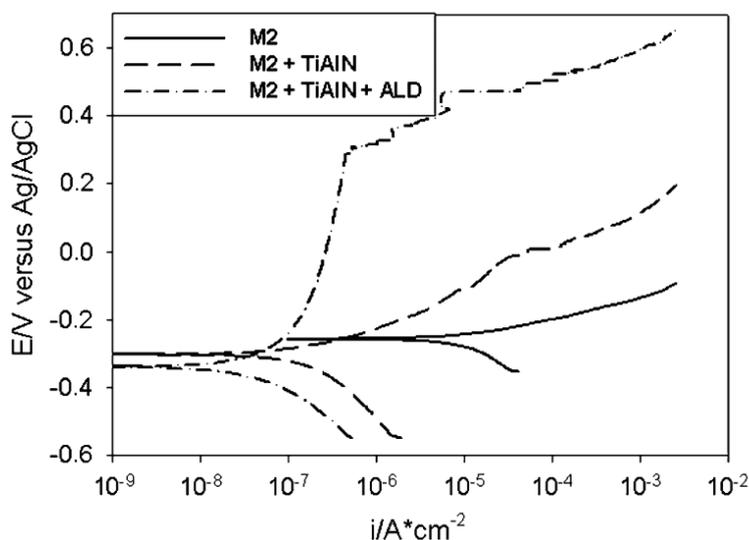
*Figure 14 Graph of the coefficient of friction and linear wear versus time for textured and non-textured samples under lubrication conditions [9]*

## 10. Hybrydowe twarde powłoki PVD+ ALD osadzone na stali narzędziowej

Głównym celem stosowania twardych przeciwzużyciowych powłok nanoszonych poprzez hybrydową metodę PVD+ALD jest zwiększenie odporności na działanie korozji elektrochemicznej na powierzchni stali narzędziowej poprzez zastosowanie powłok TiAlN oraz TiN, a następnie osadzenie powłoki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  w celu zapewnienia bariery dyfuzyjnej przed gazami, utlenianiem, a także wytworzenia obszaru pasywacji (czyli procesu w którym substancja aktywna chemicznie w wyniku reakcji wytwarza na powierzchni przedmiotu powłokę pasywacyjną) [11]. Mikrografia przekroju poprzecznego powłoki TiAlN / TiN została przedstawiona na rysunku 15.



Rys 15 Mikrografia przekroju poprzecznego SEM powłoki TiAlN / TiN na stali HSS [11]  
 Figure 15 SEM micrograph of the cross-section of TiAlN / TiN coating on HSS steel [11]

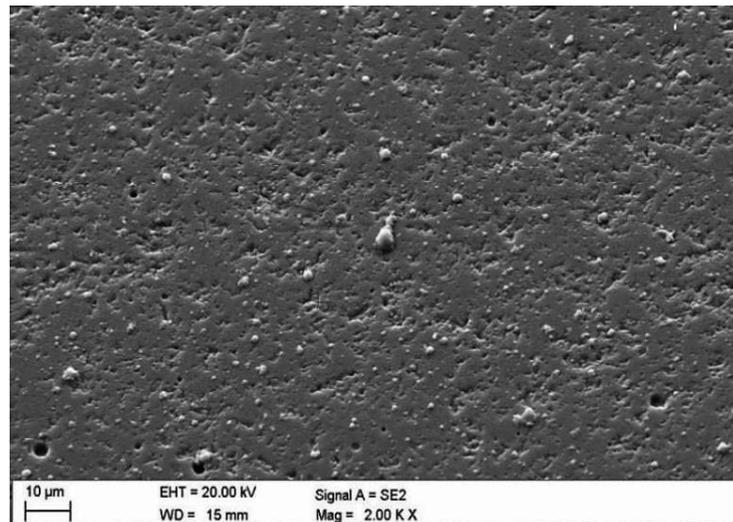


Rys 16 Krzywe polaryzacji dla powłoki TiAlN / TiN pokryta powłoką  $Al_2O_3$  oraz bez powłoki  $Al_2O_3$  [11]  
 Figure 16 Polarization curves for TiAlN / TiN coating with  $Al_2O_3$  coating and without  $Al_2O_3$  coating [11]

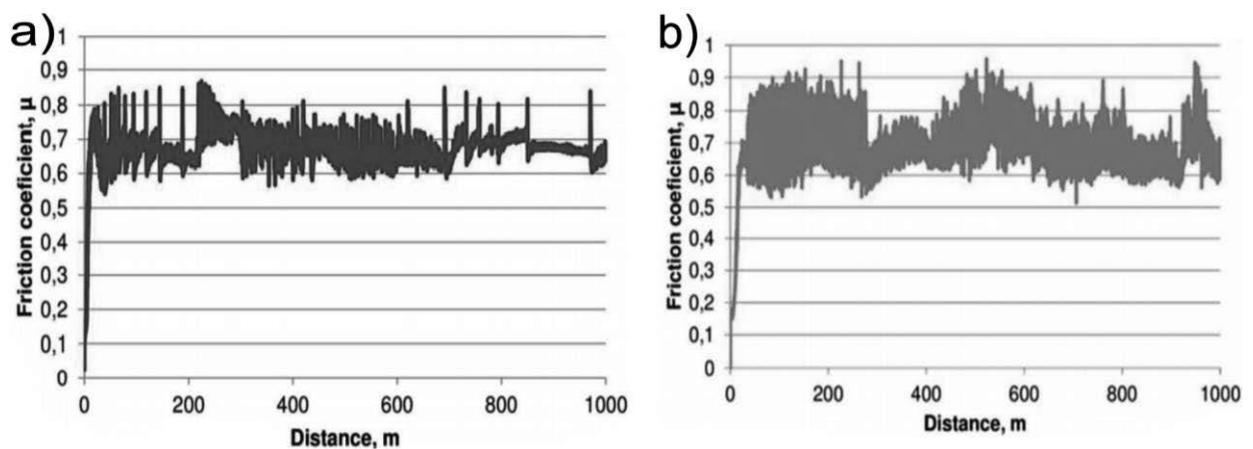
### 11. Hybrydowa powłoka ALD+ PVD osadzona na powierzchni SiAlON

Hybrydowa powłoka (Ti,Al)N została naniesiona na wielostrzowe płytki skrawające wykonane z narzędziowej ceramiki sialonowej poprzez hybrydę ALD+PVD (rys. 17). Proces osadzania hybrydowej powłoki można podzielić na dwa podstawowe etapy, w pierwszym etapie osadzono cienką warstwę ZnO wynoszącą 30nm w celu zapewnienia polaryzacji podłoża, a następnie osadzono powłoki Ti,AlN poprzez zastosowanie katodowego odparowania

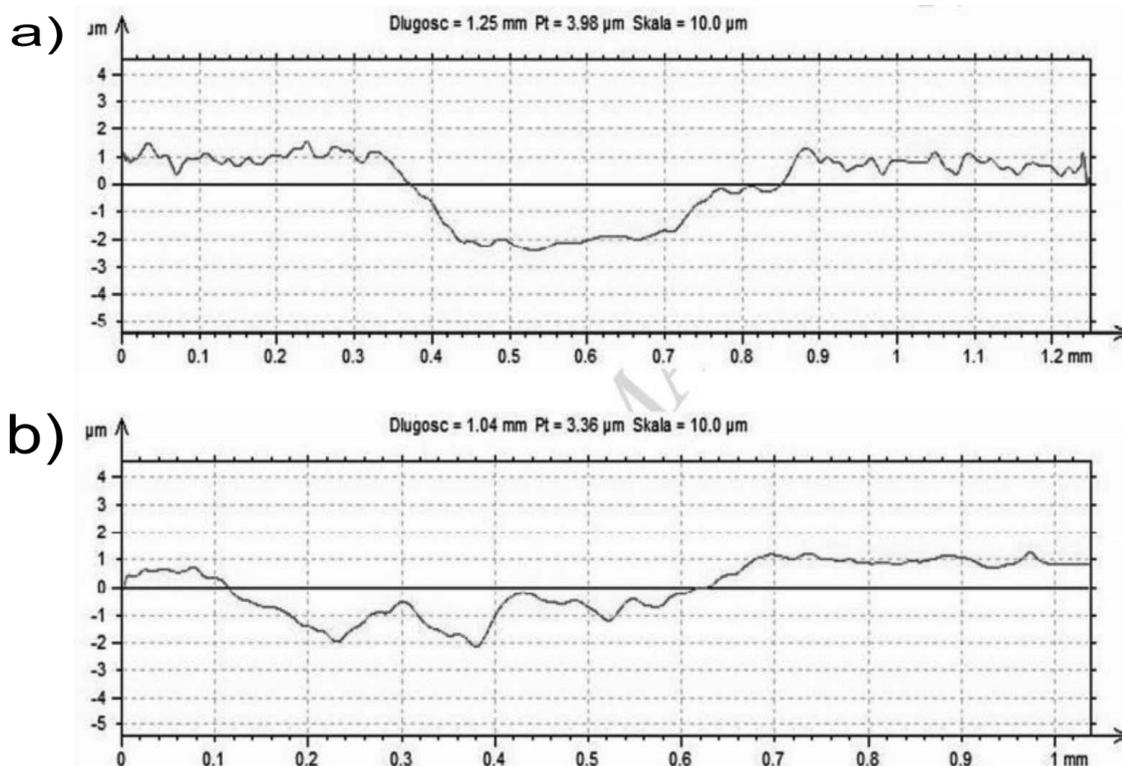
łukowego. W rezultacie czego uzyskano wzrost mikrotwardości do wartości 3120HV (Tablica 1) oraz wyznaczono objętość wytartego materiału podczas testu oscylująca w granicach  $0.034\text{mm}^3$  [12].



Rys 17 Morfologia hybrydowej powłoki (Ti,Al)N osadzonej na podłożu SiAlON [12]  
Figure 17 The morphology of the hybrid (Ti, Al) N coating on the SiAlON substrate [12]



Rys 18 Współczynnik tarcia dla powłok a) (Al,Ti)N, b) (Ti,Al)N-hybryda [12]  
Figure 18 Coefficient of friction for coatings a) (Al, Ti) N, b) (Ti, Al) N hybrid [12]



Rys 19 Profile zużycia po teście ball-on-plate dla powłok: a) (Al,Ti)N, (Ti,Al)N-hybryda [12]  
 Figure 19 Wear profiles after the ball-on-plate test for coatings: a) (Al, Ti) N, (Ti, Al) N-hybrid [12]

Tablica 1 Zestawienie własności hybrydowych warstw powierzchniowych  
 Table 1 Summary of properties of hybrid surface layers

Rodzaj warstwy powierzchniowej	Mikrotwardość HV	Grubość powłoki $\mu\text{m}$
Warstwa azotowana/CrN	560	4.0
CrC+CrN	2000	10.0
CrC+(Ni-Mo)+CrN	-	35
Teksturowanie laserowe/nawęglanie/hartowanie indukcyjne	850	-
Powłoka DLC/teksturowanie laserowe	3491	1.0
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiAlN}/\text{TiN}$	3315	2.5
ZnO/(Ti,Al)N	3120	4.0

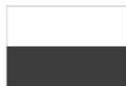
## 12. Podsumowanie

Hybrydowe procesy obróbki powierzchniowej ze względu na zastosowanie efektu synergii oferują bardzo dobre własności trybologiczne przekraczające kilkukrotnie wyniki otrzymywane przy pomocy metod konwencjonalnych. Przekłada się to bezpośrednio na wzrost żywotności

elementów poddanych osadzeniu powłok, minimalizację kosztów i odpadów związanych z wyeliminowaniem chłodziw oraz możliwość wzrostu wydajności poprzez zwiększenie prędkości procesu obróbki skrawaniem.

## PODZIĘKOWANIE

Publikacja współfinansowana przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach projektu „Politechnika Śląska jako Centrum Nowoczesnego Kształcenia opartego o badania i innowacje” nr POWR-03.05.00-00-Z098/17/00.



Rzeczpospolita  
Polska

Unia Europejska  
Europejski Fundusz Społeczny



## LITERATURA

1. B. Bogdański, J. Senatorski, P. Gębski, A. Więczkowski E. Kasprzycka. „Właściwości tribologiczne warstw hybrydowych wytwarzanych w procesach chromowania dyfuzyjnego połączonych z obróbką PVD.” *Tribologia*, nr 2/2014, 79-87, (2014)
2. J. Tacikowski J. Smolik. „Analiza wpływu grubości powłoki CrN w warstwie hybrydowej typu warstwa azotowana/powłoka CrN na trwałość matryc kuźniczych.” *Problemy eksploatacji*, nr 2/2009, 181-190, (2009)
3. M. Koprowski, J. Bielanik, S. Pilarczyk, B. Bogdański, I. Bauer E. Kasprzycka. „Właściwości tribologiczne warstw hybrydowych typu CRC+CRN wytwarzanych przez połączenie chromowania próżniowego z obróbką PVD.” *Tribologia*, nr 2/2011, 82-87, (2011)
4. B. Major. „Nowoczesne technologie w inżynierii powierzchni.” 44, [http://www.imim.pl/files/wyklady\\_prof\\_Major/WykladSDIIIrokInzPow.pdf](http://www.imim.pl/files/wyklady_prof_Major/WykladSDIIIrokInzPow.pdf), (2010).
5. W. Grzesik. „Hybrydowe procesy obróbki ubytkowej. Definicje, zasady tworzenia i znaczenie w przemyśle.” *Mechanik*, 5-6 (2018), 338-342, (2018)
6. E. Kasprzycka, J. Smolik, J. Senatorski, J. Tacikowski, B. Bogdański, M. Koprowski „Właściwości tribologiczne warstw hybrydowych typu CrC+(Ni-Mo)+CrN.” *Tribologia*, nr 5/2010, 96-102, (2010)
7. A. Woźniak W. Napadałek. „Teksturowanie laserowe warstwy wierzchniej sworznia tłoka silnika spalinowego w aspekcie tribologicznym.” *Problemy eksploatacji*, nr 2/2012, 125-131, (2012)
8. M. Yang, R. D. Sisson Jr. „Carburizing Heat Treatment of Selective-Laser-Melted 20MnCr5 Steel” *Journal of Materials Engineering and Performance* 29, (2020): 3476-3485.
9. N. Radek, P. Sęk, A. Mikina, A. Kalinowski D. Tokar. „Właściwości powłok DLC teksturowanych laserowo.”: 35-43.
10. N. Alsan, N. Basman, O. Uzun, M. Erkovan, F. Yakuphanoglu. „The effects of deposition potential on the optical, morphological and mechanical properties of DLC films produced by electrochemical deposition technique at low voltages.” *Material Science-Poland* 37(2)/2019, 4-7, (2019)

11. L. Guzman, A. Lanzutti, L. Fedrizzi, M. Saikkonen E. Marin. „Chemical and electrochemical characterization of hybrid PVD+ALD hard coatings on tool steel.” *Electrochemistry Communications*, 11(10)/2009, 2060-2063, (2009)
12. D. Pakuła, G.Chladek, M. Pawlyta, M. Pancielejko, P. Czaja M. Staszuk. „Investigation of the structure and properties of PVD coatings and ALD + PVD hybrid.” *Vacuum*, 154(3)/2018, 2-16, (2018)
13. R. Morek. „Obróbki Hybrydowe.” polski przemysł, <https://polskiprzemysl.com.pl/stal-metale-i-metalurgia/obrobki-hybrydowe>, (2016).
14. J. Smolik, A. M. Mazurkiewicz, J. Kacprzyńska-Gołacka, M. Rydzewski, M. Szota, J. Mizera. „Composite layers “ MgAl intermetallic layer / PVD coating” obtained on the AZ91D magnesium alloy by different hybrid surface treatment methods” *Archives of Metallurgy and Materials*, 60(2)/2015, (2015)





## Programowanie robotów przemysłowych do zadań napawania laserowego

R. Sanetra<sup>a</sup>, M. Bonek<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Doktorant wdrożeniowy, Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych  
email: Radoslaw.Sanetra@polsl.pl

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

**Streszczenie:** W artykule opisano przygotowanie programów sterujących robotami, wspomagających procesy napawania laserowego, a także weryfikację tych programów. Porównano możliwości oferowane przez firmy ABB oraz FANUC. Przygotowano programy wspomagające napawanie powierzchni płaskich oraz powierzchni cylindrycznych dla obu typów robotów. Przygotowane programy zweryfikowano, najpierw w środowiskach symulacyjnych – RobotStudio oraz RoboGuide, ostateczną weryfikację przeprowadzono na rzeczywistym stanowisku zrobotyzowanym do napawania laserowego.

**Abstract:** The article presents process of preparing programs for industrial robots control, aiding in laser cladding processes, and also verification of these programs. Possibilities offered by two producers – ABB and FANUC were compared. Programs aiding in cladding of flat surfaces and cylindrical surfaces were prepared, for both types of robots. Prepared programs were verified, first in simulational environments – RobotStudio and RoboGuide, then final verification was performed at actual laser cladding robotized stand.

**Słowa kluczowe:** robotyzacja, napawanie laserowe, ABB, FANUC, programowanie robotów

### 1. WSTĘP

Obecnie prawie wszystkie większe zakłady przemysłowe stosują automatyzację, osiągając w ten sposób ciągłość pracy z dużą szybkością, wysoką dokładność oraz powtarzalność. W celu zautomatyzowania trudniejszych czynności manualnych oraz zwiększenia elastyczności systemów zautomatyzowanych rozwinęła się robotyka, dając wyspecjalizowane urządzenia o dużych możliwościach, mogące uzupełniać zautomatyzowane linie produkcyjne lub też pracować samodzielnie. Roboty przemysłowe posiadają ogromny potencjał, mogą być

używane w szerokim spektrum zastosowań i szybko dostosowane do innej pracy, dzięki uniwersalnej budowie i dużym możliwościom ruchowym.

Stosowanie robotów niesie ze sobą wiele korzyści, spośród których można wymienić:

- Zwiększenie wydajności i obniżenie kosztów produkcji – roboty mogą pracować w sposób ciągły, stabilizując produkcję oraz minimalizując czas przestoju. Charakteryzująca je wysoka elastyczność również wpływa korzystnie na wydajność.
- Podniesienie jakości produkcji – roboty mogą pracować z dużą dokładnością i precyzją ważną w wielu sektorach, jak spawalnictwo czy montaż. Pozwalają też na eliminację błędów operatora.
- Humanizacja miejsca pracy – roboty mogą zastąpić człowieka w zadaniach trudnych, męczących lub monotonicznych np. przy przenoszeniu ciężkich ładunków, mogą też chronić zdrowie i życie człowieka wykonując za niego pracę w niebezpiecznych warunkach, hałasie, zapyleniu, szkodliwym promieniowaniu itp.
- Wzrost elastyczności produkcji – dzięki dużym możliwościom ruchowym oraz łatwości przeprogramowania.

Często jedynym elementem koniecznym do modyfikacji przy zmianie na inny profil produkcji jest program sterujący ruchami robota. W dużym stopniu miara skomplikowania zadania możliwego do wykonania przez robota zależy od sterującego nim programu pozwalającego mu podjąć odpowiednie działanie w zależności od sytuacji. Do dobrego użycia robota niezbędne jest jego odpowiednie zaprogramowanie [1,2].

Wszystkie ruchy i działania wykonywane przez robota są zlecane przez sygnały płynące z komputera układu sterującego, które z kolei generowane są na podstawie informacji wprowadzonych przez programistę/operatora za pośrednictwem układu wejść/wyjść. Interakcja programisty z komputerem sterującym robota jest istotną kwestią, gdyż jest ona głównym czynnikiem wpływającym na jedną z największych zalet robotów – ich elastyczność. Elastyczność robotów w głównej mierze opiera się na łatwości przeprogramowania, aby więc je zoptymalizować powstały różne metody programowania. Głównym podziałem jest tu podział na programowanie on-line, czyli na stanowisku pracy robota i off-line, czyli poza stanowiskiem pracy

Programowanie on-line – charakteryzuje się użyciem robota oraz stanowiska, na którym on pracuje. Dawniej stosowane było programowanie ręczne polegające na montowaniu mechanicznych zderzaków ograniczających ruchy robota, było to rozwiązanie dające małe możliwości, a do tego kłopotliwe i czasochłonne, dlatego nie korzysta się już z niego. Obecnie stosuje się programowanie przez nauczanie (teach in), w którym operator ręcznie lub za pomocą panelu sterującego przemieszcza efektor robota, zapisując kolejne jego położenia i w ten sposób generując tor ruchu robota. Przy programowaniu dyskretnym zapisywane są tylko kluczowe położenia robota, między którymi porusza się on w sposób dowolny lub z zadaną interpolacją. W programowaniu dyskretnym kolejne pozycje prowadzonego robota zapisywane są automatycznie co określony czas, zwany czasem próbkowania. Oczywistymi wadami programowania on-line jest konieczność zaangażowania robota, długi czas programowania, ograniczone możliwości programistyczne. Zaletą jest prostota takiego rozwiązania, nie wymaga ono dodatkowego oprogramowania, a operator nie musi znać języka programowania.

Programowanie off-line – Odbywa się na zewnętrznym komputerze, który nie musi być sprzęgnięty z robotem. Robot i jego stanowisko nie są używane, nie ma potrzeby wstrzymywania produkcji, gdyż w czasie programowania robot może wciąż realizować poprzedni program. Stosowane oprogramowanie zwykle oferuje duże możliwości, napisany program można zweryfikować poprzez wirtualną symulację zmniejszając ryzyko uszkodzenia

ludzi lub sprzętu. Zwykle można też przyspieszyć pisanie programu stosując pliki CAD, inne gotowe programy lub ich części. Wadami tej metody jest konieczność zakupu oprogramowania i znajomości przez operatora języka programowania; oprócz tego stosowane są tu idealne modele matematyczne robota i otoczenia, więc między nimi a obiektami rzeczywistymi mogą występować lekkie rozbieżności.

Obie te metody nie są pozbawione pewnych wad, więc często łączy się je uzyskując programowanie hybrydowe, w dzisiejszych czasach stosowane najczęściej. Jego celem jest łączenie ze sobą zalet obydwu sposobów, jednocześnie minimalizując ich wady. Zwykle polega ono na programowaniu części logiczno-obliczeniowej programu metodą off-line, następnie dodaniu pozycji robota metodą on-line. Dzięki części off-line czas programowania jest znacznie skrócony, natomiast część on-line pozwala na dobre dopasowanie programu do faktycznych warunków produkcji. Często w czasie programowania programista może nie znać dokładnego ułożenia przestrzennego obiektów w czasie produkcji, co dzięki takiemu podziałowi nie jest problemem [5].

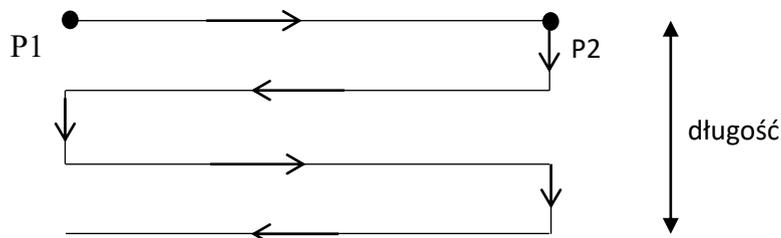
Napawanie laserowe jest procesem o wysokiej podatności na robotyzację – jej zastosowanie umożliwia uzyskanie odpowiednio wysokiej powtarzalności parametrów procesowych, a dzięki temu maksymalizację wysokiej dokładności oraz jakości charakterystycznej dla procesów laserowych.

## **2. PRZYGOTOWANIE PROGRAMÓW**

Planowane było przygotowanie programów sterujących robotem przemysłowym podczas napawania laserowego prostokątnych powierzchni płaskich oraz elementów obrotowych. Mają one zoptymalizować proces oraz ułatwić pracę operatorom robota przy tego typu zadaniach. Programy były realizowane w środowiskach dwóch firm zajmujących się robotyką – ABB oraz FANUC.

### **2.1. Program do napawania powierzchni płaskich**

Pojedyncza napoina laserowa charakteryzuje się niewielką szerokością, więc aby uzyskać pełne pokrycie powierzchni, niezbędne jest ułożenie szeregu napoin, jedna przy drugiej. Przy odpowiednio dobranej odległości między kolejnymi napoinami (nie większa niż szerokość pojedynczej napoiny) pokryta zostanie cała powierzchnia. Aby zminimalizować ilość ruchów jałowych, a tym samym lepiej zoptymalizować proces, robot może wykonywać napoiny naprzemiennie, od lewej do prawej, następnie od prawej do lewej. W ten sposób zaprojektowano trajektorię ruchu głowicy laserowej, zapewniającą optymalne wykonanie zadania. Należało także zaplanować sposób podawania wymiarów napawanego prostokąta. Aby móc dowolnie wybrać miejsce napawania na płaszczyźnie oraz odpowiednio ustawić głowicę laserową względem detalu, do punktu początkowego oraz końcowego pierwszej linii napawania robot zostanie doprowadzony przez operatora. Długość obszaru napawanego może być wprowadzona jako wartość w milimetrach (rys. 1).



Rysunek 1. Określenie wymiarów powierzchni napawanej oraz kierunku ruchów robota  
 Figure 1. Defining the dimensions of cladded surface and direction of robot movements

Program realizujący zadaną trajektorię został przygotowany w języku RAPID, wykorzystywanym w robotach przemysłowych ABB. Kolejne przesunięcia ściegu napawanego realizowane są w kolejnych iteracjach pętli FOR, naprzemiennie ruchy robota realizowane jest poprzez warunek parzystości licznika pętli. Zostały dodane obliczenia pozwalające na ustawienie wektora przesunięcia w kierunku prostopadłym do linii napawanej, bazując na współrzędnych punktów programowanych P1 oraz P2. Zostały dodane instrukcje sterujące stanem wyjść cyfrowych odpowiedzialnych za kontrolę urządzeń zewnętrznych - podawania materiału dodatkowego, elektrozaworów sterujących gazem osłonowym, włączenia/wyłączenia wiązki laserowej. Aby zapewnić wysoki poziom synchronizacji, sygnały włączenia oraz wyłączenia wiązki laserowej zostały określone jako zdarzenia powiązane z instrukcjami ruchu. Wprowadzono elementy komunikacji z użytkownikiem aby usprawnić pracę operatora: procedurę prowadzącą przez proces ręcznego programowania pozycji P1 i P2, pobranie długości obszaru napawanego wprowadzanej ręcznie, opcje szybkiego powtórzenia procesu. Pozostałe opcje sparametryzowane mogą zostać zmodyfikowane z poziomu danych programu. Fragment kodu odpowiadający za część ruchową przedstawia rysunek 2.

```

Set doPB_WlacznieGazuOslonROB1;
WaitTime 2;
Set doPB_WlacznieProszkuROB1;
WaitTime 9;
MoveL dojazd_pow, spJalowa, z0, tCOAX_PwrL;
FOR licznik FROM 0 TO ile_napoin-1 DO
  IF (licznik mod 2)=0 THEN
    TriggL
    Offs(punkt1_pow,licznik*offx,licznik*offy,0),
    sp_pow, TriggLaserON, z0, tCOAX_PwrL;
    TriggL
    Offs(punkt2_pow,licznik*offx,licznik*offy,0),
    sp_pow, TriggLaserOFF, z0, tCOAX_PwrL;
  ELSE
    TriggL
    Offs(punkt2_pow,licznik*offx,licznik*offy,0),
    sp_pow, TriggLaserON, z0, tCOAX_PwrL;
    TriggL
    Offs(punkt1_pow,licznik*offx,licznik*offy,0),
    sp_pow, TriggLaserOFF, z0, tCOAX_PwrL;
  ENDIF
ENDFOR
Reset doPB_WlacznieProszkuROB1;
MoveL dojazd_pow, spJalowa, z0, tCOAX_PwrL;
MoveJ dom_pow, spJalowa, z0, tCOAX_PwrL;

```

Rysunek 2. Program do napawania powierzchni płaskich (ABB) – fragment kodu  
 Figure 2. Flat surface cladding program (ABB) – snippet of code

Następnie analogiczny program przygotowano pod robota FANUC. Język programowania był tu uboższy niż w przypadku ABB, natomiast założeniem było uzyskanie jak największej funkcjonalności, korzystając jedynie z podstawowej wersji oprogramowania (bez dodatkowo płatnych opcji systemowych). Z uwagi na brak pętli FOR w opcji podstawowej, podobną funkcjonalność uzyskano za pomocą prostych instrukcji – etykiety (LBL), przeskoku do etykiety (JMP LBL) oraz ręczne wprowadzenie zmiennej licznika oraz jego inkrementacji. Naprzemiennosc ruchu oraz sterowanie urządzeniami zewnętrznymi uzyskano tym samym sposobem, co w przypadku oprogramowania ABB. Pewien problem napotkano przy włączeniu obliczeń prostopadłości wektora przesunięcia do linii napawanej. Zasady matematyczne obliczeń nie zmieniły się, natomiast problemem okazał się brak funkcji obliczania pierwiastka kwadratowego w podstawowej wersji oprogramowania. W celu rozwiązania tej kwestii zastosowano obliczenia przybliżone z zastosowaniem aproksymacji Newtona, które zawarto w osobnym podprogramie. Z uwagi na brak odpowiednich funkcji zrezygnowano z dodatkowych elementów komunikacji z użytkownikiem, elementy parametryczne programu są zmieniane z poziomu rejestrów. Fragment kodu gotowego programu przedstawia rysunek 3.

```
17: DO[1:CHILLER]=ON
18: DO[2:LASER_READY]=ON
18: DO[3:GAS]=ON
20: WAIT 2.00(sec)
21: DO[4:POWDER]=ON
22: WAIT 4.00(sec)
23: R[1:LICZNIK]=0
24: LBL[1]
25: PR[4,1:OFF]=R[12:OFFX]*R[1:LICZNIK]
26: PR[4,2:OFF]=R[11:OFFY]*R[1:LICZNIK]
27: IF (R[1:LICZNIK] MOD 2=1),JMP LBL[2]
28:L P[1] 200mm/sec FINE Offset,PR[4:OFF] TB 0.00sec,DO[5:LASER_ON]=ON
29:L P[2] R[4:PR_PROC]mm/sec FINE Offset,PR[4:OFF] TB 0.00sec,
: DO[5:LASER_ON]=OFF
30: JMP LBL[3]
31: LBL[2]
32:L P[2] 200mm/sec FINE Offset,PR[4:OFF] TB 0.00sec,DO[5:LASER_ON]=ON
33:L P[1] R[4:PR_PROC]mm/sec FINE Offset,PR[4:OFF] TB 0.00sec,
: DO[5:LASER_ON]=OFF
34: LBL[3]
35: R[1:LICZNIK]=R[1:LICZNIK]+1
36: IF R[1:LICZNIK]<R[2:ILE_NAPOIN],JMP LBL[1]
```

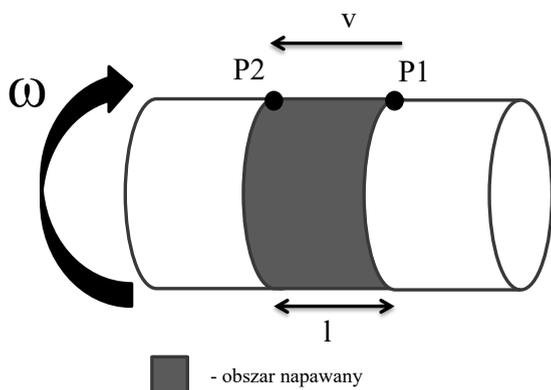
Rysunek 3. Program do napawania powierzchni płaskich (FANUC) – fragment kodu

*Figure 3. Flat surface cladding program (FANUC) – snippet of code*

## 2.2. Program do napawania powierzchni cylindrycznych

Kolejnym programem założonym do przygotowania był program do napawania laserowego powierzchni cylindrycznych elementów obrotowych. W celu wykonania zamierzonego zadania konieczne jest użycie dwóch jednostek roboczych – robota oraz obrotnika, współpracujących ze sobą. Obrotnik wprawia napawany detal w ruch dookoła własnej osi, natomiast ramię robota z umocowaną głowicą laserową wykonuje ruch liniowy wzdłuż detalu. Złożenie tych dwóch ruchów spowoduje nakładanie napoiny w kształt helisy na obwiedni detalu, co przy odpowiednich parametrach pozwoli dokładnie pokryć powierzchnię napawaną. Długość

obszaru napawanego ma być zadana położeniem punktów P1 i P2. Koncepcję przedstawiono na rys. 4.



Rysunek 4. Schemat napawania powierzchni cylindrycznych  
*Figure 4. Scheme of cylindrical surfaces cladding*

Parametrami sterującymi procesem są prędkość obrotowa obrotnika oznaczona jako  $\omega$ , oraz prędkość posuwu ramienia robota oznaczona jako  $v$ . Jednak jako dane wejściowe powinny służyć prędkość procesowa (prędkość poruszania się TCP względem napawanej powierzchni) oraz skok pomiędzy kolejnymi napoinami – napawana powierzchnia powinna charakteryzować się zadanymi wartościami tych właśnie wielkości. Prędkości obrotowa oraz posuwu powinny być więc wyliczone dla pożądaných wartości prędkości procesowej i skoku, parametrem który także należy uwzględnić jest średnica napawanego detalu.

W przypadku robotów ABB współpraca dwóch urządzeń polega na napisaniu osobnego programu dla każdego z nich, następnie, aby zapewnić ich odpowiednie współgranie, programy można sprząc ze sobą zadaniami synchronizacji. Przygotowano obliczenia prędkości obrotowej oraz posuwu, następnie przypisano je do instrukcji ruchowych programu robota oraz obrotownika. Ruch robota odbywa się od punktu P1 do P2, natomiast ruch obrotownika zadeklarowany jest jako ciągłe obroty z zadaną prędkością. Do programu robota dodano sygnały sterujące urządzeniami zewnętrznymi. Aby zapewnić odpowiednią współpracę programów sterujących robotem oraz obrotnikiem wykorzystano instrukcje synchronizacji. Instrukcja ta wstrzymuje przepływ programu, aż programy wszystkich urządzeń, zadeklarowanych jako biorące udział w zadaniu, znajdą się przy instrukcji synchronizacji z taką samą etykietą.

Planowane było także dodanie możliwości pauzy procesu w dowolnym momencie, pomocnej w kontroli stanu i ewentualnym czyszczeniu komponentów takich jak dysza podająca proszek metaliczny. Ponieważ proces jest wykonywany pojedynczym ruchem robota zachodzi konieczność przerywania tego ruchu, a następnie powrócenia do niego w miejscu przerywania. Do tego celu zastosowana została procedura pułapki. Procedura ta oczekuje na sygnał przerywania, po jego otrzymaniu przerywane jest wykonywanie aktualnej instrukcji, program przeskakuje do procedury pułapki, a po jej wykonaniu powraca do przerywanej instrukcji. Aby ułatwić prace serwisowe, robot podczas pauzy odjeżdża do bezpiecznej pozycji, a po jej zakończeniu powraca do zapisanej w momencie aktywacji pauzy pozycji tymczasowej. Fragment kodu programu sterującego robotem przedstawia rysunek 5.

```

WHILE koniec=1 DO
  MoveL domowa_obw, sp_jalowa, z0, tCOAX_PwrL;
  Set doPB_WlaczenieGazuOslonROB1;
  WaitTime 2;
  Set doPB_WlaczenieProszkuROB1;
  WaitTime 9;
  WaitSyncTask ObrotyStart, R1P1;
  TriggL punkt1_obw, sp_jalowa, TriggLaserON, z0, tCOAX_PwrL;
  WaitTime\InPos, wait;
  MoveL punkt2_obw, sp_obw, z0, tCOAX_PwrL;
  WaitTime\InPos, wait;
  TriggL punkt2_obw, sp_obw, TriggLaserOFF, z0, tCOAX_PwrL;
  WaitTime\InPos, 1;
  Reset doPB_WlaczenieProszkuROB1;
  MoveL domowa_obw, sp_jalowa, z0, tCOAX_PwrL;
  WaitSyncTask ObrotyKoniec, R1P1;
  Reset doPB_WlaczenieGazuOslonROB2;
  TPErase;

```

Rysunek 5. Program do napawania powierzchni cylindrycznych (ABB) – fragment kodu  
*Figure 5. Cylindrical surface cladding program (ABB) – snippet of code*

Następnie przystąpiono do przygotowania analogicznego programu pod robota FANUC. Założenia przyjęto identyczne jak dla programu poprzedniego – współpraca robota z obrotnikiem, przeliczenie i utrzymanie odpowiednich parametrów procesu oraz możliwość pauzowania w dowolnym momencie napawania. W przypadku robotów FANUC kilka urządzeń roboczych (w tym przypadku robot oraz obrotnik) może być sterowana z jednego programu, należy jedynie zadeklarować wykorzystywane grupy robocze w momencie tworzenia programu. Dla programów z aktywnymi kilkoma grupami roboczymi, dane pozycyjne zachowują pozycje wszystkich grup roboczych. Ponieważ obrotnik w tej aplikacji nie musi osiągać konkretnych pozycji, istotne jest jedynie zachowanie prędkości obrotowej, do sterowania nim użyto opcjonalnego argumentu instrukcji ruchu zapewniającej ciągłe obroty danej osi z zadaną prędkością. Podczas obliczania prędkości obrotowej oraz posuwu ponownie skorzystano z aproksymacji Newtona w celu uzyskania pierwiastka kwadratowego. Aby umożliwić pauzę programu w dowolnym momencie skorzystano z procedury warunkowego opuszczenia instrukcji po otrzymaniu zadeklarowanego sygnału wejściowego. Tutaj także zastosowano funkcjonalność odjazdu do pozycji bezpiecznej i powrotu do zapisanej pozycji tymczasowej. Fragment kodu przygotowanego programu przedstawia rysunek 6.

```

18: R[25:WAIT]=((R[21:SREDNICA]*3.1415)/R[22:PRED_OBW])
19:L P[1] 200mm/sec FINE CTV R[24] TB 0.00sec,DO[5:LASER_ON]=ON
20: WAIT R[25]
21: LBL[1]
22:L P[2] R[23:POSUW]mm/sec FINE CTV R[24]
  Skip,LBL[2],PR[11:TYMCZAS]=LPOS
23: DO[5:LASER_ON]=OFF
24: DO[4:POWDER]=OFF
25:L PR[12:PAUZA] 100mm/sec CNT50
26: LBL[3]
27: WAIT 1.00(sec)
28: IF DO[7:PAUZA]=ON,JMP LBL[3]
29:L PR[11:TYMCZAS] 100mm/sec FINE
30: DO[4:POWDER]=ON
31: DO[5:LASER_ON]=ON
32: JMP LBL[1]

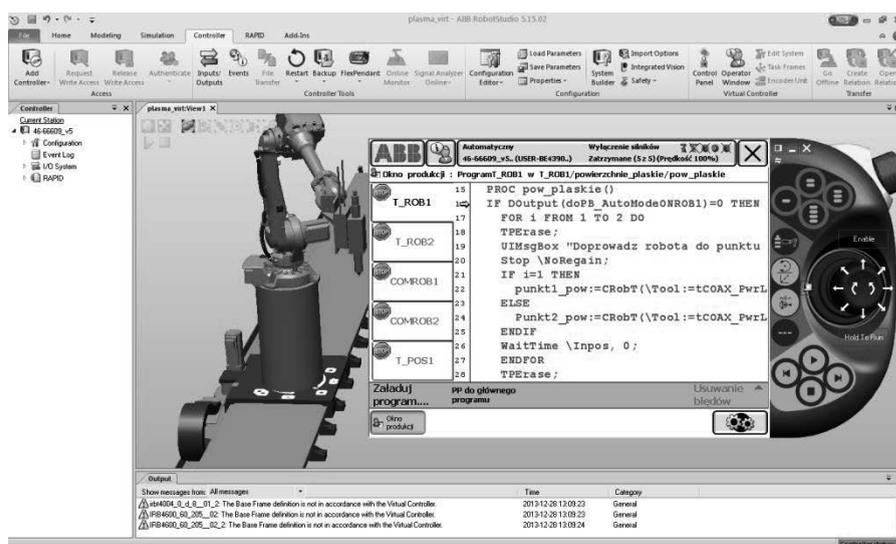
```

Rysunek 6. Program do napawania powierzchni cylindrycznych (FANUC) – fragment kodu  
*Figure 6. Cylindrical surface cladding program (FANUC) – snippet of code*

### 3. WERYFIKACJA PROGRAMÓW

#### 3.1. Program do napawania powierzchni płaskich

Po przygotowaniu programów, kolejnym krokiem była ich weryfikacja w środowisku symulacyjnym. W przypadku robotów ABB było to dedykowane oprogramowanie RobotStudio. Na potrzeby symulacji użyto wirtualnego systemu odpowiadającego rzeczywistemu. Model robota pobrano z biblioteki ABB. Użyto wirtualnego panelu programowania FlexPendant, aby możliwie przybliżyć się do sytuacji operatora obsługującego proces. Aby móc zweryfikować poprawność trajektorii ruchu centralnego punktu narzędzia użyto opcji śladu TCP.

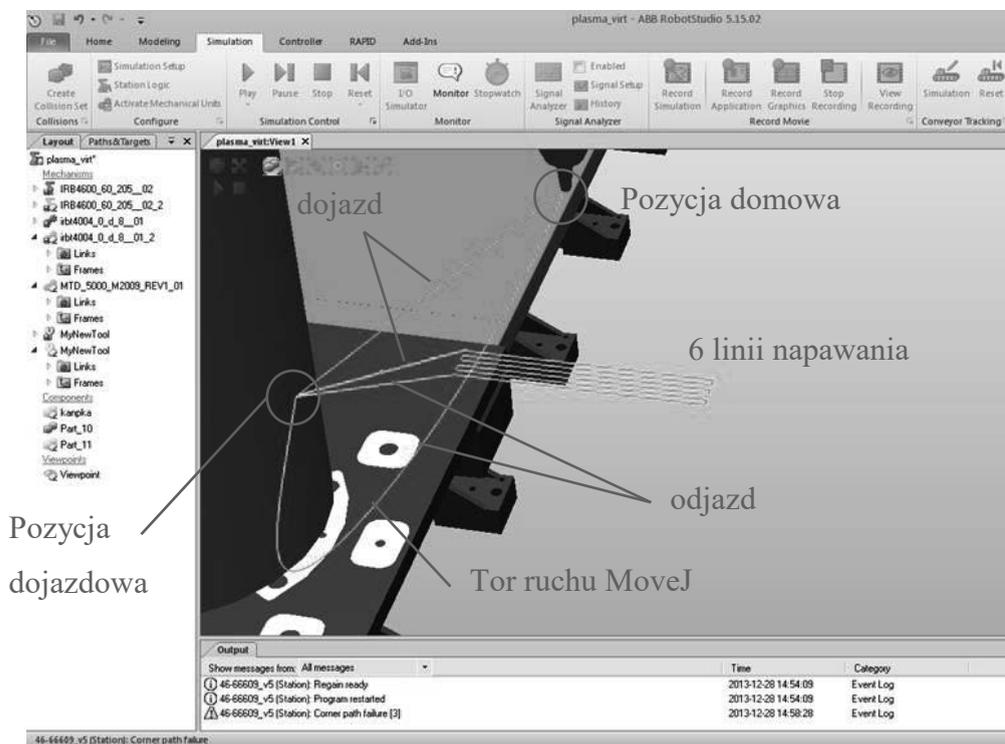


Rysunek 7. Widok stacji zrobotyzowanej oraz wirtualny panel FlexPendant

Figure 7. View of robotized stand and virtual FlexPendant

Po wprowadzeniu wymaganych danych robot wykonał program, trajektorie poruszania TCP przedstawia rysunek 8. Widoczne są punkty pozycji domowej i dojazdowej, jeden z ruchów jest widocznie nieliniowy – jest to ruch odjazdu z pozycji dojazdowej do domowej, zgodnie z programem realizowany instrukcją ruchu z interpolacją osiową, tak więc nieliniowość poruszania jest dopuszczalna. Kierunek napawania oraz ilość napoin pokrywa się z oczekiwaniami, podczas wykonania programu nie doszło także do żadnych kolizji.

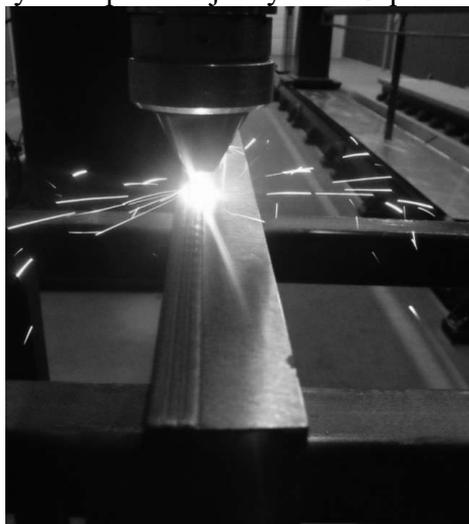




Rysunek 8. Tor ruchu robota po wykonaniu programu

*Figure 8. Track of robot movements after program execution*

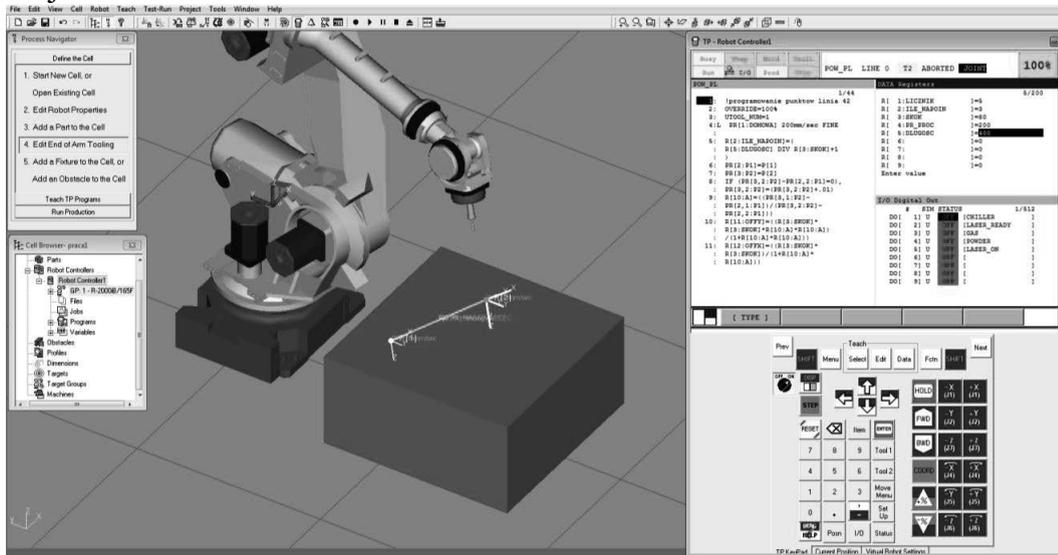
Po przetestowaniu programu w środowisku symulacyjnym przeprowadzono ostateczną weryfikację na stanowisku rzeczywistym podczas faktycznego procesu napawania. Wytworzona napoina odpowiadała przyjętym założeniom. Podczas samej obsługi programu i przebiegu procesu nie zauważono żadnych błędów, tak więc program można uznać za w pełni funkcjonalny i dopuścić do użycia w produkcji. Rysunek 9 pokazuje proces napawania.



Rysunek 9. proces napawania powierzchni płaskiej

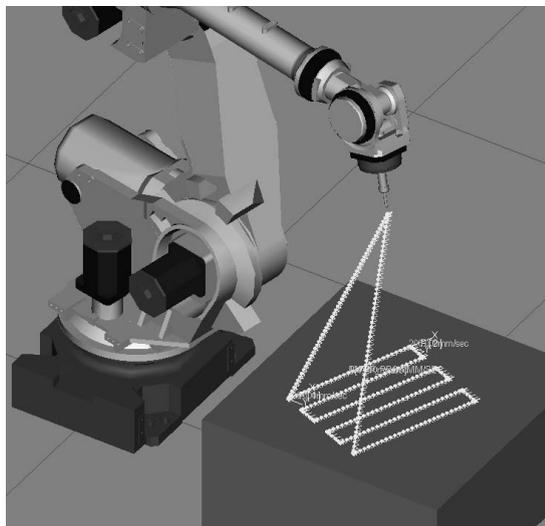
*Figure 9. process of cladding flat surface*

W podobny sposób dokonano weryfikacji programu pod robota FANUC. Wykorzystano dedykowane środowisko wirtualne firmy FANUC – oprogramowanie Roboguide. Pracę z programem zaczęto od utworzenia nowej stacji roboczej wybierając m.in. rodzaj robota, urządzenia dodatkowe, opcje sterownika. Dla lepszej wizualizacji dodano prostopadłościenny obiekt otoczenia, na którym zostanie przeprowadzona symulacja napawania. Do przeprowadzenia testu użyto wirtualnego iPendanta. Wprowadzono wymagane parametry procesu oraz zapisano pozycje początkowego oraz końcowego punktu pierwszej linii napawania.



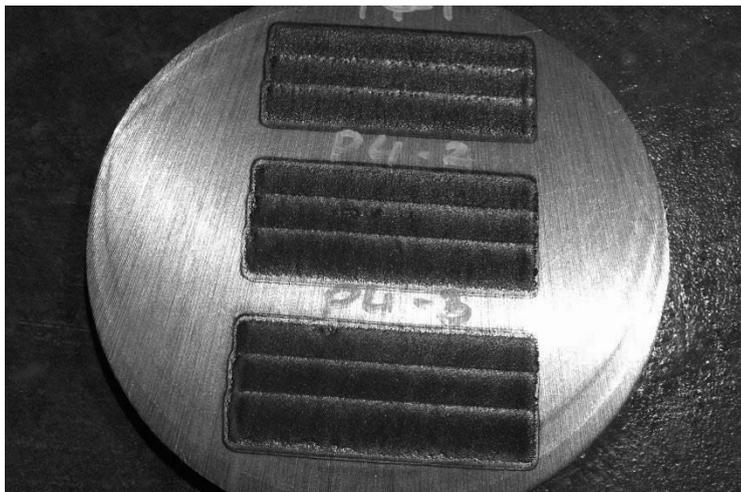
Rysunek 10. Widok stacji robotyzowanej oraz wirtualny panel iPendant  
 Figure 10. View of robotized stand and virtual iPendant

Pełna ścieżka przejazdu robota widoczna jest na rysunku 11. Oznaczony jest dojazd robota do punktu P1 z pozycji domowej, wykonanie 6 linii napawania, co zgadza się z wpisanymi wartościami parametrów oraz odjazd powrotny do pozycji domowej. Kształt powierzchni napawanej tworzy widoczny prostokąt, nie zauważono żadnych nieprawidłowości podczas przebiegu programu.



Rysunek 11. Tor ruchu robota po wykonaniu programu  
 Figure 11. Track of robot movements after program execution

Po pomyślnym przeprowadzeniu symulacji, przystąpiono do weryfikacji programu w rzeczywistym procesie napawania. Wytworzone napoiny spełniały przyjęte założenia, nie odnotowano także żadnych nieprawidłowości pracy programu. Wygląd wykonanych napoin przedstawia rysunek 12.

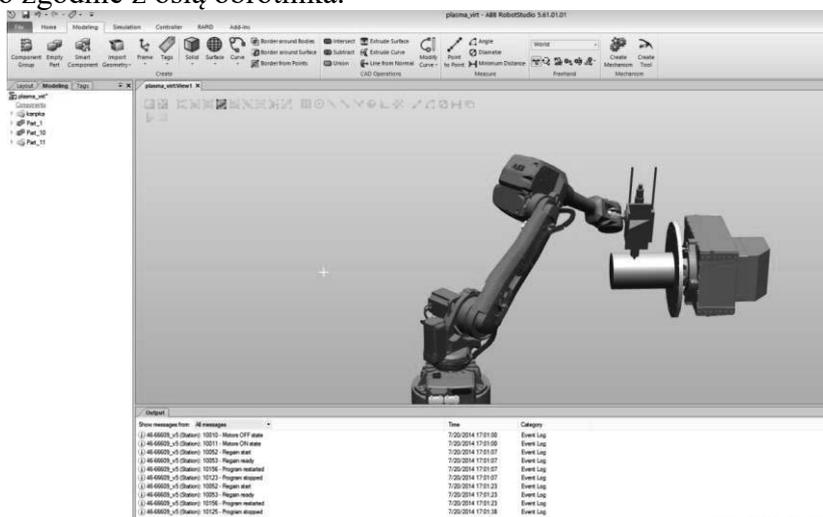


Rysunek 12. Widok napawanych powierzchni płaskich  
*Figure 12. View of cladded flat surfaces*

### 3.2. Program do napawania powierzchni cylindrycznych

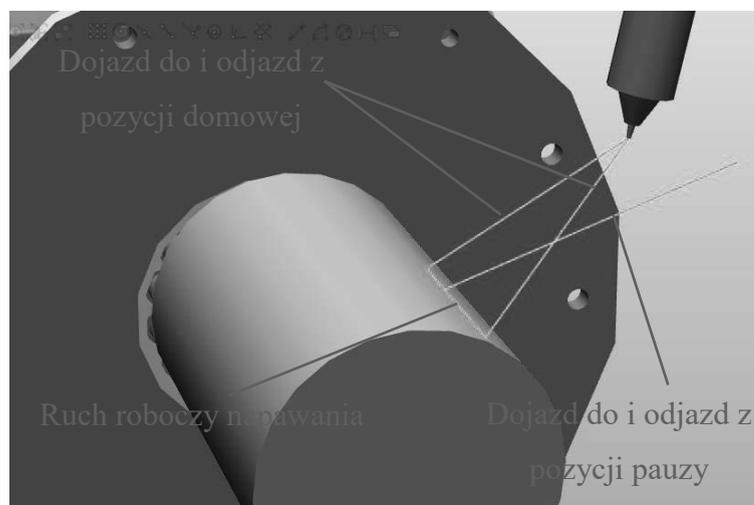
Podobnie jak w przypadku programu realizującego napawanie powierzchni płaskich, program został poddany dwustopniowej weryfikacji, w środowisku symulacyjnym oraz rzeczywistym.

W przypadku robota ABB, w programie RobotStudio użyto stacji roboczej wyposażonej w zaimportowane z bibliotek programu robota oraz obrotnik. Jako detal napawany przygotowano za pomocą opcji modelowania walec o średnicy 300 mm i długości 500 mm, następnie umieszczono go zgodnie z osią obrotnika.



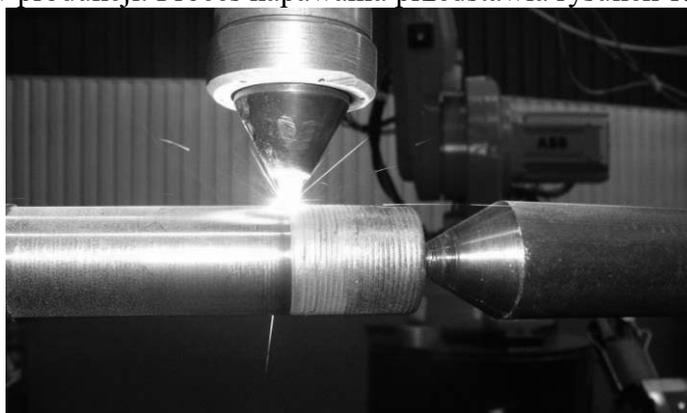
Rysunek 13. Stacja robocza do napawania powierzchni cylindrycznych (ABB)  
*Figure 13. Workstation for cylindrical surfaces cladding (ABB)*

Używając wirtualnego panelu kontrolnego FlexPendant zapisano pozycję domową robota, a na obwiedni detalu początkowy i końcowy punkt napawania. Z poziomu danych programu ustawiono parametry procesu. W trakcie przebiegu programu przetestowano także działanie funkcjonalności pauzy procesu ustawiając stan wysoki na wejściu cyfrowym odpowiedzialnym za aktywację pauzy. Wyświetlona została informacja „...pauza programu...”, a robot odsunął się od detalu w zaplanowanym kierunku. Po dojechaniu do pozycji odsunięcia wyświetlone zostało okno z pytaniem o kontynuację procesu, po potwierdzeniu robot powrócił do pozycji przerywania i kontynuował proces. Trajektorię ruchu głowicy laserowej wraz z wykonaną pauzą przedstawia rysunek 14.



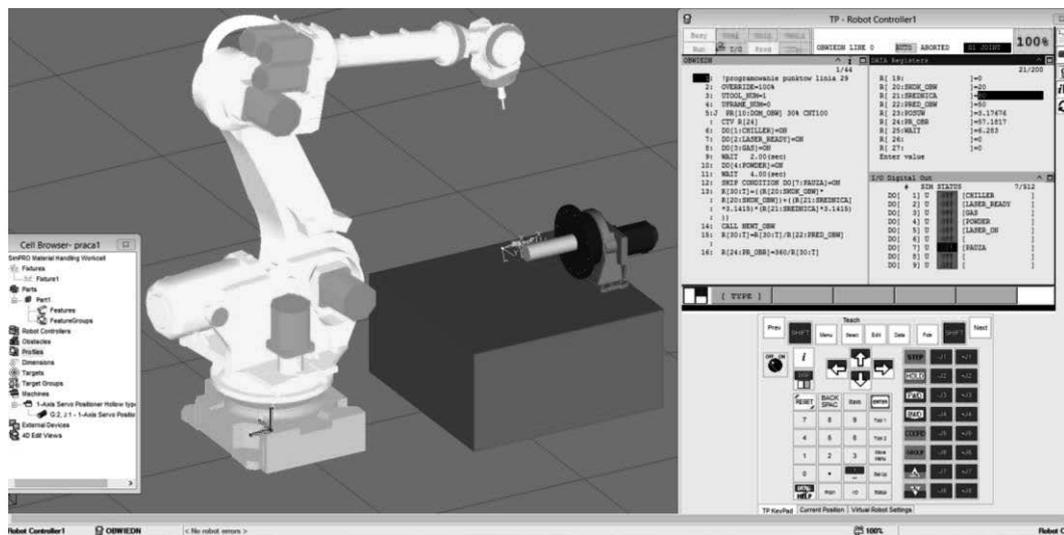
Rysunek 14. Tor ruchu robota po wykonaniu programu  
*Figure 14. Track of robot movements after program execution*

Zadana trajektoria została prawidłowo odwzorowana, funkcje powtarzania procesu oraz pauzy działały prawidłowo. Podczas sprawdzenia stanu wejść/wyjść oraz kolejności wykonywania instrukcji programu nie wykryto żadnych nieprawidłowości. Weryfikację symulacyjną uznano za zakończoną powodzeniem. Po pomyślnym sprawdzeniu programu w środowisku komputerowym została przeprowadzona próba na rzeczywistym stanowisku zrobotyzowanym. Tutaj także nie odnotowano żadnych nieprawidłowości, program można zatem uznać za możliwy do użycia w produkcji. Proces napawania przedstawia rysunek 15.



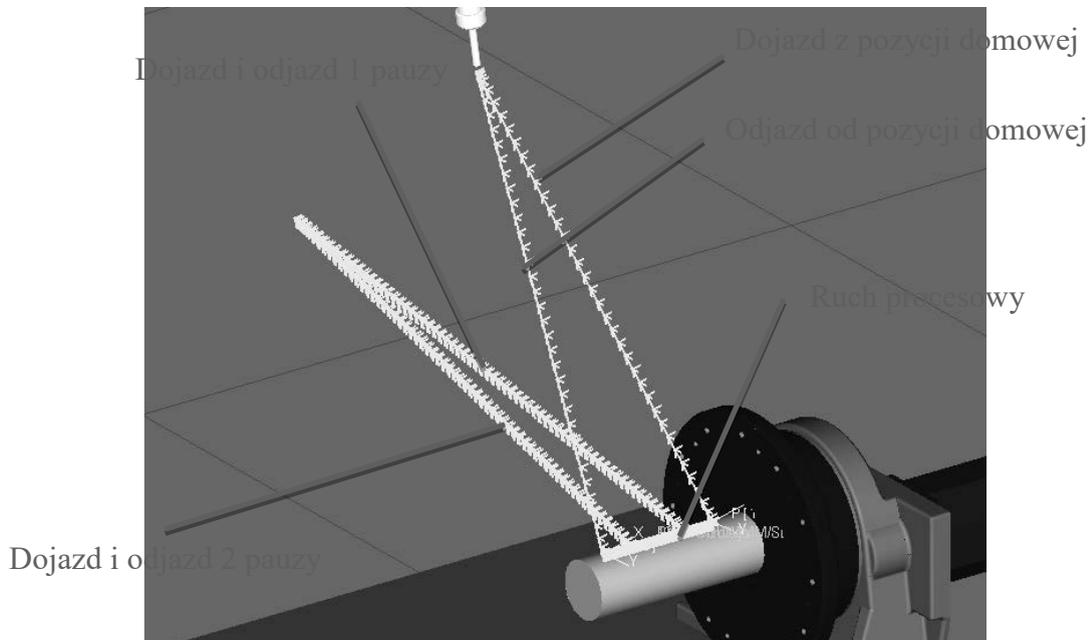
Rysunek 15. Proces napawania powierzchni cylindrycznej  
*Figure 15. Process of cladding cylindrical surface*

Następnie przystąpiono do weryfikacji programu pod robota FANUC. Do symulacji użyto stacji roboczej utworzonej w programie RoboGuide na potrzeby programu do napawania powierzchni płaskich. Dodano do niej jednoosiowy obrotnik skonfigurowany jako druga grupa robocza i związano z nim detal cylindryczny o średnicy 80 mm i długości 250 mm. Zapisano odpowiednie pozycje robota, w rejestrach wpisano wartości wymaganych parametrów. Wygląd przygotowanej stacji roboczej przedstawiono na rysunku 16.



Rysunek 16. Stacja robocza do napawania powierzchni cylindrycznych (FANUC)  
 Figure 16. Workstation for cylindrical surfaces cladding (FANUC)

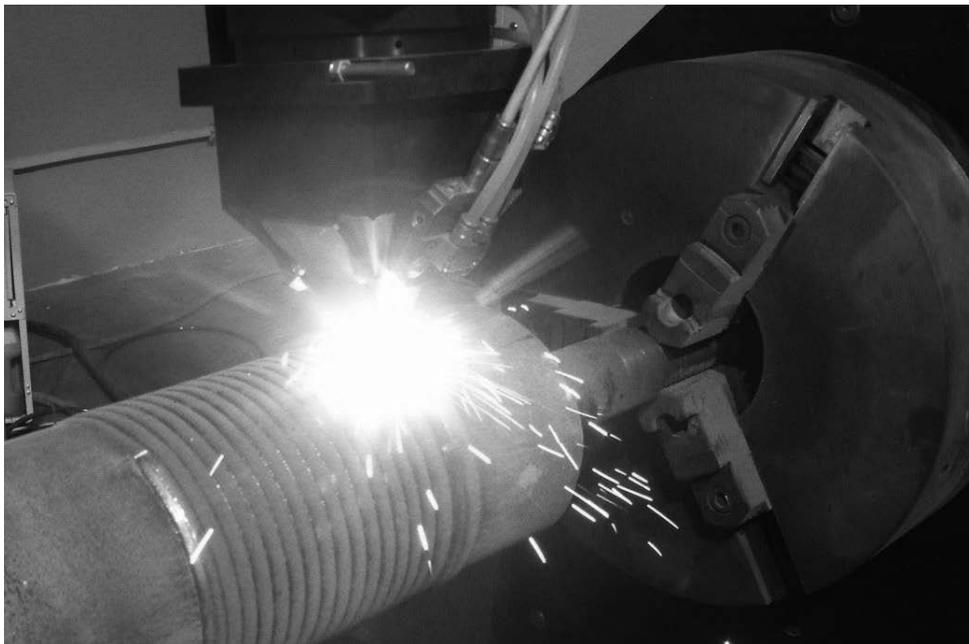
W trakcie przebiegu symulacji ustawiono stan wysoki na wyjściu cyfrowym odpowiedzialnym za aktywację paury. Robot w odpowiedzi zatrzymał ruch, sygnały sterujące włączaniem lasera i podawania proszku metalicznego zostały wyłączone, następnie robot odjechał do zdefiniowanej pozycji paury i zatrzymał się w niej oczekując na zwolnienie sygnału paury. Po ustawieniu na wyjściu sygnału niskiego, robot powrócił do miejsca przerwania ruchu i rozpoczął jego kontynuację. Sygnały włączające podawanie proszku oraz laser zostały uaktywnione. Pełną trajektorię procesu wraz z dwiema procedurami paury przedstawiono na rysunku 17.



Rysunek 17. Tor ruchu robota po wykonaniu programu

*Figure 17. Track of robot movements after program execution*

Po pomyślnym przejściu testów symulacyjnych przeprowadzono weryfikację na rzeczywistym stanowisku. Podczas przebiegu procesu nie zauważono żadnych nieprawidłowości, napoina spełniała stawiane wymagania, zatem program można uznać za sprawny i dopuścić do użycia w produkcji. Rysunek 18 przedstawia proces napawania.



Rysunek 18. Proces napawania powierzchni cylindrycznej

*Figure 18. Process of cladding cylindrical surface*

#### 4. PODSUMOWANIE

Robotyzacja dobrze sprawdza się w procesie napawania, umożliwiając utrzymanie stałych parametrów geometrycznych oraz ruchowych, jednocześnie zachowując duże możliwości dopasowania końcówki roboczej narzędzia do otoczenia, pozwalając na uzyskanie wysokiej jakości oraz dokładności procesów.

Jako że jedną z najważniejszych zalet robotów jest ich elastyczność zależna od możliwości przeprogramowania robota, a program robota warunkuje złożoność zadań, jakie jest on w stanie wykonać, programowanie jest bardzo istotną kwestią w dziedzinie robotyzacji. Zwykle najlepsze efekty daje programowanie hybrydowe – połączenie oszczędności czasu robota właściwe programowaniu offline, z charakterystyczną dla programowania online łatwością i wygodą doboru odpowiednich punktów w przestrzeni. Wyznaczenie punktów trajektorii robota metodą online charakteryzuje się też odniesieniem do rzeczywistego detalu, a nie jego, często wyidealizowanego, modelu matematycznego.

Przy pracy z robotami bardzo istotna jest kwestia bezpieczeństwa. Z tego powodu testowanie nowych programów powinno przebiegać kilkustopniowo, najlepiej najpierw w środowisku symulacyjnym, następnie w trybie ręcznym krokowym z ograniczoną prędkością, trybie ręcznym z ograniczoną prędkością, trybie ręcznym z pełną prędkością, i na koniec w trybie automatycznym. Symulacja komputerowa programu robota jest bardzo przydatnym narzędziem, dając możliwość testowania bez konsekwencji właściwych dla rzeczywistego świata, gdzie błąd programu może doprowadzić do uszkodzeń drogiego sprzętu lub znajdujących się w pobliżu osób. Oprócz zlikwidowania ryzyka pozwala też ona na zminimalizowanie czasu, jaki testowanie zabiera na rzeczywistym stanowisku – a w produkcji każde zatrzymanie procesu produkcyjnego oznacza straty.

Procedury umożliwiające przerwanie wykonywania programu, a po otrzymaniu ustalonego sygnału, jego kontynuację od miejsca przerwania są przydatnym narzędziem, pozwalającym na korekcję drobnych usterek bez konieczności użycia stopu awaryjnego i szybkie wznowienie procesu bez angażowania programisty.

Zarówno ABB, jak i FANUC są firmami z dużym doświadczeniem w robotyce, z punktu widzenia programisty pomiędzy oferowanymi przez nich produktami można znaleźć wiele podobieństw, jednak da się zauważyć pewne różnice: stosowany język jest w przypadku języka TP robotów FANUC prostszy do opanowania, jednak ma znacznie mniejsze możliwości, stosowany w ABB RAPID po nabraniu w nim pewnej biegłości staje się też wygodniejszy w użyciu. Funkcję języka o większych możliwościach spełnia w przypadku firmy FANUC język KAREL, nie wchodzi on jednak w skład oprogramowania podstawowego; brak pewnych podstawowych funkcji matematycznych w podstawowej wersji języka TP prowadzi do utrudnień – np. konieczności stworzenia nowego podprogramu w celu obliczenia pierwiastka kwadratowego. Funkcje te można uzyskać, jednak wymagane jest wykupienie dodatkowego modułu; ABB oferuje spore możliwości komunikacji z użytkownikiem za pośrednictwem ekranu panelu programowania, język TP natomiast posiada jedynie komendę wyświetlenia wiadomości, nie ma w nim instrukcji pobierania danych od użytkownika; sposób reprezentacji orientacji końcówki roboczej w przypadku robotów FANUC daje większą łatwość szybkiej edycji – stosowane są tu kąty podawane w stopniach, podczas gdy w przypadku robotów ABB są to kwaterniony, modyfikacja wymaga więc dłuższych obliczeń lub zastosowanie odpowiednich funkcji w programie; konstrukcja FlexPendants firmy ABB charakteryzuje się większą ergonomią niż iPendants firmy FANUC, ciężar panelu spoczywa na przedramieniu, natomiast środek ciężkości iPendantsa położony jest w pewnym odsunięciu od ręki, co

powoduje obciążenie nadgarstka odczuwalne przy dłuższej pracy; w dedykowanym oprogramowaniu obu firm znajdują się dobrze rozwinięte możliwości modelowania stacji zrobotyzowanych, generowania punktów i ścieżek na podstawie geometrii CAD, a także wykonywania symulacji pracy. Przy opisanych w pracy zastosowaniach, tworzeniu programów sparametryzowanych i bardziej złożonych, uwidacznia się jednak brak w oprogramowaniu RoboGuide firmy FANUC tekstowego edytora kodu programu. Rozwiązanie takie obecne w oprogramowaniu RobotStudio firmy ABB przyspiesza i ułatwia tworzenie tego typu programów.

## LITERATURA

1. Kost G. : Podstawy budowy robotów. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice 1996.
2. Zdanowicz R. : Robotyzacja dyskretnych procesów produkcyjnych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice 2009.
3. [www.robotyka.com](http://www.robotyka.com)
4. Praca zbiorowa pod redakcją Gabriela Kosta, Jerzego Świdra : Programowanie robotów on-line. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice 2008.
5. Jardzioch A. : Instrukcja komputerowego symulatora wspomagającego programowanie robota KUKA KR 125. Szczecin 2006
6. Pomoc wbudowana programu RobotStudio.
7. ABB Robotics Technical reference manual, RAPID Instructions, Functions and Data types.
8. Sanetra R., Programowanie robotów przemysłowych do zadań napawania laserowego, Praca magisterska, Instytut Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania, Gliwice, 2014.
9. Pomoc wbudowana programu RoboGuide.



## Polymérne kompozitné materiály vystužené vláknami

L. Šikyňa<sup>a</sup>, R. Baš'ovanský<sup>b</sup>, L. Kuchariková<sup>a</sup>, E. Tillová<sup>a</sup>, M. Bonek<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra materialového inžinierstva, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovak Republic, email: sikyna53@stud.uniza.sk

<sup>b</sup> Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra konštruovania a častí strojov, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovak Republic

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

**Abstrakt:** Práca sa zaoberá polymérnymi kompozitnými materiálmi vystuženými vláknami. Bližšie popisuje základné poznatky o matrici, výstuži a výrobných postupoch kompozitných materiálov. Zámerom práce je vytvoriť stručný prehľad o ich rozdeľovaní a vlastnostiach, s cieľom uviesť hlavné oblasti aplikácie týchto materiálov.

**Kľúčové slová:** kompozitné materiály, matrica, výstuž.

### 1. Úvod

Kompozitné materiály je pojem, ktorý začal v strojárstve rezonovať pred niekoľkými desaťročiami. Základy kompozitných materiálov v strojárstve prišli začiatkom dvadsiateho storočia spojením fenolickej živice a drevenej múčky, ktorá tvorila výstuž. Veľký rozmach v stavebnom priemysle spôsobil najznámejší kompozit – železobetón pozostávajúci z oceľových výstuží a betónu [1-2].

Od jednoduchých použití si kompozity našli svoje miesto na trhu v rôznych oblastiach priemyslu. Dnes sa využívajú v automobilovom, dopravnom alebo stavebnom priemysle, v medicíne a v mnohých iných oblastiach priemyslu. Príčin pre zvyšovanie výroby takýchto materiálov stále pribúda. Rad požiadaviek kladených na materiály v súčasnosti stále rastie. Či už sa jedná o mechanické vlastnosti, spôsoby namáhania, konštrukciu alebo tvar výrobku. Veľakrát si tieto požiadavky navzájom odporujú a sú takmer nedosiahnuteľné pre rovnorodý materiál. Pre splnenie takýchto kritérií výrobcovia často ukrátiť zákazníka o životnosť súčiastky, prípadne musia zmeniť celý technologický proces výroby. Preto čoraz častejšie siahajú po kompozitných materiáloch, ktoré sú schopné čeliť požiadavkám a ďaleko prevyšujú schopnosti homogénnych materiálov. Dôvody uprednostňovania kompozitných materiálov sú napr. nízka hmotnosť, lepšia pevnosť a tuhosť, odolnosť voči korózii výborné tlmiace vlastnosti a iné. Na druhej strane veľkou nevýhodou je ich vysoká obstarávacia cena [1-2].

Kompozity vznikli fyzickou kombináciou dvoch alebo viacerých zložiek s podstatne odlišnými vlastnosťami. Výsledkom takejto kombinácie je kompozit - materiál s výrazne lepšími vlastnosťami. Súčasti, ktoré tvoria kompozitný materiál sú zväčša dve - matrica a výstuž. Základná hmota alebo matrica predstavuje menej pevný materiál. Je dôležitá najmä pre zachovanie geometrického tvaru produktu, tvorí výplň a ochranu vlákien pred vonkajšími vplyvmi. Výstuž, ktorá tvorí pevnejšiu časť materiálu, môže byť vo forme vlákna alebo disperzných častíc. Funkciou výstuže je prenos hlavných zaťažení a zabezpečenie tuhosti a pevnosti výsledného produktu [1-2].

## 2. Polymérne kompozitné materiály vystužené vláknami

Tvoria najväčšiu a významnú skupinu kompozitných materiálov. Všeobecne môžeme povedať, že sú to plasty, ktorých výstuž tvoria vlákna (obr. 1). Všeobecne sa rozdeľujú podľa [3]:

### 1. Druhu matrice:

- reaktoplasty,
- termoplasty.

### 2. Druhu výstuže:

- sklené vlákna,
- aramidové vlákna,
- uhlíkové vlákna,
- bórové vlákna.



Obrázok 1. Profily vyrobené z kompozitných materiálov [4]

*Figure 1. Profiles made of composite materials [4]*

Následne sa delia aj podľa dĺžky vlákien na dve základné skupiny [3]:

- materiály vystužené krátkymi vláknami (platí pomer dĺžka/priemer  $L/D < 100$ ),
- materiály vystužené dlhými vláknami ( $L/D > 100$ ; vlákna v týchto materiáloch majú dĺžku rovnú rozmerom celého dielca.

Celosvetovo sa najviac používajú ako výstuž sklenené vlákna (65 %), ďalej uhlíkové vlákna (18 %) a ostatné vlákna - aramidové, borové a rôzne iné tvoria približne (17 %). Najväčšie uplatnenie týchto kompozitov je v posledných rokoch v automobilovom priemysle (40 %), ďalej sú to stavebné konštrukcie (25 %), elektronika (15 %), letectvo a astronautika (10 %). Ich použitie v priemysle každoročne stúpa hlavne vďaka ich vlastnostiam, ako pevnosť, tuhosť, nízka hmotnosť, odolnosť voči korózií a pod. ktoré sú oveľa lepšie, ako u bežných konštrukčných materiálov. Cena sa pohybuje od niekoľkých EUR až po niekoľko stoviek až tisíc EUR len za kilogram vlákna. Napr. cena sklenených vlákien sa pohybuje okolo 2 - 3 € za kilogram, aramidové vlákna 20 - 30 € za kilogram, borové vlákna 350 € za kilogram a u niektorých druhov uhlíkových vlákien je to až 1 000 € za kilogram [5-7].

## 2.1. Reaktoplasty

S reaktoplastami (tab. 1) vieme pracovať len istú dobu po ich zohriatí. Vtedy sú tvarovateľné a tavitelné. Pri ďalšom zahrievaní nastáva jav, kedy sa molekuly v materiáli zosieťujú a to spôsobí, že materiál sa stáva netaviteľný a nerozpustný. Takáto chemická reakcia môže byť vyvolaná okrem zahrievania aj katalyzátorom. Výsledkom takejto reakcie je nová zosieťovaná štruktúra. Celý tento proces sa nazýva vytvrdzovanie. Je to nevratný dej, čo znamená, že výsledný materiál vo vytvrdnutej forme nie je možné znovu tvarovať a taviť [8, 9].

Tabuľka 1. Vybrané reaktoplasty ich polyreakcia a stavba [9]

Table 1. Selected thermosets their polyreaction and construction [9]

Reaktoplast	Skratka	Polyreakcia	Stavba
nenasýtený polyester (polyesterová živica)	UP	polymerizácia	amorfná
epoxidová živica	EP	polyadícia	amorfná
fenolformaldehydová živica	PF	polykondenzácia	amorfná

Polyesterové živice - sú charakterizované ako nenasýtené polyestry rozpustené v reaktívnom monoméri (obr. 2). Vytvrdenie živice u polyesterov nastáva pri polymerizácii pomocou rôznych urýchľovačov a iniciátorov reakcií [8].



Obrázok 2 Polyesterová živica v kombinácii so sklenenými vláknami [11]

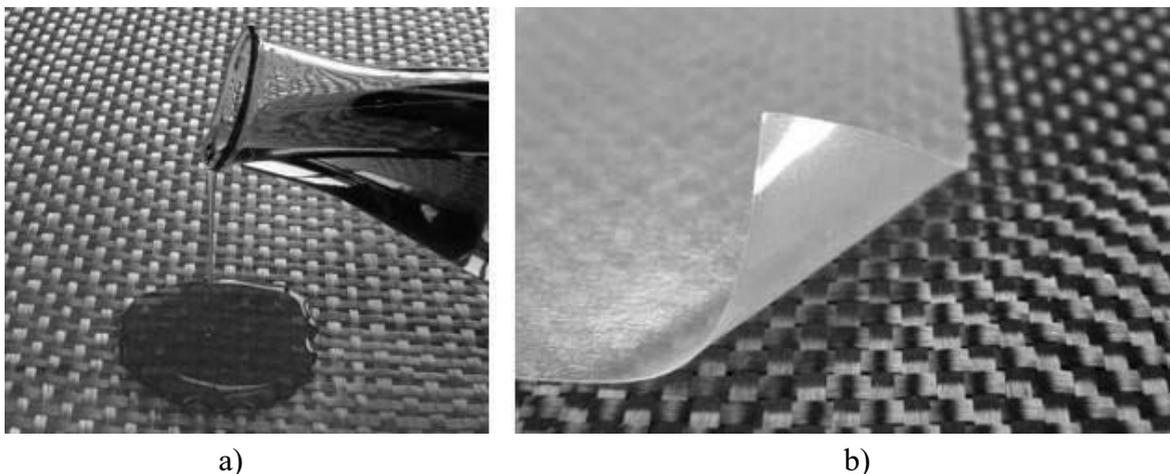
Figure 2. Polyester resin in combination with glass fibers [11]

Do týchto živíc sa zvyknú pridávať rôzne aditíva za účelom ovplyvnenia ich vlastností. Najčastejšími aditívami sú kyseliny. Tieto prísady, okrem toho, že zlepšujú vlastnosti živíc, sa

používajú ako objemové plnivo, a tak zrážajú cenu materiálov. Polyesterové živice, podobne ako aj iné reaktoplasty, sú odolné voči chemikáliám, vode, zvetrávaniu a sú pomerne lacné. Ich nevýhodou je, že po vytvrdení dosahujú nežiadúce hodnoty zmraštenia 4 % až 8 %. Tento problém je u polyesterových živíc ľahko riešiteľný pridaním plnív a aditív, ktoré dokážu zraziť zmraštenie na 0,15 % a 0,3 % [1, 10].

V technickej praxi tvoria výrobky vystužené sklenenými vláknami tzv. sklolamináty. Tie sa používajú na strešné krytiny, lode atď. [8], (obr. 2).

Epoxidové živice - sú látky, ktoré vo svojich reťazcoch obsahujú väčšinou viac ako jednu epoxidovú skupinu. Sú to bezfarebné materiály, ktorých konzistencia je kvapalinová až tvrdá. Výhodou epoxidových živíc je vysoká priľnavosť k väčšine ostatných materiálov, chemická odolnosť a na rozdiel od polyesterovej živice, aj minimálne zmraštenie pri vytvrdzovaní [8]. U epoxidových živíc sa predtým, ako je vytvorená zosieťovaná štruktúra, stretáme s pojmom medzifáza. Je to stav živice využívaný na výrobu polotovarov, ktorým hovoríme "prepreg". Jedná sa o tkaninu (vlákna) napustenú živicom, s ktorou môžeme pracovať ďalej ako s polotovarom. Závisí to od pridaných činidiel [10]. Sú odolné voči kyselinám, voči vlhku a disponujú aj antikoroznými účinkami. Považujeme ich za najvyššiu triedu živíc, ktorá sa využíva pri konštruovaní monopostov F1, pri stavbe lietadiel Boeing, na stavbu profesionálnych bicyklových rámov a pod. Okrem toho sa využívajú aj v rozličných oblastiach priemyslu či už je to v potravinárstve, zdravotníctve, stavebný priemysel alebo spracovanie odpadových hmôt [2, 8]. Epoxidové živice sa v praxi väčšinou používajú vo svojej tekutej forme, ale existujú aj fólie z epoxidových živíc (obr. 3).



Obrázok 3. Epoxidová živica: a) v tekutej forme, b) vo forme fólie [8]

Figure 3. Epoxy resin: a) in liquid form, b) in film form [8]

Fenolformaldehydové živice - vznikajú pri polykondenzácií fenolov a aldehydov. Tieto živice sa upravujú na lisovacie hmoty, ktorých teplota topenia je 70 - 105 °C. Vytvrdzujú sa pomocou tvrdidiel a za zvýšenej teploty. Bez aditív majú fenolické živice vlastnosti termoplastov. Používajú sa s rôznymi typmi plnív napr.: drevená múčka, bridlicová múčka, grafit, kaolín a rôzne iné. Sú veľmi odolné voči kyselinám a vyznačujú sa aj tepelnou odolnosťou. Používajú sa na lisované výrobky, lamináty, tvrdé povlaky, tmely, lepidlá a rôzne iné výrobky. Ich významné využitie je pri výrobe brúsnych kotúčov a pri výrobe zlievarenských pieskových foriem. Výrobky by sa nemali nikdy kombinovať a používať

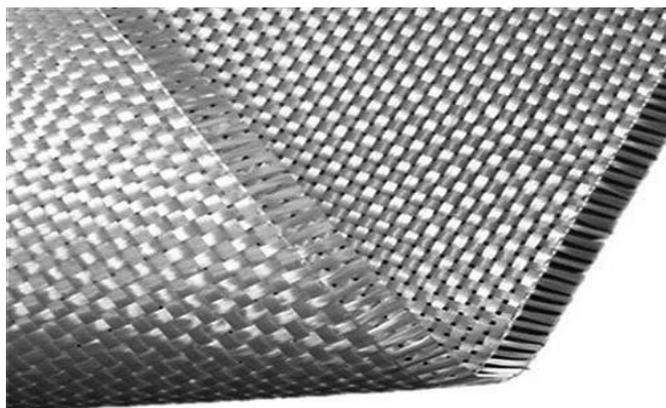
s potravinami, nakoľko aj vytvrdnutý materiál obsahuje stopy fenolu, ktorý je zdraviu nebezpečný [8, 9].

## 2.2 Termoplasty

Termoplasty sú materiály, ktoré pri ohreve ľahko mäknú. Tento prechod do plastického stavu nastáva kvôli tomu, že termoplasty zvyčajne obsahujú lineárne makromolekuly [9]. Pri ohreve nad teplotu topenia prejde termoplast do stavu taveniny. Po ochladení pod teplotu topenia sa opäť dostane do tuhého stavu. Takýto proces topenia a tuhnutia je vratný. Pri ohreve sa nemení chemická štruktúra. Zmeny, ktorými materiál prejde majú fyzikálny charakter [8]. U termoplastov častokrát prichádza riziko zhoršenia ich vlastností. Je to spôsobené tým, že ich môžeme opätovne spracovať. Najčastejšie to býva zhoršenie odolnosti voči nárazu. Na rozdiel od reaktoplastov sa termoplasty dajú ľahšie recyklovať a sú tak priaznivejšie pre životné prostredie [10].

## 2.3 Sklené vlákna

Majú amorfné zloženie a v polymérnych kompozitoch sú najčastejším druhom výstuže. Ich výroba je pomerne jednoduchá a spočíva v prúdení roztaveného skla cez malé otvory v lisovacích strojoch. Vďaka tomu patria sklené vlákna (obr. 4) k lacnejším na trhu [12,13]. Na výstuže sa používajú dva najznámejšie typy sklenených vlákien. Prvým z nich je tzv. E-sklo, ktoré predstavuje borosilikátové sklo. E-sklo obsahuje  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  a  $\text{MgO}$ . Zvykne sa používať v elektrotechnickom priemysle ale aj pri stavbe lodí, lietadiel, automobilov a športových potrieb. Nevýhodou je nízky modul pružnosti. Druhým typom sklenených vlákien je S-sklo, ktoré sa vyznačuje vysokou pevnosťou v ťahu. Obsahuje podiel  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{MgO}$ . Podobne ako E-sklo sa používa v rôznych oblastiach priemyslu. S-sklo má však lepšie mechanické vlastnosti a je drahšie [13,14].



Obrázok 4. Tkanina zo sklenených vlákien [15]

Figure 4. Glass fiber fabric [15]

Pri spracovaní sklenených vlákien a ich následnému spájaniu do pramencov dochádza k poškodzovaniu medzi vláknami, čo znižuje ich pevnosť až o 50 %. Dopomáha tomu aj absorbovanie vzdušnej vlhkosti pri výrobe. Keďže pevnosť v ťahu je závislá na povrchom stave je potrebné vlákna pri výrobe ošetriť povlakmi ešte predtým, ako sa spoja do pramencov. Vlákna určené pre kompozitné diely sa ošetrujú tzv. väzobnými prostriedkami. Na vlákna typu

E-sklo sú nanášané organické silany a na S-sklo vlákna sú aplikované špeciálne povlaky na báze epoxidových živíc [7,13].

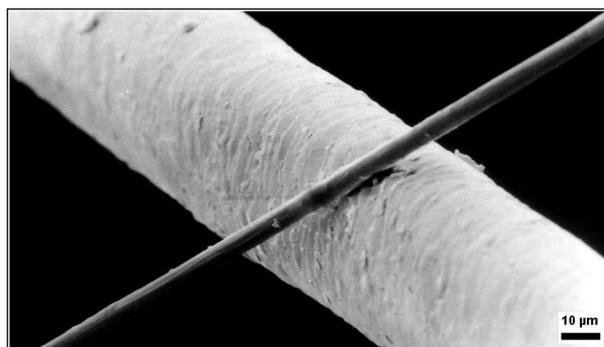
## 2.4 Aramidové vlákna

Toto označenie vzniklo spojením pojmov aromatický polyamid. Sú zložené z polyamidov s dlhým uhl'ovodíkovým reťazcom, z ktorého aspoň 85 % peptidových väzieb musí byť spojených s dvoma aromatickými jadrami [16].

Aramidové vlákna majú vynikajúce vlastnosti, medzi ktoré patria napr.: odolnosť voči chemikáliám, teplu a vysoká pevnosť. Na druhej strane majú slabú odolnosť voči ultrafialovému svetlu, vlhku a zle sa zafarbujú. Najznámejším druhom vlákien sa stal kevlar. Tento názov predstavuje obchodnú značku para-aramidového vlákna, ktoré v roku 1965 objavila Stephanie Kwoleková vo firme DuPont [7, 17]. Často používané druhy sú kevlar 29 a kevlar 49, okrem nich existujú aj mnohé iné typy. Kevlar 29 predstavuje pôvodnú skupinu produktov typu kevlar. Používa sa v armádnom priemysle a vojenskej technike, na balistické aplikácie v ochranných odevoch ako napr. prilby, rukavice a nepriestrelné vesty. Okrem armádneho priemyslu sa Kevlar používa pri výrobe automobilových kombinéz, lán a káblov, používa sa aj ako gumová výstuž v pneumatikách. Široké uplatnenie je najmä vďaka už spomínaným vlastnostiam aj nízkej hmotnosti. Kevlar 49 sa používa zvyčajne v optických kábloch a lanách, ale značne sa využíva aj pri stavbe lodí a v leteckom priemysle. Je vhodný materiál pre stavbu lodí a lietadiel hlavne vďaka nízkej váhe a odolnosti voči namáhaniu v krute, v ťahu a nárazom [18,19].

## 2.5 Uhlíkové vlákna

Do tejto skupiny patria vlákna, ktoré obsahujú uhlík v rôznych modifikáciách. Takéto dlhé a tenké vlákna sú zložené vo väčšine z atómov uhlíka, ktoré sú pospájané do mikroskopických kryštálov. Aromatické roviny vo vlákne sú usporiadané v pozdĺžnom smere osi vlákna. Usporiadanie do kryštálov spôsobuje, že vlákno je vzhľadom na svoju hrúbku mimoriadne pevné. Toto usporiadanie aromatických rovín (aromatické roviny sú bazálne roviny šesťuholníkovej mriežky), ale aj obsah defektov vnútorných kryštálov a ich dokonalosť ovplyvňuje vlastnosti vlákna. Priemer uhlíkových vlákien sa pohybuje od 4 - 8  $\mu\text{m}$ . Na obr. 5 si môžeme všimnúť porovnanie uhlíkového vlákna (6  $\mu\text{m}$ ) a ľudského vlasu (50  $\mu\text{m}$ ) [13, 20]. V súčasnej dobe je približne 90 % uhlíkových vlákien vyrábaných z polyakrylonitrilu (PAN), zvyšných 10 % sa vyrába z umelého hodvábu alebo z ropných produktov [21].



Obrázok 5. Porovnanie hrúbky uhlíkového vlákna s ľudským vlasom [20]  
 Figure 5. Comparison of carbon fiber thickness with human hair [20]

Využitie uhlíkových vlákien je veľmi široké, no väčšina z nich sa využíva ako výstuž kompozitných materiálov. Ich uplatnenie je rôznorodé a pokrývajú takmer všetky oblasti priemyslu. Uhlíkové vlákna s oblúhou využívajú výrobcovia športových áut. Nízka hmotnosť v kombinácii s výbornými mechanickými vlastnosťami predstavuje ideálne spojenie pre športový automobil [22]. V leteckom priemysle sa používajú na výrobu krídel a trupov lietadiel. Uplatňujú sa aj v oblasti športu na výrobu golfových palíc, člnov a iných športových potrieb. Okrem toho sa s nimi stretáme aj v stavebnom či vojenskom priemysle. Podstatnú úlohu majú uhlíkové vlákna aj pri výrobe veterných generátorov, kde sa používajú na výrobu rotorov. Zvyknú sa používať všade tam, kde sklenená výstuž nedisponuje požadovanou tvrdosťou aj za účelom zníženia hmotnosti [13, 23].

## 2.6 Borové vlákna

Vznikajú tak, že v reaktore, ktorý je ohriaty na vysokú teplotu prechádza tenké volfrámové vlákno. Do priestoru tohto reaktora je privedená zmes plynov vodík a chlorid boritý. Vodík redukuje chlorid boritý za vzniku elementárneho bóru na povrchu volfrámového substrátu o priemere 10  $\mu\text{m}$ . Výsledný priemer vlákien je od 0,1 do 0,2  $\mu\text{m}$ . Hlavnou výsadou u bórových vlákien je ich príľnavosť k matrici. Na druhej strane ich nevýhodou je nízka merná pevnosť. Tieto vlákna sa nedajú ohýbať. Používajú sa pri plošných konštrukciách a tam, kde je vyžadovaná vysoká tuhosť [14, 24].

## 3. Technológia výroby kompozitných materiálov s reaktoplastickou - polymérou matricou

Kompozitné materiály sa oproti konvenčným vyznačujú širokým spektrom možností spracovania. Výrobné technológie kompozitov sa rozdeľujú podľa materiálu matrice. V súčasnej dobe je veľmi veľa druhov výroby kompozitných materiálov. Do popredia sa dostávajú automatizované spôsoby výroby, kde je fyzicky vplyv a zásah človeka minimálny [1].

U kompozitných materiálov s reaktoplastickou matricou sa používa mnoho metód výroby, čo zároveň umožňuje aj výrobu dielov so zložitými tvarmi. Polyesterové živice sa vytvrdzujú tým rýchlejšie, čím viac iniciátora pridáme. Čas vytvrdenia sa môže ovplyvniť teplotou. Veľmi dôležitým faktorom pri výbere živíc je pomer medzi tvrdidlom a samotnou živicom. Toto platí zvlášť pri epoxidových živiciach, kde nepomer týchto substancií môže viesť k zhoršeniu mechanických vlastností [1].

### 3.1 Ručné kladenie za mokra

Patrí medzi najjednoduchšie technológie a vzťahuje sa výlučne na kompozity s polymérou matricou. Forma, ktorá sa pri tejto technológii používa, sa zvykne najprv ošetriť gelcoatom (obr. 6). Gelcoat predstavuje tenkú vrstvu (0,3 - 1 mm), ktorá má za úlohu zaistiť jednak estetickosť povrchu vyrábaného dielca a taktiež tvorí ochrannú vrstvu pred rôznymi vplyvmi okolia. Nanáša sa alebo ručne, alebo striekacou pištoľou. Po tom, ako gelcoat čiastočne vytvrdne, začína sa proces kladenia jednotlivých vrstiev výstuže. Živica presycuje výstuž a nanáša sa pomocou štetcov alebo valčekov. Nadbytočná živica spolu so vzduchovými bublinami sú vytláčané z formy pomocou ryhovaných valčekov alebo štetcov. Vytvrdzovanie prebieha za normálnej teploty a väčšinou bez toho, aby bol vyvíjaný tlak. Pri vytváraní tzv.

sendvičových konštrukcií sa používa pod separačnou fóliou prítlačná vákuová sila. Pre túto technológiu sa používajú rôzne druhy výstuží a matric. Ako výstuž sa zvyknú používať sklenené, uhlíkové, aramidové vlákna. Okrem nich aj rôzne iné syntetické alebo prírodné vlákna v rôznych formách a s rôznou orientáciou vlákien. Dva najčastejšie druhy matric sú polyesterová a epoxidová. Typ matrice, lepidiel a iniciátorov je treba voliť podľa požiadaviek na pevnosť, chemickej alebo teplotnej odolnosti, podľa toho, aká je doba spracovania vo výrobe a pod. Voľba matrice vždy závisí na konečnom využití výrobku. Tento proces ručného kladenia za mokra je široko využívaný v námornom priemysle, kde sa spájajú hlavne polyesterové živice so sklenenými vláknami. Náklady na výrobu touto metódou sú relatívne nízke, avšak náročné na pracovnú silu [25,26].



Obrázok 6. Schéma ručného kladenia za mokra [26]

Figure 6. Manual wet laying scheme [26]

### 3.2 Ručné kladenie prepregu

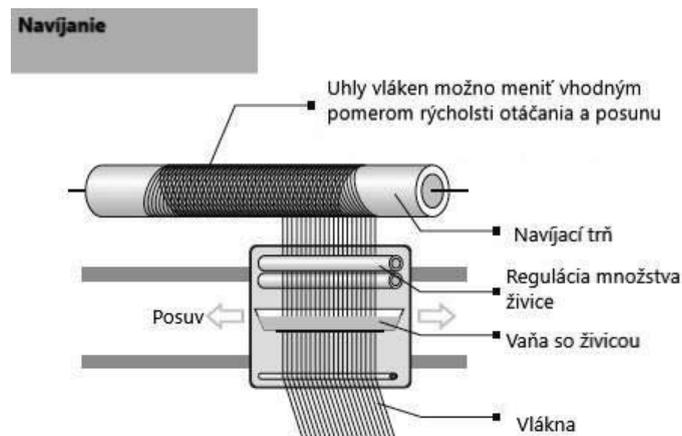
Táto technológia sa používa pri výrobe značne mechanicky zaťažovaných konštrukcií. Takéto kompozity je potrebné pripraviť tak, aby bolo nevyhnutné minimum živice udržiavané na konštantnej hodnote. Výhoda prepregov je, že prichádzajú ako polotovary od výrobcu. K finálnemu vytvrdeniu dôjde pomocou vákuového lisovania alebo v autokláve pri zvýšenej teplote a tlaku. Prepregy sú charakterizované ako polotovary určené na výrobu vláknových kompozitov. Ich hlavná zložka je predimpregnovaná výstuž a čiastočne vytvrdnutá matrica. Vyrábajú sa tak, že výstuž je ukladaná do impregnačnej látky s mierne lepkavou konzistenciou. Veľmi dôležité je, aby živica celkom nestuhla, a preto sa chladí na teplotu približne  $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Okrem technológie ručného kladenia sa prepregy používajú v mnohých ďalších typoch technológií napr.: strojové kladenie, navíjanie, pultrúzia a rôzne iné. Prepregy sa používajú všade tam, kde sú kladené vysoké nároky na mechanické vlastnosti. Uplatňujú sa v leteckom a kozmickom priemysle na výrobu rôznych častí lietadiel, ďalej v rozličných oblastiach športu a energetiky [13, 25, 27].

### 3.3 Navíjanie

Táto technológia spočíva v tom, že vláknová vystuž impregnovaná spojivom je navíjaná na jadro (trň - obr. 7), ktoré má tvar výrobku. Takýmto spôsobom je možné vytvárať duté telesá rôzne rúry, trubky, kolená, nádrže a podobne. Tento proces je riadený počítačovou technikou. Navíjaním je možné vytvárať pomerne zložité tvary. Ukladanie v rôznych osiach zabezpečuje rotácia trňa, pohyb ukladacieho ramena a poloha ukladacieho oka. V zariadení na impregnáciu



a navádzanie je výstuži dodané určité predpätie, ktoré zabezpečuje presné ukladanie na jadro. Vlákná je možné navíjať v rôznych uhloch ( $0^\circ - 90^\circ$ ). Navíjanie pod rôznymi uhlami je možné vďaka pomeru medzi rýchlosťou otáčania trňa a posuvom zariadenia na ukladanie. Táto technológia patrí medzi najprogressívnejšie metódy na výrobu dutých telies. Používa sa na výrobu rúr, potrubí, rámov na bicykle, tlakových nádob a rôznych iných dutých telies [25, 26].



Obrázok 7. Schéma navíjania [26]

Figure 7. Winding scheme [26]

### 3.4 Ostatné výrobné metódy

Medzi ostatné metódy patria automatizované výrobné technológie. Ich výhodou je, že sú oveľa rýchlejšie a odstraňujú ľudskú nepresnosť pri výrobe. K takýmto metódam môžeme radiť napríklad automatické ukladanie prepregu, pultrúzia, lisovanie, vysokotlakové vstrekovanie živice do formy s výstužou a rôzne iné metódy. Automatizované výrobné technológie nám zabezpečujú vyrábanie tvarovo zložitejších dielov [1].

### Záver

Práca poskytuje základné informácie o polymérnych kompozitoch vystužených vláknami. Informuje o ich základných vlastnostiach ako aj postupoch výroby. Vyrábanie kompozitných súčastí obsahujúcich termoplastickú maticu nie je veľmi rozšírené a je v rozsiahlom štádiu vývoja. Používané metódy sú pomerne drahé a zložité. Preto je dôležité poznať základné parametre výroby ako aj vlastnosti pre ďalšie vedecko-výskumné aktivity.

### Pod'akovanie

Článok bol riešený ako súčasť projektu KEGA 016ŽU-4/2020 s názvom „Zvýšenie kvality a inovácia vzdelávania v bakalárskych študijných programoch na SjF UNIZA“. Dielo vzniklo ako súčasť projektovo orientovaného vzdelávania - PBL, v súťaži V v rámci programu Iniciatíva excelentnosti – Politechnika Śląska, Gliwice.

### LITERATÚRA

1. W. Gottfried, Polymerní kompozitní materiály. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.

2. Kompozity-Všeobecné poznatky [online] [http://kmi2.uniza.sk/wpcontent/uploads/2020/01/8\\_Kompozity-1.pdf](http://kmi2.uniza.sk/wpcontent/uploads/2020/01/8_Kompozity-1.pdf)
3. Kompozity [online] <http://www.gdpkoral.cz/userfiles/file/pdf-design-manual/kompozity.pdf>
4. Inovative Composite Engineering, Copmposite tubes [online]. [https://www.innovativecomposite.com/wp-content/uploads/2014/08/tubes\\_v11-1024x682.jpg](https://www.innovativecomposite.com/wp-content/uploads/2014/08/tubes_v11-1024x682.jpg)
5. L. Fernández, Composite materials industry- Statistics and facts [online] [https://www.statista.com/topics/4756/composite-materials-industry/#topicHeader\\_wrapper](https://www.statista.com/topics/4756/composite-materials-industry/#topicHeader_wrapper)
6. Fiber Reinforced Polymer Composites. [online] <https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-fiber-reinforced-polymer-frp-composites-market>
7. Z. Kořínek, Vlákna pro kompozity [online]. <https://web.archive.org/web/20100401025714/http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
8. L. Běhálek, Polymery [online] <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
9. P. Skočovský, a kol., Náuka o materiáli. EDIS- vydavateľstvo ŽU, Žilina 2014
10. K. Chwalka, Composite materials: science and engineering. 2nd ed. New York: Springer, 1998 ISBN 03-879-8409-7.
11. B. Jefferson, How to repair fiberglass body panels, Know How Blog [online] [https://knowhow.napaonline.com/wp-content/uploads/2017/04/fiberglass\\_repair.jpg](https://knowhow.napaonline.com/wp-content/uploads/2017/04/fiberglass_repair.jpg)
12. J. Krizbergs, V. Gutakovskis, Kompozitné materiály. [online] <https://zep.sk/wp-content/uploads/2017/11/SKILLM21.pdf>
13. Kompozitné materiály, [online]. [http://umi.fs.cvut.cz/wpcontent/uploads/2014/08/6\\_kompozitni-materialy.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wpcontent/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf)
14. B. Kratochvíl, V. Švorčík, D. Vojtěch, Úvod do studia materiálů. Vyd. 1. Praha: VŠCHT, 2005, ISBN 80- 708-0568-4.
15. Indiamart, White Standart S Glass Fiber, for Industrial [online] <https://www.indiamart.com/proddetail/s-glass-fiber-13365490930.html>
16. A. Kliessling, M. Matthes, Textil-Fachwörterbuch. Berlin 1993, ISBN 3-7949-0546-6, S. 153
17. 1965 Kevlar® [online]. <https://www.dupont.com/about/our-history.html>
18. Kevlar® Fibers [online]. <https://www.dupont.com/products/dupont-kevlar-fiber.html>
19. V. Ryan, What is kevlar? Types of kevlar. [online] <https://technologystudent.com/joints/kevlar2.html>
20. B. Gajanan, Structure and Properties of High Performance Fibers. 1st ed. Woodhead Publishing, 2016 ISBN 978-0081005514
21. Carbon Fiber [online] <https://zoltek.com/carbon-fiber/how-is-carbon-fiber-made/>
22. Koenigsegg, #Build128 Agera RS Station 2 – Body Alignment [online]. <https://dev.koenigsegg.com/build128-agera-rs-station-2-body-alignment/>
23. Kordcarbon, Uhlíková vlákna a jejich využití [online] [http://www.kordcarbon.cz/uhlikove\\_vlakno](http://www.kordcarbon.cz/uhlikove_vlakno)
24. M. Vaňková, Vláknové kompozity. Jak se vyrábějí a kde najdeme jejich využití? [online]. <https://www.talentica.cz/vlaknove-kompozity/>
25. The Welding Institute, How are composites manufactured ? [online] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-how-are-composites-manufactured>
26. Technologie výroby kompozitů [online]. <https://polymercomposites.cz/category/technologie/>
27. Všeobecný základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů [online] <https://web.archive.org/web/20080621204219/http://www.havel-composites.com/clanky/0-/74-Vseobecny-a-zakladny-popis-materialov-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitov.html>

## Plazmowa nitridacja a ułnavova Źivotnořt' austenitckej ocele AISI 304

M. Slezák<sup>a\*</sup>, M. Uhrıcik<sup>a</sup>, L. Kuchariková<sup>a</sup>, Eva Tillová<sup>a</sup>, M. Bonek<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Źilinska univerzita v Źiline, Strojnicka fakulta, Katedra materiálového inŹinierstva, Univerzitná 8215/1, 010 26 Źilina, Slovak Republic, email: slezak15@stud.uniza.sk

<sup>b</sup> Politechnika Źlaska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materialow InŹynierskich i Biomedycznych

**Abstrakt:** Ćlanok sa zaoberá moŹnosciami chemicko-tepelneo spracovania austenitckych ocelí, so zameraním sa na nekonvenčnú metódu: plazmovú nitridaciu. V Ćlanku sú obsiahnuté sucasne poznatky o spôsoboch nitridácie, vlastnostiach a Źtrukture austenitckych ocelí ako aj ułnavovej Źivotnosti ocele AISI 304 (napr. faktory ovplyvņujuce ułnavovu Źivotnořt', Źtadia ułnavoveho procesu a vplyv plazmovej nitridácie na ułnavovu Źivotnořt').

**Klucove slová:** plazmová nitridácia, austenitcka ocel', ułnavova Źivotnořt'

### 1. Ŭvod

Źivotnořt' suciastok a konŹtrukcii súvisí s oterom povrchu, koróznymi ucinkami ako aj výskytom ułnavovych trhlín. Tieto vplyvy sa zacinaju Źirit' od povrchu suciastok a preto je vełmi doleŹite pre zvyŹenie Źivotnosti správne ovplyvņit' mechanické vlastnosti materialov. Pri chemicko-tepelnom spracovaní dochádza k zvyŹeniu odolnosti povrchovej vrstvy nasycovaním povrchu suciastok vhodne zvolenými chemickými prvkami. Toto má za následok zmenu Źtrukтуры a mechanických vlastnosti [1-2].

### 2. Chemicko-tepelnee spracovanie

Pod pojem chemicko-tepelnee spracovanie sa radí obvykle niekoľko spôsobov, pri ktorých sa difúzne nasycuje povrch ocele rôznymi prvkami. Chemicko-tepelnem spracovaním je ułmyselne vyvolaná zmena chemických, fyzikálnych a mechanických vlastnosti v povrchových vrstvách [1-2].

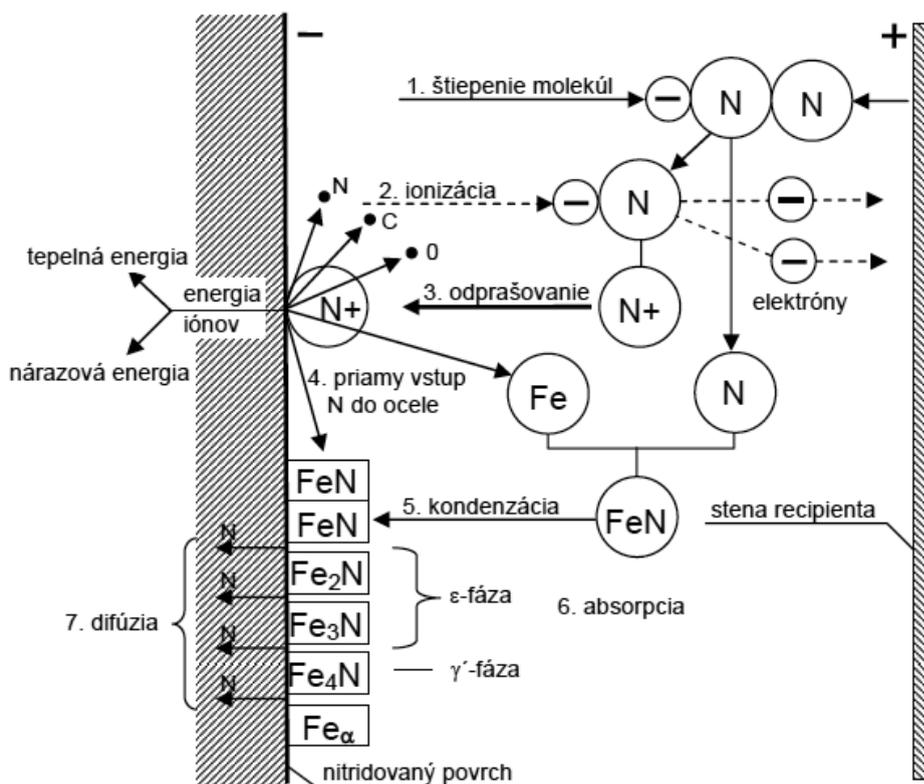
Vyvolavane zmeny v chemickom zloŹeni povrchových vrstiev sa dosahujú ohrevom na určite teploty (zaleŹi od druhu procesu a spracovania) v aktivnom prostredí, pričom sa povrch obohacuje napr. dusíkom (nitridácia), uhlíkom (cementácia), sírou (sulfidovanie). Následnou difúziou sa pridávaný prvok dostáva aj do podpovrchových vrstiev [3-4]. Pomocou chemicko-tepelneo spracovania sa docielia rôzne poŹadovane vlastnosti, ako napríklad odolnořt' voči opotrebeniu, koroziiivzdornosť, Źiaruvzdornosť, zvyŹenie tvrdosti povrchu a iné [5].

## 2.1 Nitridácia

Nitridácia je proces pri ktorom sa nasycuje povrch oceľovej súčasti dusíkom v kvapalnom alebo plynnom prostredí [6]. Nitridácia sa dosahuje pri teplotách pod čiarou  $A_{c1}$ , približne v rozhraní teplôt 470 - 580 °C. Po procese sa súčiastka už ďalej tepelne nespracováva. Optimálna východisková štruktúra ocele pred spracovaním je sorbit. Neprípustný je oduhlíčený povrch nitridovanej súčiastky [7-8].

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 [9]. Pri plazmovej nitridácii sú opracovávané súčiastky uložené v recipiente, čo je vlastne vákuová nádoba, a súčiastky sú do sústavy zapojené ako katóda. V recipiente sa udržiava znížený tlak zriedenej zmesi plynov, ktoré sú potrebné pre proces nitridácie. Recipient je zapojený ako anóda. Zmes plynov býva najčastejšie  $N_2 + H_2$ . Elektrické pole vzniká tým, že sa pripojí prúd s napätím 400 - 1000 V. A pôsobením napätia vzniká medzi povrchom súčiastok a stenou recipientu elektrické pole [10-11].

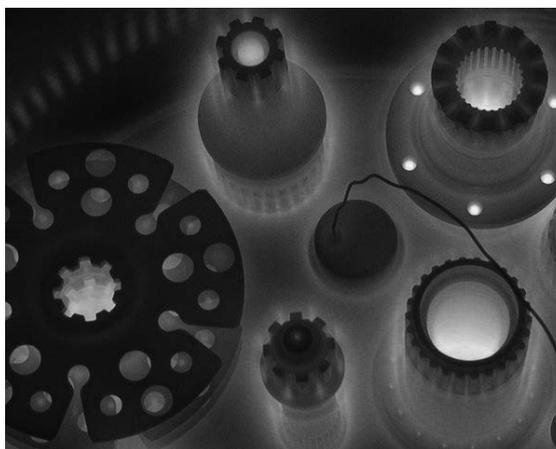
V tomto elektrickom poli dochádza k migrácii molekúl zriedeného plynu a v dôsledku nárazov potom k ich štiepeniu. Kladné ióny sú urýchľované smerom ku katóde, čo je vlastne povrch nitridovaných súčiastok (obr. 1) [11].



Obrázok 1. Schéma dejov počas plazmovej nitridácie [11]

Figure 1. Scheme of processes during plasma nitriding [11]

Nárast rýchlosti iónov a tým aj kinetickej energie nie je lineárny, čo je pre pohyb iónov ku katóde charakteristické. K prudšiemu nárastu rýchlostí dochádza až vtedy, keď sú ióny v bezprostrednej blízkosti povrchu súčiastok. Je to takzvaná oblasť katódového úbytku napätia [12]. Tento úbytok napätia má za následok, že najväčšia intenzita dejov prebieha práve v tomto anomálnom dúťnavom výboji, a je sústredená do úzkeho pásma. Toto pásmo je okolo povrchu súčiastok bez ohľadu na vzdialenosť od anódy (recipientu), a bez ohľadu na tvar súčiastky. Predovšetkým práve v tomto úzkom pásme nastáva ionizácia atómov a štiepenie molekúl. Anomálny dúťnavý výbuch má plošný charakter, ktorý môžeme vidieť ako svietiacu žiaru okolo nitridovaných súčiastok (obr. 2) [4,13].



Obrázok 2. Dúťnavý výboj [14]

Figure 2. Smoldering discharge [14]

Pre správne vytvorenie nitridačnej atmosféry (tab. 1) sa používajú technické plyny ako: dusík ( $N_2$ ), vodík ( $H_2$ ), argón (Ar), čpavok a metán ( $CH_4$ ). Základná vlastnosť dusíka je to, že je nehorľavý. Dusík je bezfarebný plyn, ktorý nemá zápach ani chuť, je asi 1,03 krát ľahší ako vzduch. Vyrába sa frakčnou destiláciou skvapalneného vzduchu pri nízkych teplotách [15].

Tabuľka 1. Atmosféry pre plazmovú nitridáciu [11]

Table 1. Atmospheres for plasma nitriding [11]

Typ	Rozsah zloženia atmosféry (v objemových %)
$NH_3$	100
$NH_3d$	25 % $N_2$ + 75 % $H_2$
$N_2H_2$	2 až 50 % $N_2$ + zvyšok $H_2$
$N_2, CH_4, H_2$	67 až 69 % $N_2$ + 1 až 3 % $CH_4$ + zvyšok $H_2$
$N_2, H_2, Ar$	5 až 30 % $N_2$ + 60 až 85 % Ar + zvyšok $H_2$
Ar, $H_2$	50 až 90 % Ar + zvyšok $H_2$
$H_2$	100

Základnou vlastnosťou ďalšieho plynu (vodíka) je to, že je horľavý a inertný. Tento plyn je taktiež ako dusík bez farby, chuti a zápachu. Rozdiel oproti vzduchu a dusíku je ten, že vodík je až 14,4 krát ľahší ako vyššie spomenuté plyny. Minimálna akosť vodíka pre proces nitridácie je

99,99 objemových percent. Základná vlastnosť argónu je tá, že je nehorľavý a inertný. V zmesi so vzduchom vytesňuje kyslík [16].

### 2.1.1 Vplyv nitridačnej teploty

Pri plazmovej nitridácii sa plyn privádza pomocou elektrického poľa do vysoko aktívneho plazmatického stavu. Ionizačný stupeň preto závisí od elektrických parametrov ako sú napätie a prúd. Spodná hranica plazmovej nitridácie sa nachádza na úrovni 350 až 400 °C. Jemná štruktúra jadra a rozmery súčiastok sa zachovávajú nitridáciou pri nízkych teplotách [11].

Difúzne vrstvy získavané pri nízkych teplotách a krátkom nitridačnom procese sú pomerne tenké. Pri nitridovaní v nízkych teplotách je potrebné dlhšie spracovávanie, aby sa dosiahla väčšia nitridačná vrstva ako pri vysokých teplotách. Zmeny rozmerov a menšie deformácie súčiastok sa dosahujú za použitia nižších nitridačných teplôt. Taktiež sa dosahuje vysoká povrchová tvrdosť a zachováva sa pevnosť jadra. Zvyšovaním teploty nad 600 °C sa dosiahne zväčšenie počtu iónov alebo zvýšenie energie iónov, prípadne aj kombináciou týchto efektov. Zväčšenie počtu iónov sa dosiahne zvýšením tlaku v recipiente a zvýšenie energie iónov zase zvýšením elektrického napätia. So zvyšujúcou sa ionizáciou pracovného plynu stúpa prúdová hustota. A týmto efektom aj privádzané množstvo tepla, ale aj dusíku na povrchu spracovávanej súčiastky. Pri vysokých nitridačných teplotách sa zvyšuje odolnosť voči korózií vznikom nitridačných vrstiev. Výška teploty je limitovaná pevnosťou jadra. V praxi sa využíva nitridácia na súčiastky namáhané prevažne dynamicky a pri ochrane proti korózií v rôznych častiach strojárstva. Hlavnou výhodou nitridačných vrstiev získaných za vysokých teplôt je obmedzenie tvrdosti povrchu, väčšia húževnatosť a väčšia hĺbka difúznej vrstvy. Krátka doba spracovania je tiež výhodná z ekonomického hľadiska [11,12].

## 3. Austenitické ocele

Charakteristickou vlastnosťou všetkých austenitických ocelí je korózna odolnosť. Obsah uhlíka v austenitických oceliach je zvyčajne nižší ako 0,08 %. Obsah iných prvkov dosahuje ďaleko vyššie hodnoty. V austenitických oceliach sa nachádza 16 až 20 % chrómu, 7 až 18 % niklu a v ojedinelých prípadoch 2 až 6 % molybdénu. V niektorých prípadoch sa môžu nachádzať aj stabilizačné prvky ako je napríklad titán. Tieto prvky zvyšujú odolnosť voči korózií, hlavne medzikryštálovej korózií s kombináciou s dobrou odolnosťou pri zvýšených teplotách. Austenitické ocele majú austenitickú štruktúru stabilnú pri všetkých teplotách. Preto tepelným spracovaním nie je možné zvýšiť ich mechanickú pevnosť. Mechanická pevnosť sa dá doceliť spracovaním za studena ako napríklad pretlačovaním, valcovaním, lisovaním, ťahaním. Tieto spracovania materiál spevňujú, zvyšujú jeho tvrdosť, a majú za následok zosilnenie magnetizmu [17].

Ďalej sa dá mechanická pevnosť zvýšiť pridaním dusíka. Austenitické ocele sú taktiež dobre zvrátateľné. Avšak pomalé ochladzovanie v teplotnom intervale 600 až 800 °C spôsobí precipitáciu karbidov na hraniciach zrna. Táto precipitácia uľahčuje medzikryštálovú koróziu. Austenitické ocele sa vyznačujú pri nízkych teplotách dobrou húževnatosťou a majú výborné mechanické vlastnosti pri izbových teplotách.

K austenitickým oceliam patria aj takzvané žiaruvzdorné ocele. Žiaruvzdorné ocele sú charakteristické vysokou odolnosťou voči oxidácií v plynnej atmosfére pri teplotách nad 600 °C. Žiaruvzdornosť závisí od vlastností vrstvy oxidov [18]. Tieto ocele majú dobrú koróznou odolnosť a vysokú mechanickú pevnosť až do 1100 °C. Tieto ocele obsahujú okolo

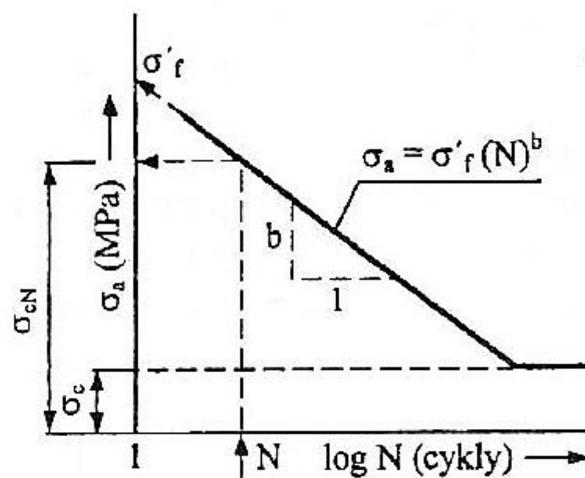
20 % chrómu a niklu a približne 1 % kremíku. Úroveň obsahu uhlíka sa pohybuje na vyšších hodnotách ako v obyčajných koróziivzdorných oceliach [5].

#### 4. Únavová životnosť materiálu

Únavová životnosť materiálu je proces, kedy sa mení stav a vlastnosti skúmaného materiálu. Tento proces je vyvolaný cyklickým namáhaním. K únave dochádza, keď je materiál zaťažovaný časovo premenlivými vonkajšími silami. Tieto sily vyvolávajú elasticke deformácie. Ak napätie striedavo mení vlastnú hodnotu od minimálnej po maximálnu, to znamená, že sa mení striedavo veľkosť pružnej deformácie. Počas poklesu zaťaženia na minimálnu hodnotu sa energia uvoľňuje a pri rastúcom zaťažení po maximálnu hodnotu, materiál energiu pohlcuje [19].

Únavové porušenie a samotná únava sa hodnotí z rôznych hľadísk. A to z technického alebo prípadne technologicko-metalurgického hľadiska. Technologické hľadisko poskytuje informácie získavané priamo zo skúšky na únavu, t. j. pri akej amplitúde napätia vydržal materiál určený počet cyklov. Technologicko-metalurgické hľadisko zahŕňa vplyvy rôznych technologických faktorov, ako napríklad teplota a prostredie v ktorom sa skúška vykonáva, ale aj povrchová úprava skúšaného materiálu. Posledným hľadiskom sú štruktúrne zmeny. Pri tomto hľadisku sa sledujú štruktúrne zmeny v materiáli pred a počas únavovej skúšky [20].

Z hľadiska počtu cyklov  $N$ , spôsobujúcich únavové porušenie materiálov sa rozlišuje vysokocyklová a nízkokycklová únava. Pri nízkokycklovej únave sa pohybuje počet cyklov  $N$  v rozpätí  $10^2$  až  $10^5$  cyklov. Pri vysokocycklovej únave býva počet týchto cyklov vyšší. Únavové správanie sa materiálu v oblasti vysokocycklovej únavy, popisuje Wöhlerova krivka (obr. 3). Táto krivka popisuje informácie o závislosti amplitúdy napätia  $\sigma_a$  na počte cyklov do lomu  $N$  [21-22].



Obrázok 3. Wöhlerova krivka  $\sigma_a$ - $f(N)$ , vysokocyklová únava [22]

Figure 3. The Wöhler diagram  $\sigma_a$ - $f(N)$ , high cycles fatigue [22]

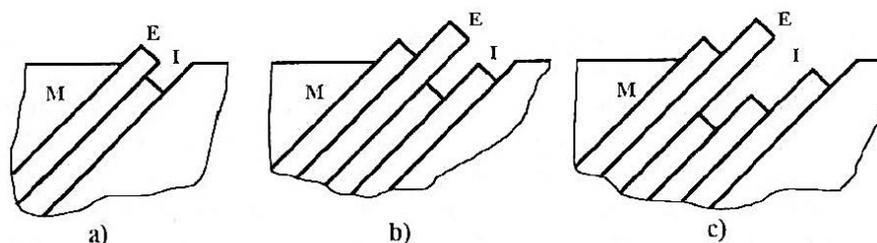
Riadiacim a rozhodujúcim faktorom v procese kumulatívneho poškodzovania pri cyklickom zaťažovaní je cyklická plastická deformácia ktorá nie je vratná. Na základe týchto zmien ktoré

boli spôsobené cyklickou plastickou deformáciou, je možný únavový proces rozdeliť na tri časovo nadväzujúce štádiá, ktoré sa do určitej miery navzájom prekrývajú [20-21]:

- Štádium zmeny mechanických vlastností: Prvé štádium únavového procesu pozostáva zo zmien v celom objeme materiálu ktorý sa zaťažuje. Menia sa fyzikálne a chemické vlastnosti materiálu, čo má za následok zmenu hustoty a rozloženia mriežkových porúch. Najvýraznejší prejav týchto zmien je na začiatku cyklického zaťažovania. S narastajúcim počtom cyklov sa prejav znižuje, a po určitom počte cyklov sa nemení.

Zmeny mechanických vlastností môžu byť dvojakého druhu:

- cyklické spevnenie - nastáva pri materiáloch ktoré boli predtým vyžíhané, s pomerom pevnosti k medzi klzu  $Rm/Re > 1,4$  ;
  - cyklické zmäkčenie - je typickým znakom pre materiály, ktoré boli predtým spevnené deformačne, disperzne cudzími časticami, spevnené prímiesovými atómami, precipitačne alebo martenzitickou transformáciou. K cyklickému zmäkčeniu dochádza pri materiáloch s pomerom medze pevnosti k medzi klzu  $Rm/Re < 1,2$ . Materiály sú cyklicky stabilné, keď majú pomer medze pevnosti k medzi klzu  $Rm/Re = 1,2$  až  $1,4$  (Frkák 2016).
- Štádium nukleácie trhlín: Únavové trhliny vznikajú vždy na voľnom povrchu materiálu, kde pôsobia napätia, teda koncentráciu cyklickej plastickej deformácie. Nukleácia trhlín v povrchových vrstvách nastupuje najčastejšie v šmykových sklzových pásmach. Ďalej za miesta vzniku trhlín sa dajú považovať vruby, precipitáty, intrúzie, hranice zŕn alebo nerovnosti na opracovanom povrchu (obr. 4). S narastajúcim počtom cyklov rastie šírka a dĺžka, ale taktiež počet sklzových pásiem [23].



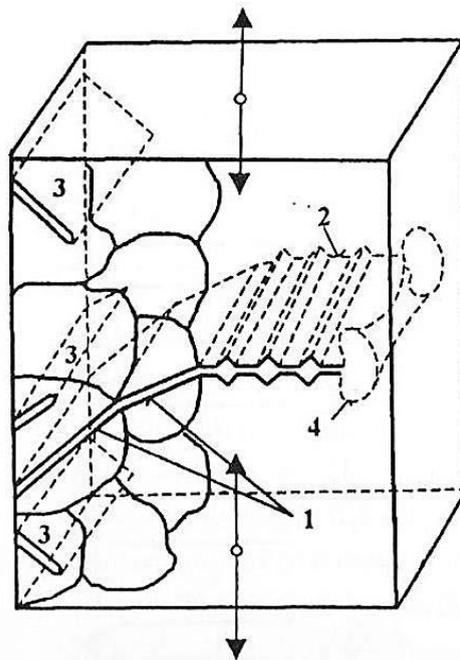
Obrázok 4. Schéma vzniku a rozvoja únavových sklzových pásov v materiáli (M) a schéma rastu extrúzií (E) a intrúzií (I) [24]

Figure 4. Scheme of formation and development of fatigue slip belts in the material (M) and scheme of growth of extrusions (E) and intrusions (I) [24]

- Štádium šírenia trhlín (obr. 5): Po ukončení nukleačného štádia, kedy sa na povrchu vytvorili mikrotrhliny, ktoré sú orientované do smeru sklzových rovín, nastáva štádium šírenia trhlín v materiály. Pri trvajúcim cyklickom zaťažovaní mikrotrhlina preniká ďalej do hĺbky namáhaného materiálu. Zo všetkých nukleoovaných mikrotrhlín, ktoré sa vytvorili, rastie ďalej do hĺbky materiálu len niekoľko desiatok z nich. S rastúcou hĺbkou trhlina začína meniť svoj smer rastu na kolmý vektor pôsobenia hlavného napätia [25].

Proces šírenia trhlín sa delí na dve etapy. Prvá etapa pozostáva z kryštalografického vzniku a rastu a postupného odklonu šírenia. V prvej etape je rýchlosť šírenia trhliny malá. Rýchlosť narastá až pri druhej etape. V tejto etape sa rýchlosť šírenia trhliny riadi podľa normálového napätia. Pri materiáloch, ktoré majú v sebe vruby sa prvá etapa neprejavuje a hneď nasleduje druhá etapa [26-27].





Obrázok 5. Schéma postupu šírenia únavovej trhliny: 1 - prvá etapa, 2 - druhá etapa, 3 - neefektívne trhliny, 4 - plastická zóna na čele trhliny [20]

Figure 5. Diagram of the fatigue crack propagation procedure: 1 - first stage, 2 - second stage, 3 - inefficient cracks, 4 - plastic zone at the crack front [20]

#### 4.1 Faktory ovplyvňujúce únavovú životnosť

Proces únavy je citlivý na veľký počet ovplyvňujúcich faktorov (vnútorných a vonkajších), ktoré môžu každý jednotlivo, ale najčastejšie je to kombinácia viacerých vplyvov, výrazne meniť odolnosť materiálu voči únavovému porušeniu [20,25]:

- Vnútorné faktory: veľkosť zrna, tvar a rozloženie nekovových vtrúsenín, chemické zloženie materiálu, štruktúrny stav materiálu, technológia výroby, textúra,
- Vonkajšie faktory: frekvencia a asymetria zaťaženia, veľkosť stredného napätia, stav napätosti, tvar a veľkosť telesa, história zaťažovania, existencia trhlín a vrubov, agresivita a teplota prostredia.

#### 4.1 Vplyv plazmovej nitridácie na únavové vlastnosti

Únavové lomy sa objavujú pri súčiastkach ktoré sú dynamicky namáhané. Tieto 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 lomy, je chemický účinok, ktorý pôsobí na povrchu súčiastok. Korózia veľmi znižuje medzu únavy. Medzu únavy zvyšujú procesy povrchového vytvrdzovania, z ktorých je najvýznamnejšia nitridácia. Naopak, všetky kroky smerujúce k zlepšeniu povrchu, ako napríklad leštenie, spôsobujú vyššiu odolnosť proti únave [13].

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 ťahového. Nitridovaná vrstva ako prostriedok k zvýšeniu medze únavy sa odporúča skôr pre súčasti namáhané striedavým ohybom než torzným namáhaním, avšak aj u torzných tyčí sa dobre uplatnila, aj keď sa nepoužili špeciálne nitridačné ocele [11].

## 5. Záver

Vlastnosti materiálov sa najlepšie rozpoznávajú sledovaním ich vnútornej štruktúry. Metalografia tak nadväzuje na odvetvie chemicko-tepelného spracovania, ktorým sa mení povrchová vrstva spracovávaných materiálov nakoľko plazmová nitridácia zvýši povrchovú tvrdosť materiálov. Tvrdosť sa zvýši vďaka dusíku, ktorý difúzne preniká do podpovrchovej vrstvy ocele. Je preto dôležité sledovať nielen vplyv chemicko-tepelného spracovania na únavovú životnosť ale zamerať sa aj na hodnotenie štrukturálnych zmien v austenitickej oceli.

### Podakovanie

Článok bol riešený ako súčasť projektu KEGA 016ŽU-4/2020 s názvom „Zvýšenie kvality a inovácia vzdelávania v bakalárskych študijných programoch na SjF UNIZA“ a grantového projektu UNIZA „Využitie chemicko-tepelného spracovania na zvýšenie únavovej životnosti vybraných konštrukčných materiálov“. Dielo vzniklo ako súčasť projektovo orientovaného vzdelávania - PBL, v súťaži V v rámci programu Iniciatíva excelentnosti – Politechnika Śląska, Gliwice.

## 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. J. Jech, Tepelné zpracování oceli. Praha: SNTL, 1983. 392 s. ISBN 04-408-83.
4. M. Hazlinger, R. Moravčík, Chemicko-tepelné spracovanie materiálov. Bratislava: STU, 2013. 169. s. ISBN 978-80-227-3624-5.
5. M. Huluchý, a kol., Strojírenská technologie 1. Metalografie a tepelné zpracování 2. díl. Praha : Scientia. 2002. 173 s. ISBN 80-7183-265-0.
6. T. Aizawa, H. Kuwahara, Plasma Nitriding as an Environmentally Benign Surface Structuring Process. Japan: Eco Society, 2003.
7. 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.
8. K. Ďaďourek, Vybrané technologie 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)
9. 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.
10. E. George, E. Totten, Steel heat treatment handbook - Second Edition. Oregon : Portland State University. 2006. 820 s.
11. A. Holemář, V. Hrubý, Iontová nitridace v praxi. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. Redakce strojírenské a metalurgické literatury. ISBN 80-03-00001-7.

12. R. Farda, Vplyv režimu tepelného a chemicko-tepelného spracovania na emisiu Barkhausenovho šumu : dizertačná práca. Žilina. 2017. 126s.
13. F. Czerwienski, Heat Treatment - Conventional and Novel Applications. Ontario: Intech open Science, 2012. ISBN 978-953-51-0768-2.
14. Rübiger. 2021. Plazmové generátory Rübiger. [online] <https://www.rubiger.com/sk/vyroba-zariadeni/plazme-generatora>
15. D. Pye, An Introduction to Nitriding. [online] [http://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/06950G\\_Chapter\\_1.pdf](http://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/06950G_Chapter_1.pdf)
16. E. J. Mittemeijer, Fundamentals of Nitriding and Nitrocarburizing. University of Stuttgart, [online] [www.asminternational.org](http://www.asminternational.org).
17. X. Kleber, S.P. Barroso, Investigation of shot-peened austenitic stainless steel 304L by means of magnetic Barkhausen noise. France - Université de Lyon: Elsevier. 2010.
18. P. Skočovský, a kol., Náuka o materiáli. Žilina : EDIS, 2015.349 s. ISBN 978-80-554-1071-5
19. D. Hrivňáková, Fyzikálna metalurgia a medzné stavy materiálov. 1. časť. Bratislava STU, 1998. 100 s. ISBN 80-227-1034-2.
20. M. Frkáň, Vplyv štruktúry na únavové vlastnosti vybraných zliatin hliníka: diplomová práca. Žilina. 2016. 63s
21. CH. R. Brooks, A. Choudhury, Failure analysis of engineering materials. McGraw-Hill, 2002. 602s.
22. A. Vaško, a kol., Vlastnosti a použitie materiálov. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2009. 96 s. ISBN 978-80-554-0102-7.
23. V. Machek, Struktury kovových materialu - Náuka o materialu. 1. časť. Praha: ČVUT, 2006. 177 s. ISBN 80-01-03379-1.
24. Únavový lom, únava materiálu [online] [http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2010/12/unava\\_materialu.doc](http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2010/12/unava_materialu.doc)
25. A. Puškár, Medzné stavy materiálov a súčastí. 1. vyd. Bratislava: VEDA, 1989. 304 s. ISBN 80-224-0020-3.
26. F. Nový, a kol., Dynamická pevnosť a únavová životnosť. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2010. 83 s. ISBN 978-80-554-0192-8.
27. M. Oravcová, Štúdium vplyvu štruktúry na lomové vlastnosti nehrdzavejúcich ocelí používaných na výrobu implantátov : dizertačná práca. Žilina. 2017. 130s.

## Teoretická analýza jednotlivých pásiem zvarového spoja AHSS ocelí využívaných v automobilovom priemysle

J. Smatana<sup>a</sup>, D. Medvecká<sup>a</sup>, L. Kuchariková<sup>a</sup>, E. Tillová<sup>a</sup>, M. Bonek<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra priemyselného inžinierstva, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovak Republic, email: smatana14@stud.uniza.sk

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

**Abstrakt:** Článok sa zaoberá teoretickou analýzou vysokopevnostných ocelí, pričom najväčší dôraz kladie na druhú generáciu týchto ocelí. V práci sú zhrnuté doterajšie znalosti o týchto oceliach, najmä ich využitie v automobilovom priemysle, charakteristika a výroba. Charakterizované je konkrétne zváranie využívané pri týchto oceliach. Spracovaný je aj popis vodíkovej krehkosti, ktorou tieto ocele trpia. Navyiac sa táto práca zaoberá analýzou zvarového spoja, mechanickými vlastnosťami a popisom mikroštruktúry v teplom ovplyvnenej oblasti.

**Kľúčové slová:** vysokopevnostné ocele, vodíková krehkosť, zváranie, teplom ovplyvnená oblasť

### 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 nabierajú 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 bezpečnosť. Z tohto dôvodu je dôležité zamerať sa na kvalitu zvarových spojov a možných defektov, ktoré môžu znížiť bezpečnosť vozidla [1-2].

Progresívne vysokopevnostné ocele sú vo vysokej miere používané v automobilovom priemysle, keďže boli primárne navrhnuté práve pre tento druh priemyslu. Vyrábajú sa z nich rôzne časti konštrukcií vozidiel, napr. karosérie. Obrovskou výhodou týchto ocelí sú výborné mechanické vlastnosti, nízky obsah uhlíka, čo je jedným z faktorov, ktorý nám zaručuje dobrú zvarateľnosť. Hlavným dôvodom, prečo sú v takom veľkom množstve využívané v automobilovom priemysle je už spomínaná možnosť zníženia celkovej hmotnosti vozidla. Zároveň pomáhajú zvýšeniu bezpečnosti vozidla, keďže majú skvelú schopnosť absorpcie nárazovej energie [1-2].

Vysoká pevnosť, húževnatosť a odolnosť voči korózii sú jedny z atribútov týchto ocelí. Do tejto skupiny ocelí patria oceľe z prvej a druhej generácie progresívnych vysokopevnostných ocelí. Medzi najznámejšie patria dvojfázové oceľe (DP), komplexne legované oceľe (CP), oceľe s transformačne indukovanou plasticitou (TRIP) a martenzitické oceľe (MS). Jemnozrná mikroštruktúra, výborné mechanické vlastnosti a zaručená zvarateľnosť sú výsledkom kombinácie mikrolegovania (do 0,15 hmot. % Mn, Cr, Mo, Ti, Nb) a riadeného termomechanického spracovania týchto ocelí [1-2].

## 2. Oceľe AHS (Advanced High-Strength Steels)

AHS oceľe obsahujú do 0,15 hmot. % mikrolegujúcich prvkov ako Mn, Cr, Mo, V, Ni, Ti, Nb a sú dvoj a viacfázové. Viacfázové oceľe dosahujú vyššiu ťažnosť a pevnosť v ťahu oproti jednofázovým oceliam, ako napríklad HSLA (vysokopevné nízko legované oceľe). HSLA sú predchodcom AHS ocelí. Výhodou týchto ocelí sú výborné mechanické vlastnosti, nízky obsah uhlíka čím je zaručená aj zvarateľnosť a cena. Mnoho projektov dokazuje a otvára diskusiu o schopnosti oceľe, splniť požiadavky na zvýšenú bezpečnosť a úsporu paliva vďaka zníženiu hmotnosti rôznych častí konštrukcie vozidla. Auto/Steel Partnership je konzorciom Rady pre automobilový priemysel v Americkom inštitúte pre železo a oceľ, spoločnosti Stellantis a spoločnosti General Motors Company. Zaujímajú sa o inovácie ocelí v automobilovom priemysle a sídlia v štáte Michigan, Detroit. Zapojili sa do výskumu a preukázali svojimi projektmi dôležitosť AHS ocelí v automobilovom priemysle [1-3].

Kľúčovým dôvodom využitia AHS ocelí je ich cena v pomere ku kvalite a pevnosti v ťahu, ktorá je dosiahnuteľná aj v nižších hrúbkach plechov, čím možno znížiť hmotnosť vozidiel. Je dôležité spomenúť, že automobilový priemysel chce znižovať hmotnosť automobilov a iných vozidiel aj z dôvodu znižovania emisií a produkcie skleníkových plynov, čo vedie k zlepšovaniu kvality ovzdušia. Tomuto sa zaviazala Európska únia v roku 2018 smernicou o kvalite okolitého ovzdušia. Toto stanovisko bolo sprísnené v roku 2019, kedy bola publikovaná The European Green Deal. Jej cieľom je dosiahnuť na území Európskej únie klimatickú neutralitu do roku 2050. Stanoviská EÚ platia nielen pre vozidlá z Európskeho trhu, ale aj tie z interkontinentálneho. Príkladom nesplnených požiadaviek stanovených na rok 2020 je napríklad automobilka Subaru, ktorá stiahla z európskeho trhu model WRX STi, pretože prekročovala emisný limit až o 154 % (95 g CO<sub>2</sub>/km) a to až na 242 g CO<sub>2</sub>/km. Za každý prekročený 1 g CO<sub>2</sub>/km ukladá EÚ vysoké peňažné tresty [3-4].

Euro NCAP, je európsky program pre hodnotenie nových automobilov z hľadiska bezpečnosti. Vystavujú nové vozidlá viacerým nárazovým skúškam, napríklad čelnou zrážkou, bočnými nárazmi a nárazom z boku. Následne vyhodnocujú bezpečnosť nového vozidla, ktoré má byť uvedené na trh. Vďaka zníženiu hmotnosti konštrukcie automobilu sa ťažisko auta posunie nižšie k zemi a tým sa zabezpečí to, aby sa auto pri náraze z boku neprevrátilo, zároveň sa tým zlepšia jazdné vlastnosti vozidla [3]. AHS oceľe sú predovšetkým využívané tam, kde záleží od pevnosti materiálu a kladie sa dôraz aj na nízku hmotnosť materiálu, ktorou zaručíme lepšiu funkčnosť respektíve spoľahlivosť finálneho produktu. To je aj jeden z dôvodov prečo sú AHS oceľe najviac zastúpené v automobilovom priemysle. Ďalším dôvodom je povinnosť plnenia smerníc EÚ v oblasti produkcie automobilového priemyslu. AHS oceľe sa však ďalej využívajú v konštrukciách lodí, lietadiel a v stavebníctve [5].

## 2.1 Rozdelenie AHSS ocelí

AHS ocele možno rozdeliť do troch základných skupín nazývaných prvá, druhá a tretia generácia.

Prvá generácia zahŕňa štyri triedy ocelí (tab. 1): 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 [5].

Druhá generácia AHS ocelí (tab. 2, obr. 1) obsahuje neskoršie vyvinuté triedy ocelí ako ocele TWIP (angl. Twinning-Induced Plasticity).

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 (obr. 1) [5].

Tabuľka 1. Vybrané charakteristiky pre triedy ocelí prvej generácie AHS [5]

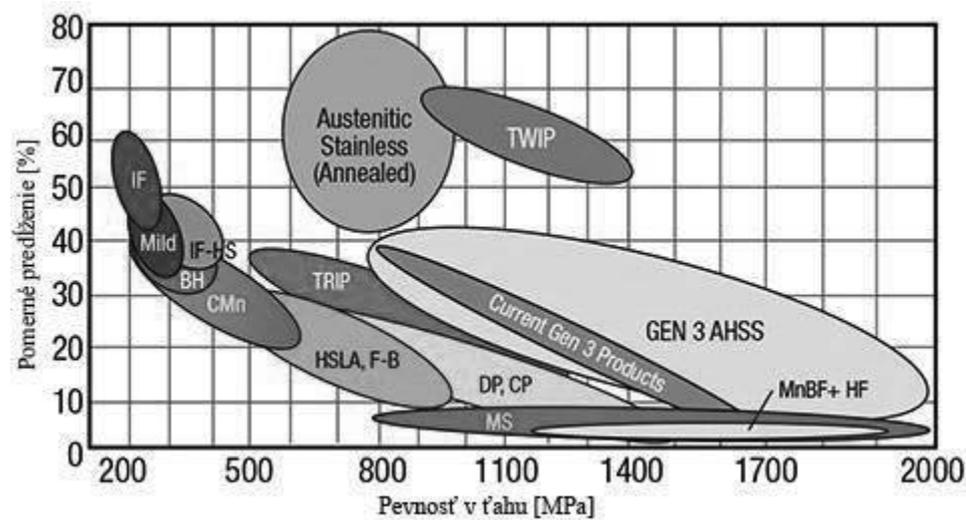
*Table 1. Selected characteristics for first generation AHS steel grades [5]*

Prvá generácia AHSS	Mikroštruktúra	Rozsah pevnosti v ťahu [MPa]
DP	Ferit + martenzit	400 - 1000
CP	(Ferit + bainit) matrica + malé množstvo perlitu, martenzit a zvyškový austenit	400 - 1000
TRIP	Ferit + martenzit/bainit + austenit	500 - 1000
MS	Martenzit	700 - 1600

Tabuľka 2. Vybrané charakteristiky pre triedy ocelí druhej generácie AHS [5]

*Table 2. Selected characteristics for second generation AHS steel grades [5]*

Druhá generácia AHSS	Mikroštruktúra	Rozsah pevnosti v ťahu [MPa]
TWIP	Jednofázový zvyškový austenit	1100 - 1650



Obrázok 1. Vzťah medzi pevnosťou a ťažnosťou pre ocele využívané na výrobu karosérie [6]  
 Figure 1. Relationship between strength and ductility for steels used in the manufacture of bodywork [6]

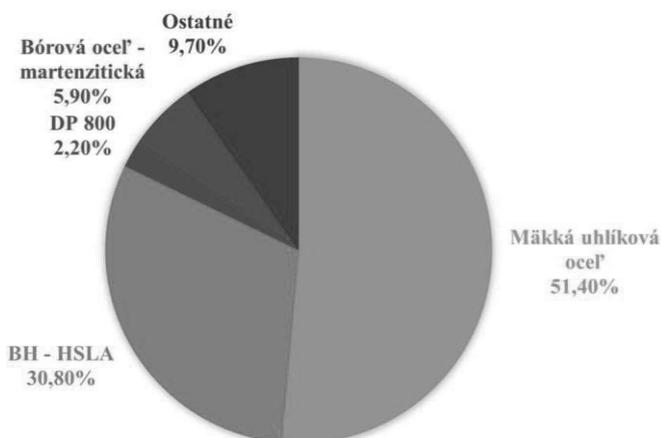
## 2.2 Využitie AHS ocelí

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 priemysly tiež našli potenciál vo využití týchto ocelí, napr. pri stavbe lodí, v letectve, spotrebičoch, a civilných alebo vojenských konštrukciách. AHS ocele sa v automobilovom priemysle využívajú hlavne z týchto dôvodov [5]:

- 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.

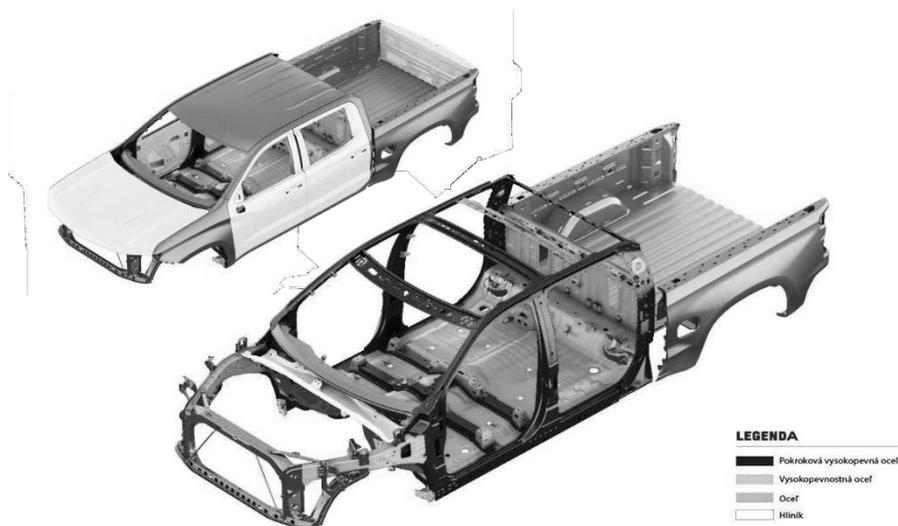
Ostatné dôležité kritéria využitia sú: odolnosť voči korózií, tvárnosť, zvarateľnosť a dostupnosť. Do roku 2020 sa predpokladalo zníženie priemernej hmotnosti európskeho automobilu na hmotnosť 870 kg; v roku 2017 bol priemer 1100 kg. Už v roku 2013 boli AHS ocele vo vysokej miere využívané v automobilovom priemysle a to napríklad [5]:

- Ford Fusion (obr. 2) - obsahuje 36,2 % progresívnych vysokopevných ocelí a 33,3 % nízkolegovaných vysokopevných ocelí [5].



Obrázok 2. Materiálové zloženie automobilu Ford Fusion [7]  
 Figure 2. The composition of Ford Fusion automobile [7]

- Chevrolet Silverado (obr. 3) - vďaka progresívnym vysokopevným, nízkolegovaným vysokopevným oceliam, ale aj využitím hliníka na dverách, kapoty a korby vozidla je až o 204 kg ľahší od predošlého modelu. Rám podvozku je ľahší o ďalších 40 kg ako jeho predchodca, a ponúka ešte o 10 % väčšiu torznú tuhosť. Okolo 80 % rámu auta je vytvorených z vysokopevnej ocele s hrúbkou od 2 do 5 mm [5,7].



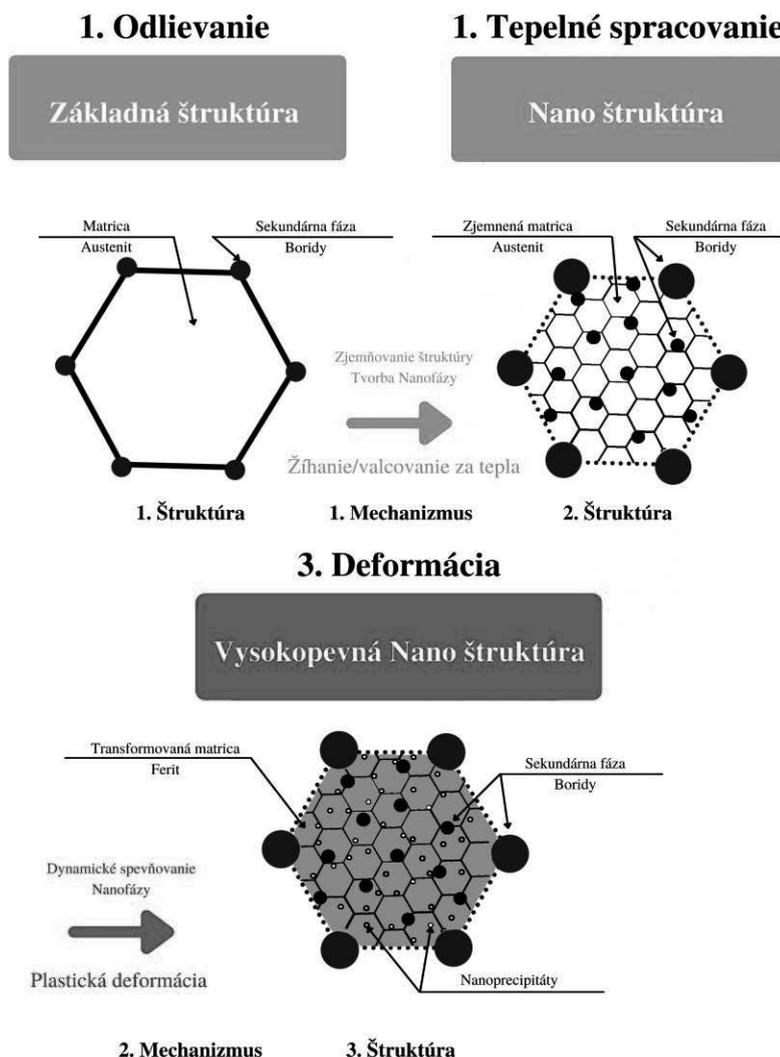
Obrázok 3. Konštrukcia karosérie automobilu Chevrolet Silverado [7]  
 Figure 3. The construction of Chevrolet silverdo automobile [7]

### 3. Vývoj tretej generácie AHS ocelí

Automobilový priemysel má neustále požiadavky na zvyšovanie kvality a úžitkovosti svojich automobilov. A tak stále skúmajú možnosti ako zmenšiť hrúbky plechov a zároveň opäť zvýšiť pevnosť materiálu. Takisto výrobcovia ocelí majú obrovskú konkurenciu v podobe ľahkých materiálov ako sú hliníkové a horčíkové zliatiny, plasty a kompozity. Preto musia výrobcovia ocelí vyvíjať nové druhý ocelí (obr. 4), ktoré spĺňajú kritéria od



výrobcov automobilov. Cieľom je vyskúmať pevnejšie, kvalitnejšie, húževnatejšie a ľahšie ocele tak, aby zachovali pevnosť materiálu no znížila sa hrúbka [3].



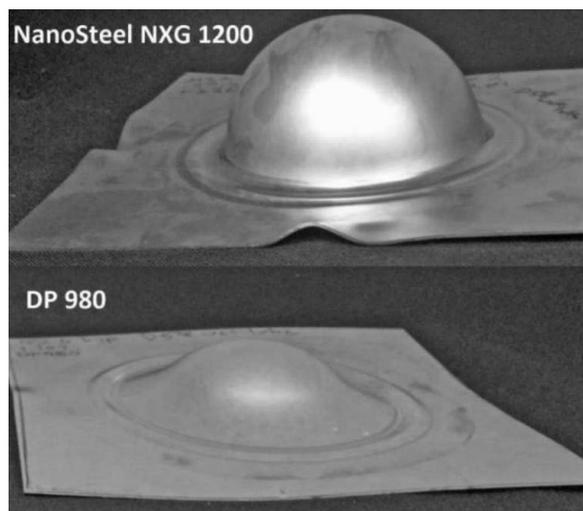
Obrázok 4. Vývoj štruktúry tretej generácie AHS ocele [8]

Figure 4. Development of the structure of the third generation of AHS steel [8]

Spoločnosť NanoSteel (Providence, Rhode Island, Spojené štáty americké) sa od roku 2009 zaoberá predovšetkým vývojom tretej generácie AHS ocelí, na ktorom sa podieľa aj spoločnosť AK Steel (Cincinnati, Ohio, Spojené štáty americké). Cieľom vývoja je vysokopevná oceľ so zvýšenou pevnosťou a tvárnosťou. Od roku 2016 začala produkcia ocele NanoSteel NXG 1200, pevnosť v ťahu tejto ocele dosahuje až 1200 MPa, hodnota ťažnosti je 50 %. Štruktúra tejto ocele pozostáva z feritickej matrice, sekundárnej fázy, boridov a nanoprecipitátov [8]. Pri vyhodnocovaní bodového zvarovania pri tomto materiáli je kľúčovou vlastnosťou jeho schopnosť spájania sa s inými materiálmi. Tvrdosť (hodnotená podľa Vickersa) v TOO je v prípade ocele NXG 1200 relatívne nezmenená. V prípade ocele DP 980 je vidieť aj nepravidelný rozptyl výsledkov tvrdosti, čo v prípade ocele NXG 1200

neplatí. To môže byť spôsobené práve vďaka jemnosti mikroštruktúry. Tak isto aj pri DP oceliach dochádza k výraznej zmene tvrdostí pri prechode zo zvarového kovu do TOO. Pričom pre NXG 1200 je tento prechod medzi zvarovým kovom a TOO plynulý čo môže predstavovať lepšie mechanické vlastnosti [8].

Nevýhodou 1. a 2. generácie AHS ocelí je ich nízka ťažnosť. Preto sa pri tretej generácii zamerali aj na tento fakt a vytvorili materiál s lepšou tvárnosťou. Porovnávajúcu skúšku tvárnosti vykonala spoločnosť AK Steel za pomoci hydraulického dvojsočím ťahom (obr. 5). Na obr. 5 je vidieť, že v porovnaní s DP oceľou má NXG 1200 oveľa lepšiu tvárnosť. Hrúbka plechov u oboch materiálov bola 1,4 mm. Najväčšia hĺbka vtlačku pri DP 980 ocele bola 28,1 mm; pri NXG 1200 bola hĺbka vtlačku až 51,1 mm, čo predstavuje až 54 % nárast oproti oceli DP 980. Približná pevnosť v ťahu DP ocele bola 1050 MPa a ťažnosť A = 11 % [8].



Obrázok 5. Porovnanie skúšky tvárnosti ocele NanoSteel NXG 1200 a DP 980 [8]

Figure 5. Comparison of ductility test made of NanoSteel NXG 1200 and DP 980 steel [8]

## 6. Záver

Motiváciou k zvoleniu témy preberanej v článku bol veľký záujem automobilového priemyslu o nové vývojové materiály. Cieľom bolo spracovať literárnu rešerš zameranú na progresívne vysokopevné ocele využívané v automobilovom priemysle a analýzu teplom ovplyvnenej oblasti, vznikajúcu počas procesu zvarovania.

### Podakovanie

Článok bol riešený ako súčasť projektu KEGA 016ŽU-4/2020 s názvom „Zvýšenie kvality a inovácia vzdelávania v bakalárskych študijných programoch na Sjf UNIZA“. Dielo vzniklo ako súčasť projektovo orientovaného vzdelávania - PBL, v súťaži V v rámci programu Iniciatíva excelentnosti – Politechnika Śląska, Gliwice.

## LITERATÚRA

1. P. Skočovský, a kol, Náuka o materiáli. Žilina: EDIS, 2015. ISBN 978-80-554-1071-5

2. A. Vaško, a kol., Vlastnosti a použitie materiálov. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2009. 96 s. ISBN 978-80-554-0102-7.
3. D. J. Brnagan, NanoSteel 3rd Generation AHSS: Auto Evaluation and Technology Expansion. [Online] <http://www.autosteel.org/~media/Files/Autosteel/Great%20Designs%20in%20Steel/GDIS%202014/Daniel%20Branagan%20-%20NanoSteel.pdf>
4. Europa. Air quality in Europe - 2020 report. [Online] <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report>
5. Y. D. Mamoud, Advanced High-Strength steels - Science, Technology, and Applications, 2013, ASM International ISBN 978-1-62708-005-7 str. 60-62, 160-165.
6. Steel Versus Aluminium: Who's Winning the Lightweighting Battle In Cars? <https://aluminiuminsider.com/steel-versus-aluminium-whos-winning-lightweighting-battle-cars/>
7. Boronextrication, Chevrolet Silverado; Steel and Aluminium? [Online] <http://www.boronextrication.com/2018/03/23/2019-chevrolet-silverado-steel-and-aluminum/>
8. P. Mulidrán, a kol., Vývoj nových a inovovaných tried ocelí používaných na výrobu karosérie automobilu. [Online] <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/35-2017/pdf/026-029.pdf>

## Bezpieczeństwo pracy i ergonomia na stanowisku robotyka

D. Sobecka<sup>a</sup>, A. Kania<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Studentka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych  
email: kruzolek.dominika@gmail.com

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

**Streszczenie:** W artykule omówiono ryzyko zawodowe oraz wybrane metody oceny ryzyka zawodowego. Scharakteryzowano ergonomię. Przedstawiono przykładowe zagrożenia występujące na stanowisku robotyka, następnie dokonano ich oceny metodami Risk Score i FMEA. Kolejno, przeprowadzono ocenę ergonomicznych czynników ryzyka metodą OWAS.

**Abstract:** The article discusses occupational risk and selected methods of occupational risk assessment. Ergonomics was characterized. The article presents examples of hazards occurring in the position of a robotics, then their assessment using the Risk Score and FMEA methods was made. Next, ergonomic risk factors using the OWAS method were assessed.

**Słowa kluczowe:** ocena ryzyka zawodowego, FMEA, Risk Score, ergonomia, OWAS, stanowisko robotyka

### 1. WSTĘP

Ryzyko zawodowe określa się jako związek przyczynowo-skutkowy, powodujący niepożądane zjawiska zdrowotne u pracowników. Jedną z definicji ryzyka można znaleźć w rozporządzeniu Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy, zgodnie, z którym ryzyko to „prawdopodobieństwo wystąpienia niepożądanych zdarzeń związanych z wykonywaną pracą powodujących straty, w szczególności wystąpienia u pracowników niekorzystnych skutków zdrowotnych w wyniku zagrożeń zawodowych występujących w środowisku pracy lub sposobu wykonywania pracy” [1]. Każde stanowisko pracy jest obciążone ryzykiem, dlatego wymaga ono szerszych analiz, w celu zapobiegania i poprawy warunków pracy. Obowiązek zapewnienia bezpieczeństwa leży po stronie pracodawcy, którego zobowiązuje do tego kodeks pracy.

Dokonując analizy stanowiska pracy trzeba, przede wszystkim, dokładnie zidentyfikować zagrożenia i ich źródła. Należy także ustalić, z jakim prawdopodobieństwem zagrożenia mogą

wystąpić oraz, jakie konsekwencje za sobą niosą. Wszystkie te działania składają się na ocenę ryzyka zawodowego [2].

W praktyce stosuje się wiele metod oceny ryzyka zawodowego, są to m.in. Risk Score, FMEA (ang. Failure Mode and Effects Analysis), JSA (ang. Job Safety Analysis) czy PN-N-18002. Stosowane metody różnią się zazwyczaj parametrami wykorzystywanymi do oceny ryzyka i ich wartościami [2].

## 2. WYBRANE METODY OCENY RYZYKA ZAWODOWEGO

Wskaźnikowa metoda Risk Score należy do indukcyjnych metod jakościowej oceny ryzyka zawodowego. Jest jedną z najpopularniejszych i najchętniej wybieranych metod oceny ryzyka zawodowego, dzięki w miarę prostej interpretacji wyników. Metoda Risk Score stosowana jest do oceny stanowisk i procesów pracy, w których następuje częsta zmiana ekspozycji zatrudnionych na czynniki środowiska pracy (np. wibracje, hałas, itd.). Wielkość ryzyka zawodowego określają trzy parametry: prawdopodobieństwo wystąpienia niepożądanego zdarzenia (P), ekspozycja na zagrożenie (E) oraz skutki (S), jakie za sobą niesie [3] Wielkość ryzyka (R) jest iloczynem wyżej wspomnianych parametrów [4].

Po oszacowaniu ryzyka sprawdza się, w jakim przedziale wartości ryzyka zagrożenie się znajduje oraz do jakiej kategorii przynależy. Kategorie ryzyka oraz jego wartości wraz z przedziałami przedstawiono w tabeli 1 [4].

Tabela 1. Kategorie ryzyka zgodnie z metodą Risk Score [4]

Table 1. Risk categories according to Risk Score method [4]

Kategoria ryzyka	Wartość ryzyka	Działania zapobiegawcze
Bardzo małe	$R \leq 20$	Wskazana kontrola
Małe	$20 < R \leq 70$	Potrzebna kontrola
Średnie	$70 < R \leq 200$	Potrzebna kontrola
Duże	$200 < R \leq 400$	Potrzebna natychmiastowa poprawa
Bardzo duże	$R > 400$	Wskazane wstrzymanie pracy

Kolejną metodą oceny ryzyka zawodowego jest jakościowa metoda FMEA. Ma na celu analizę związków przyczynowo-skutkowych powstania potencjalnych wad i ich przyczyn, a następnie eliminację lub minimalizację ryzyka ich wystąpienia. Zmniejszenie lub całkowita redukcja ryzyka wystąpienia błędów może nastąpić poprzez zastosowanie odpowiednich działań korygujących i zapobiegawczych [5].

Wynik oceny ryzyka, oznaczony symbolem WPR (WPR – wskaźnik priorytetu ryzyka) jest iloczynem trzech parametrów: prawdopodobieństwa wystąpienia wady (P), jej znaczenia dla klienta (S) oraz możliwości wykrycia (W). Wskaźniki R, Z oraz W określane są w skali od 1 do 10.

Po określeniu wyżej wymienionych parametrów, można przystąpić do wyznaczenia ryzyka związanego z zagrożeniem, stosując poniższy wzór (1) [5]:

$$WPR = S \cdot P \cdot W \quad (1)$$

### 3. ERGONOMIA STANOWISKA PRACY

Ergonomia to dyscyplina naukowa, która zajmuje się dostosowaniem pracy do możliwości psychofizycznych człowieka. Ma humanizować pracę poprzez taką organizację układu człowiek-maszyna-otoczenie, aby praca była wykonywana przy możliwie niskim koszcie biologicznym i efektywnie, co można uzyskać przez eliminację źródeł chorób zawodowych. Według Międzynarodowego Stowarzyszenia Ergonomicznego, ergonomia „to dyscyplina naukowa zajmująca się badaniem interakcji zachodzących między ludźmi i pozostałymi elementami systemu” [6].

Wyróżnia się dwa główne kierunki działania ergonomii [7]:

- ergonomię korekcyjną – analizuje istniejące stanowiska pracy pod względem dostosowania ich do psychofizycznych możliwości pracowników, a następnie formułuje zalecenia, które mają polepszyć warunki pracy,
- ergonomię koncepcyjną – ma na celu projektowanie narzędzi, maszyn i urządzeń oraz całego przedsiębiorstwa, aby spełnione zostały podstawowe wymagania ergonomii.

Oba rodzaje ergonomii wzajemnie uzupełniają się.

Jedną z metod służących identyfikacji ergonomicznych czynników ryzyka jest metoda OWAS (Ovako Working Posture Analysis System). Została opracowana do oceny narażenia na ryzyko związane z chorobami układu mięśniowo-szkieletowego (MSD – musculoskeletal disorders), dotyczące postawy pracownika podczas wykonywanej pracy. OWAS ma identyfikować, a także wskazywać działania korygujące, co wyrażone jest przez kategorie oceny. Głównym celem oceny jest ujawnienie i korekta niepożądanego położenia. Ocenie podlegają stanowiska, na których wykonuje się różnorodne czynności robocze [8].

Ocena obciążenia statycznego metodą OWAS składa się z następujących etapów [8]:

- a) wybranie czynności przeważających w ciągu zmiany roboczej,
- b) ustalenie kodu danej pozycji przy pracy,
- c) odczytanie kategorii oceny stanowiska pracy,
- d) odczytanie opisu kategorii obciążenia statycznego,
- e) określenie obciążenia na podstawie wyników.

### 4. OCENA RYZYKA ZAWODOWEGO ORAZ ERGONOMII NA STANOWISKU ROBOTYKA

#### 4.1. Charakterystyka stanowiska pracy

Pracownik na stanowisku robotyka realizuje prace z zakresu programowania robotów, zgodnie z wymaganiami klienta. Robotyk powinien cechować się, m.in. podstawową wiedzą z zakresu programowania, umiejętnością logicznego i abstrakcyjnego myślenia, uzdolnieniami technicznymi, wyobraźnią przestrzenną, znajomością języków obcych, znajomością nowych technologii, cierpliwością, dokładnością, gotowością do wyjazdów służbowych.

Do podstawowych zadań wykonywanych na analizowanym stanowisku pracy zalicza się:

- opracowanie zautomatyzowanych rozwiązań, które mają na celu zwiększenie wydajności procesów przemysłowych (np. zmniejszenie czasu cyklu pracy robota, w celu zwiększenia liczby produkowanych części na godzinę),
- monitorowanie pracy robotów,
- doskonalenie bieżących rozwiązań przemysłowych,
- diagnozowanie i usuwanie wszelkich błędów,
- jakościową optymalizację procesu,

- wsparcie produkcji.

Głównym narzędziem pracownika jest panel operatorski, który jest połączony z szafą sterowniczą danego modelu robota.

#### 4.2. Identyfikacja wybranych zagrożeń na stanowisku robotyka

W tabeli 2 przedstawiono wybrane zagrożenia zidentyfikowane na stanowisku pracy robotyka, potencjalne źródła zagrożeń oraz ich skutki.

Tabela 2. Zagrożenia na stanowisku robotyka

Table 2. Hazards at the workplace of a robotics

Lp.	Potencjalne zagrożenia	Źródło zagrożenia	Możliwe skutki zagrożenia
1.	Zagrożenie związane z elementami ostrymi i wystającymi	Roboty lub inne narzędzia znajdujące się w obrębie robota	Skaleczenia, przecięcia, rany, otarcia, ciężki uraz skóry lub błon śluzowych, śmierć
2.	Uderzenie przez spadające przedmioty	Części umieszczone w chwytaku (element robota)	Skaleczenia, kalectwo, przecięcia, otarcia, ciężki uraz skóry lub błon śluzowych, śmierć
3.	Przeciążenie narządu wzroku	Niewłaściwe oświetlenie, praca przy monitorze lub panelu operatorskim	Przeciążenie zmysłu wzroku, ból oczu, łzawienie, podrażnienie wzroku, bóle głowy, zmęczenie
4.	Hałas	Emitowany przez urządzenia i maszyny pracujące na hali	Uszkodzenie zmysłu słuchu, bóle głowy, rozdrażnienie, zawroty głowy, reakcja układu krwionośnego skutkująca skurczeniem się naczyń krwionośnych, bezsenność, nerwica, depresja

#### 4.3. Ocena ryzyka zawodowego na stanowisku robotyka metodami FMEA i Risk Score

Ocena ryzyka zawodowego na stanowisku robotyka, wykonana metodą FMEA, została przedstawiona w tabeli 3 [5].

Tabela 3. Ocena ryzyka zawodowego na stanowisku robotyka metodą FMEA

Table 3. Risk assessment for the position of robotics using the FMEA method

Lp.	Potencjalne zagrożenie	Potencjalne przyczyny zagrożenia	S	P	W	WPR	Zalecane działania
1.	Zagrożenia elementami ostrymi i wystającymi	Elementy robotów lub innych narzędzi znajdujące się w obrębie robota	7	8	6	<b>336</b>	Zachowanie odpowiedniej odległości od elementów wystających i ostrych, stosowanie przydzielonej odzieży roboczej, oznakowanie elementów ostrych i wystających

2.	Uderzenie przez spadające przedmioty	Części umieszczone w chwytaku, elementy robota	10	2	8	<b>160</b>	Stosowanie kasku ochronnego, zachowanie ostrożności, stosowanie się do instrukcji stanowiskowej
3.	Przeciążenie narządu wzroku	Odpryski podczas zgrzewania, praca przy monitorze lub panelu operatorskim	6	9	3	<b>162</b>	Stosowanie okularów ochronnych przeciwoodpryskowych oraz przerw w pracy, zapewnienie pracownikom urządzeń z regulacją jasności ekranu
4.	Hałas	Emitowany przez urządzenia i maszyny pracujące na hali	8	8	4	<b>256</b>	Zredukowanie poziomu dźwięku tak, aby był on poniżej NDN (najwyższego dopuszczalnego natężenia), stosowanie sprzętu ochrony słuchu (zatyczek do uszu)

Uwzględniając otrzymane wyniki oceny można zauważyć, że najwyższą wartość ryzyka (WPR) równą 336, otrzymano dla zagrożenia związanego z elementami ostrymi i wystającymi.

Wysoki poziom ryzyka wyznaczono również dla zagrożenia emisją hałasu. Wskaźnik WPR wynosi w tym przypadku 256. Wśród działań korygujących zalecono zredukowanie poziomu dźwięku poniżej wartości NDN oraz stosowanie ochrony słuchu. Propozycją mogą być jednorazowe zatyczki uvex x-fit firmy Uvex. Zapewniają one 37 dB izolacji akustycznej oraz spełniają normę EN 352-2.

Najniższą wartość ryzyka (WPR = 160) uzyskano dla zagrożenia – uderzenie przez spadające przedmioty. Zaleca się tutaj stosowanie kasku ochronnego oraz zachowanie ostrożności znajdując się w pobliżu części umieszczonych w chwytaku robota.

Drugą wybraną metodą do oceny ryzyka na stanowisku robotyka jest metoda Risk Score (Tabela 4).

Tabela 4. Ocena ryzyka na stanowisku robotyka metodą Risk Score

Table 4. Risk assessment for the position of robotics using the Risk Score method

L p.	Nazwa zagrożenia	S	E	P	R	Kategoria ryzyka
1.	Zagrożenia elementami ostrymi i wystającymi	7	6	6	<b>252</b>	Duże
		Ciężkie uszkodzenie ciała	Częsta	Całkiem możliwe		Potrzebna natychmiastowa poprawa
2.	Uderzenie przez spadające przedmioty	15	6	1	<b>90</b>	Średnie
		Jedna ofiara śmiertelna	Częsta	Mało prawdopodobne		Potrzebna kontrola
3.	Przeciążenie narządu wzroku	3	6	10	<b>180</b>	Średnie
		Absencja	Częsta	Bardzo prawdopodobne		Potrzebna kontrola



4.	Hałas	7	6	6	252	Duże
		Ciężkie uszkodzenie ciała	Częsta	Całkiem możliwe		Potrzebna natychmiastowa poprawa

Najwyższą wartość ryzyka R, równą 252 uzyskano dla zagrożenia związanego z elementami ostrymi i wystającymi oraz emisją hałasu. Zagrożenia te znajdują się w kategorii ryzyka „duże”. Skutkiem zdarzenia może być ciężkie uszkodzenie ciała.

Natomiast najniższą wartość,  $R = 90$ , wyznaczono dla zagrożenia – uderzenie przez spadające przedmioty. Znajduje się ono w kategorii ryzyka „średnie” i nie wymaga natychmiastowej poprawy. Wystąpienie zdarzenia jest mało prawdopodobne.

#### 4.4. Ocena ergonomicznych czynników ryzyka metodą OWAS

W dalszej części dokonano oceny obciążenia statycznego robotyka metodą OWAS. Czynność – pozycjonowanie ruchów robota – oceniona została dwa razy, z uwagi na wykonywanie jej w różnych pozycjach ciała (Tabela 5).

Tabela 5. Ocena ergonomicznych czynników ryzyka metodą OWAS

Table 5. Assessment of ergonomic risk factors using the OWAS method

Lp.	Czynność	Czas trwania (min)	Kod pozycji	Kategoria obciążenia	Czas utrzymania pozycji podczas zmiany (%)
1.	Pozycjonowanie robota – pracownik w pozycji klęczącej	20	4261	4	4,16
2.	Pozycjonowanie robota – pracownik w pozycji stojącej	220	1121	1	45,83
3.	Przerwa	30	1111	1	6,25
4.	Monitorowanie pracy robotów	210	1121	1	43,75

Ocena ergonomicznych czynników ryzyka wykazała dwie kategorie obciążenia statycznego – pierwszą i czwartą – na stanowisku robotyka. Większość wykonywanych czynności w analizowanym dniu pracy zalicza się do kategorii pierwszej. Oznacza to, że pozycje przyjmowane w trakcie wykonywania pracy są naturalne, obciążenie jest akceptowalne i zmiany na stanowisku pracy nie są konieczne.

Do kategorii czwartej zakwalifikowano czynność – pozycjonowanie robota. Pracownik wykonuje zadanie w pozycji klęczącej. Przyjmowana pozycja ma bardzo negatywny wpływ na układ mięśniowo-szkieletowy, nawet jeśli utrzymywana jest w bardzo krótkim czasie. Obciążenie statyczne jest średnie, a czas utrzymania pozycji wynosi poniżej 30% ośmiogodzinnego dnia pracy.

## 5. PODSUMOWANIE

W artykule poddano analizie stanowisko pracy robotyka. W pierwszej kolejności zidentyfikowano potencjalne zagrożenia na tym stanowisku pracy. Następnie oceniono ryzyko zawodowe, wykorzystując w tym celu dwie wybrane metody – FMEA oraz Risk Score. Następnie wykonano ocenę ergonomicznych czynników ryzyka metodą OWAS.

Na rysunku 1 przedstawiono wykres poziomów ryzyka dla zidentyfikowanych zagrożeń na stanowisku robotyka, za pomocą którego porównano otrzymane wyniki oceny uzyskane metodami FMEA i Risk Score.



Rysunek 1. Porównanie poziomów ryzyka dla zidentyfikowanych zagrożeń za pomocą metod FMEA i Risk Score

*Figure 1. Comparison of risk levels for identified hazards using the FMEA and Risk Score methods*

Ocena ryzyka zawodowego wybranymi metodami wykazała, że największe ryzyko dotyczy zagrożeń związanych z elementami ostrymi i wystającymi oraz emisją hałasu. Zagrożenia te znajdują się w najwyższych kategoriach ryzyka, a wykonywane czynności wymagają natychmiastowych zmian. Pozostałe zagrożenia wymagają jedynie kontroli.

Natomiast ocena ergonomicznych czynników ryzyka wskazała dwie kategorie obciążenia statycznego – pierwszą i czwartą. Większość czynności wykonywanych przez pracownika nie wpływa negatywnie na jego zdrowie. Znajdują się one w pierwszej kategorii obciążenia statycznego. Przyjmowane pozycje podczas wykonywania zadań są naturalne a zmiany na stanowisku pracy nie są wymagane.

## LITERATURA

1. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (Dz. U. 1997 nr 129 poz. 844).
2. M. Krause, Praktyczne aspekty doboru metod oceny ryzyka zawodowego, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Organizacja i Zarządzanie 59 (2011) 178-183.
3. E. Górka, A. Kossobudzka-Górka, Ocena ryzyka zawodowego, współczesne i przyszłe wyzwania ergonomii, Oficyna Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej (2011) 5-7.
4. Krótka charakterystyka wybranych metod oceny ryzyka (z przykładami zastosowań), <https://www.pip.gov.pl/pl/bhp/ocena-ryzyka-zawodowego/o-ocenie-ryzyka->

- zawodowego/6264,krotka-charakterystyka-wybranych-metod-oceny-ryzyka-z-przykladami-zastosowan-.html, 2022.
5. A. Folejewska, Analiza FMEA – zasady, komentarze, arkusze, Wydawnictwo Verlag Dashofer Sp. z o.o., Warszawa, 2010.
  6. W. Nowacka, Ergonomia i ergonomiczne projektowanie stanowisk pracy, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2010.
  7. European Agency for Safety and Health at Work, Third European Survey of Enterprises on New and Emerging Risks (ESENER 3) (2019) 1-3.
  8. D. Roman-Liu, T. Tokarski, Ocena obciążenia statystycznego z zastosowaniem metody OWAS, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy 7-8 (2010) 28-31.



## **Analiza mikrostruktury złącza spawanego ze stali P92 po 3000 godzin wyżarzania w temperaturze 600°C oraz 650°C**

K. Sówka<sup>a,b</sup>, M. Sroka<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Politechnika Śląska, Szkoła Doktorów, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych.

email: karol.sowka@polsl.pl

<sup>b</sup> Zakłady Remontowe Energetyki Katowice S.A.

email: karol.sowka@zre.com.pl

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

email: marek.sroka@polsl.pl

**Streszczenie:** Stal P92 (X10CrWMoVNb9-2) jest stosowana na elementy wysokociśnieniowe nowoczesnych bloków energetycznych na nadkrytyczne parametry pary. Przedstawiono wyniki badań mikrostruktury oraz twardości jednoimiennego złącza spawanego ze stali T/P92 po 3000 h długotrwałego starzenia w temperaturze 600°C oraz 650°C. Porównano twardość materiału w odniesieniu do obrazów mikrostruktury w stanie wyjściowym oraz po starzeniu. Badania mikrostruktury wykonano przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego.

**Abstract:** P92 (X10CrWMoVNb9-2) steel material is used for high-pressure parts of nowadays power units for supercritical boiler steam parameters. The paper present results of microstructure and hardness testing of P92 similar welded joint after 3000h of aging at 600°C and 3000h of aging at 650°C. The hardness of the material was compared in relation to the microstructure images in the initial state and after aging. The microstructure tests were carried out a scanning electron microscope.

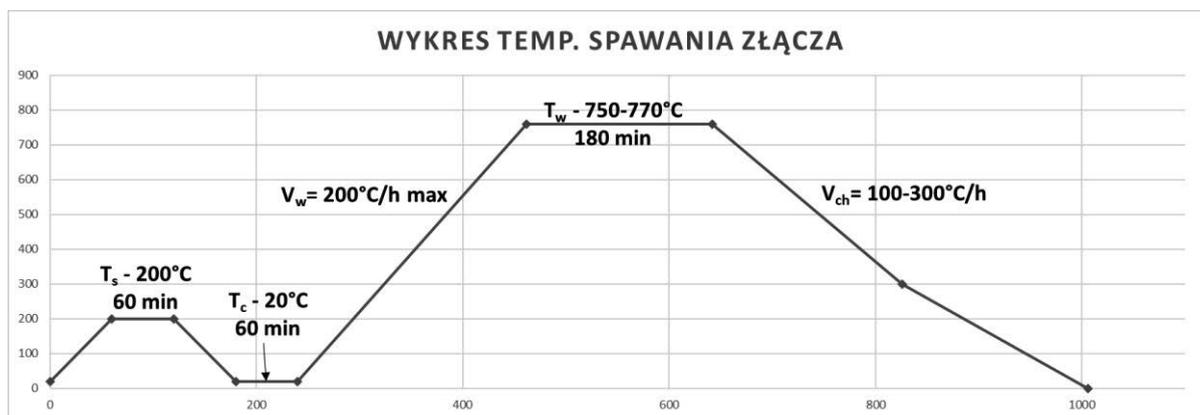
**Słowa kluczowe:** stal P92 (X10CrWMoVNb9-2), złącze spawane jednoimienne, mikrostruktura, twardość, starzenie.

**Keywords:** X10CrWMoVNb9-2 (P92) steel, similar welded joint, microstructure, hardness, aging.

### **1. WSTĘP**

Zrealizowane w przeciągu ostatnich lat inwestycje w postaci bloków energetycznych na nadkrytyczne parametry pary powodują konieczność przeprowadzenia analiz oraz badań niezbędnych do określenia wytrzymałości poszczególnych elementów ciśnieniowych omawianych jednostek energetycznych. Zatem nieodzownym staje się poznanie szeregu





Tablica 1. Parametry spawania badanego złącza oraz obróbki cieplnej po spawaniu ( $T_s$ - temp. spawania,  $T_c$ - temp. schłodzenia,  $V_w$ - szybkość podgrzewania do OC,  $T_w$ -temp. wytrzymania,  $V_{ch}$ - szybkość chłodzenia)

Table 1. Welding parameters of welding and PWHT process ( $T_s$ - welding temperature,  $T_c$ - cooling temperature,  $V_w$ - heating rate to OC,  $T_w$ -holding temperature,  $V_{ch}$ - cooling rate)

Skład chemiczny materiałów użytych do spawania złącza (wt-%)											
Norma materiałowa	Gatunek	C	Si	Mn	P max	S max	Nb	Ti	V	Zr	
PN-EN 10216-2: Rury stalowe bez szwu do zastosowań ciśnieniowych	X10CrWMoVNb9-2 1.4901	0,07 to 0,13	≤ 0,50	0,30 to 0,60	0,02	0,01	0,04 to 0,09	0,01 max	0,15 to 0,25	0,01 max	
		Cr	Mo	Ni	N	B	Al tot	Cu	W		
		8,5 to 9,5	0,30 to 0,60	≤ 0,40	0,030 to 0,070	0,001 to 0,006	≤ 0,02	-	1,50 to 2,00		
Norma materiałowa	Gatunek	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Nb	W	N
PN-EN ISO 3580: Materiały dodatkowe do spawania - elektrody otulone dla stali odpornych na pękanie	X10CrWMoVNb9-2 1.4901	0,10	0,30	0,50	8,60	0,50	0,40	0,20	0,05	1,50	0,05
Material norm	Gatunek	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	W	V	N	Nb
PN-EN ISO 21952: Materiały dodatkowe do spawania - druty, pręty i stopy dla stali odpornych na pękanie	X10CrWMoVNb9-2 1.4901	0,10	0,30	0,70	8,60	0,55	0,70	1,60	0,20	0,04	0,04

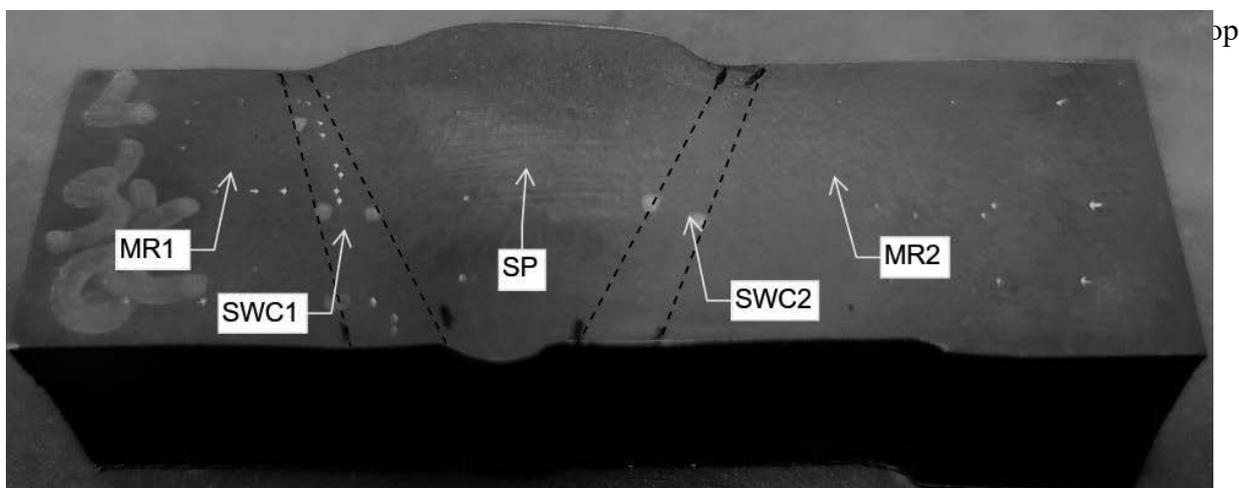
Tablica 2. Skład chemiczny materiałów użytych do wykonania złącza (wg PN-EN 10216-2, PN-EN ISO 3580, PN-EN ISO 21952)

Table 2. Chemical composition of materials used for preparing welding seam (acc.to PN-EN10216-2, PN-EN ISO 3580, PN-EN ISO 21952)

### 3. METODOLOGIA BADAŃ

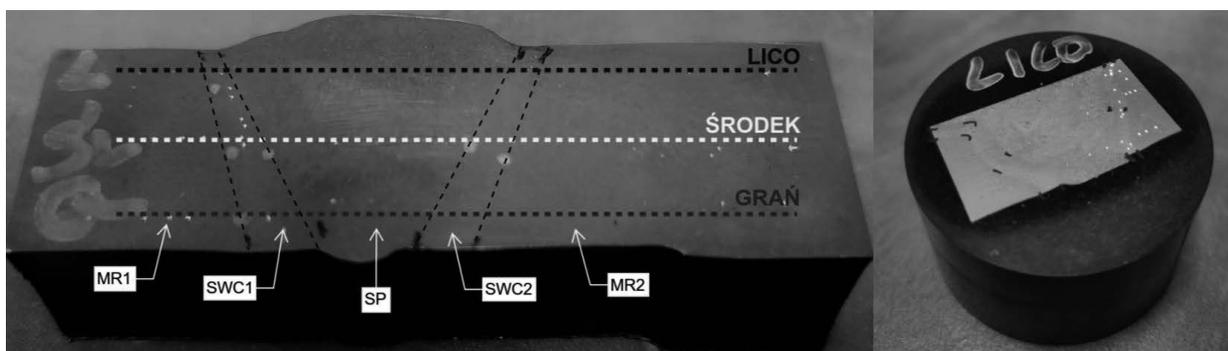
Celem badań jest porównanie próbek pod kątem mikrostruktury oraz twardości złącza spawanego w stanie wyjściowym oraz po symulacji pracy w warunkach wysokiej temperatury. Uzyskane złącza spawane pocięto na próbki, wykonano badania mikrostruktury, twardości oraz wyżarzanie przez 3000 h w temperaturze 600°C oraz 650°C.

Obserwacje mikrostruktury materiału przeprowadzono na zglądach metalograficznych z ujawnieniem stref złącza (rys. 2). Zglądy wykonano na przekroju poprzecznym wycinków złącza poprzez szlifowanie i polerowanie mechaniczne oraz trawienie. Badania mikrostruktury



Rysunek 2. Schemat obserwacji mikrostruktury złącza  
*Figure 2. Scheme for microstructure testing*

Badania twardości wykonano przy użyciu twardościomierza stacjonarnego Future-Tech FM-700 w odniesieniu do skali HV10. Twardości mierzono na zglądzie złącza, obejmując wszystkie strefy po obu stronach złącza spawanego, tj. materiału rodzimego (MR1 i MR2), strefy wpływu ciepła (SWC1 i SWC2) oraz spoiny (SP), w trzech przekrojach zgodnie ze schematem (Rysunek 2).



Rysunek 3. Schemat pomiaru twardości złącza spawanego oraz wycinek przygotowany do dalszych badań  
*Figure 3. Scheme for hardness measuring of welded joint and specimen prepared for further tests*

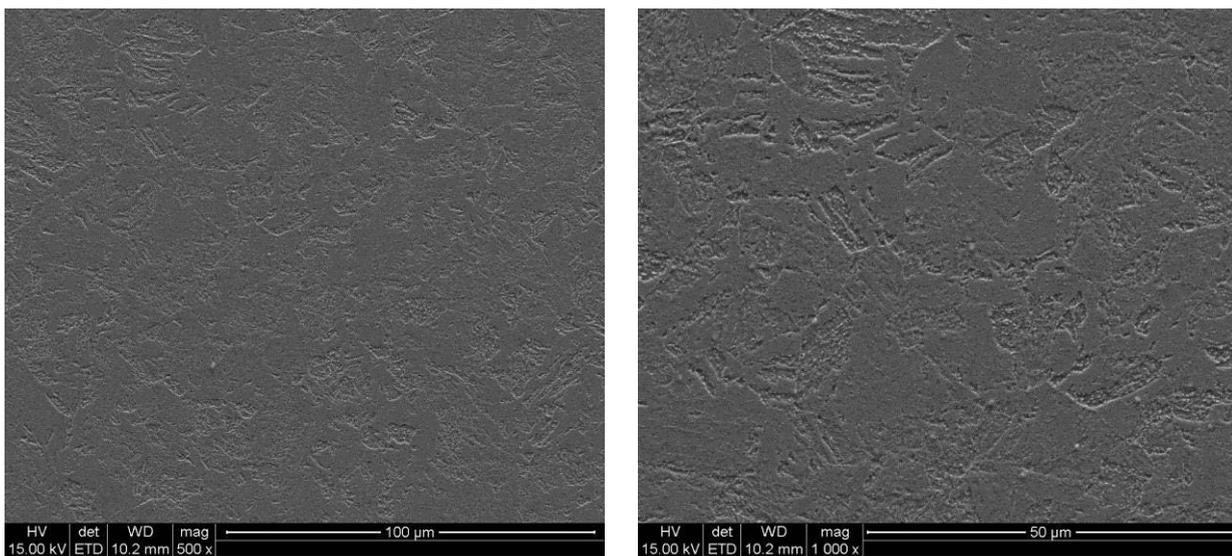
Starzenie próbek wykonano w piecach wielostrefowych produkcji własnej Łukasiewicz – Instytutu Metalurgii Żelaza, które umożliwiają prowadzenie badań w temperaturze od 550°C do 900°C. Dla omawianych próbek zastosowano wyżarzanie na poziomie 600°C przez 3000 h oraz 650°C przez 3000 h.

## 4. WYNIKI BADAŃ

### 4.1. Badania mikrostrukturalne

#### 4.1.1. Złącze spawane w stanie dostawy

Badania mikrostruktury jednoimiennego złącza spawanego podzielono na strefy zgodnie z przedstawionym schematem (rys. 2). Obserwacje materiału rodzimego dla obu stron złącza wykazały strukturę odpuszczonego martenzytu listwowego z bardzo drobnymi wydzieleniami typu  $M_{23}C_6$  po granicach ziaren byłego austenitu i listwach martenzytu, co jest charakterystyczne dla stanu wyjściowego badanej stali (rys. 4) [4].

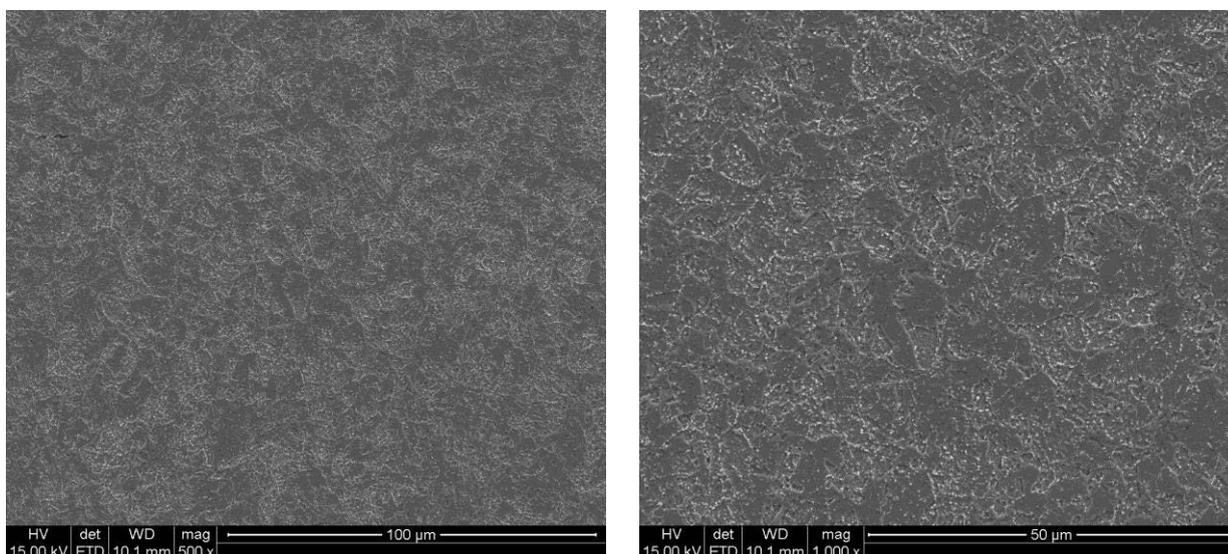


Rysunek 4. Mikrostruktura materiału rodzimego badanego złącza

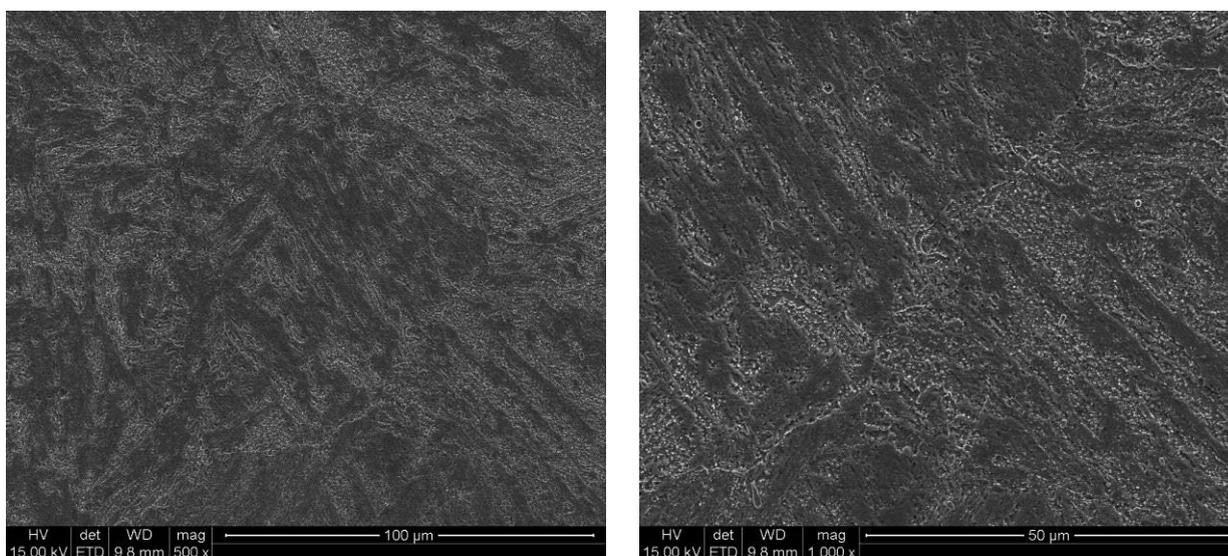
*Figure 4. Microstructure of the parent material MR1 and MR2 of tested joint*

Obserwacje strefy wpływu ciepła dla obu stron złącza SWC1 i SWC2 wykazały drobnoziarnistą mikrostrukturę odpuszczonego martenzytu z licznymi wydzieleniami na granicach ziaren byłego austenitu i listwach martenzytu. W badanej strefie nie stwierdzono nieciągłości i mikropęknięć w strukturze (rys. 5), podobnie jak dla strefy spoiny SP (rys.6).





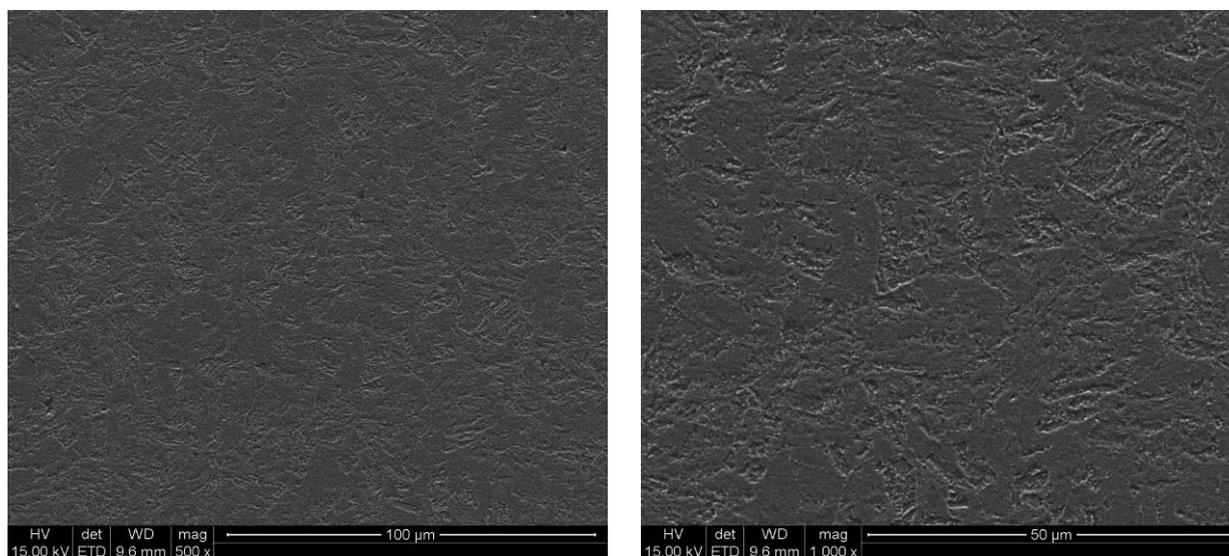
Rysunek 5. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła badanego złącza  
*Figure 5. Microstructure of the heat affected zone of tested joint*



Rysunek 6. Mikrostruktura strefy spoiny badanego złącza  
*Figure 6. Microstructure of the weld zone of tested joint*

#### 4.1.2. Złącze spawane po wyżarzaniu przez 3000 h w temperaturze 600°C

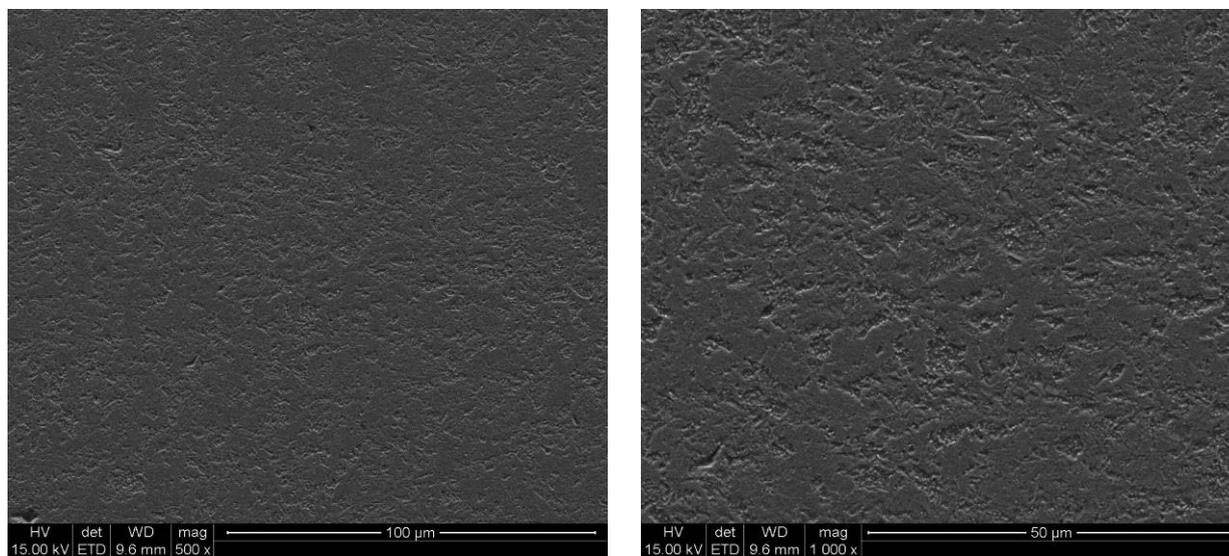
Badania mikrostruktury jednoimiennego złącza spawanego po wyżarzaniu w temperaturze 600°C również podzielono na strefy zgodnie z przedstawionym schematem na Rysunku 2. Obserwacje materiału rodzimego dla obu stron złącza przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego, wykazały bardzo zbliżoną strukturę do stanu wyjściowego tzn. strukturę odpuszczonego martenzytu listwowego z zauważalnym, jednakże bardzo nieznacznym wzrostem wielkości wydzielań, głównie po granicach ziaren byłego austenitu (rys. 7).



Rysunek 7. Mikrostruktura materiału rodzimego badanego złącza po wyżarzaniu przez 3000 h w temp. 600°C

*Figure 7. Microstructure of the parent material of tested joint after 3000 h of aging at 600°C*

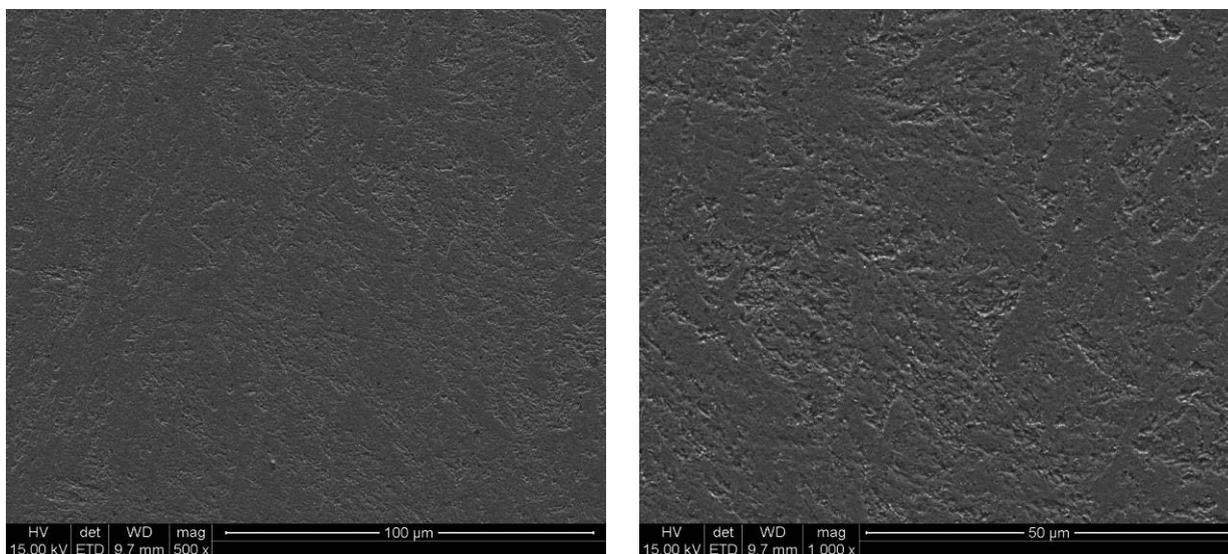
Obserwacje mikrostruktury dla obu stron strefy wpływu ciepła wykazały drobnoziarnistą mikrostrukturę odpuszczonego martenzytu z licznymi wydzieleniami na granicach ziaren byłego austenitu i listwach martenzytu, która nie odbiega obrazem od stanu wyjściowego w SWC badanego złącza spawanego (rys. 8).



Rysunek 8. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła badanego złącza po wyżarzaniu przez 3000h w temp. 600°C

*Figure 8. Microstructure of the heat affected zone of tested joint after 3000h of aging at 600°C*

Obserwacje mikrostruktury dla strefy spoiny nie wykazały zauważalnych zmian w obrazie struktury w odniesieniu do stanu wyjściowego spoiny (rys. 9).

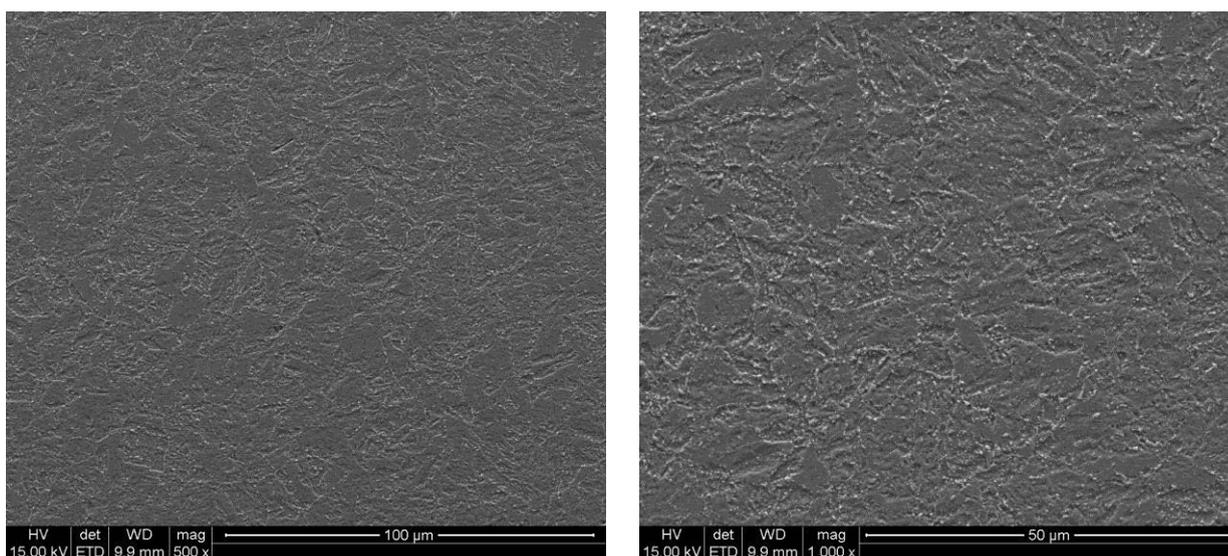


Rysunek 9. Mikrostruktura strefy spoiny badanego złącza po wyżarzaniu przez 3000h w temp. 600°C

*Figure 9. Microstructure of weld zone of tested joint after 3000h of aging at 600°C*

#### 4.1.3. Złącze spawane po wyżarzaniu przez 3000 h w temperaturze 650°C

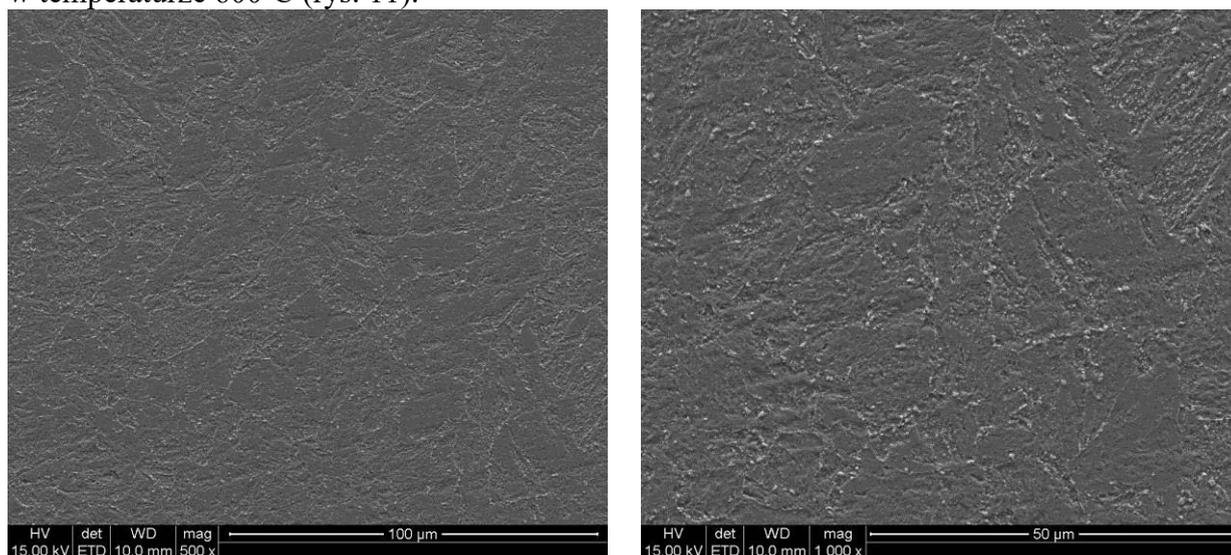
Badania mikrostruktury jednoimiennego złącza spawanego po wyżarzaniu w temperaturze 650°C również podzielono na strefy zgodnie z przedstawionym schematem na Rysunku 2. Obserwacje materiału rodzimego dla obu stron złącza wykazały zbliżoną strukturę do stanu wyjściowego tzn. strukturę odpuszczonego martenzytu listwowego z zauważalnym, nieznacznym wzrostem wielkości pojedynczych wydzieli, głównie po granicach ziaren byłego austenitu (rys. 10).



Rysunek 10. Mikrostruktura materiału rodzimego badanego złącza po wyżarzaniu przez 3000 h w temp. 650°C

*Figure 10. Microstructure of the parent material of tested joint after 3000 h of aging at 650°C*

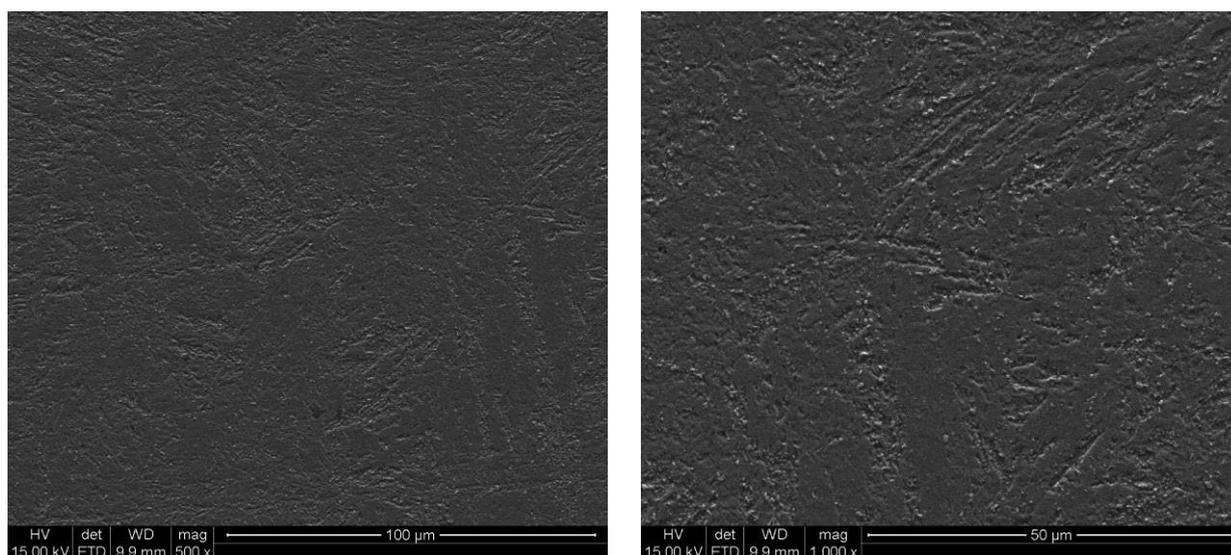
Obserwacje mikrostruktury dla obu stron strefy wpływu ciepła wykazały drobnoziarnistą mikrostrukturę odpuszczonego martenzytu z licznymi wydzieleniami na granicach ziaren byłego austenitu i listwach martenzytu. Zaobserwowano lokalnie wzrost wielkości pojedynczych wydzielań i ich koagulację w odniesieniu do stanu wyjściowego oraz wyżarzania w temperaturze 600°C (rys. 11).



Rysunek 11. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła badanego złącza po wyżarzaniu przez 3000h w temp. 650°C.

*Figure 11. Microstructure of the heat affected zone of tested joint after 3000h of aging at 650°C.*

Obserwacje mikrostruktury dla strefy spoiny wykazała, że wyżarzanie w temperaturze 650°C przez 3000 godzin przyczyniło się do zauważalnego wzrostu wielkości wydzielań oraz ich koagulacji (rys. 12).

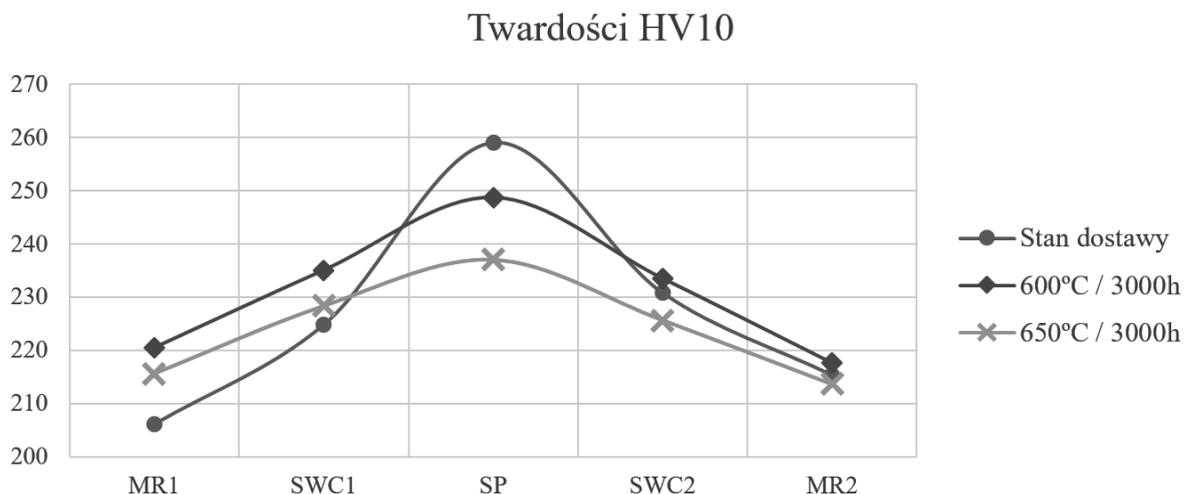


Rysunek 12. Mikrostruktura strefy spoiny badanego złącza po wyżarzaniu przez 3000h w temp. 650°C.

*Figure 12. Microstructure of weld zone of tested joint after 3000h of aging at 650°C.*

## 4.2. BADANIA TWARDOŚCI

Uśredniony rozkład twardości na przekrojach złącza dla stanu wyjściowego, złącza po wyżarzaniu przez 3000h w temperaturze 600°C oraz złącza po wyżarzaniu przez 3000 h w temperaturze 650°C pokazano na Rysunku 13.



Rysunek 13. Twardości HV10 złącza spawanego  
Figure 13. HV10 hardness of welded joint

Badania wykazały, że wraz z czasem oraz wzrostem temperatury wyżarzania obserwowano zauważalny spadek twardości w poszczególnych strefach badanego złącza spawanego ze stali P92.

## 5. WNIOSKI

Badania mikrostruktury złącza spawanego w stanie wyjściowym oraz po wyżarzaniu nie ujawniły obecności wad w postaci mikropęknięć i nieciągłości w poszczególnych strefach złącza spawanego, co świadczy o poprawnie przeprowadzonym procesie spawania.

Wyżarzanie przez 3000 godzin w temperaturze 600 i 650°C złącza spawanego wykonanego ze stali P92 wykazało, że w mikrostrukturze obserwowano zmiany w postaci procesów wydzieleniowych, głównie po granicach ziaren byłego austenitu i listwach martenzytu. Dynamika procesu wydzieleniowego jest zauważalnie większa w temperaturze wyżarzania 650°C.

Badania twardości HV10 wykazały spadek twardości poszczególnych stref złącza spawanego po wyżarzaniu, zwłaszcza w temperaturze 650°C. Potwierdza to szybkość procesu wydzielenia faz wtórnych wraz ze wzrostem temperatury wyżarzania.

## LITERATURA

1. Dobrzański J., Zieliński A., Hernas A.: Struktura i własności nowych stali żarowytrzymałych o osnowie ferrytycznej, Materiały i Technologie do budowy kotłów

- nadkrytycznych i spalarni odpadów, Praca zbiorowa pod redakcją A. Hernasa, Katowice 2009, s. 48-49.
2. Dobrzański J., Hernas A., Pasternak J., Zieliński A.: Microstructure and mechanical properties characteristics of welded joints made of creep-resistant steel with 12%Cr, V, W and Co additions. Fifth International Conference on Advances in Material Technology for Fossil Power Plants. Marco Island, Florida USA. EPRI, 3-5 October 2007.
  3. Golański G., Zielińska-Lipiec A., Zieliński A., Urbańczyk P., Słania J., Wpływ długotrwałej eksploatacji na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne stali T91. W: Bloki o nadkrytycznych parametrach pracy. Nowe materiały hutnicze, technologie wykonania, procesy degradacji oraz ocena trwałości elementów ciśnieniowych kotła, Bełchatów 2015, s.151-158.
  4. Zieliński, A. (2016). Trwałość eksploatacyjna żarowytrzymałych stali o osnowie ferrytycznej w warunkach długotrwałego oddziaływania temperatury. Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica: s. 6-7.
  5. Zieliński A., Dobrzański J., Paszkowska H.: Zmiany struktury i własności mechanicznych w wyniku równoczesnego oddziaływania temperatury, naprężenia i czasu stali 9–12% Cr na elementy krytyczne kotłów o parametrach nadkrytycznych pracujących w warunkach pełzania, Prace Instytutu Metalurgii Żelaza, 2011, 63, s.60-62
  6. Dobrzański J., Trwałość elementów ciśnieniowych bloków energetycznych. Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica, 2019.
  7. Guo X., Gong J., Jiang Y., Wang X., Zhao Y.: Microstructures and high-temperature mechanical properties in 9Cr-0.5 Mo-1.8 W-VNb steel after aging at 650° C, Materials at High Temperatures, 2015, 32, (6), s.566-574.



28 stycznia 2022  
Gliwice

KATEDRA MATERIAŁÓW INŻYNIERSKICH I BIOMEDYCZNYCH  
WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY  
POLITECHNIKA ŚLĄSKA

## MIĘDZYNARODOWA STUDENCKA KONFERENCJA NAUKOWA

### Wytwarzanie i badanie kompozytu o osnowie polimerowej z mineralnym wypełniaczem

N. Śpiewak<sup>a</sup>, M. Lis<sup>b</sup>, K. Gołombek<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Studentka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych

email: nataspi699@student.polsl.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Laboratorium Badania Materiałów

email: klaudiusz.golombek@polsl.pl

email: mateusz.lis@polsl.pl

**Streszczenie:** W pracy zbadano i przeanalizowano wpływ haloizytu jako napełniacza (o udziale masowym 1%, 3% i 5%) na własności i strukturę kompozytów złożonych z polietylenu pochodzącego z recyklingu oraz polietylenu z recyklingu z dodatkiem PE *virgin* (80/20). Materiały kompozytowe wytworzono przy użyciu gniotownika oraz mini wtryskarki. Wytworzone materiały poddano badaniu twardości oraz próbie rozciągania. Dodatkowo wykonano również obserwację struktury przełomów po próbie rozciągania z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego oraz mikroskopu SEM z analizą składu chemicznego EDS.

**Abstract:** In this study, the effect of halloysite as a filler (mass fraction 1%, 3% and 5%) on the properties and structure of composites composed of recycled polyethylene and recycled polyethylene with PE *virgin* (80/20) was investigated and analyzed. The composite materials were fabricated using a kneading machine and a mini injection molding machine. The manufactured materials were subjected to hardness testing and tensile testing. Additionally, the observation of the fracture structure after tensile test was also performed using stereo microscope and SEM microscope with EDS chemical composition analysis.

**Słowa kluczowe:** kompozyty polimerowe, haloizyt, polietylen, recykling

#### 1. WSTĘP

Ze względu na dynamicznie rozwijający się obszar przemysłu rosną coraz bardziej zapotrzebowania na nowe, lepsze oraz tańsze materiały. To właśnie kompozyty polimerowe stały się ciekawym obszarem badawczym i cieszą się bardzo dużym zainteresowaniem przemysłu ze względu na własności mechaniczne jakie mogą osiągnąć oraz szersze spektrum zastosowań w porównaniu do materiałów polimerowych.

## 1.1 Kompozyty polimerowe

Kompozyt o osnowie polimerowej składa się z:

- polimeru – duroplastów, termoplastów, elastomerów (rzadko),
- włókna wzmacniającego – włókna szklanego, węglowego, organicznego lub nieorganicznego włókna naturalnego,
- napełniacza proszkowego [1, 2].

W skład kompozytu polimerowego wchodzi zawsze pierwszy składnik oraz drugi lub trzeci, rzadko się zdarza, żeby występowały wszystkie trzy składniki jednocześnie, dodatkowo w składzie kompozytów polimerowych można wyróżnić również środki pomocnicze i modyfikujące, które są dodawane w bardzo małej ilości. Dobór środków pomocniczych zależy głównie od rodzaju polimeru oraz metody wytwarzania, a mają one na celu inicjowanie polimeryzacji i wpływ na jej przebieg np. zapobiegać przywieraniu kompozytu do formy, zmniejszenie tarcia wewnętrznego polimerów oraz zwiększanie lepkości, a także regulują własności reologiczne [2, 3]. Środki modyfikujące mają za zadanie poprawę estetyki produktów poprzez nadanie im odpowiedniej barwy, poprawę własności gotowego produktu, powstrzymanie degradacji polimeru w celu opóźnienia okresu starzenia, a także są to substancje, które wydzielają się w podwyższonej temperaturze, które wywołują np. spienienie polimeru [1, 2, 3].

## 1.2 Polimery termoplastyczne jako osnowa kompozytu

Dobór polimeru na osnowę kompozytu zależy od własności jakie posiadać ma gotowy produkt, a kształtują się one na etapie formownia budowy makrocząstek. Najczęściej wykorzystywanymi polimerami na osnowę są duroplasty i termoplasty, rzadziej elastomery – a mają one za zadanie zlepianie włókna wzmacniającego lub napełniaczy proszkowych [2, 3]. Termoplastami, zwykle stosowanymi na osnowę kompozytu polimerowego są: polietylen, polipropylen, poliamidy, poli(chlorek winylu), poliwęglany, poli(tereftalan etylenu), których koszt jest niższy w porównaniu do duroplastów. Termoplasty charakteryzują się tym, że pod wpływem wysokiej temperatury płyną, powyżej  $T_p$  stają się lepłą cieczą, natomiast po ochłodzeniu wracają do swojego pierwotnego stanu – twardnieją, a formowanie można przeprowadzać wielokrotnie, bez obaw o zmianę własności. Strukturę termoplastów można określić jako częściowo krystaliczną, lub wyłącznie amorficzną [4].

## 1.3 Mineralne wypełniacze do kompozytów

Wprowadzanie napełniaczy do materiałów polimerowych ma na celu przede wszystkim poprawę bądź nadanie pożądaných własności gotowego produktu, zmniejszenie kosztów produkcji, a także wpływ na przebieg procesu wytwórczego materiału kompozytowego. Napełniacz powinien wykazywać chemiczną obojętność wobec zastosowanej osnowy, rozmiar cząstek powinien mieścić się w zakresie 5 – 10  $\mu\text{m}$ , nie zawierać wód krystalicznych i powierzchniowych, ponadto powinna występować dobra adhezja pomiędzy napełniaczem a osnową. Polepszenie własności mechanicznych wynika z międzyfazowego oddziaływania między polimerem a powierzchnią ziaren surowca mineralnego [5, 6]. W przypadku wytwarzania materiału kompozytowego z mineralnym napełniaczem, przed wymieszaniem składników konieczne jest przeprowadzenie procesu modyfikacji powierzchni takiego napełniacza, ze względu na jego hydrofilowość. Ponadto podczas mieszania składników wymagane jest zastosowanie kompatybilizatora, który silnie oddziałuje zarówno z osnową, jak i napełniaczem, w wyniku czego jest ułatwione przenikanie cząstek napełniacza w osnowę kompozytu oraz wytwarzają się wiązania kompatybilizator – napełniacz [5, 6].



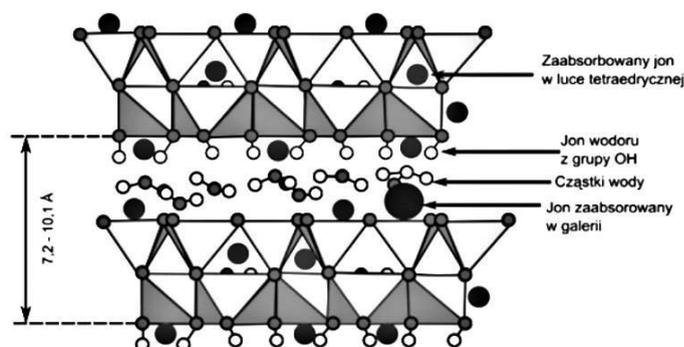
#### 1.4 Charakterystyka glinokrzemianów

Ze względu na zawartość krzemianów i glinokrzemianów w budowie skał, który wynosi około 75% masowych, czyni je najliczniejszą grupą minerałów występującą na Ziemi. Ze względu na sposób łączenia się tetraedrów wyróżnia się krzemiany: wyspowe, grupowe, pierścieniowe, łańcuchowe, wstęgowe, warstwowe, szkieletowe [7-10]. Surowce ilaste to uwodnione krzemiany glinu, magnezu i żelaza o strukturze warstwowej, a przedstawicielami tej grupy są: kaolinit, chloryty, haloizyt oraz montmorylonit. O własnościach minerałów decyduje przede wszystkim jego skład i rozmiar ziaren, który wpływa na wielkość powierzchni właściwej oraz zdolność do pochłaniania jonów. Minerale te, pomimo iż są hydrofilowe, często są wykorzystywane jako napełniacze w kompozytach polimerowych ze względu na zdolność do oddziaływań z materia organiczną, polepszenie własności mechanicznych oraz zdolność do blokowania przepływu gazów. Można wyróżnić kilka typów surowców ilastych ze względu na sposób wiązania się warstw:

- **dwuwarstwowe (pakiet typu 1:1)** – złożone z połączenia jednej warstwy oktaedrycznej z jedną tetraedryczną. Minerale posiadające typ pakietu 1:1 to kaolinit, nakryt, chryzotyl oraz haloizyt;
- **trójwarstwowe (pakiet typu 2:1)** – określają budowę złożoną z jednej warstwy oktaedrycznej znajdującej się pomiędzy dwoma tetraedrycznymi. Do grupy minerałów o typie pakietu 2:1 zaliczane są: talk, saponit, mika, nontroit, illit oraz pirofyllit;
- **mieszanopakietowe;**
- **alofany (formy bezpostaciowe)** [7-10].

#### 1.5 Haloizyt

Haloizyt zalicza się do grupy minerałów ilastych należących do glinokrzemianów dwuwarstwowych o pakiecie typu 1:1, jego wzór chemiczny ma postać  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , a występująca w nim woda posiada charakter międzypakietowy, ze względu na swoje zlokalizowanie. Biorąc pod uwagę odległość między warstwami wyróżnia się haloizyt odwodniony – z odległością równą 7Å oraz uwodniony, w którym odległość wynosi 10Å. Budowę haloizytu przedstawiono na Rysunku 1 [6].



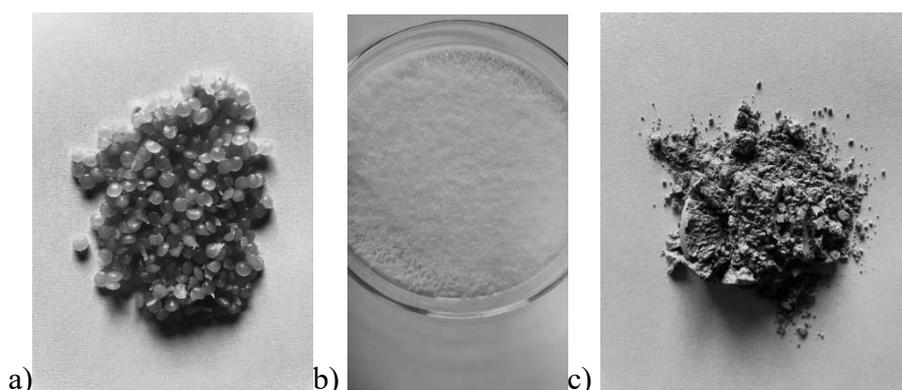
Rysunek 1. Schemat budowy haloizytu [6]

Figure 1: Schematic of the structure of halloysite [6]

Haloizyt ma pochodzenie wulkaniczne i posiada zazwyczaj morfologię rurkową, jednak tworzy również formy sferyczne i płatkowe, a formy te zależą od jego pochodzenia. Długość rurek mieści się w przedziale od 0,02 do 30  $\mu\text{m}$ , a ich grubość wynosi od ok. 0,05 do 0,2  $\mu\text{m}$ . Haloizyt charakteryzuje się wysoką porowatością oraz powierzchnią właściwą, odpornością chemiczną, a także nieskomplikowanym przetwórstwem [6, 8-12].

## 2. PRZEBIEG BADAŃ

Celem niniejszej pracy jest cenna wpływu mineralnego napelnacza, jakim jest haloizyt, o udziale masowym 1%, 3% i 5% na strukturę i własności mechaniczne kompozytu polimerowego wytworzonego z polietylenu z recyklingu folii spożywczych oraz kompozytu z dodatkiem 20% masowych polietylenu *virgin*. Próbki do badań wytworzono z recyklatu polietylenu o niskiej gęstości oraz haloizytu. Wykorzystany został również czysty polietylen o niskiej gęstości w formie proszku (*virgin*) do wytworzenia blend o składzie 80% recyklatu PE, 20% *virgin* PE z haloizytem (rysunek 2c). Polietylen *virgin* – RXP 1002 NATURAL (LD/22/1300 $\mu$ ) jest to proszek polietylenowy o niskiej gęstości (LDPE) odpowiedni do zastosowań, gdzie wymagana jest wysoka akceptacja wypełniaczy, średnia lepkość i dobre własności płynięcia (rysunek 2b), natomiast recyklat polietylenu pochodził z recyklingu folii spożywczych – rysunek 2a



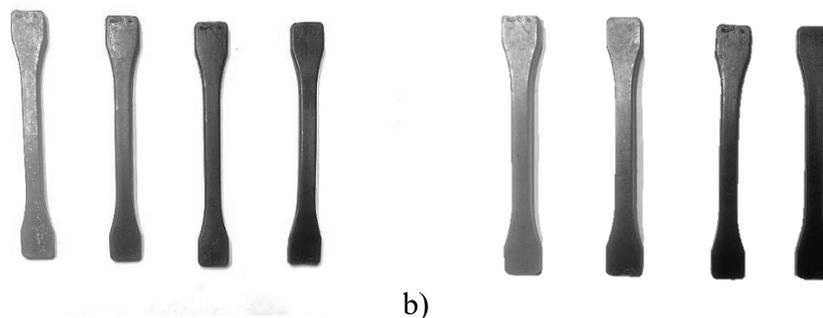
Rysunek 2. Materiał: a) polietylen recyklat, b) polietylen *virgin*, c) haloizyt  
 Figure 2. Material: a) recycled polyethylene, b) virgin polyethylene, c) halloysite

Pierwszym etapem wytwarzania próbek było odważenie na wadze analitycznej odpowiedniej ilości poszczególnych składników, następnie przy użyciu gniotownika firmy Zamak Mercator, uplastyczniano polimer w temperaturze 210°C przez 1 minutę przy prędkości obrotowej 30 obr/min. Do uplastycznionego polimeru dodawano haloizyt w ilości 1, 3, 5 % łącznej masy otrzymywanego kompozytu i mieszano przez kolejne 4 minuty. Następnie pozostawiono kompozyt do całkowitego ostudzenia. Po wytworzeniu odpowiedniej ilości wszystkich kompozytów przeprowadzono proces wtryskiwania. W tym celu umieszczono odpowiednią formę wtryskową w uchwycie (forma wtryskowa na próbki w kształcie wiosełka), następnie załadowano materiał do podgrzewanego cylindra, który dociśnięto, umieszczając tłok w cylindrze wtryskowym. Uplastyczniono materiał w czasie około 3 minut, a następnie umieszczono cylinder z tłokiem w otworze wlewowym formy i po zamknięciu osłony bezpieczeństwa uruchomiono cykl wtrysku. Parametry procesu wtryskiwania przedstawiono w Tablicy 1.

Tablica 1. Parametry procesu wtryskiwania  
 Table 1. Injection molding process parameters

Parametr	Wartość
Temperatura cylindra [°C]	180
Temperatura formy [°C]	60
Czas wtrysku [s]	15
Ciśnienie wtrysku [bar]	5

Po zakończonym procesie wtrysku wyjęto formę z uchwytu, którą następnie otwarto za pomocą szczypic i wyjęto gotową wypraskę. Wytwarzano próbki w kształcie wiosełek (rysunek 3).



Rysunek 3. Próbkki wytworzone z: a) recyklatu PE, b) 80/20 PE w kolejności od lewej 0%, 1%, 3%, 5% haloizytu

Figure 3: Samples produced from (a) recycled PE, (b) 80/20 PE in order from left 0%, 1%, 3%, 5% halloysite

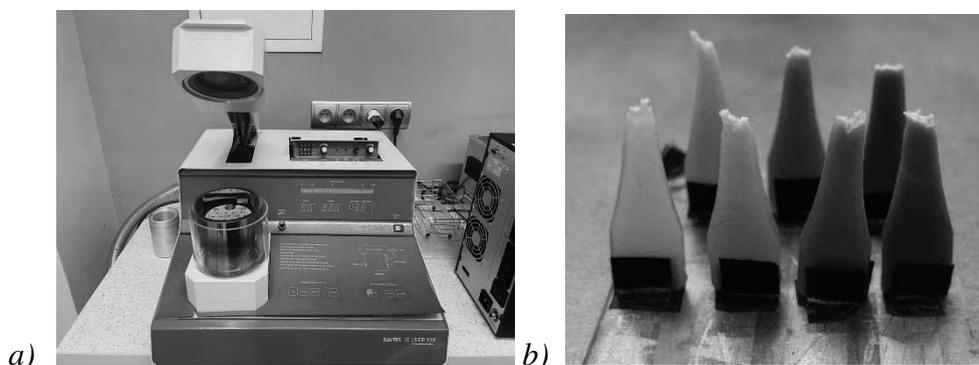
Następnie wykonano próbę rozciągania na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell model Z020. Badanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 527-1 na próbkach o znormalizowanym kształcie. Wartości parametrów procesu przedstawiono w tabelicy 2. Wykonano po 3 pomiary wytrzymałości na rozciąganie na próbkach z każdego udziału masowego haloizytu [13]. Wykonano również badania twardości metodą kulkową.

Tablica 2. Parametry próby rozciągania

Table 2. Tensile test parameters

Parametr	Wartość
Grubość próby [mm]	2,15
Szerokość próby [mm]	4,85
Równoległa długość próby [mm]	36,00
Odległość uchwytów [mm]	55,00
Prędkość badania [mm/min]	50
Sila początkowa [N]	2

Wykonano obserwację przełomów po badaniu wytrzymałości na rozciąganie każdej próbki z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego firmy Zeiss, model SteREO Discovery.V12, przy powiększeniu 40x oraz skaningowego mikroskopu elektronowego HRSEM ZEISS SUPRA 35 wyposażonego w detektor EDS. Przed przystąpieniem do badań mikroskopowych SEM odpowiedni przygotowano powierzchnię nieprzewodzących próbek – naniesiono ciekłą przewodzącą powłokę na ich powierzchnię. Do tego procesu wykorzystano napyłarkę próżniową Bal-Tec SCD 050 – rys. 4a), próbki odpowiednio zamocowano na płytce przed przeprowadzeniem procesu PVD – zdjęcie 4b) i napyłono stopem Au/Pd (80%/20%). Parametry procesu PVD przedstawiono na tabelicy 3.



Rysunek 4. Proces PVD: a) napyłarka próżniowa Bal-Tec SCD 050, b) przygotowane próbki do procesu napyłania

Figure 4: PVD process: a) Bal-Tec SCD 050 vacuum deposition machine, b) prepared samples for deposition process

Tablica 3. Parametry procesu PVD

Table 3: PVD process parameters

Parametr	Wartość
Czas napyłania [s]	90
Temperatura stolika [°C]	20
Natężenie prądu [mA]	40
Napięcie [V]	510

### 3. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

#### 3.1 Wynik badania wytrzymałości na rozciąganie

W tablicy 4 zestawiono wyniki badań uzyskane w statycznej próbie rozciągania dla próbek wykonanych z polietylenu z recyklingu i haloizytu. Na podstawie otrzymanych wyników obliczono średnie wartości dla każdej zawartości haloizytu.

Tablica 4. Własności mechaniczne próbek wykonanych z recyklatu PE i haloizytu

Table 4: Mechanical properties of samples made of recycled PE and halloysite

Próbka	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł Younga [MPa]	Wydłużenie względne przy zerwaniu [%]
	Średnia wartość		
Recyklat PE	22,85	128	442,60
Recyklat PE+ 1% haloizytu	23,03	196	108,43
Recyklat PE+ 3% haloizytu	23,93	200	105,00
Recyklat PE+ 5% haloizytu	27,63	238	69,00

Uzyskane wartości przedstawione w tablicy 4 potwierdzają wpływ mineralnego wypełniacza na własności mechaniczne kompozytu polimerowego. Największe wartości modułu sprężystości przy rozciąganiu oraz wytrzymałości na rozciąganie osiągnęły próbki z zawartością 5% haloizytu. Wykazują one wzrost o 20% wytrzymałości na rozciąganie oraz o 86% wzrosła wartość modułu Younga w porównaniu do próbki z czystego polietylenu pochodzącego z recyklingu. Jednocześnie próbki te posiadają najmniejsze wydłużenie względne przy zerwaniu, równe 69%. Próbki wytworzone z samego polietylenu pochodzącego z recyklingu wykazują najniższą wytrzymałość na rozciąganie oraz moduł Younga, ale za to najwyższą

wartość wydłużenia względnego przy zerwaniu 442,60% (próbki te nie uległy zerwaniu). Dodatek 1 % haloizytu powoduje niewielki wzrost wytrzymałości na rozciąganie, natomiast moduł Younga zwiększył o 53% oraz spadek wydłużenia względnego przy zerwaniu z 442,60 % do wartości 108,43%. Wprowadzenie 3% masowych haloizytu do polietylenu z recyklingu powoduje wzrost wytrzymałości na rozciąganie o 5% i o 56% modułu Younga w stosunku do próbki wykonanej z samego polietylenu z recyklingu.

Tablica 5 przedstawia wyniki pomiarów oraz obliczone wartości średnie dla próbek wykonanych z polietylenu z recyklingu oraz *virgin* a także haloizytu.

Tablica 5. Własności mechaniczne próbek wykonanych z 80/20PE + haloizyt

Table 5. Mechanical properties of specimens made of 80/20PE + halloysite

Próbka	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł Younga [MPa]	Wydłużenie względne przy zerwaniu [%]
	Średnia wartość		
80/20 PE	23,73	163	133,00
80/20PE + 1% haloizytu	23,96	171	102,97
80/20PE +3% haloizytu	24,00	185	101,20
80/20PE +5% haloizytu	26,16	213	77,90

Na podstawie wartości zamieszczonych w tablicy 5 dla próbek wykonanych z PE z recyklingu i *virgin*, można stwierdzić, że dodatek 1% haloizytu spowodował, że wytrzymałość na rozciąganie wzrosła o 1%, a moduł sprężystości wzdłużnej wzrósł o 5%, a wartość wydłużenia względnego przy zerwaniu zmalała o 23% w stosunku do próbki z 80/20 PE bez dodatku haloizytu. Porównując wartości wytrzymałości na rozciąganie w przypadku próbki z dodatkiem 3% haloizytu można zauważyć wzrost wartości o 1,15% w stosunku do próbki bez dodatku haloizytu. Dodatek 3% haloizytu wpłynął na wartość modułu Younga, która wzrosła o 14% w stosunku do próbek z 80/20 PE. Natomiast najwyższą wytrzymałość na rozciąganie oraz modułu sprężystości wzdłużnej wykazują próbki z dodatkiem 5% haloizytu. Dla wytrzymałości na rozciąganie wzrost ten kształtuje się na poziomie 10%, a moduł Younga osiąga wartość 213 MPa, co daje wzrost wartości o 31% w stosunku do próbek bez dodatku haloizytu. Zawartość 5% masowych haloizytu w kompozycie polimerowym powoduje zmniejszenie wydłużenia względnego przy zerwaniu do poziomu 77,90%, co daje spadek o 41,50% w porównaniu do próbki bez haloizytu. Zestawiając wyniki z tablicy 4 wraz z wynikami z tablicy 5, można zauważyć, że dodatek haloizytu powoduje większy wzrost wartości modułu Younga w przypadku próbek wykonanych z samego PE pochodzącego z recyklingu, niż tych, które mają jeszcze w swoim składzie PE *virgin*.

### 3.2 Wynik badania twardości

W Tablicy 6 przedstawiono wyniki badań twardości metodą wciskania kulki. Na podstawie wyników można stwierdzić, że dodatek haloizytu wpływa na wzrost twardości kompozytu. Twardość próbki wytworzonej z samego polietylenu pochodzącego z recyklingu folii spożywczych wynosi 13,24 N/mm<sup>2</sup>. Dodatek 1% haloizytu spowodował wzrost twardości o 0,6 N/mm<sup>2</sup> w porównaniu do próbki z czystego PE recyklatu. Zastosowanie 3% dodatku haloizytu powoduje wzrost twardości o kolejne 0,47 N/mm<sup>2</sup>. Natomiast kompozyt zawierający 5% masowych haloizytu wykazuje najwyższą twardości równą 15,57 N/mm<sup>2</sup>.

Tablica 6. Wyniki badań twardości wykonane metodą wciskania kulki dla próbek wytworzonych z recyklatu polietylenu i haloizytu.

Table 6. Results of hardness tests performed by the ball pressing method for samples produced from recycled polyethylene and halloysite

Numer próbki	Obciążenie pomiarowe [N]	Głębokość odcisku [mm]	Twardość [N/mm <sup>2</sup> ]
			Średnia wartość
<b>Recyklat PE</b>	49	0,213	13,23
<b>Recyklat PE +1% haloizytu</b>	49	0,213	13,83
<b>Recyklat PE +3% haloizytu</b>	49	0,213	14,30
<b>Recyklat PE +5% haloizytu</b>	49	0,213	15,57

Tablica 7 przedstawia wyniki pomiarów twardości metodą wciskania kulki dla próbek 80/20 PE z dodatkiem haloizytu.

Tablica 7. Wyniki badań twardości wykonane metodą wciskania kulki dla próbek wytworzonych z recyklatu, polietylenu virgin z haloizytem

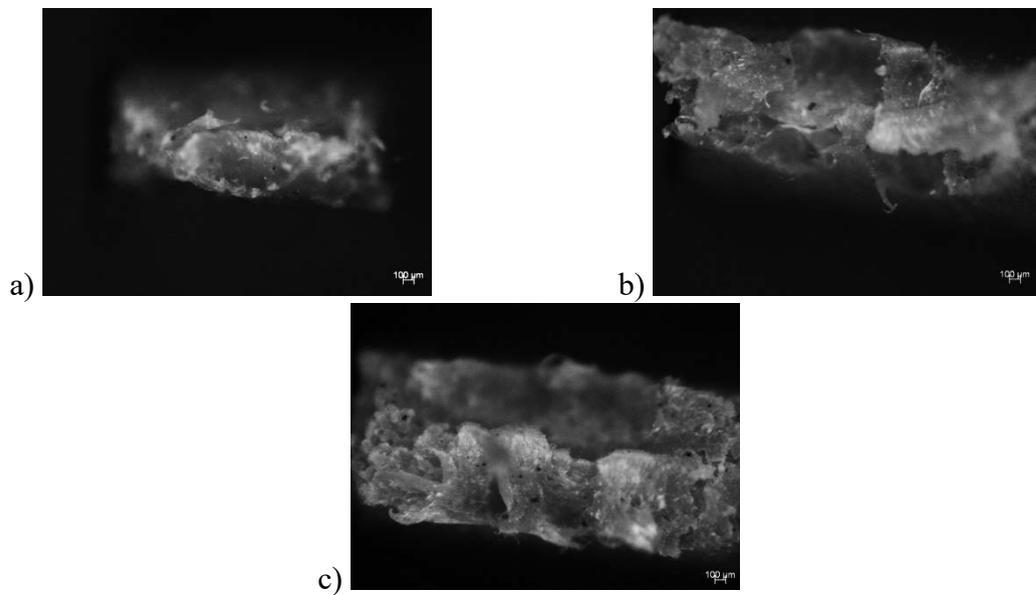
Table 7: Results of hardness tests performed by the ball pressing method for samples produced from recycled, virgin polyethylene with halloysite

Numer próbki	Obciążenie pomiarowe [N]	Głębokość odcisku [mm]	Twardość [N/mm <sup>2</sup> ]
			Średnia wartość
<b>80/20 PE</b>	49	0,213	13,17
<b>80/20 PE+ 1% haloizytu</b>	49	0,213	13,67
<b>80/20 PE+ 3% haloizytu</b>	49	0,213	14,17
<b>80/20 PE + 5% haloizytu</b>	49	0,213	15,23

Wyniki badań przedstawione w tablicy 7 wykazują, że próbka wykonana z czystego polietylenu w formie recyklatu i *virgin* bez dodatku haloizytu, wykazuje twardość równą 13,17 N/mm<sup>2</sup>. Natomiast próbki wykonane z samego recyklatu polietylenu wykazują niższą twardość wynoszącą 13,23 N/mm<sup>2</sup>. Dodatek 1% haloizytu powoduje wzrost twardości o 0,5 N/mm<sup>2</sup> w porównaniu do próbki bez dodatku haloizytu, a zwiększenie haloizytu do 3% masowych kompozytu polimerowego powoduje wzrost twardości o kolejne 0,5 N/mm<sup>2</sup>. Najwyższą twardość wykazuje próbka z dodatkiem 5% haloizytu i wynosi 15,23 N/mm<sup>2</sup>. Dla porównania –twardość próbki wykonanej z samego recyklatu polietylenu z 5% haloizytu wynosiła 15,57 N/mm<sup>2</sup>, więc było o 0,34 N/mm<sup>2</sup> wyższa niż próbki, która w swoim składzie oprócz recyklatu i 5% masowych haloizytu posiadała jeszcze 20% polietylenu *virgin*. Zestawiając wyniki z tablicy 6 z wynikami z tablicy 7 można zauważyć, że wyniki twardości dla tych samych zawartości haloizytu są większe w przypadku kompozytów wykonanych z samego recyklatu polietylenu w porównaniu, do kompozytów, które oprócz recyklatu posiadają jeszcze polietylen *virgin*.

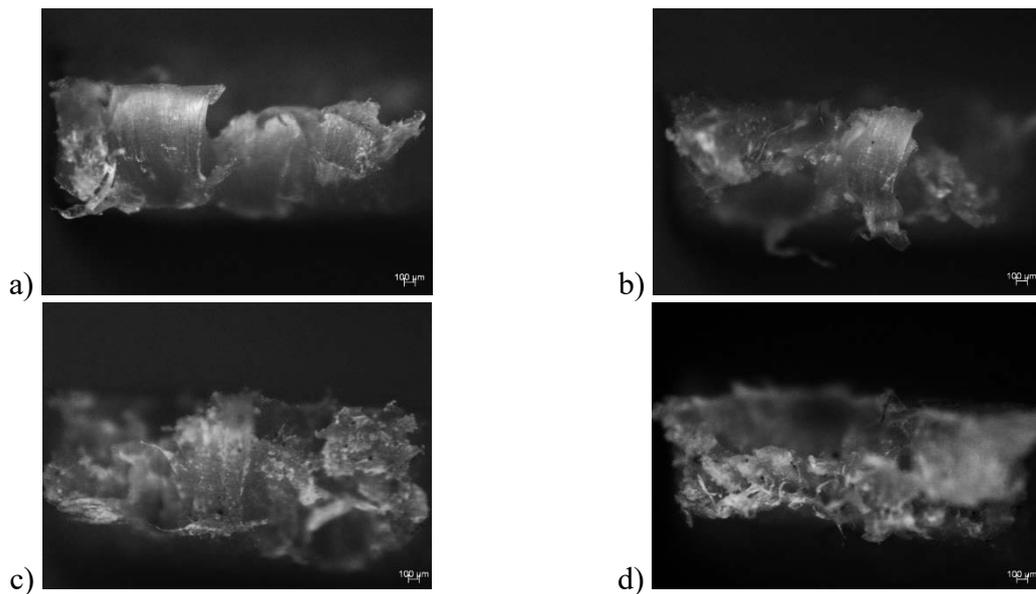
### 3.3 Wynik mikroskopii stereoskopowej

Poniżej przedstawiono zdjęcia przełomów próbek po badaniu wytrzymałości na rozciąganie, które wykonano na mikroskopie stereoskopowym. W przypadku próbek wykonanych w 100% z recyklingu nie wykonano zdjęć przełomów próbek, ponieważ nie uległy one zerwaniu.



Rysunek 5. Powierzchnia przełomu próbek PE recyklat z zawartością haloizytu: a) 1%, b) 3%, c) 5%.

Figure 5: Fracture surface of PE recyklad samples with halloysite content: a) 1%, b) 3%, c) 5%



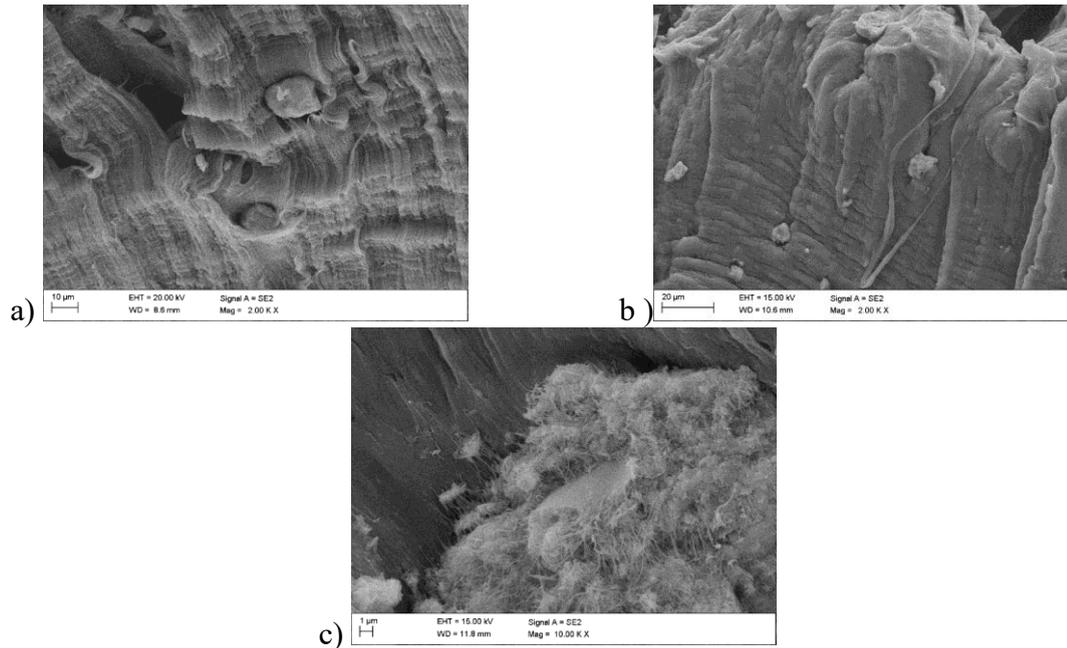
Rysunek 6. Powierzchnia przełomu próbek 80/20 PE z zawartością haloizytu: a) 0%, b) 1%, c) 3%, d) 5%

Figure 6. Fracture surface of 80/20 PE samples with halloysite content: a) 0%, b) 1%, c) 3%, d) 5%

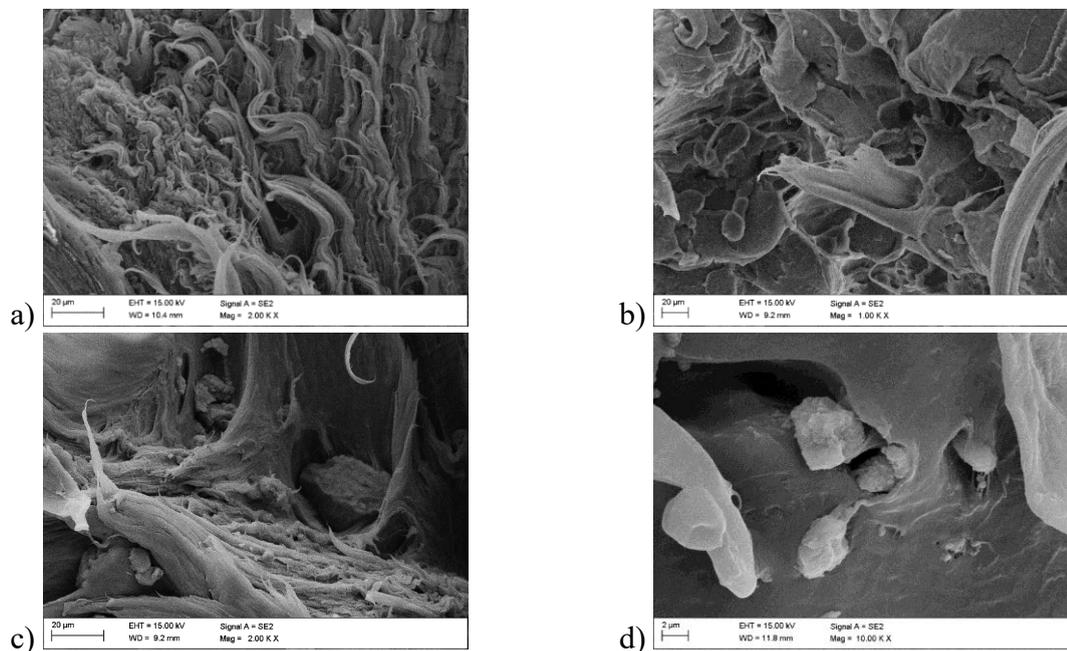
Na podstawie obserwacji przełomów po badaniu wytrzymałości na rozciąganie stwierdzono, że występowanie obecność cząstek haloizytu w każdej z próbek. Na powierzchni próbki z 80/20 PE nie stwierdzono obecności cząstek haloizytu. Na przełomach brak widocznych pęcherzy, co świadczy o tym, że proces wytwarzania wykonano prawidłowo.

### 3.4. Wynik skaningowej mikroskopii elektronowej

Badania powierzchni przełomów oraz analizy składu chemicznego w wybranych mikroobszarach wykonano z wykorzystaniem SEM i detektora EDS (rysunki 7-12).

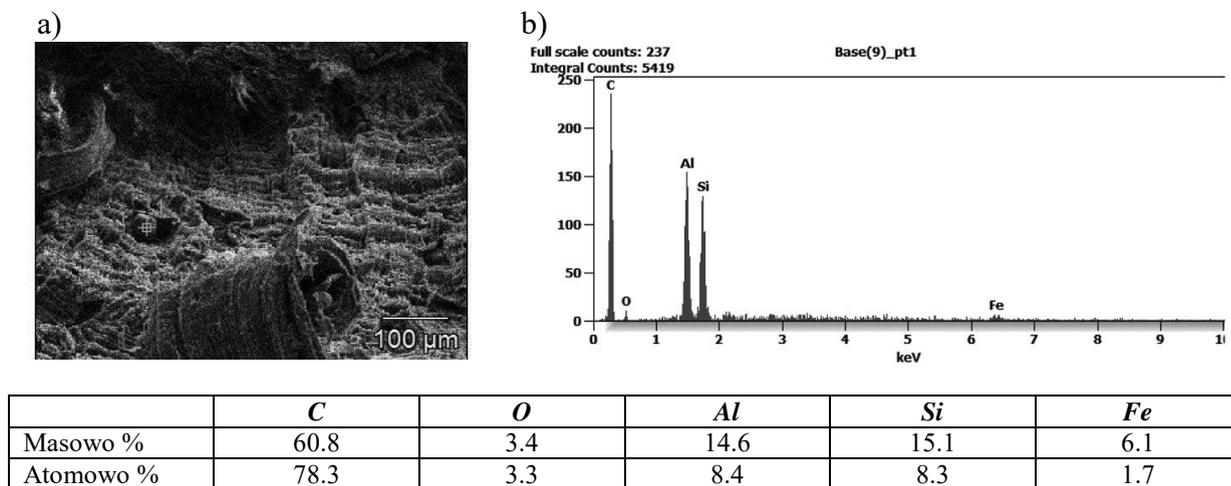


Rysunek 7. Powierzchnia przełomu próbki z PE recyklad z dodatkiem haloizytu: a) 1%, b) 3%, c) 5%  
 Figure 7: Fracture surface of PE recyklad sample with halloysite: a) 1%, b) 3%, c) 5%

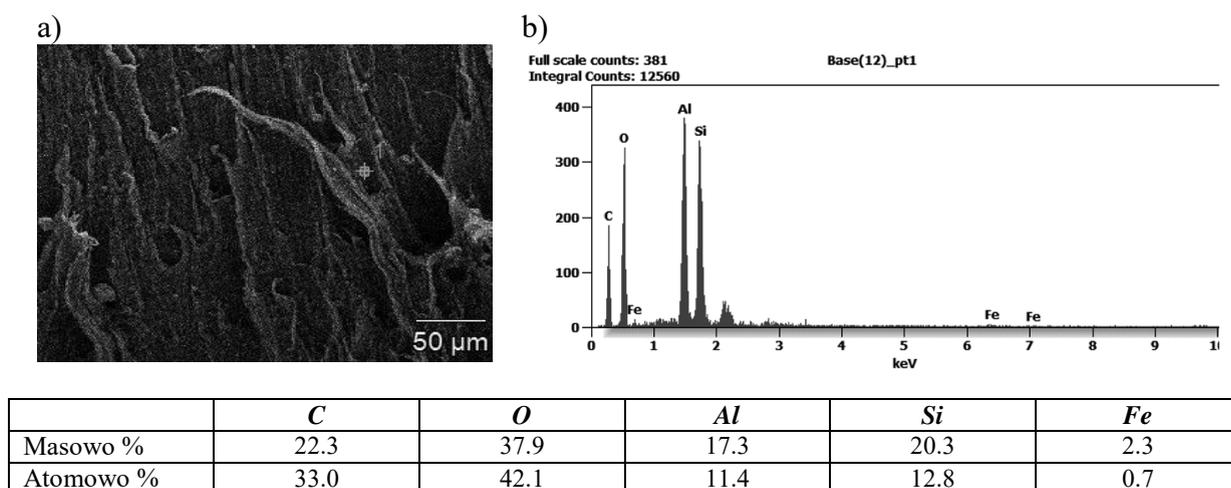


Rysunek 8. Powierzchnia przełomu próbki z 80/20 PE z dodatkiem haloizytu: a) 0%, b) 1%, c) 3%, d) 5%  
 Figure 8: Fracture surface of 80/20 PE sample with halloysite: a) 0%, b) 1%, c) 3%, d) 5%

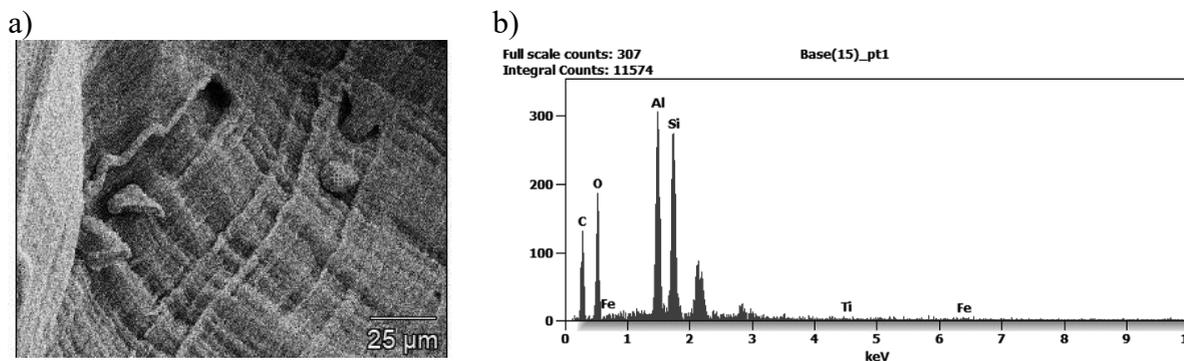




Rysunek 9. a) Przełom próbki z PE recyklatu + 1% haloizytu z zaznaczonym miejscem analizy EDS oraz b) widmo energii rozproszonego promieniowania rtg dla punktu jak na rysunku 9a  
 Figure 9. a) Fracture sample of PE recyclate + 1% halloysite with the EDS analysis site marked and (b) the scattered x-ray energy spectrum for the point as in Figure 9a

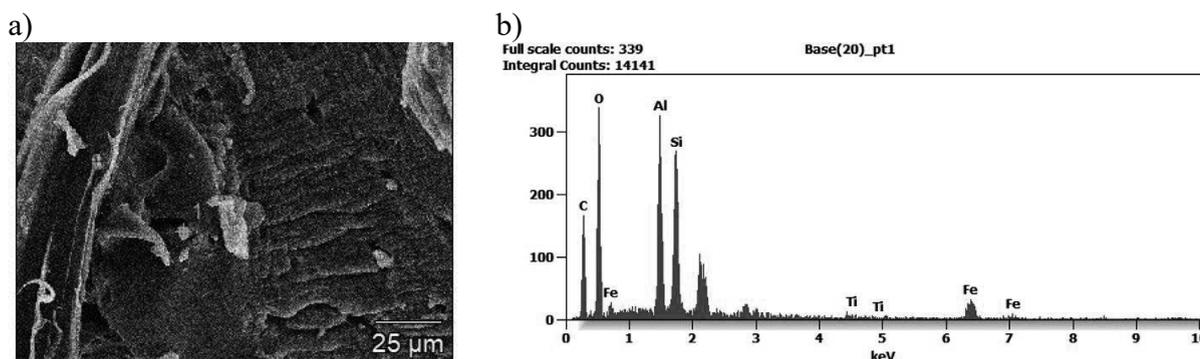


Rysunek 10. a) Przełom próbki z PE recyklatu + 5% haloizytu z zaznaczonym miejscem analizy EDS oraz b) widmo energii rozproszonego promieniowania rtg dla punktu jak na rysunku 10a  
 Figure 10. a) Fracture sample of PE recyclate + 5% halloysite with the EDS analysis site marked and (b) the scattered x-ray energy spectrum for the point as in Figure 10a



	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>	<i>Fe</i>
Masowo %	26.8	31.9	17.3	21.3	0.3	2.4
Atomowo %	39.3	35.1	11.3	13.4	0.1	0.8

Rysunek 11. a) Przełom próbki z 80/20 PE + 1% haloizytu z zaznaczonym miejscem analizy EDS oraz b) widmo energii rozproszonego promieniowania rtg dla punktu jak na rysunku 11a  
 Figure 11. a) Fracture sample of 80/20 PE + 1% halloysite with the EDS analysis site marked and (b) the scattered x-ray energy spectrum for the point as in Figure 11a



	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>	<i>Fe</i>
Masowo %	20.2	35.3	13.5	15.0	0.6	15.3
Atomowo %	32.3	42.3	9.6	10.3	0.2	5.2

Rysunek 12. a) Przełom próbki z 80/20 PE + 5% haloizytu z zaznaczonym miejscem analizy EDS oraz b) widmo energii rozproszonego promieniowania rtg dla punktu jak na rysunku 12a  
 Figure 12. a) Fracture sample of 80/20 PE + 5% halloysite with the EDS analysis site marked and (b) the scattered x-ray energy spectrum for the point as in Figure 12a

Na podstawie obserwacji przełomów próbek z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego wyposażonego w detektor EDS stwierdzono, że próbki wykazują typową strukturę dla materiałów polimerowych po wykonanych badaniach wytrzymałościowych. Świadczą o tym widoczne na zdjęciach rozciągnięte włókna, które swoim wyglądem przypominają nitki lub pasma włókien. Nie zaobserwowano na badanych przełomach występowania porów. Wykonano również mikroanalizę składu chemicznego EDS cząstek haloizytu wchodzącego w skład kompozytów. Analiza wykazała, że najczęściej występującymi

pierwiastkami są: węgiel, wapń, aluminium, krzem, tytan oraz żelazo, które potwierdzają obecność cząstek haloizytu w badanym materiale kompozytowym. Na podstawie obserwacji strukturalnych stwierdzono, że haloizytowy dodatek charakteryzuje się najczęściej okrągłym/owalnym kształtem w postaci konglomeratów, a cząstki te występują na całej powierzchni przelomu w każdej z próbek.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W ramach badań dokonano oceny wpływu haloizytu, o udziale masowym 1%, 3% i 5% na strukturę i własności mechaniczne kompozytu polimerowego wytworzonego z polietylenu z recyklingu folii spożywczych oraz z dodatkiem 20% masowych polietylenu *virgin*.

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy wyników można stwierdzić pozytywny wpływ dodatku haloizytu na własności mechaniczne materiału kompozytowego. Stwierdzono, że wraz ze podwyższeniem udziału masowego haloizytu w próbkach, wzrastają własności mechaniczne, takie jak: moduł sprężystości wzdłużnej (moduł Younga), wytrzymałość na rozciąganie oraz twardość, a maleje wartość wydłużenia przy zerwaniu. Badania wykazały również, że dodatek haloizytu wywołał intensywniejszy wzrost własności mechanicznych w przypadku kompozytów wytworzonych z samego polietylenu pochodzącego z recyklingu niż w przypadku próbek, które w swoim składzie posiadały dodatkowo polietylen *virgin*. Badania mikroskopowe wytworzonych materiałów kompozytowych potwierdziły równomierną na całej powierzchni obecność cząstek haloizytu i dobrą homogenizację tego napełniacza z polietylenem z recyklingu jako osnową.

#### 5. LITERATURA

1. Boczkowska A., Kapuściński J., Lindemann Z., Witemberg – Pietrzyk D., Wojciechowski S. „Kompozyty”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2003
2. Boczkowska A., Krzesiński G., „Kompozyty i techniki ich wytwarzania”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2016
3. Ozimina D., Madej M., „Tworzywa sztuczne i materiały kompozytowe”, Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Kielce, 2010
4. Oczóś K. „Kompozyty włókniste – właściwości, zastosowanie, obróbka ubytkowa”, Mechanik Miesięcznik Naukowo – Techniczny, nr 7/2008, s. 579-582
5. Utracki L.A., „Clay - Containing Polymeric Nanocomposites”, Rapra Techn. Ltd. 2004, 9, 73, 260.
6. Szczygielska A., Kijeński J., „Zastosowanie haloizytu jako napełniacza do modyfikacji polipropylenu, część 1. Charakterystyka haloizytu jako napełniacza”, PTM, Czasopismo Kompozyty nr 10/2010, s. 181-185
7. Kurlito Ż., Grabowska B., Kaczmarska K., Szymański Ł., „Wiązania chemiczne występujące w montmorylonicie.”, Archives of Foundry Engineering, nr 4/2015, s. 79-82
8. Stoch L., „Minerały ilaste”, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1974.
9. Matusik J., „Naturalne i syntetyczne minerały o budowie warstwowej w nanotechnologiach”, Wyd. AGH, Kraków, 2017
10. Pagacz, J., Pielichowski, K., „Modyfikacja krzemianów warstwowych do zastosowań w nanotechnologii”, Wyd. Politechniki Krakowskiej, 2007
11. Pytliński A., Józwiak K., Sołtys B., Schomburg J., Sakiewicz P., „Haloizyt ze złoża Dunino jako surowiec do wytwarzania sorbentów mineralnych”, Wyd. Politechniki Krakowskiej, 2016

12. Adamczyk M. J., Kułacz K., Małycha K., Pocheć M., Orzechowski K., „Haloizyt – naturalny absorber promieniowania elektromagnetycznego”, Wyd. Naukowo-Techniczne, 2019
13. PN-EN ISO 527-1:2020-01 Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu; Część 1: Zasady ogólne

## Konwencjonalna metoda spiekania materiału FC-0208

A. Stanula<sup>a</sup>, B. W. Pilarczyk<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych  
email: Agnieszka.Stanula@polsl.pl

**Streszczenie:** W artykule opisano metodę spiekania konwencjonalnego, aktualnie stosowaną w metalurgii proszków. Materiał FC-0208 jest powszechnie używany w aplikacjach, w przemyśle motoryzacyjnym oraz lotniczym. Elementy wyprodukowane z tego materiału charakteryzują się porowatością, która jest niezbędna z punktu technicznego i projektowego. Głównym celem tego opracowania jest przedstawienie wyników badania struktury materiału FC-0208 wytworzonego za pomocą konwencjonalnej metody spiekania. Analizie mikroskopowej poddano materiał wyjściowy w postaci proszku Fe-C-Cu. Specyficzne warunki procesowe określono na podstawie wielokrotnych eksperymentów.

**Abstract:** The article describes the conventional sintering method currently used in powder metallurgy. The material FC-0208 is widely used in applications in the automotive and aerospace industries. The elements made of this material are characterized by porosity, which is necessary from a technical and design point of view. The main aim of this paper is to present the results of the structure of FC-0208 material produced by the conventional sintering method. Based on this investigation there was found out which process parameters should be used for the robustness. The specific process conditions were determined on the basis of multiple experiments.

**Słowa kluczowe:** metalurgia proszków, technologia procesu spiekania, materiał FC-0208, SEM

### 1. WSTĘP

#### 1.1 Opis

Zasoby surowcowe Ziemi ulegają wyczerpaniu. Dalszemu rozwojowi gospodarczemu świata towarzyszyć będzie ograniczony dostęp do surowców i energii. Minimalizacja kosztów wytwarzania powinna spełniać wymagania techniczne. Odpowiedni rozwój techniki związany jest z rozwojem nowych i lepszych materiałów. Metalurgia proszków daje duże możliwości w tej kwestii.

Metalurgia proszków jest technologią wytwarzania wyrobów i półwyrobów ze sproszkowanych metali, mieszanek metali, mieszanek metali z niemetalami lub z proszków stopowych bądź częściowo stopowych. Wyrób wykonany techniką metalurgii proszków nazywa się wyrobem spiekany lub krótko - spiekami.

Ze względu na postać surowców metalurgia proszków wykazuje w porównaniu z konwencjonalną metalurgią szereg korzyści:

- można wytwarzać materiały, których inną techniką się nie otrzyma,
- własności fizyczne i chemiczne otrzymywanych wyrobów można regulować w wyjątkowo szerokim zakresie,
- porowatość i przepuszczalność wyrobów może się zmieniać w szerokich granicach [1].

W procesie technologicznym produktów metodą metalurgii proszków wykonuje się następujące operacje :

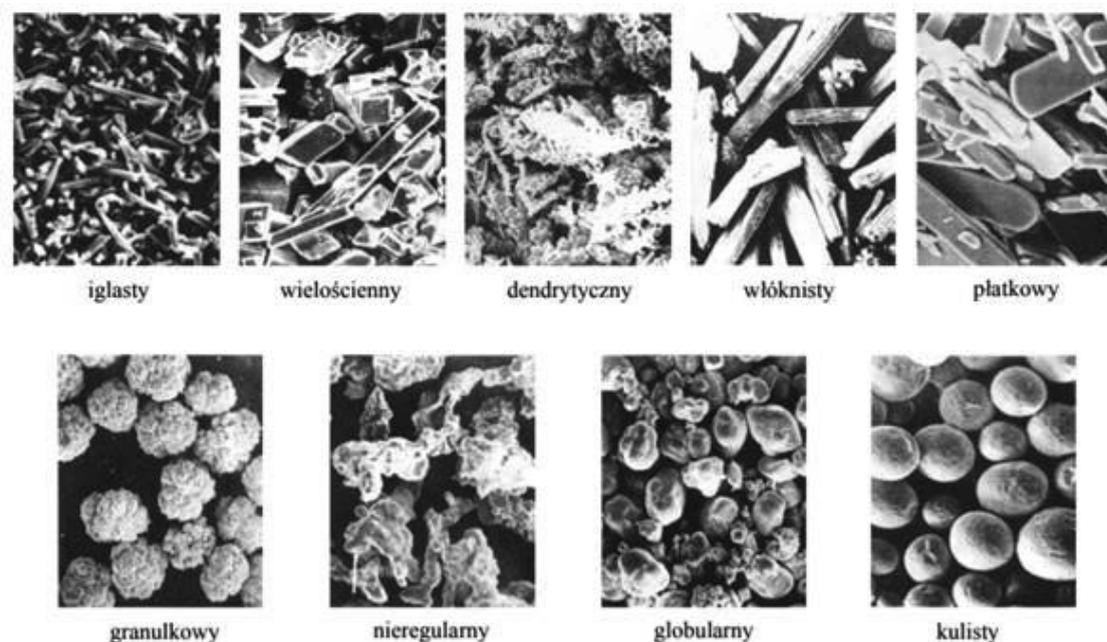
- wytworzenie proszku metalu lub mieszaniny proszków różnych materiałów,
- przygotowanie proszku,
- formowanie proszku na zimno,
- spiekanie,
- obróbkę wykończającą.

W zależności od przeznaczenia proszków oraz rodzaju surowców wyjściowych stosuje się dwie grupy metod wytwarzania proszków:

- mechaniczne sposoby wytwarzania, polegające na rozdrobnieniu materiałów przez mielenie, piłowanie, rozpylanie itp.
- procesy chemiczne i fizykochemiczne, jak np. kondensacja par metalu, redukcja chemiczna tlenków, elektroliza itp. [2].

## 1.2 Proszek

Kształt ziaren proszku wyznaczyć można metodą opisową lub metodą matematyczną. Pierwsza z nich opiera się na Polskiej Normie PN-EN ISO 3253:2002 [3]. Zgodnie z tą normą przyjmuje się następujące nazewnictwo dla ziaren proszku (Rys. 1.).



Rysunek. 1. Nazewnictwo kształtu ziaren proszków zgodnie z PN-EN ISO 3252:2002 [3]  
 Figure 1. Nomenclature of the grain shape of powders by PN-EN ISO 3252:2002 [3]

### 1.3 Technologia spiekania w metalurgii proszków

Prasowanie jest jednym z głównych procesów technologicznych w produkcji wyrobów ze spiekanych proszków metali. Ma ono na celu formowanie wyprasek o określonych wymiarach i kształcie oraz odpowiedniej gęstości i własnościach fizykochemicznych.

Prasowanie proszków na zadany kształt przeprowadza się w matrycach. Odważona lub odmierzona ilość proszku po zasypaniu do matrycy zagęszczona jest naciskiem stempla, a następnie wypychana z matrycy. Podczas prasowania proszek nasypany luźno do matrycy zmniejsza często dwu- lub trzykrotnie swoją objętość ulegając zagęszczaniu [4]:

Proces prasowania można podzielić na dwa etapy:

- a) w początkowym etapie prasowania przy niskich ciśnieniach następuje załamywanie i likwidacja "mostków" utworzonych przy zasypywaniu, oraz ściśle ułożenie ziaren dzięki wzajemnym poślizgom i obrotom poszczególnych ziaren. Gęstość wyprasek prasowanych przy zastosowaniu niskich ciśnień jest bardzo nierównomierna, występują duże różnice zwłaszcza pomiędzy materiałem przylegającym do ścian, a środkiem próbki.
- b) w drugim etapie prasowania z wyższymi ciśnieniami, ma miejsce odkształcenie plastyczne ziaren proszku. Opisane dwa etapy zagęszczania często nakładają się i odkształcenie plastyczne może rozpocząć się przed zakończeniem likwidacji porów wskutek przemieszczeń poszczególnych ziaren.

Spiekanie w technologii metalurgii proszków jest jednym z podstawowych procesów technologicznych, któremu może zostać poddany zarówno luźno zasypany proszek jak i wypraska. W procesie tym, mechaniczne połączenia między ziarnami proszku wytworzone podczas prasowania, a także lokalne, punktowe zgrzeiny ziaren proszku, powstałe w wyniku odkształcenia plastycznego i podwyższenia temperatury umożliwiającej procesy dyfuzji, zostaną przekształcone w połączenia metaliczne o większej wytrzymałości.

Następuje zmiana struktury, zmiana porowatości oraz zmniejszenie niejednorodności składu chemicznego mieszanki proszkowej [4].

Stosowanie atmosfer ochronnych podyktowane jest koniecznością zabezpieczenia materiałów spiekanych przed utlenieniem, a także redukcją powłok tlenkowych, które mogły powstać przy przeróbce proszku a poszczególnych jego ziarnach (Tab. 1).

Tablica 1. Rodzaje atmosfer ochronnych [5]

Table 1. Types of protective atmospheres [5]

Atmosfery ochronne		
Redukujące	Obojętne	utleniające

Wzajemne oddziaływanie chemiczne spiekane materiału z atmosferą w piecu nie powinno prowadzić do utworzenia związków, pogarszających właściwości spiekane materiału (Tab. 2).

Tablica 2. Zależność wyboru atmosfery ochronnej [5]

Table 2. The dependence of the choice of the protective atmosphere [5]

Wybór atmosfery ochronnej		
Skład chemiczny spiekane materiału	Typy pieca	Czynniki ekonomiczne

Gazy stosowane w charakterze atmosfery ochronnej zamieszczone są w kolejnej tablicy. (Tab.3.):

Tablica 3. Rodzaj gazów stosowanych w atmosferze ochronnej [5]

Table 3. The type of gases used in the protective atmosphere [5]

Gazy stosowane o charakterze atmosfery ochronnej						
Endotermiczne	Egzotermiczne	Konwertorowy	Zdysocjowany amoniak	Wodór	Spiekanie w próżni	Zасыпки ochronne

W procesie spiekania należy uwzględnić następujące parametry: maksymalna temperatura spiekania, czas wytwarzania kształtki w tej temperaturze, sposób podgrzania (szybkość, spiekanie wstępne wysokotemperaturowe), sposób chłodzenia po spiekaniu, atmosfera spiekania.

Proces spiekania wyrobów wykonywanych metalurgią proszków w produkcji wielkoseryjnej i masowej przeprowadza się najczęściej w piecach o działaniu ciągłym. Są to piece tunelowe, a w zależności od sposobu przesuwania wyprasek umieszczonych w koszach lub na paletach wyróżnia się: piece taśmowe oraz piece przepychowe [6].

Obróbką wykańczającą jest między innymi obróbka cieplna i cieplno-chemiczna, wykonana w celu polepszenia własności wyrobów spiekanych, które można poddać hartowaniu i odpuszczaniu, przesycaaniu i starzeniu lub obróbce cieplno-chemicznej: nawęglaniu lub azotowaniu.



#### 1.4 Element spiekany

Proces metalurgii proszków to szybka, ekonomiczna i wielkoseryjna metoda produkcji precyzyjnych elementów z proszku. Istnieje jednak wiele powiązanych technik konsolidacji, dzięki którym proszki można walcować w arkusze, wyłaczać w pręty lub zagęszczać izostaticznie w części o bardziej złożonej geometrii [7]. Na (Rys. 2.) zamieszczone są przykłady części wykonanych metodą metalurgii proszków.



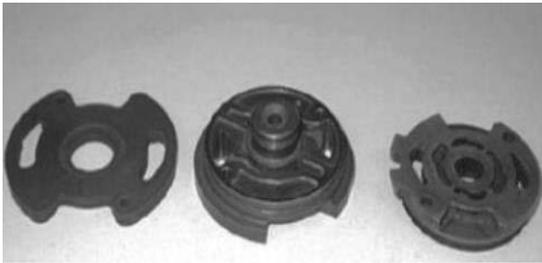
Rysunek. 2 Elementy wykonane metodą metalurgii proszków[8]  
*Figure. 2 Elements made by the powder metallurgy method [8]*

Istnieją dwa główne powody stosowania produktu metalurgii proszków: oszczędności kosztów w porównaniu z alternatywnymi procesami oraz unikalne właściwości osiągalne tylko drogą metalurgii proszków.

W sektorze motoryzacyjnym, który zużywa około 80% produkcji części konstrukcyjnych z metalurgii proszków, powód wyboru metalurgii proszków jest w większości przypadków ekonomiczny.

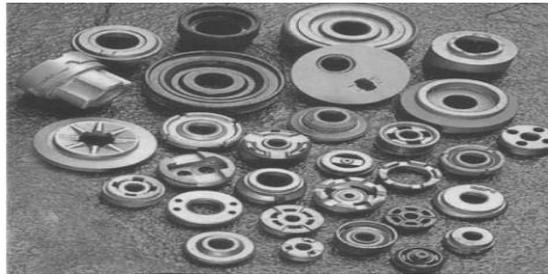
Komponenty są projektowane tak, aby spełniały kryteria strukturalne w wielu zastosowaniach. Możliwe jest wytwarzanie spiekanych części konstrukcyjnych lub mechanicznych o właściwościach równych, a nawet lepszych od części wytwarzanych bardziej tradycyjnymi sposobami. [9].

Materiał FC-0208 jest używany w elementach układu kierowniczego, zawieszeniach samochodowych; częściach amortyzatorów, drzwi, hamulców, i tak dalej (Rys. 3 - 6) [10]. Analizowany materiał jest bezpośrednio aplikowany do części składowych amortyzatorów, takich jak: końcówki cylindrów tłokowych, prowadnice prętów rozpórek i zawory sprężające.



Rysunek 3. Części wspomagania kierownicy [10]

*Figure 3. Power steering parts [10]*



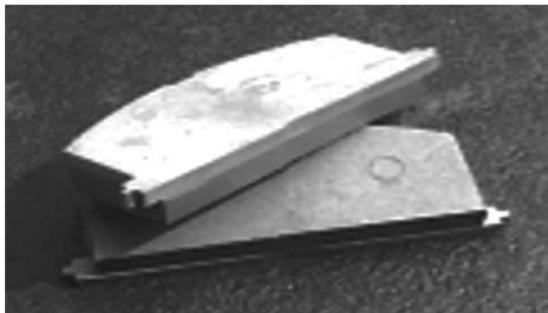
Rysunek 4. Części amortyzatorów [10]

*Figure 4. Shock absorber parts [10]*



Rysunek 5. Części do rozkładania fotela [10]

*Figure 5. Seat reclining parts [10]*



Rysunek 6. Metalowy klocek hamulcowy [10]

*Figure 6. Metal car brick [10]*

Przyszłe trendy w projektowaniu amortyzatora to:

- 1) Wysoki stosunek mocy do masy,
- 2) Lepsza sprawność konwersji energii mechaniczno-elektrycznej,
- 3) Wysoka kompatybilność z pojazdem.

Typowy amortyzator w pojeździe użytkowym musi być niezawodny i zdolny do pracy w zakresie częstotliwości 1-30 Hz i przy maksymalnym przemieszczeniu amortyzatora 0,1 m [11].

## 2. EKSPERYMENT

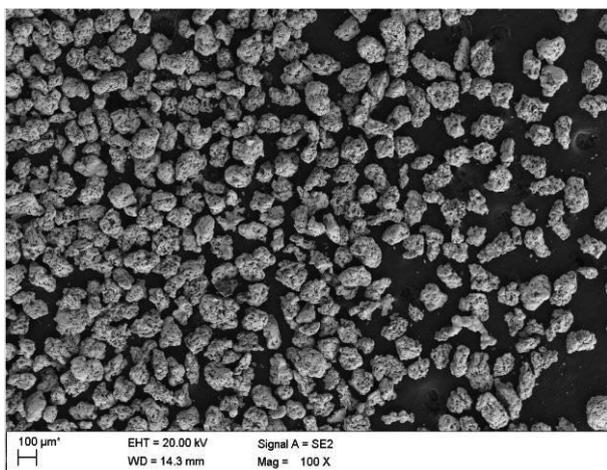
Proszek FC-0208 charakteryzuje się składem chemicznym węgiel w przedziale 0,6-0,9%; miedź 1,5-3,9% oraz żelaza, według standardu MPIF [12]. Materiał ten został wykorzystany do spiekania konwencjonalnego, w piecu taśmowym. Podczas procesu prasowania użyto ciśnienie 400MPa, a następnie poddano procesowi spiekania w temperaturze pieca 1121°C, w atmosferze azotu, w czasie 25 minut.

Materiały spiekane o składzie chemicznym: żelazo, węgiel, miedź są stosowane w przemyśle motoryzacyjnym do produkcji elementów wchodzących w skład samochodów.

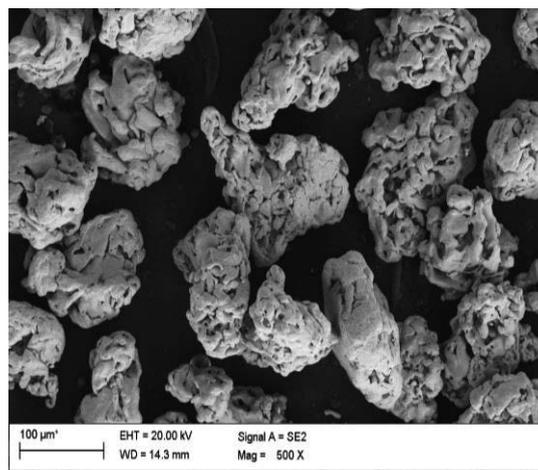
### 3. REZULTATY I DYSKUSJA

W celu zbadania struktury metalograficznej zastosowano skaningowy mikroskop elektronowy. Mikroskopia elektronowa jest szeroko rozpowszechnioną metodą badawczo-pomiarową, w ujęciu klasycznym umożliwiającą obrazowanie struktur i morfologii analizowanych materiałów za pomocą zogniskowanej wiązki elektronów, skanującej linia po linii fragmenty powierzchni badanych próbek. W wyniku analogowo-cyfrowego przetworzenia sygnałów - rejestrowanych przez układy detektorów jako rezultat oddziaływania emitowanych elektronów z badanym materiałem, uzyskuje się obraz dwuwymiarowy lub widmo promieniowania rentgenowskiego [13].

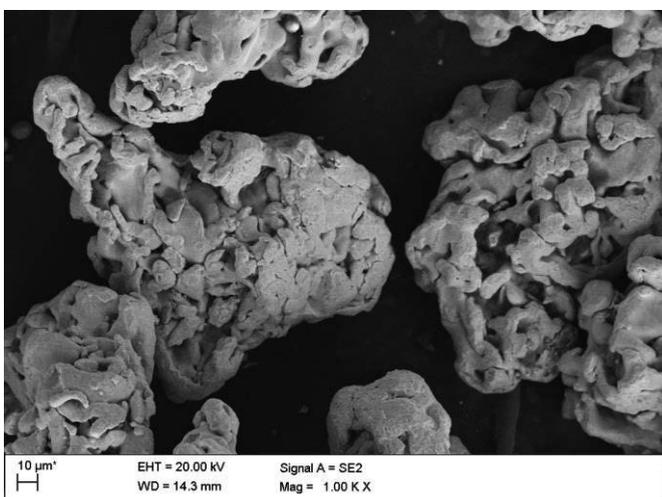
Sprawdzono także skład chemiczny metodą EDS. Poniżej zamieszczono wyniki analizy metalograficznej, w postaci zdjęć (Rys. 7-10) wraz z danymi składu chemicznego (Rys. 11).



Rysunek 7. Stop FC-0208, powiększenie 100X  
*Figure 7. FC-0208 alloy, magnification 100X*



Rysunek 8. Stop FC-0208, powiększenie 500X  
*Figure 8. FC-0208 alloy, magnification 500X*



Rysunek 9. Stop FC-0208, powiększenie 1000X  
*Figure 9. FC-0208 alloy, magnification 1000X*

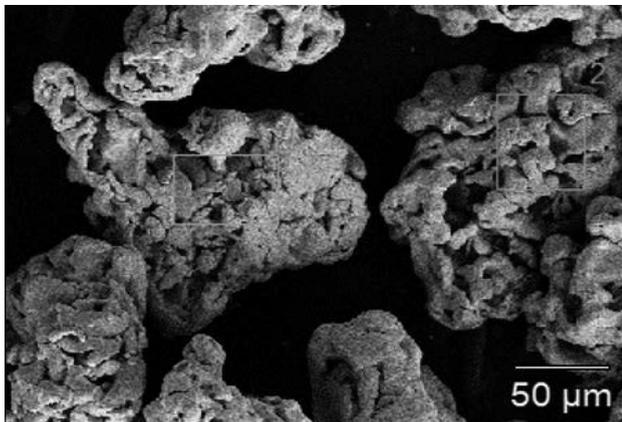
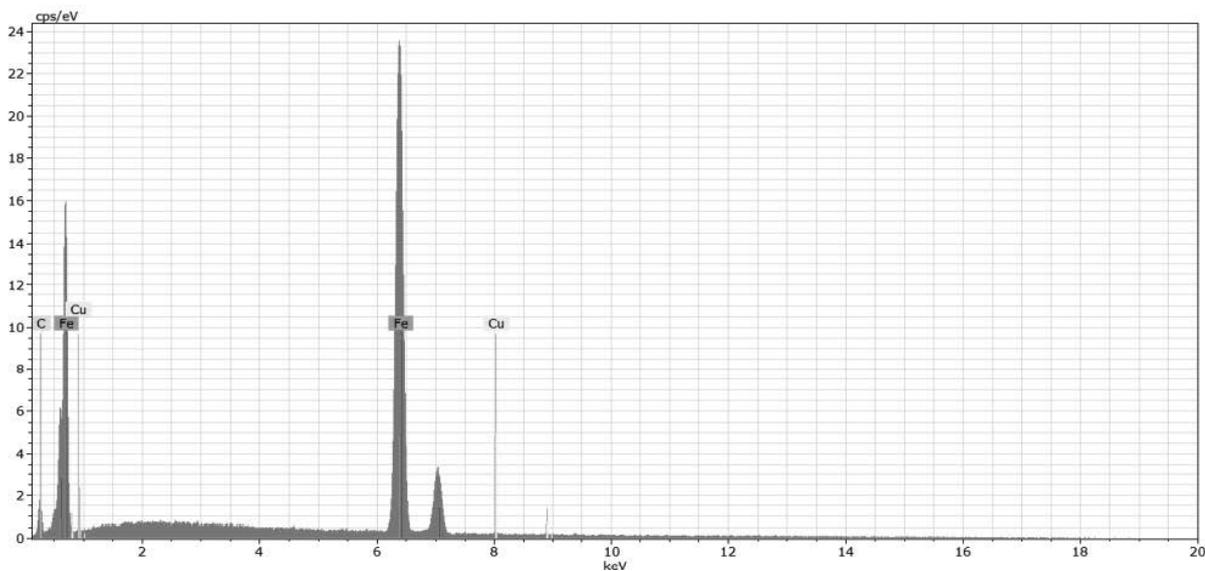


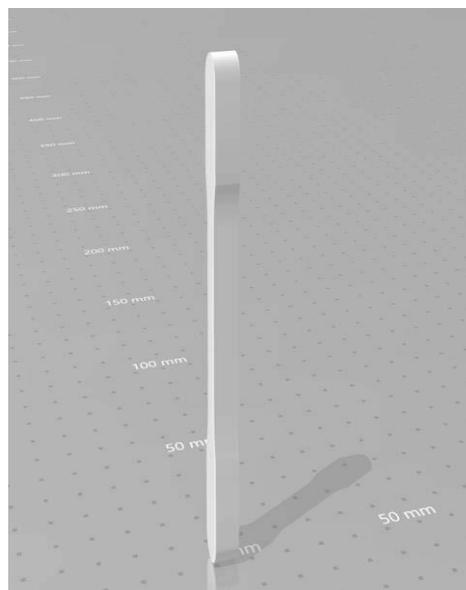
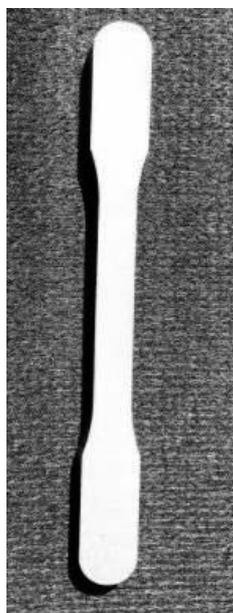
Image Resolution: 512 by 384  
Image Pixel Size: 0.65  $\mu\text{m}$   
Acc. Voltage: 20.0 kV  
Magnification: 1000

Rysunek 10. Stop FC-0208, powiększenie 1000X  
*Figure 10. FC-0208 alloy, magnification 1000X*



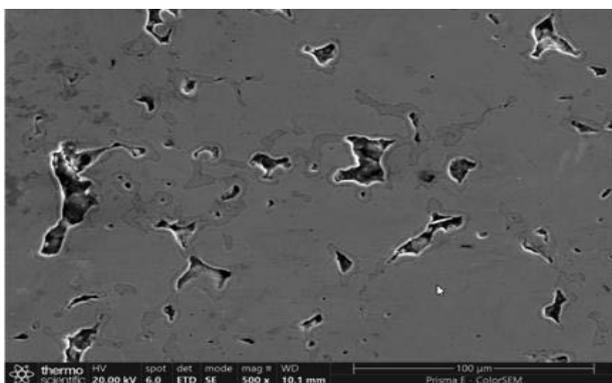
Rysunek 11. Przykładowe widmo EDS otrzymane dla materiału FC-0208  
*Figure 11. Exemplary EDS spectrum obtained for the material FC-0208*

Wykonano obserwacje elementu wyprodukowanego metodą metalurgii proszków (Rys. 12) z zastosowaniem mikroskopu (SEM/EDS). Rysunek (Rys.13-20) przedstawia strukturę metalograficzną oraz wyniki badań EDS (Rys. 21-24).

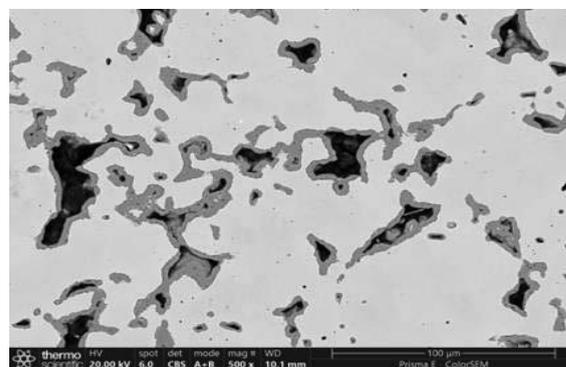


Rysunek 12 Element wyprodukowany metodą konwencjonalną metalurgii proszków  
*Figure 12. The element is produced by conventional powder metallurgy method*

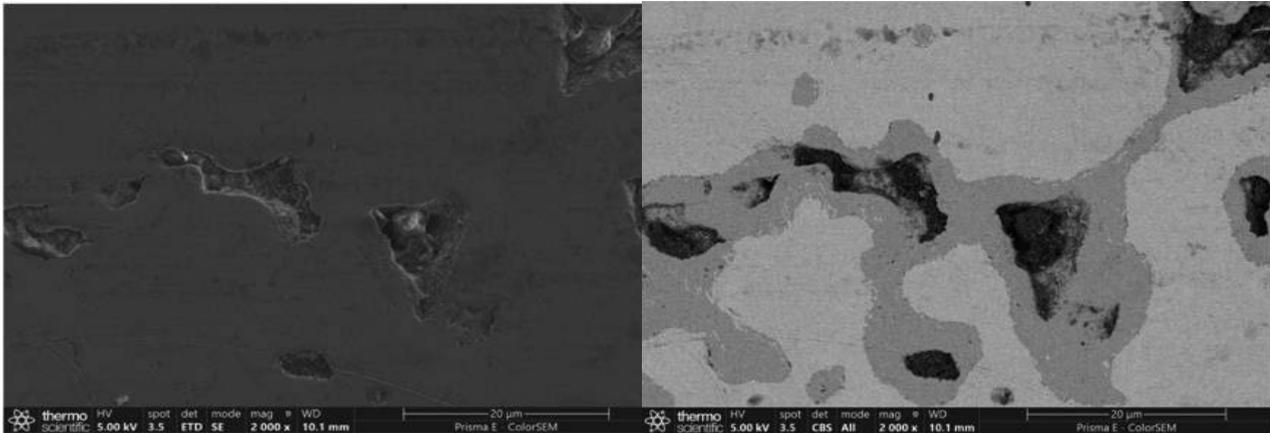
Wyprodukowano element (wypraskę) w kształcie wiosła o wymiarach: długości 89,64mm, szerokości 8,71mm; grubości 6,35 mm; gęstości: 6,3g/cm<sup>3</sup>; porowatości = 18%.



Rysunek 13. Stop FC-0208, Obraz SE, informacje topograficzne  
*Figure 13. FC-0208 alloy, SE image, topographic information*

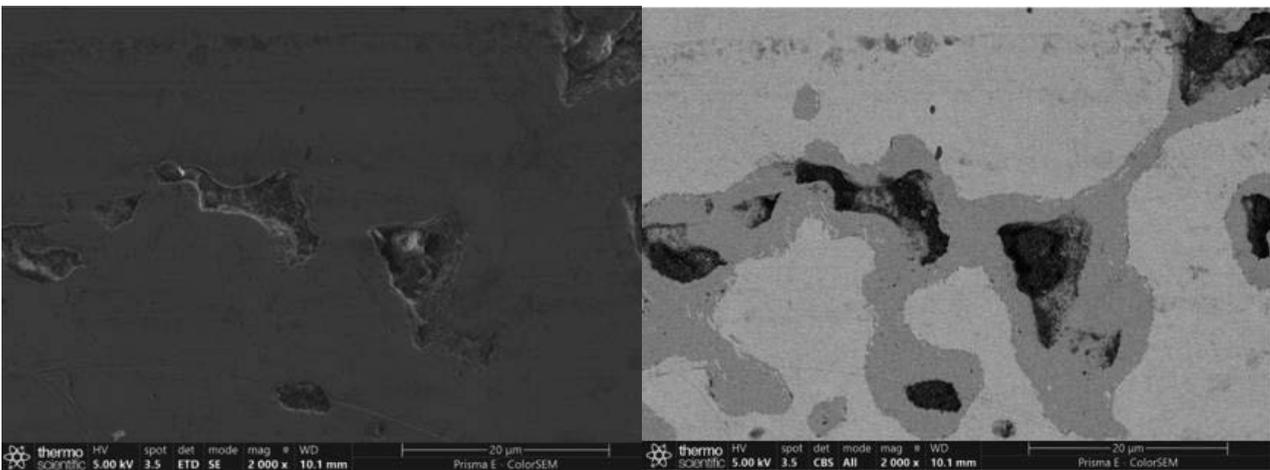


Rysunek. 14. Stop FC-0208, Obraz BSE, kontrast materiału  
*Figure 14. FC-0208 alloy, BSE image, material contrast*



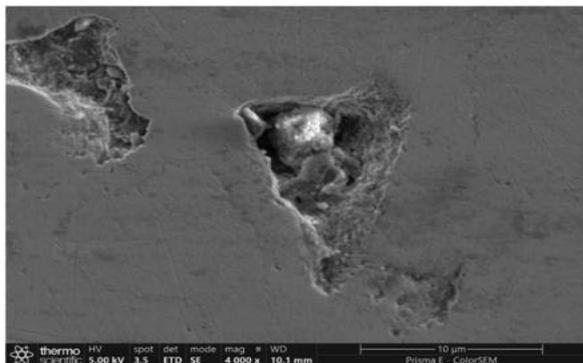
Rysunek 15. Stop FC-0208, Obraz SE, informacje topograficzne  
*Figure 15. FC-0208 alloy, SE image, topographic information*

Rysunek 16. Stop FC-0208, Obraz BSE, kontrast materiału  
*Figure 16. FC-0208 alloy, BSE image, material contrast*

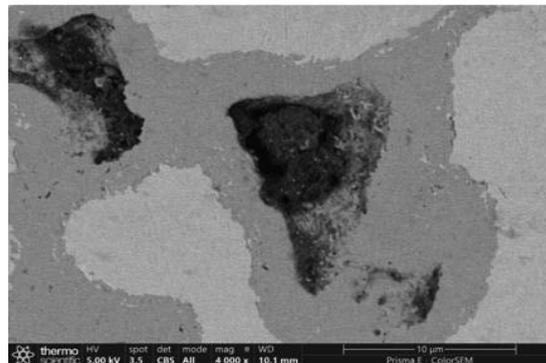


Rysunek 17. Stop FC-0208, Obraz SE, informacje topograficzne  
*Figure 17. FC-0208 alloy, SE image, topographic information*

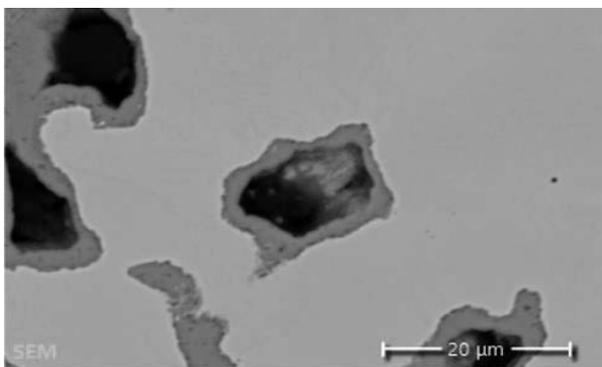
Rysunek 18. Stop FC-0208, Obraz BSE, kontrast materiału  
*Figure 18. FC-0208 alloy, BSE image, material contrast*



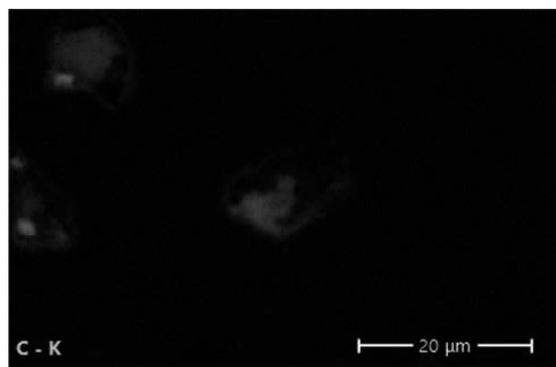
Rysunek 19. Stop FC-0208, Obraz SE, informacje topograficzne  
 Figure 19. FC-0208 alloy, SE image, topographic information



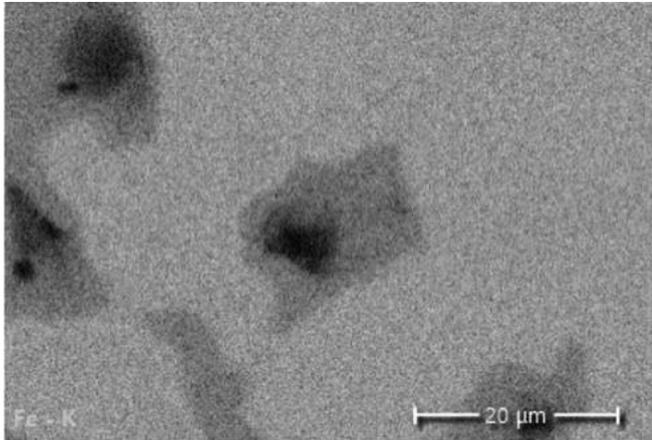
Rysunek 20. Stop FC-0208, Obraz BSE, kontrast materiału  
 Figure 20. FC-0208 alloy, BSE image, material contrast



Rysunek 21. Stop FC-0208, obraz SEM  
 Figure 21. FC-0208 alloy, SEM image

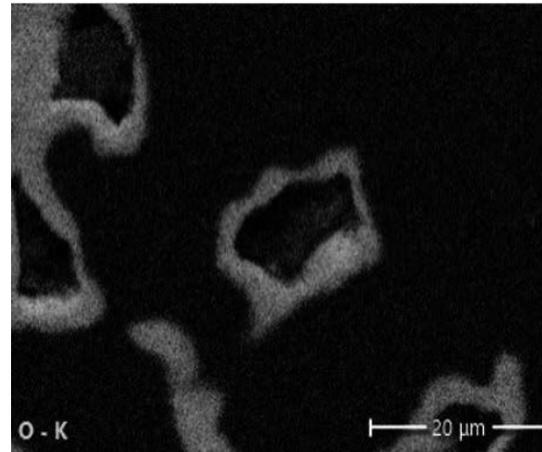


Rysunek 22. Stop FC-0208, mapa rozkładu pierwiastków  
 Figure 22. FC-0208 alloy, element distribution map



Rysunek 23. Stop FC-0208, mapa rozkładu pierwiastków

*Figure 23. FC-0208 alloy, element distribution map*



Rysunek 24. Stop FC-0208, mapa rozkładu pierwiastków

*Figure 24. FC-0208 alloy, element distribution map*

Na zdjęciach widoczne są pory. Skład chemiczny materiału FC-0208 ma duży wpływ na właściwości wytrzymałościowe elementu, które zależne są od połączonej porowatości [14].

Porowatość jest to stosunek objętości wszystkich porów do całkowitej objętości porowatego materiału [15]. Pory badanego elementu umożliwiają odpowiednie przepuszczanie oleju [16].

Odmierna budowa strukturalna badanego materiału sprawiła, że znalazł szerokie spektrum zastosowań, głównie w przemyśle samochodowym, lotniczym i kosmicznym [17].

Materiały te przy małej masie i dobrej wytrzymałości na ściskanie posiadają dużą zdolność do absorbowania energii. Są niepalne, materiały te wykazują dużą odporność zmęczeniową [18].

#### 4. WNIOSKI

W procesie projektowania należy uwzględnić właściwości materiału proszkowego oraz odpowiednie parametry procesowe.

Zbadano materiał FC-0208, który poddano procesowi prasowania pod ciśnieniem 400MPa. Następnie wykonano proces spiekania w temperaturze 1121°C , w czasie 25 minut; w piecu, w atmosferze ochronnej azotu N<sub>2</sub> / H<sub>2</sub>: 90/10.

Eksperyment ten daje informacje niezbędne, aby wyprodukować elementy o wymaganym kształcie, właściwościach wytrzymałościowych oraz zadanej strukturze materiału.

Głównym wymaganiem struktury elementów wytworzonych z materiału FC-0208 jest występowanie por. Co potwierdziły badania mikroskopowe. Pory są niezbędne by następował odpowiedni przepływ oleju na przykład w pracy tłoka, w celu wyrównywania ciśnień.



**LITERATURA:**

1. Andrzej Ciał, Hanna Frydrych, Tadeusz Pieczonka; Zarys metalurgii proszków, Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne Warszawa 1992; ISBN 83-02-04315-X
2. [http://elearning.prz.edu.pl/pluginfile.php/65582/mod\\_resource/content/1/Historia%20techniki%20Metalurgia%20proszko%CC%81w.pdf](http://elearning.prz.edu.pl/pluginfile.php/65582/mod_resource/content/1/Historia%20techniki%20Metalurgia%20proszko%CC%81w.pdf); data pobrania 1 czerwiec 2021
3. PN EN ISO 3252, Metalurgia proszków - Słownictwo; grudzień 2002; ICS 01.040.77; 77.160
4. <http://www.kmimp.agh.edu.pl/pliki/MP.pdf>; data pobrania 1 czerwiec 2021
5. Władysław Rutkowski, Projektowanie właściwości wyrobów spiekanych z proszków i włókien, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1977.
6. Tomasz Wiśniewski, Walerian Majchrzak, Dariusz Garbiec, Filip Heyduk, Proces spiekania wyrobów wykonywanych technologią metalurgii proszków, Obróbka Plastyczna Metali t. XXIII nr 1 (2012)
7. I. Anish Upadhyaya; G S Upadhyaya Powder Metallurgy, Science, Technology and Materials; ISBN 978 1 4398 5746 5
8. <https://naukawpolsce.pap.pl/aktualnosci/news%2C370052%2Cnaukowcy-z-wat-opracowali-nowoczesna-metode-otrzymywania-spiekow.html> ; data pobrania 1 czerwiec 2021
9. <https://www.epma.com/>; data pobrania 1 czerwiec 2021
10. P. Ramakrishnan; Advances in Powder Metallurgy Properties, Processing and Applications Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering 2013, Pages 493-519
11. A Comprehensive Review of the Techniques on Regenerative Shock Absorber Systems Received: 28 March 2018; Accepted: 3 May 2018; Published: 7 May 2018 ; Energies 2018, 11, 1167 ; doi:10.3390/en11051167
12. Materials Standards for PM Structural Parts, MPIF Standard 35 2018 Edition
13. Małgorzata Bużantowicz, Witold Bużantowicz, Zastosowanie mikroskopii skaningowej do inspekcji układów elektronicznych wykonanych w technologii SMT, Mechanik 7/2013, XVII Międzynarodowa Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji
14. Handbook for Sinter Components; Material and Powder Properties; Copyright Hoganas AB, 2004.
15. Methods of soil analysis, Part 4, Physical Methods, Soil Science Society of America Book Series: 5; rozdział 2.3 Porosity; January 2002; DOI: 10.2136/sssabookser5.4.c11
16. ISO 4022; Permeable sintered metal materials - Determination of fluid permeability; 2018-09; ICS : 77.160 Powder metallurgy
17. Darłak P., Dudek P. Materiały wysoko porowate – metody wytwarzania i zastosowanie. Odlewnictwo – Nauka i Praktyka 1, 2004, s. 3, 4, 16,17
18. Stachowski A. Materiały porowate przyszłościowym zastosowaniem w konstrukcjach. Kompozyty 1, 2001, s. 224, 225, 226

## Natryskiwanie cieplne ścian szczelnych kotłów energetycznych powłokami zabezpieczającymi przed korozją wysokotemperaturową

W. Szymański\*, A. Migacz\*, A. Czupryński<sup>a</sup>, M. Żuk<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Spawalnictwa  
email\*: wojcszy861@polsl.pl, agatmig637@student.polsl.pl,

**Streszczenie:** W artykule opisano metody natryskiwania cieplnego – ich wady, zalety, przebiegi procesów oraz najczęściej stosowane materiały powłokowe. Badania służyły porównaniu technologii natryskiwania cieplnego płomieniowego poddźwiękowego i naddźwiękowego, a więc najstarszej technologii natryskiwania cieplnego z jedną z najnowszych odmian tego procesu.

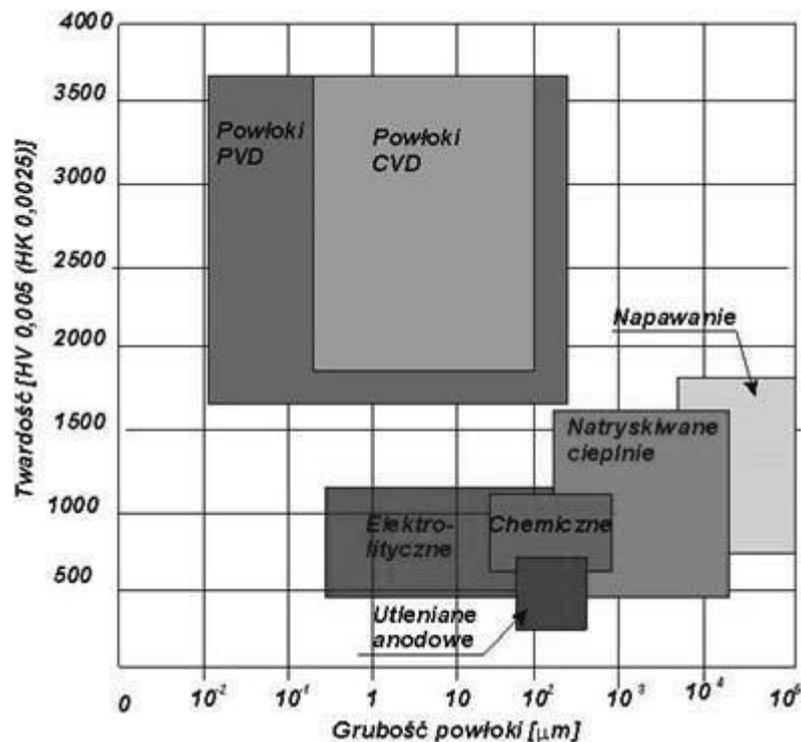
**Abstract:** The article describes the methods of thermal spraying – their disadvantages, advantages, process processes, and the most commonly used coating materials. The research served to compare the technology of flame subsonic and supersonic thermal spraying, the oldest thermal spraying technology, with one of the latest variations of this process.

**Słowa kluczowe:** natryskiwanie cieplne, metalizacja, powłoki ochronne, HVOF, HVOF, FPS.

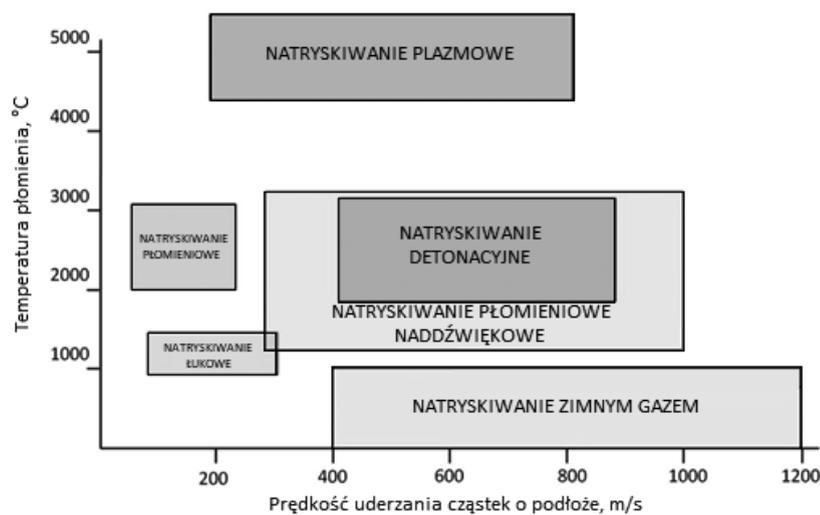
### 1. WSTĘP

Natryskiwanie cieplne to jedna z dominujących technologii zabezpieczenia przed zużyciem ściernym i korozyjnym elementów części maszyn na rynkach wysoko rozwiniętych. Możliwe do uzyskania powłoki pod warunkiem poprawnie prowadzonego procesu nie wpływają cieplnie na strukturę materiału podłoża, mogą cechować się wyższą twardością niż warstwy wierzchnie uzyskane w przypadku hartowania, nawęglania czy azotowania stali narzędziowych, mają wyższą odporność na korozję niż stale nierdzewne i kwasoodporne oraz mogą być poddawane ciągłej regeneracji w przypadku zużycia. W procesach natryskiwania cieplnego możliwe są do wytworzenia warstwy z ponad 200 materiałów i kompozytów. Warunkiem użycia materiału jest dostępność jego form (proszek, drut, zawiesina) oraz termoplastyczność (w przypadku materiałów kompozytowych dotyczy to osnowy). Metody natryskiwania cieplnego można uporządkować w zależności od temperatury i prędkości cząstek jakie osiągają na wylocie z dyszy pistoletu. Obecnie dąży się do uzyskania jak największej energii kinetycznej cząstek oraz minimalnej, niezbędnej do uplastycznienia temperatury. W obrębie jednej metody można sterować tymi parametrami przez np. skład mieszanki gazów palnych, parametry prądowo napięciowe źródła spawalniczego, czasu lotu cząstek (odległości od końca dyszy do

powierzchni pokrywanej), ciśnienia gazu rozpylającego, rodzaju i budowy zastosowanych dysz wylotowych.



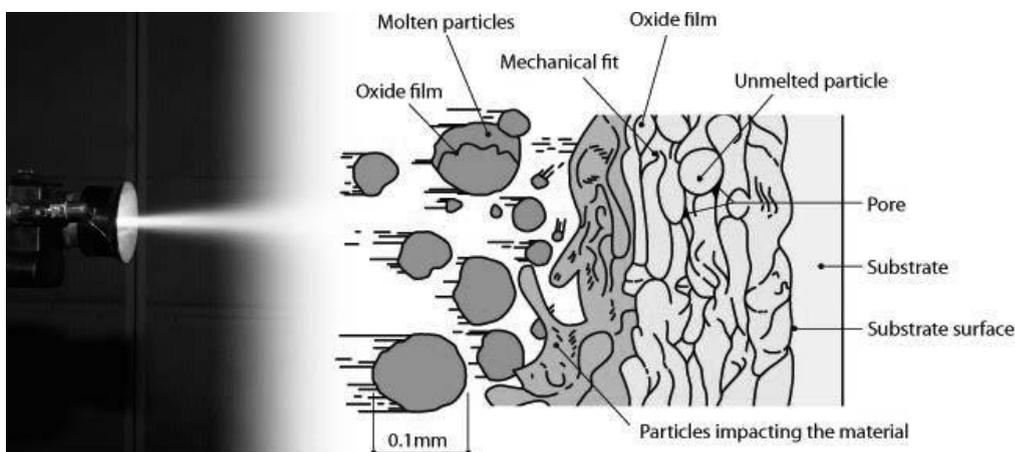
Rys. 1. Natryskiwanie ciepłynie w porównaniu z innymi metodami nanoszenia powłok [1].  
 Figure 1. Thermal spraying versus other coating methods [1].



Rys. 2. Przedstawienie graficzne różnych metod natryskiwania ciepłynie w zależności od prędkości i temperatury cząstek [2].  
 Figure 2. Graphical representation of different thermal spraying methods as a function of particle velocity and temperature [2].

### 1.1 Mechanizm tworzenia powłoki

Powłoki do tworzenia kolejnych warstw potrzebują energii kinetycznej i termicznej. Źródłami energii termicznej mogą być: ciepło spalania gazów palnych, łuk elektryczny, łuk plazmowy, powietrze o wysokiej temperaturze. Źródłem energii kinetycznej najczęściej jest strumień powietrza z kompresora, z lub bez dodatkowym ciśnieniem spalin procesu spalania. Materiał powłokowy dostarczany jest w postaci drutu litego lub proszkowego, proszku lub zawiesiny. Po ogrzaniu uplastyczniona cząsteczka proszku lub stopiona część drutu zostaje rozpędzona w dyszy pistoletu i opuszcza ją z dużą prędkością. W czasie lotu może pokryć się tlenkami, które obniżają właściwości powłoki, stąd dążenie do zwiększania energii kinetycznej, a nie termicznej. Po uderzeniu w podłoże cząstka spłaszcza się w kształt dysku jednocześnie zakotwicząc się w nierównościach podłoża i innych cząstkach. Powłoki natryskiwane nakłada się w wielu cienkich warstwach, aby zmniejszyć naprężenia w powłoce oraz ujednorodnić jej skład i budowę.



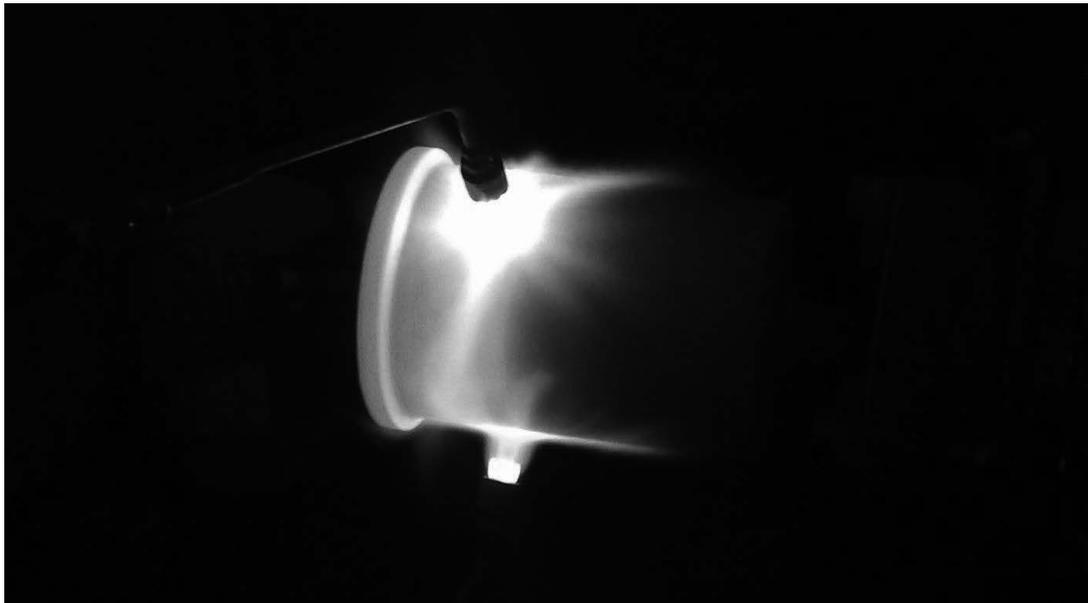
Rys. 3. Schemat tworzenia powłoki natryskiwanej cieplnie [3].

*Figure 3. Schematic of thermal sprayed coating build-up [3]*

### 1.2 Natryskiwanie płomieniowe poddźwiękowe

Natryskiwanie płomieniowe poddźwiękowe to jedna z najstarszych metod natryskiwania cieplnego zaprezentowana po raz pierwszy w 1909 roku przez Maxa Ulricha Schoopa, który po dziś dzień nazywany jest ojcem natryskiwania cieplnego, ze względu na fakt poświęcenia 35 lat pracy na doskonaleniu tego procesu. W ramach tej odmiany natryskiwania stosuje się gazy palne acetylen i tlen, których temperatura płomienia spalania oscyluje w okolicy 3000 °C. Gazem przyspieszającym cząstki jest sprężone powietrze i ciśnienie spalin. Materiał powłokowy może być podawany w postaci proszku, drutu lub żyłki. Ze względu na wysoką temperaturę procesu możliwe jest nakładanie szerokiego spektrum materiałów rozpoczynając od cynku, kończąc na ceramice. Niska energia kinetyczna cząstek jest przyczyną niskiej adhezji do podłoża, dlatego zalecane jest stosowanie warstw podkładowych z aluminku niklu w którym podczas procesu natryskiwania zachodzi reakcja egzotermiczna tworząca mikrozgrzeiny z materiałem podłoża. Jest to jednak zabieg drogi, czasochłonny i nieuzasadniony technologicznie. Obecnie jedyne rozsądne zastosowanie natryskiwania płomieniowego poddźwiękowego to nanoszenie powłok, które następnie zostają przetopione, co zapewnia im

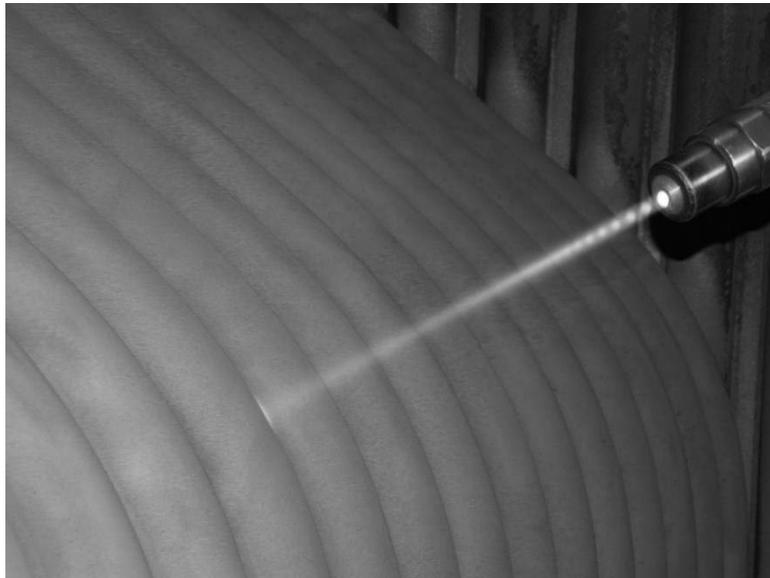
jako jedynej technologii natryskiwania cieplnego dyfuzyjne połączenie z podłożem. Największą zaletą procesu przetapiania jest przede wszystkim odporność na uderzenia i naciski punktowe, które mogą zniszczyć powłoki wykonane innymi metodami. Wadą procesu przetapiania jest wprowadzenie dużej ilości ciepła do materiału, co skutkuje zmianami strukturalnymi i deformacją podłoża.



Rys. 4. Proces przetapiania powłoki rolki samotoka hutniczego [4].  
*Figure 4. The process of remelting the coating of a metallurgical roll [4].*

### 1.3 Natryskiwanie płomieniowe naddźwiękowe

Natryskiwanie płomieniowe naddźwiękowe stanowi rozwinięcie technologii poddźwiękowej. Stosowane są inne gazy – propan butan, tlen, wodór jako gazy palne, azot jako gaz transportujący proszek. W pistolecie do natryskiwania znajduje się dysza de Lavalą umożliwiającą rozpędzenie strugi gazów z materiałem powłokowym do prędkości naddźwiękowych. Temperatura płomienia zostaje zredukowana w zależności od generacji systemu do nawet 1500 °C, co uniemożliwia natryskiwanie ceramiki bez osnowy. Materiał powłokowy podawany jest najczęściej w postaci proszku kompozytowego zawierającego węglik chromu lub wolframu w osnowach kobaltowej lub stopie nikiel chrom. Technologia natryskiwania płomieniowego naddźwiękowego jest dedykowana dla tego typu materiałów. Stosunkowo niska temperatura jest niewystarczająca do rozkładu węgliku  $Cr_3C_2$  oraz WC do ich mniej korzystnych odmian. Wysoka energia kinetyczna zapewnia bardzo dobrą adhezję do podłoża rzędu 70 MPa, niską porowatość poniżej 1% oraz wysoką twardość do 1600 HV (dla materiału WC-Co-Cr). Natryskiwanie naddźwiękowe wymaga dużego doświadczenia i wiedzy technologicznej, niewielkie błędy w procesie aplikacji mogą przynieść nieproporcjonalnie większe defekty powłoki.

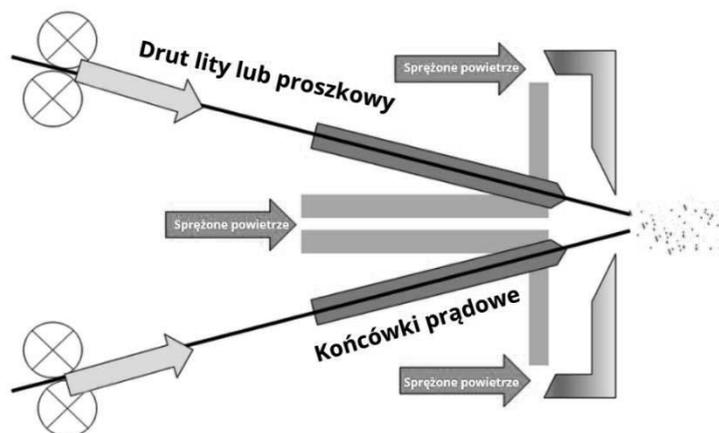


Rys. 5. Proces natryskiwania rurowych przegrzewaczy pary wodnej, w strumieniu gazów widoczne są stojące fale dźwiękowe [5].

Figure 5. Spraying process of tubular steam superheaters, standing sound waves are visible in the gas stream [5].

#### 1.4 Natryskiwanie łukowe

Natryskiwanie łukowe bazuje na spawalniczych źródłach zasilania. Materiał podawany jest zbieżnie w postaci drutu przez końcówki prądowe. Po zetknięciu zajarza się łuk elektryczny topiący drut lub jego otulinę, a dysza rozpylająca ze sprężonym powietrzem zapewnia odpowiednią energię kinetyczną. Metoda zapewnia bardzo dużą wydajność procesu, umożliwia nakładanie materiałów odpornych na ścieranie (druty proszkowe z dodatkiem węgla, materiały amorficzne), korozję (druty lite cynkowe oraz cynk- aluminium, stopy nikiel-chrom). Otrzymane powłoki mają wyższą przyczepność do podłoża, mniejszą porowatość i niższą cenę w porównaniu z metodą płomieniową poddźwiękową.



Rys. 6. Przedstawienie graficzne procesu natryskiwania łukowego [6].

Figure 6. Graphical presentation of arc spraying [6].

## 2. BADANIA WŁASNE

### 2.1 Cel badań

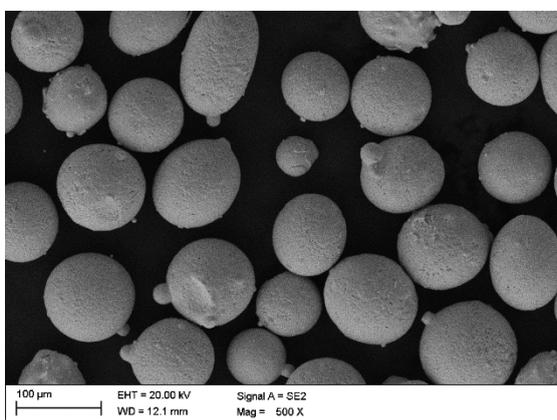
Celem badań było porównanie metod natryskiwania cieplnego płomieniowego poddźwiękowego z przetopieniem powłoki (FPS) i natryskiwania naddźwiękowego (HVOF) z użyciem proszków dedykowanych do wykonywania zabezpieczeń odpornych na korozję wysokotemperaturową. W tym celu wykonano powłoki:

- natryskiwanie na stanowisku ręcznym poddźwiękowo, z jednoczesnym przetopieniem powłoki, proszkami Eutalloy RW 17535 (producent Castolin Eutectic) i Durum 456 (producent Verschleiss-Schutz GmbH) o zbliżonym składzie chemicznym Ni-Cr-B-Si, (rys. 7-9),
- natryskiwane na stanowisku ręcznym i zrobotyzowanym naddźwiękowo proszkiem Amperit 588 (producent Höganäs) o składzie chemicznym  $\text{Cr}_2\text{C}_3\text{-Ni-Cr}$  w proporcjach 75%/25%.

Próbki z powłokami zostały poddane badaniom:

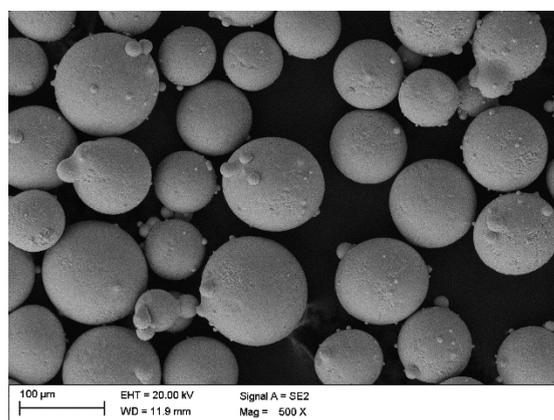
- metalograficznym,
- twardości,
- odporności na impulsowe obciążenia udarowe.
- korozji wysokotemperaturowej.

#### 2.1.1 Zdjęcia SEM proszków użytych do wykonywania powłok ochronnych



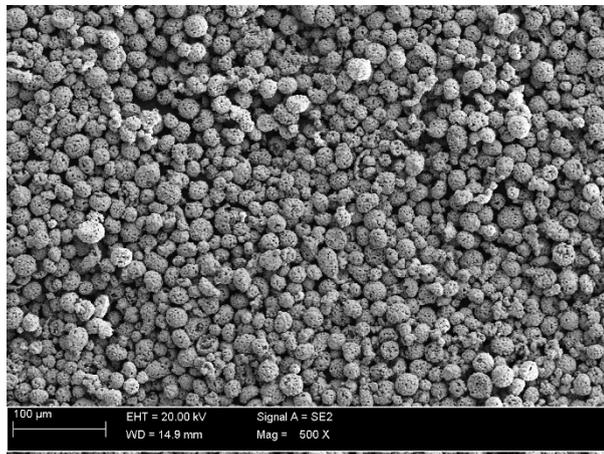
Rys. 7. Obraz SEM proszku Eutalloy RW17535.

*Figure 7. SEM image of Eutalloy RW17535 powder.*



Rys. 8. Obraz SEM proszku Durum 456.

*Figure 8. SEM image of Durum 456 powder.*



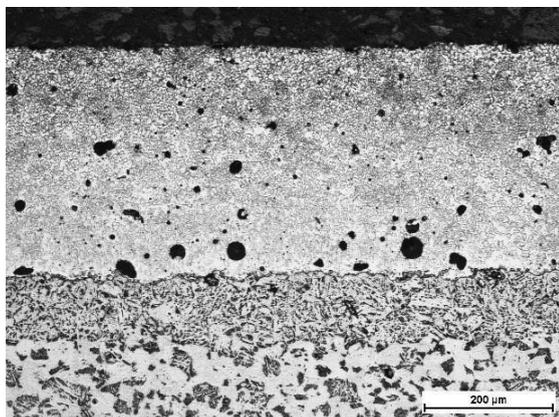
Rys. 9. Obraz SEM proszku Amperit 588  
 Figure 9. SEM image of Amperit 588 powder

## 2.2 Mikrostruktury powłok

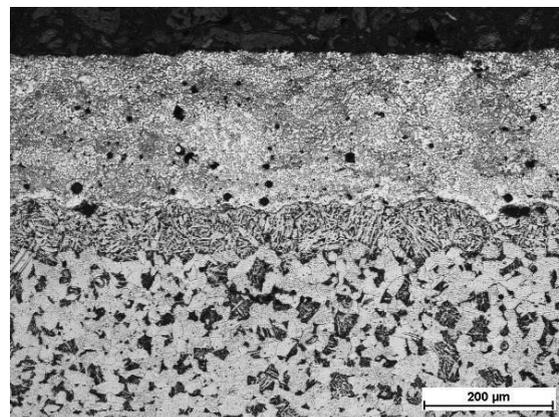
Próbki zostały wycięte z fragmentów ściany szczelnej kotła wykonanej ze stali gatunku 16Mo3 i pofragmentowane na równe części, które były następnie użyte jako podłoże do natrysku. Zostały one poddane procesowi obróbki strumieniowo ściernej w celu mechanicznego usunięcia zanieczyszczeń pozostałych na powierzchni próbek oraz aby zwiększyć ich chropowatość, dzięki czemu możliwe było uzyskanie lepszej przyczepności nanoszonych cząsteczek do podłoża.

### 2.2.1 Metoda płomieniowa poddźwiękowa – natrysk ręczny

Mimo iż obie powłoki cechują się porowatością w kształcie sferycznym w dolnej części, to połączenie z podłożem spełnia założone kryteria jakościowe. Należy jednak zaznaczyć fakt, iż w powłoce z materiałów marki Durum 456 jest znacznie mniej pustek (rys. 11). Widoczne są szerokie strefy wpływu ciepła w obu przypadkach.



Rys. 10. Powłoka wykonana z proszku Eutalloy RW17535.  
 Figure 10. Coating made of Eutalloy RW17535 powder.

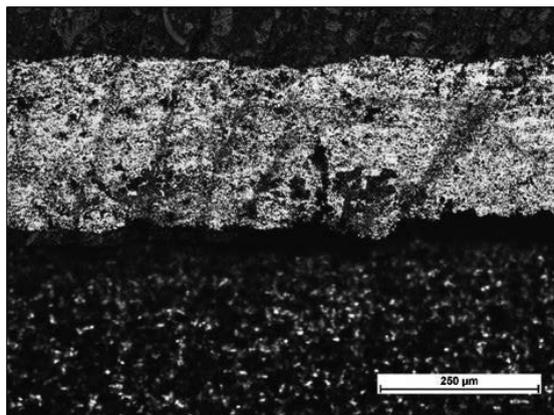


Rys. 11. Powłoka wykonana z proszku Durum 456.  
 Figure 11. Coating made of Durum 456 powder.

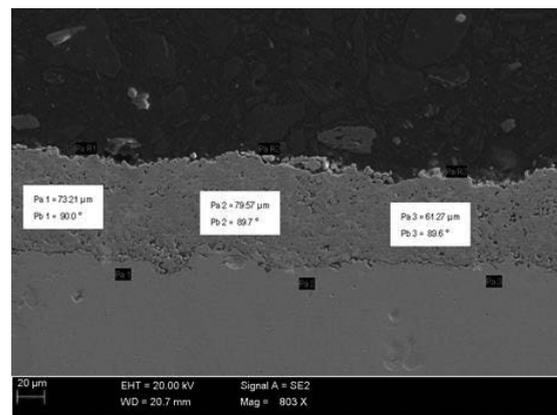


## 2.2.2 Metoda płomieniowa naddźwiękowa

Natrysk cieplny płomieniowy naddźwiękowy wykonano przy współpracy z Katedrą Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych na zrobotyzowanym stanowisku oraz ręcznie z firmą MWS Metal Welding Services.



Rys. 12. Mikrostruktura powłoki po natrysku ręcznym proszkiem Amperit 588.  
*Figure 12. Microstructure of the coating after hand spraying Amperit 588.*



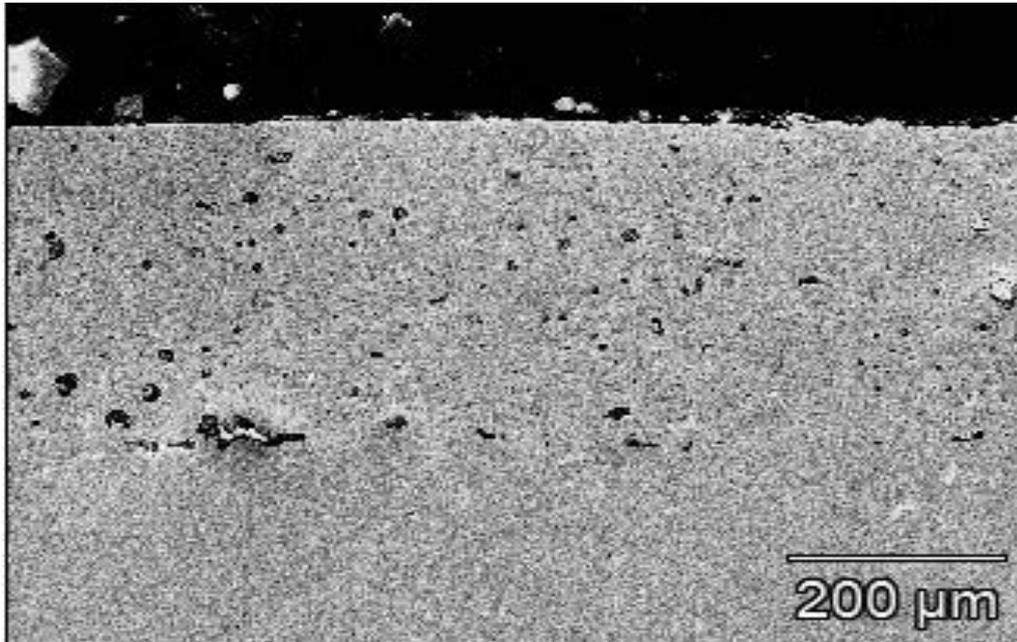
Rys. 13. Mikrostruktura powłoki po natrysku zrobotyzowanym proszkiem Amperit 588.  
*Figure 13. Microstructure of the coating after robotic spraying Amperit 588.*

Na rysunku 12 widoczny jest brak połączenia z podłożem, co może prowadzić do odpadnięcia od podłoża nałożonej powłoki w trakcie pracy, a przez to pozbawienia materiału rodzimego ochrony przed korozją. Na rysunku 13 widać bardzo dobrą przyczepność do podłoża oraz jednorodną strukturę nałożonej powłoki, brak porów oraz pęknięć. Niemniej jednak powłoka ta została odrzucona w dalszym przebiegu badań ze względu na bardzo małą grubość.

## 2.3 Analiza składu chemicznego EDS

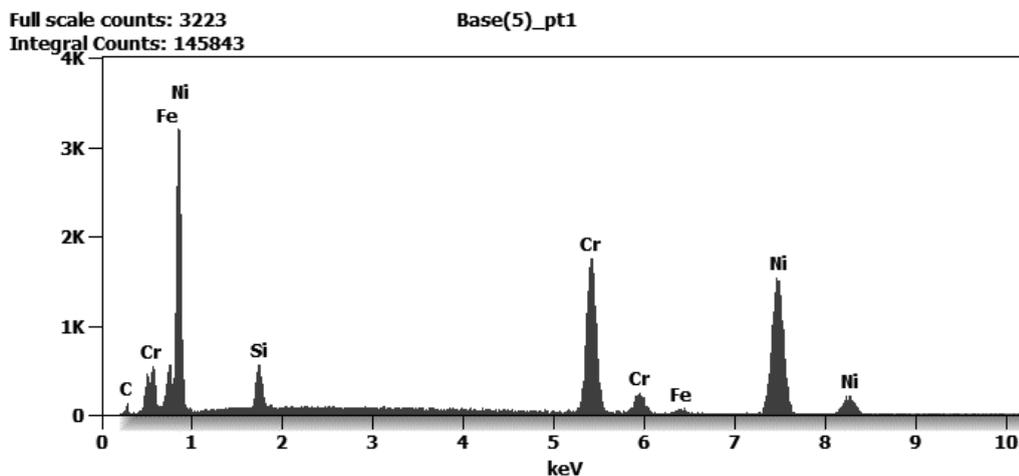
Za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego Zeiss Supra 25 z przystawką do mikroanalizy RTD EDS, EDAX firmy AMETEK, na przekroju poprzecznym zgładów metalograficznych dokonano analizy składu chemicznego powłok dla każdego z użytych proszków. Do badań wybrano fragmenty powierzchni oraz pojedyncze punkty na przekroju powłoki. Poniżej zawarte zostały obrazy mikrostruktury, wykresy graficznie odzwierciedlające skład chemiczny badanych powłok oraz tabele z dokładnym udziałem procentowym poszczególnych pierwiastków.

### 2.3.1 Mikrostruktura oraz analiza składu chemicznego powłoki natryskiwanej proszkiem Eutalloy RW17535



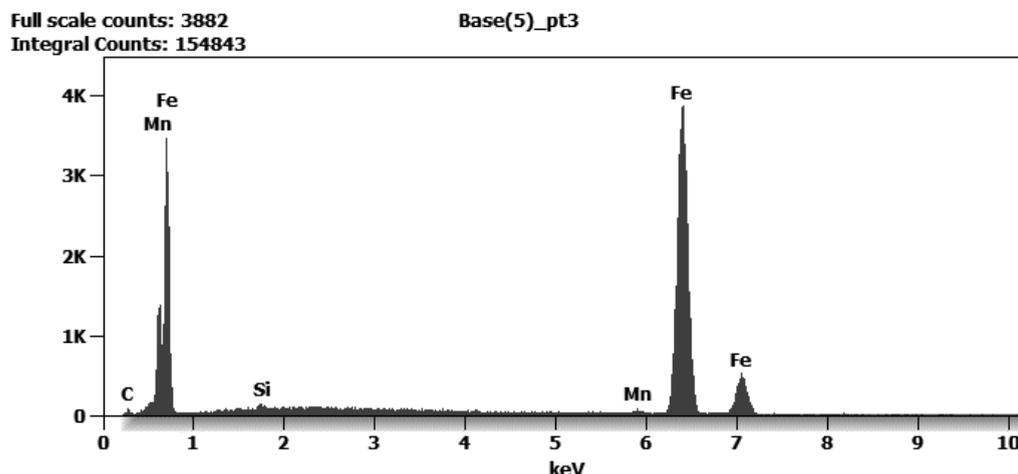
Rys. 14. Powłoka natryskiwana proszkiem Eutalloy RW17535 – obszar oraz dwa punkty poddane analizie EDS.

*Figure 14. Coating sprayed with Eutalloy RW17535 powder – an area and two points subjected to the EDS analysis.*



Rys. 15. Powłoka natryskiwana proszkiem Eutalloy RW17535 – skład chemiczny obszaru 1.

*Figure 15. Coating sprayed with Eutalloy RW17535 powder – chemical composition of area 1.*



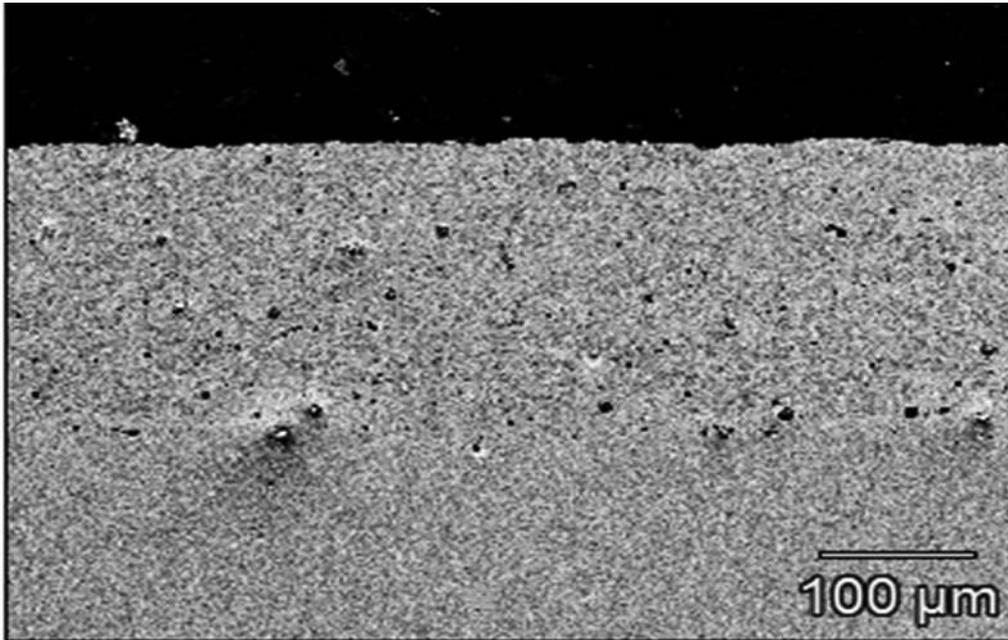
Rys. 16. Powłoka natrykiwana proszkiem Eutalloy RW17535 – skład chemiczny punktu 3  
Figure 16. Coating sprayed with Eutalloy RW17535 powder – chemical composition of point 3

Tabela 1. Udział masowy oraz atomowy poszczególnych pierwiastków w powłoce natrykiwanej proszkiem Eutalloy RW17535.

Table 1. Mass and atomic fraction of elements for coating sprayed with Eutalloy RW17535 powder.

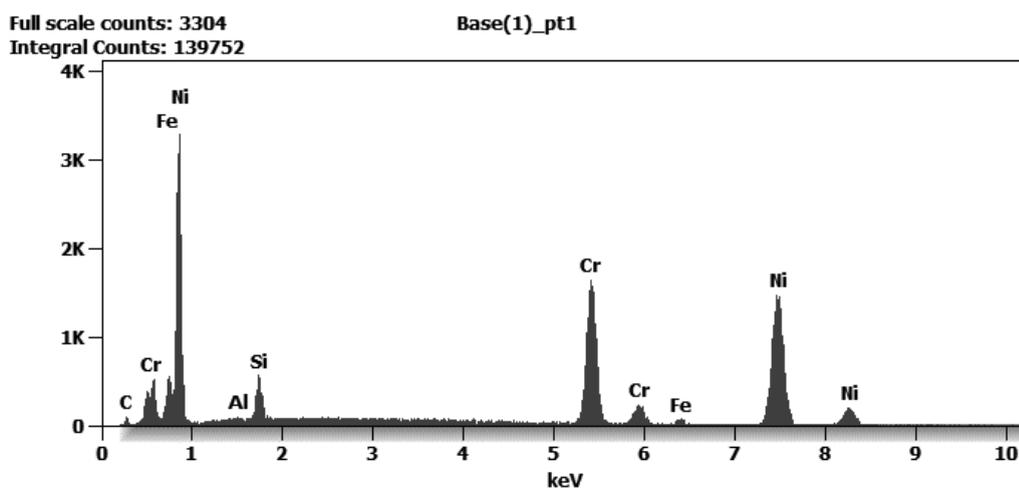
Punkt 1								
Pierwiastek	C [%]	N [%]	O [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Ni [%]
Udział masowy	2,2	-	-	3,7	30,2	-	1,2	62,7
Udział atomowy	9,1	-	-	6,7	29,3	-	1,1	53,8
Punkt 2								
Udział masowy	3,7	2,7	16,9	11,4	22,1	-	1,3	41,8
Udział atomowy	9,8	6,2	33,8	13,0	13,6	-	0,7	22,8
Punkt 3								
Udział masowy	1,1	-	-	0,4	-	1,2	97,2	-
Udział atomowy	5,0	-	-	0,7	-	1,1	93,2	-

### 2.3.2 Mikrostruktura oraz analiza składu chemicznego powłoki natryskiwanej proszkiem Durum 456

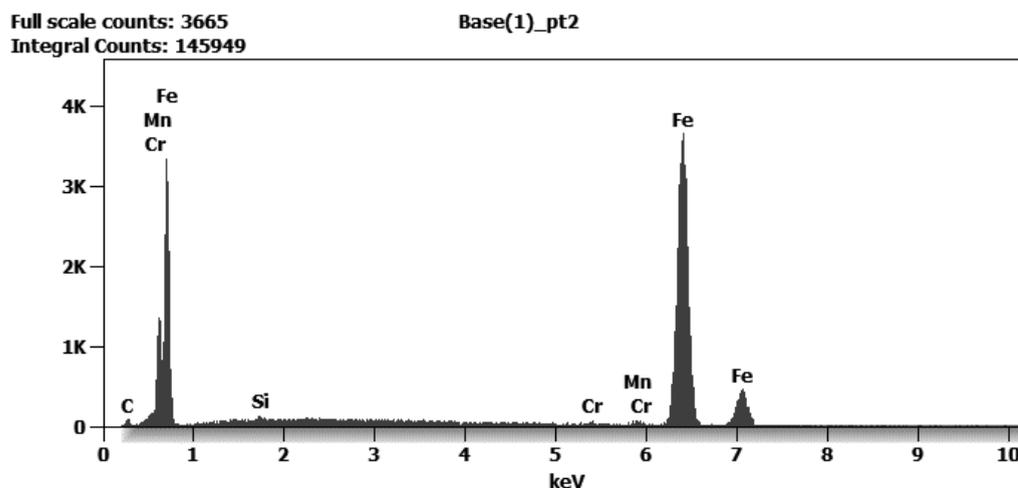


Rys. 17. Powłoka natryskiwana proszkiem Durum 456 – obszar oraz punkt poddane analizie EDS.

*Figure 17. Coating sprayed with Durum 456 powder – an area and one point subjected to the EDS analysis.*



Rys. 18. Powłoka natryskiwana proszkiem Durum 456 – skład chemiczny obszaru 1.  
*Figure 18. Coating sprayed with Durum 456 powder – chemical composition of area.*



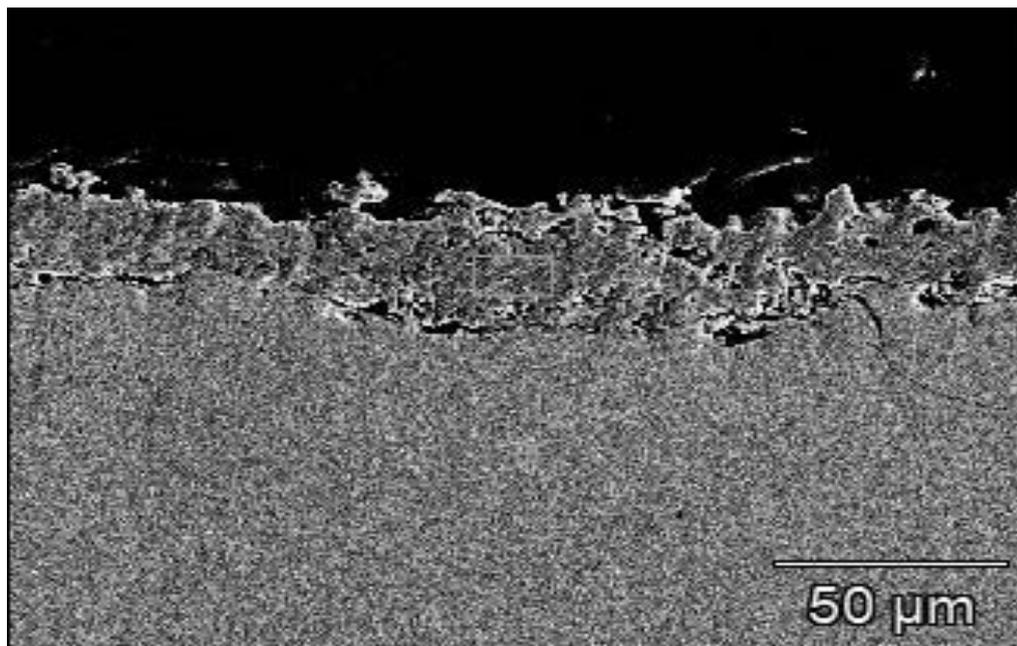
Rys. 19. Powłoka natryskiwana proszkiem Durum 456 – skład chemiczny punktu 2.  
Figure 19. Coating sprayed with Durum 456 powder – chemical composition of point 2.

Tabela 1. Udział masowy oraz atomowy poszczególnych pierwiastków w powłoce natryskiwanej proszkiem Durum 456.

Table 1. Mass and atomic fraction of elements for coating sprayed with Durum 456 powder.

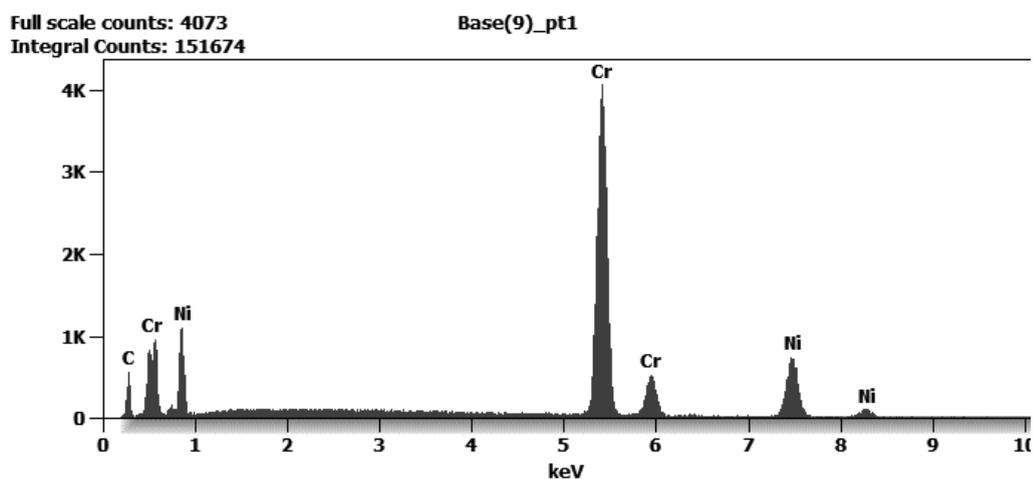
Punkt 1							
Pierwiastek	C [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Ni [%]
Udział masowy	2,1	0,2	3,5	29,6	-	1,1	63,5
Udział atomowy	8,8	0,4	6,3	28,8	-	1,0	54,7
Punkt 2							
Udział masowy	1,3	-	0,4	0,2	1,1	97	-
Udział atomowy	5,7		0,8	0,2	1,1	92,3	-

### 2.3.3 Mikrostruktura oraz analiza składu chemicznego powłoki natryskiwanej proszkiem Amperit 588

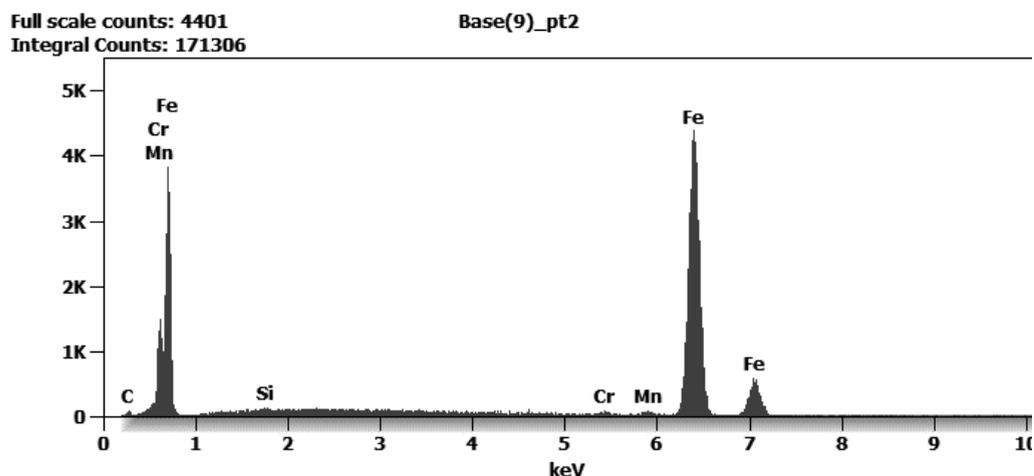


Rys. 20. Powłoka natryskiwana proszkiem Amperit 588 – obszar oraz punkt poddane analizie EDS.

Figure 20. Coating sprayed with Amperit 588 powder – an area and one point subjected to the EDS analysis.



Rys. 21. Powłoka natryskiwana proszkiem Amperit 588 – skład chemiczny obszaru 1  
Figure 21. Coating sprayed with Amperit 588 powder – chemical composition of area 2



Rys. 22. Powłoka natryskiwana proszkiem Amperit 588 – skład chemiczny punktu 2  
Figure 22. Coating sprayed with Amperit 588 powder – chemical composition of point 2

Tabela 3. Udział masowy oraz atomowy poszczególnych pierwiastków w powłoce natryskiwanej proszkiem Amperit 588.

Table 3. Mass and atomic fraction of elements for coating sprayed with Amperit 588 powder.

Punkt 1						
Pierwiastek	C [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Ni [%]
Udział masowy	6,5	-	66,6	-	-	26,9
Udział atomowy	23,6	-	56,2	-	-	20,1
Punkt 2						
Udział masowy	1,1	0,3	0,4	1,1	97,1	-
Udział atomowy	5,1	0,5	0,4	1,0	93,0	-

## Badania twardości

Po wykonaniu obrazów mikrostruktury na przekroju poprzecznym zgładów metalograficznych zostały przeprowadzone badania twardości naniesionych powłok ochronnych z użyciem mikrotwardościomierza Vickersa. Badanie zostało wykonane dla powłoki, strefy wpływu ciepła oraz materiału rodzimego. Obciążenie wglębniaka dla próbek natryśniętych proszkami Eutalloy RW17535 oraz Durum 456 wynosiło 200 g, natomiast dla próbki z powłoką natryskowaną proszkiem Amperit 588 – 300 g. Wyniki pomiarów twardości HV 0.3 przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 2. Wyniki pomiaru twardości powłok.  
Table 2. Results of coating hardness test.

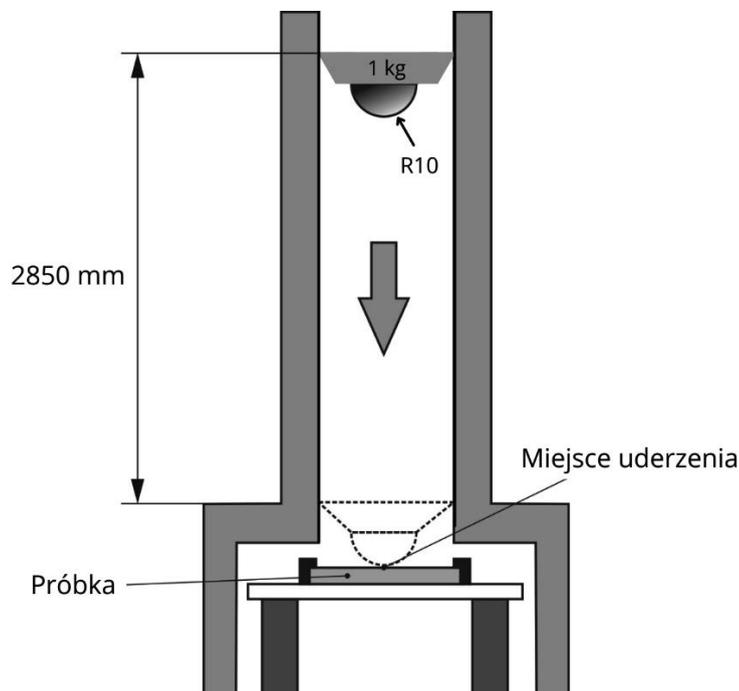
Miejsce pomiaru	Punkt pomiarowy	Durum 456	Eutalloy RW17535	Amperit 588 (natrysk ręczny)
Powłoka	1	482	<b>449</b>	516
	2	487	418	<b>620</b>
	3	<b>516</b>	409	510
	4	479	346	-
SWC	5	220	186	nie występuje
	6	219	209	
Materiał podłoża	7	186	159	253
	8	169	175	238
Średnia twardość powłoki		491	405	549
Deklarowana twardość powłoki		520-700	393	>800

Otrzymane średnie wyniki pomiaru twardości powłok natryskiwanych proszkami Durum 456 i Amperit 588 są niższe, a powłoki wykonanej przy użyciu proszku Eutalloy RW17535 wyższe od deklarowanych przez producentów. Powłoka natryskiwana na stanowisku zrobotyzowanym proszkiem Amperit 588 miała zbyt małą grubość, aby poddać ją badaniu.

### 2.4 Badania odporności powłok na obciążenia udarowe

Kolejnym krokiem w badaniach było wykonanie próby odporności powłok na impulsowe obciążenia udarowe. Próba polegała na spuszczeniu ciężarka w specjalnej tubie z określonej wysokości. Elementem który bezpośrednio uderzał w próbkę był ciężarek o masie 1 kg, w kształcie walca, którego część bezpośrednio uderzającą w próbkę była półkula o średnicy 20 mm. Na podstawie obliczenia energii potencjalnej ciężarka na wysokości z której rozpoczynał się jego spadek swobodny, określono energię uderzenia jaką oddziaływało na powłokę. Maksymalna energia uderzenia wynosiła 28 J.

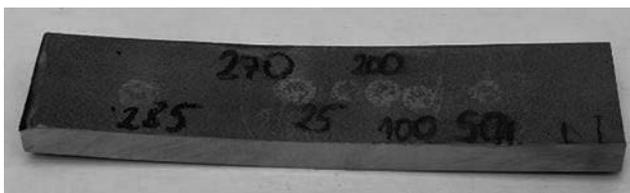




Rys. 23. Schemat urządzenia do badania powłok na obciążenia udarowe.  
 Figure 23. Schematic of impact load coating tester.

#### 2.4.1 Powłoki natryskiwane płomieniowo poddźwiękowo

Próbka z powłoką z materiału Eutalloy RW17535 była poddana uderzeniom z wysokości od 0,5 m do 2,85 m, co przekładało się na energię od 5 do 28 J. Żadne z uderzeń nie doprowadziło do odprysnięcia powłoki, pomimo deformacji całej próbki. Świadczy to o dobrym połączeniu powłoki z podłożem. Bazując na tych wynikach rozpoczęto badanie próbki z powłoką Durum 456 od wysokości 2m do 2,85m, co przekładało się na energię uderzenia 20-28 J. Oba uderzenia nie doprowadziły do pęknięcia, czy odprysnięcia powłoki, pomimo deformacji próbki, co świadczy o dobrym połączeniu powłoki z podłożem.



Rys. 24. Próbka z powłoką Eutalloy RW17535 po próbie badania odporności na obciążenia udarowe.

Figure 24. Specimen with Eutalloy RW17535 coating after impact test.



Rys. 25. Próbka z powłoką Durum 456 po próbie badania odporności na obciążenia udarowe

Figure 25. Specimen with Durum 456 coating after impact test.

### 2.4.2 Powłoki natryskiwane ręcznie płomieniowo naddźwiękowo

Próbka z powłoką z materiału Amperit 588 była poddana uderzeniom z wysokości od 0,1 m do 2m, co przekładało się na energię od 1 J do 20 J. Uderzenie z wysokości 0,5 m, czyli 5 J doprowadziło do pierwszego odprysnięcia powłoki na rogu próbki. Następne uderzenia nie spowodowały szkód, aż do osiągnięcia wysokości 2 m (20 J), na skutek którego ponownie doszło do odprysku powłoki poniżej miejsca uderzenia. Jak wcześniej wspomniano, proszek Amperit 588 jest natryskiwany inną metodą oraz różni się składem chemicznym i fazowym od proszków Eutalloy RW17535 i Durum 456. Zawiera węgiel chromu, od którego oczekuje się podniesienia twardości powłoki, ale i również powoduje to kruchość. Charakterystyka pęknięć, gdzie odpadają całe znaczne obszary warstw od podłoża świadczy o niewłaściwie prowadzonym procesie technologicznym natryskiwania i braku przyczepności do podłoża.



Rys. 26. Próbka z powłoką Amperit 588 po próbie badania udarności.

*Figure 26. Specimen with Amperit 588 coating after impact test.*

### 2.5 Badania odporności powłok na korozję wysokotemperaturową

Do badań odporności powłok na korozję wysokotemperaturową przygotowano próbki o wymiarach 10x25x5 mm. Powierzchnie próbek, za wyjątkiem badanej zostały zabezpieczone farbą odporną na oddziaływanie temperatury do 800°C, w celu ograniczenia zjawiska korozji tylko do badanej powierzchni. Zestawienie badanych próbek pokazano w tabeli 5.

Tabela 5. Zestawienie próbek do badań korozji wysokotemperaturowej.

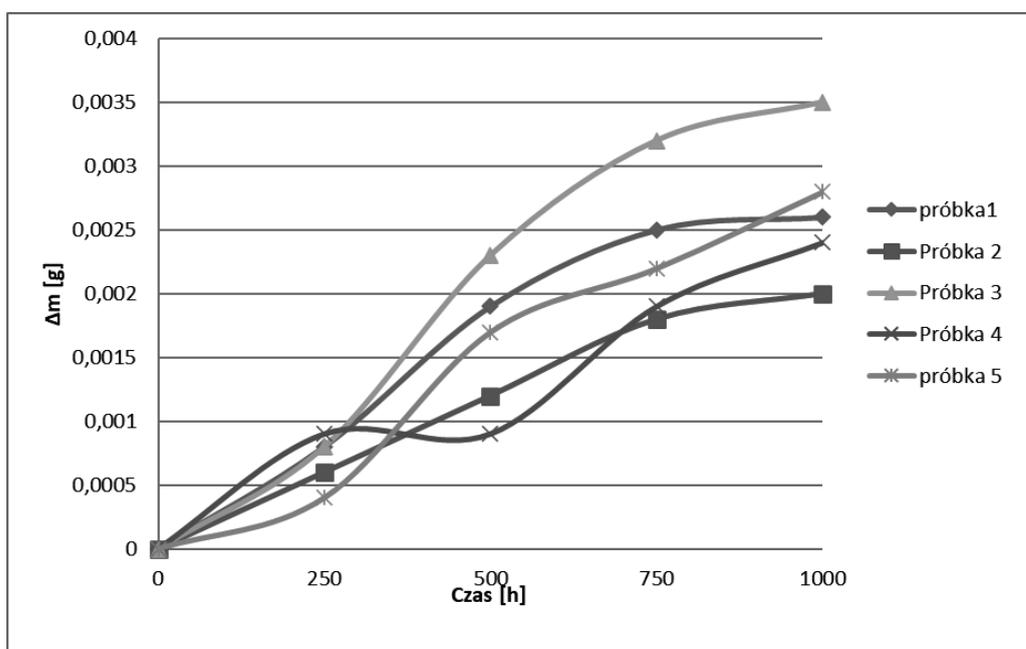
*Table 5. Comparison of specimen subjected to high temperature corrosion.*

Lp.	Oznaczenie	Materiał powłoki	Sposób nanoszenia powłoki
1	Próbka 1	Amperit 588	HVOF robot 1 warstwa
2	Próbka 2	Amperit 588	HVOF robot 2 warstwy
3	Próbka 3	Amperit 588	HVOF ręcznie
4	Próbka 4	Durum 456	Ręcznie palnikiem
5	Próbka 5	Eutalloy RW 17535	Ręcznie palnikiem

Badania prowadzono w atmosferze o składzie chemicznym: 0,2%HCl + 0,08%SO<sub>2</sub> + 9,0%O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub>, w temperaturze 800°C. Skład chemiczny mieszanki gazów był zbliżony do atmosfery występującej w kotłach energetycznych. Procedura eksperymentu została podzielona na trzy etapy:

- nagrzewanie wsadu pieca w atmosferze argonu, aż do zadanej temperatury (800°C), w celu uniknięcia procesu utleniania próbek,
- wytrzymanie próbek w atmosferze korozyjnej o zadanych stężeniach gazów w zadanej temperaturze i przepływie mieszaniny gazów zapewniającym jednokrotną wymianę atmosfery w czasie czterech godzin,
- chłodzenie wsadu pieca w atmosferze argonu, aż do temperatury 20°C.

Testy odporności na korozję przeprowadzono w czasie 1000 godzin, wykonując pomiary przyrostu masy produktów korozji co 250 godzin. Dla każdej z próbek wykonywano po trzy pomiary masy, które zostały uśrednione. Odchylenie standardowe od średniej wynosiło mniej niż 1 %. Jako miarę odporności na korozję wysokotemperaturową rur ożebrowanych przyjęto zmianę masy próbki po badaniach. Przykładowe krzywe opisujące zmianę masy w czasie dla poszczególnych próbek pokazano na rysunku 27.



Rys. 27. Zmiana masy próbek w funkcji ekspozycji na działanie atmosfery korozyjnej.  
Figure 27. Change in weight of samples as a function of exposure to corrosive atmosphere.

### 3. WNIOSKI

Zaprezentowane procesy natryskiwania cieplnego stanowią skuteczną metodę wytwarzania warstw wierzchnich, które powinny cechować się zwiększoną odpornością na warunki korozji wysokotemperaturowej panującej we wnętrzu kotła energetycznego. Analiza wyników badań dotyczących natryskiwania cieplnego ścian szczelnych kotłów energetycznych powłokami zabezpieczającymi przed korozją wysokotemperaturową pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Ocena zglądów metalograficznych jest podstawowym badaniem umożliwiającym ocenienie jakości powłoki. Szczególnie ważne jest połączenie powłoki z podłożem i jej porowatość.
2. Analiza EDS wykazała nieznacznie większą ilość chromu w powłoce dla badanych próbek, niż zakładana przez producentów proszków Eutalloy RW17535 oraz Durum 456.
3. Badania twardości wykazały, iż najwyższą twardością cechowała się powłoka natryskiwana ręcznie metodą naddźwiękową płomieniową HVOF proszkiem Amperit 588. Jest to jednak wynik znacznie poniżej wartości deklarowanych przez producenta. Powłoki natryskiwane metodą poddźwiękową ręczną proszkiem Durum 456 osiągnęła wartości zbliżone do dolnej granicy deklarowanej twardości i była twardsza od powłoki natryskiwanej proszkiem Eutalloy RW 17535, która z kolei osiągnęła wartości wyższe od katalogowych.

4. Powłoki natryskiwane płomieniowo poddźwiękowo z jednoczesnym przetopieniem proszkami Durum 456 oraz Eutalloy RW 17535 uzyskały pełne dyfuzyjne połączenie z podłożem, co zapewniło im dobrą odporność na obciążenia udarowe o energii co najmniej 28 J bez odprysnięcia powłoki od podłoża. W przypadku powłoki natryskiwanej ręcznie naddźwiękowo proszkiem Amperit 588 pierwsze uszkodzenie pojawiło się po uderzeniu z energią 5J.
5. Badania odporności na korozję wysokotemperaturową wykazały, iż najmniejszy przyrost masy, a tym samym najbardziej odporna na korozję okazała się próbka z powłoką natryskiwana w sposób zrobotyzowany metodą płomieniową naddźwiękową proszkiem Amperit 588, której grubość nie przekraczała 50  $\mu\text{m}$ . Najgorszy wynik, a więc największy przyrost masy osiągnęła również próbka z powłoką natryskiwana naddźwiękowo proszkiem Amperit 588, lecz w sposób ręczny. Rozbieżność ta świadczy, iż metoda naddźwiękowa płomieniowa wytwarza bardzo dobre jakościowo powłoki, jednakże istotnym czynnikiem wpływającym na dobre połączenie z podłożem jest właściwa aplikacja. Pomiędzy próbkami natryskiwanymi metodą płomieniową poddźwiękową proszkami Durum 456 i Eutalloy RW 17535 nie stwierdzono znacznych różnic w przyroście masy.

**Finansowanie:** Badania współfinansowane przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach projektu „Politechnika Śląska jako Centrum Nowoczesnego Kształcenia Opartego i Badania i Innowacje” nr POWR 03.05.00-00-Z098/17/00.

## Literatura

1. B. Formanek B. Kuczowicz, K. Szymański. Odporne na korozję i zużycie ściernie powłoki otrzymywane metodami natryskiwania ciepłego // *Ochrona przed korozją: Sigma-not*, 2010.
2. S. Grigoriev A. Okunkova, A. Sova, P. Bertrand, I. Smurov Surf. Coat. Technol. 268 - 2015. - pp. 77-84.
3. Reames Lacey Cold Spray Technology and How It Compares to Thermal Spray // *HTS Coatings*. - 2020.
4. Thermal Spray & Coatings
5. Thermal Spray & Coatings
6. <http://www.bexxonglobal.com/what-is-arc-spray-.html>.
7. A. Czupryński A. Lisiecki, A. Kurc- Lisiecka Ocena jakości i odporności erozyjnej powłok natryskiwanych łukowo // *Przegląd Spawalnictwa*. - 2015.
8. A. Czupryński M. Adamiak, E. Bayraktar, B. Wyględacz Comparison of tribological properties and structure of coatings produced in powder flame spraying process on grey cast iron: *SIMP*, 2020.
9. A. Klimpel A. Czupryński, J. Górka, T. Kik. M. Melcer *A study of modern materials for arc spraying* // *Welding International*. - 2014.
10. A. Niziałek M. Otto, W. Szymański, A. Czupryński Badanie wybranych metod przygotowania powierzchni przed natryskiwaniem ciepłym płomieniowym poddźwiękowym // *Symposium Katedr i Zakładów Spawalnictwa pt. Nowoczesne zastosowania technologii spawalniczych*. - Brenna : *Polska Akademia Nauk*, 2021.

11. B. Formanek K. Szymański Natryskiwane cieplnie płomieniowo kompozytowe powłoki zawierające węgliki chromu, tytanu i wolframu // *Kompozyty*. - 2006.
12. H. Myalska G. Moskal, K. Szymański Microstructure and properties of WC–Co coatings, modified by sub-microcrystalline carbides, obtained by different methods of high velocity spray processes // *Surface and Coatings Technology*. - 2014. - strony 303-309.
13. K. Szymański A. Hernas, G. Moskal, H. Myalska Thermally sprayed coatings resistant to erosion and corrosion for power plant boilers // *Surface and Coatings Technology*. - 2015. - strony 153-164.
14. K. Szymański W. Szymański, E. Jonda Powłoki do ochrony przed zużyciem części maszyn wytwarzane metodami napawania i natryskiwania cieplnego // *Ochrona przed korozją*. - 2020. - strony 226-229.

## Technologie zvarania v petrochemickom priemysle

N. Višňovská<sup>a\*</sup>, R. Koňár<sup>b</sup>, L. Kuchariková<sup>a</sup>, E. Tillová<sup>a</sup>, M. Bonek<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra materiálového inžinierstva, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovak Republic, email: visnovska4@stud.uniza.sk

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

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

**Abstrakt:** Článok sa zaoberá technológiami zvarania v petrochemickom priemysle. V článku sú popísané materiály využívané pre výrobu potrubí, iných druhov rozvodov a zásobníkov vyžívaných práve v petrochemickom priemysle. Následne sú popísané rôzne technológie zvarania využívané v tomto odvetví v súčasnosti.

**Kľúčové slová:** petrochemický priemysel, potrubia, plynovody, zvaranie

### 1. Úvod

Základom nesprávnych predpokladov v 80. a 90. rokoch bol svet, ktorému dôjde ropa. Dnes žijeme vo veľmi odlišnej realite, s nadbytkom ropy a nedostatkom skladovacieho priestoru. Skladovanie ropy a ropných produktov sa v skutočnosti nakrátko stalo komoditou, ktorá bola cennejšia ako ropa samotná. Ekonomické šoky zo súčasnej pandémie koronavírusu pravdepodobne potrvajú nejaký čas a producenti ropy nemôžu jednoducho uzavrieť kohútik, čo znamená, že znížený dopyt po rope môže nejaký čas pokračovať. Vzhľadom na ťažkosti s hľadaním a kvalifikáciou skúsených zvaračov na výrobu nádrží, na skladovanie ropy, budú kľúčom k uspokojeniu dopytu po hromadnom skladovaní ropy automatizované procesy zvarania. Procesy orbitálneho zvarania môžu pomôcť výrobcem zásobníkov na zvaranie ropy a ropných produktov uspokojiť náhly dopyt a zvýšiť kapacitu výrobcov v budúcnosti. Aj keď sa blokovanie koronavírusom končí je pravdepodobné, že po ďalšej úložnej kapacite bude vysoký dopyt. Súčasná kapacita zásobníkov na uskladnenie ropných produktov musia byť udržiavané v plne funkčnom stave, nakoľko prípadný únik ropných produktov, môže spôsobiť ekologickú katastrofu [1].

Pri návrhu technologického postupu zvarania v petrochemickom priemysle, je potrebné brať do úvahy špecifiká skladovaných ropných produktov. Preto sa článok zaoberá materiálmi používanými pre stavbu potrubí a zásobníkov na PHM [1-2].

## 2. Petrochemický priemysel

Ropa je horľavá kvapalina, ktorá je tvorená zmesou uhlíkovodíkov, 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].

Petrochemický priemysel, je odvetvie viacerých priemyslov, ktoré sa zaoberajú spracovaním ropy. Najviac rozšírený je v USA, Kanade a Rusku. Zaoberá sa krakovaním ropy a spracovaním ropných produktov, ako sú benzín, oleje a ostatné látky. Ropa sa spracováva v rôznych továrňach. Dnes je používaná v najrôznejších priemyslových odvetviach od liekov až po textil [2-3].

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 koncentrácií oxidu uhličitého 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 [4-5].

## 3. Materiály využívané v petrochemickom priemysle

Materiálmi používanými v petrochemickom priemysle sa zaoberá norma STN EN ISO 21457. V potrubných rozvodoch vyrobených z uhlíkovej ocele, alebo z koróziivzdorných zliatin (CRA), sa môžeme stretnúť s rôznymi mechanizmami korózie (tab. 1).

Tabuľka 1. Materiály odolné voči vnútorným mechanizmom korózie v uhlíkovodíkových systémoch [6]

Table 1. Materials resistant to internal corrosion mechanisms in hydrocarbon systems [6]

Mechanizmy korózie	Uhlíkové a nízkolegované ocele	Zliatiny odolné voči korózií (CRA)
CO <sub>2</sub> a H <sub>2</sub> S korózia	Áno	Áno*
MIC	Áno	Áno
SSC/SCC spôsobené H <sub>2</sub> S	Áno	Áno
HIC/SWC	Áno	Nie
ASCC	Áno	Nie
SCC bez H <sub>2</sub> S	Nie	Áno

\*Prítomnosť H<sub>2</sub>S s CO<sub>2</sub>, môže tiež viesť k lokálnym porušeniam zliatin odolných voči korózií. Kritické parametre sú teplota, obsah chloridu, pH a čiastkový tlak H<sub>2</sub>S. Nie sú určené všeobecne akceptačné limity a limity sú rôzne, v závislosti od typu zliatin odolných voči korózií.

Podmienky kladené na materiály určené pre výrobu a pre prepravu horľavých látok, sú uvedené v norme (ČSN EN ISO 3183:2014), ktorá je prepájaná cez medzinárodné normy, s požiadavkami uvedenými v normách API. Označenie rozmerov potrubia, sa môže používať v jednotkách podľa SI alebo USC.

Norma definuje dva stupne akosti [7]:

- PSL1- je zhodný s akostným stupňom ocele (označeného značkou ocelí) a musí zodpovedať údajom v tabuľke 2. Skladá sa z písmenkového alebo alfanumerického označenia, ktoré určuje pevnostnú triedu potrubí a je spojené s chemickým zložením ocele. Označenie pre akosť A a akosť B neobsahuje žiadny vzťah k menovitej minimálnej medze sklzu, avšak numerická časť iných označení zodpovedá, menovitej minimálnej medze sklzu v jednotkách SI, alebo vyššie zaokrúhlené menovité minimálne medze sklzu, vyjadrené v 1000 librách na štvrt' palca v jednotkách USC. Prípona P označuje, že oceľ má predpísané rozmedzie obsahu fosforu.
- PSL2 - musí zodpovedať údajom v tabuľke 2 a skladá sa z písmenkového alebo alfanumerického označenia, ktoré určuje pevnosť potrubia. Značka ocele spojená s chemickým zložením ocele obsahuje prídavnú príponu, skladajúcu sa z jedného písmena (R,N,Q alebo M), určujúceho spôsob tvárnenia a stav tepelného spracovania. Označenie pre akosť B, neobsahuje žiadny odkaz na minimálnu menovitú medzu sklzu, numerická časť označenia zodpovedá menovitej minimálnej medze sklzu, v jednotkách SI alebo v jednotkách USC.

Okrem použitia v bežnom prostredí norma definuje aj podmienky pre výrobu potrubí [7]:

- pre použitie v kyslom prostredí,
- pre offshore použitie (prevádzka na mori),
- pre európske onshore (pobrežie) transportné (prenosné) plynovody.

Pri potrubíach PSL1 s hrúbkou  $t \leq 25,0$  mm (0,984 palca), PSL2 s hrúbkou  $t \leq 25,0$  mm (0,984 palca) a PSL1 alebo PSL2 s  $t \leq 25,0$  mm (0,984 palca), musí byť chemické zloženie pre štandardné akostné stupne určené podľa Tabuľky 2 alebo Tabuľky 3. Akostné stupne L175P alebo A25P, sú nafosforované, a preto majú lepšie vlastnosti pre závitovanie, než akostné stupne L175 alebo A25, pri ktorých môže byť problém s technológiou ohýbania.

Pre potrubia PSL2 s hmotnostným podielom uhlíka, stanoveným rozborom výrobku, rovným alebo menším než 0,12 % musí byť stanovený tzv. uhlíkový ekvivalent  $CE_{Pcm}$ , pomocou rovnice:

$$CE_{Pcm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (1)$$

Pokiaľ je obsah bóru menší než 0,0005 %, tak treba zahrnúť bór do rozboru výrobku a obsah bóru môžeme považovať za nulový pre výpočet  $CE_{Pcm}$ . Potrubia PSL2 s hmotnostným podielom uhlíka, stanoveným rozborom výrobku, väčším ako 0,12 %, musí byť stanovený uhlíkový ekvivalent  $CE_{IIW}$ , pomocou rovnice:

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad (2)$$



Tabuľka 2. Akostné stupne rúr, akosti ocelí a prípustné dodacie stavy [6-8]

Table 2. Pipe grades, steel grades and permissible delivery conditions [6-8]

PSL	Dodací stav	Akostné stupne potrubí / značka ocelí <sup>a b</sup>
PSL 1	Valcované, normalizačne valcované, normalizačne žíhané alebo normalizačne tvárnené	L175 alebo A25
		L175P alebo A25P
		L210 alebo A
PSL 1	Valcované, normalizačne valcované, termomechanicky valcované, termomechanicky tvárnené, normalizačne tvárnené, normalizačne žíhané, normalizačne žíhané a popúšťané alebo podiel dohody, zošľachtené iba pre SMLS potrubia	L245 alebo B
PSL 1	Valcované, normalizačne valcované, termomechanicky valcované, termomechanicky tvárnené, normalizačne tvárnené, normalizačne žíhané, normalizačne žíhané a popúšťané alebo zušľachtené	L290 alebo X42
		L320 alebo X46
		L360 alebo X52
		L485 alebo X70
PSL 2	Valcované	L245R alebo BR
		L290R alebo X42R
PSL 2	Normalizačne valcované, normalizačne tvárnené, normalizačne žíhané alebo normalizačne žíhané a popúšťané	L290N alebo X42N
		L320N alebo X46N
		L360N alebo X52N
PSL 2	Zušľachtené	L290Q alebo X42Q
		L360Q alebo X52Q
		L415Q alebo X60Q
PSL 2	Termomechanicky valcované alebo termomechanicky tvárnené	L320M alebo X46M
		L360M alebo X52M
		L390M alebo X56M
PSL 2	Termomechanicky valcované	L625M alebo X90M
		L690M alebo X100M
		L830M alebo X120M

Príklad označenia potrubia [7]:

X ISO 3183 508 12,7 L360M PSL 2 SAW Y Z

X = označenie potrubí/rúr

508 = vonkajší priemer potrubia v mm

L360M = označenie materiálu (360 MPa medza sklzu)

M = termomechanicky valcované alebo termomechanicky tvárnené

L = potrubie na prepravu horľavých látok

PSL 2 = dodacie podmienky, viď Tabuľka 2

SAW = metóda zvárania pod tavivom, švová rúra

Y = označenie inšpektora/kontrolóra

ISO 3183 = norma

12,7 = hrúbka steny v mm

Z = identifikačné číslo

Tabuľka 3. Chemické zloženie PSL 1 [6-8]

Table 3. Chemical composition PSL1 [6-8]

Akosť ocelí (Značka oceli)	Hmotnostný podiel, založený na rozboře tavby a hotového výrobku <sup>a-g</sup> %							
	C max. <sup>b</sup>	Mn max. <sup>b</sup>	P		S max.	V max.	Nb max.	Ti max.
			min.	max.				
Bez-švové potrubie								
L175 alebo A25	0,21	0,60	-	0,030	0,030	-	-	-
L175P neboA25P	0,21	0,60	0,045	0,080	0,030	-	-	-
L210 alebo A	0,22	0,90	-	0,030	0,030	-	-	-
L245 alebo B	0,28	1,20	-	0,030	0,030	c, d	c, d	d
L290 alebo X42	0,28	1,30	-	0,030	0,030	d	d	d
L320 alebo X46	0,28	1,40	-	0,030	0,030	d	d	d
L360 alebo X52	0,28	1,40	-	0,030	0,030	d	d	d
L390 alebo X56	0,28	1,40	-	0,030	0,030	d	d	d
L415 alebo X60	0,28 <sup>e</sup>	1,40 <sup>e</sup>	-	0,030	0,030	f	f	f
L450 alebo X65	0,28 <sup>e</sup>	1,40 <sup>e</sup>	-	0,030	0,030	f	f	f
L485 alebo X70	0,28 <sup>e</sup>	1,40 <sup>e</sup>	-	0,030	0,030	f	f	f
Zvárané potrubie								
L175 alebo A25	0,21	0,60	-	0,030	0,030	-	-	-
L175P alebo A25P	0,21	0,60	0,045	0,080	0,030	-	-	-
L210 alebo A	0,22	0,90	-	0,030	0,030	-	-	-
L245 alebo B	0,26	1,20	-	0,030	0,030	c, d	c, d	d
L290 alebo X42	0,26	1,30	-	0,030	0,030	d	d	d
L320 alebo X46	0,26	1,40	-	0,030	0,030	d	d	d
L360 alebo X52	0,26	1,40	-	0,030	0,030	d	d	d
L390 alebo X56	0,26	1,40	-	0,030	0,030	d	d	d
L415 alebo X60	0,26 <sup>g</sup>	1,40 <sup>g</sup>	-	0,030	0,030	f	f	f
L450 alebo X65	0,26 <sup>g</sup>	1,45 <sup>g</sup>	-	0,030	0,030	f	f	f
L485 alebo X70	0,26 <sup>g</sup>	1,65 <sup>g</sup>	-	0,030	0,030	f	f	f

<sup>a</sup> Cu < 0,50 %; Ni < 0,50 %; Cr < 0,50 % a Mo < 0,15 %.

<sup>b</sup> U každého zníženia o 0,01 % pod predpísaný maximálny obsah uhlíka, je prípustné zvýšenie obsahu mangánu o 0,05 % nad predpísaný maximálny obsah mangánu, až do 1,65 % pre akosť > L245 alebo B, ale < L360 alebo X52; až do 1,75 % pre akosť > L360 alebo X52, ale < L485 alebo X70 a až do maximálne 2,00 % pre akosť L485 alebo X70.

<sup>c</sup> Ak nie je inak dohodnuté, Nb + V < 0,06 %.

<sup>d</sup> Nb + V + Ti < 0,15 %.

<sup>e</sup> Ak nie je dohodnuté inak.

<sup>f</sup> Ak nie je dohodnuté inak, Nb + V + Ti < 0,15 %.

<sup>g</sup> Zámerné pridanie B, nie je dovolené a zbytkový obsah musí byť B < 0,001 %.

Tabuľka 4. Chemické zloženie PSL2 [6-8]

Table 4. Chemical composition PSL2 [6-8]

Akosť ocelí (Značka oceli)	Hmotnostný podiel, založený na rozbere tavby a hotového výrobku <sup>a-g</sup> % maximálne									Uhlíkový ekvivalent 3 % max.	
	C <sup>b</sup>	Si	Ni <sup>b</sup>	P	S	V	Nb	Ti	ostatné	CE <sub>uw</sub>	CE <sub>pcm</sub>
Bezšvové a zvárané potrubia											
L245R alebo BR	0,24	0,40	1,20	0,025	0,015	<sup>c</sup>	<sup>c</sup>	0,04	<sup>e, l</sup>	0,43	0,25
L290R alebo X42R	0,24	0,40	1,20	0,025	0,015	0,06	0,05	0,04	<sup>e, l</sup>	0,43	0,25
L245N alebo BN	0,24	0,40	1,20	0,025	0,015	<sup>c</sup>	<sup>c</sup>	0,04	<sup>e, l</sup>	0,43	0,25
L290N alebo X42N	0,24	0,40	1,20	0,025	0,015	0,06	0,05	0,04	<sup>e, l</sup>	0,43	0,25
L320N alebo X46N	0,24	0,40	1,40	0,025	0,015	0,07	0,05	0,04	<sup>d, e, l</sup>	0,43	0,25
L360N alebo X52N	0,24	0,45	1,40	0,025	0,015	0,10	0,05	0,04	<sup>d, e, l</sup>	0,43	0,25
L390N alebo X56N	0,24	0,45	1,40	0,025	0,015	0,10 <sup>f</sup>	0,05	0,04	<sup>d, e, l</sup>	0,43	0,25
L415N alebo X60N	0,24 <sup>f</sup>	0,45 <sup>f</sup>	1,40 <sup>f</sup>	0,025	0,015	0,10	0,05	0,04	<sup>g, h, i</sup>	podľa dohody	
L245Q alebo BQ	0,18	0,45	1,40	0,025	0,015	0,05	0,05	0,04	<sup>e, l</sup>	0,43	0,25
L290Q alebo X42Q	0,18	0,45	1,40	0,025	0,015	0,05	0,05	0,04	<sup>e, l</sup>	0,43	0,25
L320Q alebo X46Q	0,18	0,45	1,40	0,025	0,015	0,05	0,05	0,04	<sup>e, l</sup>	0,43	0,25
L360Q alebo X52Q	0,18	0,45	1,50	0,025	0,015	0,05	0,05	0,04	<sup>e, l</sup>	0,43	0,25
L390Q alebo X56Q	0,18	0,45	1,50	0,025	0,015	0,07	0,05	0,04	<sup>d, e, l</sup>	0,43	0,25
L415Q alebo X60Q	0,18 <sup>f</sup>	0,45	1,70	0,025	0,015	<sup>g</sup>	<sup>g</sup>	<sup>g</sup>	<sup>h, l</sup>	0,43	0,25
L450Q alebo X65Q	0,18 <sup>f</sup>	0,45	1,70	0,025	0,015	<sup>g</sup>	<sup>g</sup>	<sup>g</sup>	<sup>h, l</sup>	0,43	0,25
L485Q alebo X70Q	0,18 <sup>f</sup>	0,45	1,80	0,025	0,015	<sup>g</sup>	<sup>g</sup>	<sup>g</sup>	<sup>h, l</sup>	0,43	0,25
L555Q alebo X80Q	0,18 <sup>f</sup>	0,45	1,90	0,025	0,015	<sup>g</sup>	<sup>g</sup>	<sup>g</sup>	<sup>l, j</sup>	podľa dohody	
L625Q alebo X90Q	0,16 <sup>f</sup>	0,45	1,90	0,020	0,010	<sup>g</sup>	<sup>g</sup>	<sup>g</sup>	<sup>j, k</sup>	podľa dohody	
L690Q alebo X100Q	0,16 <sup>f</sup>	0,45	1,90	0,020	0,010	<sup>g</sup>	<sup>g</sup>	<sup>g</sup>	<sup>i, k</sup>	podľa dohody	

<sup>a</sup> Stanovené na základe rozboru výrobku. U bezšvových potrubí  $s_r > 20,0\text{mm}$  (0.787 palce), musia byť hranice CE dohodnuté tak, že  $CE_{EHW}$  platí, pokiaľ  $C > 0,12\%$  a hranice  $CE_{POm}$  platí pokiaľ  $C < 0,12\%$ .

<sup>b</sup> U každého zníženia o 0,01 % pod predpísaný maximálny obsah uhlíka, je prípustné zvýšenie obsahu Mn o 0,05 % nad predpísaný maximálny obsah až do 1,65 % pre akosť > L245 alebo B, ale < L360 alebo X52; až do 1,75 % pre akosť > L360 alebo X52, ale < L485 alebo X70, až do max. 2,00 % pre akosť > L485 alebo X70, ale < L555 alebo X80 a až do max. 2,20 % pre akosť > L555 alebo X80.

<sup>c</sup> Ak nie je dohodnuté inak,  $Nb + V < 0,06\%$ .

<sup>d</sup>  $Nb + V + Ti < 0,15\%$ .

<sup>e</sup> Ak nie je dohodnuté inak,  $Cu < 0,50\%$ ;  $Ni < 0,30\%$ ;  $Cr < 0,30\%$  a  $Mo < 0,15\%$ .

<sup>f</sup> Ak nie je dohodnuté inak.

<sup>g</sup> Ak nie je dohodnuté inak,  $Nb + V + Ti < 0,15\%$ .

<sup>h</sup> Ak nie je dohodnuté inak,  $Cu < 0,50\%$ ;  $Ni < 0,50\%$ ;  $Cr < 0,50\%$  a  $Mo < 0,50\%$ .

<sup>i</sup> Ak nie je dohodnuté inak,  $Cu < 0,50\%$ ;  $Ni < 1,00\%$ ;  $Cr < 0,50\%$  a  $Mo < 0,50\%$ .

<sup>j</sup>  $B < 0,004\%$ .

<sup>k</sup> Ak nie je dohodnuté inak,  $Cu < 0,50\%$ ;  $Ni < 1,00\%$ ;  $Cr < 0,55\%$  a  $Mo < 0,80\%$ .

<sup>l</sup> Pre všetky akosti potrubí PSL 2, okrem tých akosti, pre ktoré už platí poznámka j, platí nasledujúce. Ak nie je dohodnuté inak, zámerné prídanie B nie je dovolené a zbytkový obsah musí byť  $B < 0,001\%$ .

Materiály na veľkoobjemové zásobníky sa označujú, podľa normy STN EN 10027-1 najmä písmenom S - konštrukčné ocele alebo P - ocele pre tlakové nádoby a zariadenia. Ako príklad je uvedená ocel P265GH - ocel pre tlakové nádoby a zariadenia,  $R_e = 265$  MPa, určená pre vysoké teploty a ocel S235JR+N = konštrukčná ocel,  $R_e = 235$  MPa, s nárazovou prácou 27J, normalizačne žíhaná [9].

#### 4. Technológie zvarovania v petrochemickom priemysle

Podstatou zvarovania je vytvorenie trvalého, nerozoberateľného spoja, založeného na pôsobení medziatomárných väzobných síl, ktoré sú príčinou súdržnosti a pevnosti kovov a zároveň zabezpečujú stály tvar kovových predmetov. Základným predpokladom k získaniu kvalitných spojov požadovaných vlastností, je však použitie zvariteľných materiálov a vhodná voľba spôsobu a postupu zvarovania [10-11].

V minulosti sa pre zvarovanie potrubí a zásobníkov pre PHM najčastejšie používalo zvarovanie kyslíkacetylénovým plameňom. V súčasnosti sa na ropovody a plynové potrubia používajú nasledujúce metódy zvarovania [10-14]:

- technológia zvarovania TIG - pre menšie priemery (<DN80),
- technológia zvarovania TIG - pre stredné priemery (DN80 - DN300),
- technológia zvarovania obalenou elektródou - pre veľké priemery (pri budovaní nových potrubí).

Pri zvarovaní ropovodov a plynových potrubí, môže hrať dôležitú úlohu orientácia daného potrubia. V prípade, že sa potrubie nachádza v severojužnom smere, môže vplyvom zemského magnetizmu dôjsť k magnetizácii potrubia, čo môže zhoršiť realizovanie kvalitného zvarového spoja, vplyvom fúkania elektrického oblúka [10-14].

Pre zvarovanie potrubí (obr. 1a) sa používajú technológie zvarovania netaviacou sa volfrámovou elektródou a ručné oblúkové zvarovanie obalenou elektródou. Pri zvarovaní potrubí sú realizované hlavne tupé obvodové zvary na rúrach [10-14].



a) potrubia



b) veľkoobjemové zásobníky

Obrázok 1. Príklady zariadení v petrochemickom priemysle

Figure 1. Examples of equipment in the petrochemical industry

Pre zvarovanie veľkoobjemových zásobníkov (obr. 1b) s objemom od 100 - 1000 m<sup>3</sup> PHM, sa používajú technológie zvarovania taviacou sa elektródou v aktívnej inertnej ochrannej atmosfére (MIG/MAG), taktiež aj metóda zvarovania pod tavivom (SAW). Pri zvarovaní veľkoobjemových zásobníkov, sú realizované hlavne obvodové zvary v polohe PC a pozdĺžne zvary. Pri

veľkoobjemových zásobníkoch od 1000 m<sup>3</sup> do 150 000 m<sup>3</sup>, sa väčšinou robia obvodové alebo pozdĺžne zvary. Používa sa najmä automatizované zváranie taviacou sa elektródou v aktívnej ochrannej atmosfére, a taktiež zváranie pod tavivom [15-16].

#### 4.1 Zváranie netaviacou sa elektródou v inertnej ochrannej atmosfére TIG

Označenie podľa normy STN EN ISO 4063, pre zváranie metódou TIG (WIG) je 141. TIG je oblúkové zváranie netaviacou sa (volfrámovou) elektródou v inertnom plyne. Pri zváraní touto metódou horí elektrický oblúk medzi základným materiálom a volfrámovou (netaviacou sa) elektródou v ochrannej atmosfére inertného plynu (Argón, Hélium, atď). Prídavný materiál je do oblúka podávaný samostatne [13, 17].

Metódu TIG možno použiť takmer pre všetky kovy a hodí sa ako pre ručné, tak automatizované zváranie. Zváranie touto metódou je oproti zváraniu obalenou elektródou a MAG zváraniu odlišné hlavne v tom, že zvárač musí používať obidve ruky, pretože zvárač volfrámovou netaviacou sa elektródou a v jednej ruke drží horák, ktorý vytvára elektrický oblúk a v druhej prídavný materiál, ktorý sa pri strete s oblúkom odtavuje a vytvára zvar.

Metóda TIG je jedna z najzložitejších zváracích metód, najmä kvôli tomu, že zvárač používa obidve ruky. Zároveň je to aj jedna z najvšestrannejších zváracích metód a ak je správne vykonávaná, sú dosahované tie najkvalitnejšie zvary. Táto metóda je používaná pri zváraní najmä neštandardných materiálov, alebo tam, kde je potrebné dosiahnuť veľmi precízne a kvalitné zvary. Tento druh zvárania má svoje výhody i nevýhody [13]:

Výhody:

- precíznosť,
- pekný zvar a bez rozstreku,
- zváranie veľmi tenkých materiálov.

Nevýhody:

- kovové vtrúseniny (odtavené časti volfrámovej elektródy),
- póry a bubliny (nekvalitný inertný plyn, prievan),
- nekovové vtrúseniny (len výnimočne napr. nečistoty).

#### 4.2 Ručné oblúkové zváranie obalenou elektródou MMA

Označenie podľa normy EN ISO 4063 pre zváranie metódou MMA je 111. MMA je Ručné oblúkové zváranie obalenou elektródou. Pri ručnom zváraní elektrickým oblúkom sa používa obalená elektróda. Medzi koncom obalenej elektródy a zvarom, vzniká elektrický oblúk. Teplota oblúku sa pohybuje nad teplotou tavenia kovu. V mieste, kde sa oblúk stretáva s kovom, dochádza k taveniu. Roztavené kvapky kovu z elektródy sa prenášajú oblúkom do zvarového kúpeľa. Roztavený kov je chránený plynmi, vznikajúcimi z rozkladu obalu elektródy. Obal elektródy sa po roztavení mení na trosku [14].

Hustota trosky je nižšia, než hustota roztaveného kovu, preto troska na zvarovom kúpeľi vytvára oddelenú povrchovú vrstvu, ktorá počas tuhnutia chráni zvarový kov pred prístupom atmosféry. Pred nanosením novej zvarovej húsenice, je treba strusku odstrániť. Táto metóda zvárania sa najčastejšie používa pri bežnom zváraní všetkých druhov zváracích ocelí i neželezných kovov, ale i pre navarovanie kovových vrstiev. Výhody a nevýhody tohto druhu zvárania sú [14]:

Výhody:

- odolnosť voči prievanu,
- je potrebná len elektróda a zvärací zdroj,
- kompromisná metóda.

Nevýhody:

- studený spoj,
- troska,
- chyby koreňa,
- póry a bubliny.

### 4.3 Zváranie taviacou sa elektródou v aktívnej ochrannej atmosfére (MAG)

Označenie podľa normy EN ISO 4063 pre zváranie metódou MAG sú 135,136. MAG je oblúkové zváranie taviacou sa elektródou v aktívnom plyne. MAG 136, je oblúkové zváranie plnenou elektródou (rúrkovým drôtom) v aktívnom plyne. Je najvhodnejšia na zváranie ocele, a to vďaka použitému aktívnemu plynu. Je možné využiť vo veľmi širokej škále aplikácií, vrátane zvárania zliatin hliníka. Môžu byť tiež automatizované, ale v priemyselnej praxi sa veľmi často využíva práca zvärača. Pri zváraní je oblúk zapálený medzi taviacim sa drôtom a základným materiálom. Drôt môže byť plný, alebo dutý a je v priebehu zvárania automaticky posúvaný stredom zväracej trysky [15,18].

Ochrana zvarového kúpeľa, je zabezpečená neprerušeným prívodom ochranného plynu, ktorý obklopuje elektrický oblúk. Tento ochranný plyn, je aktívny (metóda MAG), používa sa plyn CO<sub>2</sub> alebo zmesové plyny.

Výhody a nevýhody tohto zvárania sú [15]:

Výhody:

- vysoká produktivita,
- adaptabilnosť,
- zváranie vo všetkých polohách,
- možnosť automatizácie.

Nevýhody:

- neustály prívod atmosféry,
- náchylnosť na tvorbu chýb a to hlavne priedarov,
- problémy spojené s požiadavkami na automatizáciu.

## 5. Záver

Materiály využívané v petrochemickom priemysle majú rôzne vlastnosti. Ide o rôzne druhy ocelí, ktoré majú rôzne vlastnosti. Rozvody v petrochemickom priemysle tvoria prevažne potrubia a zásobníky. Ide o veľmi dlhé a vysoké zariadenia ktoré je nutné zvärať. Technológiu zvárania je však nutné prispôbiť poveternostným podmienkam a surovinám, ktoré budú na dané rozvody či zásobníky pôsobiť. Je preto potrebné dôkladne poznať materiál a jednotlivé technológie zvárania.

**Pod'akovanie**

Článok bol riešený ako súčasť projektu KEGA 016ŽU-4/2020 s názvom „Zvýšenie kvality a inovácia vzdelávania v bakalárskych študijných programoch na SjF UNIZA“. Dielo vzniklo ako súčasť projektovo orientovaného vzdelávania - PBL, v súťaži V v rámci programu Iniciatíva excelentnosti – Politechnika Śląska, Gliwice.

**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. ČSN EN ISO 3183: 2014. Naftový a plynárenský priemysl - Ocelové potrubí pro potrubní přepravní systémy
4. I. Hrivňák, Zváranie a zvariteľnosť materiálov. s.l. : Citadella, 2013. ISBN 978-80-89628-18-6
5. V. Leždík, a kol. Opravy plynovodných potrubí vykonávané technológiou zvárania. 2020. ISBN 978-80-969599-3-8.
6. STN EN ISO 21457:2011. Naftový, petrochemický a plynárenský priemysel. Výber materiálov a kontrola korózie výrobných systémov ropy a zemného plynu (ISO 21457: 2010).
7. ČSN EN ISO 3183:2014, Naftový a plynárenský priemysl - Ocelové trubky pro potrubní přepravní systémy
8. ČSN 41 1353: 1983. Oceľ 11353
9. STN EN 10027-1, Systém označovania ocelí. Časť 1: Značky ocelí
10. STN EN ISO 5817: 2014. Zváranie. Zvarové spoje ocelí, niklu, titánu a ich zliatin zhotovené tavným zváraním (okrem lúčového zvárania). Stupne kvality (ISO 5817:2014).
11. P. Višňovský, a kol., NDT -učebné texty. Žilina : Welding & Testing of materials, s.r.o., 2017.
12. V. Leždík, a kol., Schvaľovanie postupov zvárania. Žilina : Inštitút kvality a vzdelávania , 2016. ISBN 978-80-969599-2-1.
13. Solik, 2021. Základy TIG zvárania. [online] <https://www.solik.sk/blog/zaklady-tig-zvarania/>.
14. Solik, 2021. Základy elektrodového zvárania. [online] <https://www.solik.sk/blog/zaklady-elektrodoveho-zvarania/>.
15. Euronice, 2013. Zváranie MAG. 2021 [online] <http://www.zvaranie.eu/metoda-zvarania-mag/>.
16. Esab, 2021. Zváranie pod tavivom (SAW). [online] <https://www.esab-slovakia.sk/sk/sk/automation/process-solutions/saw/index.cfm>.
17. STN EN ISO 4063, Zváranie a príbuzné procesy. Zoznam spôsobov zvárania a ich číselné označovanie (ISO 4063: 2009, opravená verzia 2010-03-01)
18. EN ISO 4063, Zváranie a príbuzné procesy. Zoznam spôsobov zvárania a ich číselné označovanie (ISO 4063: 2009)

## Wpływ procesu mielenia kulowego na wielkość cząstek wełny mineralnej

A. Walentyńska<sup>a</sup>, B. Łazniewska-Piekarczyk<sup>b</sup>, B. Tomiczek<sup>c</sup>, M. Czop<sup>d</sup>, D. Smyczek<sup>e, f</sup>

<sup>a</sup> Studentka Politechniki Śląskiej na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, Katedra Procesów Budowlanych i Fizyki Budowli

<sup>c</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Laboratorium Nanotechnologii i Technologii Procesów Materiałowych

<sup>d</sup> Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Katedra Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów

<sup>e</sup> Politechnika Śląska, Szkoła Doktorów

<sup>f</sup> Saint Gobain Construction Products Polska

email: beata.lazniewska-piekarczyk@polsl.pl

**Streszczenie:** Celem pracy było określenie wpływu czasu mechanicznego mielenia kulowego na rozdrobnienie odpadów z wełny mineralnej. Wykazano, że dodanie do wełny mineralnej składnika w postaci proszku boksytu przyspiesza proces mielenia i pozwala na jego skrócenie. Rozdrobnione włókna wełny mineralnej mogą być materiałem bazowym do opracowania geopolimerów o pożądanych właściwościach użytkowych.

**Abstract:** The aim of the study was to determine the effect of ball milling time on the fragmentation of mineral wool waste. It has been shown that adding bauxite powder to mineral wool accelerates the milling process and allows it to be shortened. Fragmented mineral wool fibres can be the base material for the development of geopolymers with the desired performance properties. .

**Słowa kluczowe:** geopolimer, wełna mineralna, mielenie kulowe

### 1. WSTĘP

Współczesne realia ekologiczne sprawiły, że nadrzędnym celem w produkcji tworzyw jest dążenie do minimalizacji niekorzystnego wpływu wszelkich procesów na środowisko. Dzięki prężnie rozwijającej się dziedzinie inżynierii materiałowej coraz częściej popularne konwencjonalne materiały zastępowane są tymi produkowanymi z użyciem surowców pozyskanych z recyklingu. Na całym świecie najczęściej używanym materiałem budowlanym jest cement. Niestety, mimo rosnącej świadomości ekologicznej i coraz częstszego używania mieszanek paliw z paliwami alternatywnymi, produkcja klinkieru portlandzkiego, który w ok. 95% wchodzi w skład cementu, niesie za sobą bardzo dużą emisję CO<sub>2</sub>.



Wełna mineralna to wyjątkowy i bardzo użyteczny produkt izolacyjny. Jej doskonałe właściwości termiczne w ogromnym stopniu przyczyniają się do europejskich wysiłków na rzecz oszczędzania energii. Włókna z wełny mineralnej produkowane są w wysokich temperaturach poprzez topienie surowców takich jak bazalt, gabbro, dolomit, wapień, kwarc czy stłuczka szklana. W procesie szybkiego przędzenia roztopiona mieszanina ulega rozwłóknieniu [1]. Niestety odpady z produkcji i rozbiórki wełny mineralnej są trudne do recyklingu. Składowanie odpadów wełny mineralnej jest technicznie trudne ze względu na ich dużą objętość, niską gęstość nasypową, wysoką elastyczność, słabą ściśliwość, a w konsekwencji – brak stabilności na składowisku. Ponadto, składowanie tego typu odpadów może powodować zanieczyszczenie powietrza, wody i gleby, stwarzając poważne zagrożenie dla środowiska. Znalazienie nowych celów jego wykorzystania zmniejszyłoby ślad węglowy branży budowlanej w środowisku.

Dotychczasowe zastosowania odpadów wełny mineralnej to m.in. dodatek do cementu [2], składnik pianek ceramicznych [3] oraz jako wzmocnienia kompozytów polimerowych [4,5], a ostatnio także przetwarzanie w geopolimery [6,7]. Wykorzystanie odpadów wełny mineralnej jest jednak nadal problematyczne ze względu na włóknisty charakter i niską gęstość produktów izolacyjnych. W przypadku wełny mineralnej gęstość nasypowa (rzeczywista) jest znacznie większa niż gęstość pozorna. Można stwierdzić, że taki materiał włóknisty charakteryzuje się bardzo dużą porowatością. Z tego powodu nie tylko transport wełny mineralnej jest bardzo kosztowny i trudny w zastosowaniu jako dodatek do cementu, gipsu i geopolimerów. Zastosowanie materiału włóknistego powoduje drastyczny spadek płynności i wymusza stosowanie bardziej płynnej mieszanki, co powoduje problemy technologiczne i wytrzymałościowe [1].

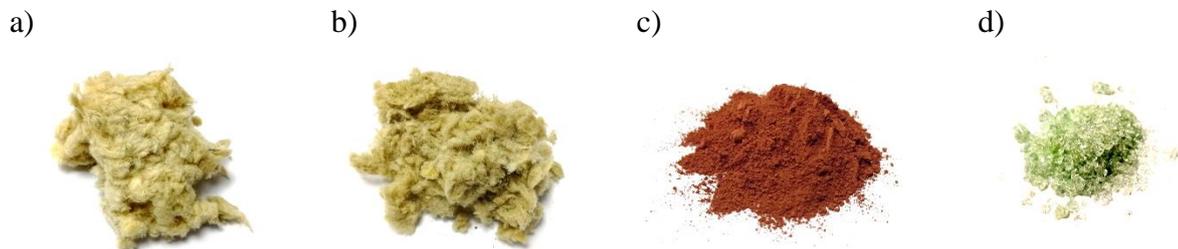
Wełna ze względu na swój skład chemiczny i skład fazowy może być również wykorzystywana do produkcji geopolimerów. Odpowiednio rozdrobnione włókna, po dodaniu aktywatora alkalicznego, tworzą syntetyczny materiał o szerokim spektrum zastosowań. Geopolimery można wytwarzać z szerokiej gamy prekursorów glinokrzemianowych, z których najpopularniejsze to popiół lotny z węgla oraz mielony żużel wielkopiecowy [7].

Ponowne wykorzystanie odpadów wełny mineralnej uzależnione jest jednak od jej efektywnego rozdrobnienia. Literatura opisująca recykling wełny szklanej lub skalnej zazwyczaj nie przedstawia szczegółowego opisu metod rozdrabniania [2,3]. Niniejsza praca ma na celu zbadanie czy odpady wełny skalnej i szklanej można skutecznie mielić i przygotować jako odpowiedni prekursor geopolimeru.

## **2. METODYKA BADAWCZA**

W pracy wykorzystano odpady z produkcji wełny skalnej i szklanej dostarczone przez firmę Saint-Gobain. Aby zwiększyć efektywność mielenia przygotowano różne dodatki: boksyt i stłuczkę szklaną. Wstępną makroskopową morfologię wełny mineralnej i dodatków przedstawiono na Rys. 1. Mieszaninę wełny mineralnej z dodatkiem proszku mielono mechanicznie za pomocą planetarnego młyna kulowego Fritsch Pulverisette 5. Pojemniki ze stali nierdzewnej o objętości 500 cm<sup>3</sup> napełniano mieszanką wełny i proszku wraz z kulkami ze stali nierdzewnej o średnicy 18 mm jako mielnikiem (Rys. 2). Zastosowano stosunek masy kul mielących do masy proszku (ang. BPR – ball to powder ratio) 20:1. Szybkość mielenia wynosiła 300 obr/min, a czas mielenia regulowano w zależności od uzyskanego rozdrobnienia wełny. Zastosowane czasy mielenia podsumowano w tabeli 1. Analizę rozkładu wielkości cząstek przeprowadzono na laserowym analizatorze wielkości cząstek Analysette 22 MicroTec Plus, firmy Fritsch GmbH, opartym na systemie podwójnej dyfrakcji laserowej. Badania

mikrostruktury i morfologii proszków wykonano w skaningowym mikroskopie elektronowym ZEISS SUPRA 35 (SEM) przy użyciu detekcji elektronów wtórnych przy napięciu przyspieszającym 20 kV i maksymalnym powiększeniu 50000x.



Rysunek 1. Materiały bazowe: a) wełna szklana, b) wełna skalna, c) boksyt i d) stłuczka szklana  
Figure 1. Base materials: a) glass wool, b) rock wool, c) bauxite and d) glass cullet

Tablica 1. Dobrane czasy przemiału w zależności od rodzaju wełny i dodatku proszkowego.  
Table 1. Chosen milling time depending on the type of wool and powder additive.

Rodzaj wełny	Bez dodatku	10% dodatek boksytu	10% dodatek stłuczki szklanej
szklana	5, 15, 25 min	5 min	5, 15, 25 min
skalna	5, 10, 15 min	5 min	5, 10 min

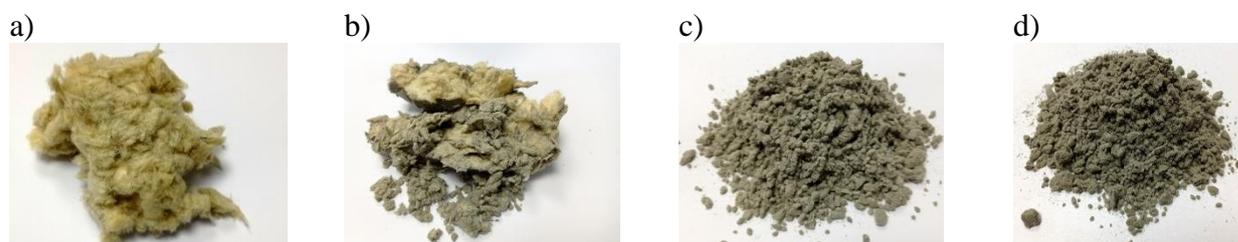


Rysunek 2. Widok zastosowanego planetarnego młynka kulowego oraz pojemników wypełnionych mielnikami ze stali nierdzewnej  
Figure 2. View of the planetary ball mill and the containers filled with stainless steel milling balls

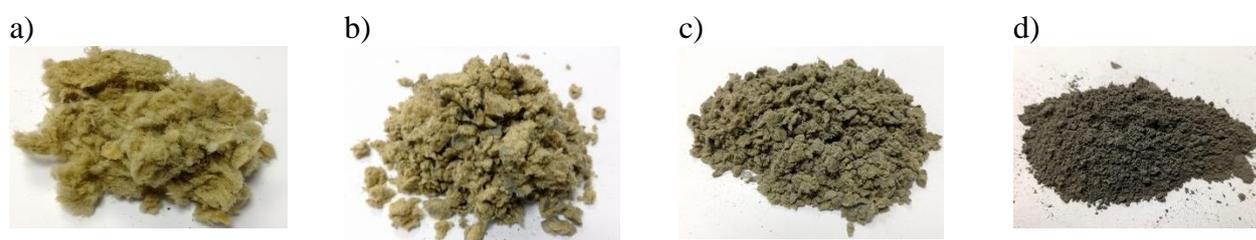
### 3. WYNIKI BADAŃ

Efekt rozdrabniania dwóch rodzajów wełny mineralnej w młynie kulowym jest widoczny na rysunku 3 i 4. Bez użycia metod mikroskopowych można zaobserwować, że wełna mineralna, zarówno szklana jak i skalna, może być efektywnie rozdrobniona przy pomocy planetarnego młyna kulowego. Jednakże uwidoczniono znaczną różnicę między mieleniem wełny. Dodanie do mielonej wełny składnika proszkowego w postaci boksytu znacznie przyspiesza

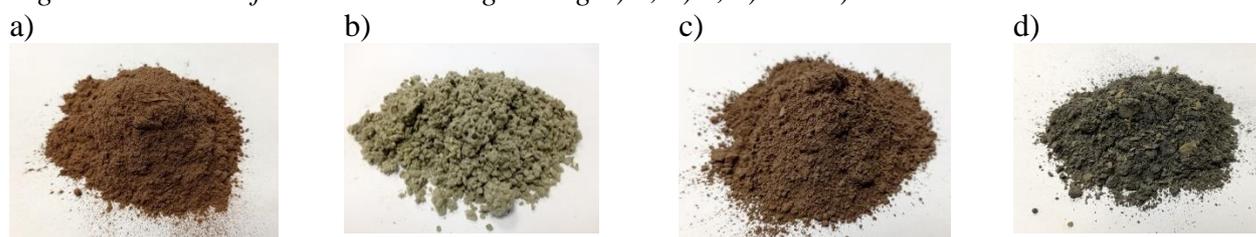
proces mielenia i pozwala go skrócić nawet do 5 minut. Dodatek stłuczki szklanej nie wywołuje podobnego efektu, dlatego też można wnioskować, że istotna jest twardość dodawanego proszku (Rys. 5).



Rysunek 3. Efekt mielenia wełny szklanej przez a) 0, b) 5, c) 15 i d) 25 min  
*Figure 3. Results of glass wool milling during a) 0, b) 5, c) 15 i d) 25 min*

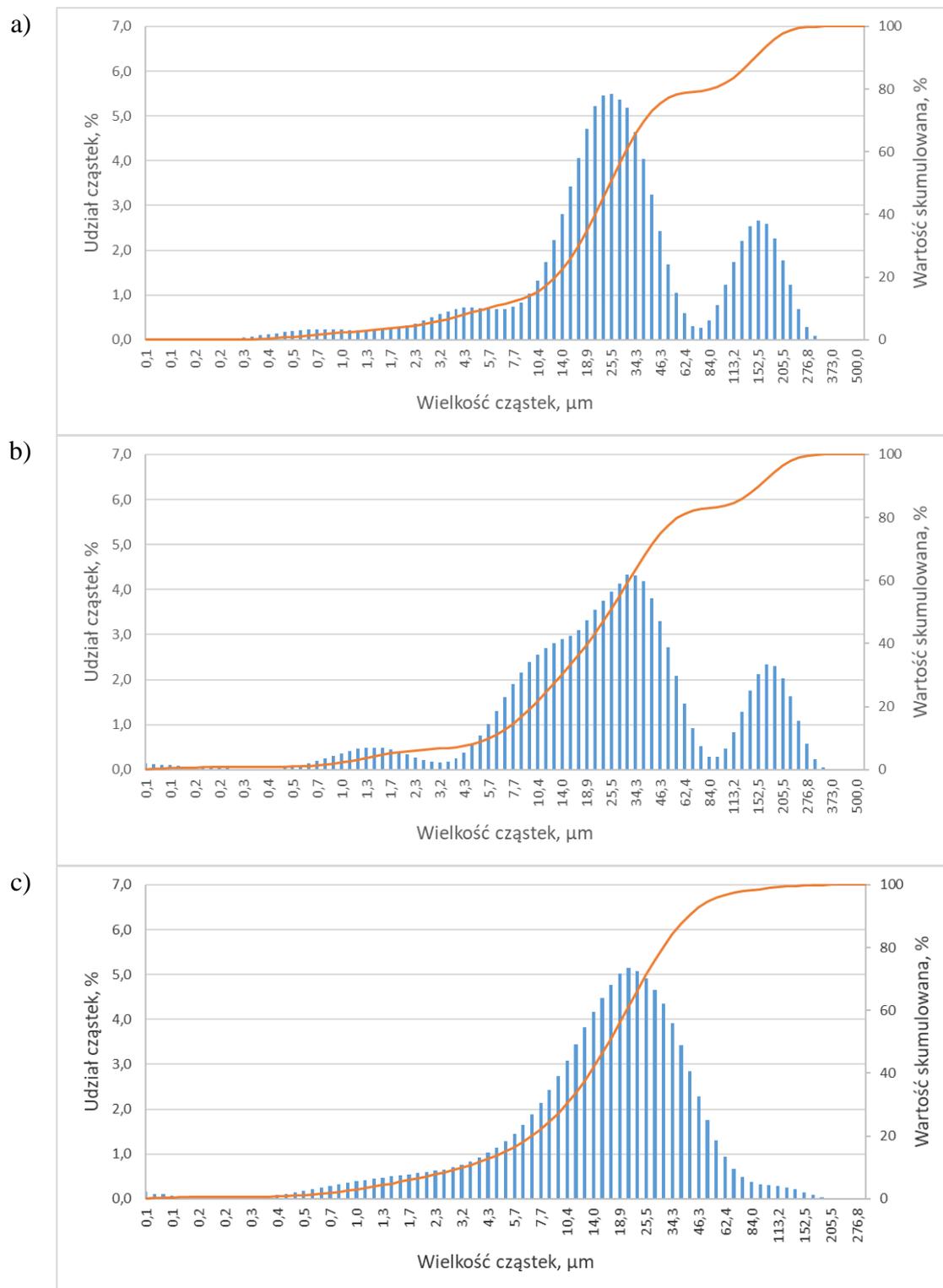


Rysunek 4. Efekt mielenia wełny skalnej przez a) 0, b) 5, c) 15 i d) 25 min  
*Figure 4. Results of rock wool milling during a) 0, b) 5, c) 15 i d) 25 min*



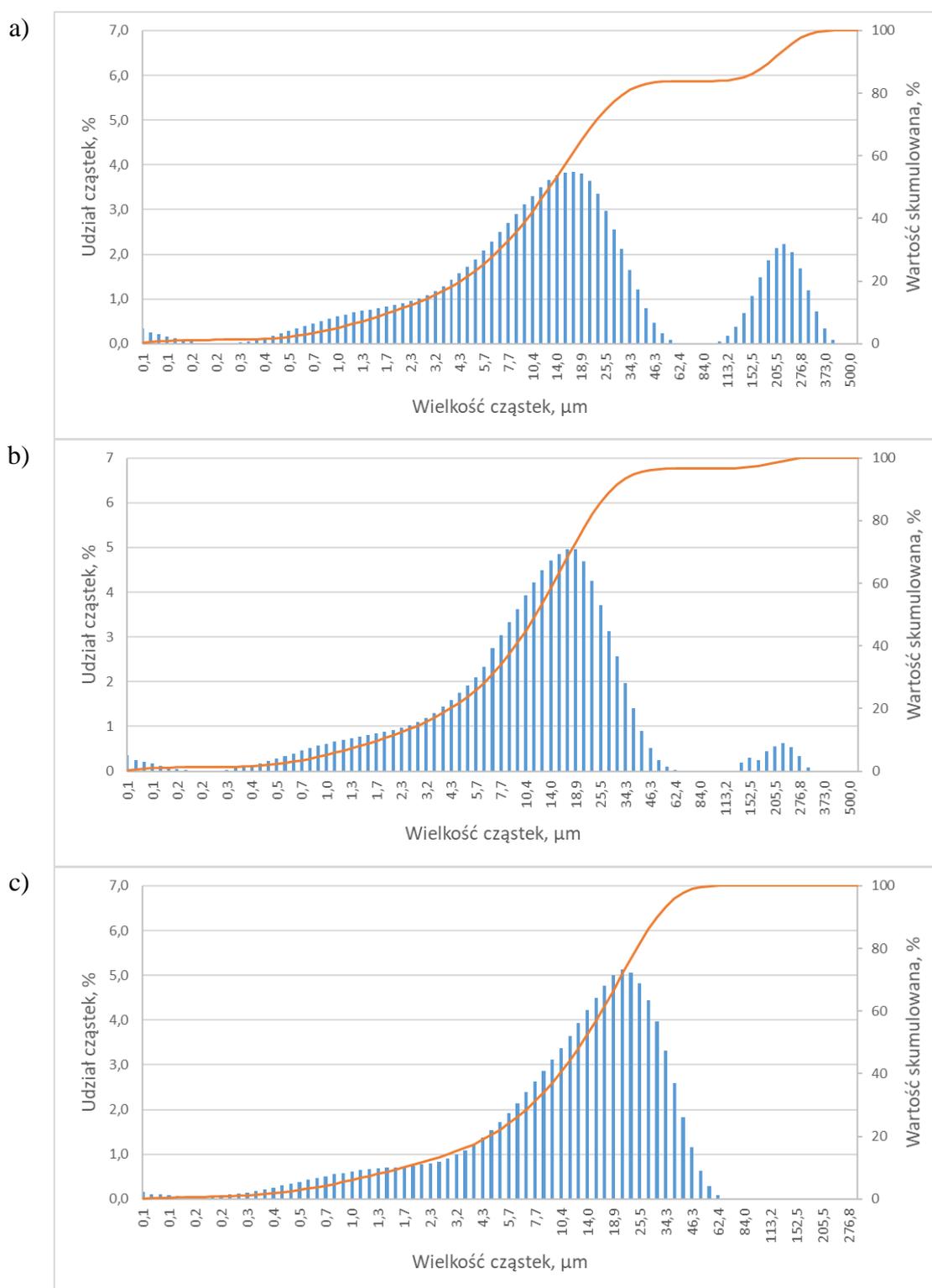
Rysunek 5. Efekt mielenia przez 5 min wełny szklanej z 10% dodatkiem a) boksytu i b) stłuczki szklanej oraz wełny skalnej z 10% dodatkiem c) boksytu i d) stłuczki szklanej  
*Figure 5. Results of 5 min glass wool milling with 10% addition of a) bauxite and b) glass cullet and rock wool milling with 10% addition of c) bauxite and d) glass cullet*

Wnioski z obserwacji otrzymanego proszku potwierdzono wynikami uzyskanymi dzięki wykorzystaniu laserowego analizatora wielkości cząstek (Rys. 6 i 7).



Rysunek 6. Rozkład wielkości cząstek wełny szklanej mielonej przez a) 25 min (bez dodatków), b) wraz z 10% dodatkiem stłuczki szklanej oraz c) przez 5 min wraz z 10% dodatkiem boksytu

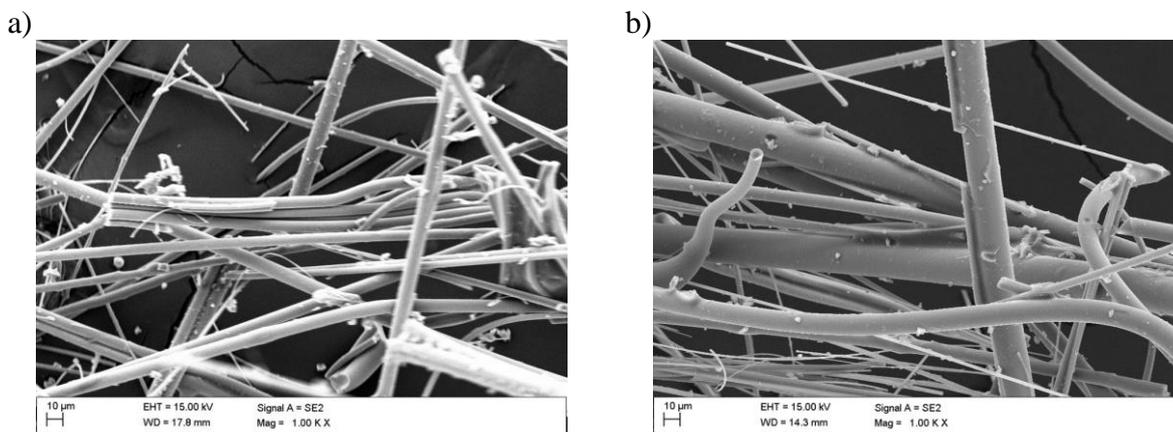
Figure 6. Particle size distribution of glass wool after milling during a) 25 min (without any addition), b) with 10% addition of glass cullet and c) during 5 min with 10% addition of bauxite



Rysunek 7. Rozkład wielkości cząstek wełny skalnej mielonej przez a) 15 min (bez dodatków), b) przez 10 min wraz z 10% dodatkiem słuczki szklanej oraz c) przez 5 min wraz z 10% dodatkiem boksytu

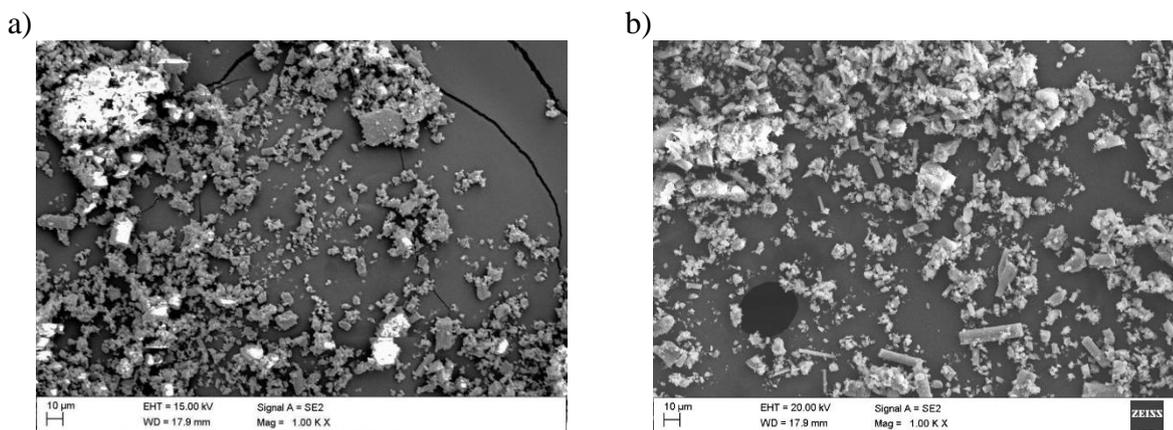
Figure 7. Particle size distribution of rock wool after milling during a) 15 min (without any addition), b) during 10 min with 10% addition of glass cullet and c) during 5 min with 10% addition of bauxite

Rozdrobnienie włóknistej struktury wełny mineralnej najlepiej obrazują wyniki badań wykonane z użyciem skaningowej mikroskopii elektronowej. Badania dowiodły, że mielenie długich włókien z dodatkiem boksytu pozwala efektywnie je kruszyć, w skutek czego można otrzymać cząstki proszku o rozmiarach kilku mikrometrów (Rys. 8 i 9).



Rysunek 8. Morfologia włókien wełny a) szklanej i b) skalnej, SEM

Figure 8. Morphology of a) glass and b) rock wool fibers, SEM



Rysunek 9. Morfologia zmieszanych cząstek wełny a) szklanej i b) skalnej po mieleniu przez 5 min z 10% dodatkiem boksytu

Figure 9. Morphology of a) glass and b) rock wool after 5 min of milling with 10% addition of bauxite, SEM

#### 4. WNIOSKI

W ramach zrealizowanych badań dowiedziono, że wełnę mineralną, zarówno szklaną, jak i skalną, można skutecznie rozdrobnić przy pomocy planetarnego młyna kulowego. Badania wykazały, że dodanie do wełny mineralnej składnika w postaci proszku boksytu przyspiesza proces mielenia i pozwala na jego skrócenie nawet do 5 minut. Jednak dodatek stłuczki szklanej nie daje podobnego efektu; w związku z tym można wnioskować, że twardość proszku jest niezwykle istotna. Skrócenie czasu mielenia jest ważne nie tylko z punktu widzenia mniejszej energochłonności procesu, ale także może zredukować zanieczyszczenie proszku drobinami stali pochodzącymi ze ścierającego się pojemnika i mielników. Możliwy jest również przemiał czystszej wełny mineralnej bez jakichkolwiek dodatków, ale wymaga on starannego doboru

parametrów procesu, w szczególności właściwego doboru stosunku kulek mielących do masy proszku. Rozdrobnione włókna wełny mineralnej mogą być materiałem bazowym do opracowania geopolimerów o pożądanych właściwościach użytkowych.

## **5. PODZIĘKOWANIA**

Prace zostały zrealizowane w ramach projektu PBL pt. „Ocena istotności wpływu parametrów technologicznych na właściwości mechaniczne geopolimeru z udziałem wełny mineralnej”, współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach projektu „Politechnika Śląska jako Centrum Nowoczesnego Kształcenia opartego o badania i innowacje” nr POWR03.05.00-00-Z098/17/00.

## **6. LITERATURA**

1. Yliniemi, J., Laitinen, O., Kinnunen, P. et al.: Pulverization of fibrous mineral wool waste. *J Mater Cycles Waste Manag* 20 (2018) 1248–1256.
2. Cheng A., Wei-Ting L., Huang R.: Application of rock wool waste in cement-based composites. *Materials and Design* 32/2 (2011) 636-642.
3. Chen Z., Wang H., Ji R., Liu L., Cheeseman C., Wang X.: Reuse of mineral wool waste and recycled glass in ceramic foams, *Ceramics International* 45/12 (2019) 15057-15064.
4. Sormunen, P.; Kärki, T. Compression Molded Thermoplastic Composites Entirely Made of Recycled Materials. *Sustainability* 11 (2019) 631.
5. Väntsi O., Kärki T.: Utilization of recycled mineral wool as filler in wood–polypropylene composites. *Constr Build Mater* 55 (2014) 220–226.
6. Yliniemi J., Kinnunen P., Karinkanta P., Illikainen M.: Utilization of mineral wools as alkali-activated material precursor. *Materials* 9 (2016) 312.
7. Davidovits J., False Values on CO2 Emission For Geopolymer Cement/Concrete published In *Scientific Papers, Technical Paper #24, Geopolymer Institute Library, www.geopolymer.org.* (2015)

## Wpływ obróbki powierzchniowej na zużycie narzędzi skrawających

D. Wilczek<sup>a</sup>, D. Pakuła<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Student/ka Politechniki Śląskiej, Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny,

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych  
e-mail: daniel.pakula@polsl.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono często stosowane narzędzia skrawające, a także metody obróbki powierzchniowej poprawiające ich własności. Opisano również zagadnienia dotyczące zużycia tychże narzędzi. Celem pracy było przedstawienie wpływu powłok nanoszonych na narzędzia skrawające, ich porównanie, oraz przedstawienie korzyści z tego płynących.

**Abstract:** In this article commonly used cutting tools, and surface treatment methods which are improving their performance were introduced. Tool-wear and wear resistance were described as well. Main goal of this work was to show, how coatings can reduce the tool-wear, their comparison and what do we gain by using them.

**Słowa kluczowe:** zużycie narzędzi skrawających, obróbka powierzchniowa, wpływ powłok na zużycie narzędzi.

### 1. WSTĘP

Obróbka skrawaniem jest technologią ciągle rozwijaną, co można zauważyć na nowych rozwiązaniach wprowadzanych do maszyn skrawających CNC, jak i narzędzi w niej stosowanych. Biorąc pod uwagę trendy takie jak: HSC (Skrawanie z dużymi prędkościami) oraz HPC (skrawanie wysoko wydajne) [1], można z bardzo dużym prawdopodobieństwem stwierdzić, że obróbka skrawaniem będzie odgrywała znaczną rolę jeszcze przez długi czas [2]. Za tymi trendami idą wymagania w stosunku do narzędzi skrawających i materiałów z których są wykonane. Przy doborze narzędzi warto mieć na uwadze aspekt ekonomiczny, gdyż cena w przypadku materiałów narzędziowych może znacznie się różnić [3].

Przy produkcji nowoczesnych materiałów narzędziowych, bardzo istotny wpływ na ich własności ma obróbka powierzchniowa. Jako typowe rodzaje obróbki powierzchniowej narzędzi skrawających można wymienić: obróbkę cieplną, azotowanie, nawęglanie, nakładanie powłok, dyfuzyjne nasycanie stali pierwiastkami metalicznymi [4]. Z pośród wymienionych, dużą rolę w produkcji narzędzi skrawających, odgrywa nanoszenie powłok techniką PVD ze względu na znaczną poprawę własności narzędzi [3–5].

Narzędzia skrawające ulegają zużyciu ze względu na takie czynniki jak: duże siły nacisku, zmienne warunki pracy, pracę w podwyższonej temperaturze, pracę w środowisku korozyjnym [2,3,5]. Zużywające się narzędzia wpływają na jakość powierzchni i dokładność wykonania



obrabianych elementów, dlatego niezwykle istotna jest ich optymalizacja pod kątem zarówno kształtu jak i materiału wraz z powłokami.

Na podstawie przeglądu piśmiennictwa przedstawiono jak charakterystyka obróbki powierzchniowej wpływa na zużycie narzędzi skrawających oraz ich wydajność. W szczególności skupiono się na określeniu wpływu nanoszenia powłok na poprawę parametrów tych narzędzi.

## 2. NARZĘDZIA SKRAWAJĄCE

Najprostszym podziałem narzędzi skrawających jest pogrupowanie ich względem rodzaju obróbki, w takim przypadku wyróżniamy następujące narzędzia [2,3,6]: tokarskie, frezerskie, do gwintowania, do wiercenia, rozwiercania i pogłębiania, do przeciągania (przeciągacze), do strugania i dłutowania, do szlifowania.



Rysunek 1. Przykłady narzędzi skrawających: a) Płytką z węglików spiekanych z narożem borazonowym [7], b) Frez składany [8], c) Płytką z węglików spiekanych z powłoką TiAlN [9].  
*Figure 1. Examples of cutting tools: a) Sintered carbide insert with borazon corner, b) Compound milling tool, c) Sintered carbide insert with TiAlN coating [9].*

Ponadto większość narzędzi skrawających można podzielić na jednolite, łączone w sposób trwały i składane [2]. Ze względu na aspekt ekonomiczny, narzędzia skrawające jednolite, cieszą się coraz mniejszą popularnością kosztem tych łączonych w sposób trwały i składanych. Na przykładzie toczenia, najczęściej używanymi narzędziami są noże tokarskie składane, ze względu na brak potrzeby wykonywania całego narzędzia z drogiego materiału jak i łatwą wymianę zużytych płytek skrawających. W przypadku wiertel i frezów, częściej spotyka się narzędzia jednolite min. ze względu na ich obrotowy kształt, a co za tym idzie łatwiejszy proces nakładania powłok polepszających ich własności.

Najpopularniejszymi stosowanymi materiałami narzędziowymi w kontekście obróbki skrawaniem są stale szybko tnące oraz węgliki spiekane [3]. Węgliki spiekane pozwalają na skrawanie z większą wydajnością, jednak stale szybko tnące mają tą przewagę iż są tańsze [2,3,6]. Ponadto narzędzia skrawające wytwarza się również z cermetali, spieków ceramicznych oraz materiałów supertwardych [2,3], których głównym zastosowaniem jest obróbka twardych materiałów trudno obrabialnych np. stale hartowane i żeliwa stopowe [3].

## 3. OBRÓBKA POWIERZCHNIOWA NARZĘDZI SKRAWAJĄCYCH

### Obróbka cieplna i ciepłno-chemiczna

Obróbka cieplno-chemiczna dedykowana jest narzędziom stalowym. W kontekście obróbki skrawaniem będą to głównie narzędzia ze stali szybko tnącej. Typowymi zabiegami obróbki cieplnej stali szybko tnących są hartowanie z odpuszczaniem (przeważnie kilkukrotnym)

[3,5,6,10]. Stale szybko tnące można hartować w ośrodkach wolno odprowadzających ciepło (np. olej, sprężone powietrze) [2], dzięki czemu wykazują mniejszą kruchość i podatność na naprężenia hartownicze.

Do często stosowanych zabiegów obróbki cieplno-chemicznej zaliczamy: azotowanie, nawęglanie, tlenoazotowanie, siarkoazotowanie, węgloazotowanie [2,4,5]. Dzięki tym rodzajom obróbki można poprawić min. odporność na ścieranie, odporność na korozję, czy odporność zmęczeniową. Najbardziej znanymi z pośród wymienionych zabiegów są azotowanie i nawęglanie. Warto w tym miejscu przedstawić podstawową różnicę w obróbce z zastosowaniem tych metod. Mianowicie azotowanie przeprowadza się po zbiegach obróbki cieplnej, natomiast nawęglanie przed tymi zabiegami [4].

### **Nanoszenie powłok**

W celu poprawy własności narzędzi skrawających, nanosi się na ich powierzchnię cienkie powłoki (np. TiN, TiAlN, TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Najczęściej stosowaną metodą nakładania powłok jest w tym przypadku PVD (Physical Vapour Deposition) [2,3,10], w przypadku węglików spiekanych powłoki nanosi się również często za pomocą metody CVD (Chemical Vapour Deposition) [3].

Powłoki nanoszone za pomocą metody PVD można podzielić na [5]: Powłoki I generacji – głównie azotki (np. TiN); Powłoki II generacji - można tu wyróżnić: węglikoazotek tytanu Ti(C, N), azotek aluminium i tytanu (Ti,Al)N, azotek chromu CrN, powłoki diamentopodobne DLC; Powłoki III generacji – powłoki wieloskładnikowe i wielowarstwowe (np. (Ti,Zr)N, (Ti,Cr)N, (Ti,Al,V)N, (Ti,Al,Si)N); Powłoki IV generacji – do tej generacji można zaliczyć powłoki kompozytowe, nanokrystaliczne jak i gradientowe.

Kolejną generacją mogą być powłoki nad którymi aktualnie prowadzi się badania. Są to między innymi powłoki hybrydowe (wytworzone za pomocą połączenia przynajmniej dwóch różnych metod nanoszenia np. ALD/PVD).

Narzędzia z naniesionymi powłokami charakteryzują się lepszą trwałością, co przemawia za ich stosowaniem pod względem ekonomicznym, nawet mimo wyższej ceny.

### **Teksturuwanie laserowe**

Jedną z metod obróbki laserowej, dzięki której uzyskać można poprawę własności narzędzi skrawających jest teksturuwanie laserowe. W metodzie tej stosuje się duże gęstości promieniowania laserowego i krótkie czasy ekspozycji. Teksturuwanie laserowe opiera się na efekcie ablacji (gwałtowne rozrywanie wiązań atomowych oraz przejście materii w stan pary bez tzw. efektu termicznego [11]). Dzięki temu typowi obróbki można uzyskać różne kształty tekstur (rysunek 3). Rowki wykonane przy pomocy tej metody mogą poprawiać własności smarne, bądź redukować naprężenia [11,12].

## **4. ZUŻYCIE NARZĘDZI SKRAWAJĄCYCH**

Z racji pracy w warunkach znacznych obciążeń i wysokiej temperatury, narzędzia skrawające ulegają zużyciu. W przypadku zużycia ostrza wyróżniamy stan w którym nie nadaje się ono do dalszej pracy, co nazywany stopniem ostrza [3]. Zużycie ostrza można podzielić na ciągłe i nagłe. Zużycie ciągłe wynika z ciągłej pracy narzędzia i pogarszania jego stanu w czasie, natomiast zużycie nagłe (katastroficzne) występuje gdy narzędzie w bardzo krótkim czasie ulega zniszczeniu do tego stopnia, iż nie nadaje się do dalszej pracy [2]. Ze względu na

przyczyny, zużycie narzędzi skrawających można podzielić na: mechaniczne, adhezyjne, dyfuzyjne, chemiczne oraz ciepłe [2,3,5,6].

#### **Przebieg zużycia ostrza**

Do określenia przebiegu zużycia wprowadza się pojęcie trwałości ostrza która może być określona przez czas skrawania bądź liczbą wykonanych operacji. Norma PN-ISO 3685 podaje, że trwałość ostrza należy wyznaczać z krzywej naturalnego zużycia. Krzywe zużycia rysuje się w układzie wskaźnik zużycia – czas skrawania. Do stworzenia wykresu potrzeba przynajmniej pięciu eksperymentalnych punktów, aby uzyskać odpowiednią dokładność. Trwałość ostrza definiuje punkt przecięcia wyżej przedstawionych krzywych z linią odpowiadającą wartości wskaźnika zużycia odpowiadającemu stopniowi ostrza [3,6].

### **5. WPŁYW OBRÓBKI POWIERZCHNIOWEJ NA ZUŻYCIE NARZĘDZI SKRAWAJĄCYCH**

Przyjmuje się, że cienkie powłoki nakładane na narzędzia skrawające, znacznie poprawiają ich odporność na zużycie [5]. Obecnie prowadzone są badania nad polepszaniem własności tych powłok. Dominują publikacje dotyczące metody PVD, jednak można się doszukać też sporej liczby badań nad powłokami nanoszonymi metodami CVD i ALD. Jak już wcześniej wspomniano, jakość powłok poprawia się również nanosząc powłoki wielowarstwowe [13,14] i powłoki nanoszone hybrydowo (połączenie dwóch lub więcej metod nanoszenia) [15,16]. Wśród metod obróbki powierzchniowej, nad którymi aktualnie prowadzone są badania znaczącą rolę zaczyna odgrywać teksturowanie laserowe, dzięki któremu poprawie ulegają nie tylko własności skrawne narzędzia, ale również przyczepność powłok do podłoża [17].

#### **Wpływ powłok na zużycie narzędzi z węglików spiekanych**

W publikacjach [14] oraz [18] przedstawiono zmniejszenie zużycia narzędzi z węglików spiekanych w przypadku zastosowania powłok wielowarstwowych w stosunku do narzędzi niepokrytych oraz z powłoką jednowarstwową. W artykule [14] autorzy badali zużycie narzędzi z powłoką wielowarstwową Ti-TiN-(Ti,Al,Cr)N. Natomiast w pracy [18] badano wpływ nanostrukturalnych powłok wielowarstwowych (Ti-TiN-(Ti,Al,Cr,Si)N) na zużycie. Narzędzia z powłokami wielowarstwowymi wykazały o wiele lepszą trwałość, osiągając kryterium zużycia VB = 0,4mm po znacznie dłuższym czasie skrawania (płytką z powłoką Ti-(Ti,Al)N: ok 13min; płytką z powłoką wielowarstwową: > 33min) [18], oraz dłuższą drogę skrawania (płytką z powłoką TiN: ok. 80m; płytką z powłoką wielowarstwową: ok 195m) [14].

Natomiast w publikacji [19] badano wpływ powłok hybrydowych, trójwarstwowych (warstwy: adhezyjna, przejściowa, odporna na zużycie) na trwałość narzędzi skrawających. W porównaniu do powłok przedstawionych w pracy [18], te opisane w [19] wykazały znacznie lepszą trwałość przy takiej samej prędkości skrawania (200m/min). W artykule [18] kryterium VB = 0,3mm osiągnięto maksymalnie po ok 13 minutach, natomiast w przypadku [19] po ok 23 minutach dla powłoki Zr,Nb-(Zr,Nb)N-(Cr,Mo,Zr,Nb,Al)N. Wyników tych nie można bezpośrednio porównywać, gdyż w tych dwóch przypadkach, obróbce poddano dwa różne materiały, jednak z uwagi na ich zbliżone właściwości, można z dużą dozą prawdopodobieństwa stwierdzić, że powłoki hybrydowe mogą odznaczać się większą odpornością na zużycie.

#### **Wpływ powłok na zużycie narzędzi ceramicznych**

Autorzy w pracy [20] badali zużycie płytek skrawających z ceramiki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC. Płytką pokryta powłoką TiN wykazała niższy wskaźnik zużycia VB (około 10–18μm) od płytki niepokrytej. Wynika stąd, że powłoka pozwoliła jedynie na nieznaczną poprawę trwałości

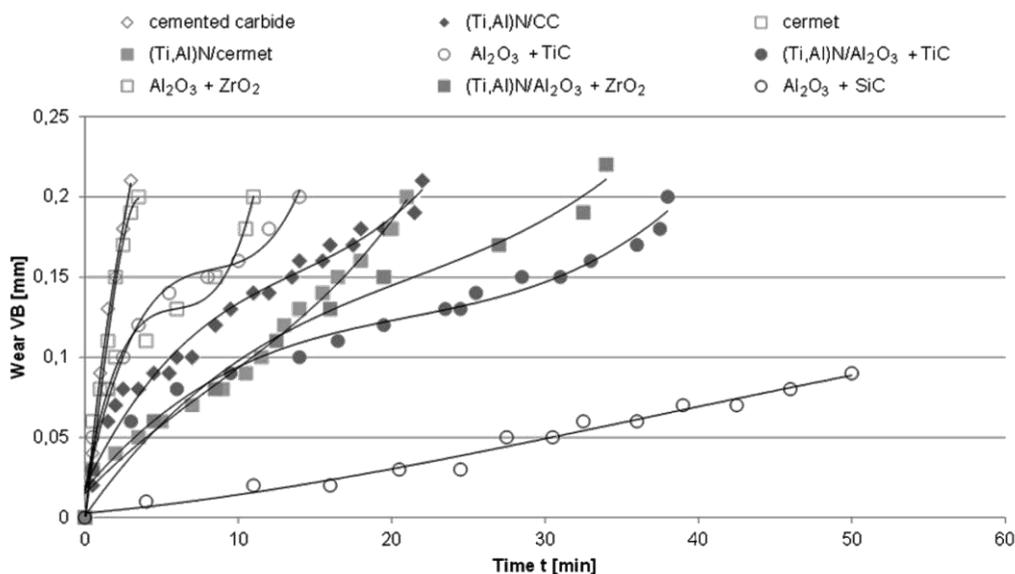
narzędzia. Można się w tym miejscu powołać na prace [15,16,21] gdzie autorzy jako jedną z głównych przyczyn szybkiego zużywania się powłok naniesionych z pomocą metody PVD podają słabą adhezję powłoki do podłoża ceramicznego.

Tabela 1. Poprawa odporności na zużycie narzędzi z powłoką w stosunku do niepokrytego podana w % [21].

Table 1. Wear-resistance improvement of coated tool in comparison to uncoated tool in % [21].

	200 m/min	300 m/min	400 m/min
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /TiAlN	38%	48%	81%
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /CrAlN	92%	100%	-

W pracy [21] opisano badania odporności na zużycie narzędzi skrawających wykonanych z ceramiki azotkowej Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Jako kryterium trwałości ostrza przyjęto wskaźnik zużycia powierzchni przyłożenia VB = 0,3mm. Najlepszy wynik uzyskano dla płytki pokrytej CrAlN (tabela 1). Przy prędkości skrawania 400 m/min powłoka CrAlN uległa zniszczeniu. Autorzy jako przyczynę wskazują zbyt małą adhezję powłoki do podłoża (21,2N).



Rysunek 2. Krzywe zużycia ostrza dla narzędzi niepokrytych oraz z powłokami [22].

Figure 2. Cutting edge wear curves for coated and uncoated tools.

W publikacji [22] przedstawiono badania zużycia płytek skrawających wykonanych z różnych materiałów (rysunek 2). Jako kryterium zużycia dobrano wskaźnik VB = 0,2mm. Dla płytek wykonanych z węglików spiekanych oraz cermetali, w wyniku zastosowania powłok odnotowano poprawę trwałości narzędzia na poziomie 500% oraz 633% [22].

W przypadku ceramiki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiC oraz Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + ZrO<sub>2</sub> poprawa odporności na zużycie wyniosła kolejno 171% i 209% dla płytek powlekanych, natomiast powłoka nałożona na ceramikę wzmocnioną wiskerami (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + SiC<sub>(w)</sub>) dała poprawę trwałości narzędzia na poziomie 36%. Wykresy trwałości wszystkich narzędzi pokazano na rysunku 2. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że ceramika wmacniana wiskerami nie osiągnęła kryterium zużycia nawet po 60min skrawania.

**Wpływ powłok hybrydowych oraz teksturowania laserowego na zużycie narzędzi skrawających**

Odpowiedzią na problem ze słabą adhezją powłok do podłoża (w szczególności ceramicznego), mogą być nowe rodzaje powłok, nad którymi aktualnie prowadzone są prace (min. powłoki hybrydowe). W poniższych przykładach wprawdzie nie przeprowadzono bezpośrednich badań zużycia narzędzi skrawających, jednak zbadano własności mechaniczne, które można z powodzeniem odnieść do odporności na zużycie narzędzi skrawających.

Tabela 2. Adhezja do podłoża powłok nanoszonych metodami PVD oraz ALD/PVD [15].

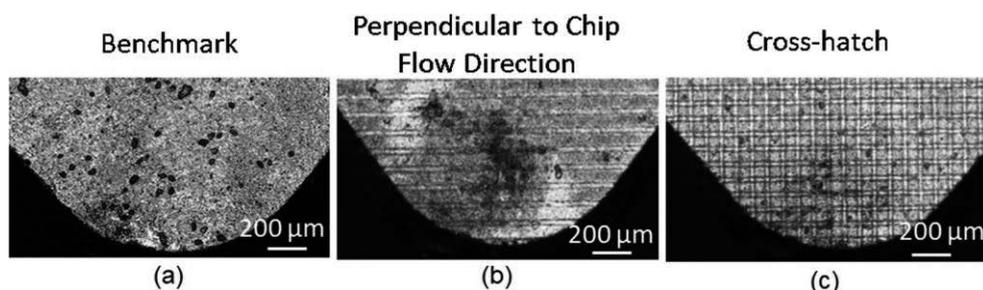
Table 2. Adhesion of coatings deposited by PVD and ALD/PVD methods.

Rodzaj powłoki	Lc, N	
	Podłoże sialonowe	Podłoże z węglików spiekanych
(Ti,Al)N	21	109
ZrO/(Ti,Al)N	64	55

W pracy [15] przedstawiono badania, w których nanoszono powłoki hybrydowe ALD/PVD na podłoża z węglików spiekanych oraz ceramiki narzędziowej SiAlON. Badania wykazały znaczną poprawę adhezji w przypadku próbki o podłożu ceramicznym i powłoce hybrydowej w stosunku do próbki z powłoką PVD, natomiast odwrotną sytuację odnotowano w przypadku próbek o podłożu z węglików spiekanych co przedstawiono w tabeli 4. Zastosowanie powłoki hybrydowej na podłożu ceramicznym dało również poprawę odporności na ścieranie. Podobne wyniki opisali autorzy publikacji [16]. Własności (min. adhezja, ścieralność) płytki z powłoką hybrydową (ZnO/(Ti,Al)N) były znacznie lepsze od płytki z powłoką (Ti,Al)N.

Autorzy pracy [12] badali wpływ teksturowania laserowego na zużycie narzędzi skrawających (płytki z węglików spiekanych z narożem PcBN). Wykonane zostały trzy rodzaje tekstur (rysunek 3). Przy prędkości skrawania 100m/min kryterium zużycia  $VB = 0,15\text{mm}$  osiągnęła jedynie próbka bez tekstury, natomiast najmniejsze wartości parametru VB odnotowano dla próbki z teksturą o liniach prostopadłych do kierunku spływania wióra.

Z kolei w pracy [17] dzięki zastosowaniu teksturowania laserowego uzyskano min. znaczącą poprawę odporności na zużycie (50%) oraz własności mechanicznych narzędzi. Odnotowano także poprawę przyczepności ( $L_2$  większe o ok. 30N) oraz ścieralności powłoki  $WS_2$  naniesionej na podłożu z węglików spiekanych z wykonanymi rowkami w drodze teksturowania laserowego.



Rysunek 3. Płytki poddane badaniu: a) bez tekstury, b) z teksturą linii prostopadłych do kierunku spływania wióra, c) z teksturą krzyżową [12].

Figure 3. Investigated cutting tools: a) without texture, b) with perpendicular to chip flow lines texture, c) with cross-hatch texture.

## 6. PODSUMOWANIE

Zużycie narzędzi jest istotnym zagadnieniem w obróbce skrawaniem, gdyż wpływa na wydajność produkcji jak i jakość wytworów. Trwałość narzędzi można znacząco wydłużyć dzięki nanoszeniu powłok, w szczególności tych nowej generacji (kompozytowe, mikrostrukturalne, hybrydowe), jak i poprzez teksturowanie laserowe. Badania w tym zakresie mogą przynieść znaczące korzyści, pozwalając na wydłużenie okresu życia narzędzi skrawających, jak i możliwość skrawania materiałów trudno obrabialnych.

## PODZIĘKOWANIA

Publikacja współfinansowana przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach projektu „Politechnika Śląska jako Centrum Nowoczesnego Kształcenia opartego o badania i innowacje” nr POWR-03.05.00-00-Z098/17/00.



Rzeczpospolita  
Polska

Unia Europejska  
Europejski Fundusz Społeczny



## LITERATURA

- [1] J. Bałamucki, P. Cichosz, *Obróbka skrawaniem: wysoka produktywność*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2007. <https://books.google.pl/books?id=fw7BLQAACAAJ>.
- [2] K. Zaleski, J. Matuszak, P. Lubelska, *Podstawy obróbki ubytkowej*, Politechnika Lubelska, 2016. <https://books.google.pl/books?id=plK6tAEACAAJ>.
- [3] Jan.Red. Kosmol, Jan.Oprac. Darlewski, Grzegorz.Oprac. Dyrbuś, Adam.Oprac. Salamon, Henryk.Oprac. Słupik, Jerzy.Oprac. Wodecki, Dariusz.Oprac. Ziemiak, Kazimiera.Oprac. red. Szafir, eds., *Techniki wytwarzania: obróbka wiórowa i ścierna*, (n.d.). <http://delibra.bg.polsl.pl/dlibra/docmetadata?id=70304>.
- [4] L.A. Dobrzański, *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo: materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2002.
- [5] L.A. Dobrzański, A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, *Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich*, Open Access Library. Volume 5 (2011).
- [6] K. Zaleski, A. Skoczylas, J. Matuszak, *Narzędzia skrawające: ćwiczenia laboratoryjne*, Lublin University of Technology, 2014.
- [7] sandvik, (n.d.). <https://www.sandvik.coromant.com/pl-pl/industrysolutions/automotive/transmission/pages/cbn-insert-with-integral-chip-breaker.aspx>.
- [8] Artykuły Techniczne, (n.d.). [https://artykulytechniczne.pl/frez-skladany-14-217-699-1-150-z-1-akko.html?fast\\_search=fs](https://artykulytechniczne.pl/frez-skladany-14-217-699-1-150-z-1-akko.html?fast_search=fs).
- [9] Sandvik, (n.d.). <https://www.sandvik.coromant.com/pl-pl/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>.
- [10] H. Słupik, *Obróbka skrawaniem: podstawy teoretyczne*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2013. <http://delibra.bg.polsl.pl/dlibra/docmetadata?id=70234>.
- [11] T. Burakowski, W. Napadłek, *Rodzaje teksturowania laserowego w tribologii*, Tribologia. 4 (2010) 33–45.

- [12] M. Pacella, D. Briggins, Enhanced wear performance of laser machined tools in dry turning of hardened steels, *Journal of Manufacturing Processes*. 56 (2020) 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.058>.
- [13] G. Skordaris, K.-D. Bouzakis, T. Kotsanis, P. Charalampous, E. Bouzakis, O. Lemmer, S. Bolz, Film thickness effect on mechanical properties and milling performance of nano-structured multilayer PVD coated tools, *Surface and Coatings Technology*. 307 (2016) 452–460. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.09.026>.
- [14] A. Vereschaka, S. Grigoriev, N. Sitnikov, G. Oganyan, C. Sotova, Influence of thickness of multilayer composite nano-structured coating Ti-TiN-(Ti,Al,Cr)N on tool life of metal-cutting tool, *Procedia CIRP*. 77 (2018) 545–548. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.237>.
- [15] M. Staszuk, D. Pakula, T. Tomasz, Investigation studies involving wear-resistant ALD/PVD hybrid coatings on sintered tool substrates, *Materiali in Tehnologije*. 50 (2016) 755–759. <https://doi.org/10.17222/mit.2015.236>.
- [16] M. Staszuk, D. Pakula, G. Chladek, M. Pawlyta, M. Pancielejko, P. Czaja, Investigation of the structure and properties of PVD coatings and ALD + PVD hybrid coatings deposited on sialon tool ceramics, *Vacuum*. 154 (2018) 272–284. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.04.032>.
- [17] Y.S. Ahmed, S.C. Veldhuis, Enhancement of carbide tool performance during dry machining through a combination of laser surface texturing and tungsten disulfide soft coatings, *Surface and Coatings Technology*. 428 (2021) 127849. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127849>.
- [18] A.A. Vereschaka, S. Grigoriev, N.N. Sitnikov, J.I. Bublikov, A.D.L. Batako, Effect produced by thickness of nanolayers of multilayer composite wear-resistant coating on tool life of metal-cutting tool in turning of steel AISI 321, *Procedia CIRP*. 77 (2018) 549–552. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.236>.
- [19] M. Volosova, A. Vereschaka, N. Andreev, C. Sotova, J. Bublikov, Improvement of the performance properties of cutting tools using the multilayer composite wear-resistant coatings based on nitrides of Cr, Mo, Zr, Nb, and Al, *Materials Today: Proceedings*. 38 (2021) 1421–1427. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.118>.
- [20] B. Karpuschewski, K. Schmidt, J. Prilukova, J. Beňo, I. Maňková, N.T. Hieu, Influence of tool edge preparation on performance of ceramic tool inserts when hard turning, *Journal of Materials Processing Technology*. 213 (2013) 1978–1988. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.05.016>.
- [21] W. Liu, Q. Chu, J. Zeng, R. He, H. Wu, Z. Wu, S. Wu, PVD-CrAlN and TiAlN coated Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic cutting tools —1. Microstructure, turning performance and wear mechanism, *Ceramics International*. 43 (2017) 8999–9004. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.04.041>.
- [22] J. Mikula, D. Pakula, L. Zukowska, K. Gołombek, A. Kříž, Wear Resistance of (Ti,Al)N Metallic Coatings for Extremal Working Conditions, *Coatings*. 11 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11020157>.

## Analiza termodynamiczna procesu wydzielenia węglikoazotku $Ti_xV_{1-x}C_yN_{1-y}$ w stali typu HSLA

A. Wojtacha<sup>a</sup>, M. Opiela<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych  
email: anna.wojtacha@polsl.pl, marek.opiela@polsl.pl

**Streszczenie:** Celem pracy była analiza termodynamiczna procesu wydzielenia się w austenicie złożonego węglikoazotku typu  $Ti_xV_{1-x}C_yN_{1-y}$ . Przedmiotem analizy była stal typu HSLA zawierająca 0,175% C, 1,87% Mn, 1% Si, 0,22% Mo, 0,0064% N oraz Ti i V o stężeniu 0,031% i 0,022% odpowiednio. Analizę procesu wydzielenia złożonego węglikoazotku w warunkach równowagi termodynamicznej przeprowadzono w oparciu o model Hillerta i Staffanssona, rozwinięty przez Adriana. Do oceny procesu wydzielenia węglikoazotku wykorzystano program komputerowy CarbNit. Temperatura początku wydzielenia się węglikoazotku o składzie stechiometrycznym  $Ti_{0,985}V_{0,015}C_{0,073}N_{0,927}$  wynosi 1394°C. W temperaturze 850°C praktycznie cały Ti jest związany w węglikoazotku o składzie stechiometrycznym  $Ti_{0,883}V_{0,117}C_{0,378}N_{0,622}$ . W wymienionej temperaturze znaczna część mikrododatku V będzie rozpuszczona w roztworze  $\gamma$ , co oznacza, że wanad będzie słabiej oddziaływał na tworzenie drobnoziarnistej struktury austenitu, lecz silniej na utwardzenie wydzieleniowe stali przez wydzielające się podczas chłodzenia wyrobów dyspersyjne cząstki VN i V(C,N).

**Abstract:** The aim of the study was a thermodynamic analysis of the precipitation of complex carbonitride of the  $Ti_xV_{1-x}C_yN_{1-y}$  in austenite. The subject of the analysis was HSLA-type steel containing 0.175% C, 1.87% Mn, 1% Si, 0.22% Mo, 0.0064% N and Ti and V with a concentration of 0.031% and 0.022%, respectively. The analysis of the precipitation of complex carbonitride under thermodynamic equilibrium conditions was based on the Hillert and Staffansson model, developed by Adrian. The CarbNit computer program was used to evaluate the process of carbonitride precipitation. The temperature of the onset of carbonitride of the stoichiometric composition  $Ti_{0,985}V_{0,015}C_{0,073}N_{0,927}$  evolution, was 1394°C. At 850°C, practically all of the Ti is bound in the carbonitride of the stoichiometric composition  $Ti_{0,883}V_{0,117}C_{0,378}N_{0,622}$ . At the mentioned temperature, a significant part of the microaddition V was dissolved in the solution  $\gamma$ , which means that vanadium had a lesser effect on the formation of the fine-grained structure of austenite, but more strongly on the precipitation hardening of the steel by the dispersion VN and V(C,N) particles released during the cooling of the products.

**Słowa kluczowe:** węglikoazotek, model termodynamiczny, stale typu HSLA



## 1. WSTĘP

Wzrastające wymagania odbiorców wyrobów stalowych decydują o konieczności wytwarzania gatunków o wysokiej wytrzymałości, gwarantowanej ciągliwości, podatności do odkształceń technologicznych na zimno i na gorąco oraz ograniczonej anizotropii własności plastycznych [1, 2]. Jednoczesne spełnienie tych przeciwstawnych cech wymaga racjonalnego doboru składu chemicznego, zapewniającego pożądaną hartowność i spawalność stali [3-5].

Wymienione wymagania spełniają w szerokim zakresie stale typu HSLA (High Strength Low Alloy), zawierające mikrododatki o dużym powinowactwie z C i N, tj. Nb, Ti i V w ilości do około 0,1%, niekiedy z podwyższonym stężeniem N, a w przypadku stali do ulepszania cieplnego także do 0,005% B – zwiększającego hartowność [6-9]. Mikrododatki metaliczne w oddziaływaniu z C i N tworzą stabilne fazy międzywęzłowe MX o sieci typu NaCl, co stwarza możliwość wytwarzania wyrobów stalowych o strukturze drobnoziarnistej, nadającej im wysoką wytrzymałość i gwarantowaną odporność na pękanie, bez konieczności stosowania kosztownej obróbki cieplnej lub jej ograniczenia zwykle tylko do odpuszczania [10, 11].

Wytwarzanie wyrobów o wysokich własnościach wytrzymałościowych i gwarantowanej ciągliwości ze stali mikrostopowych typu HSLA wymaga właściwego doboru warunków obróbki plastycznej, dostosowanych do temperaturowego zakresu wydzielania się w austenicie faz międzywęzłowych typu MX wprowadzonych do stali mikrododatki. Rozpuszczalność w austenicie węgla lub azotu jest określana przez logarytm iloczynu rozpuszczalności wyrażony wzorem [12]:

$$\log ([M] \cdot [X]) = B - A/T \quad (1)$$

gdzie: [M] i [X] – odpowiednio udziały masowe mikrododatku metalicznego i metaloidu rozpuszczone w austenicie wyrażone w % mas., T – temperatura bezwzględna, A i B – stałe związane z energią tworzenia związku (stała A jest proporcjonalna do entalpii, a stała B do entropii tworzenia związku).

Skład chemiczny austenitu ([M], [X]), jak też zawartość nierozpuszczonego związku <MX> można wyznaczyć, wykorzystując iloczyn rozpuszczalności związku oraz bilans masy pierwiastków wchodzących w reakcję, której produktem jest związek <MX>. Uproszczony model termodynamiczny oparty na prawach termodynamiki równowagowej, dotyczący wydzielania związku <MX>, opisuje układ równań [13]:

$$[M] \cdot [X] = k_{MX} \quad (2)$$

$$M = [M] + \frac{(M)}{(MX)} < MX > \quad (3)$$

$$X = [X] + \frac{(M)}{(MX)} < MX > \quad (4)$$

gdzie:  $k_{MX} = [M] \cdot [X]$  – iloczyn rozpuszczalności związku MX, M i X – całkowite stężenie tych pierwiastków w stali w % mas., natomiast symbole w nawiasach okrągłych oznaczają masy atomowe pierwiastków lub masę cząsteczkową związku.

Rozwiązaniem powyższego układu równań jest funkcja kwadratowa pozwalająca obliczyć ilość rozpuszczonego w austenicie pierwiastka międzywęzłowego [14]:

$$[X]^2 + [X] \left[ \frac{(X)}{(M)} \cdot M - X \right] - \frac{(X)}{(M)} \cdot k_{MX} = 0 \quad (5)$$

Jeżeli  $\Delta > 0$ , to równanie (2.77) ma dwa rozwiązania, przy czym rozwiązanie ujemne jest pomijane, natomiast dla  $\Delta \leq 0$  temperatura austenitowania jest wyższa lub równa temperaturze rozpuszczania związku  $\langle MX \rangle$ . Zawartość pierwiastka międzywęzłowego rozpuszczonego w austenicie przy  $\Delta > 0$  wyznacza się ze wzoru:

$$[X] = \frac{X - \frac{(X)}{(M)} \cdot M + \sqrt{\left(\frac{(X)}{(M)} \cdot M - X\right)^2 + 4 \frac{(X)}{(M)} \cdot k_{MX}}}{2} \quad (6)$$

Modele procesów wydzieleniowych w stalach mikrostopowych typu HSLA oparte na prawach termodynamiki równowagowej przewidują również tworzenie się złożonych faz węglikoazotków podczas operacji technologicznych przeróbki plastycznej. Węglik i azotki mikrododatków Nb, Ti i V wykazują wzajemną rozpuszczalność i w wyniku tego procesu tworzą się węglikoazotki o składzie chemicznym i temperaturze rozpuszczania zależnych od składu chemicznego stali [15-18]. Modele wieloskładnikowe, rozpatrujące obecność od jednego do trzech mikrododatków, oparte są na modelu roztworów regularnych faz międzywęzłowych zaproponowanym przez Hillerta i Staffanssona [19]. Modele te opierają się następujących założeniach [13]:

- pierwiastki substytucyjne ( $M'$ ,  $M''$ ,  $M'''$ ) oraz pierwiastki międzywęzłowe (C, N) tworzą w austenicie roztwory rozcieńczone, a ich aktywności spełniają prawo Henry'ego,
- w wyniku reakcji pomiędzy pierwiastkami substytucyjnymi i międzywęzłowymi powstaje węglikoazotek  $M'_x M''_{1-x} C_y N_{1-y}$  lub  $M'_x M''_y M'''_{1-x-y} C_y N_{1-y}$  wykazujący idealną stechiometrię,
- w powstającym węglikoazotku atomy metali oraz pierwiastków międzywęzłowych zajmują pozycje w dwu niezależnych podsięciach,
- pomijana jest możliwość powstawania wakansów w obu podsięciach oraz rozpuszczania atomów żelaza w węglikoazotku.

Zgodnie z modelem Hillerta i Staffanssona molowa energia swobodna węglikoazotku jest równa [19]:

$$G_{MC_y N_{1-y}} = G_m = y {}^o G_{MC} + (1-y) {}^o G_{MN} + RT[y \ln(y) + (1-y) \ln(1-y)] + y(1-y) L_{CN}^M \quad (7)$$

gdzie:  $L_{CN}^M$  – parametr oddziaływania pierwiastka M na roztwór C-N.

W stanie równowagi termodynamicznej potencjały chemiczne związku MX ( $\bar{G}_{MX}$ ) rozpuszczonego w węglikoazotku oraz pierwiastków M i X ( $\bar{G}_M^y$ ,  $\bar{G}_X^y$ ) rozpuszczonych w austenicie są sobie równe:

$$\bar{G}_{MC} - \bar{G}_M^y - \bar{G}_C^y = 0 \quad (8)$$

$$\bar{G}_{MN} - \bar{G}_M^y - \bar{G}_N^y = 0 \quad (9)$$

Potencjał chemiczny pierwiastka X rozpuszczonego w austenicie opisuje równanie:

$$\bar{G}_X^y = {}^o G_X^y + RT \ln([X_a]) \quad (10)$$

gdzie:  ${}^o G_X^y$  – molowa energia swobodna czystego pierwiastka,  $[X_a]$  – ułamek atomowy pierwiastka X rozpuszczonego w austenicie.

Natomiast potencjał chemiczny związku MX w węglikoazotku opisuje równanie:

$$\bar{G}_{MX} = G_m + \left( \frac{\partial G_m}{\partial Z_X} \right)_{Z_k} - \sum_{j=1}^2 Z_{Xj} \left( \frac{\partial G_m}{\partial Z_{Xj}} \right)_{Z_k} \quad (11)$$

gdzie:  $Z_k$  – oznacza, że zawartości innych pierwiastków oprócz rozważanych są stałe,  $Z_X$  – oznacza zmienną zawartość węgla w węglikoazotku –  $y$ , lub azotu –  $1-y$ .

Z równań (7) i (11) otrzymuje się układ równań:

$${}^oG_{MC} - \ln([M_a]) - \ln([N_a]) + RT \ln(y) + (1-y)^2 L_{CN}^M = 0 \quad (12)$$

$${}^oG_{MN} - \ln([M_a]) - \ln([N_a]) + RT \ln(1-y) + y^2 L_{CN}^M = 0 \quad (13)$$

Po uwzględnieniu zależności:

$$\frac{{}^oG_{MX}}{RT} = K_{MX} \quad (14)$$

końcowa postać równań opisujących stan równowagi termodynamicznej w układzie Fe-M-C-N jest następująca [20]:

$$\ln \left( \frac{y K_{MC}}{[M_a] [C_a]} \right) + (1-y)^2 \frac{L_{CN}^M}{RT} = 0 \quad (15)$$

$$\ln \left( \frac{(1-y) K_{MN}}{[M_a] [N_a]} \right) + y^2 \frac{L_{CN}^M}{RT} = 0 \quad (16)$$

Układ równań (15) i (16) zawiera cztery niewiadome:  $[M_a]$ ,  $[C_a]$ ,  $[N_a]$  i  $y$ . Do jego rozwiązania konieczne są dodatkowe równania, wynikające z bilansu masy pierwiastków wchodzących w reakcje, w wyniku których powstaje węglikoazotek:

$$M_a = \frac{f}{2} + (1-f)[M_a] \quad (17)$$

$$C_a = \frac{yf}{2} + (1-f)[C_a] \quad (18)$$

$$N_a = \frac{(1-y)f}{2} + (1-f)[N_a] \quad (19)$$

gdzie:  $f$  – ułamek atomowy wydzielen  $MC_yN_{1-y}$ .

## 2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Przeprowadzona analiza dotyczyła nowo opracowanej stali typu HSLA przeznaczonej do wytwarzania odkuwek o strukturze wielofazowej z austenitem szczątkowym. Badana stal zawiera 0,175% C, 1,87% Mn, 1% Si, 0,014% P, 0,020% S, 0,22% Mo, 0,028% Cr, 0,0064% N oraz mikrododatki Ti i V o stężeniu 0,031% i 0,022% odpowiednio.

Analiza termodynamiczna stanu równowagi fazowej składników strukturalnych w zakresie stabilności fazy  $\gamma$  badanej stali typu HSLA dotyczyła obliczeń składu chemicznego austenitu oraz zawartości i składu chemicznego faz międzywęzłowych typu MX wprowadzonych do stali mikrododatki w funkcji temperatury chłodzenia.

Analizę procesu wydzielania się w austenicie węglików i azotków w warunkach równowagi termodynamicznej przeprowadzono z wykorzystaniem modelu opracowanego przez Adriana [13, 20]. Obliczenia przeprowadzono na podstawie zależności logarytmicznej (1) oraz równań (2÷4) dotyczących bilansu masy.

Natomiast analizę procesu wydzielania złożonych węglikoazotków w warunkach równowagi termodynamicznej przeprowadzono w oparciu o model Hillerta i Staffansona [19], zmodyfikowany przez Adriana [13, 21], pozwalający obliczyć skład chemiczny austenitu oraz skład i zawartość wydzieleni węglikoazotku w układzie wieloskładnikowym Fe-M'-M''-M'''-Al-C-N. Końcowa postać równań opisujących równowagę termodynamiczną układu przedstawia się następująco [21]:

$$y \ln \frac{xyK_{M'C}}{[M'_a][C_a]} + (1-y) \ln \frac{x(1-y)K_{M'N}}{[M'_a][N_a]} + y(1-y) \frac{L_{CN}}{RT} = 0 \quad (20)$$

$$y \ln \frac{vyK_{M''C}}{[M''_a][C_a]} + (1-y) \ln \frac{v(1-y)K_{M''N}}{[M''_a][N_a]} + y(1-y) \frac{L_{CN}}{RT} = 0 \quad (21)$$

$$y \ln \frac{(1-x-v)yK_{M'''C}}{[M'''_a][C_a]} + (1-y) \ln \frac{(1-x-v)(1-y)K_{M'''N}}{[M'''_a][N_a]} + y(1-y) \frac{L_{CN}}{RT} = 0 \quad (21)$$

$$v \ln \frac{x[M'''_a]K_{M'C}}{v[M'_a]k_{M'C}} + (1-x-v)(1-y) \ln \frac{(1-x-v)[M'_a]K_{M'N}}{X[M'''_a]k_{M'N}} + \\ + (1-y) \ln \frac{x(1-y)K_{M'N}}{[M'_a][N_a]} + y^2(1-y) \frac{L_{CN}}{RT} = 0 \quad (23)$$

$$[Al_a] \cdot [N_a] = K_{AlN} \quad (24)$$

Do rozwiązania przedstawionych równań nieliniowych konieczne jest wykorzystanie dalszych równań, opisujących prawo zachowania masy podczas reakcji powstawania węglikoazotku i azotku AlN [20]:

$$M'_a = \frac{x}{2} f + (1-f-f_a)[M'_a] \quad (25)$$

$$M''_a = \frac{v}{2} f + (1-f-f_a)[M''_a] \quad (26)$$

$$M'''_a = \frac{z}{2} f + (1-f-f_a)[M'''_a] \quad (27)$$

$$C_a = \frac{y}{2} f + (1-f-f_a)[C_a] \quad (28)$$

$$N_a = \frac{1-y}{2} f + (1-f-f_a)[N_a] \quad (29)$$

$$Al_a = \frac{f_a}{2} f + (1-f-f_a)[Al_a] \quad (30)$$

gdzie:  $f$  – ułamek molowy węglikoazotku,  $f_a$  – ułamek molowy AlN,  $z = 1 - x - v$ .

Do oceny procesu wydzielania złożonych węglikoazotków wykorzystano program komputerowy CarbNit [22].

### 3. WYNIKI BADAŃ

Niezbędnym warunkiem prawidłowego projektowania warunków obróbki cieplno-plastycznej stali mikrostopowych typu HSLA jest szczegółowa analiza procesu wydzielania faz międzywęzłowych typu MX, pozwalająca na wyznaczenie temperaturowego zakresu wydzielania się tych faz w austenicie. W pierwszej kolejności przeprowadzono analizę wydzielania się pojedynczych azotków i węglików wprowadzonych do stali mikrododatki w funkcji temperatury, którą oparto głównie na zależności (1) oraz równaniach (2-4) dotyczących bilansu masy pierwiastków. Do obliczeń wykorzystano następujące wartości stałych z równania (1): dla fazy TiN –  $A = 14400$ ,  $B = 5,00$ ; dla fazy TiC –  $A = 10745$ ,  $B = 5,33$ ; dla fazy VN –  $A = 9720$ ,  $B = 3,90$ ; dla fazy VC –  $A = 9500$ ,  $B = 6,72$  [8, 12, 23-26].

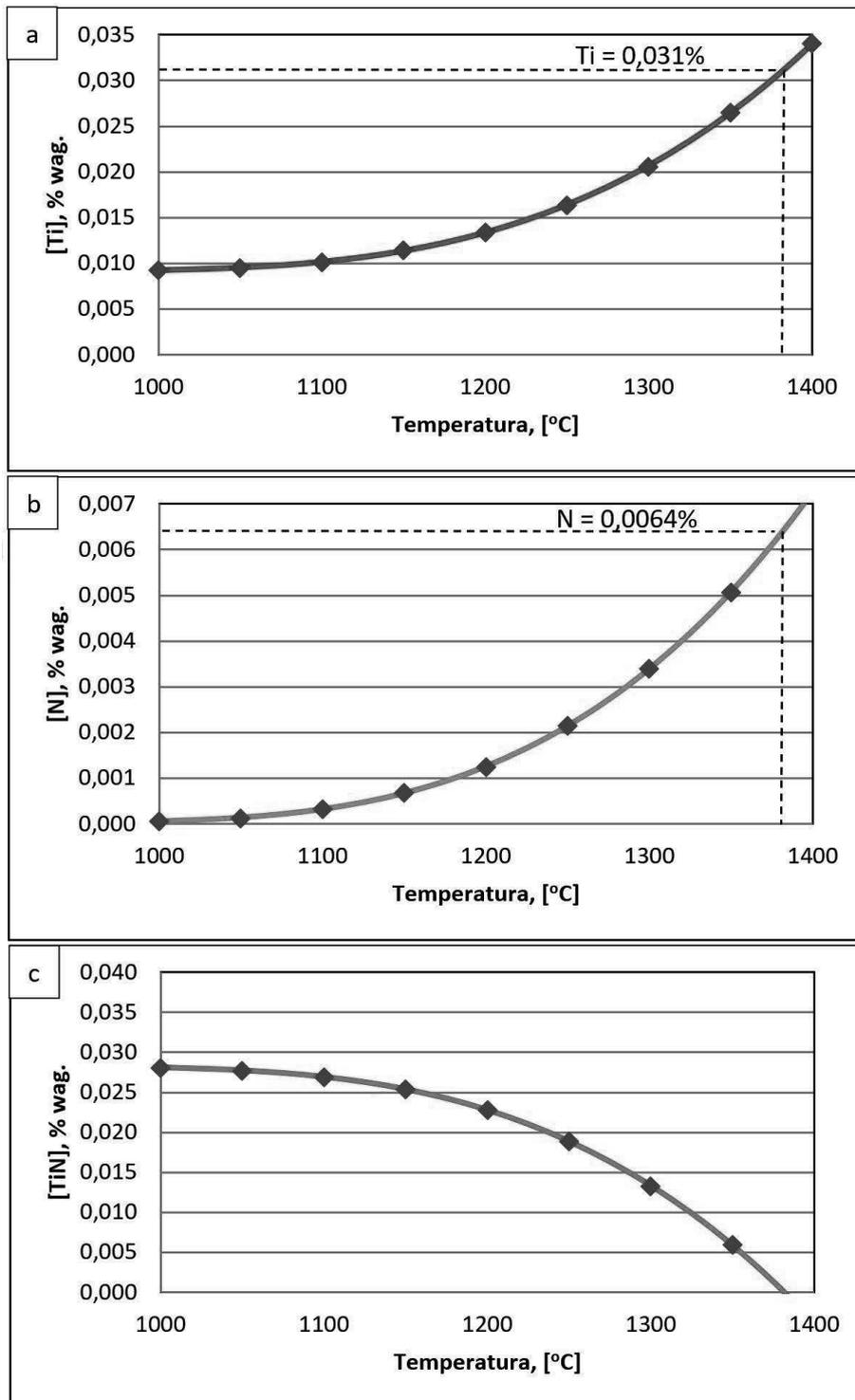
Przeprowadzone obliczenia wskazują, że w austenicie analizowanej stali zawierającej 0,175% C, 0,0064% N, 0,031% Ti i 0,022% V w pierwszej kolejności nastąpi wydzielanie się azotków typu TiN. Początek wydzielania się tej fazy w austenicie następuje w temperaturze około 1380°C (**rys.1a**). W miarę obniżania temperatury następuje stopniowe zmniejszanie zawartości azotu i tytanu rozpuszczonych w roztworze stałym (**rys.1a** i **rys.1b**), natomiast udział nierozpuszczonej fazy TiN ulega zwiększeniu (**rys.1c**). Całkowite związanie tytanu w azotki typu TiN ma miejsce w temperaturze około 1000°C.

Następną fazą mogącą wydzielać się w austenicie analizowanej stali jest węgiel typu TiC. Temperatura początku wydzielania się węglików typu TiC wynosi około 1180°C. Obniżanie temperatury powoduje zmniejszenie się zawartości tytanu i węgla rozpuszczonych w roztworze stałym (**rys.2a** i **rys.2b**) przy jednoczesnym zwiększeniu udziału węglików typu TiC nierozpuszczonych w austenicie (**rys.2c**). Przeprowadzone obliczenia wykazały, że mikrododatek tytanu w warunkach równowagowych będzie całkowicie związany w węgliki typu TiC w temperaturze około 900°C.

Kolejnym mikrododatkiem mogącym tworzyć fazy międzywęzłowe typu MX w austenicie analizowanej stali jest wanad. Zapoczątkowanie procesu wydzielania się azotków typu VN następuje w temperaturze około 980°C (**rys.3**). W wyniku obniżania się temperatury następuje zmniejszenie zawartości wanadu i azotu rozpuszczonego w austenicie (**rys.3a** i **rys.3b**), natomiast udział nierozpuszczonej fazy VN ulega zwiększeniu (**rys.3c**). Z danych zestawionych na rys.3 wynika, że mikrododatek wanadu wprowadzony do analizowanej stali w stężeniu 0,022% w temperaturze 900°C, stanowiącej często temperaturę końca obróbki plastycznej, jest związany w azotki typu VN tylko w około 50% i będzie słabiej oddziaływał na tworzenie drobnoziarnistej struktury austenitu, lecz silniej na utwardzenie wydzieleniowe stali przez wydzielające się podczas chłodzenia wyrobów dyspersyjne cząstki VN i V(C,N).

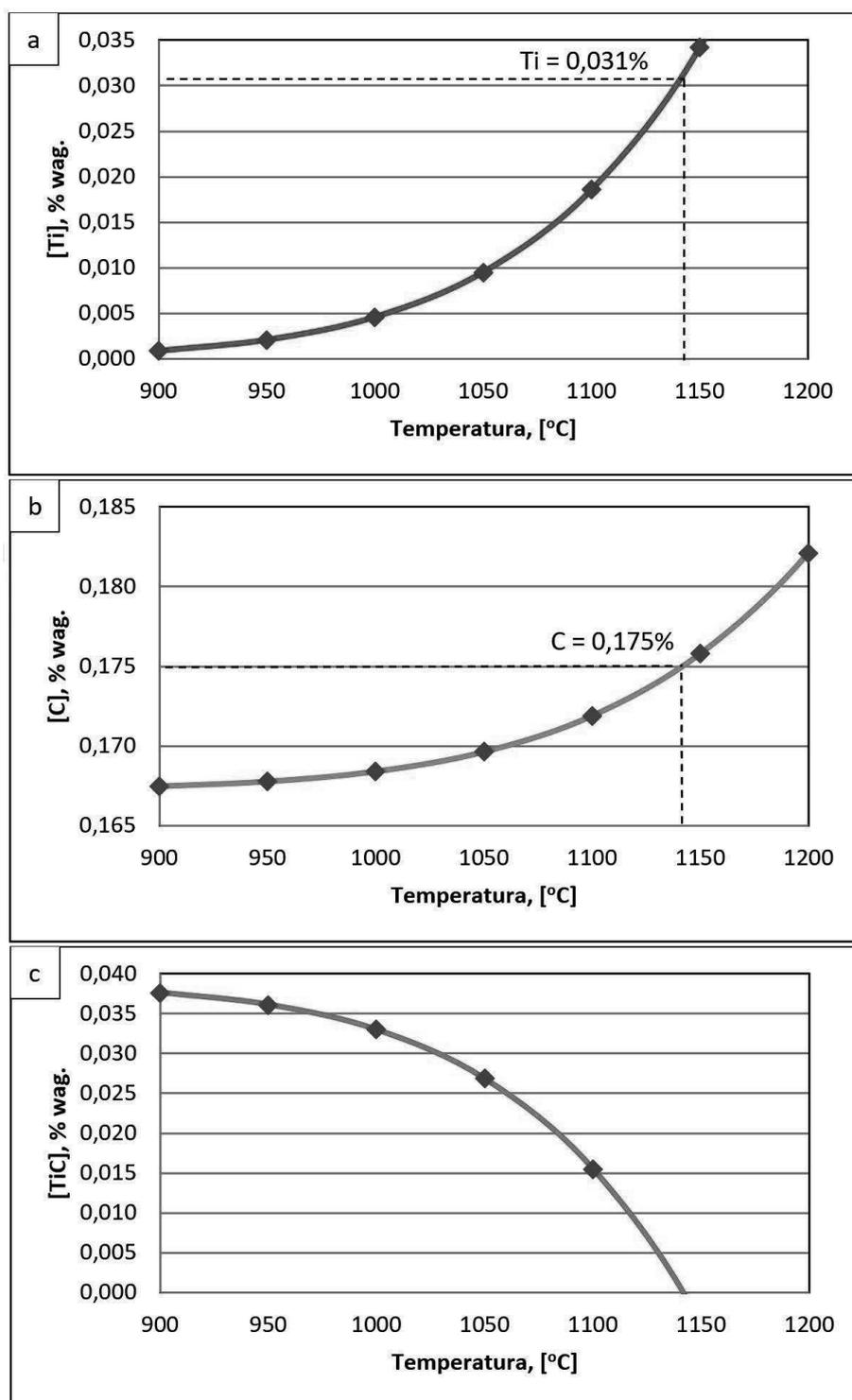
Kolejną fazą mogącą wydzielić się w austenicie analizowanej stali jest węgiel typu VC. Przeprowadzone obliczenia wykazały, że temperatura początku wydzielania się węglików typu VC wynosi około 775°C (**rys.4**). W wyniku obniżenia temperatury udział azotków typu VC w roztworze stałym rośnie (**rys.4c**), przy jednoczesnym zmniejszaniu zawartości mikrododatku wanadu i węgla rozpuszczonego w austenicie (**rys.4a** i **rys.4b**). W warunkach równowagowych praktycznie cały wanad jest związany w węgliki typu VC w temperaturze około 600°C.

W rzeczywistości w stalach z mikrododatki Ti i V występują kompleksowe węglikoazotki Ti(C,N) i (Ti,V)(C,N) jako wynik wzajemnej rozpuszczalności azotków TiN, węglików TiC oraz węglikoazotków V(C,N) [8, 27, 28].



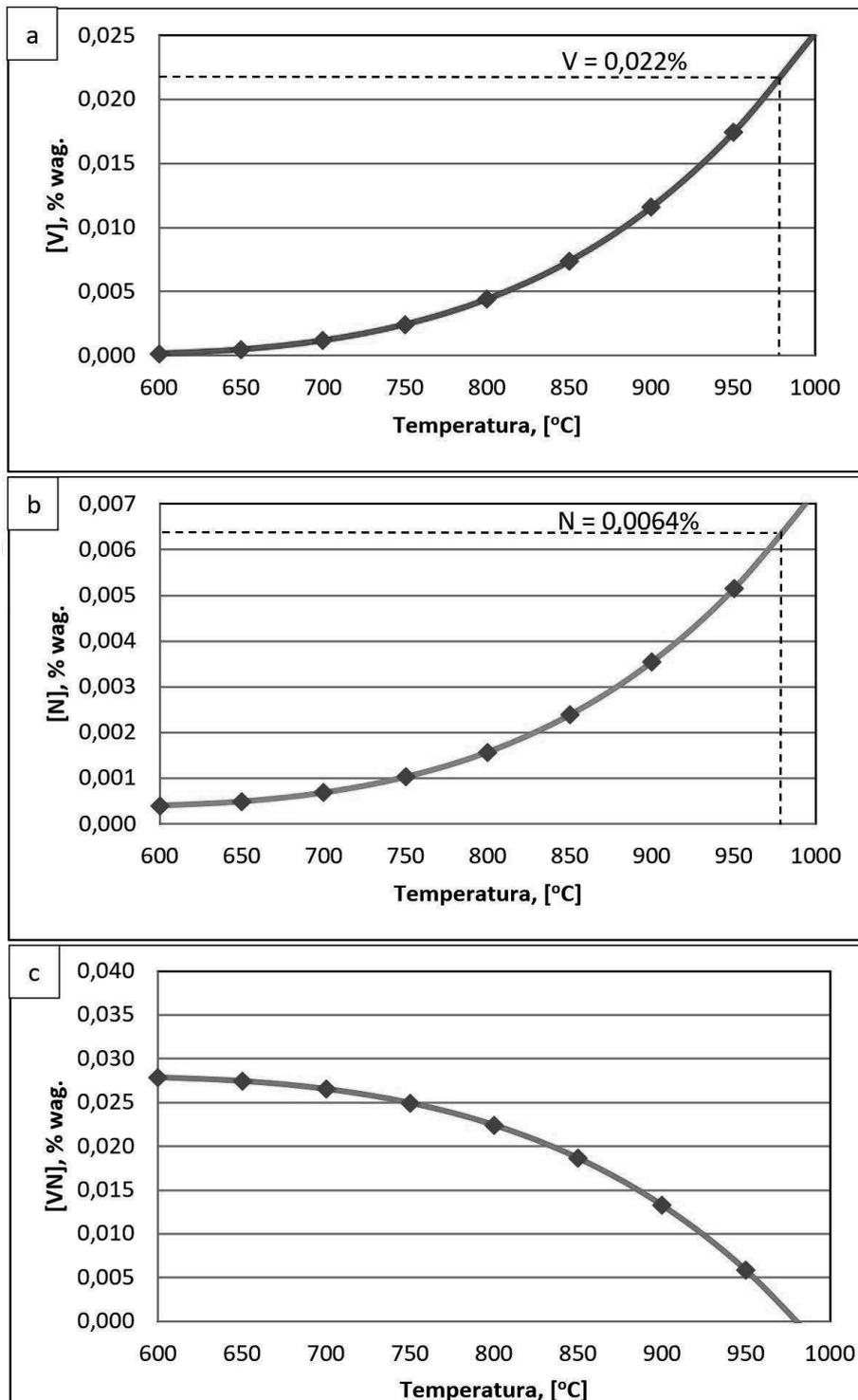
Rysunek 1. Zakres temperaturowy wydzielenia azotku typu TiN w austenicie badanej stali: a) stężenie tytanu rozpuszczonego w austenicie, b) stężenie azotu rozpuszczonego w austenicie, c) udział <TiN> nierozpuszczonego w austenicie

Figure 1. Temperature range of TiN precipitation in the austenite for the tested steel: a) titanium concentration dissolved in the austenite, b) nitrogen concentration dissolved in the austenite, c) fraction of <TiN> not dissolved in the austenite



Rysunek 2. Zakres temperaturowy wydzielenia węglika typu TiC w austenicie badanej stali: a) stężenie tytanu rozpuszczonego w austenicie, b) stężenie węgla rozpuszczonego w austenicie, c) udział <TiC> nierozpuszczonego w austenicie

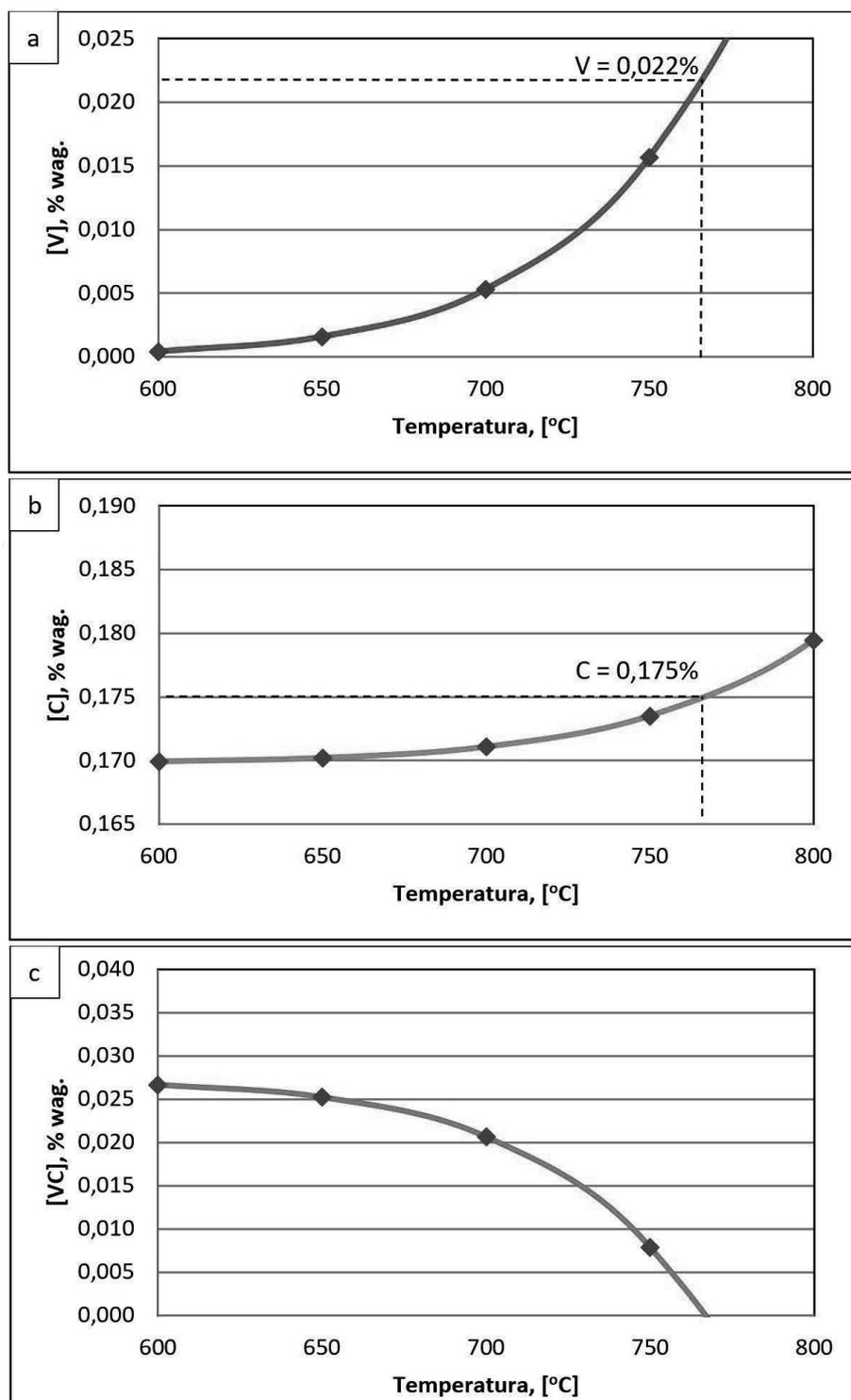
Figure 2. Temperature range of TiC precipitation in the austenite for the tested steel: a) titanium concentration dissolved in the austenite, b) carbon concentration dissolved in the austenite, c) fraction of <TiC> not dissolved in the austenite



Rysunek 3. Zakres temperaturowy wydzielenia azotku typu VN w austenicie badanej stali: a) stężenie wanadu rozpuszczonego w austenicie, b) stężenie azotu rozpuszczonego w austenicie, c) udział <VN> nierozpuszczonego w austenicie

Figure 3. Temperature range of VN precipitation in the austenite for the tested steel: a) vanadium concentration dissolved in the austenite, b) nitrogen concentration dissolved in the austenite, c) fraction of <VN> not dissolved in the austenite

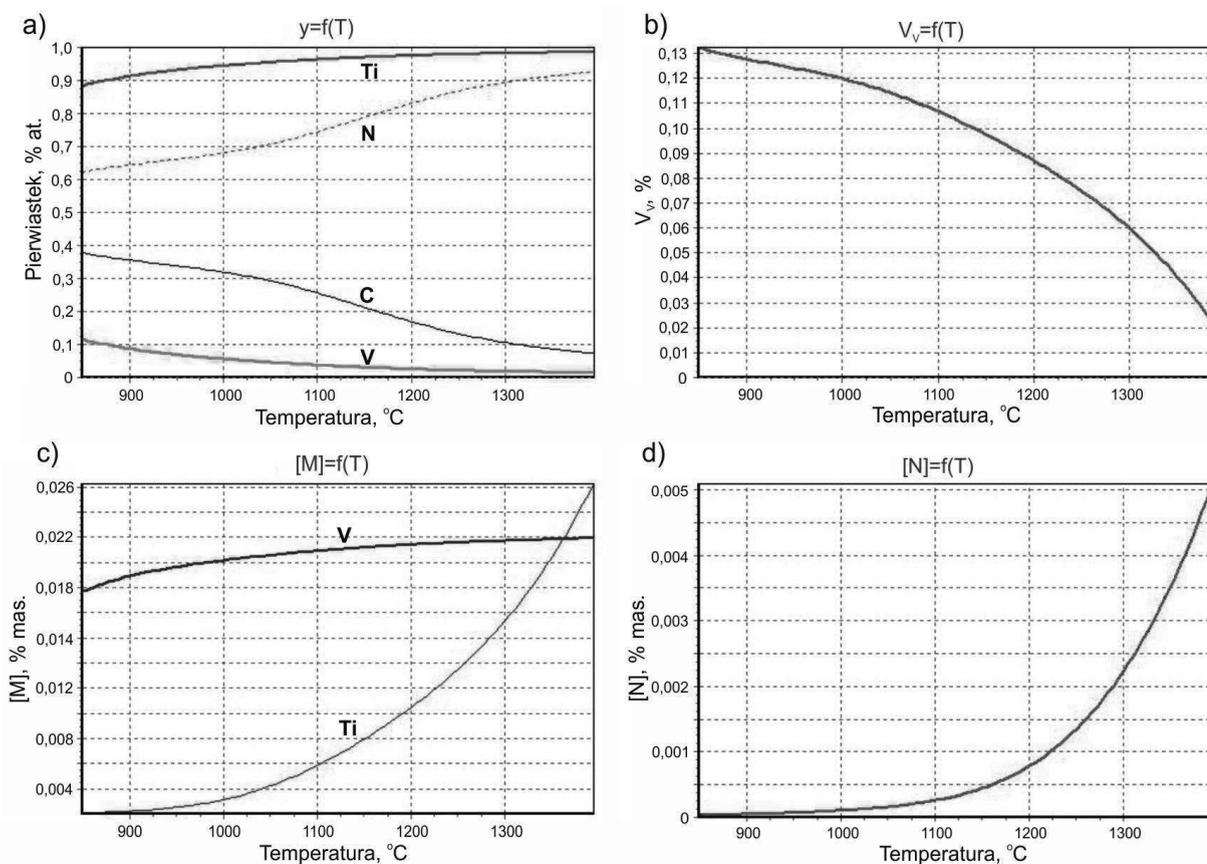




Rysunek 4. Zakres temperaturowy wydzielenia węglika typu VC w austenicie badanej stali: a) stężenie wanadu rozpuszczonego w austenicie, b) stężenie węgla rozpuszczonego w austenicie, c) udział <VC> nierozpuszczonego w austenicie

Figure 4. Temperature range of VC precipitation in the austenite for the tested steel: a) vanadium concentration dissolved in the austenite, b) carbon concentration dissolved in the austenite, c) fraction of <VC> not dissolved in the austenite

Wyniki obliczeń składu chemicznego austenitu analizowanej stali, a w szczególności określenie zależności temperaturowej zawartości pierwiastków metalicznych  $[M] = f(T)$  oraz niemetalicznych, jak również składu chemicznego złożonego węglikoazotku typu  $Ti_xV_{1-x}C_yN_{1-y}$  w postaci graficznej  $y = f(T)$  wraz z określonym udziałem objętościowym analizowanej fazy  $V_v = f(T)$  przedstawiono na **rys.5**. Proces wydzielania złożonego węglikoazotku typu  $(Ti,V)(C,N)$  rozpoczyna się w temperaturze  $1394^\circ\text{C}$ . W tej temperaturze z austenitu wydziela się złożony węglikoazotek o składzie chemicznym  $T_{0,985}V_{0,015}C_{0,073}N_{0,927}$ . Wraz z obniżaniem temperatury w zakresie od  $1394^\circ\text{C}$  do  $850^\circ\text{C}$  w analizowanym węglikoazotku stężenie wanadu wzrasta od  $0,015\%$  at. do  $0,117\%$  at. W tym samym zakresie temperaturowym stężenie węgla w węglikoazotku wzrasta od  $0,073\%$  at. do  $0,378\%$  at., natomiast stężenie azotu maleje od  $0,927\%$  at. do  $0,622\%$  at. (**rys.5a**). W temperaturze  $850^\circ\text{C}$  udział objętościowy węglikoazotku o składzie  $T_{0,883}V_{0,117}C_{0,378}N_{0,622}$  wynosi  $0,132\%$ . Z danych zestawionych na **rys.5c** wynika, że w temperaturze  $850^\circ\text{C}$  praktycznie cały Ti jest związany w węglikoazotku, podczas gdy duża część mikrododatku V jest jeszcze rozpuszczona w austenicie. Obliczone składy stechiometryczne analizowanego węglikoazotku  $(Ti,V)(C,N)$  zestawiono w **tablicy 2**.



Rysunek 5. Wyniki obliczeń: a) składu chemicznego węglikoazotku  $Ti_xV_{1-x}C_yN_{1-y}$ , b) udziału objętościowego węglikoazotku, c) tytanu i wanadu rozpuszczonych w austenicie, d) azotu rozpuszczonego w austenicie

Figure 5. Calculation results of: a) chemical compositions of  $Ti_xV_{1-x}C_yN_{1-y}$  carbonitride, b) volume fraction of carbonitride, c) titanium and vanadium dissolved in austenite, d) nitrogen dissolved in austenite

Tablica 2. Wyznaczone składy stechiometryczne węglikoazotków typu (Ti,V)(C,N) w warunkach równowagi termodynamicznej

Table 2. Determined stoichiometric compositions of carbonitride (Ti,V)(C,N) under thermodynamic equilibrium conditions

L. p.	Temperatura, °C	Skład stechiometryczny węglikoazotków
1.	1350	$T_{0,984}V_{0,016}C_{0,086}N_{0,914}$
2.	1300	$T_{0,982}V_{0,018}C_{0,106}N_{0,894}$
3.	1250	$T_{0,979}V_{0,021}C_{0,131}N_{0,869}$
4.	1200	$T_{0,975}V_{0,025}C_{0,169}N_{0,831}$
5.	1150	$T_{0,969}V_{0,031}C_{0,212}N_{0,788}$
6.	1100	$T_{0,963}V_{0,037}C_{0,256}N_{0,744}$
7.	1050	$T_{0,955}V_{0,045}C_{0,293}N_{0,707}$
8.	1000	$T_{0,945}V_{0,055}C_{0,319}N_{0,681}$
9.	950	$T_{0,932}V_{0,068}C_{0,338}N_{0,662}$
10.	900	$T_{0,913}V_{0,087}C_{0,356}N_{0,644}$
11.	850	$T_{0,883}V_{0,117}C_{0,378}N_{0,622}$

#### 4. WNIOSKI

Analiza procesu wydzielania się faz międzywęzłowych typu MX w warunkach równowagi termodynamicznej wykazała, że pierwszą fazą, która wydzieli się w austenicie badanej stali jest azotek typu TiN. Temperatura początku wydzielania się tej fazy wynosi 1380°C. W następnej kolejności będą wydzielaly się węgliki typu TiC, azotki typu VN oraz węgliki typu VC. Temperatura początku wydzielania się tych faz wynosi 1180°C, 980°C i 775°C odpowiednio.

Przeprowadzona analiza wydzielania się w roztworze stałym pojedynczych faz międzywęzłowych typu MX nie oddaje w sposób zadowalający stanu rzeczywistego, gdyż wszystkie opisane fazy wykazują wzajemną rozpuszczalność w stanie stałym i zazwyczaj wydzielają się w postaci złożonych węglikoazotków. Niemniej jednak analiza wydzielania indywidualnych faz typu MX ma istotne znaczenie dla opracowania temperaturowej sekwencji wydzielania się węglikoazotków w badanej stali. Ze względu na wzajemną rozpuszczalność azotków typu TiN, węglików typu TiC oraz węglikoazotków typu V(C,N), w analizowanej stali będzie tworzył się złożony węglikoazotek typu  $Ti_xV_{1-x}C_yN_{1-y}$ . Temperatura początku wydzielania się złożonego węglikoazotku (Ti,V)(C,N) wynosi 1394°C. W tej temperaturze skład stechiometryczny węglikoazotku wynosi  $Ti_{0,985}V_{0,015}C_{0,073}N_{0,927}$ . Wraz z obniżeniem temperatury udziały atomowe Ti i N maleją, a udziały atomowe C i V rosną. Jednocześnie zwiększa się udział objętościowy analizowanego węglikoazotku. W temperaturze 850°C skład stechiometryczny węglikoazotku wynosi  $Ti_{0,883}V_{0,117}C_{0,378}N_{0,622}$ , a jego udział objętościowy wynosi 0,132%. W temperaturze 900°C – stosowanej często jako temperatura końca obróbki plastycznej na gorąco – ponad 80% mikrododatku V jest rozpuszczona w roztworze stałym  $\gamma$ , co oznacza, że wanad będzie słabiej oddziaływał na tworzenie drobnoziarnistej struktury austenitu, lecz silniej na utwardzenie wydzieleniowe stali przez wydzielające się podczas chłodzenia dyspersyjne cząstki VN i V(C,N).

Zastosowany w pracy model Adriana do analizy procesu wydzielania się w austenicie złożonego węglikoazotku typu (Ti,V)(C,N) w warunkach równowagi termodynamicznej, stanowi przydatne narzędzie do optymalizacji warunków obróbki cieplno-plastycznej stali mikrostopowych typu HSLA.

**LITERATURA**

1. Li X., Shi L., Liu Y., Gan K., Liu Ch.: Achieving a desirable combination of mechanical properties in HSLA steel through step quenching. *Materials Science & Engineering A* 772, 2020, 138683, p.1–9.
2. De Oliveira A.P., Gonzalez B.M.: The engineering behind the mechanical properties enhancement on HSLA steels, microalloyed with niobium: Effects of boron and titanium. *Journal of Materials Research and Technology* 9(4), 2020, p.9372–9379.
3. Opiela M., Grajcar A.: Microstructure and anisotropy of plastic properties of thermomechanically-processed HSLA-type steel plates. *Metals* 8(5), 2018, p.1–15.
4. Lu J., Yu H., Yang S.: Mechanical behavior of multi-stage heat-treatment HSLA steel based on examinations of microstructural evolution. *Materials Science & Engineering A* 803, 2021, 140493, p.1–13.
5. Saha D.C., Westerbaan D., Nayak S., Biro E., Gerlich A.P., Zhou Y: Microstructure-properties correlation in fiber laser welding of dual-phase and HSLA steels. *Materials Science & Engineering A* 607, 2014, p.445–453.
6. Chen S., Li L., Peng Z., Huo X., Gao J.: Strain-induced precipitation in Ti microalloyed steel by two-stage controlled rolling process. *Journal of Materials Research and Technology* 9(6), 2020, p.15759–15770.
7. Jun H.J., Kang J.S., Seo D.H., Kang K.B., Park C.G.: Effect of deformation and boron on microstructure and continuous cooling transformation in low carbon HSLA steels. *Materials Science & Engineering A* 422, 2006, p.157–162.
8. Gladman T.: *Physical Metallurgy of Microalloyed Steels*. The Institute of Materials, London 1997.
9. Opiela M.: Effect of thermomechanical processing of the microstructure and mechanical properties of Nb-Ti-V microalloyed steel. *Journal of Materials Engineering and Performance* 23(9), 2014, p. 3379–3388.
10. Adamczyk J.: Development of the microalloyed constructional steels. *Journal of Achievements Materials and Manufacturing Engineering* 14, 2006, p. 9–20.
11. Zardoveev A., Poznyakov V., Baudin T.: Effect of heat treatment on the mechanical properties and microstructure of HSLA steels processed by various technologies. *Materials Today Communications* 28, 2021, 102598, p.1–12.
12. Adamczyk J.: *Inżynieria wyrobów stalowych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
13. Adrian H.: *Model termodynamiczny wydzielania węglikoazotków w stalach niskostopowych o podwyższonej wytrzymałości z zastosowaniem do badań hartowności*. Wydawnictwa AGH, Kraków 1995.
14. Adrian H.: *Numeryczne modelowanie procesów obróbki cieplnej*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2011.
15. Liu W.J., Jonas J.J.: Calculation of the  $Ti(C_yN_{1-y})-Ti_4C_2S_2-MnS$  austenite equilibrium in Ti-bearing steels. *Metallurgical Transactions* 20, 1989, p.1361–1374.
16. Adrian H., Augustyn-Pieniążek J., Marynowski P., Matusiewicz P.: Model kinetyki wydzielania węglikoazotków w stalach mikrostopowych. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 4, 2014, s. 208–214.
17. Liu W.J., Jonas J.J.: Nucleation kinetics of Ti carbonitride in microalloyed austenite. *Metallurgical Transactions* 20, 1989, p.689–696.

18. Dutta B., Sellars C.M.: Effect of composition and process variables on Nb(C,N) precipitation in niobium microalloyed austenite. *Materials Science and Technology* 3, 1987, p.197–206.
19. Hillert M., Staffansson L.I.: The regular solution model for stoichiometric phases and ionic melts. *Acta Chemica Scandinavica* 24, 1970, p.3618–3626.
20. Adrian H.: Analiza termodynamiczna wydzielenia węglikoazotków w stalach niskostopowych. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 4, 1997, s. 179–183.
21. Adrian H.: Thermodynamic model for precipitation of carbonitrides in high strength low alloy steels containing up to three microalloying elements with or without addition of aluminium. *Material Science and Technology* 8, 1992, p.406–415.
22. Opiela M.: Thermodynamic analysis of precipitation process of MX-type phases in high strength low alloy steels. *Advances of Science and Technology Research Journal* 15(2), 2021, p.90–100.
23. Gladman T., Pickering F.B.: Grain coarsening of austenite. *ISIJ International* 205, 1967, p.653–664.
24. Matsuda S., Okumura N.: Effect of distribution of TiN precipitate particles on the austenite grain size of low carbon low alloy steels. *Transactions ISIJ* 18, 1978, p.198–205.
25. Hudd R.C., Jones A., Kale M.N.: A method for calculation the solubility and composition of carbonitride precipitates in steel with particular reference to niobium carbonitride. *Journal of Iron and Steel Institute* 209, 1971, p.121–125.
26. Palmiere E.J.: Precipitation phenomena in microalloyed steels. *Proceedings of the International Conference Microalloyed'95*. Iron and Steel Soc., Pittsburg, USA, 1995, p.307–320.
27. Adamczyk J., Kalinowska-Ozgowicz E., Ozgowicz W., Wusatowski R.: Interaction of carbonitrides V(C,N) undissolved in austenite on the structure and mechanical properties of microalloyed V-N steels. *Journal of Materials Processing Technology* 54, 1995, p.23–32.
28. Balart M.J., Davis C.L., Strangwood M.: Fracture behaviour in medium-carbon Ti-V-N and V-N microalloyed ferritic-pearlitic and bainitic forging steels with enhanced machinability. *Materials Science & Engineering A* 328, 2002, p.48–57.

## Wpływ utwardzacza na wybrane własności wytrzymałościowe żywic poliestrowych

G. Zieliński<sup>a</sup>, A. Włodarczyk-Fligier<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Student kierunku Inżynieria Materiałowa na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej  
email: zielinski@rzegorz1994@gmail.com

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

**Streszczenie:** W artykule zostały omówione żywice chemoutwardzalne, ich charakterystyka, własności i zastosowanie. Zbadano wpływ utwardzacza na wybrane własności wytrzymałościowe (twardość, statyczna próba rozciągania, statyczna próba zginania, uderność) żywic poliestrowych.

**Abstract:** The article discusses chemosetting resins, their characteristics, properties and application. The influence of the hardener on selected strength properties (hardness, static tensile test, static bend test, impact strength) of polyester resins was investigated.

**Słowa kluczowe:** żywice chemoutwardzalne, żywice poliestrowe, własności wytrzymałościowe

### 1. WSTĘP

Żywice poliestrowe przygotowuje się tak, aby posiadały odpowiednią ilość cząsteczek utwardzacza i cząsteczek żywicy. Proces sieciowania zaczyna się po dodaniu katalizatora, jego ilość ma wpływ na czas utwardzania żywic poliestrowych. Bardzo często do żywic winylestrowych oraz poliestrowych jako utwardzacza stosuje się ketonox oraz butanox jako inicjatory, ponieważ posiadają w sobie metyloetyloketon, a jako przyspieszacza często używa się nafteniana kobaltu.

Skład chemiczny poliestru oraz ilość monomeru sieciującego wpływa na stopień usieciowania żywicy, a stopień usieciowania żywicy oddziałuje na własności gotowego materiału. Kruchość materiału rośnie wraz ze wzrostem stopnia usieciowania. Przez poprawną modyfikację poliestrów nienasyconych można zmieniać własności produktów usieciowanych.

Znaczna większość przemysłowo produkowanych nienasyconych żywic poliestrowych posiada, styren jako monomer sieciujący.

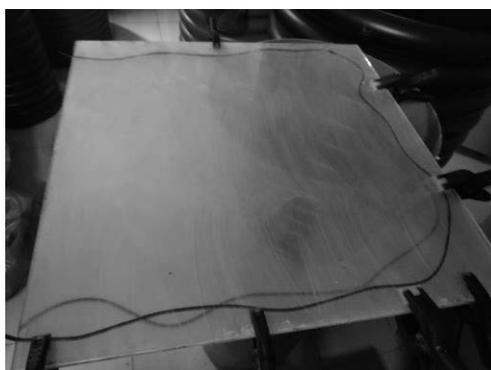
W zależności od występujących w cząsteczce liczbie wiązań podwójnych (stopnia nasycenia) można wyróżnić żywice: nisko, średnio i wysokoreaktywne, a ich zastosowanie to:

żelkotowe, chemoodporne, konstrukcyjne, elastyczne, fotopolimerowe oraz specjalnego zastosowania. Nienasycone żywice poliestrowe są używane zazwyczaj w formie kompozytów lub kompozycji przy dodatku środków pomocniczych [1-6].

### 1.1. Materiał do badań

Materiałem do badań były próbki wykonane z żywicy poliestrowej Polimal 1094 AWTP. Wykonano 3 formy (rys. 1), które zalano następującymi mieszankami (rys. 2):

- 1kg żywicy poliestrowej, 10 g utwardzacza (butanox), 1 g akceleratora [Dichlorek (2-etyloheksanian) kobaltu] – zalecana ilość utwardzacza,
- 1kg żywicy poliestrowej, 5 g utwardzacza (butanox), 1 g akceleratora [Dichlorek (2-etyloheksanian) kobaltu] – zmniejszona ilość utwardzacza,
- 1kg żywicy poliestrowej, 20 g utwardzacza (butanox), 1 g akceleratora [Dichlorek (2-etyloheksanian) kobaltu] – zwiększona ilość utwardzacza.

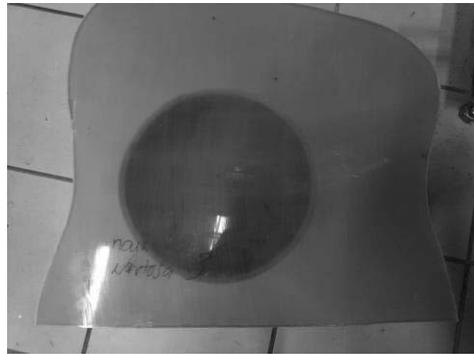


Rysunek 1. Forma na żywice  
*Figure 1. Mold for resins*



Rysunek 2. Formę zalaną żywicą  
*Figure 2. Mold flooded with resin*

Po wyschnięciu żywicy ściągnięto formy i wyciągnięto gotowe elementy żywic. Wszystkie formy zostały przedstawione na rysunku 3-5.



Rysunek 3. Żywica przy zwiększonej ilości utwardzacza

*Figure 3. Resin with increased amount of hardener*



Rysunek 4. Żywica przy zalecanej ilości utwardzacza

*Figure 4. Resin with the recommended amount of hardener*



Rysunek 5. Żywica przy zmniejszonej ilości utwardzacza

*Figure 5. Resin with decreased amount of hardener*

Następnie płyty z żywicami zostały umieszczone na ploterze frezującym CNC (rys. 6) w celu otrzymania próbek w kształcie wiosełek (rys. 7) do badań wytrzymałościowych.





Rysunek 6. Ploter frezujący CNC

*Figure 6. CNC milling plotter*



Rysunek 7. Próbkki do badań wytrzymałościowych

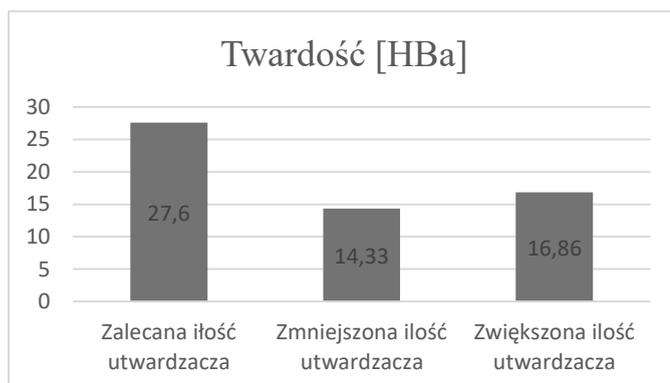
*Figure 7. Samples for strength tests*

## 1.2. Metodologia badań

Badania twardości wykonano na twardościomierzu typu Barcola na przygotowanych płytach, zgodnie z normą PN-EN 59:2016-03 [7]. Badania statycznej próby rozciągania przeprowadzono na maszynie LabTest 6.10, przy prędkości rozciągania  $v=1$  mm/min, w temperaturze otoczenia  $23,5^{\circ}\text{C}$  i niskiej wilgotności (zgodnie z normą PN-EN ISO 527-1:2012 i PN-EN ISO 527-2:2012) [8, 9]. Badania statycznej próby zginania przeprowadzono na maszynie LabTest 6.10, przy prędkości rozciągania  $v=10$  mm/min, w temperaturze otoczenia i niskiej wilgotności, (zgodnie z normą PN-EN ISO 178:2019-06) [10]. Pomiar udarności przeprowadzono na młocie Charpy'ego w temperaturze otoczenia i niskiej wilgotności, (zgodnie z normą PN-EN ISO 179-1:2010) [11].

## 1.3. Omówienie wyników badań

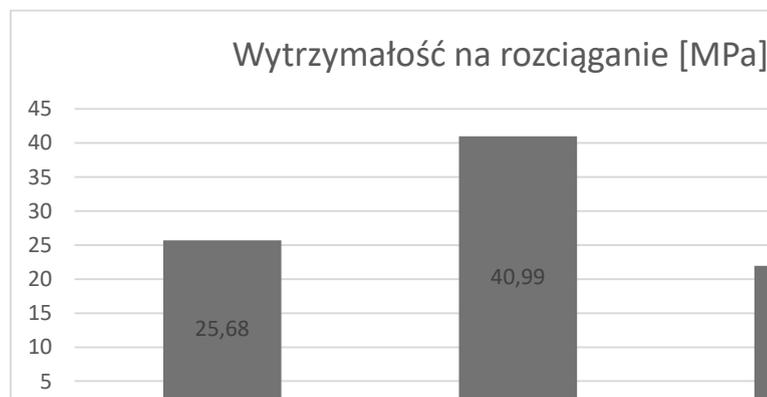
Z analizy otrzymanych wyników badań zaobserwowano, że ilość utwardzacza ma znaczący wpływ na twardość żywicy. Największą twardość – 27,6 HBa - zaobserwowano na płycie z zalecaną ilością utwardzacza. Najmniejsza twardość – 14,33 HBa - odnotowano na płycie ze zmniejszoną ilością utwardzacza. Z kolei twardość 16,86 HBa - zanotowano na płycie z największą ilością utwardzacza. Porównane wyniki zostały przedstawiono na rysunku 8.



Rysunek 8. Średnie wyniki twardości

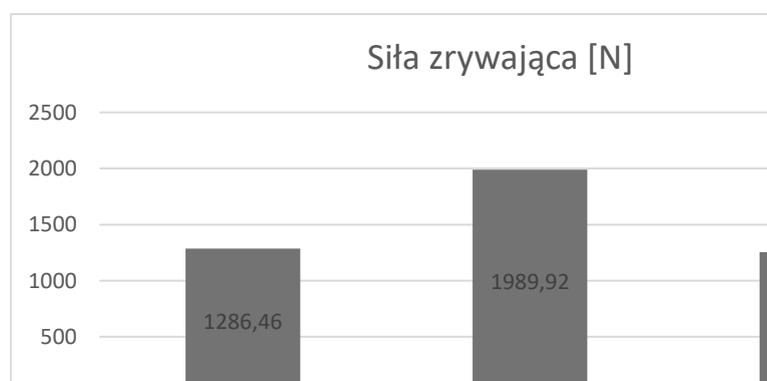
*Figure 8. Average hardness results*

Na podstawie otrzymanych wyników statycznej próby rozciągania zauważono, że zmiana ilości utwardzacza wpłynęła na wytrzymałość na rozciąganie (im mniejsza ilość utwardzacza, tym większa wytrzymałość na rozciąganie oraz siła zrywająca). Przy zmniejszonej wartości utwardzacza średni wynik wytrzymałości na rozciąganie 40,99 MPa, przy średniej sile zrywającej 1989,92 N. Przy zalecanej ilości utwardzacza średnia wytrzymałość na rozciąganie wyniosła 25,68 MPa, przy średniej sile zrywającej 1286,46 N. Najmniejsza wytrzymałość na rozciąganie zanotowano dla próbki o największej ilości utwardzacza – średnia 21,97 MPa, przy średniej sile zrywającej 1255,62 N (rys. 9, 10).



Rysunek 9. Średnie wyniki wytrzymałości na rozciąganie

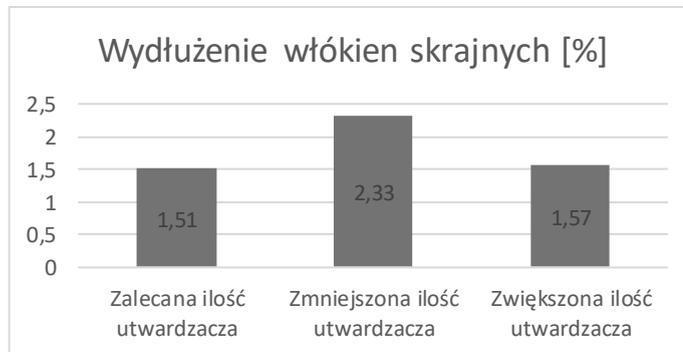
Figure 9. Average tensile strength results



Rysunek 10. Średnie wyniki siły zrywającej

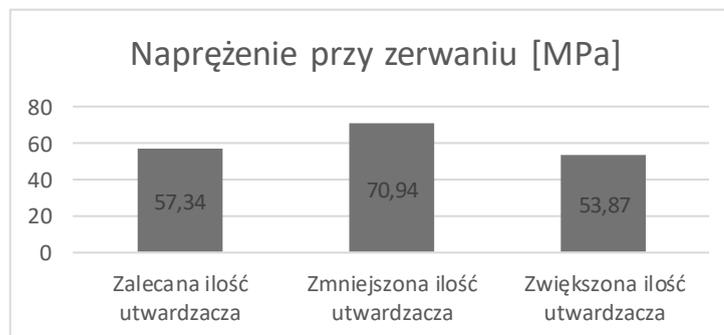
Figure 10. Average breaking load results

Z analizy wyników statycznej próby zginania zaobserwowano, iż najmniejsza średnia wartość wydłużenia włókien skrajnych oraz naprężenia przy zerwaniu zanotowano przy próbkach z zalecaną ilością utwardzacza. Największą średnią wartość wydłużenia włókien skrajnych oraz naprężenia przy zerwaniu odnotowano przy próbce ze zmniejszoną ilością utwardzacza. Natomiast pośrednią wartość wydłużenia włókien skrajnych oraz naprężenia przy zerwaniu odnotowano na próbce ze zwiększoną ilością utwardzacza. Porównane wyniki zostały przedstawione na rysunkach 11 i 12.



Rysunek 11. Średnie wyniki wydłużenia włókien skrajnych

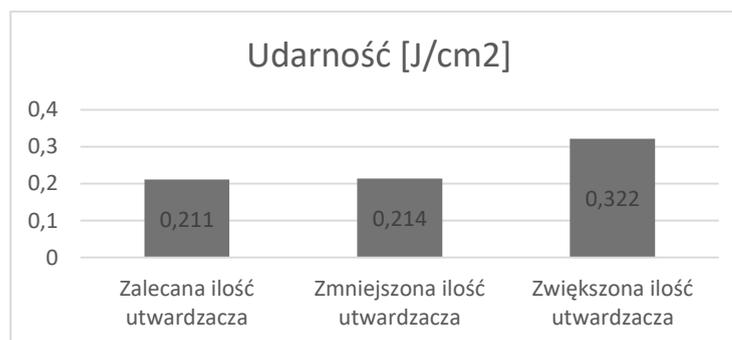
Figure 11. Average of the elongation of the edge fibers results



Rysunek 12. Średnie wyniki naprężenia przy zerwaniu

Figure 12. Average stresses at break up results

Wyniki badania udarności wykazują, że największa udarność wystąpiła wśród próbek ze zwiększoną ilością utwardzacza. Najmniejszą udarność zaobserwowano na próbkach z zalecaną ilością utwardzacza. Średnią wartość 0,214 [J/cm<sup>2</sup>] zanotowano na próbkach ze zmniejszoną ilością utwardzacza. Porównane wyniki zostały przedstawione na rysunku 13.



Rysunek 13. Średnie wyniki udarności

Figure 13. Average impact strength results

## 5. PODSUMOWANIE

Szybki rozwój nowoczesnych technologii oraz coraz to większe zapotrzebowanie wyznaczone przez konstruktorów każą szukać nowych materiałów, które z powodzeniem zastąpią te wykorzystywane od dziesiątek lat. Tworzywa sztuczne, a przy tym żywice poliestrowe znalazły swoje zastosowanie w wielu dziedzinach techniki, od przedmiotów które używamy na co dzień tj. farby, kontenery, rury po płaskie poszycia dachów, czy elementy jachtu, gdzie szczególnie te elementy są zagrożone uszkodzeniami podczas użytku, to właśnie one mają wpływ na zdrowie, a nierzadko kiedy na życie człowieka.

Z otrzymanych wyników badań można wywnioskować że zastosowanie zalecanej ilości utwardzacza pozwala otrzymać różny jego wpływ na własności wytrzymałościowe żywicy. Im mniejsza ilość utwardzacza, tym większa wytrzymałość na rozciąganie oraz siła zrywająca.

Po badaniu statycznej próby zginania, najmniejszą średnią wartość wydłużenia włókien skrajnych oraz naprężenie odnotowano przy próbce z zalecaną ilością utwardzacza. Największe wartości zanotowano na próbkach ze zmniejszoną ilością utwardzacza. Największą udarność zaobserwowano wśród próbek z największą ilością utwardzacza, natomiast najmniejsza udarność wystąpiła u próbek z zalecaną ilością utwardzacza.

## LITERATURA

1. L.A. Dobrzański, Niemetale materiały inżynierskie, wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2008.
2. L.A. Dobrzański, Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2002
3. W. Kucharczyk, A. Mazurkiewicz, W. Żurowski, Nowoczesne materiały konstrukcyjne; wybrane zagadnienia, wyd. Politechnika Radomska, Radom, 2008.
4. A. Ciszewski, T. Radomski, A. Szummer, Materiałoznawstwo, wyd. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1996.
5. Kłosowska-Wołkiewicz, P. Penczek, W. Królikowski, P. Czub, J. Pielichowski, R. Ostrysz, Nienasycone żywice poliestrowe, wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1969, 2010.
6. P. Czub, Z. Bończa-Tomaszewski, P. Penczek, J. Pielichowski, Chemia i technologia żywic epoksydowych, wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1960, 2002.
7. PN-EN 59:2016-03, Tworzywa sztuczne ze wzmocnieniem szklanym - Oznaczanie twardości twardościomierzem Barcola.
8. PN-EN ISO 527-1:2012, Tworzywa sztuczne - Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu -- Część 1: Zasady ogólne.
9. PN-EN ISO 527-2:2012, Tworzywa sztuczne - Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu - Część 2: Warunki badań tworzyw sztucznych przeznaczonych do różnych technik formowania.
10. PN-EN ISO 178:2019-06, Tworzywa sztuczne - Oznaczanie właściwości przy zginaniu
11. PN-EN ISO 179-1:2010, Tworzywa sztuczne - Oznaczanie udarności metodą Charpy'ego - Część 1: Nieinstrumentalne badanie udarności.

## Wpływ parametrów degradacji i spiekania na strukturę i własności wytrzymałościowe komponentów ze stali nierdzewnych 17-4PH i 316L wytwarzanych technologią FDM

M. Ziółkowska<sup>a</sup>, G. Matula<sup>b</sup>,

<sup>a</sup> Studentka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych,  
email: michzio222@student.polsl.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych,  
email: grzegorz.matula@polsl.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono strukturę i własności stali wytwarzanych metodą FDM (ang. Fused Deposition Modelling) zmieniając warunki druku, degradacji cieplnej i spiekania. Dokonano badań twardości, wytrzymałości na rozciąganie i trójpunktowe zginanie oraz obserwacji mikroskopowych próbek w stanie drukowanym i po spiekaniu. Metody przyrostowe wytwarzania materiałów metalowych oparte są głównie o technologię SLM jednak dzięki wprowadzonym na rynek wysoko wypełnionych filamentów cząstkami metalowymi istnieje możliwość zastosowania również drukarek do druku metodą FDM a dalej degradacji lepiszcza polimerowego oraz spiekania pozostałych cząstek metalowych. Metoda ta wywodzi się z technologii MIM (ang. Metal Injection Moulding) tj. formowania wtryskowego proszku. W przypadku metody przyrostowej gęstwa jest przygotowana w postaci filamentu a nie granulatu. Dalszy proces usuwania lepiszcza i spiekania jest identyczny w obydwu metodach.

**Abstract:** The article presents the structure and properties of steels produced by FDM (Fused Deposition Modeling) by changing the conditions of printing, thermal degradation and sintering. Tests of hardness, tensile strength and three-point bending were carried out, as well as microscopic observations of samples in the printed state and after sintering. Additive manufacturing methods of metal materials are based mainly on SLM technology, however, thanks to the highly filled filaments with metal particles introduced to the market, it is also possible to use printers for FDM printing and further degradation of the polymer binder and sintering of the remaining metal particles. This method is derived from MIM technology (Metal Injection Molding), i.e. powder injection molding. In the case of the incremental method, it is prepared in the form of a filament, not a granulate. The further debinding and sintering process is identical for both methods.

**Słowa kluczowe:** stale nierdzewne, 17-4PH, 316L, druk 3D, FDM, własności wytrzymałościowe, degradacja, spiekanie

## 1. WSTĘP

Do licznych odkryć naukowych XXI wieku przyczynia się postęp technologiczny spowodowany rozpoczęciem nowej ery przemysłowej, zwanej Przemysłem 4.0 [1-3]. Do filarów Przemysłu 4.0 należą stałe ulepszanie, ciągłość pracy, minimalizacja czasu przebrojeń, obniżenie kosztów, zminimalizowanie zużycia energii oraz zminimalizowanie ilości odpadów, przy czym własności komponentów nie mogą być gorsze od komponentów produkowanych w technologiach konwencjonalnych [4-6]. Druk 3D wpisuje się w tę koncepcję, ponieważ w metodzie tej często spotkać się można z prawie zerową stratą materiału – jedynym odpadem są podpory generowane w przypadku modeli o ścianach nachylonych pod kątem większym niż kąt  $45^\circ$ . Co więcej, elementy drukowane nie są elementami litymi, lecz o ilości ich wypełnienia decyduje użytkownik [7,8]. Technologia ta jednak stale nie spełnia jednego z filarów – filaru dotyczącego kosztu powstałego komponentu. Im bardziej zaawansowana metoda wytwarzania oraz im droższy materiał wykorzystywany do druku, tym wyższa jego cena końcowa. Druk 3D podlega stałym ulepszeniom, co jest zgodne z ideą nowej ery przemysłowej [9]. Stąd zastąpienie drogich i specjalistycznych urządzeń do technologii SLM która daje możliwość wytwarzania materiałów metalowych drukarkami stosowanymi w metodzie FDM oraz materiałami wsadowymi w postaci filamentów wypełnionych cząstkami metalowymi pozwala na druk materiałów metalowych. Oczywiście bezpośrednio po wydruku otrzymujemy kompozyt o osnowie polimerowej wypełniony cząstkami proszku metalowego, który w dalszej części należy poddać degradacji polimerowej osnowy i spiekaniu w wysokiej temperaturze zależnej od cząstek metalowych. Najbardziej popularnym wypełnieniem metalowym są cząstki stali odporne na korozję. Podobnie technologia formowania wtryskowego proszku w pierwszych latach swojego rozwoju skupiała się na popularnych stalach odpornych na korozję, a dopiero później zaczęto produkować bardziej zaawansowane stale oraz ceramikę. Niewątpliwie wspólną cechą obydwu technologii tj. FDM i MIM jest konieczność usuwania polimerowego lepiszcza, co jest najczęściej realizowane przez degradację rozpuszczalnikową, cieplną lub katalityczną. W technologii FDM oprócz odpowiedniego filamentu ważny jest również sposób drukowania. Era cyfryzacji przyczyniła się do rozpowszechnienia oraz rozwoju technologii druku 3D, dzięki czemu możliwe jest stałe ulepszanie druku oraz programów służących do zaprojektowania modelu, który następnie będzie drukowany. Programy typu CAD (ang. Computer Aided Design) obsługują coraz więcej rozszerzeń plików. Podczas projektowania interfejs programu zmienia się, aby jak najlepiej dostosowany został do użytkownika. Coraz częściej wraz z programem występuje również moduł do symulacji materiałowych na podstawie powstałej geometrii bez konieczności instalacji kolejnej aplikacji. W druku 3D natomiast koniecznością jest posiadanie programu typu Slicer, który z biegiem lat rozbudowany został o kolejne, bardziej szczegółowe i precyzyjniejsze moduły pozwalające na zaawansowane ustawianie parametrów druku. Modyfikacji podlega także sposób dostarczenia pliku z modelem do urządzenia. Najpopularniejszy z nich wciąż wykorzystuje kartę SD, jednak coraz częściej stosuje się urządzenia wykorzystujące połączenie internetowe do przesyłu danych [8-11].

Do badań przedstawionych w tym artykule wykorzystano komercyjne filamenty firmy BASF zawierające cząstki stali nierdzewnej martenzytycznej 17-4PH oraz stali austenitycznej 316L. Firma BASF zaleca stosowanie degradacji katalitycznej, którą od lat wykorzystuje również w procesie MIM. Brak odpowiednich urządzeń do degradacji katalitycznej oraz konieczność stosowania niebezpiecznych odczynników chemicznych spowodował, że zastosowano degradację cieplną lepiszcza. W tym celu dobrano eksperymentalnie cykl

degradacji, a następnie wykonano spiekanie w temperaturze 1360, 1380 oraz 1400°C. Spieki poddano badaniom wytrzymałości na rozciąganie, zginanie oraz twardości. Ponadto strukturę badano na mikroskopie świetlnym, stereoskopowym oraz w skaningowym.

## 2. MATERIAŁ DO BADAŃ

W celu wykonania badań wykorzystano filamenty firmy BASF wypełnione cząstkami stali nierdzewnej martenzytycznej 17-4PH oraz austenitycznej 316L przeznaczone do wydruku techniką FDM a następnie degradacji i spiekania. W Tablicy 1 przedstawiono skład chemiczny obydwu gatunków stali.

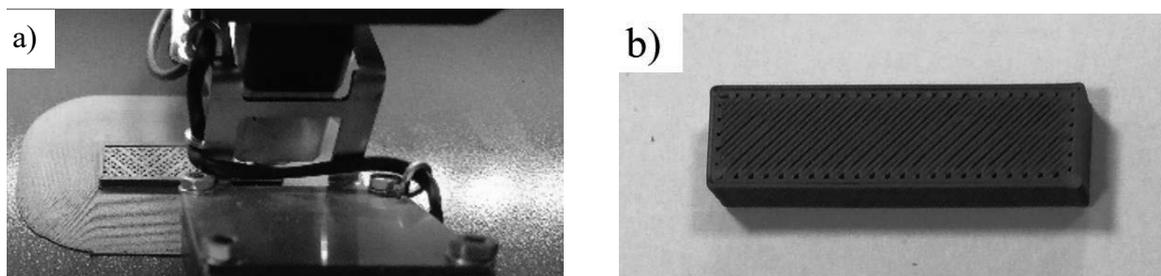
Tablica 1. Skład chemiczny stali 17-4PH i 316L [12, 13]

Table 1. Chemical composition of 17-4PH steel and 316L [12, 13]

		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb
17-4PH	min.	-	-	-	-	-	15,00	0,00	3,00	3,00	5xC
	max.	0,07	0,7	1,00	0,04	0,03	17,50	0,6	5,00	5,00	0,45
316L	min.	-	-	-	-	-	16,00	2,00	10,00	-	-
	max.	0,03	1,00	2,00	0,045	0,030	18,00	3,00	14,00	-	-

Obydwa filamenty po wydruku poddano degradacji cieplnej i spiekaniu przy tych samych parametrach. Pierwsza próba dotyczyła wydruku prostego kształtu o wymiarach 20x10x10 mm. Prostopadłościan, który zaprojektowano w programie Inventor drukowano w temperaturze 245°C. Temperatura stołu wynosiła 110°C. Zgodnie z zaleceniami producenta temperatura głowicy mieściła się w zakresie 230÷250°C, natomiast temperatura stołu pomiędzy 90 i 120°C. Ponadto producent zaleca, aby średnica dyszy wynosiła co najmniej 0,4 mm, stąd wybrano dyszę o średnicy 0,5 mm.

Drukowanie odbywało się na drukarce 3D Gence One. Generalnie do tego typu filamentów powinno się stosować drukarki z komorą zamkniętą, celem zmniejszenia cyrkulacji powietrza i wyższej adhezji wydruku do podłoża. W wyniku braku komory i w celu zapewnienia odpowiedniej adhezji zastosowano obwódkę wokół komponentu oraz klej Dimafix. Wypełnienie wydruków wynosiło 100%. Wybrano sposób kreskowania typu „Zig Zag” (Rys. 1a).



Rysunek 1. a) Drukowanie sposobem „Zig Zag”; b) Widok próbki testowej ze stali 17-4PH do procesu degradacji i spiekania

Figure 1. a) “Zig Zag” type printing; b) Testing sample of 17-4PH steel after degradation and sintering processes



Próbka po wydrukowaniu zachowuje swoje wymiary oraz nie ulega rozwarstwieniu, co oznacza, że parametry wydruku zostały dobrane odpowiednio, a podjęte kroki do zachowania adhezji wydruku do stołu spełniły oczekiwania (Rys. 1b).

W celu przeanalizowania zachowania próbki w zróżnicowanych warunkach degradacji i spiekania, materiał poddano testom. Najefektowniejsze wyniki, przy których udało się otrzymać próbkę w całości spieczoną, zwartą oraz bez znacznych odkształceń zaobserwowano podczas testu nr 1 oraz testu nr 2. Cykle degradacji odbywały się w atmosferze azotu, a spiekania w mieszaninie gazów Ar i 5% H<sub>2</sub>. Cykl nr 1 trwał 70,5h i polegał na przystankach izotermicznych co 10°C od temperatury 160 do 220°C, a następnie co 50°C aż do temperatury 500°C. Z kolei cykl nr 2 polegał na przystankach izotermicznych co 20°C aż do osiągnięcia 400°C, a następnie co 50°C do 500°C. Spiekanie w obu przypadkach odbywało się w 1360°C. Widoki próbki poddanej procesom degradacji i spiekania przedstawiono na Rys. 2.



Rysunek 2. Próbka po degradacji i spiekaniu w cyklu nr 1

*Figure 2. Sample after degradation and sintering cycle no. 1*

W wyniku degradacji i spiekania w cyklu nr 1 otrzymano próbkę o stabilnym kształcie, bez rozwarstwień, deformacji i zwartą. Wynik ten został uzyskany poprzez wydłużenie czasu wygrzewania do 4 godzin. Zmniejszono także przystanki izotermiczne z co 50°C do co 10°C. Jednak taka optymalizacja procesu degradacji oraz spiekania jest nieekonomiczna i wymaga modyfikacji.

Cyklowi degradacji i spiekania nr 2 poddano dwa wydruki ze stali 17-4PH o wypełnieniu 80% i 100%. Próbki nie zostały obsypane korundem, w wyniku czego na ich powierzchni zauważa się pofałdowania w wyniku gazowania. Jednak kształt próbek został zachowany.

Spieczona próbka o wypełnieniu 80% mierzy 64,49 mm długości, 8,61 mm szerokości w części chwytowej, 4,33 mm szerokości w części pomiarowej oraz 2,58 mm grubości. Masa próbki wynosi 5,2092 g. Z kolei próbka o wypełnieniu 100% poddana procesowi spiekania liczy 64,17 mm długości, 8,49 mm szerokości w części chwytowej, 4,18 mm szerokości w części pomiarowej oraz 2,34 mm grubości. Masa próbki wynosi 5,2132 g.

Jako że zachowanie stali 17-4PH było najlepsze podczas testu według cyklu nr 1 w obsypce korundowej, próbki do rozciągania ze stali 316L oraz 17-4PH o wypełnieniu 100% poddano degradacji i spiekaniu w podobnych warunkach.

### **3. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ**

#### **3.1. Badanie wytrzymałości na rozciąganie**

Próby wytrzymałości na rozciąganie dokonano na maszynie wytrzymałościowej Z0202 firmy Zwick/Roell z założonym modułem do rozciągania. Próbki do próby rozciągania zmierzono przy pomocy suwmiarki elektronicznej. Wyniki badania przedstawiono zbiorczo w Tablicy 2.

Tablica 2. Zbiorcze wyniki wytrzymałości na rozciąganie  
 Table 2. Tensile strength results

Próbki po degradacji i spiekaniu	
Rodzaj próbki	R <sub>m</sub> [MPa]
17-4PH_spiek_80%_poz_1	332,90
17-4PH_spiek_100%_poz_1	384,11
17_4PH_spiek_poz_1	576,99
17-4PH_spiek_poz_2	412,57
316L_spiek_poz_1	156,46
316L_spiek_poz_2	313,51
316L_spiek_poz_3	284,43

Powyższe badania potwierdziły, że stal 17-4PH odznacza się wyższymi własnościami wytrzymałościowymi w porównaniu do stali 316L. Badanie wytrzymałości na rozciąganie jest również dowodem na to, że większe wypełnienie materiału zwiększa wytrzymałość podczas próby statycznego rozciągania. Ponadto próbka całkowicie wypełniona charakteryzuje się większym skurczem, a puste przestrzenie w wydrukach o niższym wypełnieniu nie ulegają zagęszczeniu podczas spiekania. Wyniki pomiarów badań wytrzymałości na rozciąganie zostały uśrednione. Najwyższą wytrzymałością na rozciąganie charakteryzuje się stal 17-4PH, która wynosi 494 MPa po degradacji i spiekaniu według cyklu nr 1. Wzrost wypełnienia oczywiście ma wpływ na wytrzymałość nie tylko wydruków ale również spieków (Tablica 2). Stal 316L charakteryzuje się niską wytrzymałością na rozciąganie, ponieważ jest to stal austenityczna. Należy przypuszczać, że obróbka cieplna stali 17-4PH spowoduje jeszcze większy wzrost jej własności mechanicznych.

### 3.2. Badanie wytrzymałości na zginanie

Próbie zginania trójpunktowego przeprowadzono również dla obydwu stali, przy czym po pierwszych obserwacjach struktury zauważono, że spieki charakteryzują się jeszcze relatywnie dużą porowatością, stąd zastosowano również wyższą temperaturę spiekania wynoszącą 1400°C, przy niezmiennym cyklu degradacji cieplnej i obsypce korundowej. Badano jedynie wydruki o orientacji poziomej. Odległość między podporami dla próbek wynosiła 25 mm. Zmierzono szerokość oraz grubość próbek. Wyniki próby przedstawiono w Tablicy 3.

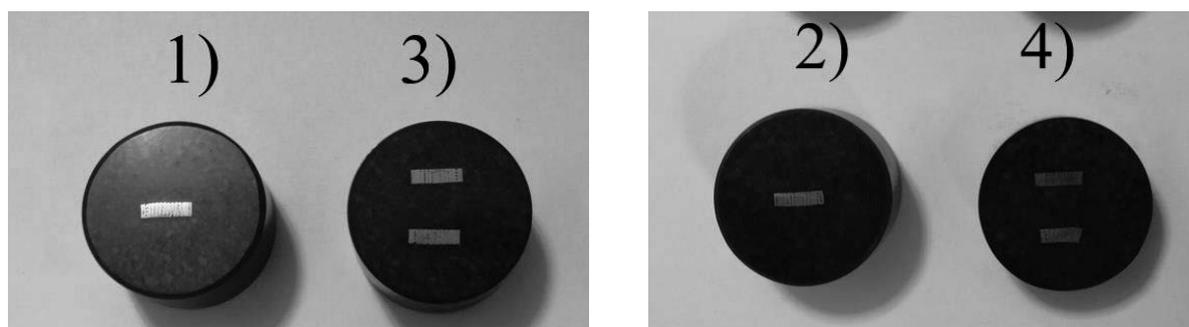
Tablica 3. Zbiorcze wyniki wytrzymałości na zginanie  
 Table 3. Bending strength results

Próbki po degradacji i spiekaniu	
Rodzaj próbki	Naprężenie maksymalne $\sigma$ [MPa]
17-4PH 1360°C	651
17-4PH 1400°C	1440
316L 1360°C	435
316L 1400°C	651

Wzrost temperatury spiekania stali 17-4PH do 1400°C powoduje ponad dwukrotny wzrost wytrzymałości na zginanie. W przypadku stali 316L efekt ten jest mniej widoczny. Należy przypuszczać, że spiekanie w piecu próżniowym pozwoli na jeszcze większe zagęszczenie próbek i dalszy wzrost wytrzymałości mechanicznej.

### 3.3. Badanie twardości

Badanie twardości przeprowadzono metodą Vickersa na twardościomierzu FUTURE-TECH FM-ARS 9000. Badanie odbywało się przy powiększeniu 50x, obciążeniu 300 g, które trwało 15 s. Pomiar przeprowadzono dla próbek ze stali 17-4PH poddanej degradacji i spiekaniu w cyklu nr 2 o wypełnieniu 80% i 100% oraz dla stali 17-4PH i 316L po degradacji i spiekaniu w cyklu nr 1. Próbki do badań przedstawiono na Rys. 3. Wyniki pomiaru przedstawiono w Tablicy 4.



Rysunek 3. Przygotowane zgłady: 1) ze stali 17-4PH o 80% wypełnienia po teście nr 2; 2) ze stali 17-4PH o wypełnieniu 100% po teście nr 2; 3) ze stali 17-4PH po teście nr 1; 4) ze stali 316L po teście nr 1

Figure 3. Prepared metallographic specimens: 1) of 17-4PH steel with 80% filling after test no. 2; 2) of 17-4PH steel with 100% filling after test no. 2; 3) of steel 17-4PH after test no. 1; 4) of 316L steel after test no. 1

Tablica 4. Wyniki zbiorcze pomiaru twardości metodą Vickersa

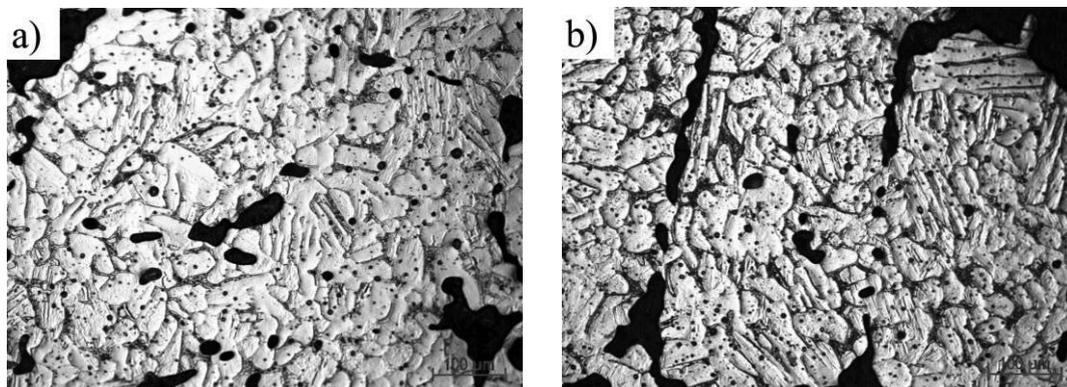
Table 4. Results of hardness measurement using the Vickers method

Twardość [HV]			
17-4PH_spiek_80_poz	17-4PH_spiek_100_poz	17-4PH_spiek_poz	316L_spiek_poz
328,75	316,02	300,46	206,70
297,92	317,49	312,10	205,28
310,76	321,53	302,94	163,25
320,26	310,75	310,71	210,37
321,64	306,82	312,07	189,24
ŚREDNIA			
315,87	314,52	307,66	194,97

Niezależnie od warunków wytwarzania stal 17-4PH posiada wyższą twardość od stali 316L z uwagi na strukturę austenityczną stali 316L. Podczas badania twardości wybierano obszary lite pozbawione porów i nieciągłości, stąd nie ma znacznych różnic w twardości stali 17-4PH w zależności od warunków wytwarzania.

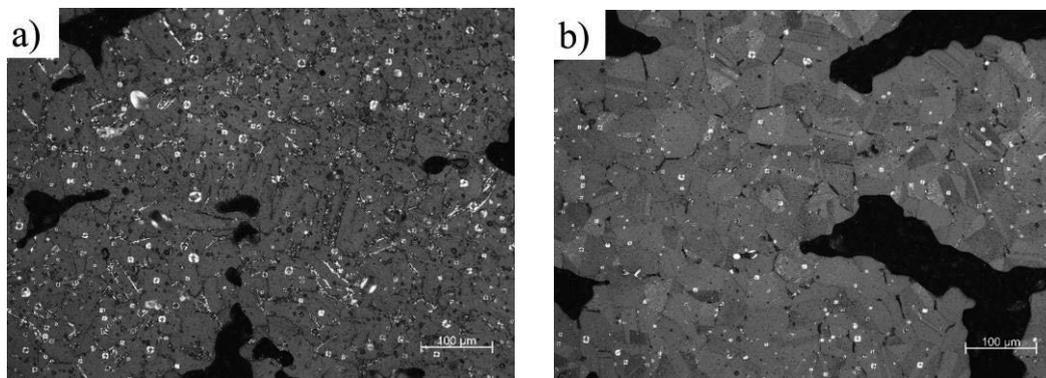
### 3.4. Badanie na mikroskopie świetlnym

Do obserwacji wykorzystano mikroskop świetlny Axio Observer firmy Zeiss. Do badania wykorzystano próbki, na których mierzono twardość. Próbki te obserwowano w świetle spolaryzowanym przy powiększeniu 200x. Zbadano również próbki o różnym wypełnieniu po poddaniu ich cyklowi degradacji i spiekania nr 2. Obserwacji dokonano w kontraście interferencyjno-różniczkowym przy powiększeniu 200x. Struktury otrzymane w wyniku badania zostały przedstawione na Rys. 4 i Rys. 5.



Rys. 4. Mikrostruktura próbki ze stali 17-4PH poddanej procesom degradacji i spiekania w cyklu nr 2: a) o wypełnieniu 80%; b) o wypełnieniu 100%

*Figure 4. Microstructure of 17-4PH steel sample after degradation and sintering processes no. 2: a) with 80% filling; b) with 100% filling*



Rys. 5. Mikrostruktura próbki poddanej procesom degradacji i spiekania w cyklu nr 1: a) ze stali 17-4PH; b) ze stali 316L

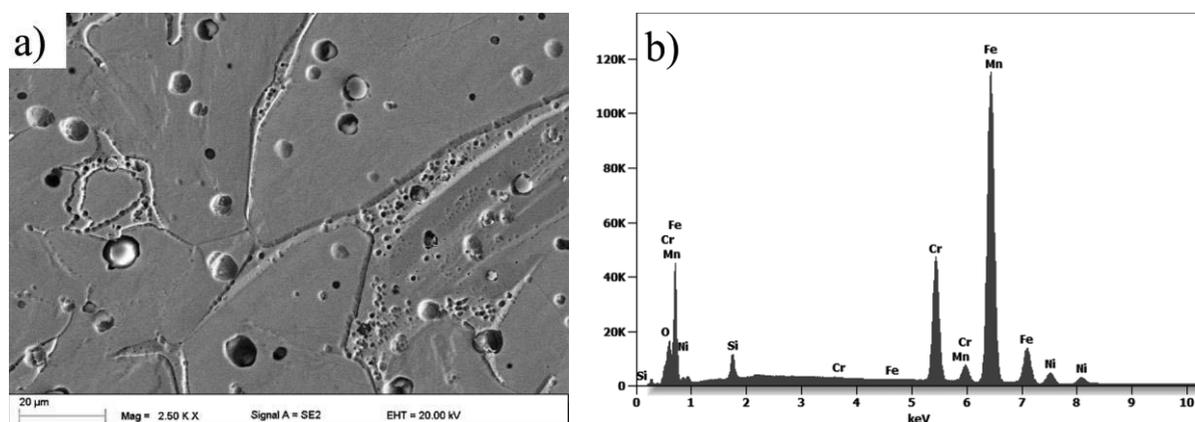
*Figure 5. Microstructure of sample after degradation and sintering processes no. 1: a) of 17-4PH steel; b) of 316L steel*

Niezależnie od warunków wytwarzania materiały spiekane w temperaturze 1360°C charakteryzują się licznymi porami, które niewątpliwie obniżają własności mechaniczne. We wszystkich obserwowanych materiałach zauważono drobne sferyczne wydzielania, które nie powinny występować szczególnie w stalach austenitycznych. W stalach udział tych wydzieleni jest wyższy, zwłaszcza na granicach ziaren. Ziarna tworzące mikrostrukturę są często wydłużone, zróżnicowane pod względem rozmiaru oraz nieregularnie zorientowane. Badania

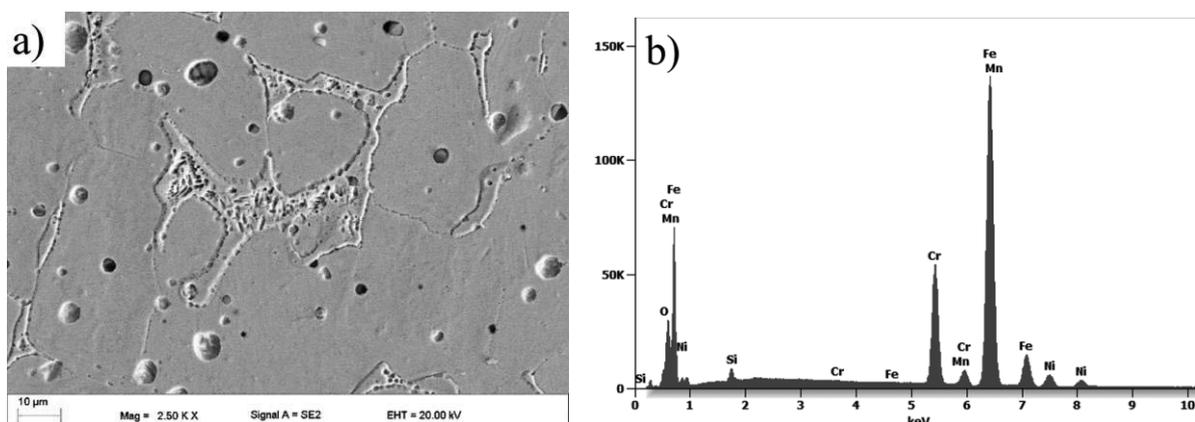
mikroskopowe poszerzono o skaningową mikroskopię elektronową w celu zidentyfikowania cząstek sferycznych.

### 3.5. Badania w skaningowym mikroskopie elektronowym

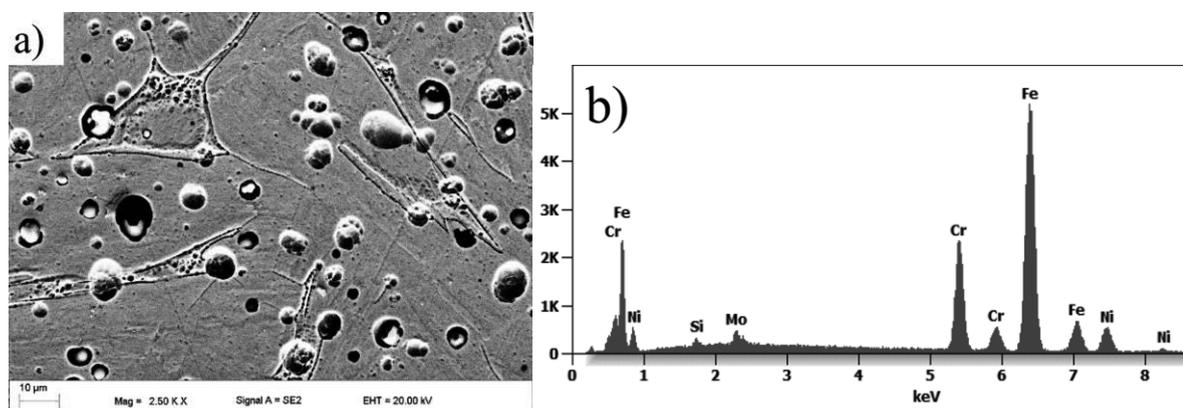
Obserwacji powierzchni dokonano na wcześniej badanych próbkach na mikroskopie świetlnym. Do badań wykorzystano mikroskop elektronowy Zeiss Supra 35 z wbudowanym modułem EDS. Na Rys. 6 b), Rys. 7 b), Rys. 8 b) oraz Rys. 9 b) dokonano analizy EDS z obszarów przedstawionych na Rys. 6 a), Rys. 7 a), Rys. 8 a) i Rys. 9 a).



Rysunek 6. Stal 17-4PH cykl nr 2, wypełnienie 80%: a) SEM przy powiększeniu 2500x; b) energia promieniowania rentgenowskiego badanego obszaru  
 Figure 6. 17-4PH processes no. 2 with 80% filling: a) SEM at 2500x magnification; b) x-ray energy of the area

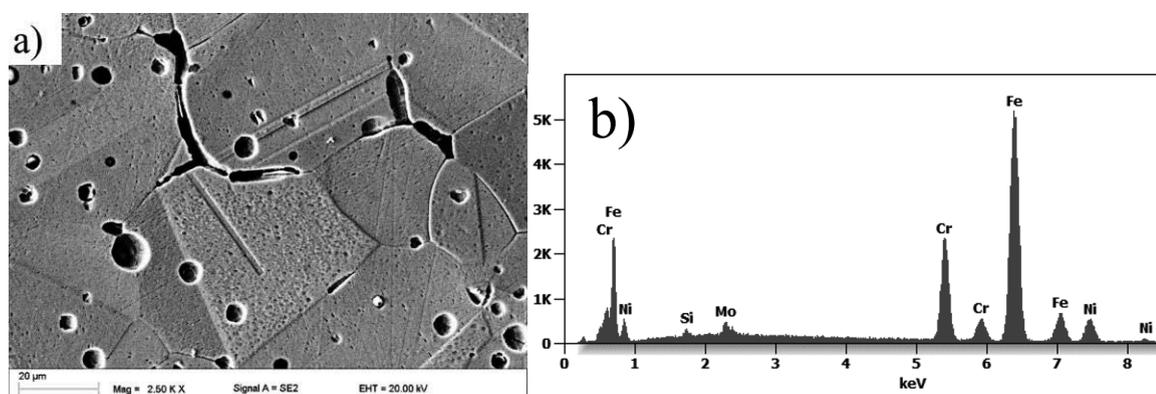


Rysunek 7. Stal 17-4PH cykl 2, wypełnienie 100%: a) SEM przy powiększeniu 2500x; b) energia promieniowania rentgenowskiego badanego obszaru  
 Figure 7. 17-4PH processes no. 2 with 100% filling: a) SEM at 2500x magnification; b) x-ray energy of the area



Rysunek 8. Stal 17-4PH cykl nr 1: a) SEM przy powiększeniu 2500x; b) energia promieniowania rentgenowskiego badanego obszaru

Figure 8. 17-4PH processes no. 1: a) SEM at 2500x magnification; b) x-ray energy of the area



Rysunek 9. Stal 316L cykl nr 1: a) SEM przy powiększeniu 2500x; b) energia promieniowania rentgenowskiego badanego obszaru

Figure 9. 316L processes no. 1: a) SEM at 2500x magnification; b) x-ray energy of the area

Podczas obserwacji struktury w skaningowym mikroskopie elektronowym można zauważyć, że niezależnie od warunków wytwarzania oraz gatunku stali, w spiekach występują liczne sferyczne cząstki bogate w krzem i tlen. Ponadto w stali 17-4PH można zauważyć podłużne ziarna występujące wzdłuż granic dużych ziaren z licznymi drobnymi wydzieleniami. Obszary te najprawdopodobniej ulegają nadtopieniom podczas spiekania. Wyniki badań składu chemicznego w mikroobszarach potwierdzają występowanie dodatków stopowych występujących w tych stalach. Niezgodny ze składem chemicznym jest natomiast zbyt duży udział Si oraz  $O_2$ . Sferyczne pory które również można zaobserwować mogą być efektem wypadania sferycznych cząstek  $SiO_2$ , a nie efektem sferoidyzacji porów podczas spiekania. W szczególności dotyczy to Rys. 9a), na którym widać wyraźnie pory wzdłuż granic ziaren, które nie uległy sferoidyzacji oraz pory i cząstki sferyczne w całym obserwowanym obszarze. W celu wykluczenia przypuszczeń, że cząstki  $SiO_2$  są pozostałością po procesie przygotowywania zglądu metalograficznego, zbadano strukturę filamentu i wydruku, w którym również potwierdzono występowanie  $SiO_2$ . Można przypuszczać, że cząstki te zostały dodane do filamentu celowo i stanowią katalizator podczas degradacji katalitycznej, jaką zaleca producent.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań wynika, że druk 3D jest stale rozwijającą się technologią nie tylko w obszarze urządzeń oraz oprogramowania, ale także odnośnie materiałów wykorzystywanych w druku i sposobie ich przetwarzania. Chcąc obniżyć koszty drukowania z metali technologią SLM, na rynku pojawia się coraz więcej filamentów wypełnionych cząstkami metali, w szczególności stalowymi przeznaczonymi do technologii FDM. Mimo że często informacje podane przez producenta ograniczają się jedynie do parametrów drukowania, oraz zalecana jest degradacja katalityczna, w przedstawionej pracy udowodniono, że możliwe jest również dla tego materiału stosowanie degradacji cieplnej i bezpośredniego spiekania zapewniającego wysokie własności mechaniczne.

Na podstawie wyników badań można przedstawić następujące wnioski:

- zastosowany filament, przeznaczony do degradacji katalitycznej według producenta można poddać również przy odpowiednio dobranych parametrach degradacji cieplnej i następnie spiekaniu,
- chcąc stosować degradację cieplną, drukowane elementy powinny być relatywnie małe, co ułatwia proces degradacji, skraca jej czas i zapewnia spiek pozbawiony wad materiałowych,
- własności mechaniczne wytworzonych elementów silnie zależą od stopnia wypełnienia druku oraz sposobu drukowania. W celu zwiększenia zagęszczenia wydruku powinno się stosować dysze o możliwie małej średnicy poniżej 0,4 mm,
- w celu zwiększenia własności mechanicznych spieków konieczne jest dalsze prowadzenie badań i zastosowanie wysokiej próżni podczas spiekania która zwiększy gęstość spieków lub infiltracji ciśnieniowej, w której otwarte pory i kanały zostaną wypełnione ciekłym metalem lub stopem.

Uwagi ogólne: Niniejsze opracowanie powstało częściowo dzięki realizacji projektu pt. „Dobór warunków degradacji lepszycza i spiekania elementów wytwarzanych metodą przyrostową z wysokowypełnionych filamentów” w ramach działań Studenckiego Koła Naukowego Metalurgii Proszków działającego na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach, finansowanego w ramach programu „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza”.

#### LITERATURA

1. Olsson N.O.E., Arica E., Woods R., Madrid J.A., Industry 4.0 in a project context: Introducing 3D printing in construction projects, ScienceDirect, Project Leadership and Society, vol. 2, 2021
2. Castagnoli R., Büchi G., Coeurderoy R., Cugno M., Evolution of industry 4.0 and international business: A systematic literature review and a research agenda, ScienceDirect, European Management Journal, 2021
3. Jiang P.F., Zhang C.H., Zhang S., Zhang J.B., Chen J., Chen H.T., Additive manufacturing of novel ferritic stainless steel by selective laser melting: Role of laser scanning speed on

- the formability, microstructure and properties, ScienceDirect, Optics & Laser Technology, vol. 140, 2021
4. Solomon I.J., Sevvel P., Gunasekaran J., A review on the various processing parameters in FDM, ScienceDirect, materialstoday: PROCEEDINGS, vol. 31, cz. 2, 2021, s. 509-514
  5. Lashgari H.R., Kong C., Adabifiroozjaei E., Li S., Microstructure, post thermal treatment response, and tribological properties of 3D printed 17-4PH stainless steel, ScienceDirect, Wear, vol. 456-457, 2020
  6. Al-Mamun N.S., Haider W., Shabib I., Corrosion resistance of additively manufactured 316L stainless steel in chloride-thiosulfate environment, ScienceDirect, Electrochimica Acta, vol. 362, 2020
  7. Yadollahi A., Shamsaei N., Thompson S.M., Elawany A., Bian L., Effects of building orientation and heat treatment on fatigue behavior of selective laser melted 17-4PH stainless steel, ScienceDirect, International Journal of Fatigue, vol. 94, cz. 2, 2017, s. 218-235
  8. Shin W.S., Son B., Song W., Sohn H., Jang H., Kim Y.J., Park C., Heat treatment effect on the microstructure, mechanical properties, and wear behaviors of stainless steel 316L prepared via selective laser melting, ScienceDirect, Materials Science and Engineering: A, vol. 806, 2021
  9. Dong P., Vecchiato F., Yang Z., Hooper P.A., Wenman M.R., The effect of build direction and heat treatment on atmospheric stress corrosion cracking of laser powder bed fusion 316L austenitic stainless steel, ScienceDirect, Additive Manufacturing, vol. 40, 2021
  10. Riemer A., Leuders S., Thöne M., Richard H.A., Tröster T., Niendorf T., On the fatigue crack growth behavior in 316L stainless steel manufactured by selective laser melting, ScienceDirect, Engineering Fracture Mechanics, vol. 120, 2014, s. 15-25
  11. Balajaddeh M.B., Naffakh-Moosavy H., Pulsed Nd:YAG laser welding of 17-4PH stainless steel: Microstructure, mechanical properties, and weldability investigation, ScienceDirect, Optics & Laser Technology, vol. 119, 2019
  12. STAHLHANDEL. GRÖDITZ GMBH. Dostęp z dnia 14.12.2021  
[https://www.stalespecjalne.com.pl/files/17-4ph\\_karta\\_charakterystyki\\_gatunku\\_ssp.pdf](https://www.stalespecjalne.com.pl/files/17-4ph_karta_charakterystyki_gatunku_ssp.pdf)
  13. Stal nierdzewna AISI 316/316L- przydatne informacje. Dostęp z dnia 14.12.2021  
[https://siatkitkane.com.pl/blog/14\\_stal-nierdzewna-aisi-316316l-przydatne-informacje.html](https://siatkitkane.com.pl/blog/14_stal-nierdzewna-aisi-316316l-przydatne-informacje.html)
  14. Audisio G., Silvani A., Catalytic Thermal Degradation of Polymers Degradation of Polypropylene, ScienceDirect, Journal of Analytical und Applied Pyro&sis, vol. 7, 1984, s. 83-90





28 stycznia 2022  
Gliwice

KATEDRA MATERIAŁÓW INŻYNIERSKICH I BIOMEDYCZNYCH  
WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY  
POLITECHNIKA ŚLĄSKA

## MIĘDZYNARODOWA STUDENCKA KONFERENCJA NAUKOWA

### **Organizacja systemu produkcyjnego dla produkcji form metalowych wytwarzanych technologią druku 3D**

P. Złotoś<sup>a</sup>, A. Ramos<sup>a</sup>, K. Czupryńska<sup>a</sup>, R. Bednarczyk<sup>a</sup>, N. Cieślińska<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

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

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

**Streszczenie:** W artykule opisano zależności doboru systemów organizacji produkcji w odniesieniu do produkcji form metalowych technologią 3D oraz szereg wpływających na to czynników produkcyjnych i pozaprodukcyjnych.

**Abstract:** The article describes the dependencies of the selection of production organization systems in relation to the production of metal molds with 3D technology and a number of production and non-production factors affecting it.

**Słowa kluczowe:** organizacja produkcji, proces produkcyjny, elementy wejścia i wyjścia, otoczenie systemu produkcyjnego, partia produkcyjna, zintegrowane systemy zarządzania

### **1. WSTĘP**

#### **Planowanie procesu produkcyjnego**

Produkcja dostosowuje się do potrzeb klienta oraz do jego wymagań, dlatego też ważne jest, aby była zróżnicowana i musi cechować ją duża zmienność [1]. Dzięki spełnieniu tego założenia firma staje się konkurencyjna, jednakże powoduje to utrudnienia w planowaniu produkcji. Firmy często dążą do standaryzacji procesów, czyli wprowadzenia tych samych podzespołów, zespołów i elementów w różnych konstrukcjach oraz stosowania tych samych rozwiązań w zakresie procesów wytwarzania. Opracowywana oferta bierze pod uwagę takie czynniki jak:

- ocenę możliwości technicznych zakładu,
- ocenę czasu realizacji, kosztu oraz ryzyka.

Dla klientów oprócz funkcjonalności wyrobu ważne są takie aspekty jak: cena, termin dostawy oraz warunki gwarancji.

Planowanie jest jednym z najważniejszych etapów procesu zarządzania. Jak wynika z definicji zarządzania, planowanie jest pierwszym etapem, od którego zaczyna się proces

produkcji. Jest podstawą do podejmowania decyzji, a jego zadaniem jest umiejscowienie w czasie operacji, zabiegów czynności wykonywanych w związku z zamówionymi wyrobami lub usługami, tak aby osiągnąć zysk.

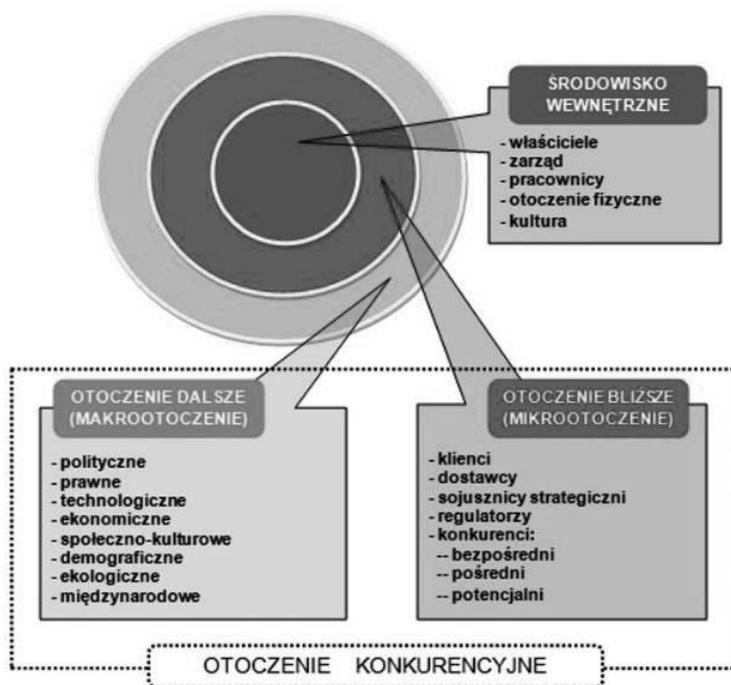
### Elementy wejścia (X) i elementy wyjścia (Y)

Na wejściu do każdego procesu produkcyjnego znajdują się zasoby, które zostaną w nim wykorzystane i zalicza się do nich następujące czynniki produkcji:

- Zasoby ludzkie - umiejętności, wiedza, zdolności oraz predyspozycje wszystkich osób zatrudnionych w przedsiębiorstwie.
- Zasoby pieniężne - kapitał finansowy, który organizacja wykorzystuje do finansowania działań zarówno bieżących, jak i długoterminowych.
- Zasoby rzeczowe - w skład, których wchodzi między innymi surowce, półprodukty, pomieszczenia biurowe i produkcyjne oraz wszelkiego rodzaju sprzęt.
- Zasoby informacyjne - to wszelkiego rodzaju użyteczne dane niezbędne do skutecznego i prawidłowego podejmowania decyzji.

Na wyjściu z procesu produkcyjnego znajdują się gotowe wyroby lub usługi, a także odpady, produkty wybrakowane, surowce przeznaczone do ponownego wykorzystania będące skutkiem ubocznym procesu produkcyjnego, informacje dotyczące jakości wyrobu, koszty jego wytworzenia oraz opis doświadczeń zdobytych podczas jego produkcji [2].

### Otoczenie systemu produkcyjnego



Rysunek 1. Otoczenie systemu produkcyjnego [3]

Figure 1. The environment of the production system [3]

Na system produkcyjny oddziałuje środowisko, w jakim jest on realizowany (Rysunek 1). Otoczenie systemu produkcyjnego dzieli się na:

- bliższe - wewnątrz zakładu przemysłowego, w ramach którego dany system funkcjonuje,

- dalsze - gospodarka kraju lub regionu,
- wewnętrzne - pracownicy, właściciele, kultura organizacyjna.

### **Istota i cele wyznaczania partii produkcyjnej**

Według J. Burshe'a partia produkcyjna jest to „ilość przedmiotów obrabianych w kolejności na jednym stanowisku roboczym, bez przerw na wykonanie innych czynności produkcyjnych” [4]. Inną definicję przedstawia zaś B. Liwowski i R. Kozłowski, którzy partię produkcyjną rozumieją jako „łączną liczbę wyrobów tego samego rodzaju (czyli część serii) wykonanych w określonym ciągu technologicznym bez przerw, w których ciąg ten zajmowałby się wytwarzaniem innych produktów” [4]. W definicji M. Brzezińskiego pod pojęciem partii produkcyjnej rozumie się „liczbę detali wykonywanych w ścisłej kolejności przy jednorazowym nakładzie czasu przygotowawczo-zakończeniowego” [5].

Wielkość partii produkcyjnej należy dobierać tak, aby odpowiadała ona programom produkcyjnym oraz wymaganiom ekonomicznym produkcji. Podczas wyboru należy uwzględnić czynniki, które przemawiają za zwiększaniem wielkości partii produkcyjnej lub za jej zmniejszeniem. Zwiększenie partii produkcyjnej może pociągać za sobą zarówno korzystne, jak i niekorzystne skutki [6].

Korzystne skutki [6]:

- zmniejszenie nakładów na ustawienie i przygotowanie produkcji w przeliczeniu na jednostkę produkcji,
- wykorzystanie w większym stopniu dysponowanego funduszu czasu pracy stanowisk roboczych poprzez zmniejszenie czasu przebrojeń,
- zwiększenie wydajności pracy robotników w wyniku tzw. produkcyjnego uczenia się,
- zmniejszenie kosztów produkcji związane z wymienionymi wyżej czynnikami,
- uproszczenie organizacji i zarządzania produkcją, zwłaszcza planowania operatywnego, ewidencji produkcji, zarządzania dyspozytorskiego itp.

Niekorzystne skutki [6]:

- wydłużenie cyklu produkcyjnego,
- zwiększenie zapasów produkcji w toku, potrzebnej powierzchni i pomieszczeń produkcyjno-magazynowych,
- wzrost zamrożenia środków obrotowych i odsetek od kredytu na środki obrotowe, opodatkowania zapasów itp.
- zmniejszenie elastyczności procesu produkcyjnego i jego adaptabilności.

### **Metody wyznaczania wielkości partii produkcyjnej**

Najbardziej znanymi sposobami określania wielkości partii są metody opisane przez Josepha Orlicky'ego, który wyróżnił dziewięć głównych metod [7]:

- stała wielkość partii (ang. fixed order quantity),
- partia na partię (ang. lot for lot),
- partia pokrywająca zapotrzebowanie okresowe (ang. fixed period requirements),
- zmienna wielkość partii (stały cykl zamawiania) (ang. period order quantity),
- minimalny koszt jednostkowy (ang. least unit cost),
  - minimalny koszt całkowity (ang. Least total cost),
  - partia okresowo-bilansowana (ang. part period balancing),
  - algorytm Wagnera-Within'a (ang. Wagner-Within algorithm).

### **Produktywność systemu produkcyjnego**

Definiowana jako współzależność pomiędzy strumieniami nakładów czynników produkcji X, a strumieniami produktów Y (wyrobów lub usług) [7].

Niska produktywność może prowadzić do:

- wzrostu cen,
- zwiększenia zapotrzebowania na energię i materiały bez wzrostu wyników produkcyjnych.

Wysoka produktywność umożliwia:

- obniżenie kosztów wytwarzania,
- zwiększenie wyników produkcyjnych i zysków,
- zwiększenia zapotrzebowania na pracę.

### **Typy organizacji produkcji**

Typ organizacji produkcji – jest to system organizacji produkcji na stanowiskach roboczych obejmujący zespół stosowanych środków i metod produkcji wyrobów, określany przez stopień specjalizacji poszczególnych stanowisk [8].

Możemy wyróżnić:

- produkcję jednostkową,
- produkcję seryjną (małoseryjna, średnioseryjna, wielkoseryjna),
- produkcję masową.

Produkcja jednostkowa charakteryzuje się [8]:

- uproszczoną dokumentacją techniczną,
- bieżącym opracowywaniem planów produkcji,
- wysoko wykwalifikowanymi pracownikami produkcyjnymi,
- wyposażeniem uniwersalnym.

Produkcja masowa charakteryzuje się [8]:

- bardzo szczegółową dokumentacją techniczną,
- wysokimi wymaganiami w stosunku do tolerancji wymiarów i naddatków obróbkowych,
- wysoko wykwalifikowanymi pracownikami konstrukcyjno-technologicznymi,
- wyposażeniem specjalnym,
- jednorazowym opracowaniem planów produkcji,
- realizacją operacji i ich części na oddzielnych stanowiskach.

Stopień specjalizacji:

- uniwersalne – bez przydzielenia ściśle określonych części i operacji,
- specjalizowane – z przydzieloną grupą części i operacji z możliwością przebrojenia w zakresie klasy przyrządów i narzędzi,
- specjalne – z przydzieloną jedną lub kilkoma częściami lub operacjami, dostosowanie do innych wymagań przebudowy stanowiska.

Tablica 1. Typ produkcji, a stopień specjalizacji.

Table 1. Type of production and degree of specialization

Liczba detali	Typ produkcji	Stanowisko robocze		
		Uniwersalne	Specjalizowane	Specjalne
Nieokreślona	Jednostkowy	+	-	-
20 ÷ 50 (100)	Małoseryjny	+	-	-
5 (10) ÷ 20	Średnioseryjny	+	+	-
2 ÷ 5 (10)	Wielkoseryjny	-	+	-
1	Seryjny	-	+	+

„+” – najczęściej występuje

„-” – najczęściej nie występuje

### Formy organizacji produkcji

Formy organizacji produkcji są to sposoby powiązania poszczególnych stanowisk roboczych w zakresie wszystkich wyrobów na nich wytwarzanych [9]. Określane są przez dwa kryteria:

- Stałości kierunków przebiegu (przepływu) przedmiotów pracy,
- Równomierności tego przepływu między stanowiskami pracy.

Kryterium stałości przepływu [10]:

- Produkcja potokowa – kierunek przebiegu przedmiotów pracy pomiędzy stanowiskami jest stały – stanowiska pracy są rozmieszczone w kolejności odpowiadającej poszczególnym etapom przebiegu procesu.
- Produkcja niepotokowa - kierunek przebiegu przedmiotów pracy pomiędzy stanowiskami jest zmienny – każde stanowisko pracy może współpracować z różnymi stanowiskami i kolejność operacji technologicznych jest zmienna.

Kryterium równomierności przepływu [10]:

- Wytwarzanie w równych jednostkach czasu jednakowych wielkości produkcji, co związane jest z równomiernym rozłożeniem w czasie nakładów materiałowych i pracy ludzkiej oraz równomiernym wykorzystaniem maszyn i urządzeń.

W ramach form wyróżnia się [10]:

- Produkcję niepowtarzalną wyrobów pojedynczych lub w krótkich seriach.
- Asynchroniczny przepływ wyrobów – zróżnicowane czasy operacji na poszczególnych stanowiskach.
- Synchroniczny przepływ wyrobów – czasy pracy stanowisk są w przybliżeniu równe taktowi.

Problematyka planowania procesu produkcyjnego polega na złożoności systemu, który nie jest odrębną jednostką, która może sama funkcjonować. Zależy on od ludzi, maszyn, informacji i praw, które znajdują się w jego otoczeniu. Warto zauważyć, że jest to skomplikowana sieć zależności, a nie pojedyncza zależność. Niezbędny jest więc dobór i umiejętne wykorzystanie wiedzy technologicznej, prawnej oraz ekonomiczno-finansowej. Wiedza ta umożliwi efektywne i skuteczne działanie danej osobie lub organizacji.

## 1.1. WPLYW ELEMENTÓW WEJŚCIA I WYJŚCIA NA JAKOŚĆ WYROBU

Na wejściu do każdego procesu wchodzi takie zasoby jak: ludzkie, pieniężne, rzeczowe i informacyjne.

Praca to ludzie. Ich siła robocza. To nie tylko pracownicy produkcyjni. Praca może być wysoko wykwalifikowana. Bez doświadczonych i kompetentnych pracowników formy stalowe drukowane 3D nie mogłyby powstać. Pracownicy powinni znać technologie wytwarzania takich form i specyfikę materiałów, z których są wytwarzane. Nieumiejętność i niewiedza może spowodować, że jakość wyrobu nie będzie zadowalająca. Każdy pracownik dobrze sprawujący swoją funkcję przyczynia się do dobrej jakości wyrobu.

Bez zasobów pieniężnych niemożliwe by było wytworzenie czegokolwiek. Przedsiębiorstwa muszą mieć zgromadzony kapitał, aby móc finansować działania krótko i długoterminowe. Wszystko ma swoją cenę. Przedsiębiorstwa mają szereg potrzeb, które trzeba sfinansować. Często niewystarczająca ilość funduszy negatywnie wpływa na jakość wyrobu.

Zasoby rzeczowe, to kolejny element wejścia procesu produkcyjnego. W ich skład wchodzi surowce, półprodukty, pomieszczenia biurowe i produkcyjne oraz wszelkiego rodzaju sprzęt. Odpowiednie rodzaje stali potrzebne do wytworzenia form stalowych drukowanych 3D mają potem wpływ na ich jakość. Odpowiednie oprzyrządowanie, maszyny oraz inne narzędzia również mają wpływ na finalną jakość wyrobu. Nie można pominąć organizacji przestrzeni produkcyjnej i biurowej. Często rozmieszczenie ludzi, maszyn i narzędzi pracy na hali produkcyjnej ma potem wpływ na jakość wyrobu.

Zasoby informacyjne to wszelkiego rodzaju użyteczne dane potrzebne do podejmowania decyzji. Bez wiedzy o technologii wytworzenia form nie jest możliwa realizacja zamówień. Wiedza i umiejętności wpływają na jakość wyrobu. Im więcej zebranych danych i lepsze zorientowanie przedsiębiorstwa na rynku tym lepsza jakość wyrobu finalnego.

Na wyjściu z procesu produkcyjnego są gotowe wyroby lub usługi, a także odpady, produkty wybrakowane, surowce przeznaczone do recyklingu, informacje dotyczące jakości wyrobu, koszty jego wytworzenia oraz opis doświadczeń zdobytych podczas jego produkcji. Wyprodukowane już formy stalowe mogą stanowić formę nauki do dalszych udoskonaleń procesu i produktu. Analiza poprodukcyjna dotycząca jakości wyrobu, kosztów oraz doświadczeń produkcyjnych ma znaczący wpływ na kształtowanie przyszłej jakości wyrobu. Dzięki temu mogą być wprowadzone działania naprawcze i doskonalące, zapobiegające błędom popełnionym w przeszłości.

## 1.2. WIELKOŚĆ PARTII PRODUKCYJNEJ WYROBU

Analizując przedsiębiorstwo którego produkcja zajmowałaby się jedynie wytwarzaniem form drukowanych 3D, można by założyć, że wielkość partii produkcyjnej byłaby ograniczona jedynie takimi czynnikami jak: konieczne przestoje maszyny, jak również czasy przygotowawczo zakończyeniowe, pozostawiając jedynie efektywny czas pracy podczas zmiany na wykonanie elementów. Jak również ilość zmian w czasie doby oraz wielkość zamówienia przez klienta, warunki produkcyjne oraz zdarzenia nieprzewidziane.

W przypadku drukarki 3D dla form metalowych, czasem przygotowawczo zakończyeniowym jest:

1. Ocena wizualna stanu technicznego maszyny i stanowiska roboczego

2. Podłączenie maszyny do źródeł zasilania w razie braku zagrożenia dla życia i zdrowia pracowników oraz pełnej sprawności maszyny
3. Zapewnienie obrabianego produktu wejściowego, jakim jest sproszkowany metal
4. Nastaw parametrów wytwarzania- wybór programu obróbczego
5. Czas potrzebny na zdjęcie gotowego elementu z obszaru roboczego maszyny
6. Czas potrzebny na uzupełnienie obrabianego materiału wsadowego
7. Wyłączenie maszyny
8. Czas związany z konserwacją i czyszczeniem stanowiska i maszyny pod koniec czasu pracy pracownika
9. Przystoje spowodowane awarią bądź niesprawnością maszyny
10. Czas związany z pracami renowacyjnymi

Kolejnym ograniczeniem są warunki produkcyjne. Do warunków produkcyjnych wpływających na wielkość partii można zaliczyć:

11. Odległości na hali produkcyjnej pomiędzy poszczególnymi obszarami
12. Ilość drukarek 3D
13. rodzaj drukarek 3D- specyfikacja i parametry
14. Sposób przepływu wyrobów i materiałów, w tym ścieżki przepływu oraz środki transportu
15. Wielkość zamówienia od klientów i oczekiwany czas na zrobienie zamówienia
16. Ilość zamówień w danym czasie
17. System zarządzania
18. Wykwalifikowana kadra
19. Czas potrzebny na wykonanie programu dla obrabiarki
20. Statystyczna ilość sztuk wadliwych

Do czynników niezależnych od człowieka, czyli do zdarzeń losowych można zaliczyć:

21. Awaria drukarek 3D
22. Niesprawność drukarek 3D
23. Awarie zasilania
24. Wypadki przy pracy z drukarką 3D
25. Stany zagrożenia życia i zdrowia spowodowane np.: pożarem, zalaniem itp.

Wymienione wyżej czynniki wpływają na finalny czas wykonania danej ilości sztuk metalowych form na drukarkach 3D. Wpływają one na określenie wielkości partii produkcyjnej.

Produkcja form metalowych metodą druku 3D daje precyzyjne i skomplikowane kształty form, co za tym idzie jest droższa niż klasyczna metoda wytwarzania poprzez odlewanie, dlatego zamówienia dla tego typu produkcji mogą składać jedynie klienci których finalny produkt odznacza się precyzją wykonania oraz skomplikowaną budową. Zapotrzebowanie na tego typu elementy jest średnie, a co za tym idzie wielkości partii produkcyjnych jest również średnia i oscyluje w wartościach setek sztuk.

Wyznaczanie wielkości partii produkcyjnej dla jednej operacji technologicznej:

$$Sek = tpz / q * tj$$

gdzie: Sek - wielkość partii produkcyjnej

tpz - czas przebrojenia operacji

tj - czas wykonania operacji

q - zróżnicowany, zależnie od rodzaju produkcji empiryczny, współczynnik strat czasu na przezbieranie stanowisk roboczych (najczęściej przyjmowany jest w zakresie 0,02-0,15).

### 1.3. OTOCZENIE ZEWNĘTRZNE I WEWNĘTRZNE ORGANIZACJI

Wydarzenia i uwarunkowania mające wpływ na funkcjonowanie przedsiębiorstwa określa się jako otoczenie organizacji. Można wyróżnić otoczenie zewnętrzne wewnątrz.

Na otoczenie wewnętrzne organizacji składa się zarząd (osoby lub organy sprawujące władzę w organizacji), pracownicy (ludzie pracujący na rzecz organizacji, zatrudnieni w niej lub współpracujący w innej formie) oraz kultura organizacji integrująca powyższe elementy. Pracownicy to kierownicy wszystkich szczebli oraz wykonawcy. Kultura organizacji to wartości, na których organizacja opiera swoje działania, wartości, jakimi kierują się członkowie organizacji, obowiązujące reguły i zasady (tutaj oprócz tych zapisanych w aktach mowa również o zasadach niepisanych). Nie zawsze można je wybrać czy narzucić, ponieważ najczęściej są to wartości przeszczepiane z otoczenia i środowiska, z których wywodzą się członkowie organizacji oraz system społeczny organizacji. Kultura jest wypadkową działania wielu czynników, wśród których zazwyczaj wymienia się: historię, wielkość i strukturę organizacji, jej sytuację rynkową, środowisko, w jakim działa, system wartości lokalnego społeczeństwa, wynikający z kultury narodowej, regionalnej czy też religijnej.

Otoczenia zewnętrzne rozumiane jako elementy wpływające na organizację ale funkcjonujące poza nią można podzielić na otoczenie zadaniowe, które będzie obejmowało konkurentów, klientów, dostawców ale możemy również wyróżnić otoczenie:

- Polityczno-prawne - otoczenie to pod uwagę bierze wszystkie aspekty podatkowe, uregulowania prawne czy też wpływ polityczny na daną branżę,
- Ekonomiczne - otoczenie to obejmuje sytuację makroekonomiczną kraju w którym produkowany dany produkt. Ważnymi elementami są tutaj stopa inflacji, obowiązujące stopy procentowe czy wartość waluty, ponieważ każdy z tych czynników będzie wpływał na ceny półproduktów a od nich będzie zależeć jakość formy stalowej (produktu końcowego).
- Socjokulturowe – dotyczy analizy podziału wiekowego, stanu majątkowego, struktury zatrudnienia czy struktury etnicznej. W otoczeniu socjokulturowym można zawrzeć też informację dotyczącą relacji społecznych w odniesieniu do badanej branży, otwartości na nowe technologie takie jak druk 3D.

W otoczeniu celowym, czy też zadaniowym za konkurentów uważa się, podmioty z którymi organizacja współzawodniczy o różnego typu zasoby.

Pod pojęciem klienta, kryją się osoby, które płacą za nabycie danego dobra czy też usługi wytwarzanej przez organizację. Są to odbiorcy produktów lub usług; mogą to być osoby fizyczne, prawne ale również jednostki organizacyjne nieposiadające osobowości prawnej. Dostawcy to organizacje dostarczające zasoby niezbędne do sprawnego funkcjonowania organizacji. Należą do nich dostawcy mediów, wyposażenia czy też półproduktów, a w literaturze można spotkać się z tezą, że są nimi również szkoły czy uczelnie ponieważ dostarczają one wykwalifikowanych pracowników. Możemy jeszcze wyróżnić sojuszników strategicznych, których współpraca opiera się na dążeniu do tego samego lub pokrewnego celu. Do tej kategorii otoczenia zaliczane są też jednostki udzielające pomocy.



Ostatnim elementem wchodzącym w skład otoczenia zadaniowego są regulatorzy, inaczej podmioty i jednostki organizacyjne, które na drodze prawnej mogą kontrolować i regulować działanie organizacji lub oddziaływać na nią w inny sposób; w odniesieniu do organizacji publicznych są to państwowe organy kontroli i nadzoru, np. Najwyższa Izba Kontroli, czy organy nadzoru nad samorządem terytorialnym (wojewoda, Prezes Rady Ministrów, Regionalne Izby Obrachunkowe), wyspecjalizowane służby, inspekcje i straże. Znajomość otoczenia celowego jest niezbędna organizacji, jako że oddziałuje na nią bezpośrednio i wpływa na jej otoczenie wewnętrzne, które obejmuje zarząd, pracowników i kulturę organizacji.

Cecha otoczenia może być rozumiana jako zespół właściwości charakteryzujących badane otoczenie pod konkretnym względem. Powszechnie znany jest podział otoczenia ze względu na intensywność zmian, zwany dynamiką zmian. Ze względu na dynamikę można wyróżnić następujące rodzaje otoczenia: stałe zwane stabilnym, zmienne oraz burzliwe (Tabela 2).

Tablica 2. Cechy otoczenia

Table 1. Features of the environment

Otoczenie	Cechy charakterystyczne
Stale	- wyroby i usługi nie ulegają zmianom, -niewiele nowości technologicznych, -stabilne warunki polityczne, -sformalizowana i scentralizowana struktura;
Zmienne	- umiarkowane zmiany wyrobów i usług, -wielcy konkurenci na rynku i wciąż pojawiający się nowi, -przewidywalne zmiany w polityce, -obserwacja otoczenia
Burzliwe	-ciągłe zmiany produktów i usług, -zmieniająca się konkurencja, -gwałtowne zmiany społeczne, -elastyczna struktura,

Otoczenie stabilne, nazywane inaczej spokojnym cechuje brak nagłych zmian oraz statyczność. Jego celem jest stworzenie powiązań pomiędzy poszczególnymi elementami.

W tym otoczeniu konkurenci i klienci rynkowi nie ulegają dużym wahaniom tak samo jak zmiany popytu. Podobna stabilność charakteryzuje regulacje prawne oraz uwarunkowania polityczne.

Otoczenie zmienne, zwane niespokojnym cechuje umiarkowane tempo zmian we wszystkich obszarach: rynkach, wyrobach, technologii, regulacjach prawnych, itp. Co jakiś czas pojawiają się nowi konkurenci oraz nowe wyroby – tendencje te są jednak możliwe do przewidzenia.

Otoczenie burzliwe, inaczej turbulentne, charakteryzują szybkie, trudne do przewidzenia, zmiany. W tym otoczeniu bardzo ciężko jest kontrolować przyszłe wydarzenia, ponieważ stale zmieniają się konkurenci, wytwarzane są nowe wyroby czy następują gwałtowne zmiany społeczne i polityczne.

#### 1.4. WPLYW ZINTEGROWANYCH SYSTEMÓW ZARZĄDZANIA NA POPRAWĘ JAKOŚCI WYROBU

Zasady zarządzania jakością zostały opublikowane po raz pierwszy w normie ISO 9004 a także w normie ISO 9001. Ich stosowanie ma ułatwić kierownictwu organizację, oraz udoskonalić system zarządzania jakością. Zaliczamy do nich min.[8][1]:

Orientację na klienta – każde przedsiębiorstwo jest ustawione po to aby zapewnić jak najlepszą wartość swoim klientom. Sukces może być osiągnięty tylko wtedy kiedy przyciągnie i utrzyma zaufanie klientów.

- Przywództwo – Przywódcy mają za zadanie ustalić jedność celu na wszystkich poziomach, oraz tworzyć i utrzymywać warunki w organizacji. Tak aby pracownicy dążyli do osiągnięcia celów organizacji.
- Zaangażowanie ludzi – Dążenie aby pracownicy byli kompetentni i zaangażowani w powiększaniu zdolności organizacji, tak aby powstała jak największa wartość.
- Podejście procesowe – System zarządzania jakością składa się z wzajemnie powiązanych procesów, które mają za zadanie działać jako spójny system. Ich celem jest osiągnięcie zgodnych i podobnych wyników lub lepszych od poprzednich dzięki sprawności systemu.
- Doskonalenie – Dążenie do doskonalenia jest niezbędne w strategii organizacji aby utrzymać i zmienić funkcjonowanie na dłuższy czas.
- Podejmowanie decyzji – Analizując i oceniając łatwiej jest dokonywać trafnych decyzji. Oparte na faktach i logiczne podejście jest niezbędne do ustanowienia celów.
- Zarządzanie relacjami – utrzymanie sukcesów jest bardzo prawdopodobne do osiągnięcia, kiedy organizacja jest zdolna zarządzać relacjami z zainteresowanymi stronami, tak aby zapewnić swoim klientom wysoką wartość.

Uwzględnienie podanych zasad w zarządzaniu strategicznym może przynosić organizacji znaczne korzyści. Warunkiem jest jednak, aby nie były one nadmierne i tworzone tylko na potrzeby certyfikacji, ale z myślą o doskonaleniu systemu zarządzania. Między tymi zasadami istnieją powiązane zależności, z których warto dawać sobie sprawę, że powiązania występują między wszystkimi zasadami[9].

Wymagania zawarte w podanej normie mają charakter ogólny i mają zastosowanie do wszystkich organizacji, które nie mają wpływu na ich rodzaj, wielkość oraz dostarczany wyrób. Określają między innymi zdolność organizacji do spełnienia wymogów klientów poprzez dostarczenie wyrobu [5].

Strukturę opisanej normy oparto na tzw. cyklu E. Deminga składającą się z czteroetapowej sekwencji PDCA zalecaną przez wszelkiego typu przedsięwzięcia, również przy wdrażaniu systemu ISO 9001. Etapami tej sekwencji są [7]:

- Planowanie przedsięwzięcia – osiągnięcie celów spójnych z nadrzędną koncepcją strategiczną, osiągnięcie zaplanowanych celów, poprzez ustalony harmonogram.
- Wdrażanie zaplanowanych działań, przez przygotowane odpowiednie warunki- szkolenie pracowników, gromadzenie wysokiej jakości zasobów, nadzorowanie zużycie zasobów, oraz przebiegu pracy.
- Sprawdzanie, czy wdrożone funkcjonowanie jest zgodne z zaplanowanymi zamierzeniami- do tego potrzebne jest monitorowanie całego procesu i odkrywanie niepożądanych niezgodności z ustalonymi planami, tak by w odpowiednim momencie je skorygować.

- Działanie – działanie zgodnie z ustalonym planem w trakcie, którego należy analizować czy uzyskane wyniki są zgodne z oczekiwaniami, oraz czy wyniki są zgodne.
- Chcąc wdrożyć i certyfikować system ISO 9001, organizacja powinna uwzględnić w prowadzonym przedsiębiorstwie[7]:
- Zidentyfikować wszystkie ważne procesy realizowane w przedsiębiorstwie, tzn. ustalić ich nazwy, dostawców i klientów, oraz sporządzić ich opis.
- Wprowadzić w posiadanych procesach skuteczne mechanizmy nadzoru polegających na ustaleniu mierników oceny i ich wartości pożądanych, zaopatrywania i kontroli procesów.
- Opracowanie specjalnej dokumentacji systemu posiadającej plan działania, wskazujące na sposób spełniania wymagań zawartych w normie. Należy podkreślić ich wymagania tak aby każda organizacja mogła je spełnić. Organizacja wybiera sposób spełniania wymagań zależny od jej skuteczności i który uzna za właściwy.

ISO 14001 to wiodący standard dotyczący systemów zarządzania środowiskowego. Funkcjonuje w oparciu o międzynarodowe standardy i stanowi potwierdzenie konsekwentnego wdrażania wszystkich elementów zmierzających do maksymalnego ograniczenia negatywnego wpływu organizacji na środowisko.

Celem wdrożenia systemu środowiskowego opartego na normie ISO 14001 jest ciągłe doskonalenie i poprawa efektów działalności środowiskowej oraz przygotowanie do reagowania w przypadku zagrożenia ekologicznego.

Umieść zarządzanie środowiskowe w centrum swojej działalności, aby osiągnąć trwałe sukcesy. Jest to uznawana w skali międzynarodowej norma pomagająca zmniejszać wpływ działalności na środowisko naturalne przy jednoczesnym zwiększaniu rentowności.

Wdrożenie ISO 45001:2018 – System Zarządzania BHP

Międzynarodowa norma ISO 45001:2018 jest pierwszą Międzynarodową Normą opracowaną przez komitet normalizacyjny ISO dotyczącą Systemu Zarządzania BHP. W ciągu kilku najbliższych lat najprawdopodobniej zastąpi funkcjonujące obecnie systemy zgodne ze standardami: OHSAS 18001 oraz Polską Normą PN-N 18001.

Wdrożenie ISO 45001 – wdrażanie nowej normy z zakresu bezpieczeństwa i higieny pracy – Etapy.

Poszczególne etapy wdrażania Systemu Zarządzania Bezpieczeństwem i Higieną Pracy zgodnego z ISO 45001:2018. Wśród etapów wspólnych dla większości systemów zarządzania są także te, charakterystyczne dla systemów BHP:

- Przeprowadzenie auditu wstępnego (audit stanu zerowego) czyli inwentaryzacja obecnie stosowanych rozwiązań i dokumentów z wymaganiami normy ISO 45001.

Analiza działań oraz dokumentów dotyczących zarządzania BHP pod kątem spełnienia wymagań normy ISO 45001:2018. Celem auditu jest zapoznanie się z sytuacją panującą w Organizacji w chwili przystępowania do wdrażania, oraz określenie stopnia spełnienia wymagań normy ISO 45001 przed przystąpieniem do projektu wdrożeniowego.

Opracowany na zakończenie auditu zerowego raport zawiera:

- Ocenę obecnej sytuacji w zakresie zarządzania BHP w tym analizę luk (GAP Analysis) względem normy ISO 45001
- Słabe i mocne strony oraz wykaz szans i zagrożeń obecnie funkcjonujących rozwiązań w zakresie BHP (analiza SWOT).

Wymagania co do jakości stosowanych materiałów stają się coraz wyższe. Technologia druku 3D to odpowiedź na faktyczne potrzeby związane z codziennym funkcjonowaniem przedsiębiorstw oraz rozwiązanie optymalizujące koszty. Faktem jest, że druk 3D zmienia przemysł produkcyjny: daje nam przewagę redukcji kosztów oraz czasu produkcji. Przeanalizujmy więc jakimi cechami powinna charakteryzować się drukarka 3D do zastosowań przemysłowych:

- Duże pole robocze (500x500x500),
- Automatyczna kalibracja maszyny,
- Wysokie możliwości temperaturowe,
- Możliwość zdalnego zarządzania,
- Zarządzanie farmą drukarek 3D,

## PODZIĘKOWANIE

Praca powstała w wyniku realizacji projektu w ramach kształcenia zorientowanego projektowo - PBL, w konkursie V w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza, Politechnika Śląska. Praca jest efektem współpracy na mocy umowy międzynarodowej pomiędzy Politechniką Śląską i Chmielnickim Uniwersytetem Narodowym na Ukrainie.

## LITERATURA

1. Głowacka-Fertsch D., Fertsch M., Zarządzanie produkcją. Wyższa Szkoła Logistyki, Poznań 2004.
2. Pająk E. Trojanowska J., Planowanie i sterowanie produkcją wieloasortymentową. Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2021.
3. Strona internetowa: <https://szpiegul.pl/blog/cele-analazyki/> [dostęp 30.12.21]
4. Bursche J.: Planowanie wewnątrz-zakładowe i ewidencja produkcji. WNT, Warszawa 1963.
5. Liwowski B., Kozłowski R.: Podstawowe zagadnienia zarządzania produkcją. Oficyna Wyd. Wolters Kluwers business, Warszawa 2011.
6. Brzeziński M.: Organizacja produkcji. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2000.
7. Gronowicz M, Romaniuk K, Szczubełek G., Ekonomia produkcji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztyn 2014.
8. Liwowski B., Kozłowski R., Podstawowe zagadnienia z zarządzania produkcji. Oficyna Ekonomiczna, Kraków 2011.
9. Knosala R., Inżynieria produkcji, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2017.
10. Strona internetowa: [http://www.ptzp.org.pl/files/konferencje/kzz/artyk\\_pdf\\_2016/T1/t1\\_0730.pdf](http://www.ptzp.org.pl/files/konferencje/kzz/artyk_pdf_2016/T1/t1_0730.pdf) [dostęp 30.12.21].
11. Strona internetowa: <https://www.exapro.pl/3d-systems-projet-660-pro-system-p80618007/#prettyPhoto> [dostęp 30.12.2021].
12. K. Szczepańska Zarządzania Jakością. W dążeniu do doskonałości, Wydawnictwo C.H.Beck, Warszawa, 2011.
13. B. Gajdzik, B. Jama. Analiza strategiczna w procesie zarządzania przedsiębiorstwem. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.



## Poprawa własności eksploatacyjnych powierzchni materiałów narzędziowych przy użyciu obróbki laserowej

P. Złotoś<sup>a</sup>, A. Ramos<sup>a</sup>, K. Czupryńska<sup>a</sup>, R. Bednarczyk<sup>a</sup>, N. Cieślińska<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

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

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

**Streszczenie:** W artykule opisano warunki techniczne i technologiczne przetapiania warstwy wierzchniej stali narzędziowej stopowej do pracy na gorąco X40CrMoV5-1 laserem diodowym dużej mocy (HPDL) oraz zależności między parametrami obróbki laserowej, a własnościami trybologicznymi.

**Abstract:** The paper describes the technical and technological conditions for remelting the surface layer of X40CrMoV5-1 hot-working alloy tool steel by high-power diode laser (HPDL) and the relationship between the laser processing parameters and tribological properties.

**Słowa kluczowe:** laser diodowy dużej mocy HPDL, parametr obróbki laserowej, własności trybologiczne, X40CrMoV5-1, przetapianie warstwy wierzchniej

### 1. WSTĘP

Inżynieria powierzchni jest dziedziną od inżynierii materiałowej, której celem jest badanie struktur warstw wierzchnich materiałów [1]. Zajmuje się także procesami, które mają na celu zmianę ich właściwości, a także trybologicznym zużyciem powierzchni.

Warstwa wierzchnia głównie decyduje o trwałości narzędzi, stąd tak ważne jest jej odpowiednia obróbka i zabezpieczenie. Szybsze zużywanie się powierzchni prowadzi do znacznego obniżenia ich trwałości.

Proces tarcia występuje podczas stykania się dwóch powierzchni ciał stałych w trakcie działania sił. Tarcie jest siłą, która przeciwstawia się ruchowi. Skutki powstałe w wyniku tarcia, prowadzą do dalszych uszkodzeń materiału. Zmniejsza się odporność korozyjna, a także erozyjna.

Materiały takie jak stale stopowe do pracy na gorąco przeznaczone są do pracy w środowisku, gdzie temperatura zawiera się w granicach 250-700°C. Najczęściej wykorzystywane są jako stale [2]:

- na noże do cięcia na gorąco,
- matryce pras do wyciskania,
- pras kuźniczych,
- na formy do odlewania pod ciśnieniem,
- formy do produkcji i obróbki plastycznej metali w postaci stałej i ciekłej.

Ze względu na środowisko pracy, muszą się one charakteryzować wysoką odpornością na korozję, pęknięcia, twardością, żaroodpornością, ścieranie oraz wysoką wytrzymałością, ciągliwością, niezawodnością i trwałością.

Laserowe przetapianie powierzchni jest szybkim procesem, w którym tylko część energii cieplnej przenika w głąb materiału, przez co powstaje duża różnica temperatury pomiędzy warstwą ciekłą na powierzchni i materiałem w stanie stałym. W czasie przetapiania następuje intensywne mieszanie ciekłego metalu wskutek ruchów konwekcyjnych, wywołanych różnicą temperatury oraz wskutek intensywnego podmuchu gazu osłonowego. Materiał przetopiony szybko krzepnie. Laserowe przetapianie warstw wierzchnich materiałów prowadzi do uzyskania dużej odporności na tarcie, korozję i erozję. Polepszenie własności następuje w wyniku tworzenia jednorodnej chemicznie, drobnokrystalicznej warstwy wierzchniej bez zmian składu chemicznego materiału. [3]

Celem pracy jest określenie warunków technicznych i technologicznych przetapiania warstwy wierzchniej stali narzędziowej stopowej do pracy na gorąco X40CrMoV5-1 laserem diodowym dużej mocy (HPDL) oraz zależności między parametrami obróbki laserowej, a własnościami trybologicznymi.

### 1.1. LASER DIODOWY HPDL

Wymagania stawiane stalom narzędziowym, stopowym do pracy na gorąco, powodują zwiększone zainteresowanie prowadzeniem badań i prac dążących do polepszeniem własności warstw wierzchnich. Obecnie lasery diodowe dużej mocy stosuje się m.in. do lutowania, hartowania, spawania, przetapiania, stopowania, wtapiania oraz różnych zastosowań obróbki powierzchniowej stopów metali. Proces obróbki powierzchni metali przedstawiono na rysunku nr 1. [3].

Dynamiczny rozwój technik oraz urządzeń laserowych spowodował coraz częstsze wykorzystywanie w przemyśle laserowej obróbki, m.in. za pomocą lasera diodowego dużej mocy HPDL (High Power Diode Laser). Jest on jednym z najbardziej nowoczesnych źródeł energii o pracy ciągłej i Nd:YAG o pracy impulsowej wykorzystywanym na skalę światową od 1998 roku. Laser ten charakteryzuje się bardzo wysokim współczynnikiem absorpcji promieniowania, wysoką sprawnością energetyczną i niezawodnością [4]. Umożliwia on uzyskanie przetapianie o szerokości do 6,8 mm oraz zbliżony do liniowego. Zastosowanie laserowego przetapiania wierzchnich warstw powoduje polepszenie własności wierzchnich przetopionego materiału. Technologia laserowa HPDL stwarza możliwości dalszego rozwoju oraz znacznego rozszerzenia zastosowania technologii obróbki powierzchniowej [5-9].

Przed 1998 rokiem HPDL był zorientowany przede wszystkim na badania. Szczególną uwagę poświęcono żywotności, która przy poziomie mocy 50W wzrosła z 2000 godzin do

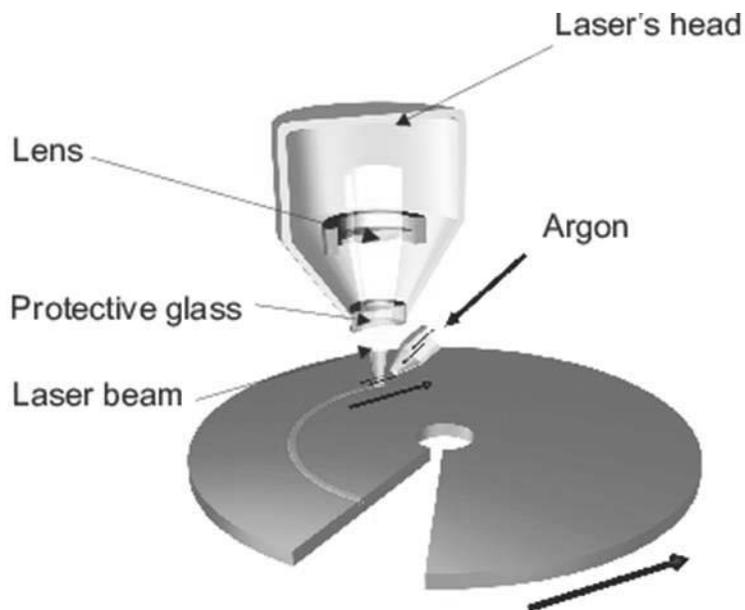
10 000 godzin. Wprowadzano liczne lasery diodowe i stojaki do wypalania dedykowane do generowania danych. Z biegiem czasu poprawiła się jakość HPDL, sprawność elektrooptyczna półprzewodnika i poprawa zdolności do odprowadzania ciepła z półprzewodnika [11].

Najefektywniejsze są lasery diodowe dużej mocy o sztucznym źródle światła znaczną część energii elektrycznej zamieniały na ciepło, dopiero po powstaniu programu SHEDS w USA oraz opracowaniu przez Jenoptik struktury lasera diodowego o bardziej wydajnym materiale lasera diodowego oraz umiarkowanym wzroście wydajności wtyczki ściennej (WPE) od 50% do 60% pozwoliła uzyskać 50% większą optyczną moc wyjściową przy identycznym odprowadzaniu ciepła. Poprawa wydajności materiału półprzewodnikowego w wielu przypadkach prowadzi do wad innych właściwości, takich jak modyfikacje falowodu i studni kwantowej. Zwłaszcza szybka rozbieżność osi wpływa na właściwości. Zrozumienie wewnętrznej struktury i wzajemnych oddziaływań na wydajność lasera diodowego jest kluczowa dla dalszego rozwoju, w szczególności wiedza, że wydajność półprzewodników i jakość montażu to kluczowe obszary dalszej poprawy większość rozwiązań [11].

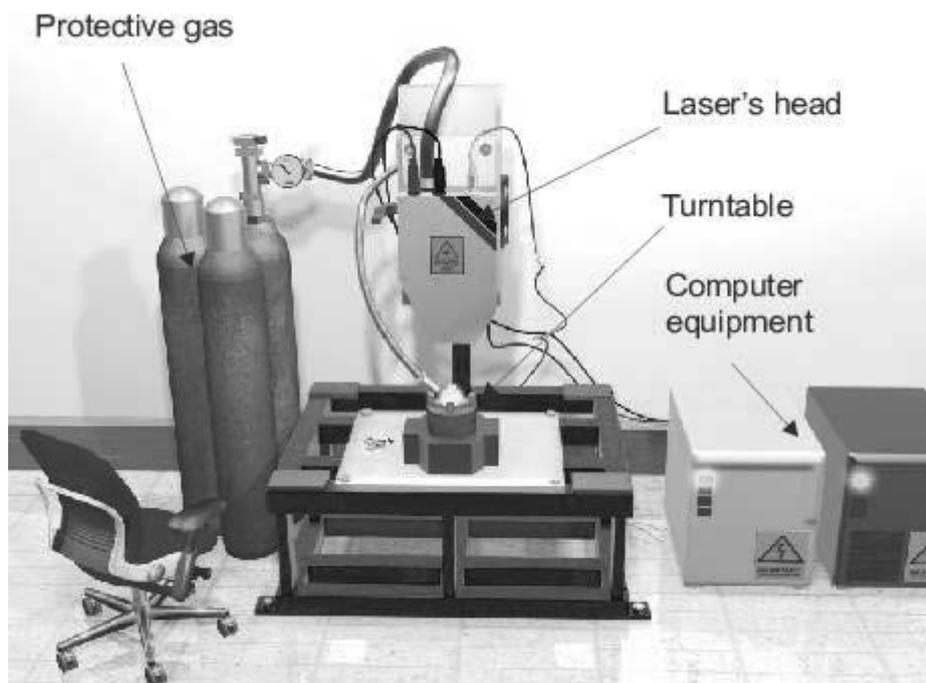
Ulepszenia budowy i działania HPDL można zauważyć porównując standard branżowy konstrukcja pasywnie chłodzonych laserów diodowych (CS) z projektem (CH) lasera diodowego o wydajniejszym materiale lasera diodowego oraz umiarkowanym wzroście wydajności wtyczki ściennej, stwierdzono, że przedłużenie radiatora w kierunku do przodu poprawia rozprowadzanie ciepła, zmniejszając temperaturę złącza przy pracy 120 W o około 8 tys., co podwaja oczekiwaną żywotność ze względu na zmniejszona do 50% szybkość degradacji. Lepsza konstrukcja CH pozwala na wprowadzenie dodatkowego odprowadzania ciepła od strony stykowej na laser diodowy. Sprawność wtyczki ściennej sięga 63% przy około 160 W mocy optycznej. W celu lepszego odprowadzania ciepła alternatywą jest zamiast zwiększania mocy, obsługa lasera diodowego w podwyższonych temperaturach chłodzenia. Dokonano takiego rozwiązania z pomocą modułu sprzężonego z włóknami, który zapewnia moc 100 W przy 915 nm od 0,4 mm włóknach. Wydajność wtyczki ściennej spada w porównaniu z chłodzeniem wodnym, ale zaawansowane chłodzenie półprzewodnika utrzymuje temperaturę złącza wystarczająco nisko, aby oczekiwać życia co najmniej 20 000 godzin. Całkowita wydajność wtyczki ściennej modułu światłowodowego w wymuszonym obiegu powietrza schłodzona jest powyżej 42% [11]. Przykładowa budowa lasera HPDL, wraz z rozmieszczeniem sprzętu potrzebnego do prawidłowej pracy urządzenia przedstawiono na rysunku nr 2.

Zaletą laserów HPDL jest:

- Uzyskanie różnych kształtów ogniska wiązki laserowej jak np.: prostokątnego, kwadratowego, liniowego lub kołowego,
  - Otrzymanie kontrolowanego rozkładu energii w miejscu ogniskowania przy gęstości mocy do 105W/cm<sup>2</sup>,
  - Stabilność pracy,
  - Łatwość w sterowaniu,
  - Wysoki współczynnik absorpcji promieniowania,
  - Niewielkie gabaryty,
  - Nie wymagają prowadzenia wiązki laserowej przez złożone układy optyczne powodujące straty energii od 10 do 30%,
    - Stosunkowo niska cena urządzenia,
    - Trwałość urządzenia na poziomie powyżej 10 000h,
    - Łatwość obsługi (jedynie czyszczeniem układu optycznego),
    - Mobilność [10].



Rysunek 1. Budowa głowicy lasera HPDL i przebieg procesu obróbki metalu [5].  
*Figure 1: HPDL laser head design and metal processing flow [5].*



Rysunek 2. Budowa i rozmieszczenie elementów składowych wyposażenia lasera HPLD [5].

*Figure 2: Construction and arrangement of HPLD laser equipment components [5].*



## 1.2. WARUNKI TECHNICZNE I TECHNOLOGICZNE PODCZAS PRZETAPIANIA WARSTWY WIERZCHNIEJ STALI NARZĘDZIOWEJ DO PRACY NA GORĄCO

Do badania laserem diodowym dużej mocy wykorzystano próbkę w postaci prętów o średnicy 75mm X40CrMoV5-1, która została otrzymana z wytopu próżniowego. Proces technologiczny rozpoczął się od wytoczenia próbki o średnicy 70mm i grubości 6mm. Przetapianie próbek przeprowadzono przy stałej prędkości przetapiania 0,5 m/min, zmieniając moc wiązki laserowej w zakresie 1,4 – 2,5 kW. Próbki poddano piaskowaniu oraz obróbce mechanicznej na szlifierce magnetycznej. W tablicy 1 przedstawiono przebieg badania laserem HPLD.

Tablica 1. Warunki technologiczne procesu

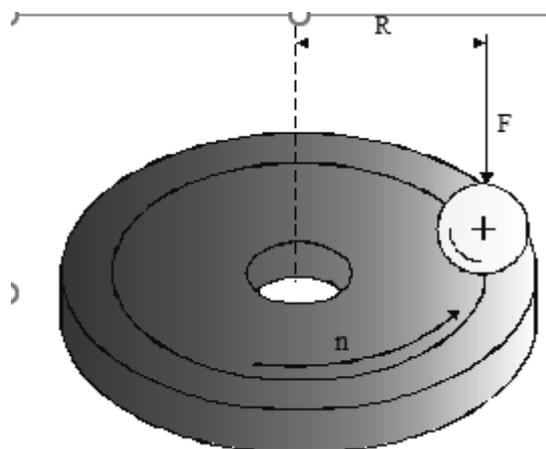
Table 1: Technological conditions of the process

Proces	Opis/Przebieg
Austenitzowanie	W kąpeli solnej
Odpuszczanie	W piecu komorowym z atmosferą ochronną argonu
Austenitzowanie	Stopniowe podgrzewanie do temp. Austenitzowania i wytrzymanie w temp. 650°C przez 15 min
Austenitzowanie	Podgrzanie Do temp. 1060°C
Chłodzenie	W gorącym oleju
Hartowanie i odpuszczanie	W temp. 510-660°C ze stopniowaniem co 30°C, każdorazowo przez 2 godziny

Powierzchnie próbek piaskowano i poddano obróbce mechanicznej na szlifierce magnetycznej. Przetapianie próbek przeprowadzono przy stałej prędkości przetapiania 0,5 m/min, zmieniając moc wiązki laserowej w zakresie 1,4 – 2,5 kW. Wykonano po dwie ścieżki przetopienia na każdej z powierzchni czołowych próbek o promieniu 12 i 22 mm.

Doświadczalnie określono, iż pełną osłonę obszaru przetopień zapewnia nadmuch argonu o natężeniu przepływu gazu 20 l/min przez dyszę kołową o średnicy  $f$  12mm, skierowaną przeciwnie do kierunku przetapiania. Po przetapianiu powierzchnie próbek szlifowano w celu uzyskania chropowatości określonej przez normę ASTM G99-90.

Badania odporności na zużycie ściernie suche metodą pin-on-disk przeprowadzono na urządzeniu CSEM High Temperature Tribometer ze sterowaniem komputerowym. Schemat działania testera typu kula – tarcza przedstawia rysunek 3. Testowy węzeł tarcia składa się z tarczy – próbki obracającej się z prędkością obrotową  $n$  i kulki dociskanej do tej tarczy siłą  $F$  w punkcie odległym o  $R$  od środka obrotu tarczy. Podczas biegu badawczego mierzona była siła tarcia występująca między kulka i tarczą. Na podstawie badań wstępnych ustalono następujące warunki testu: najmniejsze rozrzuty wyników, a także stabilne charakterystyki trybologiczne uzyskano dla przeciwpróbki w postaci kulki o średnicy 6 mm z tlenku glinu  $Al_2O_3$ . W badaniu tym nieruchoma kulka, dociskana była do obracającej w płaszczyźnie poziomej tarczy siłą 10N. Prędkość poślizgu wynosiła 0,5 m/s, promień tarcia wynosił od 11 do 22 mm, a optymalną drogę tarcia ustalono na 1000 m. Przyjęto temperaturę otoczenia 23°C, oraz wilgotność względną powietrza 50 %.



Rysunek 3. Schemat działania testera typu kula-tarcza  
 Figure 3: Schematic of the bullet-disk type tester

Pomiarów ubytku masy próbek dokonano na wadze elektronicznej Mettler AT 201, oczyszczając próbki z produktów zużycia w strefie tarcia strumieniem sprężonego powietrza.

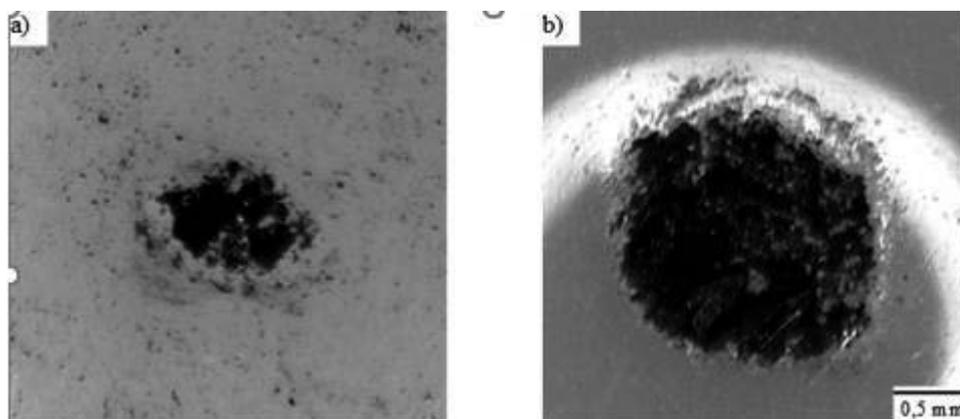
Analizy pola powierzchni wytarcia przeciwpróbki (kulki  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dokonano przy pomocy mikroskopu świetlnego z systemem analizy obrazu Image – Pro Measure Version 1.3 przy powiększeniu 50x.

Profile zużycia próbek wykonano na profilografometrze laserowym Taylor – Hobson Form Talysurf 120L w zakresie głębokości od  $5\ \mu\text{m}$  do  $20\ \mu\text{m}$  i długości pomiarowej od  $500\ \mu\text{m}$  do  $1755\ \mu\text{m}$  w trzech płaszczyznach co  $120^\circ$ .

### 1.3 WNIOSKI

#### Wnioski z badań są następujące:

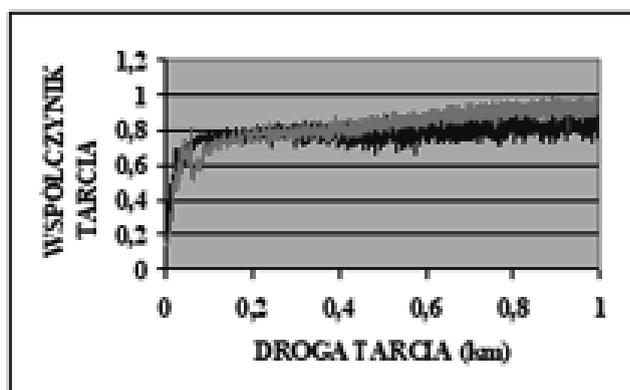
- Widoczny jest wyraźny wpływ przetapiania warstwy wierzchniej laserem na zmniejszenie współczynnika tarcia w stosunku do materiału poddanego jedynie standardowej obróbce cieplnej (Rysunek 5).
- Możliwe jest uzyskanie mniejszego o ok. 20% współczynnika tarcia w skojarzeniu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  z przetopioną laserowo warstwą wierzchnią stali (Rysunek 6).
- Z analizy wyników badania ubytku masy próbek w zależności od mocy wiązki lasera przy przetapianiu warstwy wierzchniej wynika, iż zużycie masowe próbek przetapianych jest dwukrotnie niższe i wynosi od  $0,4\ \text{mg}$  do  $0,8\ \text{mg}$  w porównaniu z materiałem niepodanym przetapianiu laserowemu, dla którego wynosi  $1,4$
- Zastosowanie laserowego przetapiania prowadzi do zmniejszenia masowego zużycia próbek podczas testu w wyniku wolniejszego wydzielania produktów zużycia.
- Moc wiązki lasera nie ma wyraźnego wpływu na zużycie masowe przetapianych próbek. (rysunek 7)
- Nastąpił wzrost pola powierzchni śladu zużycia przeciwpróbki ( $0,170$  do  $0,240\ \text{mm}^2$ ) w trakcie kontaktu z przetopioną laserowo warstwą wierzchnią.
- Pole śladu zużycia przeciwpróbki w kontakcie ze stalą X40CrMoV5-1 po standardowej obróbce cieplnej jest ok. dwukrotnie mniejsze (ok.  $0,094\ \text{mm}^2$ ) (Rysunek 4).



Rysunek 4. Ślad zużycia przeciwpróbki  $Al_2O_3$  po 1000m drogi tarcia: a) o warstwę wierzchnią stali po standardowej obróbce cieplnej, b) o warstwę wierzchnią stali po przetapianiu wiązką lasera o mocy 2,3 kW

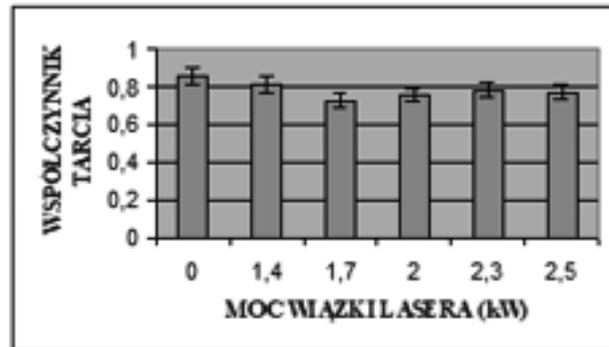
Figure 4: Wear trace of  $Al_2O_3$  counterexample after 1000m friction path: a) against steel surface layer after standard heat treatment, b) against steel surface layer after remelting with 2.3 kW laser beam

- Moc wiązki lasera podczas stopowania nie wpływa znacząco na pole powierzchni wytarcia przeciwpróbki z  $Al_2O_3$
- Przetapianie laserowe ma wpływ na głębokość przekroju poprzecznego ścieżki zużycia, które dla materiału nieprzetopionego wynosiła ok. 4  $\mu m$  natomiast dla warstwy wierzchniej przetopionej wiązką lasera o mocy 1,7 kW uzyskała wartość 1,8  $\mu m$  (rysunek 9)
- Nie stwierdzono wyraźnego wpływu mocy wiązki lasera podczas przetapiania na własności trybologiczne warstwy wierzchniej stali narzędziowej stopowej do pracy na gorąco X40CrMoV5-1
- Zastosowanie lasera HDPL w celu modyfikacji warstwy wierzchniej ma wpływ na poprawę własności trybologicznych.



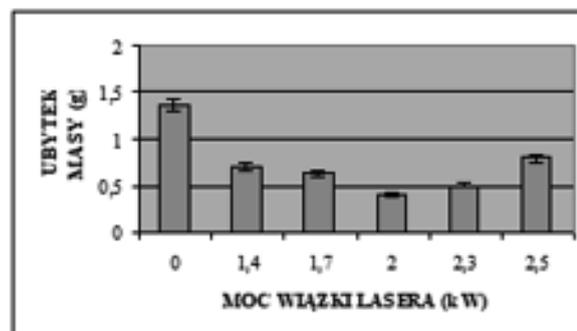
Rysunek 5. Charakterystyki tarcia skojarzenia  $Al_2O_3$  i warstwy wierzchniej stali X40CrMoV5-1

Figure 5: Friction characteristics of the  $Al_2O_3$  association and the surface layer of X40CrMoV5-1 steel



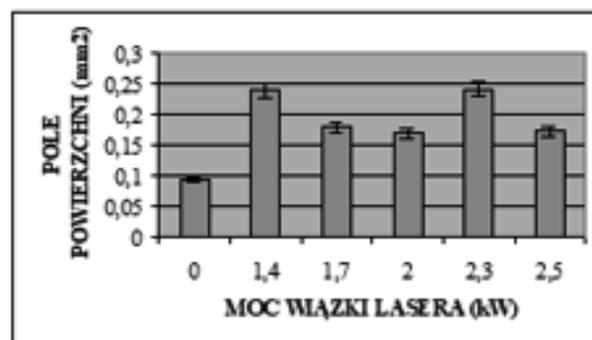
Rysunek 6. Porównanie wyników pomiaru współczynnika tarcia w zależności od mocy wiązki lasera użytej do przetapiania stali

Figure 6: Comparison of friction coefficient measurement results as a function of the laser beam power used to melt the steel



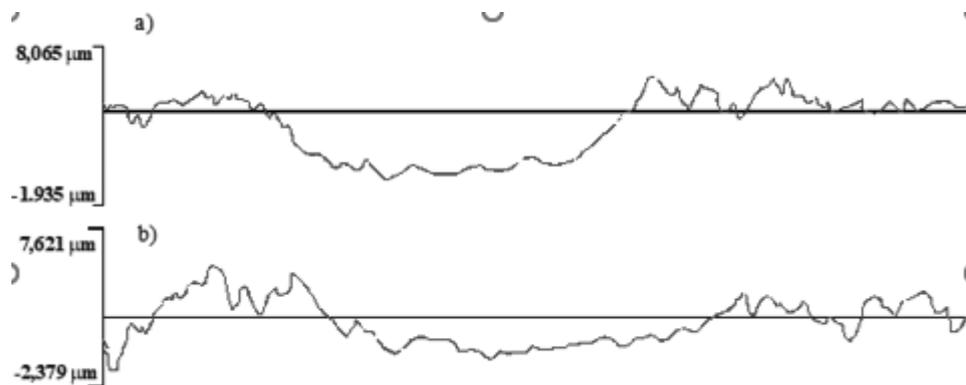
Rysunek 7. Wyniki pomiaru średniego ubytku masy próbki w zależności od mocy wiązki lasera

Figure 7: Results of average sample weight loss as a function of laser beam power



Rysunek 8. Porównanie pola powierzchni śladu zużycia przeciwpróbki  $Al_2O_3$

Figure 8: Comparison of the area of the wear trace of the  $Al_2O_3$  counterexample



Rysunek 9. Przykładowy profil zużycia a) warstwy wierzchniej stali po standardowej obróbce cieplnej, b) warstwy wierzchniej stali po przetopieniu wiązką lasera o mocy 1,7 kW

Figure 9: Example wear profile of (a) steel surface layer after standard heat treatment, (b) steel surface layer after remelting with a 1.7 kW laser beam

## PODSUMOWANIE

Badania dotyczyły wpływu parametrów przetapiania na własności trybologiczne warstwy wierzchniej stali X40CrMoV5-1 przy użyciu lasera diodowego dużej mocy HPDL. Przedstawiono również wpływ parametrów przetapiania na wyniki pomiaru współczynnika tarcia oraz ilościowy pomiar zużycia metodą wagową, metodą analizy pola powierzchni wytarcia przeciwpróbki i metodą profilografowania. Stal do pracy na gorąco X40CrMoV5-1 jest jedną z najczęściej używanych stali do produkcji matryc ze względu na jej dobre właściwości termiczne, zmęczenie, korozję i odporność na zużycie. Wykorzystany laser jest jednym z najbardziej nowoczesnych źródeł energii o pracy ciągłej i impulsowej na skale światową. Zastosowanie tego lasera posiada taką zaletę, że przy przetapianiu wierzchnich warstw polepszają się własności warstw wierzchnich przetopionego materiału.

## PODZIĘKOWANIE

Praca powstała w wyniku realizacji projektu w ramach kształcenia zorientowanego projektowo - PBL, w konkursie V w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza, Politechnika Śląska. Praca jest efektem współpracy na mocy umowy międzynarodowej pomiędzy Politechniką Śląską i Chmielnickim Uniwersytetem Narodowym na Ukrainie.

## LITERATURA

1. Antoszewski B., Inżynieria Powierzchni. Wybrane Zagadnienia, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Kielce 2011.
2. Strona internetowa: <https://virgamet.pl/stale-narzedziowe-do-pracy-na-goraco-stopowe> [dostęp 02.01.2022]

3. L.A. Dobrzański, T. Tański, A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, M. Król, S. Malara, J. Domagała-Dubiel, Laserowa obróbka powierzchniowa stopów Mg-Al-Zn , Open Access Library, Volume 5 (11), 2012
4. Strona internetowa: <https://www.wnp.pl/wiadomosci/poprawa-wlasnosci-warstwy-wierzchniej-stali-narzedziowej-stopowej-do-pracy-na-goraco-metoda-obrobki-laserowej,-4424.html> [dostęp 02.01.2022]
5. M. Bonek, L.A. Dobrzański, E. Hajduczek, A. Klimpel, Structure and properties of laser alloyed surface layers on the hot-work tool steel, Journal of Materials Processing Technology 175 (2006)
6. L.A. Dobrzański, K. Labisz, M. Piec, J. Lełątko, A. Klimpel, Structure and Properties of the 32CrMoV12-28 Steel Alloyed with WC Powder using HPDL Laser, Materials Science Forum 530- 531 (2006) 334-339
7. L.A. Dobrzański, K. Labisz, A. Klimpel, Comparison of Mechanical Properties of the 32CrMoV12- 28 Hot Work Tool Steels Alloyed with WC, VC and TaC Powder Using HPDL Laser, Key Engineering Materials 324-325 (2006) 1233-1236.
8. L.A. Dobrzański, M Piec, A. Klimpel, Z. Trojanowa, Surface modification of hot work tool steel by high-power diode laser, International Journal of Machine Tools and Manufacture 47/5 (2007) 773-778.
9. L. A. Dobrzański, A. D. Dobrzańska-Danikiewicz, Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich, Open Access Library, Volume 5, 2011
10. Strona internetowa: <https://docplayer.pl/61693439-.html> [dostęp 02.01.2022]
11. D. Wolff, K. Stolberg, H. U.Zuhlke, High Power Diode Lasers and Current Applications Enabling features for DPSSL and laser micro processing, LASERSYSTEMSMay 2009 No. 3, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany



28 stycznia 2022  
Gliwice

KATEDRA MATERIAŁÓW INŻYNIERSKICH I BIOMEDYCZNYCH  
WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY  
POLITECHNIKA ŚLĄSKA

## MIĘDZYNARODOWA STUDENCKA KONFERENCJA NAUKOWA

### **Budowa stanowiska do badań technologicznych drutów wraz z badaniami przelomów i własności wytrzymałościowych**

P. Falkowska, M. Rejek, D. Tatar, K. Tobolik, M. Stachura, D. Werenc, J. Mazurkiewicz

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, SKN Mikroskopii Światłowej i Elektronowej, Studenci Kierunku Inżynieria Materiałowa i Mechanika i Budowa Maszyn  
email: Janusz.Mazurkiewicz@polsl.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań oraz wnioski uzyskane w wyniku realizacji projektu SKN pt. „Budowa stanowiska do badań technologicznych drutów wraz z badaniami przelomów i własności wytrzymałościowych” realizowanego ze środków pozyskanych w konkursie IDUB Politechniki Śląskiej. Celem projektu była renowacja nieużywanych i niesprawnych urządzeń do testów własności technologicznych drutów. W ramach projektu wykonano diagnostykę niesprawnych urządzeń, wykonano plan modernizacji i przeprowadzono ją fizycznie. W wyniku realizacji projektu pozyskano dla celów dydaktycznych dwa stanowiska badawcze, które wzmocnią potencjał Pracowni Badań Własności Technologicznych Materiałów w Katedrze Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych.

**Abstract:** The article presents the research results and conclusions obtained as a result of the SKN project entitled "Construction of a stand for technological tests of wires together with research on breakthroughs and strength properties" carried out with funds obtained in the IDUB competition of the Silesian University of Technology. The aim of the project was to renovate and build stands for testing the strength properties of hard and soft steel wires.

**Słowa kluczowe:** własności technologiczne materiałów, próba skręcania drutów, próba przeginanania drutów, druty miękkie, druty twarde, stanowiska dydaktyczne, badania materiałów,

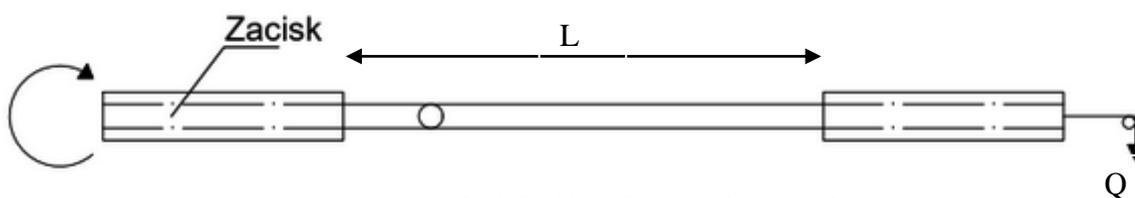
### **1. WSTĘP**

Poniższy artykuł przedstawia rezultaty pracy nad projektem poświęconym odrestaurowaniu i dostosowaniu do aktualnych warunków BHP dwóch urządzeń do badań technologicznych. Poza samym przygotowaniem stanowisk badawczych podjęto badania zmierzające do oceny własności technologicznych drutów stosowanych na wyroby w przemyśle maszynowym i budowlanym. Przeprowadzeniu próby skręcania jednokierunkowego drutów oraz próby liczby przegięć drutów. Po testach technologicznych dokonano analizy przelomów uzyskanych w w/w próbach w skaningowym mikroskopie elektronowym oraz na mikroskopie cyfrowym.

## 2. METODYKA BADAŃ

### 2.1 PRÓBA JEDNOKIERUNKOWEGO SKRĘCANIA DRUTÓW

Próba jednokierunkowego skręcania drutów o średnicy pomiędzy 0,3 mm do 5 mm jest przeprowadzana w celu określenia podatności drutów na odkształcenia plastyczne, wykrycia wad materiałów, niejednorodności oraz błędów obróbki termicznej lub plastycznej [1, 2, 3]. Tego typu próby są ważne dla producentów wyrobów z drutów ponieważ dostarczają informacji o poziomie plastyczności drutów i odporności na wielokrotne skręcanie. Cała próba polega na skręcaniu próbki, która jest zamocowana w uchwytach skrecarki (rys.1). Uchwyt skrecarki jest wstępnie napięta siłą  $Q$  (stałe obciążenie rozciągające, wystarczające do jej wyprostowania, ale nie przekraczające 2% wartości nominalnego obciążenia zrywającego drut) ze stałą prędkością do momentu pęknięcia, bądź osiągnięcia oczekiwanej liczby skręceń. Tego typu próby opisano w archiwalnych normach PN-75/M-80003.



Rys. 1. Idea próby jednokierunkowego skręcania drutów

Próbkę należy przeprowadzać w temperaturze 10-35°C. Próbkę, którą chcemy przeprowadzić w warunkach znormalizowanych powinny być wykonane w temperaturze 23°C±5°C. Urządzenie do badań liczby skręceń nazywamy skrecarką. Badania polegają zamocowaniu próbki drutu o odpowiedniej długości podanej w tabelicy 1, zamocowanej w uchwycie samocentrującym z jednej strony nieruchomym poddanym obciążeniu  $Q$ , a z drugiej strony obracającym się z prędkością w zależności od średnicy drutu i jego materiału podaną w tabelicy 2.

Tablica 1. Odległość  $L$  między zaciskami w zależności od średnicy  $d$  drutu [mm]

Średnica nominalna $d$ [mm]	Odległość między zaciskami [mm]
$0,3 \leq d < 1$	200 $d$
$1 \leq d < 5$	100 $d$
$5 \leq d$	50 $d$

Tablica 2. Prędkość skręcania w zależności od średnicy drutu i rodzaju materiału

Średnica $d$ [mm]	Maksymalna liczba skręceń na sekundę		
	Stal	Miedź i stopy miedzi	Aluminium i stopy aluminium
$d < 1$	3	5	1
$1 \leq d < 3,0$	1	2	



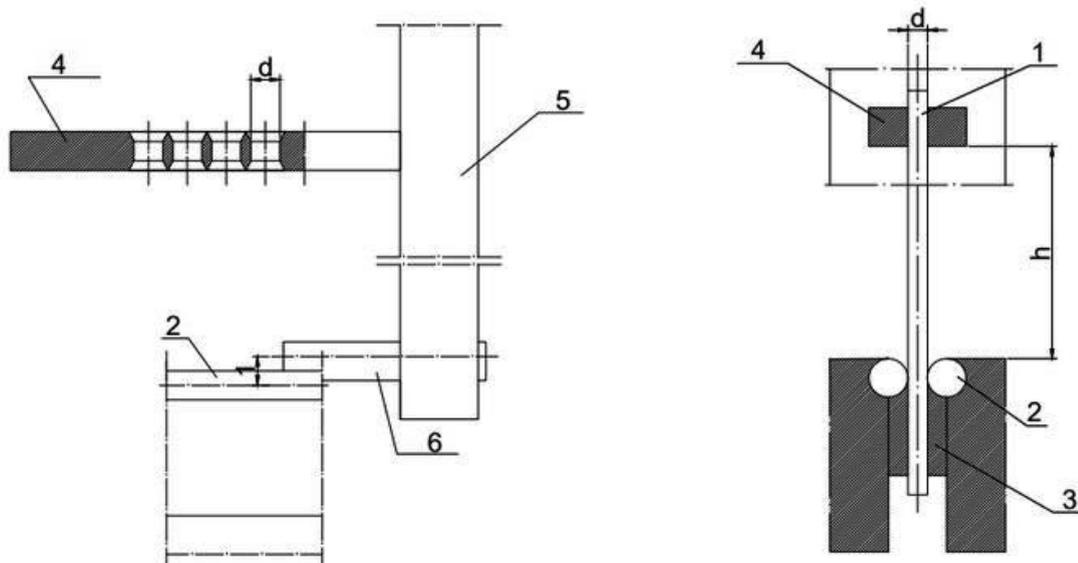
Tablica 2. Prędkość skręcania w zależności od średnicy drutu i rodzaju materiału (cd)

Średnica d [mm]	Maksymalna liczba skręceń na sekundę		
	Stal	Miedź i stopy miedzi	Aluminium i stopy aluminium
$1,5 \leq d < 3,0$	1	1,5	1
$3,0 \leq d < 3,6$		1	
$3,6 \leq d < 5,0$			
$5,0 \leq d < 10,0$	0,5	0,5	

## 2.2 PRÓBA DWUKIERUNKOWEGO PRZEGINANIA DRUTÓW

Próbę wielokrotnego przeginania drutów opisano w archiwalnej normie PN-75/M-80003. W niniejszej pracy wykonano badania drutów o średnicy  $d = 0,8; 0,9$  oraz  $1,0$  mm. Badania wykonano na wyremontowanym przyrządzie badawczym, który usprawniono i udostępniono do celów dydaktycznych dla studentów Wydziału Mechanicznego Technologicznego. Druty do badań w różnym stanie dostawy (miękkie i twarde) pozyskano dzięki uprzejmości producenta Firmy Urban-Metal Sp. z o.o. z Rachowic. Badania podobnie jak dla próby skręcania prowadzono na drutach stalowych gołych (niepokrywanych) o przekroju okrągłym, ciągniętych na zimno ze stali niestopowej niskowęglowej ( $C_{max} = 0,10\%$ ) ogólnego przeznaczenia, wykonanych zgodnie z normą PN-EN 10218-2 ze stali S235JRG2 (wg PN-EN 10025). Druty twarde są utwardzone w wyniku procesu ciągnięcia, bez obróbki termicznej. Wytrzymałość na rozciąganie drutów twardych zawiera się w granicach od 620 do 1100 MPa, co sprzyja procesom gięcia na dalszych etapach obróbki jednocześnie zapewniając dobrą sztywność wykonanych elementów. Podstawowe zastosowania tego rodzaju drutu to siatki, sita, gwoździe oraz elementy gięte dla przemysłu meblarskiego i budowlanego. Druty miękkie zostały poddane obróbce cieplnej po procesie ciągnięcia - wyżarzaniu. Dzięki niskiej wartości  $R_m$  (w granicach 330-450 MPa) drut ma możliwość wielokrotnego gięcia bez pęknięcia. Drut jest wyżarzany atmosferze beztlenowej w temperaturze ok. 740 °C. Typowe zastosowania: drutów miękkich to wiązania elementów zbrojarskich w budownictwie, drut prowadzący w plantacjach uprawy warzyw i owoców oraz do produkcji choinek, wieńców ozdobnych. Badania prowadzono pod kątem oceny plastyczności technologicznej analizowanych drutów (przydatności drutu o procesie technologicznego). Samo badanie liczby przegięć pozwoliło zidentyfikować różnice pomiędzy plastycznością drutów w stanie miękkim oraz twardym. Skłonność próbek do odkształcenia plastycznego pozwoliła ocenić liczbę przegięć.

Strukturę przelomów i ewentualne wady analizowano w skaningowym mikroskopie elektronowym Supra 35. Próba dwukierunkowego przeginania została przeprowadzona na przyrządzie, którego schemat przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat przyrządu do przeginania drutu: 1 – próbka, 2 - wałki wymienne w zależności od średnicy badanego drutu, 3- wkładka wymienna, 4 - prowadnica, 5 ramię dźwigni, 6- oś dźwigni, d- średnica drutu, h odległość między górną płaszczyzną do wałków zginających a dolną powierzchnią prowadnicy

Przyrząd do przeginania drutów (rys. 3) wyposażony jest w zestaw wymiennych płytek z wałkami (rys. 2 p.2) oraz prowadnicę o wymiarach od średnicy drutu (rys. 2 p.4). Średnica drutu wyznacza wymaganą odległość  $h$  między prowadnicą a górną powierzchnią wałków gnących. Górna krawędź uchwytu powinna znajdować się poniżej osi wałków zginających w odległości  $y$  równej 1,5 mm dla wałków o promieniu do 2,5 mm i wynoszącej 3,0 mm dla wałków o promieniu większym.

Tablica 3. Parametry ustalane w próbie przeginania wg rys. 2

Oznaczenie	Określenie	Jednostka
d	średnica drutu okrągłego	mm
h	odległość pomiędzy dolną powierzchnią prowadnicy, a górną płaszczyzną styczną do wałków zginających	mm
g	najmniejsza grubość drutu o przekroju nieokrągłym, umieszczonego między równoległymi uchwytami	mm
r	promień wałków zginających	mm
y	odległość osi wałka zginającego od górnej powierzchni uchwytu	mm
$d_g$	średnica otworu prowadnicy	mm

Długość wyprostowanej przed badaniem próbki powinna wynosić od 100 do 150 mm, w tym przypadku do badań przyjęto długość 120 mm.

Próba dwukierunkowego przeginania drutu polega na wielokrotnym przeginaniu zaciśniętej w szczękach urządzenia i przesuniętej przez otwór przewodnicy próbki. Z ustawienia wyjściowego (pionowego) próbkę przegina się w prawo o  $90^\circ$  za pomocą dźwigni do zderzaka i z powrotem do ustawienia wyjściowego licząc taki krok jako pierwsze przegięcie. Następne przegięcie i każde kolejne odbywa się na przemian w lewo i w prawo (do zderzaka i z powrotem do ustawienia wyjściowego) aż do złamania próbki. Próby należy przeprowadzać do uzyskania wyniku zgodnego z liczbą przegięć przedstawioną w normach, bądź do uzyskania widocznego pęknięcia bez konieczności korzystania z przedmiotów powiększających obraz. Przegięcie, w którego czasie dochodzi do pęknięcia próbki nie powinno być wliczane do wyniku.

**Tablica 4. Ogólne warunki zamocowania próbek do próby wielokrotnego przeginania drutu**

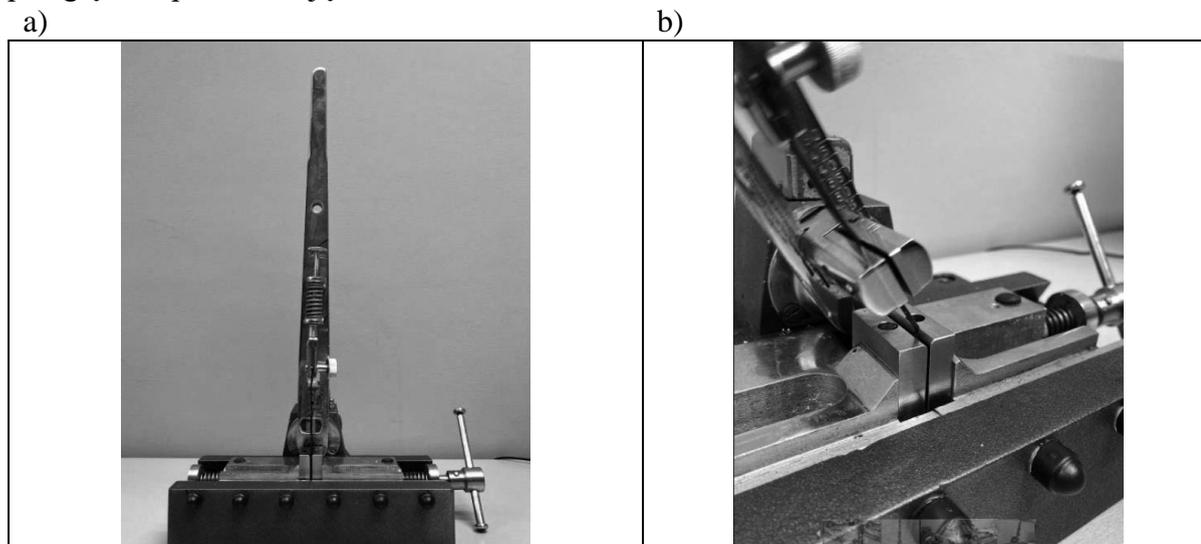
Średnica nominalna lub grubość drutu $d(g)$	Promień wałka zginającego $r$	Odległość $h$	Średnica otworu przewodnicy $d_g$
$0,3 < d(g) \leq 0,5$	$1,25 \pm 0,05$	15	2,0
$0,5 < d(g) \leq 0,7$	$1,75 \pm 0,05$	15	2,0
$0,7 < d(g) \leq 1$	$2,5 \pm 0,1$	15	2,0
$1,0 < d(g) \leq 1,5$	$3,75 \pm 0,1$	20	2,0
$1,5 < d(g) \leq 2,0$	$5,0 \pm 0,1$	20	2,0 i 2,5
$2,0 < d(g) \leq 3,0$	$7,5 \pm 0,1$	25	2,5 i 3,5
$3,0 < d(g) \leq 4,0$	$10 \pm 0,1$	35	3,5 i 4,5
$4,0 < d(g) \leq 6,0$	$15 \pm 0,1$	50	4,5 i 7,0
$6,0 < d(g) \leq 8,0$	$20 \pm 0,1$	75	7,0 i 9,0
$8,0 < d(g) \leq 10,0$	$25 \pm 0,1$	100	9,0 i 11,0

Przebieganie musi odbywać się ze stałą prędkością, która nie może przekroczyć 1 przegięcia na 1 sekundę. Wyjątkiem, który pozwala na zmniejszenie prędkości przeginania jest widoczne nagrzewanie się próbki podczas wykonywania próby.

Próbkę przeginania przeprowadza się w temperaturze otoczenia wynoszącej od  $10^\circ\text{C}$  do  $30^\circ\text{C}$ . Próby w warunkach znormalizowanych powinno się wykonywać w temperaturze  $23 \pm 5^\circ\text{C}$ . Nasza próba została przeprowadzona w temperaturze otoczenia mieszczącej się w sugerowanym znormalizowanym przedziale.

Badania przeprowadzono na próbkach w ilości 5 sztuk z każdego rodzaju drutu na ustawieniu wysokości  $h=35$  mm, czyli odmiennie niż dla zalecanej odległości, która wynosi 15 mm, w celu sprawdzenia różnicy w wynikach. Dla porównania wyników na naszym urządzeniu

przeprowadzono dodatkowe testy dla drutu miękkiego o średnicy 1,0 mm na wysokości zalecanej, czyli 15 mm. Potwierdziły one, że wpływ wysokości  $h$  na uzyskane wartości liczby przegięć nie przekraczają 10%.



Rys. 3. Przyrząd do badania liczby przegięć drutu po modernizacji, a) widok ogólny, b) przyrząd w czasie testu liczby przegięć - szczegół

## 1. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

W ramach niniejszej pracy ze względu na ograniczenia ilościowe przedstawiono wyłącznie wyniki badań liczby przegięć. Są one zbieżne z wynikami liczby skręceń, które przedstawione zostaną w kolejnej publikacji.

Szczegółowe wyniki badań liczby przegięć przedstawiono dla analizowanych drutów przedstawiono w tabelicy 5. Przy dużych rozrzutach wyników dla danej partii wykonywano więcej niż 3 testy. Wyniki liczby przegięć drutów twardych były jak się spodziewano różne od wyników dla drutów miękkich.

Tablica 5. Szczegółowe wyniki liczby przegięć w próbie przeginania dla badanych próbek drutów

Oznaczenie próbki	Średnia liczba przegięć	Wysokość $h$
T 1,0 I	6	35
T 1,0 II	4	35
T 1,0 III	5	35
T 1,0 IV	3	35
T 1,0 V	3	35
T 0,8 I	5	35
T 0,8 II	6	35
T 0,8 III	6	35

Oznaczenia próbek: M - miękki drut; T - twardy drut; 0,8; 0,9; 1,0 - średnica drutu; I, II, III ... VIII - numery próbek dla kolejnych z tej samej partii

Tablica 5. Szczegółowe wyniki liczby przegięć w próbie przeginania dla badanych próbek drutów (cd)

Oznaczenie próbki	Średnia liczba przegięć	Wysokość h
T 0,8 IV	6	35
T 0,8 V	5	35
M 0,8 I	7	35
M 0,8 II	8	35
M 0,8 III	13	35
M 0,8 IV	9	35
M 0,8 V	10	35
M 0,9 I	12	35
M 0,9 II	10	35
M 0,9 III	10	35
M 0,9 IV	9	35
M 0,9 V	11	35
M 1,0 I	9	35
M 1,0 II	10	35
M 1,0 III	9	35
M 1,0 IV	9	35
M 1,0 V	11	35
M 1,0 VI	10	15
M 1,0 VII	10	15
M 1,0 VIII	12	15
Oznaczenia próbek: M - miękki drut; T - twardy drut; 0,8; 0,9; 1,0 - średnica drutu; I, II, III ... VIII - numery próbek dla kolejnych z tej samej partii		

Zgodnie z wspomnianą wyżej normą opracowano uśrednione wyniki badań dla każdej partii drutu, których wyniki przedstawiono poniżej oraz w tablicy 6

Uśrednione wyniki

- T 1,0 – odrzucono najbardziej skrajne wyniki (3 i 6)  

$$\frac{4 + 5}{2} = 4,5 \approx 5 \text{ przegięć}$$
- T 0,8 – odrzucono najbardziej skrajne wyniki (5 i 7)  

$$\frac{6 + 6 + 6}{3} = 6 \text{ przegięć}$$
- M 0,8 – odrzucono najbardziej skrajne wyniki (7 i 13)  

$$\frac{8 + 9 + 10}{3} = 9 \text{ przegięć}$$
- M 0,9 – odrzucono najbardziej skrajne wyniki (9 i 12)  

$$\frac{10 + 10 + 11}{3} = 10,33 \approx 11 \text{ przegięć}$$
- M 1,0 na wysokości 35 mm – odrzucono najbardziej skrajne wyniki (9 i 10)  

$$\frac{10}{1} = 10 \text{ przegięć}$$

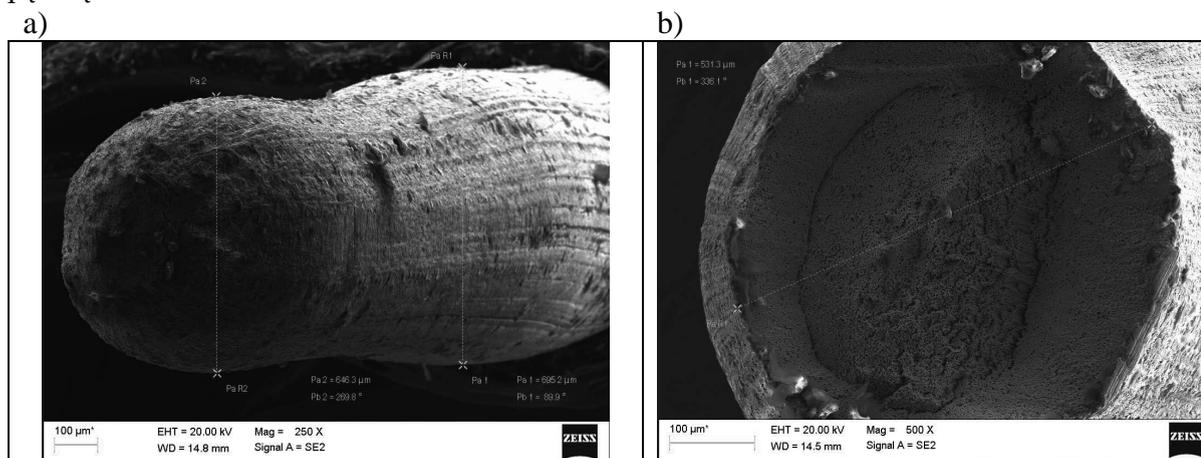
- M 1,0 na wysokości 15 mm – nie odrzucano ze względu na przeprowadzoną małą ilość prób (3)

$$\frac{10 + 10 + 12}{3} = 10,67 \approx 11 \text{ przegięć}$$

Tablica 6. Uśrednione wyniki liczby przegięć dla drutów Zestawienie wyników uśrednionych

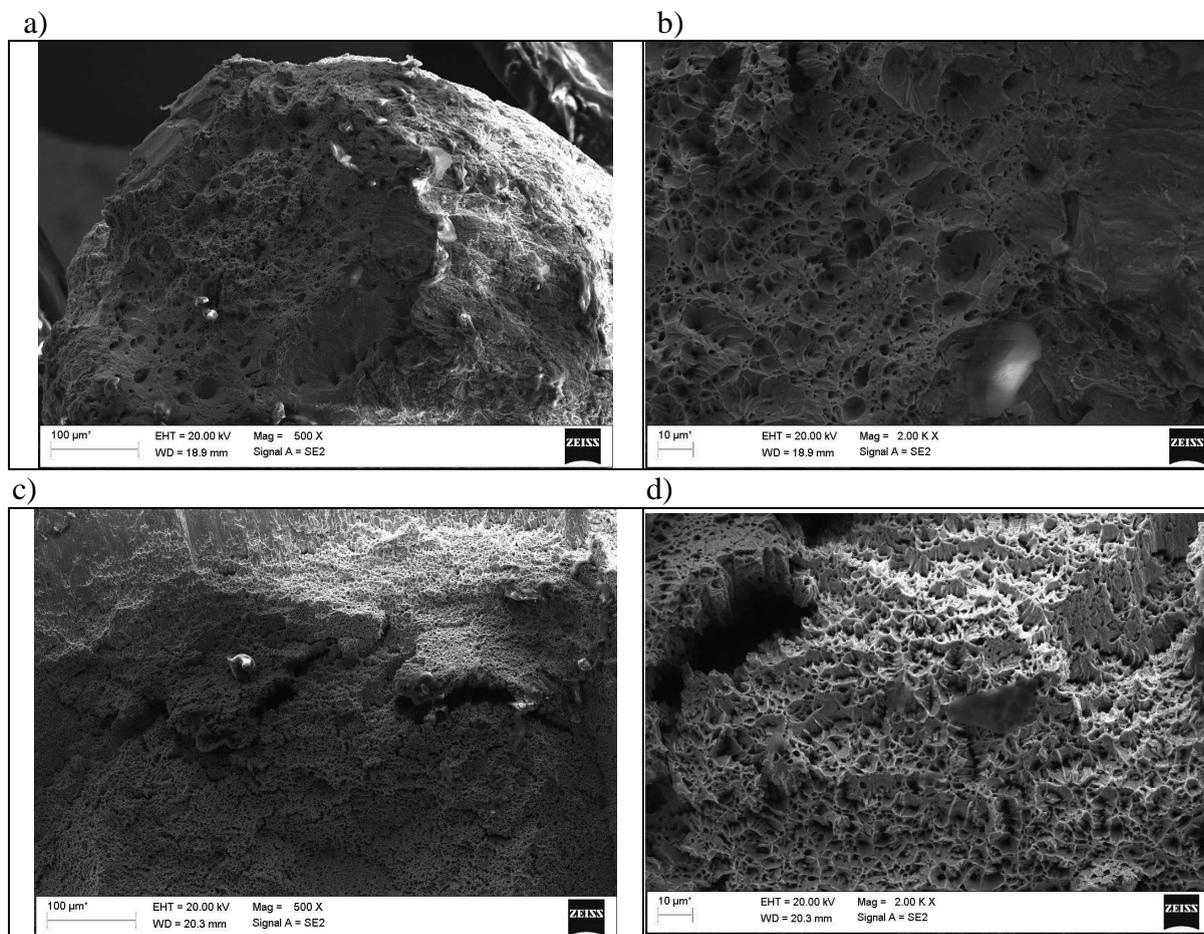
Oznaczenie partii drutu	Średnia liczba przegięć
T 1,0	5
T 0,8	6
M 0,8	9
M 0,9	11
M 1,0 h=35mm/h=15 mm	10/11

Wyniki uzyskanych badań wyraźnie wskazują, że druty miękkie mają co najmniej o 50% większą dopuszczalną liczbę przegięć niż druty twarde. Widoczna na rys. 4 struktura przełomów drutów miękkich i twardych o średnicy 0,8 mm wyraźnie wskazuje na zdecydowanie większą plastyczność drutów miękkich, która objawia się silnym odkształceniem i zmniejszeniem średnicy drutu w miejscu pęknięcia i ok. 1,5 mm od przełomu. W przypadku drutów twardych obszar uplastycznienia przełomu ogranicza się do ok. 0,3 mm od miejsca pęknięcia.



Rysunek 4. Struktura przełomu drutów po próbie przeginania obserwowana w SEM, a) dla próbki 0,8 M, b) dla próbki 0,8 T

Analiza przełomów po próbie przeginania w odniesieniu do różnic dla drutów miękkich i twardych pozwala stwierdzić, że przełomy dla drutów miękkich charakteryzują się na całym przekroju przełomem plastycznym o silnie odkształconych strefach przy jego krawędziach (rys. 4 i 5). Dla drutów twardych wyróżnia się mieszany charakter przełomów po próbach przeginania. Wyniki są zgodne z oczekiwaniami i doniesieniami literaturowymi. Porównując dopuszczalną liczbę przegięć drutów stwierdzono także, że wraz ze wzrostem średnicy drutów zmniejsza się maksymalna liczba przegięć drutów, co wyraźnie widoczne jest dla drutów twardych. Z kolei dla drutów miękkich tendencja jest odwrotna, czyli wzrost średnicy sprzyja zwiększeniu liczby przegięć. Sprzyja temu zwiększenie energii wydzielanej w procesie gięcia, co przy większych średnicach sprzyja silniejszemu wzrostowi temperatury próbki w czasie testu.



Rysunek 5. Struktura przełomu drutów po próbie przeginania obserwowana w SEM, a i b) dla próbki 1,0 M (h=35 mm), c i d) dla próbki 1 T

## 2. PODSUMOWANIE

W ramach niniejszej pracy przedstawiającej wyniki realizacji projektu SKN Mikroskopii Światłowej i Elektronowej uzyskano dwa zmodernizowane stanowiska do badań technologicznych drutów. Oba stanowiska pozwalają na naukowe ujęcie różnic we własnościach drutów twardych, miękkich i półmiękkich.

Wykonane badania wybranych drutów w stanie twardym i miękkim ze stali S235JRG2 ujawniły duże różnice w plastyczności materiału w zależności o technologii ich wytwarzania. Wyżarzanie drutów po obróbce plastycznej ciągnięcia zwiększa plastyczność drutu i dopuszczalne liczny przegięć o co najmniej 50%.

## LITERATURA

1. R. Skoblik, L. Wilczewski, *Technologia Metali*. Gdańsk : Politechnika Gdańska, 2006
2. M. Suliga, *Analiza wielostopniowego ciągnięcia drutów stalowych z dużymi prędkościami w ciągadłach konwencjonalnych i hydrodynamicznych*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2013;
3. E. Hadasik, Z. Pater, *Obróbka plastyczna. Podstawy teoretyczne*, Wyd. Pol. Śl., Gliwice, 2013

## Wpływ przygotowania powierzchni elementów ocynkowanych galwanicznie oraz aluminiowych na przyczepność powłok poliestrowych nakładanych technologią proszkową

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 wstępne wyniki badań oraz wnioski uzyskane w wyniku 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 and conclusions obtained as a result of 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, przyczepność powłok, powłoki proszkowe, metody badania powłok, grubości powłok proszkowych i cynkowych

### 1. WSTĘP

W pracy przedstawiono główne problemy zdiagnozowane w wyniku analizy przyczepności powłok malowanych proszkowo na blachach stalowych ocynkowanych ogniowo oraz blachach aluminiowych stosowanych w procesie produkcyjnym rzeczywistego zakładu przemysłowego.



Kluczowa dla realizowanego projektu jest diagnostyka metodyki przygotowania powierzchni elementów ocynkowanych galwanicznie oraz aluminiowych do malowania proszkowego elementów komercyjnych stosowanych w wymiennikach ciepła. W tym artykule przedstawiono wstępne wyniki badań powłok proszkowych nałożonych na komercyjne wymienniki ciepła różnej wielkości, pokryte farbą poliestrową białą oraz czarną i zidentyfikowano główne problemy tam zlokalizowane. [1-11]

### 1.1. NAKŁADANIE POWŁOK PROSZKOWYCH

Nałożenie powłoki na materiał wymaga odpowiedniego przygotowania powierzchni materiału. Pierwszym etapem przygotowania jest oczyszczenie powierzchni z wszelkich zanieczyszczeń m.in. kurzu, olejów, starych powłok. Następnie na podłożu trzeba uzyskać docelową możliwie jak największe rozwinięcie powierzchni, w tym określoną chropowatość powierzchni, która pozwoli na uzyskanie dobrej przyczepności między powłoką a podłożem.

Materiały proszkowe z polimerów pozwalają na uzyskanie grubszych powłok niż w przypadku malowania farbami płynnymi, bez powstawania niepożądanych wad takich jak np. zacieki, plamy, zmarszczenia itp.

Sposoby nanoszenia pokryć z proszków polimerowych można podzielić na trzy grupy:

- 1) otrzymanie powłok przez napyłanie proszku polimerowego na przedmiot nagrany powyżej temperatury topnienia nanoszonego polimeru (napyłanie pneumatyczne, fluidyzacyjne, odśrodkowe itp.),
- 2) otrzymywanie powłok przez napyłanie roztopionych cząstek proszkowego polimeru na powierzchnię przedmiotu (gazowo - płomieniowe),
- 3) otrzymywanie powłok przez napyłanie elektrycznie naładowanych cząstek proszku polimerowego na powierzchnię przeciwnie naładowanego przedmiotu (napyłanie elektrostatyczne).

Wdrożenie każdego z wymienionych sposobów wymaga odpowiedniego wyposażenia i dopracowanej technologii. Przy wyborze sposobu nanoszenia trzeba zwrócić uwagę na odpowiednie dobranie polimeru do podłoża oraz funkcjonalności użytkowych malowanego elementu. Ważne są tutaj także własności fizyczne i mechaniczne stosowanych polimerów, a także wymagane własności pokrycia. (1)

### 1.2. POWŁOKI CYNKOWE NAKŁADANE OGNIOWO

Cynkowanie ogniowe, nazywane inaczej zanurzeniowym, polega na zanurzeniu elementu powlekanego w kąpeli z roztopionego metalu powłokowego jakim w tym przypadku jest cynk. Jest to jedna z najwydajniejszych metod zabezpieczania stali przed korozją atmosferyczną. W wyniku tego procesu uzyskujemy w prawidłowo zrealizowanym procesie technologicznym szczelną powłokę cynku, która zapobiega przez określony czas tworzeniu się korozji podłoża. Najogólniej proces cynkowania ogniowego można podzielić na :

-metodę ciągłą, która jest stosowana do blach, taśm, bednarki, a także drutów;  
-metodę nieciągłą, która jest stosowana do wydłużonych kształtowników, stalowych konstrukcji, a także drobnych elementów.

Metodę nieciągłą można realizować na 3 sposoby : metodą moką, metodą suchą lub z odwirowaniem. Wspólnym elementem wszystkich tych metod jest konieczność odpowiedniego

przygotowania powierzchni. Metoda sucha i mokra różnią się sposobem topnikowania. W metodzie suchej operacja ta polega na zanurzeniu metalizowanych elementów w topniku, a następnie ich wysuszeniu. Topnik stanowi tutaj wodny roztwór chlorku cynkowego z dodatkiem substancji powierzchniowo aktywnych (np. gliceryna, nekalina). Suszenie jest tutaj konieczne, ponieważ zanurzenie mokrego elementu w kąpeli cynkowej powoduje rozpryskiwanie cynku oraz straty ciepła kąpeli. Czas suszenia nie może być zbyt długi, ponieważ na powierzchni elementu w atmosferze otoczenia mogą powstać tlenki żelaza. Po suszeniu element jest zanurzany w kąpeli cynkowej, gdzie narasta stopowa powłoka głównie cynku i żelaza. W metodzie mokrej, element poddany obróbce powierzchniowej, oczyszczony i jeszcze wilgotny zanurza się w kąpeli metalicznej, na której powierzchni znajduje się warstwa ciekłego topnika. Jako topniki używane są zazwyczaj mieszaniny chlorku cynkowego i substancji dodatkowych (węglowodany, glikozydy, mydła, gliceryna). W tej metodzie element zanurzany nie musi być suchy, ponieważ warstwa topnika stanowi ochronę przed rozpryskiwaniem cynku. Powłoki cynkowe znajdują szerokie zastosowanie w ochronie antykorozyjnej stali i żeliwa. Szczególnie duże ilości cynku zużywa się w przemyśle maszynowym, samochodowym itp., do pokrywania blach, taśm, drutów stalowych i drobnic. W odpowiednich kąpielach i po zastosowaniu właściwych technologii można galwanicznie cynkować wyroby sprężyste bez obawy wystąpienia kruchości wodorowej. Istotnym ograniczeniem zastosowania cynku jest przemysł spożywczy, szczególnie w zakresie ochrony pojemników na żywność, gdzie cynk nie może być stosowany z uwagi na toksyczność jego soli. W przypadku badanych w niniejszym artykule blach stalowych powłoki cynkowe były nakładane w technologii ogniowej ciągłej.

### **1.3. METODY BADANIA PRZYCZEPNOŚCI POWŁOK MALOWANYCH PROSZKOWO**

Test przyczepności powłok to badanie stosowane powszechnie w niemal wszystkich sektorach przemysłu. Różnica polega na tym, że w poszczególnych działach przeważają odmienne metody lub ich modyfikacje dostosowane do określonej technologii ich nakładania. Na przykład w przemyśle motoryzacyjnym, gdzie dużym problemem jest ścieranie się farby samochodowej pod wpływem uderzających w nią kamieni, często stosuje się metody erozyjne, która polegają na symulowaniu warunków jazdy (wyrzucaniu w przez sprężone powietrze elementów o ostrych krawędziach np. ścierniwa w postaci proszku tlenku aluminium (korundu). Poniżej przedstawiono kilka wybranych metod badania przyczepności powłok malowanych proszkowo oraz natryskowo.

#### **1.1.1. Test metodą siatki nacięć**

Jest to jedna z najprostszych metod badań niszczących. Utwardzona powłoka nacinana jest specjalnym nożem, a następnie w naciętym miejscu nakleja się kawałek taśmy samoprzylepnej. Po określonym w tabelach dedykowanej normy czasie, odrywa się ją i sprawdza, w jak dużym stopniu nastąpiło częściowe oderwanie fragmentów naciętej powłoki lakierniczej. Test ten wykonuje się na uprzednio przygotowanych próbkach testowych ze względu na charakter niszczący tej metody badania. Niemniej może być także stosowany do oceny jakości powłoki na gotowych elementach. Jedną z odmian testu nacięć jest metoda siatki nacięć stosowana dla powłok malowanych proszkowo o grubości mniejszej niż 250  $\mu\text{m}$ . Polega ona na tym, że przy pomocy noża o wielu ostrzach wykonuje się na powierzchni dwa głębokie nacięcia pod kątem prostym do siebie. W efekcie na powłoce powstaje siatka nacięć.

Bardzo grube powłoki natomiast bada się z wykorzystaniem noża o jednym ostrzu, tworząc dwa nacięcia o długości ok. 4 cm pod kątem 30-45°. (1)

### 1.1.2. Test przyczepności powłok metodą „pull off”

Metoda pull-off jest stosowana w celu sprawdzenia wytrzymałości i przyczepności zastosowanych materiałów powłokowych czy też poszczególnych warstw przez mechaniczne odrywanie specjalnego stempla od powłoki. Metoda pull-off należy do metod nieniszczących. Wynikiem badania jest wartość wyrażona w MPa, wyznaczona na podstawie siły, po której następuje oderwanie przyklejonego wcześniej stempla od materiału powłoki.

Przeprowadzenie badań metodą pull-off można podzielić na kilka zasadniczych etapów:

- 1) Wyznaczenie miejsc pomiarowych. Badanie należy wykonać w miejscach o jednolitej strukturze. Ponadto powierzchnia obszarów, w których będzie wykonane badanie powinna być płaska.
- 2) Przygotowanie podłoża: podłoże powinno być suche i odtłuszczone oraz zwiększamy jego chropowatość powierzchni aby zwiększyć przyczepność kleju np. przez delikatne szlifowanie papierem ściernym.
- 3) Montaż stempla pomiarowego - w pierwszej kolejności należy dobrać rozmiar grzybka pomiarowego, którego wielkość zależy od rodzaju materiału/powłoki, a także spodziewanej siły adhezji pomiędzy warstwami. Im mniejsze są siły adhezji, tym rozmiar grzybka pomiarowego jest większy. Do badania przyczepności zapraw naprawczych średnica grzybka wynosi np. 50 mm. W przypadku powłok malarskich proszkowych stosuje się grzybki o średnicy do 20 mm.

Wraz ze wzrostem średnicy stempla zmniejszają się dopuszczalne w tej metodzie wartości pomiarowe siły adhezji powłoki. Poniżej przedstawiono zakres pomiarowy w zależności od średnicy grzybka:

- 10 mm (70 MPa),
- 14 mm (40 MPa),
- 20 mm (20 MPa),
- 50 mm (3,3 MPa).

W zależności od rodzaju podłoża należy czasem wykonać obwodowe nacięcie wokół przyklejonego stempla aby ograniczyć zakres oddziaływania sił adhezji. W przypadku powłok malarskich nacięcie wykonuje się frezem wokół obwodu przyklejonego grzybka. Nacięcie należy wykonać do podłoża przez całą grubość badanej warstwy.

Grzybek montuje się do podłoża za pomocą odpowiednio dobranego kleju bardzo często są to kleje epoksydowe, nakładając na jego powierzchnię cienką jego warstwę.

- 4) Odrywanie grzybków - do odrywania grzybków można przystąpić po całkowitym związaniu kleju. Grzybki odrywa się przy pomocy specjalnego urządzenia - siłownika, odczytując wartości siły odrywającej odniesionej do pola przekroju stempla co wyrażone jest w MPa. Istotne jest, aby przyrost siły odrywającej był możliwie liniowy. W innym przypadku może dojść do zbyt szybkiego oderwania w wyniku nagłego zwiększenia siły. (1)

#### 1.4. ŚRODKI CHEMICZNE DO CZYSZCZENIA I AKTYWACJI POWIERZCHNI METALOWYCH W CELU POPRAWY PRZYCZEPNOŚCI POWŁOK LAKIERNICZYCH (DLA AL I FE-ZN);

Właściwe przygotowanie powierzchni metalu stanowi swoistą gwarancję otrzymania dobrej powłoki lakierniczej o odpowiedniej i zamierzonej jakości. Pominięcie etapu oczyszczenia i aktywacji powierzchni jest jednoznaczne z obniżeniem przyczepności powłoki, a w konsekwencji negatywnie rzutuje to na jej trwałość, odporność na bodźce mechaniczne i estetykę. Poprzez przygotowanie powierzchni rozumie się nie tylko jej oczyszczenie i aktywację, lecz również jej wyrównanie, usunięcie wszelkich defektów oraz zabezpieczenie antykorozyjne przy zastosowaniu powłok konwersyjnych. Całościowo etap przygotowania powierzchni przed nałożeniem powłoki lakierniczej niejednokrotnie jest znacznie bardziej skomplikowany i kosztowny, niż samo malowanie. Znalezienie produktów odpowiednich dla wykorzystywanej powierzchni bazowej, umożliwiających jej dokładne oczyszczenie oraz aktywację i nie wchodzących tym samym w niepożądaną reakcję z powłoką lakierniczą, jest procesem często zadaniem żmudnym, czasochłonnym i wymagającym szerokiej wiedzy oraz wielu badań.

Wśród metali obrabianych w technice lakierniczej wyróżnić można między innymi: aluminium, chrom, cynę, miedź, a także takie metale szlachetne takie jak platyna, srebro, czy też złoto (powłoki bezbarwne zapewniające długotrwały połysk). Jednak najczęściej malowane są stopy żelaza z węglem: stal, żeliwo. Powierzchnia wymienionych materiałów może być zanieczyszczona przez rdzę, kurz, różnorodne pyły, oleje i smary, sole, kwasy, lub też alkalia. Z tego powodu przygotowanie powierzchni standardowo rozpoczyna się od jej mechanicznego oczyszczenia. Możliwe jest dzięki temu usunięcie wszelkich produktów luźno związanych produktów korozji znajdujących się na niej oraz wyrównanie nierówności, pozbycie się bruzd i nalotów. W efekcie po etapie oczyszczania, powierzchnia powinna osiągnąć odpowiednią gładkość. Równie istotnym aspektem oczyszczania jest jej odtłuszczenie. Ważne jest jednak, by czas upływający pomiędzy etapem oczyszczania powierzchni, do nałożenia powłoki, nie był dłuższy niż 6 godzin. W przeciwnym wypadku, istnieje duże prawdopodobieństwo ponownego jej zanieczyszczenia i zatłuszczenia, a także wystąpienia szeregu innych niekorzystnych zjawisk.

Staranne i odpowiednie przygotowanie powierzchni pozwala istotnie zwiększyć adhezję powłoki do podłoża, co z kolei przekłada się na zwiększenie jej trwałości, która stanowi jedno z najważniejszych kryteriów jakości. Ponadto, dobrze przygotowane podłoże cechuje znacznie niższa podatność na występowanie korozji. Jej rozwój pod lakierem jest niezaprzeczalnie związany z obniżeniem trwałości samej powłoki. W przypadku pominięcia etapu oczyszczania powierzchni, jej niejednorodna i chropowata struktura może wpływać na estetykę nałożonej farby. W tym wypadku znacznie ułatwione jest również powstawanie pęcherzy, które to mogą powodować z czasem wykruszanie się powłoki. Powyższe argumenty, jak i doświadczenie, jasno wskazują, że etap przygotowania, a w szczególności oczyszczania powierzchni, jest niezbędny i nie może zostać pominięty przed nałożeniem jakiegokolwiek powłoki lakierniczej.

Oczyszczanie powierzchni można prowadzić dwojako. Pierwszy sposób stanowi oczyszczanie mechaniczne, polegające na skrobaniu, szciotkowaniu, szlifowaniu, lub też na obróbce strumieniowo – ścierniej. Zaliczyć można do niej piaskowanie, oczyszczanie hydrościernie lub śrutowanie. Drugi ze sposobów polega właśnie na wykorzystaniu odczynników chemicznych, takich jak kwasy, zasady i środki powierzchniowo czynne, lub też preparatów zwanych odrdzewiaczami fosforanowymi.

Obróbka chemiczna powierzchni, w zależności od wielkości elementu oraz stosowanych preparatów, może być prowadzona poprzez metodę zanurzeniową lub natryskową. Metoda zanurzeniowa wykorzystuje wanny, ustawiane w linii z urządzeniami transportowymi. Obróbka natryskowa z kolei zwyczajowo prowadzona jest w odpowiednich komorach zaopatrzonych w dysze umożliwiające wytworzenie odpowiednio silnego strumienia cieczy lub w przypadku produkcji wielkotonażowej, w urządzeniach tunelowych ze zmechanizowanym transportem przedmiotów.

W celu przygotowania odpowiedniego czynnika odtłuszczającego niezwykle istotne jest uwzględnienie wpływu pH i odporności korozyjnej danego podłoża. Odtłuszczanie aluminium zwyczajowo prowadzi się w stosunkowo niskim pH (jednakże wyższym niż 4), dzięki czemu ograniczone zostaje ryzyko wystąpienia korozji. W przypadku odtłuszczania stali, pH roztworu powinno być odpowiednio wysokie – powyżej 8.

## **2. METODYKA BADAŃ**

### **2.1. Materiał do badań**

Badania przyczepności polimerowych powłok proszkowych wykonano na blachach stalowych o grubości 0,5 i 0,7 mm, ocynkowanych ogniowo w procesie ciągłym oraz na blachach aluminiowych o grubości 1 mm stosowanych komercyjnie na elementy konstrukcyjne urządzeń w postaci obudów i elementów wymienników ciepła. Do malowania proszkowego stosowano komercyjne proszki na bazie mieszanin żywic poliestrowych takiej jak Pulverit 59 w kolorze białym i czarnym.

### **2.2. Przygotowanie blach**

Przygotowanie blach pod proces malowania proszkowego odbywa się kilku etapowo na rzeczywistej linii produkcyjnej. Pierwszym etapem jest umycie płytek w komorze natryskowej. Myjnia natryskowa 3-strefowa umożliwia dokładne przygotowanie powierzchni malowanego detalu przed nałożeniem farby proszkowej.

Proces odtłuszczania prowadzi się przy użyciu związków alkalicznych oraz niejonowych środków powierzchniowo czynnych. W analizowanej linii technologicznej jest stosowany obieg zamknięty środków chemicznych umożliwiający ponownie wykorzystywanie odzyskanych składników kąpieli w tym zwłaszcza wody stanowiącej ponad 90% składu kąpieli. Po chemicznym myciu komponenty trafiają do pieca w których są dokładanie suszone. Piec jest tak zaprojektowany aby można było zarówno suszyć malowane elementy po procesie mycia jak i wygrzewać farbę po malowaniu dzięki odpowiedniej cyrkulacji powietrza

### **2.3. Nakładanie powłok**

Dokładnie umyte i wysuszone parowniki trafiają do kabiny lakierniczej firmy Wagner. Technika napyłania elektrostatycznego przy pomocy pistoletów pneumatycznych w sposób automatyczny zostaje nałożona farba proszkowa na malowane elementy. Dodatkowe pistolety do malowania ręcznego umożliwiają dodatkowe uzupełnienie proszku przy malowaniu trudno dostępnych miejsc.

### **2.4. Badania na mikroskopie świetlnym i elektronowym**

Badania przekrojów analizowanych powłok wykonano za pomocą mikroskopu świetlnego metalograficznego ZEISS Axio Observer Z1m. Badania wykonano przy powiększeniach 25x, 200x oraz 1000x w polu jasnym. W celu oceny morfologii, grubości i składu chemicznego powłok cynkowych nałożonych na stal wykonano także badania w mikroskopie elektronowym skaningowym Supra 35 firmy Zeiss z wykorzystaniem przystawki do badań techniką EDS przekrojów poprzecznych powłok.



Rysunek 1. Zdjęcie mikroskopu metalograficznego ZEISS Axio Observer Z1m

### 2.5. Badania przyczepności powłok

Badania przyczepności powłok wykonano za pomocą miernika pull off DeFelsko PosiTest AT-A. Badania wykonano zgodnie z PN-EN ISO 4624 Farby i lakiery -- Próba odrywania do oceny przyczepności. Do badania zastosowano następujące kleje: klej dołączony do aparatury PosiTector, „T-REX Klej elastyczny” firmy SOUDAL, „T-REX Klej montażowy bezbarwny” firmy SOUDAL, „FIX Strong Klej montażowy” firmy DRAGON, „FIX EXTREME” Pattex, „All Plastics” firmy UHU, „MAMUT Glue” firmy Bostik, „Klej metakrylanowy” firmy Technicqll, „Klej do PP, PE, PTFE” firmy Technicqll, „Klej sekundowy” firmy Technicqll, Plastic Welding firmy VersaChem. Duża liczba zastosowanych klejów wynikała z optymalizacji i doboru najlepszego pod względem przyczepności dla analizowanych powłok lakierniczych. Ocena na tym etapie pozwoli na wybór optymalnego kleju do badań w drugiej części realizacji przedmiotowego projektu.

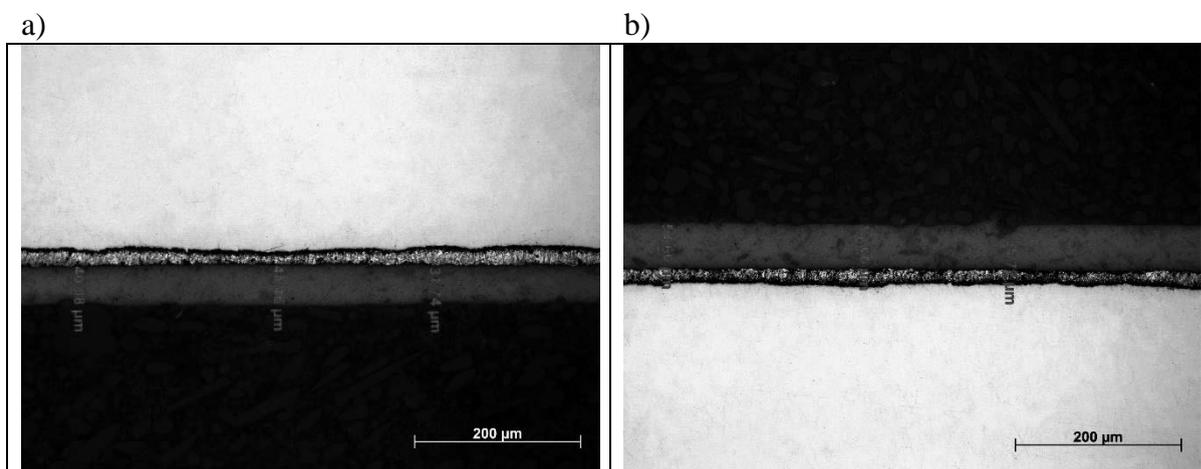


Rysunek 2. Zdjęcie miernika pull-off DeFelsko PosiTest AT-A

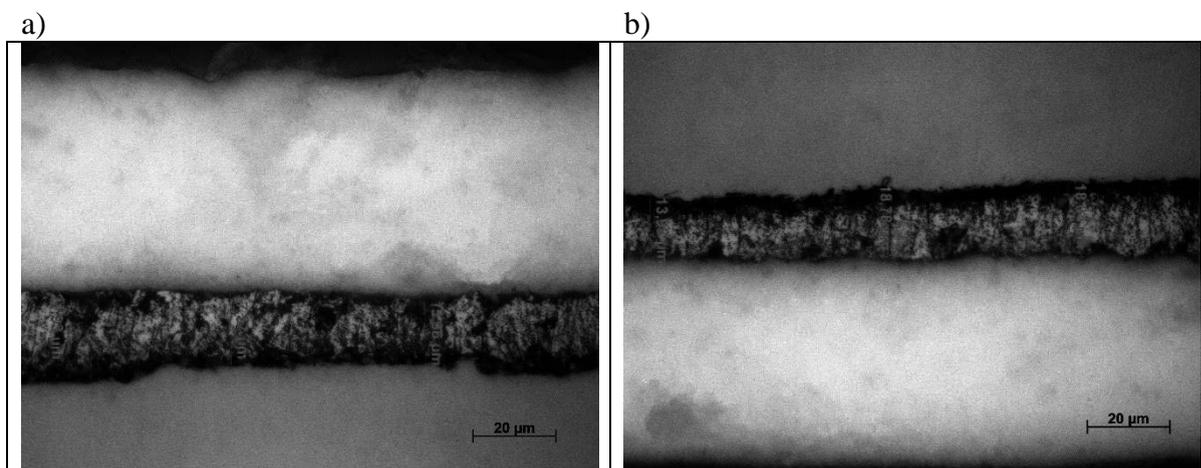
## 3. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Analizując badane warstwy i powłoki nałożone na stal oraz aluminium z wykorzystaniem mikroskopu świetlnego stwierdzono mocno zróżnicowane grubości poszczególnych warstw

powłoki dla stali ocynkowanych malowanych proszkowo oraz powłoki polimerowej dla malowanego proszkowo aluminium (rys.3). W pierwszym etapie badań ocenie podlegała równomierność warstw powłok na blachach stalowych ocynkowanych. Stwierdzono, że warstwa cynku ma w tym przypadku grubość od 14-22  $\mu\text{m}$  i biorąc pod uwagę dużą liczbę punktów oceny grubości na płytkach testowych i samą liczbę płytek można potwierdzić, że warstwa cynku jest odpowiedniej grubości i zapewnia wymaganą dla elementów konstrukcyjnych wymienników ciepła grubość odporność korozyjną (rys. 4).



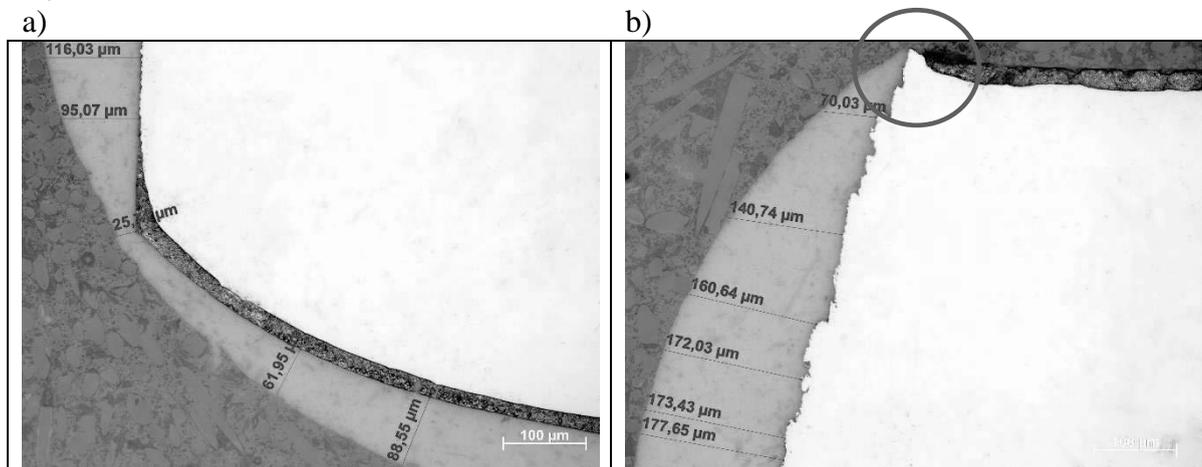
Rysunek 3. Struktura przekroju poprzecznego próbki SL1 (a – rewers, b-awers) płytki ze stali ocynkowanej malowanej proszkowo farbą czarną. Widoczne grubości powłok proszkowych od 34-54  $\mu\text{m}$ . LM 200x



Rysunek 4. Struktura przekroju poprzecznego próbki SL21 (a – awers, b-rewers) płytki ze stali ocynkowanej malowanej proszkowo farbą białą. Widoczne grubości warstwy cynku od 14-22  $\mu\text{m}$ . LM 1000x

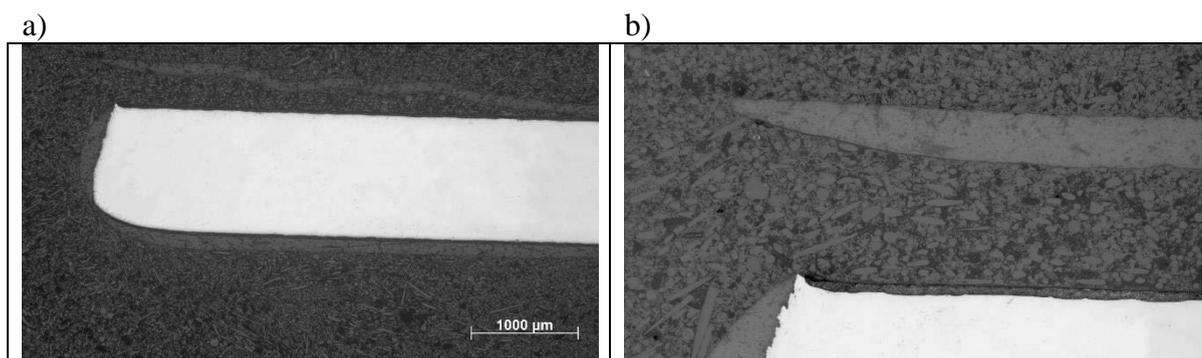
Niestety stwierdzono także, że miejsca cięcia blach (czyli krawędzie próbek testowych) są nie pokryte powłoką cynku co wynika ze zastosowanej metody cięcia. Może to skutkować w czasie eksploatacji przyspieszonym rozwojem korozji detalu i ma zdecydowanie zły wpływ na odporność korozyjną całej konstrukcji (rys. 5). Pojawienie się oznak korozji na krawędziach blach będzie sprzyjać jej rozwojowi, a także powodowaniu rdzawych nacieków na powłokach

polimerowych, co szczególnie silnie będzie widoczne na jasnych powłokach polimerowych (rys. 5).



Rysunek 5. Struktura przekroju poprzecznego próbki SL21 (a – rewers, b-awers) płytki ze stali ocynkowanej malowanej proszkowo farbą białą w miejscu cięcia płytki przed nakładaniem powłoki proszkowej. Widoczne silne zróżnicowanie grubości powłoki polimerowej i cynkowej. Na rys. b widoczne odwarstwienie powłoki polimerowej. LM 200x

Analizując grubość warstwy lakieru proszkowego na stali ocynkowanej można stwierdzić, że jest ona bardzo mocno zróżnicowana w różnych obszarach próbek testowych. Grubości wahają się od 35-215  $\mu\text{m}$ . Cieńsze powłoki polimerowe stwierdzono dla koloru czarnego. Białe są zdecydowanie do trzech razy grubsze niż czarne. Najmniejsze grubości powłok polimerowych uzyskano w czasie badań krawędzi płytek testowych co dodatkowo przy braku warstwy cynku potęguje niebezpieczeństwo przyspieszonej korozji w tych miejscach. Szczególnie niebezpieczne są obszary zaznaczone na rys. 5b, gdzie uzyskano minimalną grubość warstwy lakieru proszkowego zdecydowanie za małą aby zapewnić odporność na korozję.



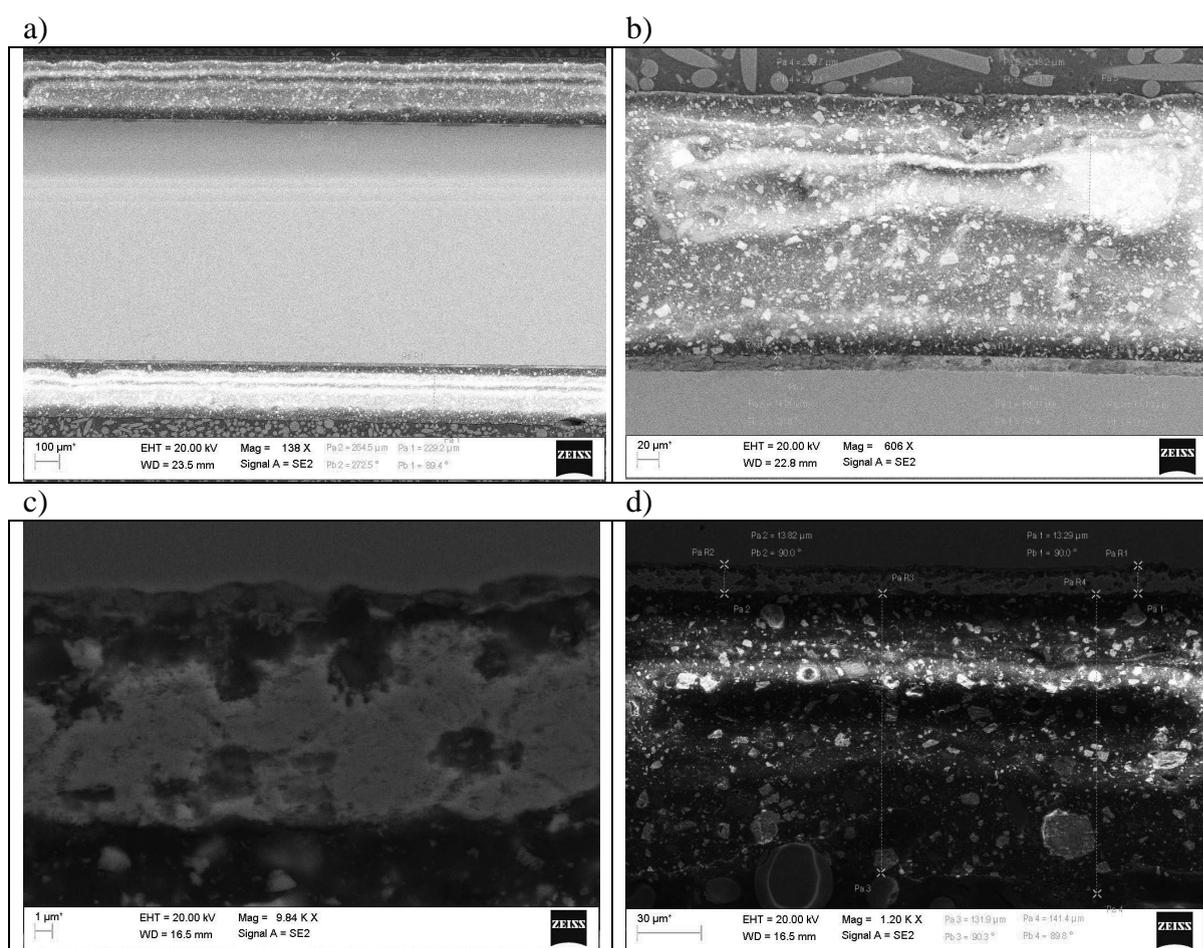
Rysunek 6. Struktura przekroju poprzecznego próbki SL21 płytki ze stali ocynkowanej malowanej proszkowo farbą białą w miejscu cięcia płytki przed nakładaniem powłoki proszkowej. Widoczna delaminacja powłoki polimerowej od warstwy cynku na długości kilku milimetrów, czego przyczyną jest charakterystyczny efekt cięcia pokazany na rys. 5b, który sprzyja inicjacji procesu odrywania powłoki poliesterowej na krawędzi płytki. LM rys.a 25x, rys. b 200x.

Oczywiście kluczem do poprawy jakości analizowanych powłok i wyeliminowania słabych obszarów płytek jest poprawa technologii ich nakładania. Można to zrealizować poprzez modyfikację procesów mycia próbek oraz samego malowania proszkowego, zwłaszcza z modyfikacją grubości powłoki we wskazanych miejscach. Możliwe jest też zastosowanie



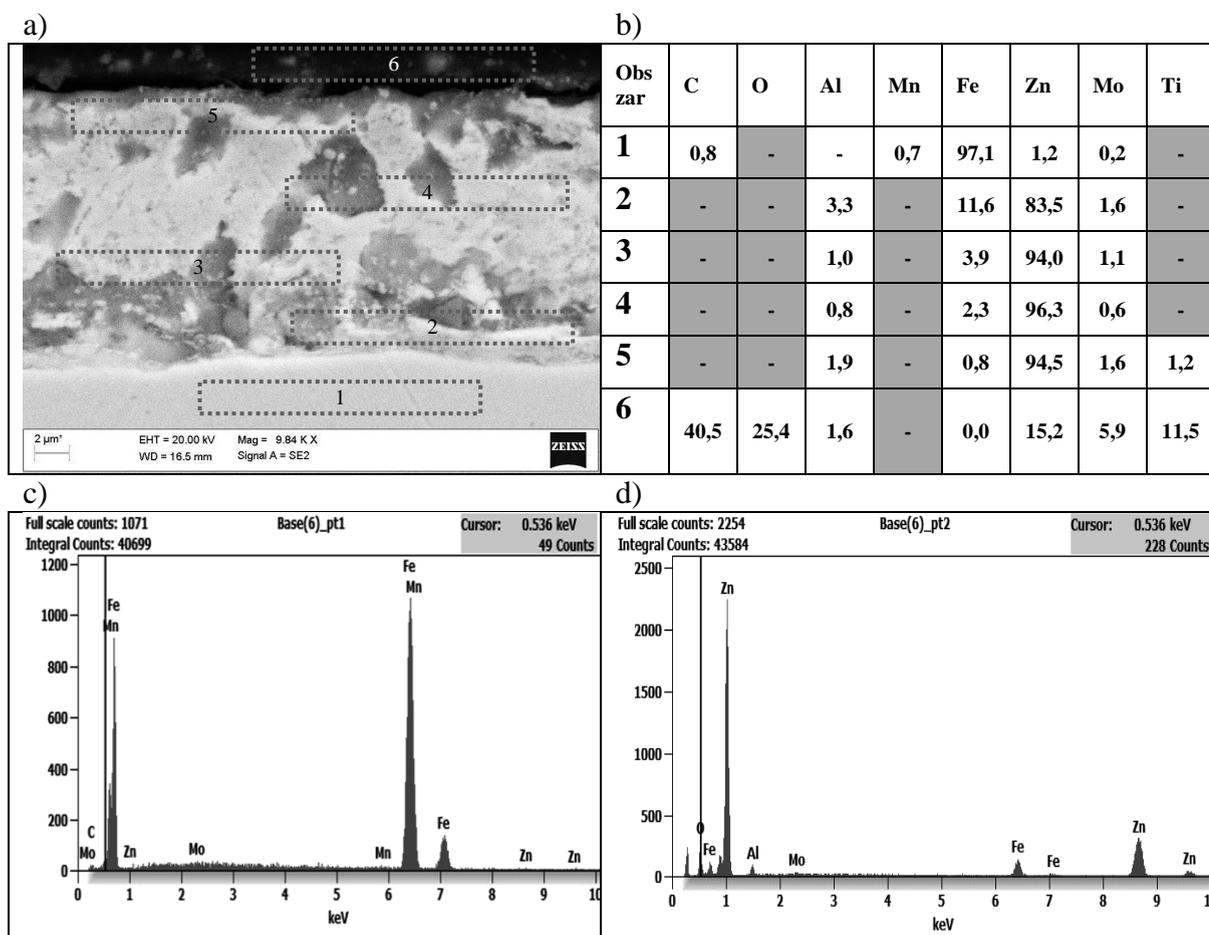
metod cięcia zwiększających zakres pokrycia ciętych krawędzi powłoką cynkową, jak i zmniejszających rozwinięcie powierzchni. Można także na krawędzie nanosić w dodatkowym etapie farbę cynkową itp.

Badania przekrojów poprzecznych powłok polimerowych jak i cynkowych w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) pozwoliło na ocenę morfologii powłok ich jednorodności oraz składu chemicznego dla powłoki cynkowej (rys. 6 i 7). Potwierdzono, że warstwa cynku na analizowanych blach została nałożona technologią cynkowania ogniowego, co potwierdzają zdjęcia struktury przelomów na rys. 6 oraz wyniki badań składu chemicznego warstwy cynku. Ujawniono stopowy charakter powłoki cynku z dominującym udziałem cynku i zmniejszającym się udziałem żelaza idąc od powierzchni podłoża w kierunku powłoki polimerowej od ok. 12% do ok. 1% (rys. 8).



Rysunek 7. Struktura przekroju poprzecznego próbki SL5 płytki ze stali ocynkowanej malowanej proszkowo farbą czarną obserwowana w SEM. Na rys. a widoczny jest cały przekrój blachy (pow. 138x). Rys. b przedstawia analizę grubości warstwy cynku (pow. 606x). Rys. c prezentuje morfologię warstwy cynku (pow. 9840x), a na rys. d porównanie grubości warstwy cynkowej i polimerowej (pow. 1200x)

Widoczna jest też wielofazowa struktura powłok proszkowych (rys. 6 b i d), w których ujawniono pigmenty i dodatki wypełniające oraz stabilizujące ich własności w tym odporność na degradację promieniowaniem UV.



Rysunek 8. Struktura przekroju poprzecznego próbki SL17 płytki ze stali ocynkowanej malowanej proszkowo farbą białą obserwowana w SEM wraz z analizą składu chemicznego, rys. a) widoczny jest przekrój blachy (pow. 9840x) z zaznaczonymi mikroobszarami analizy EDS, rys. b) przedstawia wyniki składu chemicznego w mikroobszarach 1-6 z rys. a (udział masowy [%]), rys. c) jakościowa analiza składu chemicznego techniką EDS w mikroobszarze 1 zaznaczonym na rys. a, rys. d) jakościowa analiza składu chemicznego techniką EDS w mikroobszarze 3 zaznaczonym na rys. a

Analizując wyniki badań składu chemicznego od podłoża w kierunku powłoki polimerowej stwierdzono, że poza cynkiem i żelazem w powłoce stwierdzono także molibden oraz aluminium w stężeniach nieskorelowanych z odległością od podłoża (rys. 8). W powłoce polimerowej wyróżnia się duży udział tytanu prawdopodobnie w postaci tlenku tytanu tzw. bieli tytanowej stosowanej powszechnie do barwienia kompozycji farb.

Wykonane w ramach niniejszej pracy badania techniką Pull-off pozwoliły wybrać spośród 12 wstępnie wytypowanych klejów optymalny do badań docelowych przyczepności powłok polimerowych nakładanych proszkowo. Zbiorcze wyniki badań przyczepności przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Wyniki badań przyczepności stempla lub powłoki proszkowej do podłoża metodą Pull off

LP.	NAZWA KLEJU	RODZAJ KLEJU	PRODUCENT	PLYTKA	WYNIK [MPa]	UWAGI
1	PULOFF PosiTector	2 skl. epoks.	PosiTector	BFe	1,41	oderwanie kleju od powłoki
2	PULOFF PosiTector	2 skl. epoks.	PosiTector	BFe	2,15	oderwanie kleju od powłoki
3	PULOFF PosiTector	2 skl. epoks.	PosiTector	BFe	2,16	oderwanie kleju od powłoki
4	PULOFF PosiTector	2 skl. epoks.	PosiTector	CzAl	1,61	oderwanie kleju od powłoki
5	PULOFF PosiTector	2 skl. epoks.	PosiTector	CzAl	1,59	oderwanie kleju od powłoki
6	PULOFF PosiTector	2 skl. epoks.	PosiTector	CzAl	1,91	oderwanie kleju od powłoki
7	PULOFF PosiTector	2 skl. epoks.	PosiTector	CzAl	1,87	oderwanie kleju od powłoki
8	PULOFF PosiTector	2 skl. epoks.	PosiTector	CzAl	1,55	oderwanie kleju od powłoki
9	PULOFF PosiTector	2 skl. epoks.	PosiTector	CzAl	2,40	oderwanie kleju od powłoki
10	PULOFF PosiTector	2 skl. epoks.	PosiTector	CzAl	2,88	oderwanie kleju od powłoki
11	X15	epoks.	Glue	BFe	1,50	oderwanie kleju od powłoki
12	X15	epoks.	Glue	CzAl	0,07	oderwanie kleju od powłoki
13	X15	epoks.	Glue	CzAl	0,32	oderwanie kleju od powłoki
14	Plastic Welding	2 skl. metakryl.	VersaChem	BFe	4,81	cześciowe zerwanie kohezcyjne
15	Plastic Welding	2 skl. metakryl.	VersaChem	CzAl	5,81	cześciowe zerwanie kohezcyjne
16	Plastic Welding	2 skl. metakryl.	VersaChem	CzAl	5,65	cześciowe zerwanie kohezcyjne
17	Plastic Welding	2 skl. metakryl.	VersaChem	CzAl	5,63	cześciowe zerwanie kohezcyjne
18	Plastic Welding	2 skl. metakryl.	VersaChem	BFe	5,69	cześciowe zerwanie kohezcyjne
19	Plastic Welding	2 skl. metakryl.	VersaChem	BFe	5,93	cześciowe zerwanie kohezcyjne
20	T-REX Klej elastyczny	polimerowy	Soudal	CzAl	pn	mokry klej (po upływie 24h)
21	T-REX Klej elastyczny	polimerowy	Soudal	CzAl	pn	mokry klej (po upływie 24h)
22	T-REX Klej elastyczny	polimerowy	Soudal	BFe	pn	mokry klej (po upływie 24h)
23	T-REX Klej bezbarwny	dysp. akryl.	Soudal	CzAl	pn	mokry klej (po upływie 24h)
24	T-REX Klej bezbarwny	dysp. akryl.	Soudal	CzAl	pn	mokry klej (po upływie 24h)
25	T-REX Klej bezbarwny	dysp. akryl.	Soudal	BFe	pn	mokry klej (po upływie 24h)
26	FIX Strong	polimerowy	Dragon	CzAl	pn	mokry klej (po upływie 24h)
27	FIX Strong	polimerowy	Dragon	CzAl	pn	mokry klej (po upływie 24h)
28	FIX Strong	polimerowy	Dragon	BFe	pn	mokry klej (po upływie 24h)
29	FIX EXTREME	dysp. akryl.	Pattex	CzAl	pn	mokry klej (po upływie 24h)
30	FIX EXTREME	dysp. akryl.	Pattex	CzAl	pn	mokry klej (po upływie 24h)
31	FIX EXTREME	dysp. akryl.	Pattex	BFe	pn	mokry klej (po upływie 24h)
32	All Plastics	dysp. akryl.	UHU	CzAl	pn	oderwanie stempla od kleju
33	All Plastics	dysp. akryl.	UHU	CzAl	pn	oderwanie stempla od kleju
34	All Plastics	dysp. akryl.	UHU	BFe	pn	oderwanie stempla od kleju
35	MAMUT Glue	mod.silany	Bostik	CzAl	pn	mokry klej (po upływie 24h)
36	MAMUT Glue	mod.silany	Bostik	CzAl	pn	mokry klej (po upływie 24h)
37	MAMUT Glue	mod.silany	Bostik	BFe	pn	mokry klej (po upływie 24h)
38	Klej metakrylanowy	metakrylanowy	Technicqll	CzAl	0,93	oderwanie kleju od powłoki
39	Klej metakrylanowy	metakrylanowy	Technicqll	CzAl	0,58	oderwanie kleju od powłoki
40	Klej metakrylanowy	metakrylanowy	Technicqll	BFe	1,54	oderwanie kleju od powłoki
41	Klej do PP, PE, PTFE	cjanoakrylowy	Technicqll	CzAl	0,90	oderwanie stempla od kleju
42	Klej do PP, PE, PTFE	cjanoakrylowy	Technicqll	CzAl	0,98	oderwanie stempla od kleju
43	Klej do PP, PE, PTFE	cjanoakrylowy	Technicqll	BFe	2,15	oderwanie stempla od kleju
44	Klej sekundowy	cjanoakrylowy	Technicqll	CzAl	2,66	oderwanie stempla od kleju
45	Klej sekundowy	cjanoakrylowy	Technicqll	CzAl	2,40	oderwanie stempla od kleju
46	Klej sekundowy	cjanoakrylowy	Technicqll	BFe	3,36	oderwanie stempla od kleju

Skróty w tablicy: CzAl- blacha aluminiowa malowana proszkowo na kolor czarny, BFe- blacha stalowa ocynkowana malowana proszkowo na kolor biały, CzFe - blacha stalowa ocynkowana malowana proszkowo na kolor czarny  
pn - pomiar niekwalifikowany, problem wiązania kleju pomiędzy metalami.

Niestety zdecydowana większość testowanych klejów nie wykazywała zadawalającej przyczepności do powłoki proszkowej. Kleje montażowe nie uległy utwardzeniu z powodu słabej dyfuzji rozpuszczalników przez powierzchnie metalowe podłoża i stempla. Jedynie klej na bazie żywic metakrylanowych o nazwie Plastic Welding firmy VersaChem pozwolił na

częściową dekohezję powłoki lub oderwanie jej od podłoża. Naprężenia odrywające uzyskane na wstępnym etapie badań nie są zadawalające nawet dla wybranego kleju Plastic Welding. Dopracowania w następnym etapie testów i badań wymaga przygotowanie mechaniczne powłoki polimerowej przez odpowiednie zmatowienie papierem ściernym na głębokość do 25% grubości powłoki. Zwiększy to powierzchnię czynną kleju z powłoką i powinno poprawić adhezję kleju do powłoki co umożliwi jej całkowite oderwanie od podłoża i ocenę naprężenia odrywającego dla poszczególnych wariantów próbek malowanych proszkowo. Podejmowane próby w tym zakresie potwierdzają możliwość zwiększenia w ten sposób siły adhezji kleju do powłoki proszkowej.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Analizując uzyskane wyniki badań przedstawione w niniejszej pracy można stwierdzić, że malowanie proszkowe blach ocynkowanych ogniowo oraz blach aluminiowych jest procesem mocno zależnym od odpowiedniego przygotowania podłoża oraz zastosowanej technologii cięcia zapewniającej uzyskanie odpowiedniej grubości powłoki ochronnej cynkowej oraz polimerowej na krawędziach. Stwierdzono, że o ile grubości lakieru proszkowego na powierzchni blach stalowych ocynkowanych jak i aluminiowych wykazują mocno zróżnicowane grubości powłok, także w zależności o rodzaju zastosowanej farby i typu podłoża, to zapewniają one wymaganą odporność na czynniki atmosferyczne dzięki swojej dobrej morfologii. Niestety słabym punktem wszystkich płytek testowych blach ze stali ocynkowanej był brak cynku na krawędzi i niska grubość powłok polimerowych nie zapewniająca nawet minimalnej wymaganej odporności korozyjnej.

Analiza powłoki cynku i powłoki polimerowej z wykorzystaniem mikroskopu elektronowego skaningowego potwierdziła stopowy charakter powłoki ze zmniejszającą się zawartością żelaza w powłoce cynku wraz z oddalaniem się od stalowego podłoża oraz pozwoliła ujawnić złożoną strukturę powłoki polimerowej z udziałem stabilizatorów i dodatków wypełniających takich jak np. tlenek tytanu.

Badania techniką Pull off pozwoliły wybrać do testów docelowych przyczepności powłok polimerowych klej Plastic Welding, który zapewnia minimalną wymaganą przyczepność do powłoki polimerowej jak i do aluminiowego stempla testowego.

Podjęte w tym artykule badania stanowią wstępną diagnozę problemów będących przedmiotem w/w projektu PBL i pozwoliły na przygotowanie planu badań w II etapie jego realizacji, których wyniki zostaną zaprezentowane w kolejnych publikacjach.

#### LITERATURA

1. P. Liberski, Antykorozyjne powłoki zanurzeniowe, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2013;
2. D. Kotnarowska, Destrukcja powłok polimerowych pod wpływem czynników eksploatacyjnych, Wydawca Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Warszawa 2015;
3. D. Kotnarowska, Powłoki ochronne : wytwarzanie, eksploatacja, badania, Politechnika Radomska, Wydawnictwo, Radom, 2010;
4. A. Lewińska – Romicka, Pomiary grubości powłok, Wyd. Biuro Gamma, Warszawa, 2001;