



TalentDetector

**TalentDetector2023_Summer
INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC
CONFERENCE**

**Scientific editor:
Mirosław Bonek**

Department of Engineering Materials and Biomaterials,
Faculty of Mechanical Engineering,
Silesian University of Technology
26th June 2023
Brenna, Poland



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, A. Czupryński, A. Drygała, K. Gołombek, R. Honysz, A. Kania, M. Kciuk, A. Kloc-Ptaszna, M. Kremzer, M. Król, B. Krupińska, L. Kuchariková, S. Lesz, G. Matula, C. Meran, J. Nowak, F. Nový, O. Polishchuk, M. Polok-Rubiniec, M. Roszak, M. Spilka, M. Sroka, M. Staszuk, M. Szindler, A. Śliwa, T. Tański, E. Tillová, J. Mazurkiewicz, A. Włodarczyk-Fligier

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

Wydano za zgodą:

Kierownika Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
Wydziału Mechanicznego Technologicznego
Politechniki Śląskiej

Wydawca:

Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska
Gliwice 2023

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: czerwiec 2023

**INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE
TALENTDETECTOR2023_SUMMER
SILESIAIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, GLIWICE-BRENNNA, POLAND
26TH JUNE 2023**

The International Student Scientific Conference TalentDetector2023_Summer aims to integrate the student and scientific community dealing with topics related to material technologies. It is a place that gives the opportunity to exchange experiences, knowledge, skills and present current scientific achievements, developing and expanding students' interests in the field of materials engineering, surface engineering, biomaterials and biomedical engineering, nanotechnology, pro-ecological technologies and computer materials science. The conference allows for the presentation of projects conducted with the industry as part of the activities of Student Scientific Circles, doctorates, projects implemented in the form of PBL - Project Based Learning as part of the Excellence Initiative - Research University at the Silesian University of Technology, PBL in the framework of EURECA PRO/European University in Responsible Consumption and Production, international bilateral cooperation and projects implemented as part of the Visegrad Scholarship Program 2022/2023.



CONFERENCE ORGANIZER

Department of Engineering Materials and Biomaterials, Faculty of Mechanical Engineering,
Silesian University of Technology, Gliwice, Poland

CONFERENCE CO-ORGANIZER

Materials Science Circle of the Association of Alumni of the Silesian University of Technology,
Gliwice, Poland

INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE

prof. Mirosław Bonek, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland - *President of the International Scientific Committee*

prof. Marcin Adamiak, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland
prof. Sedat Alkoy, Gebze Technical University, Gebze, Turkey
prof. Rafał Babilas, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland
prof. Ahmet Durgutlu, Gazi University, Ankara, Turkey
prof. Otar Gelashvili, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia
prof. Boris Gitolendia, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia
prof. Adam Grajcar, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland
prof. Volkan Kılıçlı, Gazi University, Ankara, Turkey
doc. Lenka Kuchariková, University of Zilina, Zilina, Slovakia
prof. Martin Kusy, Slovak Technical University in Bratislava, Trnava, Slovakia
prof. Grzegorz Matula, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland
prof. Janusz Mazurkiewicz, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland
prof. Serhii Matiukh, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine
prof. Cemal Meran, Pamukkale University, Denizli, Turkey
prof. Oleh Polishchuk, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine
prof. Mykola Skyba, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine
prof. Tomasz Tański, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland
prof. Eva Tillova, University of Zilina, Zilina, Slovakia

ORGANIZING COMMITTEE*Chairman*

prof. Mirosław Bonek

prof. Marcin Adamiak	dr. Aneta Kania
prof. Zbigniew Brytan	dr. Monika Kciuk
prof. Klaudiusz Gołombek	dr. Anna Kloc-Ptaszna
prof. Sabina Lesz	dr. Mariusz Król
prof. Grzegorz Matula	dr. Agnieszka J. Nowak
prof. Janusz Mazurkiewicz	dr. Magdalena Polok-Rubinić
prof. Daniel Pakuła	dr. Łukasz Reimann
prof. Marek Roszak	dr. Weronika Smok
prof. Marek Sroka	dr. Marcin Staszuk
prof. Agata Śliwa	dr. Magdalena Szindler
prof. Tomasz Tański	dr. Marek Szindler
dr. K. Cesarz-Andraczke	dr. Anna Włodarczyk-Fligier
dr. Aleksandra Drygała	Anna Kiljan MSc
dr. Rafał Honysz	Marta Zaborowska MSc



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Contents

VOLUME 1

Surface Morphology of P3HT-PCBM Solar Cells Encapsulated with SHF E. Adzo Addae, A. Nana Sekyi Appiah, M. Adamiak.....	1
Influence of laser surface treatment on structure and properties of the metal materials E. Akbari, R. Danesh-Marnani, M. Bonek.....	6
Metal Additive Manufacturing General Overview K. Akewaq, M. Kremzer, G. Matula.....	10
Influences of Energy Density on The Structure and Hardness of Selective Laser Melted AlSi7Mg Alloy A.N.S. Appiah, H.B. Mamo, P. Snopiński, M. Król, M. Kremzer, M. Adamiak.....	21
Innovation Model of the Label Sticking Mechanism and Brief Analysis of its Business Value T. Baramashvili, B. Gitoleandia, M. Barbakadze.....	29
Vplyv teploty formy na štruktúru a vlastnosti Al-zliatiny A. Barčák, E. Tillová, L. Kuchariková, M. Bonek.....	34
Wpływ grubości warstwy półprzewodnikowej na własności optoelektryczne barwnikowych ogniw fotowoltaicznych K. Barczak, K. Herka, D. Czułył, J. Budzynowski, S. Lesz, A. Zarychta, A. Drygała.....	41
Dedicated calculator for determining critical micelle concentration K. Bartel, O. Chojecka, M. Gawliczek, J. Schneider, N. Swoboda, K. Wesenfeld, A. Mielańczyk, A. Bal.....	49
Wirtualny scratch test M. Belina, S. Czyż, M. Dolatowski, R. Honysz.....	57
Wtapianie cząstek złota przy użyciu krótkoimpulsowej obróbki laserowej O. Bialas.....	63

Przyczyny korozji wkrętów z galwanicznymi powłokami ZnNi stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym J. Bicz, P. Ferdyn, A. Kupień, J. Plaszczyk, M. Rejek, D. Towarnicki, M. Król, J. Mazurkiewicz	69
Klasyfikacja funkcjonalnych materiałów gradientowych ze względu na rodzaj, wielkość oraz rozkład gradientu J. Bicz, A. Kloc-Ptaszna	75
Klasyfikacja funkcjonalnych materiałów gradientowych ze względu na materiały składowe, stan skupienia w trakcie przetwarzania oraz strukturę wewnętrzną J. Bicz, A. Kloc-Ptaszna	83
Hybrydowe metody obróbki materiałów konstrukcyjnych i narzędziowych J. Bicz, W. Wanczura, D. Pakuła, M. Staszuk.....	91
Symulacja procesu walcowania A. Bosek, S. Dobrowolski, B. Znamirowski, R. Honysz	105
Štúdium vlastností polymérnych kompozitov vystužených uhlíkovými vláknami M. Bôžek, L. Markovičová	112
Preparation of silica aerogels using the sol-gel method M. Brączek, J. Bugła, M.M. Szindler, M. Szindler, J. Popis	120
Analiza rozkładu naprężeń, przemieszczeń oraz odkształceń w formie wtryskowej J. Chudy, D. Towarnicki, A. Sliwa.....	128
GC-MS analysis of natural and anthropogenic organic pollutants of rainwater from various surfaces P. Cichy, K. Dudzisz, K. Pawlusińska, N. Sępek, E. Bahrouni, P. Wikliński, E. Kudlek, A. Marszałek, E. Puszczalo, K. Szymańska, M. Sroka, N.F.A. Salam	135
Charakterizácia adhézie špeciálnej gumárenskej zmesi a polyuretánovej peny - experiment A. Ciesarová, M. Matis, L. Markovičová.....	143
Influence of laser processing on the structure of the surface layer of metal alloys P. Cincio, D. Gajczowska, T. Głowinkowski, P. Jerominek, P. Świerczek, A. Zyzik, T. Setnik, J. Płocica, M. Bonek, E. Tillova	151
Wpływ obróbki laserowej na rozdrobnienie struktury warstwy wierzchniej stopów metali w kontekście przedmiotów realizowanych przez uczestników PBL P. Cincio, T. Głowinkowski, P. Jerominek, P. Świerczek, M. Bonek	158

The influence of selecting technological parameters for laser cutting on the quality of large-scale steel products P. Cisowski, A. Wójtowicz, K. Królikowska, M. Konieczny, M. Laskowski, N. Peters, S. Szeja, B. Jóźwiak, N. Juszczak, M. Bonek, O. Polishchuk.....	165
Wytwarzanie technologią druku 3D materiału inżynierskiego o zróżnicowanej sztywności przeznaczonych na spersonalizowane ortozy dziecięce (AFO) K. Cuber, A.J. Nowak	174
Obserwacje makro- i mikroskopowe fotoanody barwnikowego ogniwa słonecznego D. Czuły, J. Budzynowski, K. Barczak, K. Herka, W. Pakieła, S. Lesz, A. Zarychta, M. Zięba, A. Drygała	184
Microstructural and Hardness distribution analysis of Laser Powder Bed Fusion (LPBF) printed 2507 duplex stainless M.J. Dagnaw, Z. Brytan.....	193
Application of organic-inorganic alginate-based capsules with TiO ₂ /Eosin Y in the photocatalytic degradation of thiazine dyes A. Duda, B. Kopyciński.....	201
Badania własności wytrzymałościowych filamentów domieszkowanych recyklatem P. Falkowska, Sz. Jędrzejewski, D. Tatar, A.J. Nowak, M. Król	209
Preparation and characterization of materials based on expanded graphite as an enzyme carrier A. Filipowska, A. Marzec-Przyszlak, E. Skwarek, J. Bodak, K. Bryzik, P. Ferst, J. Mieszczanin, M. Pieniżek, K. Pilarski, A. Taratuta, J. Majewska, W. Filipowski	216
Wpływ obróbki laserowej na strukturalne aspekty materiału D. Gajczowska, M. Paluch, P. Cisowski, M. Bonek	224
Tribological properties of the surface layer of tool steels after laser remelting K. Gawęda, K. Samek, P. Janiak, J. Kierepka, M. Paluch, M. Volkmer, C. Meran, O. Polishchuk, M. Bonek	230
Charakterystyka właściwości wielowarstwowych folii polietylenowych z dodatkiem regranulatu RPE oraz cząstek CaCO ₃ : badania współczynnika tarcia i analiza mikroskopowa T. Gliński, M. Bilewicz, T. Tański, K. Pierskała	238
Wytwarzanie spieku ze stali 316L z nowo opracowanego filamentu kompozytowego M. Gocki, G. Matula	247

Analiza systemów zarządzania o najczęstszym zastosowaniu w poszczególnych branżach P. Gołuch, K. Furman, X. Wang, Y. Lu, A. Kiljan, E. Jonda	255
Badania nad odzyskiem cynku z odpadowych roztworów wodnych S. Górecki, D. Babilas.....	265
Struktura i własności polilaktydu stosowanego do druku 3D O. Górka, K. Sośniak, M. Polok-Rubinić, A. Włodarczyk-Fligier, A. Kania	273
Wpływ plazmowej elektrolytycznej oksydacji na korozijną odporność złoty AZ31 J. Hrbek, M. Štrbák, E. Tillová, M. Bonek	278
Korozyjna odporność austenitycznych niekorodujących oceli w 3,5% NaCl M. Hrubý, V. Zatlíková.....	285
Analiza mikrostrukturnych zmian potrubia z ocele AISI 316L F. Janiš, D. Medvecká, F. Nový, M. Bonek.....	292
Zastosowanie nowoczesnej technologii cięcia laserowego stali w przemyśle samochodowym B. Jóźwiak, N. Juszczak, M. Bonek	300
Optymalizacja wybranego odcinka procesu produkcyjnego z wykorzystaniem oprogramowania FlexSim P. Karchut, P. Gołuch, K. Furman, Y. Lu, X. Wang, A. Kiljan, E. Jonda, D. Krenczyk	304
Symulacja komputerowa wpływu strefy zgniotu w samochodzie osobowym na bezpieczeństwo pasażerów K. Kojm, D. Lazaj, Ł. Lomania, A. Sasiela, C. Zach, W. Mikołajko, A. Śliwa, A. Dziwis, M. Sroka.....	315
Thermoplastic starch in biodegradable polymeric blends used in the film production processes Ł. Kołodziej, A.J. Nowak, S. Waśkiewicz.....	323
Wpływ dodatku miedzi na stopień zagęszczenia stali 18Ni300 wytwarzanej przez prasowanie i spiekanie proszku N. Kos, B. Tomiczek.....	334
Wybrane aspekty obróbki cieplno-chemicznej stali 16MnCr5 B. Krawczyk, B. Grzegorzczak.....	342
Epoksydowo-bezwodnikowe materiały kompozytowe katalizowane związkami fosfoniowymi – wstęp do zastosowania kriogenicznego A. Krzak, A.J. Nowak.....	348

Meranie modulu prużności akustickými metodami M. Kucbel, M. Uhrčík, L. Kuchariková, M. Bonek	359
---	-----

VOLUME 2

Analiza wpływu wybranych parametrów procesu cynkowania galwanicznego na grubość antykorozyjnych powłok cynkowych M. Łągiewka, A. Widak, R. Trojnar, D. Solipiwo, M. Bodio, J. Wyrwał, S. Lesz, A. Zarychta	367
Mikroporowate szkielety niklowe wytwarzane metodą hybrydową P. Malkusch, B. Tomiczek, G. Matula	375
Zastosowanie haloizytu jako napelniacza do modyfikacji terpolimeru EPDM M. Marczak, G. Matula, P. Sakiewicz	386
Mobile Cable Reel Transporter Car Design and Manufacturing C. Meran, O. Eren, K. İlhan, R. Dinçer, A. Şahin, C. Kuyu, M. Guvenc, A. Ceylanoglu.....	397
The Design of Security Barrier for Cable Machine C. Meran, Ö. Eren, K. İlhan, B. Kahraman, A.İ. Narin, S.G. Kanyılmaz	404
Mobile Cable Reel Play-Out Stand Design and Manufacturing C. Meran, K. İlhan, O. Eren, D. Ustabasi, C. Ozdemir, A. Babacoglu, B. Calhan	409
Porównanie wpływu napawania utwardzającego jednowarstwowego z napawaniem utwardzającym dwuwarstwowym na zmiany składu chemicznego stali kwasoodpornej 1.4301 A. Migacz, M. Bonek.....	416
The influence of manganese residue filler on the mechanical properties of silicone-based composites M. Mrówka, G. Moskal.....	424
Projekt komory rękawicowej typu glove box S. Musioł, G. Pośpiech, N. Tomanek, S. Nowak, J. Popis, S. Lesz	429
Optimization of VR performance by utilizing eye tracking for foveated rendering D. Myszor, P. Bartosz, J. Sarno	433
Optimization of user experience ergonomics used in visual brain-computer interfaces D. Myszor, P. Bartosz, J. Sarno, M. Wieczorek, M. Wola, K. Cichecka, M. Łoś, M. Polak, N. Krzywda	438

Design of a multi-purpose automatic unmanned aerial vehicle D. Myszor, W. Cofalik, P. Mondry, V. Morawiec, P. Karski	446
Numerical research of gear-lever of the planetary drive mechanisms of basic needles of warp knitting machines with the use of the software environment PRANS-PK V. Neimak, O. Polishchuk, T. Romanets, M. Bonek	454
Zastosowanie regresji wielokrotnej do obliczania temperatury początku przemiany martenzytycznej W. Niechoj, J. Trzaska.....	461
Próba udarności nowo opracowanych w pełni biodegradowalnych materiałów kompozytowych do kontaktu z żywnością z naturalnym napełniaczem K. Niesporek, O. Baszczeńska, A.J. Nowak	467
Application of Innovative Laser Technology to Improve the Functional Properties of Surface of Steel Z. Noor Ul Ain, M. Madani, M. Bonek.....	475
Improving the service life of elements made in 3D printing technology by using an additional temperature control system in the printer's construction S. Nowak, M. Brączek, J. Bugła, E. Nawalińska, M.M. Szindler, J. Popis, M. Szindler, B. Tomiczek	482
Influence of laser surface treatment on structure and properties of the steel E. Oghenerukevwe, J. Muniyika Kapala, M. Bonek	487
Návrh rámu dronu pre priemyselné využitie M. Orolin, E. Tillová, P. Pačák, M. Bonek	492
Charakterystyka i własności materiałów polimerowych stosowanych na stabilizatory kości J. Pająk, R. Gabryś, A. Włodarczyk-Fligier, A. Kania, M. Polok-Rubiniec.....	498
Komputerowe wspomaganie projektowania uchwytu rowerowego na telefon M. Pogodała, M. Spilka	503
Analiza rozkładu naprężeń, przemieszczeń oraz odkształcenia w trakcie obrotu łopaty turbiny wiatrowej J. Polis, J. Bicz, K. Gajewski, A. Śliwa	509
Obróbka laserowa materiałów konstrukcyjnych i narzędziowych J. Polis, Z. Buchaj, D. Pakuła, M. Staszuk.....	524

Klasyfikacja funkcjonalnych materiałów gradientowych ze względu na wartość naprężeń szczątkowych oraz stopień kontroli gradientu J. Polis, A. Kloc-Ptaszna	537
Klasyfikacja funkcjonalnych materiałów gradientowych ze względu na ich zastosowanie J. Polis, A. Kloc-Ptaszna	542
Development of technology for processing of polymer waste of light industry into finished products using 3D printers A. Polishchuk, O. Polishchuk, M. Bonek, Z. Brytan, S. Lisevich	548
Application of neural networks to analyze groundwater quality P. Radek, M. Sładek, J. Tłołka, B. Zieliński, P. Kołodziejczyk, M. Ziółkowska, M.M. Szindler, M. Szindler, A. Kania	558
Prototyp generatora niskich napięć z wykorzystaniem zjawiska piezoelektrycznego M. Rak, M. Bilewicz, A. Katunin, M. Chomiak, J. Wojnarowski, J. Sławińska, M. Żebrowski, J. Patera, A. Sosnowski	567
Partycypacja pracowników w procesie doskonalenia w oparciu o spełnienie wymagań w zakresie zarządzania procesami M. Roszak, A. Siwczyk.....	573
Impact of warranty claims on changes implemented in product and manufacturing process according APQP requirements Ł. Rudolf, M. Roszak	577
Badania układów metal-polimer do zastosowań medycznych S. Sacha, W. Cieślak, W. Wiśniewska, M. Rzepiela, M. Gawlas, K. Cesarz-Andraczke, A. Kania.....	581
Removal of Heavy Metals & Bacterial Infection from Industrial Wastewater Using Nanocomposite of Silver Nanoparticles & Household Wastes S. Salahi	586
Obróbka laserowa jako nowoczesna technologia w inżynierii powierzchni T. Setnik, J. Płocica, M. Bonek.....	593
Integracja znormalizowanych systemów zarządzania a wymagania specyfikacji PAS 99:2012 M. Skorek, M. Molenda, M. Roszak	597
Struktura i własności rur ze stali austenitycznych spawanych doczołowo metodą TiG A. Skwara, T. Słaboszewski, A. Ludwig, P. Kozłowski, Z. Litwina, M. Kciuk, A. Czupryński, W. Kwaśny	601

Nanomaterials based on SnSe - characterization and application W. Smok, P. Jarka	609
Metody wytwarzania ortez dla sportowców z urazami kończyn S. Sochaj, K. Tobolik, A. Kania, M. Polok-Rubiniec, A. Włodarczyk-Fligier.....	613
Characterization and mechanical behavior of E2594 super duplex stainless steel weld metal M. Sözeri, U. Özdemir, T. Findik.....	617
Vplyv tlakových zvyškových napätí na tribologické vlastnosti nízkolegovanéj ocele P. Špuro, M. Vicen, F. Nový, M. Bonek.....	625
Energia elektryczna ze Słońca W. Stolarczyk, Z. Zakrzewska, J. Popis, B. Hrapkowicz, A. Drygała	633
Anionic and cationic dyes adsorption onto sludge-based activated carbon P. Stuchlik, R. Kryst, D. Pokoj, K. Hanzlik, N. Piekarczyk, B. Pieczykolan, A. Marszałek, E. Puszczało, B. Solecka, M. Sroka	641
Microstructure determination of AlCrTaN coatings magnetron sputtered on WC-Co substrate using X-ray diffraction P. Šulháněk, L. Ďuriška, I. Černíčková, M. Haršáni, M. Kusý	649
Influence of fatigue load conditions on the structure and hardness of the welded butt joint of Inconel 800 HT sheets J. Supernak, K. Skonieczny, T. Szeliga, M. Chowaniak, R. Czarnecki, A. Czupryński, W. Kwaśny.....	655
Znaczenie standaryzacji z wykorzystaniem metody SMED na przykładzie przeprowadzonej optymalizacji procesu przezbrojenia K. Szczyrba, M. Roszak	662
Automatyzacja procesu cięcia laserem – kluczowe parametry optymalne grawerowania i cięcia przy zastosowaniu lasera CO ₂ S. Szeja, A. Zyzik, M. Volkmer, M. Bonek	668
Wpływ modyfikacji narzędzi na czas przezbrojenia R. Trepiać, M. Roszak	674
Wpływ składu chemicznego na przemianę monotektoidalną stopów Zn-Al A. Trojacka, K. Sakowski, M. Szafran, K. Trojacka, M. Krupiński, B. Krupińska, W. Borek	680

Wpływ gęstości prądu i czasu nakładania na grubość antykorozyjnych powłok cynkowych R. Trojnar, D. Solipiwo, M. Bodio, A. Widak, M. Łągiewka, J. Popis, W. Pakieła, B. Grzegorzczak, J. Wyrwał, A. Zarychta, S. Lesz.....	687
Wpływ obróbki cieplnej na wielkość ziarna spoiny z ferrytycznej stali nierdzewnej gatunku X2CrTiNb18 G. Walczyk, W. Pakieła, M. Roszak.....	699
Warstwy samonaprawialne na bazie biopolimeru do zastosowań implantologicznych W. Wiśniewska, M. Rzepiela, M. Gawlas, S. Sacha, W. Cieślak, K. Cesarz-Andraczke, A. Kania.....	703
Zapewnienie jakości procesów specjalnych A. Wójtowicz, M. Konieczny, K. Królikowska, M. Laskowski, N. Peters, M. Bonek.....	708
Znaczenie wdrożenia metody Total Productive Maintenance w działalności organizacji w obszarach produkcyjnym i pozaprodukcyjnym A. Wolska, A. Folek, L. Gajda, M. Roszak.....	716
Application of Biomaterials Materials for Medicine S. Worku, M. Bonek.....	723
Badania efektu samonaprawiania się wybranych materiałów polimerowych K. Wróbel, K. Cesarz-Andraczke	731
Electrospinning of 1D metal oxide nanostructures M. Zaborowska, T. Tański.....	736
Analiza numeryczna własności wytrzymałościowych czekana wspinaczkowego Z. Zielińska, R. Szymik, E. Lewandowska, J. Jabłoński, P. Pawluk, A. Dziwis, M. Sroka, W. Mikołajko, A. Śliwa, D. Śliwa	741
A facile route for preparing Hydroxyapatite powders from biogenic waste Y.M. Tsekpo, P. Jarka, T. Tański.....	747
Projektowanie reaktorów mikrofluidycznych typu „lab-on-chip” A. Wierzbicka, M. Skrzek, D. Grychtoł, W. Fizia, Ł. Mielańczyk, A. Mielańczyk, M. Lemanowicz	752
Projektowanie elementów ciśnieniowych z zastosowaniem analizy MES na przykładzie wzmocnionego okrągłego dna płaskiego T. Puszczało, A. Zieliński, K. Sówka, M. Sroka, H. Purzyńska.....	760
Industrial partner of the TalentDetector2023_Summer	765



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Analiza wpływu wybranych parametrów procesu cynkowania galwanicznego na grubość antykorozyjnych powłok cynkowych

M. Łągiewka^a, A. Widak^a, R. Trojnar^b, D. Solipiwo^b, M. Bodio^b, J. Wyrwał^c, S. Lesz^d, A. Zarychta^d

^a Student, Silesian University of Technology, Faculty of Automatic Control, Electronics and Computer Science, Akademicka 16, 44-100 Gliwice

email: macilag700@student.polsl.pl, adriwid422@student.polsl.pl

^b Student, Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 18a Konarskiego Str., 44-100 Gliwice, Poland, email: radotro676@student.polsl.pl, dawisol189@student.polsl.pl, mb304698@student.polsl.pl

^c Silesian University of Technology, Faculty of Automatic Control, Electronics and Computer Science, Department of Measurements and Control Systems, Akademicka 16, 44-100 Gliwice

email: Janusz.wyrwal@polsl.pl

^d Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials, 18a Konarskiego Str., 44-100 Gliwice, Poland

email: sabina.lesz@polsl.pl, adam.zarychta@polsl.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono proces technologiczny osadzania powłok cynkowych metodą cynkowania galwanicznego oraz wyniki analizy wpływu wybranych parametrów prowadzenia procesu cynkowania na grubość wytworzonych powłok cynkowych. W pracy dokonano syntezy empirycznego modelu matematycznego analizowanego procesu.

Abstract: The article presents the technological process of zinc coating deposition by electrogalvanizing and the results of the analysis of the influence of selected parameters of the galvanizing process on the thickness of the zinc coatings produced. The paper synthesizes the empirical mathematical model of the analyzed process.

Słowa kluczowe: cynkowanie galwaniczne, powłoki cynkowe, modelowanie matematyczne

1. WPROWADZENIE

Cynkowanie to proces polegający na pokrywaniu przedmiotu metalowego (najczęściej stalowego) warstwą cynku. Powlekanie powierzchni ma na celu ochronę przed działaniem czynników zewnętrznych mogących powodować korozję. Dwie najczęściej stosowane metody cynkowania to cynkowanie ogniowe oraz galwaniczne (elektrolityczne).

Cynkowanie ogniowe polega na zanurzeniu przedmiotu (z uprzednio odpowiednio przygotowaną powierzchnią) w wannie z płynnym cynkiem. Podczas kąpieli, w temperaturze 440-460 °C, na skutek dyfuzji płynnego cynku na powierzchni elementów poddawanych obróbce

dochodzi do wytworzenia warstwy cynku, składającej się ze stopionego cynku i żelaza. Metoda ta stosowana jest głównie do cynkowania dużych przedmiotów o prostej geometrii. Grubość powłoki dla metody cynkowania ogniowego zależy między innymi od czasu i temperatury kąpieli oraz składu stopu cynku. Średni zakres grubości powłok uzyskiwanych metodą ogniową waha się w granicach od 40 μm do 150 μm . [1].

Cynkowanie galwaniczne wykorzystuje proces elektrochemiczny i jest metodą elektrolityczną wytwarzania powłok na materiałach stalowych. Z uwagi na położenie cynku w szeregu napięciowym powłoki cynkowe osadzone elektrolitycznie na stalach lub żelazie mają charakter anodowy. Na skutek przyprływu prądu przez elektrolit, w którym zanurzony jest element poddawany cynkowaniu, jony cynku są transportowane z anody wykonanej z cynku do materiału podłoża, który pełni w procesie cynkowania rolę katody. Grubość powłoki powstałej w procesie cynkowania galwanicznego w przeciwieństwie do metody ogniowej może być ściśle kontrolowana w zależności od parametrów prowadzenia procesu (gęstości prądu oraz czasu trwania procesu). Średni zakres grubości powłok dla tej metody waha się w przedziale od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów. Metoda umożliwia wytworzenie powłoki błyszczącej (cynkowanie z polyskiem) lub zabarwionej w różnym kolorze co sprawia, że stosowana jest do przedmiotów, w których ochronna warstwa cynku ma również spełniać role dekoracyjne. Zasadniczymi zaletami tej metody cynkowania są: duża równomierność wytworzonych powłok, możliwość wytwarzania powłok o pożądanej grubości, możliwość otrzymywania powłok o różnych twardościach, niska temperatura kąpieli (20-30°C), mała porowatość otrzymanych powłok, duża czystość nakładanych powłok, małe straty osadzanego cynku oraz dobra przyczepność powłok. Cynkowanie elektrolityczne prowadzi się szczególnie w przypadkach gdy należy wytworzyć powłoki o dużej czystości i dokładnie regulowanych grubościach [2].

Inne metody cynkowania takie jak cynkowanie płatkowe, mechaniczne, natryskowe, proszkowe czy termodyfuzyjne stosuje się w przypadku przedmiotów o specyficznych wymaganiach, np. wrażliwych na wysoką temperaturę, działanie prądu elektrycznego lub wykonanych z materiału innego niż stal/żelazo [3,4].

Na własności powłoki wytworzonej w procesie cynkowania galwanicznego wpływa wiele czynników [5], w tym: sposób przygotowania cynkowanej powierzchni, struktura i topografia cynkowanej powierzchni, skład chemiczny cynkowanego materiału, skład elektrolitu [6], zastosowane pierwiastki towarzyszące (dodatki) [7], warunki fizykochemiczne w czasie osadzania powłoki, czas przebywania w kąpieli, temperatura elektrolitu [8], pH kąpieli [9], gęstość prądu w czasie kąpieli [10], obecność zanieczyszczeń w elektrolicie [11].

Zasadnicza trudność w analizie układów fizycznych wynika ze złożoności zachodzących w nich procesów. Ogólną strategią stosowaną w celu zrozumienia zachowania złożonych układów jest zastosowanie odpowiedniego uproszczonego opisu rozważnego systemu w postaci adekwatnego modelu matematycznego. Każdy model matematyczny opisuje rozważany układ za pomocą pewnego zestawu zmiennych, które w zależności od natury opisywanego układu mogą przyjmować wartości z różnych zbiorów. Właściwy model wiąże ze sobą te zmienne opisując w ten sposób powiązania między różnymi wielkościami w rozważnym układzie fizycznym.

Model tworzony jest zawsze w określonym celu np. aby oceniać działanie układu czy przewidywać zachowanie układu. W praktyce inżynierskiej stosuje się wiele różnych typów modeli matematycznych, w zależności od celu, do którego mają one być zastosowane.

Modele fenomenologiczne opierają się na matematycznym opisie zjawiska lub procesu, który ma być reprezentowany przez model. Modele te zawierają zwykle parametry interpretowalne fizycznie, czyli takie, które reprezentują rzeczywiste właściwości układu, co jest jedną z ich

najważniejszych zalet. Synteza modeli fenomenologicznych bazuje na ścisłym opisie zjawisk fizycznych zachodzących w rozważnym systemie. Jeśli nic nie wiadomo o systemie, należy zastosować modele empiryczne. Model empiryczny nie bazuje na teorii lecz opiera się na obserwacji opisywanego zjawiska, a o jego strukturze decydują obserwowane zależności wejściowo-wyjściowe między danymi eksperymentalnymi. Modele empiryczne mają uniwersalne zastosowanie, są łatwe do skonfigurowania, ale mają ograniczony zakres zastosowania. Z kolei modele fenomenologiczne umożliwiają zwykle głębszy wgląd w zachowanie rozważanego systemu, ale ich synteza jest o wiele bardziej złożona i czasochłonna.

Niniejszy artykuł dotyczy analizy grubości powłoki cynkowej osadzanej metodą galwaniczną. Z uwagi na mnogość czynników wpływających na osadzaną w procesie cynkowania powłokę praca koncentruje się na analizie wpływu dwóch wybranych parametrów prowadzenia procesu tj. czasu kąpieli w elektrolicie oraz gęstości prądu w czasie tej kąpieli na grubość wytworzonej powłoki cynkowej. W rozdziale drugim scharakteryzowano próbki, które zostały poddane procesowi cynkowania oraz przedstawiono charakterystykę linii technologicznej, na której wykonano cynkowanie, określając zasadnicze parametry prowadzenia procesu (temperatura, czas, skład poszczególnych kąpiele). W rozdziale trzecim przedstawione zostały wyniki dotyczące modelowania matematycznego rozważnego zagadnienia. Przedstawiona została metodologia zastosowana do syntezy opracowanego modelu oraz ocena jego dopasowania. W rozdziale czwartym zamieszczono podsumowanie i wnioski końcowe.

2. BADANIA WŁASNE

2.1 Materiał bazowy

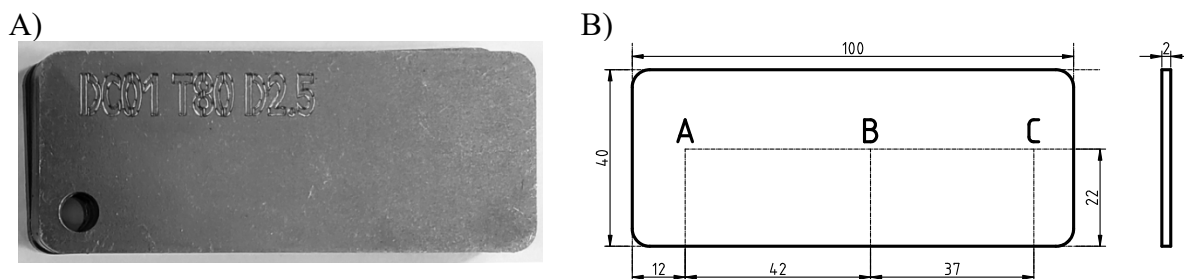
Próbki do badań, o wymiarach 100×40×2 mm (długość×szerokość×grubość) (Rysunek 1 B), zostały wycięte z arkusza blachy wykonanej ze stali DC01 (1.0330). Istotny wpływ na proces cynkowania ma skład cynkowanej stali. Krytyczna w tym zakresie jest szczególnie zawartość krzemu i fosforu. Generalnie, stale przeznaczone do cynkowania powinny mieć jak najmniejszą zawartość krzemu i fosforu. Z tego względu odpowiednia norma określa pożądany skład chemiczny stali poddawanej procesowi cynkowania. W tabeli 1 przedstawiono wymagane zgodnie z normą PN-EN 10152 [12] zawartości pierwiastków dla stali poddawanej cynkowaniu i zestawiono je ze średnimi zawartościami tych pierwiastków zamieszczonymi w świadectwie kontroli dostarczonym przez dostawcę arkusza blachy, z której wykonano próbki poddane cynkowaniu.

Na każdej próbce wykonany został grawer DC01 TX DY, gdzie: DC01 oznacza stal, z której wykonano próbki, X oznacza zastosowaną w procesie cynkowania gęstość prądu wyrażoną w A/dm², natomiast Y oznacza czas kąpieli w elektrolicie wyrażony w minutach (Rysunek 1A).

Tablica 1. Zawartość procentowa pierwiastków dla stali DC01 [%mas.]

Table 1. Percentage of chemical elements for steel DC01 [wt.%]

DC01	Skład chemiczny [%mas.]							
	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni
PN-EN 10152	0,12	0,6	-	0,045	0,045	-	-	-
Atest	0,07	0,4	0,009	0,013	0,006	0,03	0,02	0,01



Rysunek 1. A) Próbka ze stali DC01 przed cynkowaniem B) Wymiary próbki oraz rozkład punktów pomiaru grubości powłoki cynkowej

Figure 1. A) DC01 steel sample before electrogalvanizing B) sample dimensions and distribution of measurement points for the thickness of the zinc coating produced on the treated steel samples

2.2 Proces cynkowania galwanicznego

Cynkowanie galwaniczne zostało przeprowadzone w warunkach przemysłowych na zawieszkowej, zautomatyzowanej linii technologicznej, która wykorzystuje kąpiel alkaliczną. Załadunek i rozładunek na linii odbywa się ręcznie, następnie pozostałe kroki procesu są zautomatyzowane i sterowane komputerowo. Proces cynkowania został przeprowadzony w następujących krokach:

- *odtuszczanie chemiczne* powierzchni w obecności kwasu solnego (HCL) o stężeniu $100 \div 180 \text{ g/dm}^3$ oraz kwasu fosforowego (H_3PO_4) o stężeniu $50 \div 80 \text{ g/dm}^3$ w temperaturze $30\text{-}40^\circ\text{C}$ przez 500s,
- *trawie* w obecności kwasu solnego (HCL) o stężeniu $100 \div 180 \text{ g/dm}^3$ w temperaturze $30\text{-}40^\circ\text{C}$ przez 500s,
- *plukanie* w wodzie przez 25s,
- *odtuszczanie elektrochemiczne* w obecności wodorotlenku sodu (NaOH) o stężeniu $220 \div 260 \text{ g/dm}^3$ w temperaturze $50\text{-}60^\circ\text{C}$ i gęstości prądu 2 A/dm^2 przez 240 s,
- *plukanie* w wodzie przez 25 s,
- *dekapowanie*, w obecności kwasu solnego o stężeniu $120 \div 160 \text{ g/dm}^3$ oraz dodatku wspomagającego SIV 21 GAL będącego mieszaniną inhibitorów trawienia przez 135 s,
- *plukanie* w wodzie przez 25 s z dodatkiem środka wspomagającego AKTIV GAL 900 zwiększającego aktywność chemiczną powierzchni o składzie zawierającym metakrzemian sodu i wodorotlenek sodu,
- *cynkowanie galwaniczne* w temperaturze 24°C w kąpeli alkalicznej o składzie:
 - wodorotlenek sodu (NaOH) o stężeniu $140\text{-}142 \text{ g/dm}^3$, cynk o stężeniu $9 \div 13 \text{ g/dm}^3$, węglany o stężeniu $26 \div 30 \text{ g/dm}^3$,
 - dodatki wspomagające LUX SUPER GAL: nośnik (mieszanina nośnika połysku do alkalicznych wolnych od cyjanku elektrolitów cynkowych o składzie zawierającym: mocznik, imidazol, polimer chlorometylooksiranu), wyblyszczacz (mieszanina wyblyszczacza do alkalicznych wolnych od cyjanku elektrolitów cynkowych o składzie zawierającym: 1-benzylo-3-karboksy pirydyna sodu, disiarczan (IV) sodu) oraz zmiękcacz (mieszanina zmiękczacza i roztworu korektorowego do alkalicznych wolnych od cyjanku elektrolitów cynkowych o składzie zawierającym: krzemian sodu oraz tiomocznik),
- *plukanie odzyskowe* (10 s) i *plukanie* w wodzie przez 18 s,

- *aktywacja* w czasie 20 s z użyciem dodatku wspomagającego PASIV ACTIV PLUS 900 zwiększającego aktywność chemiczną powierzchni przed pasywacją w obecności 55% kwasu azotowego (HNO_3), za pomocą którego regulowano pH w zakresie 1,2-1,8,
- *pasywacja niebieska* z użyciem dodatku PASIV GAL 900-001 w obecności 55% kwasu azotowego (HNO_3), za pomocą którego regulowano pH w zakresie 1,8-2,5 w temperaturze 25°C przez 20 s,
- *plukanie* w wodzie przez 18 s,
- *plukanie* w wodzie demineralizowanej przez 10 s,
- *Suszenie* w temperaturze $50\text{-}60^\circ\text{C}$ przez 280 s.

Krok *cynkowanie galwaniczne* jest charakteryzowany przez dwa dodatkowe parametry tj. gęstościach prądu oraz czas kąpieli w elektrolicie. Na potrzeby badań proces cynkowania galwanicznego przeprowadzono dla trzech różnych gęstości prądu wynoszących odpowiednio $1,7\text{ A/dm}^2$, $2,1\text{ A/dm}^2$, $2,5\text{ A/dm}^2$, oraz trzech różnych czasów kąpieli w elektrolicie wynoszących 40 min, 80 min oraz 120 min. Dla każdej pary tych parametrów wykonano cynkowanie 6 próbek co daje łącznie liczbę 54 ocynkowanych próbek.

2.3 Wytworzone powłoki

Próbki zostały zważone przed oraz po cynkowaniu na wadze analitycznej firmy RADWAG AS110R.2 PLUS, która posiada dokładność $\pm 0,0002\text{ g}$ oraz maksymalny zakres pomiarowy do 110 g. Uśrednione różnice mas dla próbek przed i po cynkowaniu zamieszczono w tablicy 2.

Tablica 2. Dane pomiarowe, wyznaczone grubości powłok oraz prędkości osadzania warstw
Table 2. Measurement data, determined thicknesses of zinc coatings and speed of surface deposition

Parametry procesu		Różnica mas próbek po i przed cynkowaniem m_e , g	Zmierzone grubości powłoki cynkowych d , μm	Grubości powłoki wyznaczone z różnicy mas d , μm	Średnia szybkość osadzania, $\mu\text{m}/\text{min}$
Czas kąpieli t , min	Gęstość prądu, J , A/dm^2				
40	1,7	0,6125	11,1	10,02	0,28
40	2,1	0,6331	11,4	10,36	0,29
40	2,5	0,4513	11,8	11,08	0,30
80	1,7	1,0078	17,1	16,49	0,21
80	2,1	1,1153	19,2	18,24	0,24
80	2,5	1,9576	36,6	31,98	0,46
120	1,7	2,0832	37,5	34,04	0,31
120	2,1	1,8573	33,9	31,98	0,28
120	2,5	1,9633	36,4	32,08	0,30

Grubość osadzonych w procesie cynkowania powłok (d) określono za pomocą miernika DELTASCOPE FMP30 firmy Fischer o dokładności $\pm 0,5\ \mu\text{m}$. Pomiar grubości został wykonany w 3 punktach z każdej strony próbki. Umieszczenie punktów, w których wykonano pomiar grubości osadzonej powłoki został przedstawiony na rysunku 1B. Zmierzone wartości grubości osadzonych powłok uśredniono dla każdej pary parametrów procesu (czas kąpieli (t), gęstość prądu (J)) a ich wartości zamieszczono w tablicy 2.

W oparciu o dane dotyczące masy osadzonego w czasie cynkowania materiału wyznaczono grubość osadzonej powłoki. W tym celu założono, że grubość powłoki jest jednorodna na całej powierzchni próbek poddanych obróbce. Wyznaczono objętość osadzonej powłoki i porównano ją z objętością cynku o masie odpowiadającej ilości osadzonego materiału. Otrzymane w ten sposób równanie rozwiązano względem grubości osadzonej powłoki (Tablica 2). Uzyskane wyniki wykazują dużą zgodność z wynikami pomiarów grubości osadzonej powłoki co potwierdza poprawność wykonanych pomiarów.

Ponadto dla analizowanych wartości parametrów prowadzenia procesu cynkowania wyznaczono średnią prędkość osadzania się warstwy. Waha się ona w granicach od 0.24 $\mu\text{m}/\text{min}$ do 0.46 $\mu\text{m}/\text{min}$ i wykazuje tendencję do wzrostu wraz ze wzrostem gęstości prądu (Tablica 2).

3. MODELOWANIE MATEMATYCZNE

Każdy model matematyczny opisuje rozważany układ za pomocą pewnego zestawu zmiennych, które w zależności od natury opisywanego układu mogą przyjmować wartości z różnych zbiorów. W rozważanym przypadku zmiennymi tymi są czas kąpieli w elektrolicie oraz gęstość prądu w czasie cynkowania galwanicznego. Mogą one przyjmować wartości ze zbioru liczb rzeczywistych w granicach określonych przez dopuszczalne zakresy zmian tych parametrów dla prowadzenia procesu cynkowania. Właściwy model matematyczny będzie w rozważanym przypadku określał zależność grubości osadzonej powłoki w zależności od tych zmiennych. Ze względu na złożoność rozważanego zagadnienia zdecydowano się na dopasowanie do danych pomiarowych modelu empirycznego, który opisuje zależności wejściowo-wyjściowe rozważanego układu bez wnikania w złożony charakter zjawisk fizykochemicznych występujących w procesie cynkowania galwanicznego.

Do wyznaczenia modelu zastosowano metodę najmniejszych kwadratów. W rozważanym przypadku przyjęto, że dane pomiarowe $[t_i, J_i, d_i]$ będą aproksymowane za pomocą funkcji:

$$d = f(t, J, \mathbf{p}), \quad (1)$$

gdzie \mathbf{p} jest wektorem nieznanych parametrów funkcji f , które należy wyznaczyć. Nieznane parametry funkcji f zostały wyznaczone poprzez minimalizację wskaźnika jakości o następującej postaci:

$$d = \min_{\mathbf{p}} \sum_{i=1}^l [d_i - f(t_i, J_i, \mathbf{p})]^2, \quad (2)$$

gdzie l jest liczbą danych pomiarowych. Zatem rozwiązanie sformułowanego zadania aproksymacji sprowadzało się do rozwiązania zadania optymalizacji opisanego wskaźnikiem (2) minimalizującego sumę kwadratów błędów. Rozważono wiele różnych postaci funkcji f , które były zarówno liniowe jak i nieliniowe względem parametrów. Na drodze eksperymentów najlepsze wyniki uzyskano dla funkcji o postaci:

$$d(t, J) = p_1 + p_2 t + p_3 J + p_4 t^2 + p_5 t J + p_6 J^2 + p_7 t^2 J + p_8 t J^2. \quad (3)$$

Optymalne wartości parametrów funkcji $d(t, J)$ wyznaczone na podstawie numerycznej optymalizacji wskaźnika (2) przedstawiono w tablicy 3.

Rysunku 2 przedstawia dwa różne widoki hiperpowierzchni ilustrującej odpowiedź modelu opisanego równaniem (3) na zmiany wartości analizowanych parametrów procesu cynkowania galwanicznego w rozważanym zakresie. Na rysunku 2 zaznaczono również dane pomiarowe, aby ocenić w sposób jakościowy dopasowanie opracowanego modelu do tych danych.

Tablica 3. Optymalne wartości parametrów funkcji d

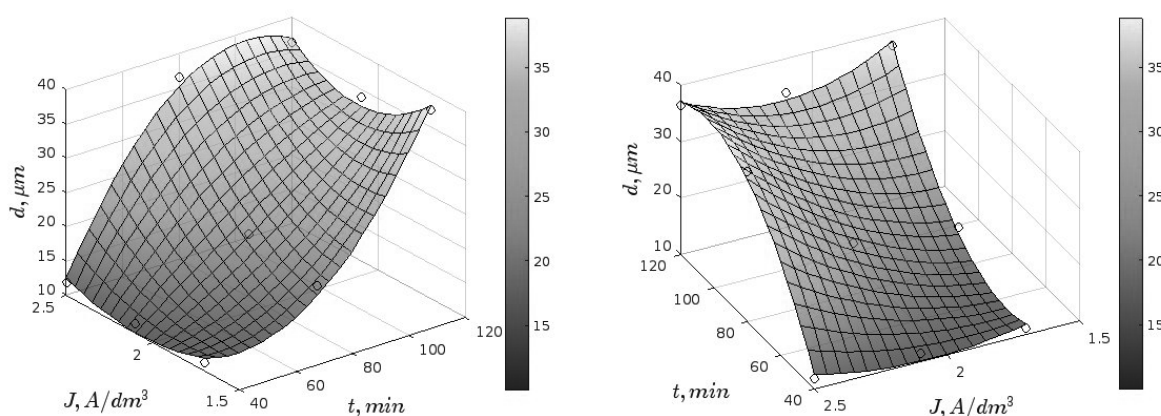
Table 3. Optimal values of function d parameters

Parametry funkcji d							
p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8
163.96	-3.736	-87.187	0.032	1.450	3.646	-0.015	0.2344

Jakość dopasowania modelu do danych pomiarowych oceniono również w sposób ilościowy wyznaczając tzw. wskaźnik dopasowania R^2 zdefiniowany następującą zależnością:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^l [d_i - f(t_i, J_i, \mathbf{p})]^2}{\sum_{i=1}^l [d_i - \bar{d}]^2}, \quad (4)$$

gdzie \bar{d} oznacza średnią arytmetyczną wszystkich wartości d_i . Wartość wskaźnika dopasowania powinna być możliwie bliska 1. Dla modelu opisanego równaniem (3) wartość wskaźnika dopasowania wynosi 0.985. Świadczy to o dobrym dopasowaniu modelu do danych pomiarowych.



Rysunek 2. Hiperpowierzchnia ilustrująca zachowanie modelu w rozpatrywanym zakresie zmian parametrów procesu

Figure 2. Hypersurface illustrating the behavior of the model in the considered range of changes in process parameters

4. WNIOSKI

W ramach niniejszego artykułu dokonano syntezy modelu matematycznego, który umożliwia predykcję grubości powłoki cynkowej osadzonej w procesie cynkowania galwanicznego w zależności od wybranych parametrów prowadzenia tego procesu tj. czasu kąpieli w elektrolicie oraz zastosowanej w czasie tej kąpieli wartości gęstości prądu.

Zarówno jakościowa jak i ilościowa ocena zaproponowanego modelu empirycznego jest pozytywna co pozwala na sformułowanie wniosku, że spełnia on stawiane mu wymagania.

Niewątpliwą zaletą zaproponowanego modelu jest jego prostota mimo tego, że opisuje bardzo złożone zjawiska fizykochemiczne zachodzące w czasie cynkowania galwanicznego. Wyznaczenie grubości osadzonej powłoki z zastosowaniem tego modelu jest możliwe przy bardzo niewielkim nakładzie obliczeniowym. Ponadto funkcja opisująca opracowany model jest gładka (klasy C^∞) co również stanowi zaletę modelu.

Należy podkreślić, że niewielka liczba dostępnych danych pomiarowych znacznie ograniczała pole manewru przy doborze postaci funkcji opisującej model. Należało uważać, by nie doszło do tak zwanej nadparametryzacji modelu (*ang. model over-parameterization*), która polega na tym, że model posiada więcej parametrów, niż można zidentyfikować na podstawie danych pomiarowych. Z tego względu w dalszej perspektywie planuje się przeprowadzenie kolejnych badań w celu pozyskania dodatkowych danych o analizowanym procesie. Oczekuje się, że pozwoli to na dalszą istotną poprawę jakości modelu.

PODZIĘKOWANIA

Pracę zrealizowano w ramach kształcenia zorientowanego projektowo – PBL programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza w zakresie projektu pt.: „Analiza wpływu parametrów prądowych na grubość antykorozyjnych powłok cynkowych”.

LITERATURA

1. K. Kurski, Cynkowanie ogniowe, WNT, Warszawa, 1970.
2. S. Tkaczyk, Powłoki ochronne, praca zbiorowa, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1997.
3. K. Kołała, B. Oleksiak, płatkowe powłoki cynkowe na podłożach stalowych, Zarządzanie Przedsiębiorstwem, Enterprise Management 23 (2020), p. 23–28
4. Blicharski M. Inżynieria powierzchni. WNT, Warszawa, 2021.
5. D. Dhak, M. Mahon, E. Asselin and A. Alfantazi, Characterizing industrially electroplated zinc deposits, Hydrometallurgy 111-112 (2012), p.136–140.
6. A.M. Alfantazi, D.B. Dreisinger, The role of zinc and sulfuric acid concentrations on zinc electroplating from industrial sulfate based electrolyte, J. Appl. Electrochem 31 (2001), p. 641–646.
7. M. Li, S. Luo, Y. Qian, W. Zhang, L. Jiang and J. Shen: Effect of additives on electrodeposition of nanocrystalline zinc from acidic sulfate solutions. J. Electrochem. Soc. 154 (2007), D567–D571.
8. J. Yu, L. Wang, L. Su, X. Ai and H. Yang, Temperature effects on the electrodeposition of zinc, J. Electrochem. Soc 150 (2003), C19–C23.
9. X. Xia, I. Zhitomirsky, J.R. McDermid, Electrodeposition of zinc and composite zinc–yttria stabilized zirconia coatings, J. Mater. Process. Technol 209 (2009), p.2632–2640.
10. M. Aliokhazraei, E.K. Alamdari, M. Zamanzade, M. Salasi, S. Behrouzghaemi, J. Heydari, D.F. Haghshenas and V. Zolala, Empirical equations for electrical conductivity and density of Zn, Cd and Mn sulphate solutions in the range of electroplating and electrorefining electrolytes, J. Mater. Sci. 42 (2007).
11. D.J. MacKinnon, J.M. Brannen and P.L. Fenn: Characterization of impurity effects in zinc electroplating from industrial acid sulfate electrolyte. J. Appl. Electrochem. 17 (1987), p.1129–1143.
12. PN-EN 10152 Wyroby płaskie walcowane na zimno ocynkowane elektrolitycznie do obróbki plastycznej na zimno. Warunki techniczne dostawy.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Mikroporowate szkielety niklowe wytwarzane metodą hybrydową

P. Malkusch^a, B. Tomiczek^b, G. Matula^c

^a Studentka kierunku Inżynieria i Technologie Materiałowe, Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny

email: paulmal043@student.polsl.pl

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych,

email: blazej.tomiczek@polsl.pl

^c Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych,

email: grzegorz.matula@polsl.pl

Streszczenie: Celem pracy było opracowanie hybrydowej metody wytwarzania porowatych szkieletów niklowych z wykorzystaniem mikroobróbki ubytkowej elementów formowanych z gęstwy polimerowo-proszkowej i spiekania. Otrzymano niklowe szkielety o otwartej porowatości i rozwiniętej powierzchni.

Abstract: The work aimed to develop a hybrid method for producing porous nickel skeletons using micromachining of components formed from polymer-powder slurry and sintering. Nickel skeletons with open porosity and developed surfaces were obtained

Słowa kluczowe: materiały porowate, niklowe nośniki katalizatorów

1. WSTĘP

Materiały porowate zalicza się do inżynierskich tworzyw, które charakteryzują się unikatowymi właściwościami. Materiały te posiadają w swym wnętrzu dużej ilości luki, zwane przestrzeniami, które wypełnione są cieczą bądź gazem. Przestrzenie powstałe we wnętrzu materiału nazywane są porami, natomiast osnowę ciała porowatego, którą stanowi ciało stałe nazywa się nośnikiem, bądź szkieletem. Strukturę ciała porowatego określają wielkości takie, jak: powierzchnia właściwa szkieletu, porowatość, gęstość pozorna czy przepuszczalność. Materiały porowate definiuje się jako materiały o porowatości zawierającej się w przedziale 20 – 95 % [1].

Wyróżniamy [1-3]:

- pory otwarte, które mają bezpośrednie połączenie z powierzchnią materiału, swoje zastosowanie znajdują m.in. w katalizie i adsorpcji,
- pory zamknięte, które odseparowane są od środowiska zewnętrznego, nie biorą one udziału w adsorpcji, lecz swe zastosowanie znajdują w głównej mierze, jako izolatory.

Właściwości materiałów porowatych określa się w głównej mierze, na podstawie rodzaju porów, które są w nich zawarte. Charakterystyczna budowa strukturalna materiałów porowatych, sprawiła, że materiały te odnalazły szerokie zastosowanie np. w przemyśle lotniczym, kosmicznym, elektrotechnicznym, chemicznym czy samochodowym [1,4].

Nikiel jest wysoce reaktywnym pierwiastkiem, należącym do grupy przejściowych metali. Charakteryzuje się własnościami katalicznymi. Powoduje przyśpieszenie konkretnych reakcji chemicznych, jednocześnie nie wchodząc w skład powstających związków chemicznych [5]. Należy do materiałów odpornych na korozję. Jest metalem podatnym na obróbkę plastyczną zarówno na zimno jak i na gorąco, materiałem dobrze zgrzewalnym oraz spawalnym. Metal ten, stanowi istotny dodatek stopowy stosowany w stalach odpornych na korozję [6]. Nikiel charakteryzuje się siecią krystaliczną, która zdolna jest do absorpcji atomów wodoru. Taka własność, powala na zastosowanie go jako katalizatora w szeregu procesach, np. uwodornienia (czyli hydrogenizacji) lub metanizacji [7,8]. W takim przypadku stosowany jest najczęściej jako tzw. nikiel Raneya, czyli drobno sproszkowany, nieutleniony nikiel, należący do grupy katalizatorów szkieletowych [9,10].

1. MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

Celem pracy było, opracowanie metody wytwarzania porowatych szkieletów niklowych z wykorzystaniem mikroobróbki ubytkowej elementów formowanych z gęstwy polimerowo-proszkowej i spiekania. Na początku należało określić odpowiedni udział proszku niklu oraz materiałów wiążących stanowiących lepiszcze. Następnie dokonano doboru warunków formowania mieszaniny, tj. prasowania na gorąco, mikroobróbki ubytkowej, a także warunków procesu degradacji termicznej i spiekania. Ogólny schemat wytwarzania przedstawiono na rys. 1.

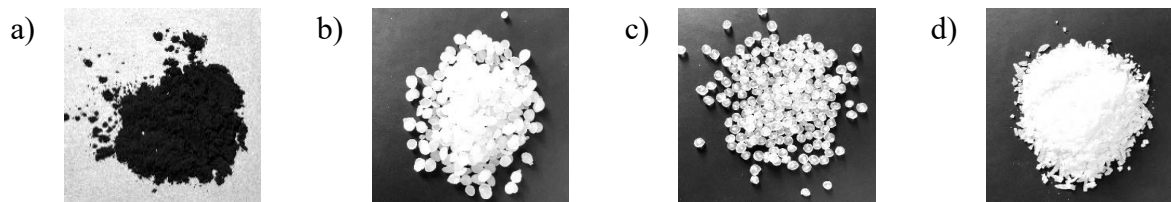


Rysunek 1. Schemat procesu wytwarzania porowatych szkieletów

Figure 1. Scheme of the manufacturing porous skeletons process

Mikroobróbka ubytkowa prasowanych polimerowo-proszkowych próbek polegała na frezowaniu powierzchni, a następnie wierceniu, za pomocą wiertel o różnej średnicy. Zastosowano wiertła o średnicy: 200, 300 oraz 400 μm , wykonane z węgla spiekane. Następnie próbki zostały podane procesowi degradacji termicznej i spiekania, w temperaturach: 700 - 850°C. Zbadano gęstość, skurcz oraz mikrostrukturę otrzymanych próbek.

Do formowania próbek wykorzystano proszki niklu, a jako składników lepiszcza zastosowano: kopolimer EVA, parafinę, polipropylen oraz kwas stearynowy.



Rysunek 2. Materiały wykorzystane do przygotowania mieszaniny polimerowo-proszkowej:

a) proszek niklu, b) parafina, c) polipropylen, d) kwas stearynowy

Figure 2. Materials used to prepare the mixture: a) nickel powder, b) paraffin, c) polypropylene, d) stearic acid

1.1. Przygotowanie mieszaniny polimerowo-proszkowej

W celu przygotowania mieszaniny polimerowo-proszkowej, wykorzystano proszek niklowy, kopolimer EVA, polipropylen, parafinę oraz kwas stearynowy, które odważono w odpowiednich proporcjach. Mieszanina polimerowo – proszkowa, wytwarzana była w gniotowniku firmy Zamak Mercator, który posiada komorę o objętości 30 cm³. Mieszanie odbywało się w temperaturze 180°C, a ślimaki poruszały się z prędkością obrotową 20 obrotów/minutę. Poszczególne zawartości danych składników w mieszaninie, została przedstawiona w tabelicy 1.

Tabela 1. Udział składników mieszaniny polimerowo-proszkowej

Table 1. Components content of the polymer-powder mixture

	Nikiel	EVA	PP	PW	SA
Gęstość [g/cm³]	8,90	0,94	0,91	0,91	0,94
Udział objętościowy [%]	50	15	15	10	10
Masa [%]	90,61	2,86	2,76	1,85	1,92
Masa [g]	133,53	4,21	4,07	2,73	2,82
Masa całkowita [g]	147,36				

1.2. Formowanie próbek

Po przednim przygotowaniu mieszaniny polimerowo – proszkowej, odmierzone dwanaście porcji mieszaniny. Odmierzoną porcję mieszaniny, o wadze 1,2 g wsypywano do stalowej matrycy walcowej o średnicy przekroju 10mm, przeznaczonej do prasowania na gorąco. Po osiągnięciu wyznaczonej temperatury matrycy, tj. ok. 100°C, matrycę z uprzednim umieszczeniem stempla górnego, usytuowano w prasie hydraulicznej. Mieszaninę zagęszczano pod ciśnieniem ok. 500 MPa. Maksymalny czas nacisku stempla górnego na mieszaninę, wynosił ok. 30 sekund. Po zakończeniu prasowania mieszaniny, matrycę wyjęto z prasy i usunięto próbkę. Przygotowano łącznie dwanaście próbek do badań o wymiarach $\phi 10\text{mm} \times 4\text{mm}$.

1.3. Frezowanie i wiercenie próbek

Frezowanie oraz wiercenie każdej z próbek, odbywało się na frezarce CNC LF lite 1. Powierzchnia płaska próbek frezowana była obustronnie na jedną wysokość, tj. ok. 3 mm. Po zakończeniu frezowania, w każdej próbce wywiercono symetrycznie rozmieszczone otwory przelotowe. W wyniku wiercenia, otrzymano po cztery próbki, dla każdego z zastosowanych wiertel. Otrzymane próbki zestawiono w na rysunku 3.

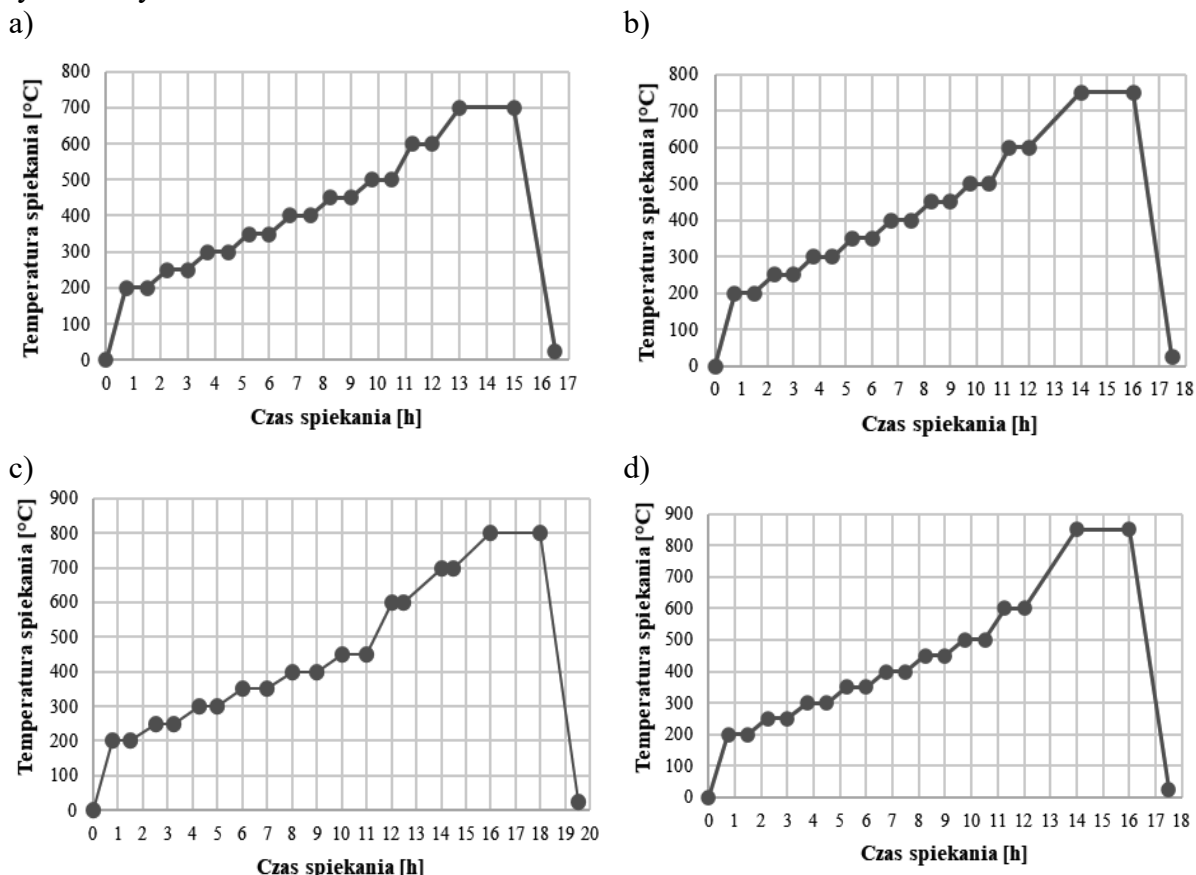
Po zakończeniu wiercenia, próbki przygotowane były, do procesu degradacji termicznej i spiekania, w odpowiednio dobranych temperaturach.



Rysunek 3. Wytworzone próbki przy użyciu wiertła o średnicy a) 200, b) 300 oraz c) 400 μm
 Figure 3. Prepared samples using a drill with a diameter of a) 200, b) 300, and c) 400 μm .

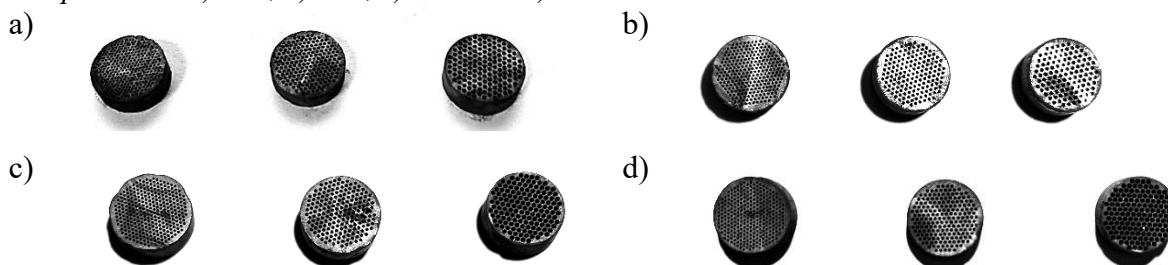
1.4. Degradacja cieplna i spiekanie próbek

Otrzymane próbki, zostały poddane degradacji cieplnej i spiekaniu, w rurowym piecu firmy Czylok. Spiekanie, odbywało się w atmosferze mieszanki gazowej argon – wodór. Schematy cyklu spiekania, dla próbek spiekanych w temperaturach 700, 750, 800 oraz 850°C przedstawiono na rysunku 4. Na rysunku 5 przedstawiono widok spiekanych próbek wytworzonych do badań.



Rysunek 4. Schemat procesu degradacji termicznej i spiekania próbek niklowych spiekanych w temperaturze: a) 700, b) 750, c) 800 i d) 850°C

Figure 4. Scheme of the process of thermal degradation and sintering of nickel samples sintered at a temperature: a) 700, b) 750, c) 800 and d) 850°C



Rysunek 4. Widok wytworzonych próbek spiekanych w następujących temperaturach: a) 700, b) 750, c) 800 i d) 850°C

Figure 4. View of manufactured samples sintered at the following temperatures: a) 700, b) 750, c) 800 and d) 850°C

2. WYNIKI BADAŃ

2.1. Charakterystyka próbek wytworzonych do badań

Wytworzone przez prasowane na gorąco gęstwy polimerowo-proszkowej próbki, wiercone były za pomocą wiertel o różnej średnicy. W tabelicy 2, pokazano charakterystykę próbek wytworzonych do badań. Na podstawie pomiarów przed i po spiekaniu dokonano obliczenia skurczu liniowego.

Tabela 2. Charakterystyka próbek wytworzonych do badań

Table 2. Characteristics of samples prepared for testing

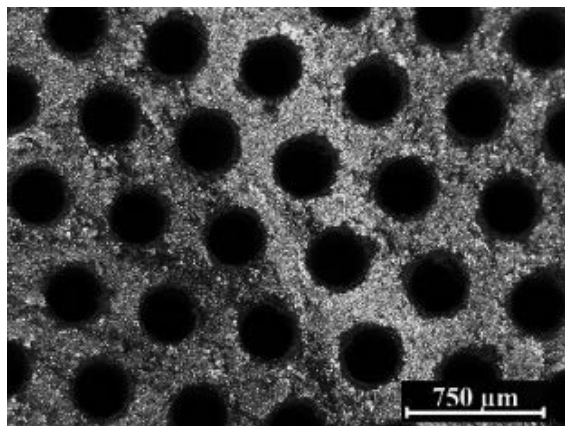
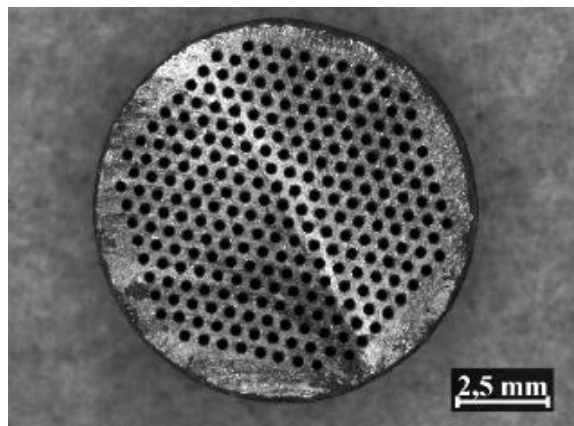
L.p.	Średnica otworów [μm]	Temperatura spiekania [°C]	Średnica próbki przed spiekaniem [mm]	Średnica próbki po spiekaniu [mm]	Skurcz materiału [%]
1	200	700	8,45	-*	-*
2	300	700	8,50	-*	-*
3	400	700	8,53	-*	-*
4	200	750	8,03	7,95	1,00
5	300	750	8,12	8,08	0,49
6	400	750	8,04	8,02	0,25
7	200	800	8,48	8,37	1,30
8	300	800	8,49	8,39	1,18
9	400	800	8,51	8,37	1,65
10	200	850	8,49	8,39	1,18
11	300	850	8,52	8,51	0,12
12	400	850	8,48	8,44	0,47

*próbka uległa uszkodzeniu

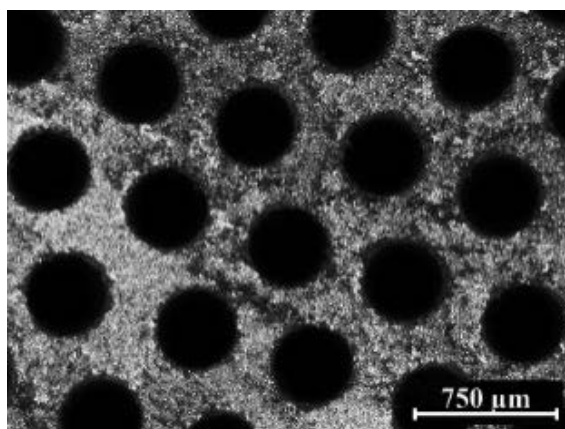
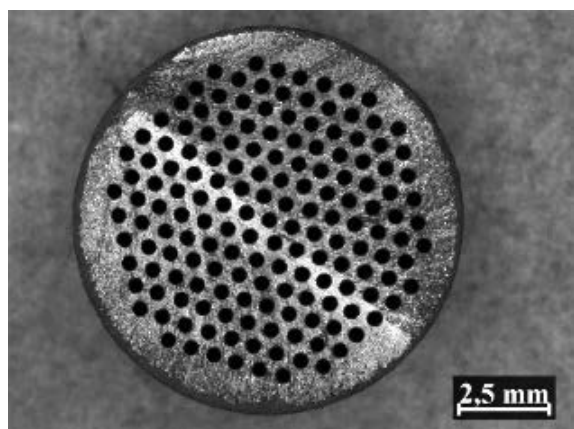
2.2. Wyniki badań strukturalnych

Na rysunkach 5-7 przedstawiono morfologię powierzchni próbek, prasowanych na gorąco, frezowanych, wierconych, a końcowo spiekanych. Obserwacja została przeprowadzona przy użyciu cyfrowego mikroskopu świetlnego Leica DVM6. Jak widać w zdecydowanej większości otwory zostały wykonane metodą ubytkową w sposób precyzyjny i powtarzalny. Na niektórych próbkach widać niewielkie sfazowanie otworów. Nie zaobserwowano pęknięć, wykruszeń czy też odkształceń. Rysunek 8 przedstawia mikrostruktury próbek, które zostały wykonane przy pomocy skaningowego mikroskopu elektronowego. Obserwacja mikrostruktury przeprowadzona była, przy użyciu detekcji elektronów wtórnych. Przy użyciu większych powiększeń dowiedziono, że zastosowane spiekanie w temperaturach 750-850°C nie prowadzi do zagęszczenia proszku niklowego. Tym samym można stwierdzić, że wytworzone próbki są porowate nie tylko z powodu wywierconych kanałów, ale także w przestrzeni pomiędzy nimi.

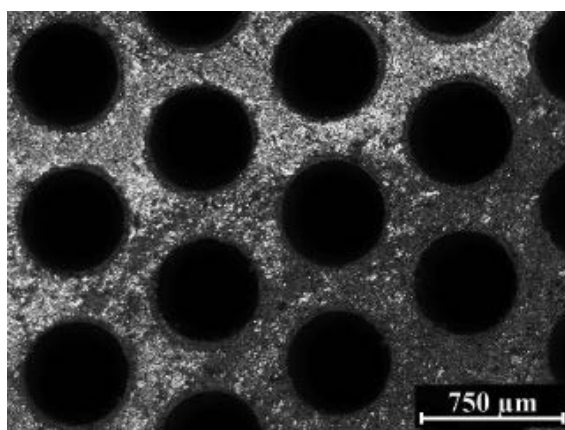
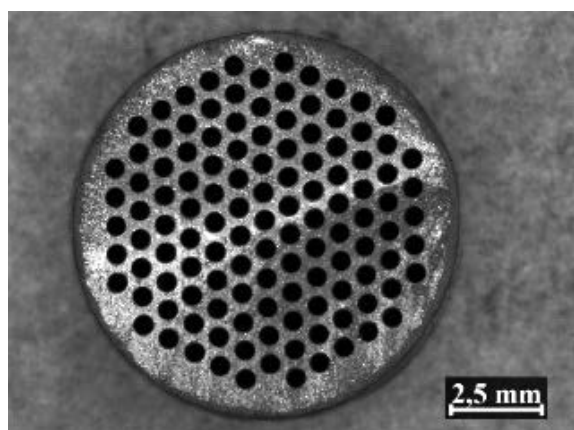
a)



b)

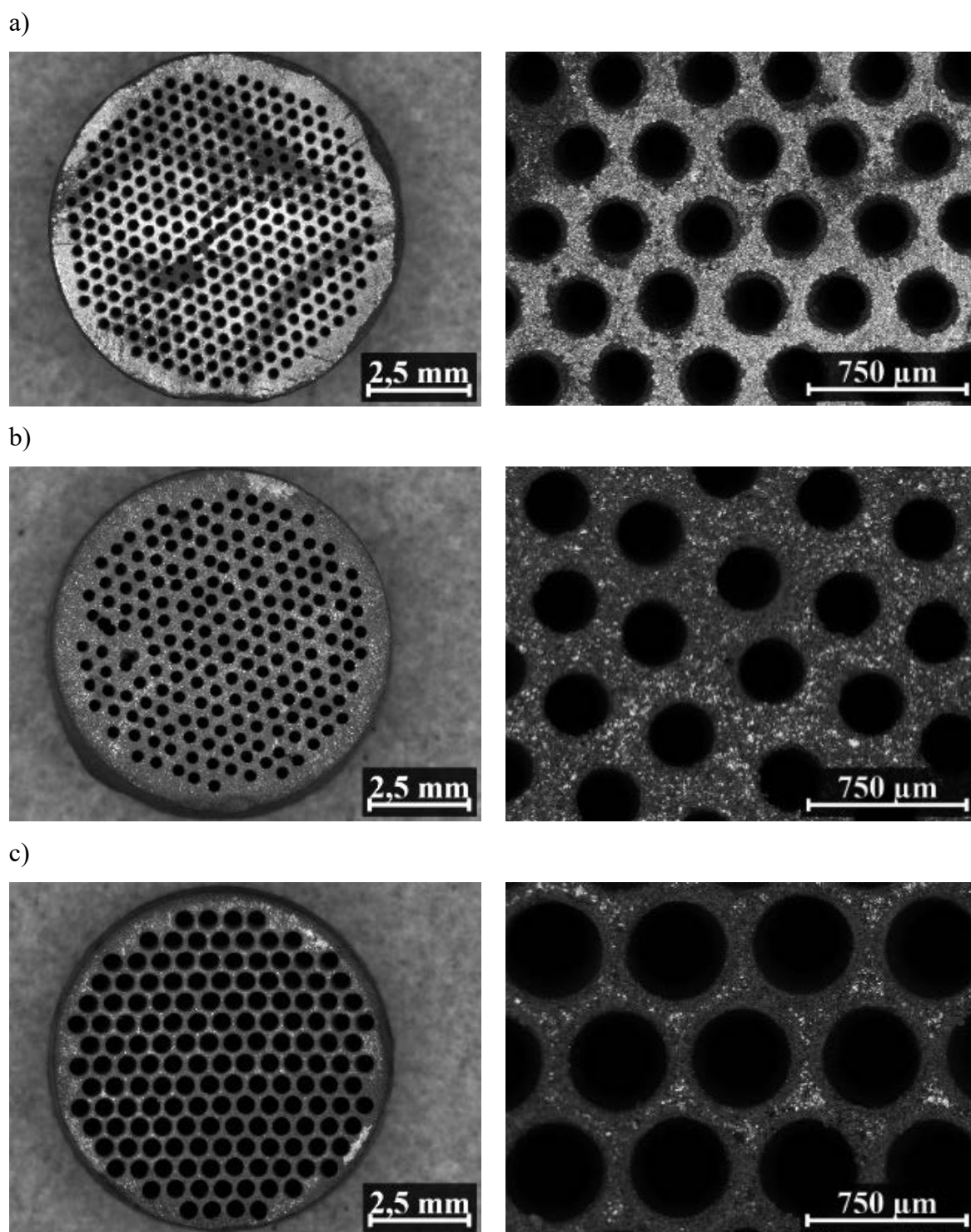


c)



Rysunek 5. Widok powierzchni czołowej próbek spiekanych w temperaturze 750°C o średnicy otworów a) 200, b) 300 i c) 400 μm

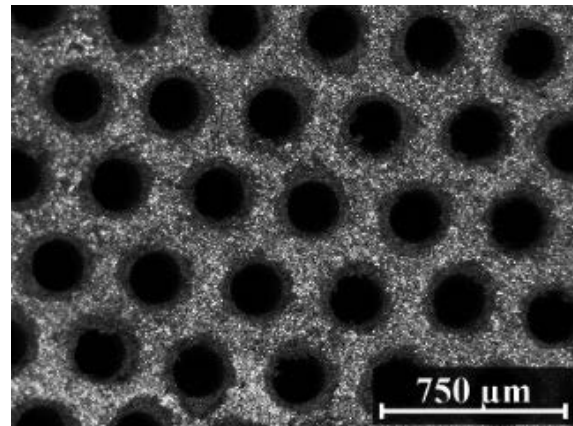
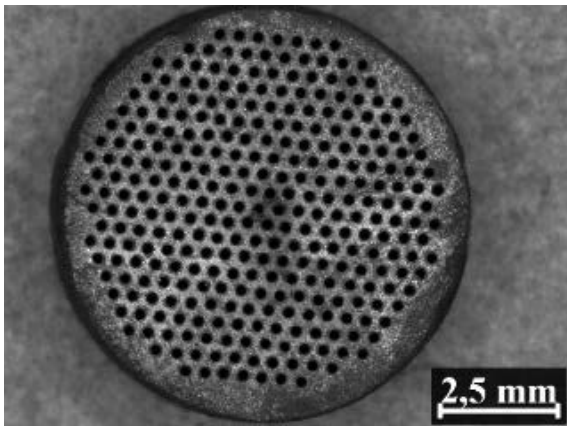
Figure 5. View of the front surface of samples sintered at 750°C with the diameter of the holes a) 200, b) 300 i c) 400 μm



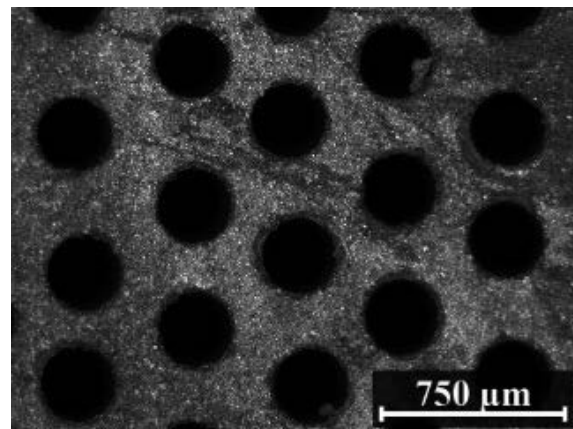
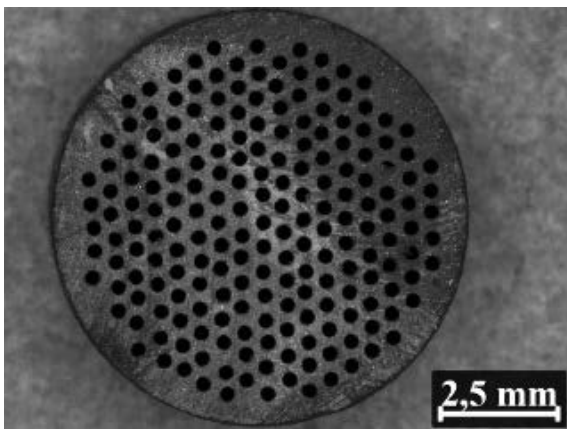
Rysunek 6. Widok powierzchni czołowej próbek spiekanych w temperaturze 800°C o średnicy otworów a) 200, b) 300 i c) 400 μm

Figure 6. View of the front surface of samples sintered at 800°C with the diameter of the holes a) 200, b) 300 i c) 400 μm

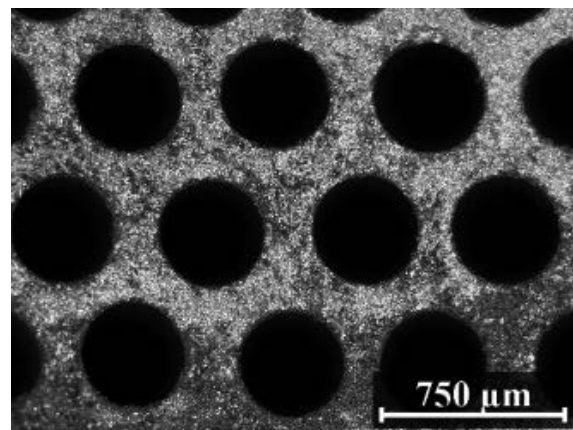
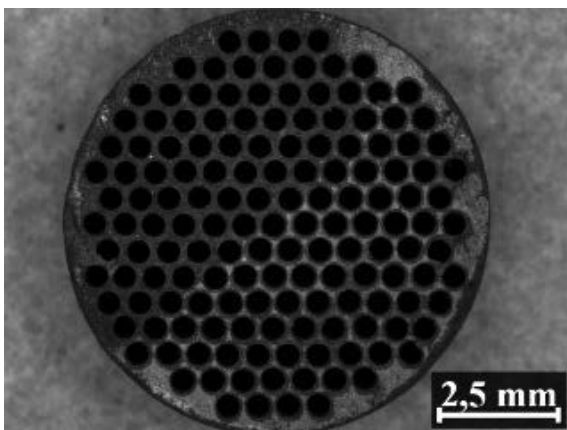
a)



b)



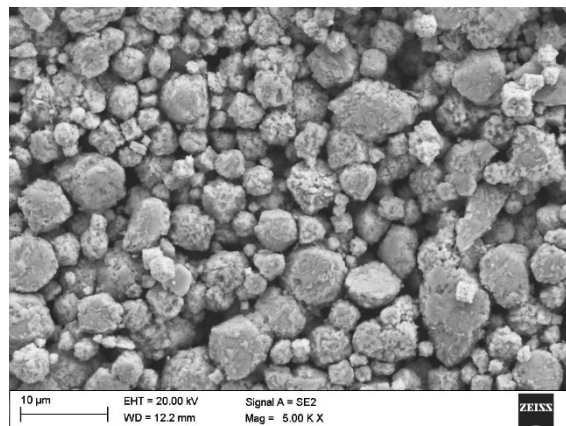
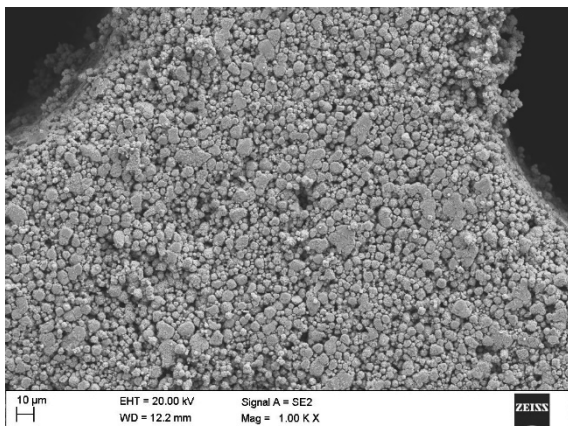
c)



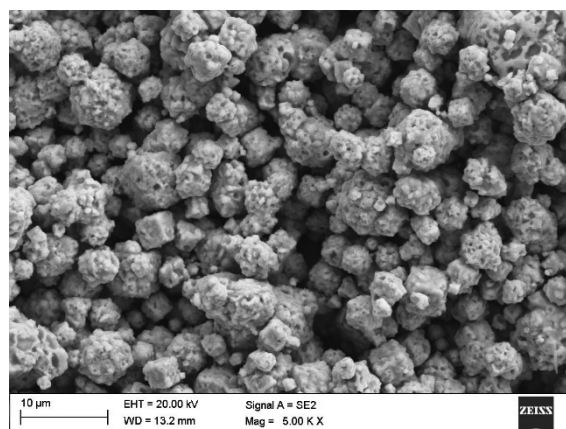
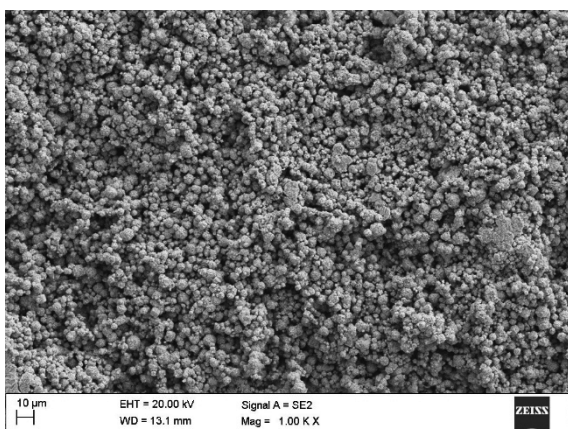
Rysunek 7. Widok powierzchni czołowej próbek spiekanych w temperaturze 850°C o średnicy otworów a) 200, b) 300 i c) 400μm

Figure 7. View of the front surface of samples sintered at 850°C with the diameter of the holes a) 200, b) 300 i c) 400μm

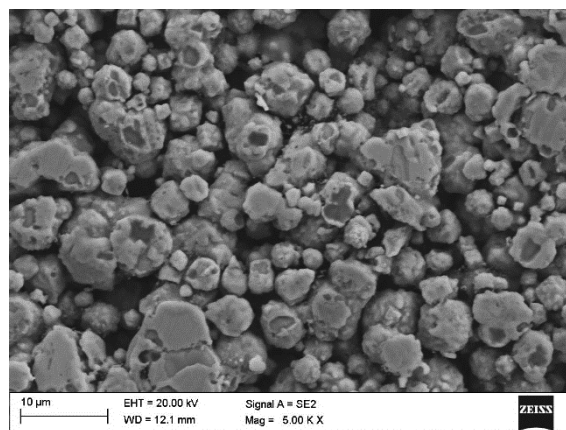
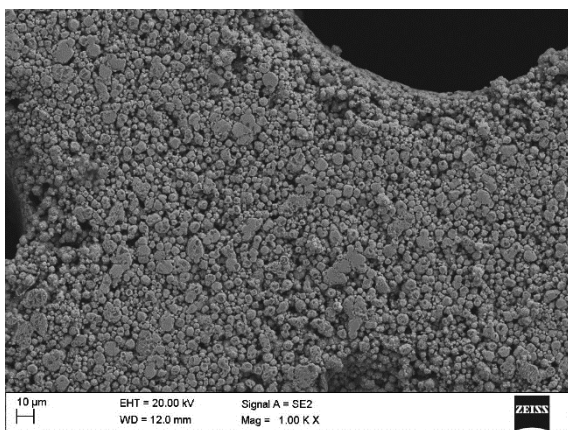
a)



b)



c)



Rysunek 8. Morfologia powierzchni niklowych próbek spiekanych w temperaturze a) 750, b) 800 i c) 850°C, SEM

Figure 8. Surface morphology of nickel samples sintered at a) 750, b) 800 and c) 850°C, SEM

2.3. Wyniki pomiaru gęstości

Tablica 4 przedstawia wyniki pomiaru gęstości i porowatości próbek spiekanych w różnych temperaturach. Zauważono, że wraz ze wzrostem temperatury spiekania maleje nieznacznie gęstość pozorna i rośnie tym samym porowatość. Może być to związane z faktem iż w wyższej temperaturze dochodzi do całkowitej degradacji pozostałości polimerowego lepiszcza. Innym powodem może być sferoidyzacja cząstek niklu i rozrost porów w wyższej temperaturze co można zaobserwować na rys. 8. Cząstki próbki spiekanej w temperaturze 750°C mają bardziej chropowatą powierzchnię od cząstek próbki spiekanej w temp. 850°C, które wydają się być bardziej sferyczne i o gładkiej powierzchni. Aczkolwiek te zjawiska muszą zostać jeszcze dokładniej zbadane.

Tabela 3. Wyniki pomiaru gęstości próbek spiekanych
Table 4. Density measurement results of sintered samples

L.p.	Średnica otworów [μm]	Temperatura spiekania [°C]	Masa [g]	Objętość [cm ³]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Porowatość [%]
1	200	700	-	-	-	-
2	300	700	-	-	-	-
3	400	700	-	-	-	-
4	200	750	0,544	0,151	3,60	59,5
5	300	750	0,537	0,156	3,44	61,4
6	400	750	0,461	0,152	3,03	65,9
7	200	800	0,570	0,167	3,42	61,5
8	300	800	0,540	0,167	3,24	63,6
9	400	800	0,447	0,165	2,71	69,5
10	200	850	0,564	0,165	3,41	61,6
11	300	850	0,532	0,173	3,07	65,5
12	400	850	0,450	0,175	2,58	70,9

3. WNIOSKI

W ramach zrealizowanych prac naukowo-badawczych dowiedziono, że dzięki zastosowaniu hybrydowej technologii mikroobróbki ubytkowej elementów formowanych z gęstwy polimerowo-proszkowej i spiekania, można otrzymać szkielety niklowe o dużej otwartej porowatości i w pełni kontrolowanej wielkości mikrometrycznych kanałów. Dwojaki charakter porów w wytworzonych próbkach niklowych zapewnia nie tylko porowatość otwartą, podwyższoną powierzchnię właściwą, ale również pozwala zmniejszyć opór przepływu gazu w sytuacji zastosowania tego materiału jako nośnika katalizatora w reaktorze chemicznym. Warto podkreślić, że proponowana metoda może zostać zastosowana do otrzymania porowatych materiałów metalowych o większych rozmiarach i niemal dowolnym kształcie. Dzięki

wywierconym mikrokanalom degradacja termiczna polimerowego lepiszcza jest mniej problematyczna zwłaszcza w przypadku elementów o większych rozmiarach.

PODZIĘKOWANIA

Praca została zrealizowana w ramach badań uzupełniających w projekcie OPUS 2018/29/B/ST8/02303 finansowanym przez Narodowe Centrum Nauki.

LITERATURA

1. S. J. Kowalski, *Inżynieria materiałów porowatych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004
2. M. Oszust, M. Barczak, A. Dąbrowski, *Mezoporowate materiały krzemionkowe – charakterystyka i zastosowanie, Adsorbenty i Katalizatory. Wybrane Technologie a Środowisko*, Uniwersytet Rzeszowski, Rzeszów 2012.
3. IUPAC, Recommendations for the characterization of porous solids, *Pure Appl. Chem.* 66 (1994) 1739-1758
4. P. Darlak, P. Dudek, *Materiały wysokoporowate – metody wytwarzania i zastosowanie. Odlewnictwo – Nauka i Praktyka* 1 (2004) 3-4
5. R. Śpiewak, J. Piętowska, *Nikiel - alergen wyjątkowy. Od struktury atomu do regulacji prawnych. Alergologia Immunologia* 3/3-4 (2006) 58-62
6. I. Dul, *Zastosowanie i przetwarzanie stopów niklu w przemyśle lotniczym, Przegląd Spawalnictwa* 7-8 (2009) 67-73
7. D. Lach, B. Tomiczek, T. Siudyga, M. Kapkowski, R. Sitko, J. Klimontko, S. Golba, G. Dercz, K. Matus, W. Borek, J. Polanski: Spatially Formed Tenacious Nickel-Supported Bimetallic Catalysts for CO₂ Methanation under Conventional and Induction Heating. *International Journal of Molecular Science* 24 (2023) 4729
8. G.A. Mills, F.W. Steffgen: Catalytic Methanation. *Catalytic Review* 1974, 8, 159–210
9. A. I. Vogel, *Preparatyka organiczna*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Wydanie 3, Warszawa, 2006.
10. A. Maranda, M. Szala, L. Szymańczyk, D. Choiński, E. Szajna, Z. Bielecki, *Badanie właściwości katalizatora Raney’a, Materiały Wysokoenergetyczne* 8 (2016) 103–110



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Zastosowanie haloizytu jako napelniacza do modyfikacji terpolimeru EPDM

M. Marczak^a, G. Matula^a, P. Sakiewicz^b

^a Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych,

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email: marcmar690@polsl.pl, grzegorz.matula@polsl.pl, piotr.sakiewicz@polsl.pl

Abstract: The article describes the effect of rough halloysite on the rheological, strength and tribological properties of the developed EPDM polymer composites. The research provides the correlations between the studied properties and typifies the processing possibilities of the established rubber formulations.

Keywords: etylen-propylen-dien rubber, halloysite, compound, filler, SEM.

1. WSTĘP

Kompozyty polimerowe cieszą się szczególnym zainteresowaniem przemysłu ze względu na poprawę właściwości wytrzymałościowych, nadanie tworzywom specjalnych właściwości, np. obniżenie palności, tłumienie hałasu czy ochrona przeciwbakteryjna. Istotnym składnikiem mieszanki gumowej, stanowiącą największą jej część, jest napelniacz, którego wprowadzenie do kompozycji wpływa na własności fizykochemiczne, przetwórcze i użytkowe powstałych kompozytów. Napelniacze powinny wykazywać dobrą adhezję do osnowy polimerowej oraz powinny charakteryzować się wysokim stopniem dyspersji i nie zawierać wody krystalicznej i powierzchniowej. Opisane powyżej wymagania spełniają napelniacze proszkowe pochodzenia mineralnego, a więc napelniacze kwarcowe, krzemionkowe, dolomitowe czy też, bardzo rozpowszechnione w przyrodzie, kaolinowe, do których zaliczają się glinki mineralne wraz z haloizytem.

Haloizyt (HNT-halloysite nanotubes) o wzorze cząsteczkowym $[Al_2Si_2O_5(OH)_4nH_2O]$ jest podobny do kaolinitu [1]. Jednakże, w przeciwieństwie do kaolinitu powierzchnie i krawędzie HNT zawierają grupy hydroksylowe, co daje możliwość dalszej jego modyfikacji różnymi związkami organicznymi. W kwietniu 2014 r. firma Sigma-Aldrich podpisała umowę z Applied Minerals na dystrybucję ich haloizytu (Dragonite™) dla naukowców na całym świecie [3]. Istnieją pewne właściwości HNT, które determinują ich zastosowanie jako wypełniacza polimerowego [4, 5]: niska zawartość zanieczyszczeń, dostępność i relatywnie niska cena w stosunku do pozostałych napelniaczy, struktura rurkowa i ich efekt wzmacniający

[6], względnie niska hydrofilowość [7,8], powierzchnie naładowane ujemnie [4], odporność termiczna i chemiczna [9], właściwości zmniejszające palność [2, 10].

2. CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

2.1. Materiały

Próby laboratoryjne wykonano za pomocą miksera laboratoryjnego dla mieszanek na bazie polimeru EPDM (etylenowo- propylenowo- dienowego) o lepkości 59.0 ± 5 MU, przy parametrach badań lepkości ML(1+4)125°C, zawartości ENB (etylenodienononborenu) $4,5 \pm 1\%$ jako trzeciego monomeru i zawartości etylenu $70 \pm 3\%$. Drugi polimer stanowi LDPE (niskogęstościowy polietylen), o gęstości $0,925 \text{ g/cm}^3$. Jako napelniacza użyto węgla wapnia o gęstości $2,7 \text{ g/cm}^3$ z niskim stopniem zawartości wilgoci, tj. $< 1,0\%$. Plastyfikator stanowił olej parafinowy, o gęstości $0,87 \text{ g/cm}^3$, lepkości kinematycznej $108,1 \text{ mm}^2/\text{s}$ (w 40°C), 69% zawartości parafiny, 31% zawartości nafty, $0,002\%$ zawartości siarki. Stosowano dwie postaci haloizytu: kalcynowany (HK) o frakcji początkowej 0-1mm oraz surowy (HS) o frakcji 0-0,56mm, z których, po przesianiu uzyskano frakcje pośrednie. Aktywator wulkanizacji stanowił tlenek cynku, stosowany podczas typowej wulkanizacji siarkowej. W skład przyspieszaczy wulkanizacji wchodzi: TMTM (monosiarczek tetrametylotiuramu), ZDEC (dietylokarbaminian cynku), MBT (2-merkaptobenzotiazol). Pigment stanowił tlenek żelaza o barwie RAL 3016, pH=4-8, gęstości $5,25 \text{ g/cm}^3$. Czynnikiem sieciującym stanowiła siarka, nieolejowana, rombowa, o gęstości $1,80\text{-}2,07 \text{ g/cm}^3$, jasnożółtej barwy o pH=6,6; temperatura topnienia $111^\circ\text{C}\text{-}119^\circ\text{C}$; gęstość nasypowa $550\text{-}750 \text{ kg/m}^3$.

2.2. Metodyka badań

Otrzymane postaci haloizytu HK o frakcji 0-1mm oraz HS 0-0,56mm przesiano za pomocą wytrząsarki manualnej firmy Retsch przy użyciu sit o wielkości oczek: 0,045; 0,1; 0,2; 0,5; 0,8 mm. Z otrzymanych frakcji materiałowych sporządzono krzywe uziarnienia za pomocą automatycznego przesiewacza typu CamSizer. Dostarczony materiał HK i HS podzielono na frakcje: $< 0,1 \text{ mm}$; 0,1-0,2mm; 0,2-0,5mm (rys. 1).



Rysunek 1. Frakcje haloizytu kalcynowanego i surowego po przesianiu
Figure 1. Calcined and rough halloysite fractions after sieving

Mieszanki gumowe sporządzono w warunkach laboratoryjnych w mieszarce zamkniętej typu Brabender PlastiCorder, z rotorami stycznymi (tzw. tangential) w jednoetapowym cyklu mieszania. Proces mieszania kontrolowano w sposób ciągły według zdefiniowanego reżimu mieszania. Kauczuk EPDM zadawano do miksera laboratoryjnego w temperaturze ok. 65°C, w dalszym kroku dodawano węglan wapnia wraz z olejem, pigment oraz LDPE. Układ sieciujący (siarka oraz przyspieszacze) zadawano w temperaturze 70°C. Zakres obrotów miksera laboratoryjnego zwiększano o 5RPM przy osiągnięciu temperatury 80°C oraz po osiągnięciu temperatury mieszanki 90°C. Standardowa temperatura zrzutu mieszanki gumowej to 95°C. Całkowity czas mieszania to ok. 5minut. W pierwszym etapie przygotowano mieszankę, która była mieszanką referencyjną oraz stanowiła bazę do dalszej modyfikacji. Skład mieszanki referencyjnej M00 przedstawiono w tabeli 1. Na bazie mieszanki M00 wykonano mieszanki zawierające 2; 30; 100% dodatku różnych postaci haloizytu o zmiennych frakcjach uziarnienia w stosunku do ilości węglanu wapnia (62,3%) w mieszance odniesienia M00. Dla mieszanek gumowych M01, M02, M03 zastosowano HK o frakcji <0,1mm, w mieszankach M04, M05, M06 użyto HK o frakcji 0,1-0,2mm, a HK 0,2-0,5mm ujęto w mieszankach M07, M08, M09. Druga odmiana haloizytu HS znajdowała się w kompozytach: M10, M11, M12 (z HS o frakcji <0,1mm); M13, M14, M15 (z HS o frakcji 0,1-0,2mm) i M16, M17, M18 (z HS o frakcji 0,2-0,5mm). W każdej serii trzech kompozytów, znajdujący się w mieszance odniesienia węglan wapnia, zastąpiono w ilości 2%, 30% i 100% przez HK i HS z 62,3% węglanu wapnia. Składy wszystkich mieszanek EPDM ujęto w tabeli 2. Zawartości w poszczególnych kompozycjach: EPDM+LDPE, oleju, pigmentu, stearyny, bieli cynkowej i układu sieciującego są stałe względem mieszanki odniesienia (jak w tabeli 1). Zawartość kredy i różnych postaci haloizytu jest zmienna.

Tabela 1. Skład mieszanki referencyjnej M00

Table 1. Formulation of the reference compound M00

Składnik	Udział [%]
EPDM i LDPE	20
Węglan wapnia	62,3
Olej parafinowy	13
Pigment	3
Biel cynkowa	0,22
Kwas stearynowy	0,25
Układ sieciujący	1,23

Sporządzone mieszanki gumowe płytowano przez 4 minuty na grubość 6mm za pomocą walcarki laboratoryjnej Polymix 110L, Servitec. Temperatura walców wynosiła 50°C (kontrolowana za pomocą systemu TCU - temperature control unit, umożliwiającego utrzymanie narzuconych temperatur walców), a walce obracały się z zadaną frykcją 1:1,2, przy prędkości 20 RPM. Mieszankę pozostawiono do 24- godzinnego kondycjonowania w pomieszczeniu, w którym wilgotność względna utrzymywana była na stałym poziomie (35±5)%.

Charakterystykę przebiegu wulkanizacji otrzymanych mieszanek gumowych przeprowadzono za pomocą wulkametru z oscylującym rotorem, na podstawie charakterystyk: minimalnego (ML) i maksymalnego (MH) momentu skrętnego, ich różnicy ($\Delta M = MH - ML$) oraz czasów t_{s2} -czas podwulkanizacji i t_{90} -czas wulkanizacji. Wulkanizację prowadzono w

175°C przez 10minut, zgodnie z normą [11]. Z wytworzonych mieszanin wulkanizowano w hydraulicznej prasie laboratoryjnej (Fontijne) płytki o grubości 2mm w temperaturze 160°C pod ciśnieniem 10MPa przez 30 minut. Przed przystąpieniem do dalszych badań próbki kondycjonowano przez 24 godziny w temperaturze pokojowej.

Tabela 2. Składy mieszanek gumowych EPDM (M00, M01-M18)

Table 2. The composition of EPDM rubber compounds (M00, M01-M18)

Mieszanka	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18
Składnik, %																		
Kreda	61	44	0	61	44	0	61	44	0	61	44	0	61	44	0	61	44	0
HK <0,1 mm	1,3	19	62															
HK 0,1-0,2mm				1,3	19	62												
HK 0,2-0,5 mm							1,3	19	62									
HS <0,1 mm										1,3	19	62						
HS 0,1-0,2 mm													1,3	19	62			
HS 0,2-0,5 mm																1,3	19	62

Właściwości mechaniczne wytworzonych kompozytów badano przy użyciu maszyny wytrzymałościowej, zgodnie z normą [12], stosując standardowe próbki w kształcie „wiosełek”. Próbki poddawano próbie naprężenia-odkształcenia przy prędkości przesuwu głowicy krzyżowej 500 mm/min, przeprowadzając pomiary w temperaturze pokojowej. Na podstawie uzyskanej krzywej naprężenie-odkształcenie wyznaczono wytrzymałość na rozciąganie (TSb) oraz wydłużenie przy zerwaniu (Eb). Uzyskane wyniki z 5 próbek dla każdego kompozytu uśredniono.

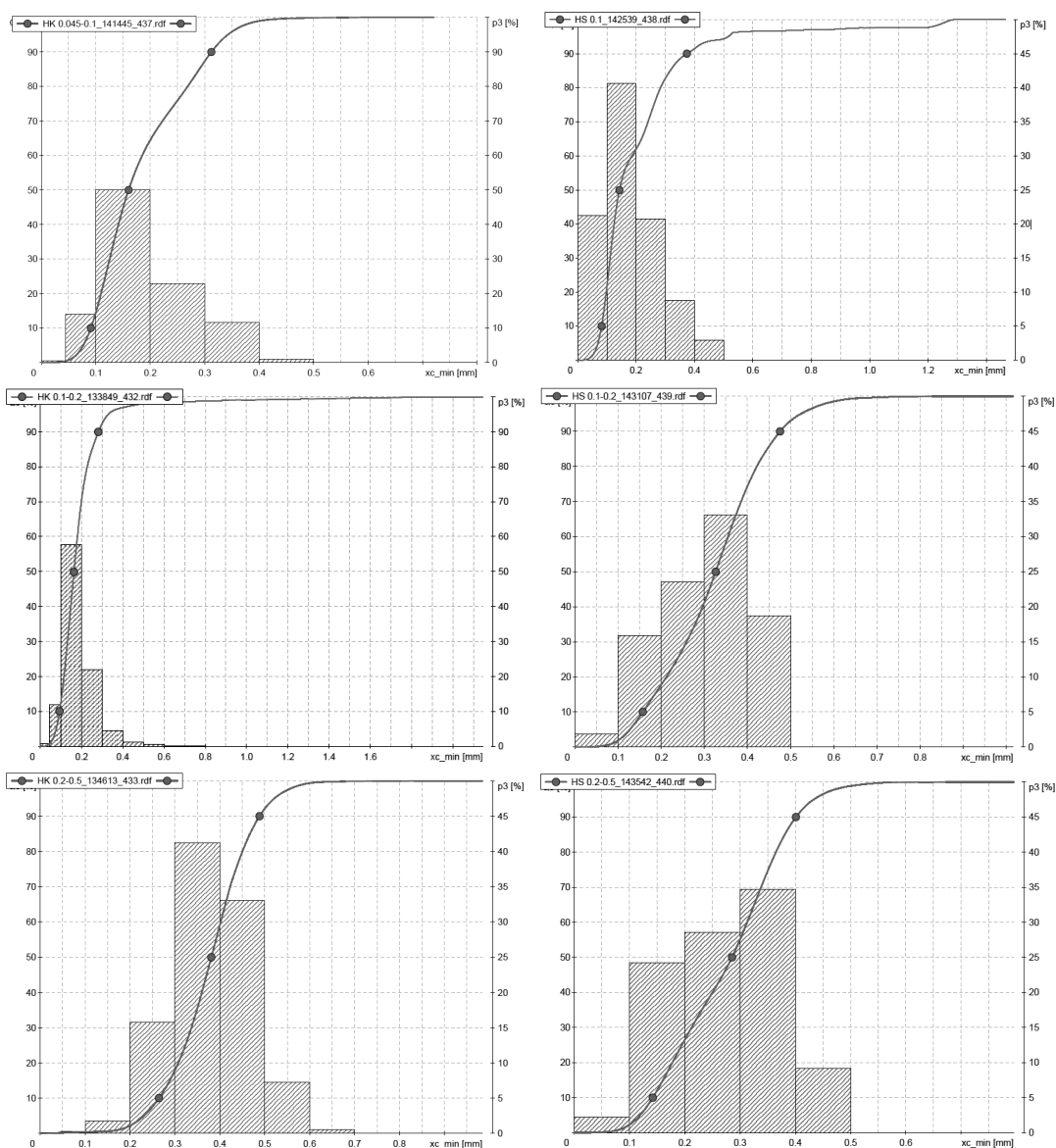
Pomiar twardości mieszanek gumowych metodą Shore'a, wykonywano za pomocą elektronicznego twardościomierza stolikowego typu A, zgodnie z normą [13]. Próbkę stanowiła zwulkanizowana mieszanka gumowa w postaci krążka o grubości 6 mm. Uzyskane 5 wyników z różnych miejsc powierzchni danej próbki uśredniono. Lepkość kinematyczną mieszanek gumowych dokonano za pomocą lepkościomierza z dyskiem ścinającym, model MV one (TA Instruments), zgodnie z normą [14]. Badań właściwości kolorymetrycznych wytworzonych kompozytów zwulkanizowanych dokonano za pomocą kolorymetru przy użyciu programu SpectraMagic NX. Wyniki badań barwy (ΔE^*ab) odniesiony do wzorca (referencyjnej, czerwonej-RAL 3016, próbki mieszanki gumowej) obliczany jest przy użyciu wartości trójkromatycznych próbki. Za wartość poza tolerancją koloru uznaje się $\Delta E^*ab > 2.0$.

Oceny morfologii wytworzonych kompozytów dokonano za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) Zeiss Supra 35. Analizy wykonano przy napięciu przyspieszającym wynoszącym 15 kV, przy wykorzystaniu sygnału z elektronów wtórnych SE, obrazujących topografię powierzchni. Do badań wykorzystano zwulkanizowane przełomy próbek, na które naniesiono powłokę stopu złoto-pallad metodą PVD (physical vapour deposition), wykorzystując napyłarkę próżniową Bal-Tec SCD 050. Do określenia składu chemicznego wybranych kompozytów wykorzystano składowy element SEM, technikę spektroskopii energodispersyjnej (EDS) – urządzenie UltraDry EDS Detector, firmy Thermo Scientific.

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. Charakterystyka HK i HS

Haloizyt w postaci nieprzetworzonej dostarczono przez firmę Sigma-Aldrich Sp. z o.o. Analiza sitowa (rys. 2) wykazała, że HK dla zdefiniowanej frakcji <0,1mm, składał się z niej w 14,4%. Dla HS, zawartość najdrobniejszej frakcji wyniosła 21,3%. Udział frakcji 0,1-0,2mm dla HK stanowił 57,7%, z czego udział procentowy ziaren <0,1mm wyniósł 12,7% a powyżej 0,2mm 29,6%. Dla HS udział ziaren 0,1-0,2mm stanowił jedynie 15,9%. W przypadku frakcji 0,2-0,5mm w HK jej udział wyniósł 90%, a dla HS 72,4% (pozostałą większość wypełniła frakcja <0,2mm).



Rysunek 2. Analiza granulometryczna frakcji <0,1; 01-0,2; 02-0,5 mm w minerałach HK i HS
 Figure 2. Grain size analysis of fractions <0.1; 01-0.2; 02-0.5 mm in HK and HS minerals

3.2. Przygotowanie i analiza mieszanek oraz wulkanizatów

Przygotowane w mieszarce zamkniętej mieszanki gumowe poddano analizie kinetyki sieciowania (tab. 3,4). Z przebiegu krzywych momentu obrotowego wynika, że minimalny moment obrotowy ML rósł wraz z rosnącym udziałem haloizytu HK i HS w kompozycjach, niezależnie od frakcji dodatku. Największy wzrost parametru ML odnotowano dla mieszanek, w których jedynym wypełniaczem był HK lub HS (mieszanki M03, M06, M09, MM12, M15, M18) Moment minimalny dostarcza informacji odnośnie przetwarzalności mieszanek gumowych. Wyższe wartości ML, definiujące wyższą lepkość początkową, mogą wpływać na ograniczenie w płynięciu, mieszanki EPDM np. w trakcie procesu ekstruzji. Powodem wzrostu wartości modułu minimalnego jest duży udział wypełniacza organicznego w postaci HK/HS. W przypadku wartości MH - maksymalnego momentu obrotowego, jego wartości nie charakteryzowały się tendencją wzrostową. Parametr ten świadczy o sztywności mieszanki, a jego wzrost mógł być spowodowany tworzeniem się aglomeratów w kompozycji wraz ze wzrostem udziału haloizytu. Przy zawartości 2% HK/HS, niezależnie od frakcji odnotowano najwyższe wartości modułu MH, w porównaniu do pozostałych kompozycji, ale niższe w odniesieniu do mieszanki referencyjnej M00.

Czas podwulkanizacji t_{s2} stanowi o bezpieczeństwie przerobu mieszanki, eliminując ryzyko tzw. skurczu materiału niewulkanizowanego. Niezależnie od frakcji HK i HS większy dodatek spowodował wydłużenie czasów t_{s2} i t_{90} , co stanowi negatywny aspekt z punktu widzenia przetwórstwa oraz oznacza brak możliwości uzyskania optymalnych właściwości kompozytu.

Tabela 3. Wyniki oznaczeń fizykochemicznych i mechanicznych mieszanek gumowych z różną zawartością HK o różnych frakcjach

Table 3. The results of physicochemical and mechanical analysis of rubber compounds with different content of HK of different fractions.

Frakcja	Próbka	Udział HK	Wulkametr					TSb	Eb	Twardość	Lepkość Mooney'a
			ML	MH	DM	t_{s2}	t_{90}				
mm	nr	%	dNm	dNm	dNm	min	min	MPa	%	ShA	MU
Ref.	M00	0	0,62	7,32	6,70	1,06	4,26	4,31	641	62	42,67
HK <0,1	M01	2	0,70	7,11	6,41	1	4,39	4,93	634	60	47,54
	M02	30	1,17	3,54	2,37	4,66	3,32	2,78	428	67	61,47
	M03	100	7,88	9,50	1,62	-	8,15	4,16	140	80	152,72
HK 0,1-0,2	M04	2	0,80	7,18	6,38	1,06	4,68	3,70	594	62	49,51
	M05	30	1,20	3,56	2,36	3,04	4,3	2,06	294	73	68,44
	M06	100	4,25	5,85	1,60	-	7,82	2,31	103	80	135,32
HK 0,2 - 0,5	M07	2	0,73	6,92	6,19	1,05	4,43	4,62	705	63	47,58
	M08	30	1,24	3,35	2,11	6,21	4,16	2,28	408	61	66,48
	M09	100	5,28	6,93	1,65	-	7,98	2,70	110	81	152,42

Tabela 4. Wyniki oznaczeń fizykochemicznych i mechanicznych mieszanek gumowych z różną zawartością HS o różnych frakcjach

Table 4. The results of physicochemical and mechanical analysis of rubber compounds with different content of HS of different fractions.

Fracja	Próbka	Udział HS	Wulkametr					TSb	Eb	Twardość	Lepkość Mooney'a
			ML	MH	ΔM	ts2	t90				
mm	nr	%	dNm	dNm	dNm	min	min	MPa	%	ShA	MU
Ref.	M00	0	0,62	7,32	6,70	1,06	4,26	4,31	641	62	42,67
HS < 0,1	M10	2	0,80	6,07	5,27	1,11	3,92	5,30	645	64	46,57
	M11	30	1,35	2,55	1,20	-	6,77	2,32	321	64	60,48
	M12	100	5,89	7,24	1,35	-	7,56	2,32	66	76	138,03
HS 0,1-0,2	M13	2	0,82	5,97	5,15	1,09	3,73	4,97	725	61	47,53
	M14	30	1,34	2,76	1,42	-	5,95	2,02	246	55	60,04
	M15	100	6,07	7,49	1,42	-	7,56	2,79	129	71	138,46
HS 0,2-0,5	M16	2	0,85	6,30	5,45	1,05	3,9	4,67	731	61	50,87
	M17	30	1,34	2,76	1,42	-	7,06	1,87	163	58	65,20
	M18	100	4,07	5,47	1,40	1,03	7,55	2,61	168	71	113,14

Lepkość Mooneya badanych mieszanek różniła się w stosunku do mieszanki odniesienia przy kompozycjach zawierających 30% i 100% HK i HS, niezależnie od zastosowanej frakcji. Przyczyną jest silnie rozwinięta, zawierająca puste przestrzenie, struktura HK/HS, w których mógł zostać uwięziony kauczuk. Mogło to skutkować zmniejszeniem udziału objętościowego kauczuku w stosunku do haloizytu, a przez to zwiększeniem lepkości kinematycznej. Dla kompozycji z większą, niezależnie od wielkości frakcji, ilością haloizytu, lepkość MU rośnie. Wyższe wartości lepkości wykazują mieszanki z udziałem większej frakcji minerału. Może to być efekt powstawania aglomeratów, tworzących lokalne punkty naprężeń na granicy faz. Jak wykazano w tabelach 3 i 4, 30%-owy dodatek drobniejszej/grubszej frakcji haloizytu powodował znacznie zwiększenie lepkości, o ok. 20MU w porównaniu do mieszanki odniesienia. Trzykrotny wzrost lepkości kinematycznej w stosunku do kompozycji odniesienia zanotowano dla mieszanek niezawierających kredy, jedynie haloizyt HK/HS.

Wyniki badań właściwości mechanicznych, zaprezentowane w tabelach 3 i 4, przedstawiają porównanie wytrzymałości (TSb) oraz wydłużenia przy zerwaniu (Eb) próbek materiałów zawierających trzy frakcje ziarnowe dwóch odmian haloizytu w odniesieniu do sieciowanej za pomocą prasy hydraulicznej mieszanki referencyjnej. Jedynie dla kompozycji zawierających 2%-owy udział HK (M01, M07) i HS (M10, M13, M16) parametr wytrzymałości był wyższy w porównaniu do mieszanki bazowej. Każdą z pozostałych mieszanek zwulkanizowanych charakteryzowała niższa wytrzymałość względem mieszanki referencyjnej. Dla zwulkanizowanych mieszanin z HK i HS zawierających 30% i 100% dodatku następuje znaczne pogorszenie wytrzymałości względem zwulkanizowanej mieszanki odniesienia. Pogorszenie właściwości wytrzymałościowych można w tym przypadku wyjaśnić jako niekompatybilność między fazami haloizyt-polimer. Na zmniejszenie właściwości wytrzymałościowych wpływał niewystarczający stopień adhezji osnowy polimerowej i napełniacza. Wartości wydłużenia przy zerwaniu Eb również odzwierciedlają gorsze właściwości wytrzymałości TSb. Utrudniona homogenizacja minerału z osnową elastomerową

i tworzące się przy tym aglomeraty mogą, poprzez niejednorodność próbki, świadczyć o uzyskanych niskich własnościach mechanicznych.

Znaczny wzrost twardości (o ok. 20ShA) odnotowano dla mieszanek zwulkanizowanych z 100%-ową zawartością napelnacza każdej frakcji. Wzrost twardości nie odpowiadał trendowi maksymalnego momentu obrotowego MH, świadczącego o sztywności mieszanki, co potwierdza brak wpływu HK i HS na gęstość sieciowania kompozytów.

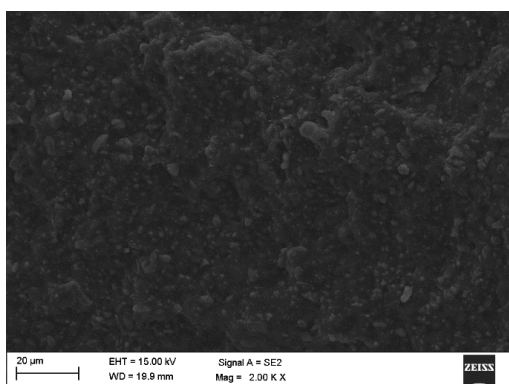
Otrzymane kompozycje poddano badaniom kolorymetrycznym (tabela 5) według formuły parametrów L, a, b. Wynik pomiaru ΔE^*ab jest zbliżony do próbki odniesienia dla 2%-owej zawartości dodatków haloizytu niezależnie od frakcji (ocena: TAK, tzn. $\Delta E^*ab < 2$). Spośród pozostałych próbek, jedynie w przypadku kompozycji z 30%-owym dodatkiem HK o najdrobniejszej frakcji, badanie kolorymetryczne potwierdza zgodność materiału (ocena: TAK) w stosunku do kompozycji wzorcowej.

Tabela 5. Wynik badań kolorymetrycznych dla próbek M01-M18
Table 5. Colorimetric results for samples M01-M18

Nazwa pomiaru/mieszanka	Ocena	L* (D65)	a* (D65)	b* (D65)	dL* (D65)	da* (D65)	db* (D65)	dE*ab (D65)
RED HK M01 (<0,1mm)	TAK	47,95	15,18	9,29	0,96	-0,42	-0,26	1,08
RED HK M02 (<0,1mm)	TAK	47,56	14,57	8,96	0,57	-1,03	-0,6	1,32
RED HK M03 (<0,1mm)	NIE	44,81	12,31	7,75	-2,18	-3,29	-1,81	4,34
RED HK M04 (0,1-0,2mm)	TAK	48,18	15,22	9,45	1,19	-0,38	-0,1	1,26
RED HK M05 (0,1-0,2mm)	NIE	46,88	13,18	8,26	-0,11	-2,42	-1,29	2,75
RED HK M06 (0,1-0,2mm)	NIE	45,42	10,51	6,78	-1,57	-5,09	-2,78	6
RED HK M07 (0,2-0,5mm)	TAK	46,85	15,59	9,8	-0,14	-0,01	0,25	0,28
RED HK M08 (0,2-0,5mm)	NIE	43,98	15,75	9,78	-3,01	0,15	0,23	3,02
RED HK M09 (0,2-0,5mm)	NIE	42,64	12,79	7,57	-4,35	-2,81	-1,99	5,54
RED HS M10 (<0,1mm)	TAK	47,88	15,56	9,59	0,89	-0,04	0,03	0,89
RED HS M11 (<0,1mm)	NIE	46,27	13,81	8,79	-0,72	-1,79	-0,77	2,08
RED HS M12 (<0,1mm)	NIE	44,32	12,44	7,49	-2,67	-3,16	-2,06	4,63
RED HS M13 (0,1-0,2mm)	TAK	46,59	16,36	10,01	-0,4	0,76	0,46	0,97
RED HS M14 (0,1-0,2mm)	NIE	46,21	13,83	8,78	-0,78	-1,77	-0,77	2,08
RED HS M15 (0,1-0,2mm)	NIE	45,55	12,94	8,18	-1,44	-2,66	-1,37	3,33
RED HS M16 (0,2-0,5mm)	TAK	46,26	16,11	9,92	-0,72	0,51	0,37	0,96
RED HS M17 (0,2-0,5mm)	NIE	44,92	15,31	9,32	-2,07	-0,29	-0,23	2,1
RED HS M18 (0,2-0,5mm)	NIE	44,11	12,88	7,89	-2,88	-2,73	-1,66	4,3

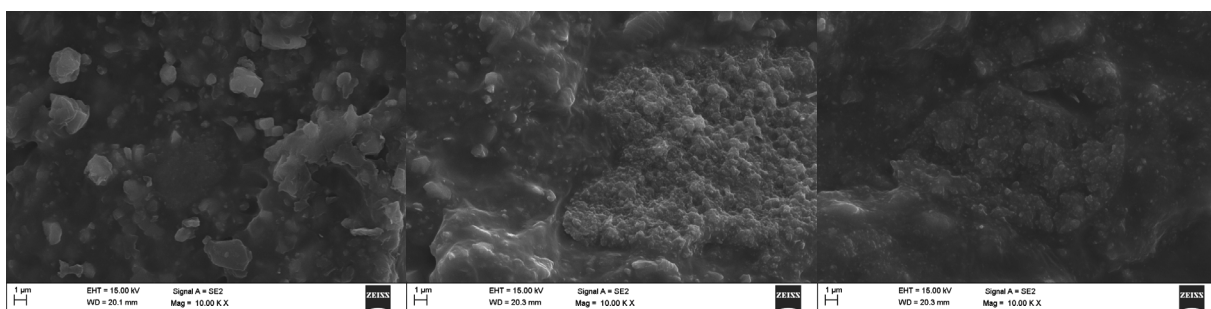
Badaniom morfologicznym (SEM) poddano powierzchnie próbek wulkanizatów mieszanek gumowych zawierających <0,1mm; 0,1-0,2mm; 0,2-0,5mm frakcje minerałów HK i HS.

Na rysunku 4 przedstawiono zdjęcie morfologiczne SEM wulkanizatu mieszanki referencyjnej M00, której struktura po przełomie była czysta i nie zawierała wad. Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono morfologię przełomu próbek wulkanizatów zawierających HK o frakcja <0,1mm i 0,2-0,5mm.



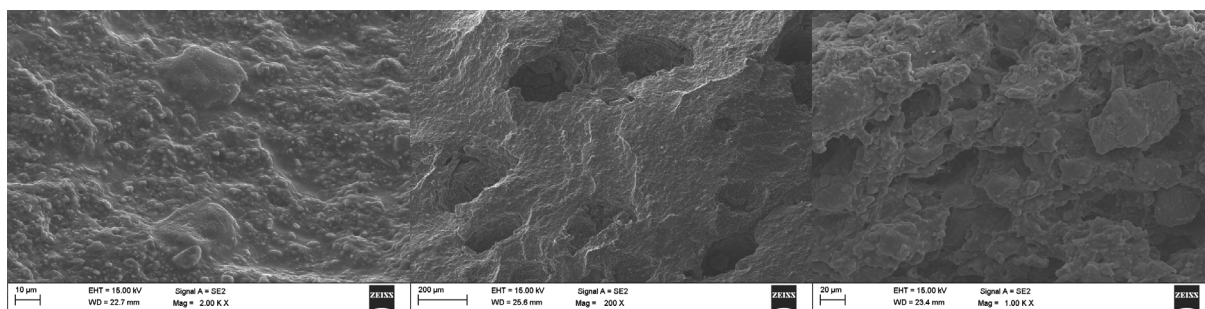
Rysunek 4. Struktura przełomu zwulkanizowanej próbki odniesienia M00 (SEM, powiększenie 2kx)

Figure 4. Structure of the breakthrough of vulcanized reference sample M00 (SEM, 2kx magnification)



Rysunek 5. Struktura przełomu próbek M01, M02, M03 (2, 30, 100% HK frakcji <0,1mm) (SEM, powiększenie 10kx)

Figure 5. Structure of the breakthrough of samples M01, M02, M03 (2, 30, 100% HK of fraction <0,1mm) (SEM, 10kx magnification)

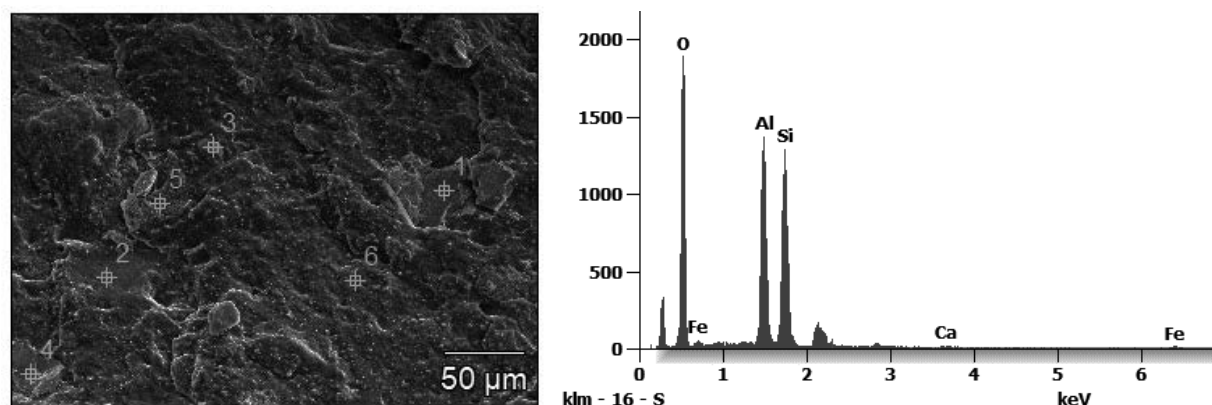


Rysunek 6. Struktura przełomu próbek M07, M08, M09 (2, 30, 100% HK frakcji 0,2-0,5mm) (SEM, powiększenie 2kx, 200x, 1kx)

Figure 6. Structure of the breakthrough of samples M07, M08, M09 (2, 30, 100% HK of fraction 0,2-0,5mm) (SEM, 2kx, 200x, 1kx magnification)

Wprowadzenie do mieszanki odniesienia haloizytu powodowało powstawanie aglomeratów (rys. 5 i 6), szczególnie przy zwiększonej zawartości grubszej frakcji. Widoczna jest również słaba adhezja cząstek HK i HS do osnowy polimerowej (rys. 6) dla przełomu próbki z 100%-owym dodatkiem HK 0,2-0,5mm w postaci pustych przestrzeni w osnowie. Obecność

aglomeratów haloizytu, poprzez jego skład chemiczny potwierdzono za pomocą analizatora EDS (rys. 7).



Rysunek 7. Skład chemiczny próbki M08 (30% HK frakcji 0,2-0,5mm) określony przy użyciu analizatora EDS

Figure 7. Chemical composition of sample M08 (30% HK fraction 0.2-0.5mm) with EDS analyzer

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie przedstawionego opracowania i otrzymanych wyników można zauważyć, że haloizyt w postaci niemodyfikowanej, niefunkcjonalizowanej może stanowić przy wysoko napełnionych mieszankach EPDM, alternatywny napełniacz modyfikujący właściwości fizykochemiczne kompozytu. Stopień, w jakim właściwości mieszanki gumowej ulegną zmianie zależy od ilości i frakcji zastosowanego minerału. Aby uzyskać jak najkorzystniejsze właściwości kompozytu, należy zastosować napełniacz o jak najdrobniejszej frakcji. Powyższa analiza udowadnia, że jedynie kompozycje z udziałem do 2% haloizytu kalcynowanego i surowego charakteryzują się akceptowalnymi właściwościami przetwórczymi, a produkty końcowe właściwościami użytkowymi.

Parametry reologiczne wytworzonych kompozytów odbiegają znacznie od mieszanki bazowej, szczególnie dla mieszanek z największą zawartością (>30%) grubszej frakcji napełniacza haloizytowego.

Widoczne pogorszenie właściwości mechanicznych zaobserwowano, niezależnie od frakcji, przy wysokim napełnieniu kompozytów polimerowych. Stwierdzono, że główną przyczyną słabszych właściwości wytrzymałościowych jest gorsza adhezja zastosowanego napełniacza w postaci haloizytu do matrycy polimerowej. Wyeliminowanie tego problemu jest możliwe dzięki odpowiedniej funkcjonalizacji powierzchni napełniacza. W toku kontynuacji prezentowanej tematyki badawczej będą prowadzone dalsze prace badawcze.

LITERATURA

1. E. Wierzbicka, I. Legocka, E. Wardzińska-Jarmulska, B. Szczepaniak, M. Krzyżewski, Funkcjonalizowany nanonapełniacz polimerów – otrzymanie, charakterystyka i zastosowanie, *Polimery* 2016, 61, nr 10

2. K. Szpilska, K. Czaja, S. Kudła, Thermal stability and flammability of polyolefin/halloysite nanotubes composites, *Polimery*, Listopad-Grudzień 2015, Nr 11/12, , Tom LX
3. http://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigma-aldrich/docs/Sigma-Aldrich/General_Information/1/applied-minerals-press-release.pdf (data wejścia: 11.06.2023).
4. Liu M., Jia Z., Jia D. et.al.: *Progress in Polymer Science* 2014, 39, 1498.
5. Deepak R., Agrawal Y.K.: *Reviews on Advanced Materials Science* 2012, 32, 149.
6. Jinhua W., Xiang Z., Bing Z.: *Desalination* 2010, 259, 22.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2010.04.046>
7. Farmer V.C.: *Science* 1964, 145, 1189.
8. Frost R.L., Tran T.H., Kristof J.: *Clays and Clay Minerals* 1998, 46, 280
9. Cheng H., Yang J., Liu Q. et al.: *Thermochimica Acta* 2010, 507—508, 106.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2010.05.007>
10. P. Rybiński, G. Janowska: *Polimery* 2013, 58, 327.
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2013.327>
11. PN-ISO 3417:2015-2 Mieszanka gumowa - oznaczenie przebiegu wulkanizacji za pomocą wulkametry z oscylującym rotorem
12. PN-ISO 37:2007 Guma i kauczuk termoplastyczny – oznaczenie właściwości wytrzymałościowych przy rozciąganiu
13. PN-EN 868:2005 Tworzywa sztuczne i ebonit – oznaczenie twardości metodą wciskania z zastosowaniem twardościomierza (twardość metodą Shore'a)
14. PN-ISO 285-1:2007 Kauczuki i mieszanki kauczukowe – oznaczanie za pomocą lepkościomierza z wirnikiem ścinającym – część 1: oznaczanie lepkości według Mooneya



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Mobile Cable Reel Transporter Car Design and Manufacturing

C. Meran¹, O. Eren², K. İlhan², R. Dinçer³, Şahin A.³, C. Kuyu³, M. Guvenc², A. Ceylanoglu

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

²Nexans Turkey Industry and , Denizli, Turkey

³Student, Pamukkale University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Denizli, Turkey

Abstract: The aim of this study is to design a cable reel carrier that is as light, simple and convenient as possible. The cable reels to be transported from one place to another and used as a reel uncoiler where they are transported. In this study, a product is designed to be used for short-distance transportation of the cable reel. Designs at the idea stage were also included. The prototype design was tested and modified. The final design has been tested and approved.

Keywords: Cable reel, transportation, uncoiler, design

1. INTRODUCTION

The cable consists of one or more metallic conductor wires covered with an insulating material used to transmit electric current. While the cables, which frequently encounter in daily life, are used in reels as well as their production and bulk shipment, their short-distance transportation is also especially important in terms of both occupational health and safety and the competition of the company. In the scope of this study, there is a single core NX100 type cable on the reel in which interest. This type of cable belongs to the class of structural energy cables and is used in buildings, its voltage is less than 1kV. The reel weighs 90 kg and is transported without the use of any tools by human power, which adversely affects the occupational health and safety of the employees. In the recommendations of the World Health Organization, the weight that a person can carry continuously is specified as 25 kg. The maximum weight it can lift at once is recommended as 50 kg. As can be seen in **Figure 1**, the reel transport does not provide the necessary conditions in terms of employee health.



Figure 1: Transport of the reel in the current state

The aim of the study is to carry a cable reel with a maximum weight of 90 kg, the dimensions of which are shown in **Figure 2**, for a short distance in the most ergonomic way with a simple machine and at the desired location. The product is aimed to comply with the principles of occupational health and safety and to be used easily by the operator. The product will not be sold but will be given as a giveaway in the purchase of a specified number of reels. Therefore, the carrying product should be quite simple and economical.

2. DESIGNS OF TRANSPORTERS

It is showed to the individuals as the first idea, **Figure 2**. As can be seen, it is aimed to carry two reels at the same time by means of two shafts on the sides of the product. The two wheels at the back had a folding mechanism. The height difference between the shafts is made to cut the contact of the first reel with the ground while loading the second reel. It should be loaded on the higher spindle first, when reel is loaded on the higher spindle first, the reel will not touch the ground as the second reel enters the spindle. The caster wheels used facilitate the work. Since it can carry two reels and does not have a mechanism, the production cost is low and easy to manufacture. Cons of this design; First, the width created by two reels is not desired, two reels must be carried continuously. If a single reel is desired to be loaded, there are serious balance problems, and the design is not innovative in general. The first design remained in the idea stage due to its shortcomings.



Figure 2: 3D view of first design

The second design is seen in **Figure 3**. As in the first design, it is aimed to carry two reels in this design as well. This time the reels would be aligned in the side position and the shafts that were seen with the product driven over them would engage in the center of the reels. It is decided to use a hydraulic or jacking system to disconnect the reels from the ground because the force handle required for a mechanical system to be built would be too long to lift approximately 180 kg.

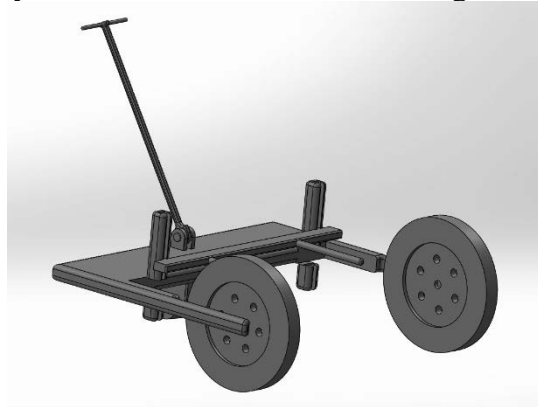


Figure 3: 3D view of second design

As a result of the research, it was decided to switch to an innovative design due to the integration time, compatibility, and cost of such systems. Pros of this design; being able to carry two reels, comfortable loading stages and ease of walking by design. Cons of this design; since extra systems must be used, the cost is high, the compatibility problems of the systems are possible, and most importantly, there is an undesirable width due to the side position of the reels. The second design was abandoned due to its disadvantages.

In the third design, which is seen as an idea in **Figure 4**. The use of the design is based on lifting the reel with the logic of a motorcycle stand, by opening the triangle stand under it when it is desired to move without the need for wheels and using after attaching the product to the reel. Pros of this design; Fully use of human power, no jack or hydraulic system, consisting of few and cheap parts, easy to manufacture, light weight and not a complex system. Cons of this design; It can carry only one type of reel. This design was approved, and production started.

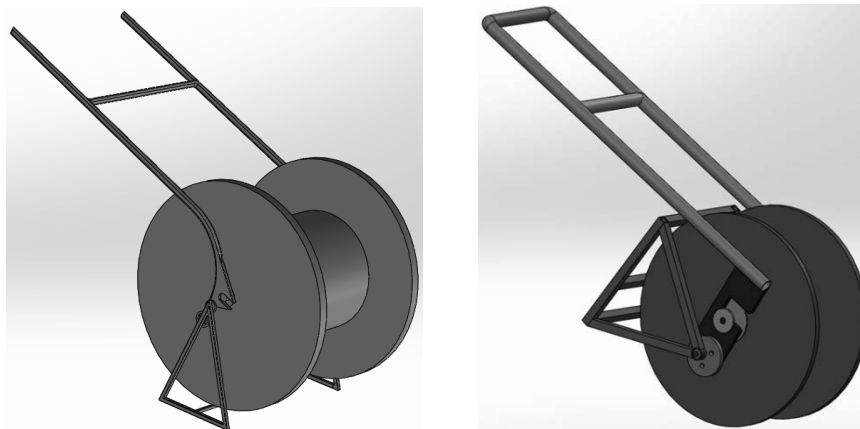


Figure 4: 3D view of the third design

Considering the weight of the reel, thickness and brace processes were conducted to stiffen the necessary parts. Necessary changes were made in the design considering the cost and ease of production. Two position spring pin system was designed for the movement of the triangle stand. Opening pedal was added to triangle stand considering the operator's ease of use.

2.1. Centering Part Design

This part, which is inserted into the center of reel from one side, ensures that the bearings at both ends rotate comfortably in the using mode. This centering part provides the main connection between the reel and the product. S235JR sheet material with 3mm thickness and 215 mm length was used. The two parts are joined by welding. Two “6302” bearings are attached to their ends, **Figure 5**.

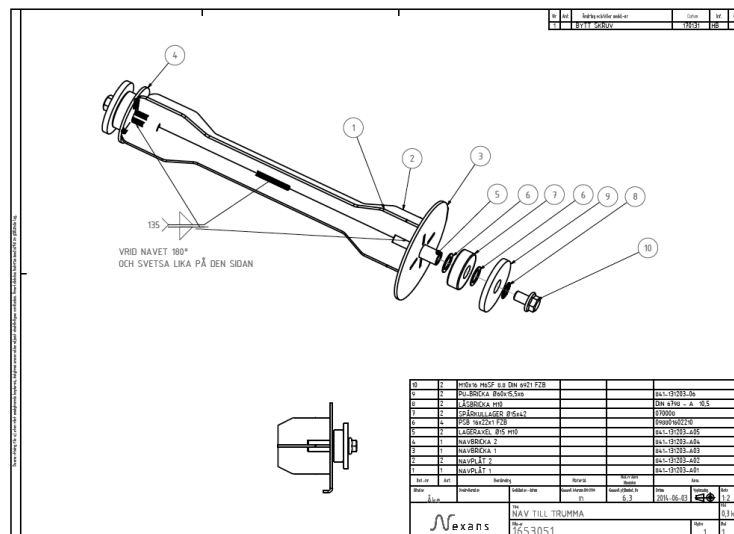


Figure 5: Assembly drawing of the centering part

2.2. Handle Design

A lightweight and high strength chassis is aimed by using Ø32x1.5mm tube. Occupational health and safety of the operator has been taken into consideration in the design of the handle. To

increase the rigidity of the handle, the brace is placed at the required distance. At the same time, this brace provides convenience to the operator in transporting without reel. The handle's length and angle of use are designed for the average person's height.

2.3. Claw Design

The claw design seen in **Figure 4** has been designed in accordance with the centering part, and the reel is attached in the slot in using mode. The holes were added into the claw for the pin mechanism. Appropriate thickness was determined in the direction of the force to be exposed. The bottom side of the part is rounded as a requirement of occupational health and safety. Necessary tolerances have been applied for ease during reel loading and unloading.

2.4. Pin Mechanism

Two pins in the mechanism are connected to the single hole in the claw in two distinct positions. One of these positions is the driving mode (**Figure 6a**) and the other is the using mode (**Figure 6b**). The pins are lockable, and spring loaded. Mode switching is done by locking one pin and unlocking the other. The unlocked pin replaces in the claw when the stand is at the appropriate angle. For ease of use, this mechanism is positioned on one side only.

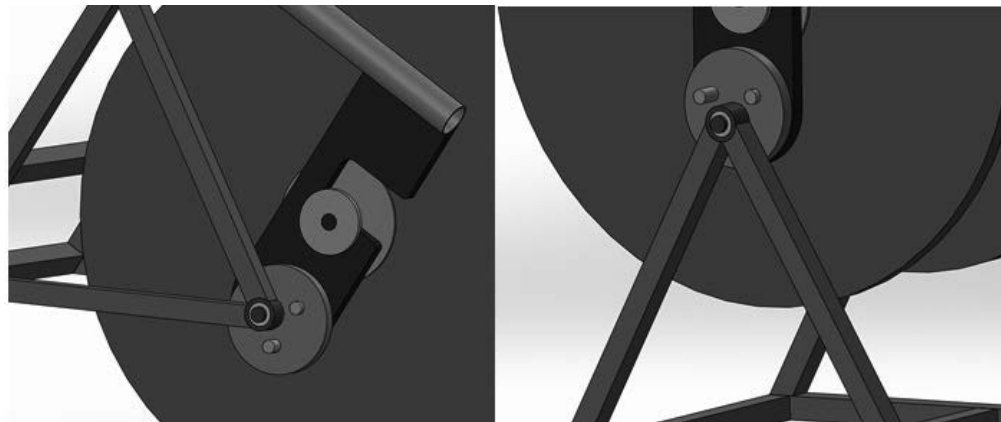


Figure 6: Driving (a), and using mode (b) of reel transporter

2.5. Triangular Stand Design

20x20x2mm profile is used. The dimensions of the profile were chosen considering the weight values to carry the reel. It is designed with an apex angle and height to keep the system stable in using mode. Profiles and $\text{Ø}30 \times 4$ mm tube are welded for mounting the triangle stand to the product, **Figure 6b**.

3. PROTOTYPE PRODUCTION

3.1 First Prototype

The production of the parts whose production drawings were prepared was completed by Nexans Denizli and the first prototype was assembled. As a result of the tests on the prototype, problems were detected in the driving mode and mode switching. These problems are the reel drop in mode switch due to reel imbalance and difficulty in triangle stand positioning in drive mode. It was decided to make a redesign on the prototype, **Figure 7**.



Figure 7: Production of the first prototype

4.2. Second Prototype

During the tests of the first prototype, the driving mode was changed. The new drive mode has made two position operation of the triangle stand unnecessary. In this direction, the triangular stand, and claw were redesigned as a single piece. The geometry of the claw part has been changed for the new mods. The pin mechanism has been removed. The new product has been made more practical both in terms of production and use, and the problems have been eliminated. For ease of assembly and shipment, the handle and claw connection are made with bolts instead of welding. Necessary tests for both modes were performed on the second prototype with a loaded reel. The product has completed tests in both driving mode and using mode. The prototype phase has been completed, and the product has been made ready for mass production, **Figure 8**.

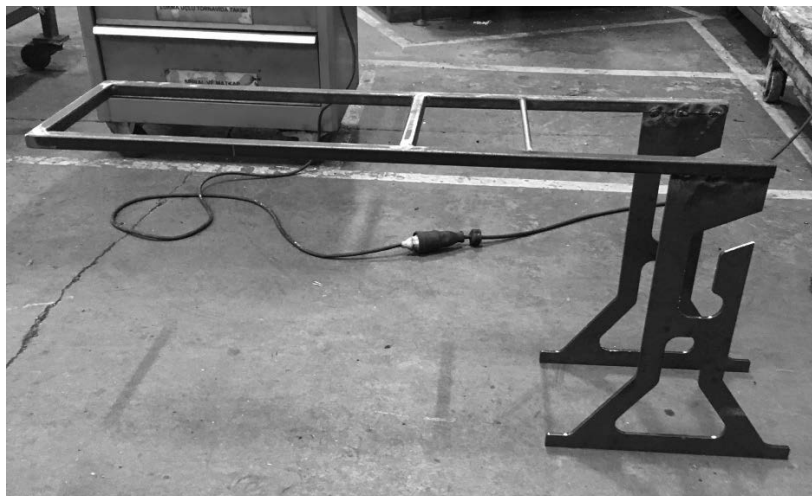


Figure 8: Production of the second prototype

The claw part, which has been redesigned in accordance with the new driving mode, has now been reduced to one part with a triangle stand, and the slot geometry has made the driving mode safer. The slot is angled 60 degrees for easy loading of the reel into the slot. The stand is a fixed one-piece so there is no need for a brace. The modern design has been improved in terms of lightness and ease of assembly, **Figure 9**.



Figure 9: Driving (a), and using mode (b) of final cable reel carrier

REFERENCES

1. <https://www.nexans.se/en/products/Accessories/Cable-Walk26680/product~14200109~.html>
2. <https://www.nexans.com.tr/tr/products/INDOOR-ENERGY-CABLES/Wires-and-cables-less-1kV/Low-smoke---fire-resistant/ALSECURE-P36343.html>
3. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Kablo>
4. <https://www.isgnedir.com/elle-yuk-tasima-islerinde-guvenlik/>



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

The Design of Security Barrier for Cable Machine

C. Meran ¹, Ö. Eren ², K. İlhan ², B. Kahraman ³, A.İ. Narin ³, S.G. Kanyılmaz ³

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

²Nexans Turkey Industry, R&D Center, Denizli, Turkey

³Student, Pamukkale University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Denizli, Turkey

Abstract: Taking occupational health and safety measures is of great importance in protecting the physical and mental health of employees. A number of safety problems have arisen due to the rotating components of the cable winding machines used in the cable manufacturing company. In order to eliminate these security problems that arise in the company, a security barrier design has been made to be placed in front of the cable winding machines. The originality of the study is that there is no need for any power source and it can be controlled manually. Technical drawings of the safety barrier were drawn and weight calculations were made. The prototype production of the study was carried out and the necessary experiments were carried out.

Keywords: Occupational Health and Safety, Barrier, Design

1. INTRODUCTION

Cable winding machines cause to be unexpected situations on working. In this situations working staff can be badly affected. With this study, it was aimed to eliminate the risks. The barrier designed to fit the occupational health and safety laws. The design rules are easy producing, being cheap and being ergonomic. Discovered many systems for examples result of the searching. However the systems didn't apply for some reasons. Because of this reasons it was designed a new desing.

2. DESING

Existing system, the cable pulley is hanging at a height sufficient to close it while the machine is in operation. The up and down move of the system is provided by an electric motor and a rope. Designed a new design for the problems can take places in existing system, **Figure 1**.



Figure 1: The problems of existing system

2.1 Design Rules for Existing System

- In the designed system, we aim to avoid the use of equipment such as chains, ropes, which carry the risk of breakage and require periodic maintenance and check.
- We aim to avoid using any power source in the system and reduce the cost.
- We aim to design an ergonomic solution that can be applied to other reels within the factory.
- Finally we aim is to take strong security measures.

Design ideas

The advantages and disadvantages of the ideas are given below.

Advice 1

The biggest feature of the accordion security restriction system is that it is completely mechanical. It is a portable and ergonomic design. However, the design was made according to the dimensions and this system was not implemented because the dimensions were too large, **Figure 2.**

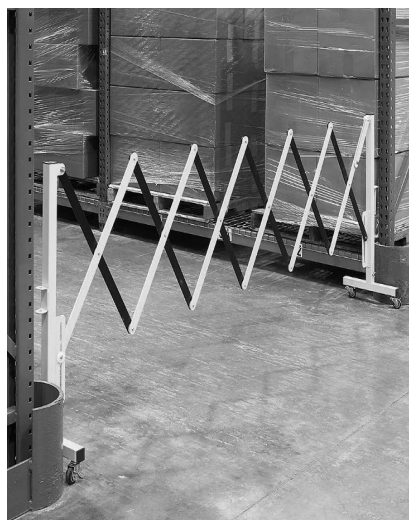


Figure 2: Collapsible accordion system

Advice 2

The system uses the counterweight mechanism. The system provides a great advantage because it is mechanical. It is useful because of the sleds included in the system. But it is difficult and costly to apply this system in the cable winding machine. For this reason this system is not preferred, **Figure 3**.



Figure 3: Counterweight balancing system

Advice 3

The system is mechanical and is not suitable to the dimensions of the area where the cable winding machine is located. For this reason this system is not preferred, **Figure 4**.

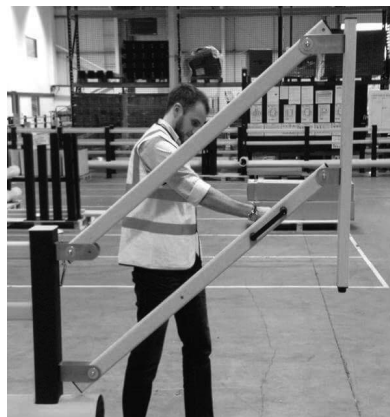


Figure 4: Single arm barrier system

Advice 4

This system is one of the most preferred systems. However, it occupies more space than necessary, need an electric motor, and is costly. For this reason this system is not preferred, **Figure 5.**



Figure 5: Shutter system

2.2 New system designed

The demands from the company, the dimensions of the cable winding machine line, the design criteria were taken into account and they were carried out in accordance with their new designs. The manufacturing drawing of the design was prepared in accordance with the dimensions of the cable winding machine, and the prototype was delivered to the company.

The working mechanism of the design

It has been requested that the security barrier be easily opened and closed in the cable winding machine line. In order to open the system, the left side of which is fixed and the right side is wheeled, it is necessary to pull the lever on the movable pole.



Figure 6: Motion transmission lever

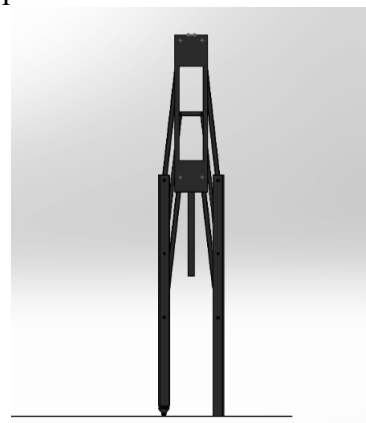


Figure 7: Closed state of the designed system

To turn off the system, it is necessary to lift the support arm in the middle upwards. Four levers, called motion transmission levers, will lift the body part up, easily moving at an angle thanks to the bearings mounted in it, as shown in **Figure 6**. Thanks to this, the system will take up the minimum possible space when it is turned off. A closed view of the system is shown in **Figure 7**.

The different feature of the designed system is that it is entirely mechanical, which provides a significant advantage in suitability, use, and cost. It is aimed to adapt and disseminate the safety barrier system to other machines in the factory. The technical drawings of the designed system are shown in **Figure 8** below.

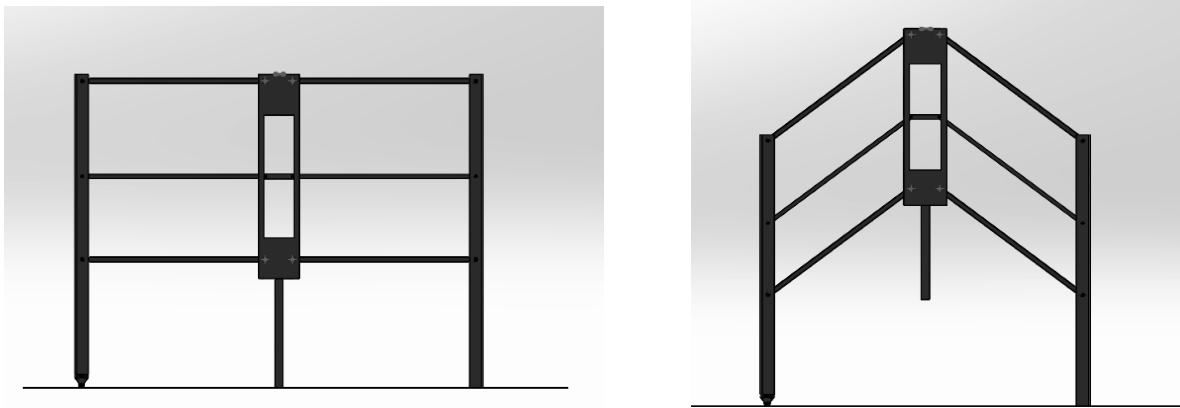


Figure 8: Operating state images of the designed system

3. GENERAL EVALUATION

Situations that endanger the health and safety of the operator in the cable winding machine have been eliminated with the safety barrier design made. The new design has been implemented in accordance with occupational health and safety practices. A prototype attempt was made and the system was started to be implemented.

REFERENCES

1. https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2022/08/Onuncu_Kalkinma_Plani2014-2018.pdf
2. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/353328>
3. https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/0173ea48d9567f1_ek_0.pdf
4. <https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/halil.yamak/129502/MAK%C4%B0NE%20KORUYUCULARININ%20TASARIMI%20VE%20MAK%C4%B0NE%20KORUYUCU%20%3%87E%C5%9E%C4%B0TLER%C4%B0.pdf>
5. https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/musa.sahin/129502/Havza%20MYO%20%C4%B0SG%20UZEM_%C4%B0SG-106%20Makine%20ve%20Techizat-2_Dersi%207.%20%C3%9CN%C4%B0TE.pptx



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Mobile Cable Reel Play-Out Stand Design and Manufacturing

C. Meran¹, K. Ilhan², O. Eren², D. Ustabasi³, C. Ozdemir³, A. Babacoglu³, B. Calhan²

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

²Nexans Turkey Industry, R&D Center, Denizli, Turkey

³Student, Pamukkale University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Denizli, Turkey

Abstract

The aim of this study is design and manufacturing a mobile winding reel (MWD). The most common and secure way to transport cables from the factory to the end user is the use of reels. In this project, to ensure that end users can easily secure and unwind the reels during usage, support flanges are placed on the sides of the reels. This allows for easy securing and winding of the reels, reducing the task that would typically require two people to be accomplished by a single person. The assembly and disassembly time have been optimized to be under three minutes.

Keywords: Reel, flange, optimization. winders

1. INTRODUCTION

As known, the delivery of various cables produced by companies is done by winding them onto reels. The use, unloading, and transportation of these heavy cable reels require them to rotate. This process is quite challenging for operators. In this project, the reels are suspended using two large flanges, allowing them to be easily moved and rotated in their position. By optimizing previously used components, a simplified design has been achieved.

2. THE DESIGN OF THE WINDING REEL

The primary objective in flange design is to make it easy to transport and use cable reels within the range of 300-1000 kg. Considering the difficulty of lifting heavy reels when attaching flanges, the flanges are cut to fit the reel sizes and shaft centers, ensuring they are suitable dimensions for the reels without much effort.

In the project, the flanges are cut at a 120-degree angle to fit three different reel sizes. As shown in **Figure 1**, the selected reel outer diameters are 800mm, 900mm, and 1200mm. The

flanges were cut from the selected corners in lengths of 100mm, 150mm, and 200mm, respectively, according to the reel dimensions.

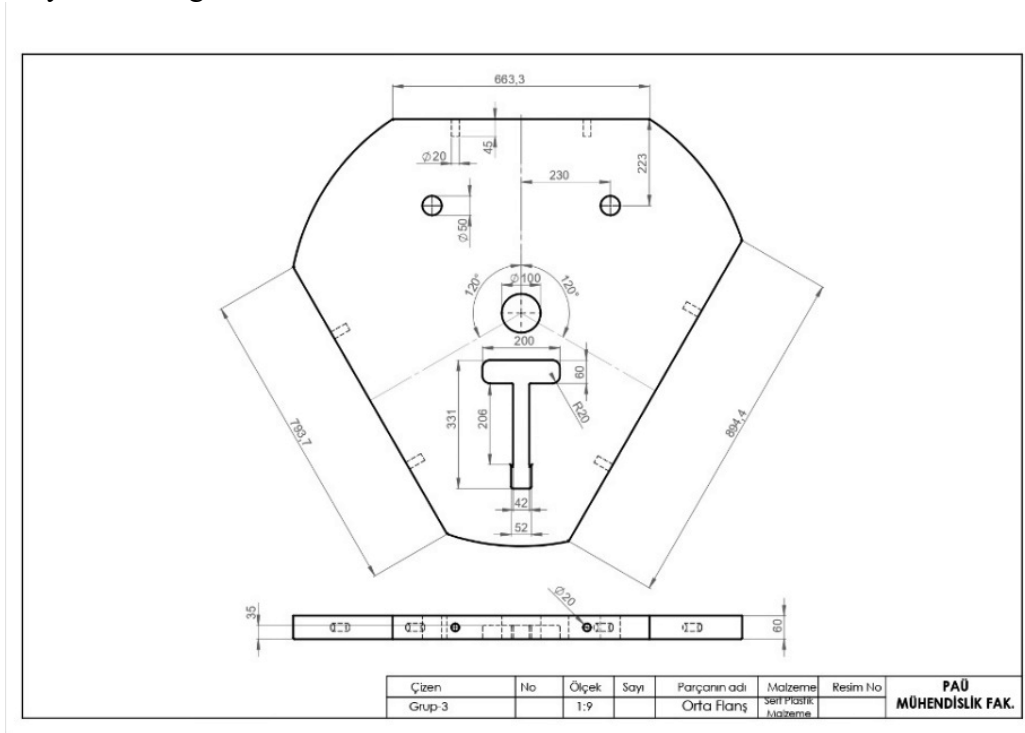


Figure 1: Technical drawing of the system flange

The T-wrench, as seen in Figure 2, is a handheld tool used to tighten or loosen bolts and nuts in a serial manner. In our project, we utilized the T-wrench to easily tighten and loosen the nuts that secure the fasteners used to attach the cut parts to the flange.

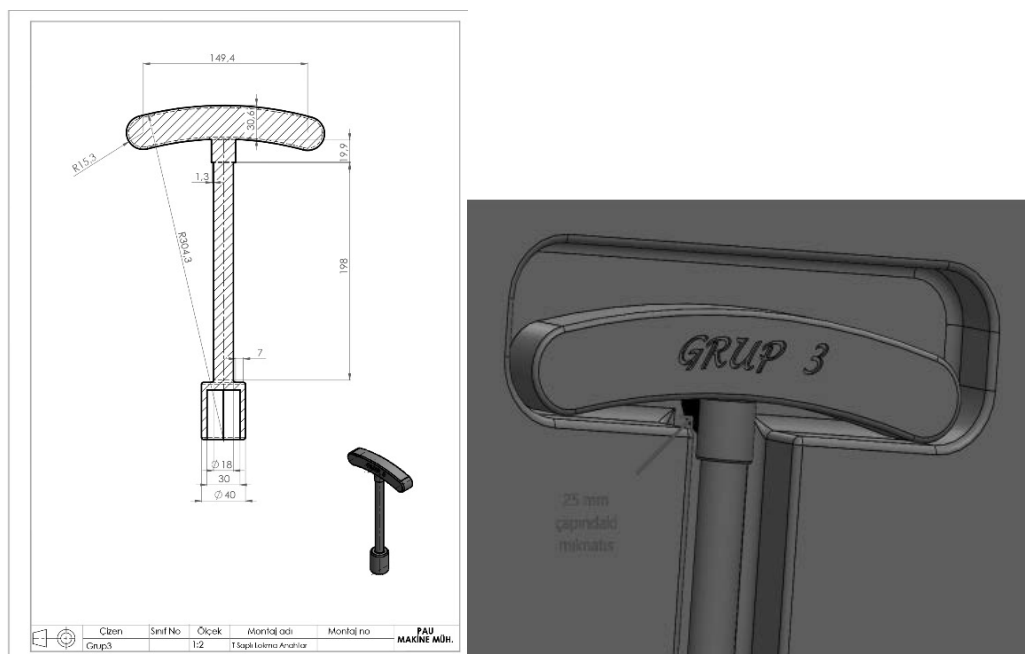


Figure 2: Technical drawing of the T-wrench and method of placing the T-wrench into the slot

To facilitate faster usage and prevent users from losing the T-wrench in the application areas of the mobile milking reel, it is aimed to position the flange's outer surface close to the centerline. In this context, a groove was created in the shape similar to that of the T-wrench, with a depth equal to half the thickness of the flange. To secure the T-wrench to the flange, a circular magnet with a diameter of 25 mm was placed at any point within the groove. This allows for quick and sequential insertion and removal of the wrench from the groove.

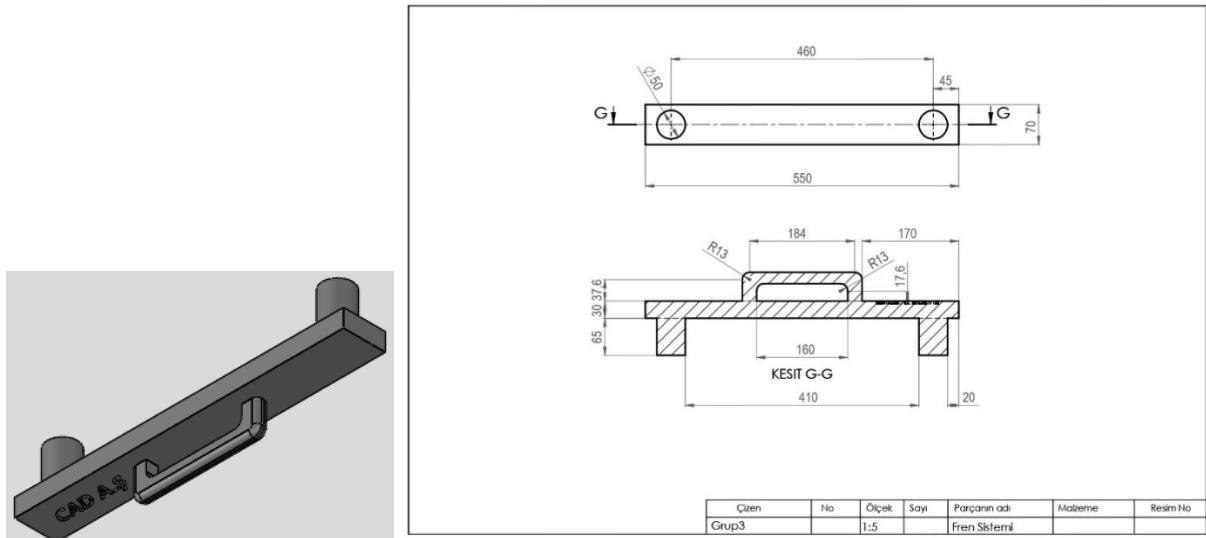


Figure 3: Technical drawing of the brake system

As seen in **Figure 3**, it has been created a two-armed design to secure and prepare the reel system with attached flange in its position for use. In this design, there is one handle to easily grip and place it in position, and two cylindrical parts, each with a length 5mm longer than the thickness of the flange, to serve the purpose of braking.

As seen in **Figure 4**, it has been created suitable holes, with a diameter equal to that of the brake system's cylindrical arms, on the outer surface of the flange near its centerline. By passing the cylindrical arms of the brake system through these holes, the system is securely fixed to the flange.

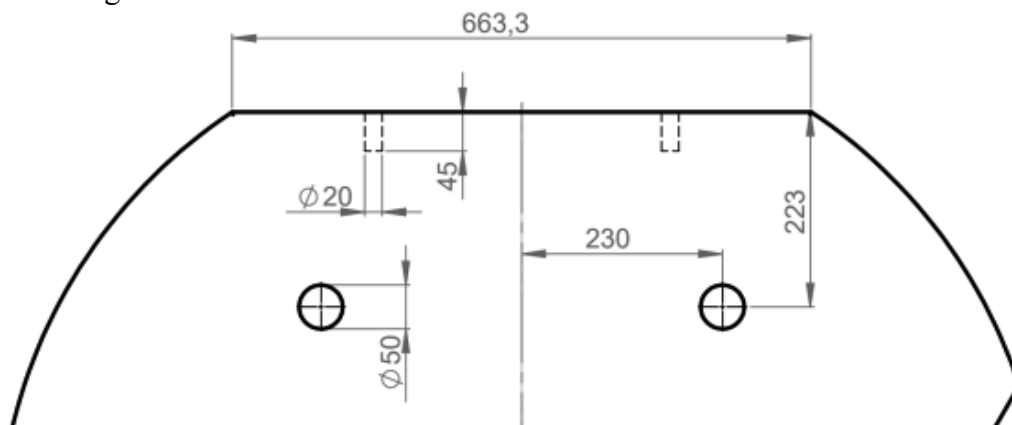


Figure 4: Slots created on the flange for the brake system

The bearing system used in the project, which is intended to rotate the shaft inside the reel, was initially planned to be produced using a two-piece injection method. However, the idea

was later changed, and it was decided to use six M5 helicoil inserts that would be heated and mounted with the help of a hot air gun. In the final stage, the entire system was completely redesigned, and the flange outer cover part number 2 and hub shaft part number 5, as shown in **Figure 5**, were designed to be securely fixed with screws.

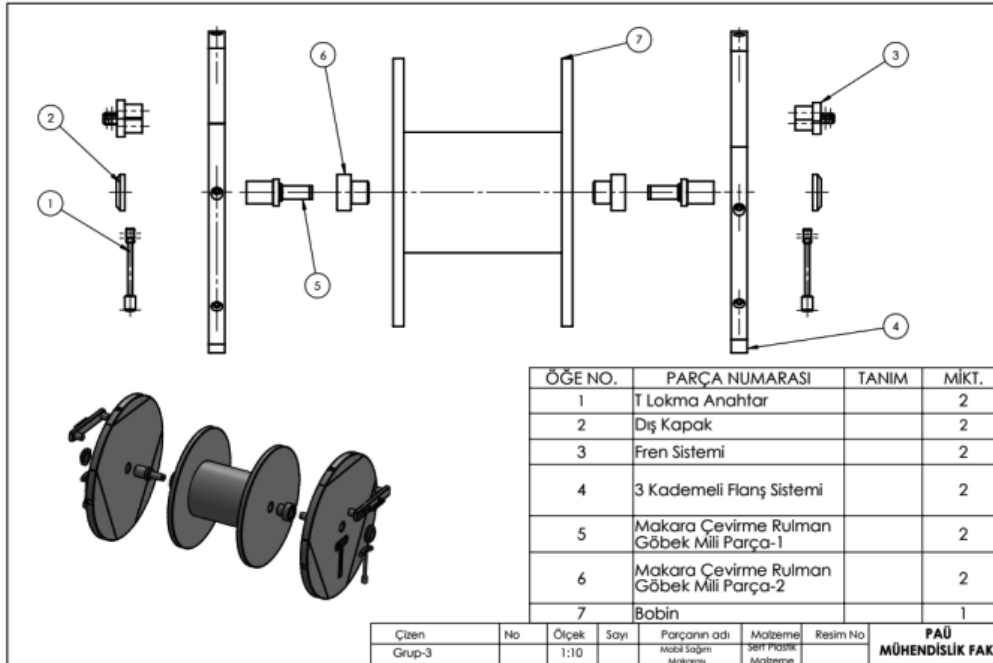


Figure 5: Final assembly drawing of the mobile winding reel

3. SYSTEM INSTALLATION STEPS

In the project, the outer diameter of the bobbin is initially taken as a reference. As shown in **Figure 6**, part 4 is selected for an 800 mm bobbin, part 5 for a 900 mm bobbin, and part 2 for a 1000 mm bobbin (All parts are initially integrated with the system).

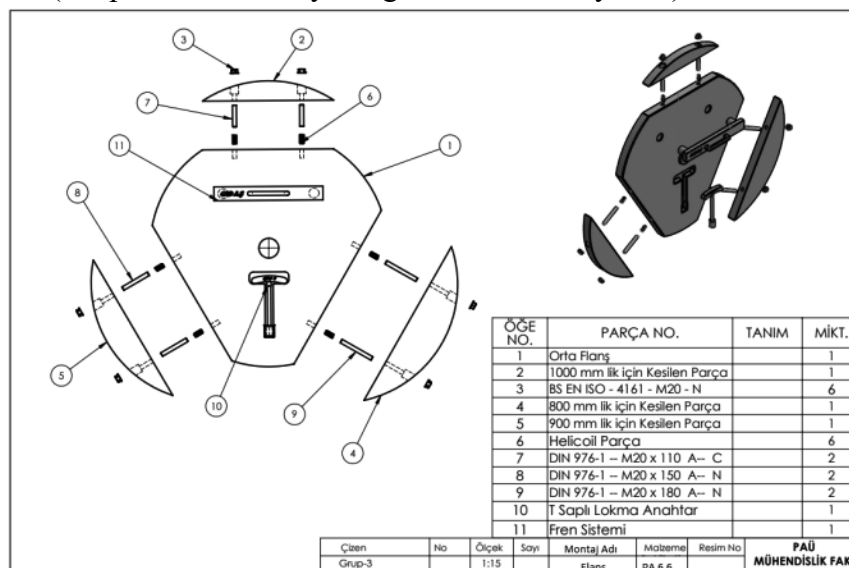


Figure 6: Flange design assembly draw

The design in the **Figure 6** is designed for 3 different bobbin sizes and specifically for the closest 3 bobbin sizes. If necessary, the bobbin diameters of 100-200 mm and 300 mm can be scaled down by adjusting the system accordingly. For example, let's consider part 2 as the reference for a 1000 mm bobbin. With the help of the T wrench positioned on the flange using magnets, the process starts by removing the M20 nuts and M20x110 bolts shown. To prevent the bolts from getting lost, they can be placed in the slots on the flange.

When the same procedure is carried out for the other flange, the extracted surface will be fitted onto the base surface, resulting in the alignment of the center shaft height of the coil with the center shaft height of the flange. Parts 6 and part 5 will be integrated into a single piece. (In the Exploded View, each part to be produced separately is modeled separately.) As shown in **Figure 7**, the specified integrated parts are placed inside the coil, and the flanges with equal center heights are inserted into the slot of part 5. Then, the fastening process is completed by tightening the covers indicated by part 2.

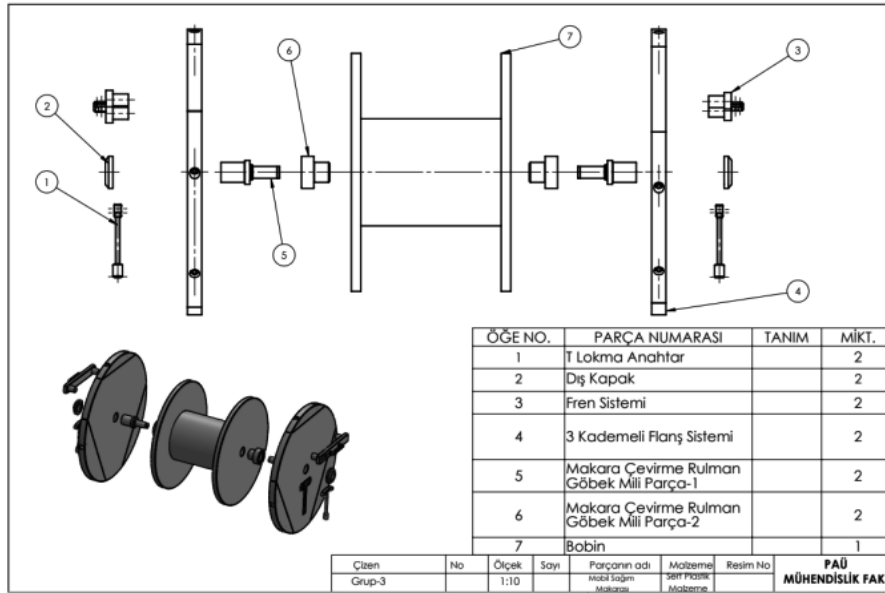


Figure 7: Final assembly drawing of the mobile winding reel

The operator lifts a single flange by freeing its upper surface from the ground plane or using a support lever. Then, the removed cut part, depicted as part 2 in **Figure 7**, is reattached to ensure system integrity by following the reverse of the instructions mentioned above. The outer cover, depicted as part 2 in **Figure 7**, is mounted on to the flange through external compression, and the process is completed for the single flange.

In order to ensure workplace safety and prevent the part from sliding and rotating, the brake system is removed from its socket, and to avoid any harm to the operator, the flange is securely placed in a cage above the ground level. The same procedure is carried out for the other flange as well. Since the coil's ground angle remains unchanged and the second flange has no possibility of rotation or sliding, the assembly of both flanges can be easily accomplished.



Figure 8: Final render image of mobile winding reel

Kestamid was used with such mechanical properties as flange material is suitable both in terms of mechanical characteristics and cost-effectiveness, **Figure 8**.

4. CONCLUSIONS

In the mobile winding machine project, the aim is to facilitate the transportation, fixation, and braking of cables produced by companies and delivered with coils, enabling easy unloading of cables from the coil by rotating in place, and ensuring the easiest supply and use for the consumer. The cost of existing prototypes and products, which are expensive in terms of assembly, production prices, and overall costs, has been reduced by approximately 2/3. A prototype has been developed that is easier to assemble and disassemble, requiring less cost and effort.

When mobile winding reels are in the field, it is important to keep the bolt beds as clean as possible, free from dust and dirt. To ensure the long-term usability of bolt and shaft alignments, it is crucial to minimize horizontal forces and avoid using them on sloping surfaces. Although single-person assembly may be feasible, we recommend conducting the assembly with at least two operators for the sake of occupational safety.

REFERENCES

1. AVAS Metal Industry and Trade Inc., 2017, 'Mechanical Properties of Kestamid' Access Date: 19.12.2022. Available at: <https://www.avasmetal.com.tr/?/kestamid/kestamid-teknik-ozellikler>
2. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 2017, Hilal Can, 'Mechanical Properties of Recycled Kestamids' Access Date: 20.12.2022. Available at: <http://pajes.pau.edu.tr/>

3. OKD Polymers, 2021, 'General Properties of Kestamit' Access Date: 20.12.2022. Available at: <https://okdpolimer.com/kestamit-blog/what-is-kestamit>
4. Southwire, 'SIMpull™ Flange Step-by-Step Installation Guide' YouTube video, May 30, 2017. Access Date: 30.05.2022. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=s8Ji9Gs3fPA>
5. Maxistools, 'Maxis Jax' YouTube video, August 17, 2011. Access Date: 17.08.2022. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=15KXxidVqKY>
6. Volta Macchine, 'Cable reel unreeling frame' YouTube video, March 3, 2021. Access Date: 03.03.2022. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=CrVc4911Mrg>
7. Itoolco 'Feeding wire with iTOOLco Real Jack Stands' YouTube 30 May 2014 <https://www.youtube.com/watch?v=XPCtH9nvF>



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Porównanie wpływu napawania utwardzającego jednowarstwowego z napawaniem utwardzającym dwuwarstwowym na zmiany składu chemicznego stali kwasoodpornej 1.4301

A. Migacz^a, M. Bonek^b

^a Studentka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: agatmig637@student.polsl.pl

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

Streszczenie: W artykule opisano cel powszechnego wykorzystywania metod napawania oraz wyróżniono najważniejsze cechy charakteryzujące prawidłowo wykonaną warstwę trudnościeralną. Materiałem poddanym napawaniu utwardzającemu była nierdzewna stal austenityczna 304 (1.4301). W części badawczej przedstawiono obrazy mikroskopowe dwóch zastosowanych technik napawania, gdzie wykonano próbkę z napoiną jednowarstwową oraz próbkę z napoiną dwuwarstwową. Do badań użyto samoosłonowego drutu żeliwnego o rdzeniu proszkowym i wysokiej zawartości chromu. Celem przeprowadzenia procesu dwoma technikami było porównanie stopnia wymieszania materiału elektrody z podłożem. Wykonano analizę składu chemicznego lica napoiny oraz materiału rodzimego od strony nienapawanej dla obu próbek.

Abstract: The article describes a general aim of hardfacing and points out essential features of properly built layer. An austenitic stainless steel 304 (1.4301) was hardfaced for during research. In experimental section are shown microscopic photographs of single-layer cladding and of double-layer cladding. Self-shielding fluxcored wire with high chromium content was used to prepare both specimen. Conducting hardfacing process in two technics enabled comparison of dilution rate between clad and base material. Chemical composition analysis was crucial and every specimen was examined on clad surface and base material.

Słowa kluczowe: napawanie, napawanie utwardzające, FCAW, warstwy trudnościeralne, analiza składu chemicznego, stal austenityczna, stal nierdzewna

1. WSTĘP

Inżynieria materiałowa stanowi podstawę w projektowaniu konstrukcji stalowych, maszyn oraz pojedynczych elementów pracujących. Jedną z jej gałęzi jest inżynieria powierzchni umożliwiająca modyfikowanie warstw wierzchnich. Łącząc ideologię inżynierii powierzchni z metodami inżynierii spajania, możliwe jest nakładanie i kształtowanie metalicznych powłok,

które końcowo osiągają cechy znacząco przewyższające te, które oferują warstwy utworzone wyłącznie poprzez obróbkę materiału rdzenia. Dzięki metodom spawalniczym możliwe jest znaczące podniesienie własności powłok takich jak: twardość, udarność czy odporność na korozję. Powszechnie spotykanym problem w przemyśle ciężkim, takim jaki stanowi przemysł wydobywczy, jest zużycie ściernie. Powierzchnie długotrwale pracujące w warunkach, gdzie towarzyszy tarcie typu metal-metal, metal-minerał, bez dodatkowego zabezpieczenia, narażone są końcowo na niszczenie całego elementu. Można to niekorzystne działanie znacząco ograniczyć poprzez stosowanie powłok zapewniających odpowiednio wysokie wartości odporności na zużycie ściernie, bądź adhezyjne. Trudnościeralne napoiny mogą być nakładane bezpośrednio na nowe części, jeszcze przed podjęciem przez nie pracy oraz także na częściowo już zużyte powierzchnie, co będzie zapobiegało dalszym ubytkom. Poprzez utworzenie napoiny możliwe jest nadanie nie tylko lepszych własności wytrzymałościowych niż materiał podstawowy wyrobu, ale także możliwa jest odbudowa pierwotnego kształtu elementu, co jest charakterystyczne dla napawania regeneracyjnego. [1-8]

Do najpowszechniej używanych metod napawania należy napawanie łukowe FCAW. Proces ten często przeprowadzany jest na tych samych urządzeniach spawalniczych co spawanie, natomiast poprzez manipulację parametrami procesu można rozszerzyć ich zakres pracy także o tworzenie powłok metalicznych bez konieczności głębokiego wtopienia. Podczas tego procesu dochodzi do metalurgicznego połączenia materiału dodatkowego z materiałem podłoża w skutek częściowego wymieszania stopiwa. Cechami prawidłowo wykonanej napoiny są: spójność z materiałem podłoża, a tym samym brak przyklejeń, pęknięć, wtrąceń niemetalicznych oraz brak porowatości. Dąży się, aby udział napoiny w materiale podłoża był jak najmniejszy oraz aby była zachowana w miarę jak najwcześniejsza linia wtopienia. [9,10]

2. BADANIA WŁASNE

2.1 Cel i zakres badań

Badania miały na celu wskazanie różnic powstałych w składzie chemicznym w wyniku wymieszania materiału podłoża oraz napoiny po przeprowadzeniu procesu napawania utwardzającego w dwóch technikach na podłożu ze stali nierdzewnej 304. Część próbek została otrzymana poprzez nałożenie pojedynczej warstwy powłoki o grubości 4mm. Druga technika miała na celu uzyskanie tej samej końcowej wartości grubości powłoki, natomiast poprzez nałożenie na siebie kolejno dwóch warstw. Próbki poddano także obserwacjom mikroskopowym w celu zbadania i porównania struktury napoiny oraz materiału rodzimego.

2.2 Materiały użyte do badań

Materiał podłoża stanowiła stal kwasoodporna 1.4301, inaczej nazywana też stalą 304. Należy ona do gatunku stali austenitycznych o wysokiej zawartości chromu oraz niklu, które odpowiadają między innymi za własności antykorozyjne. Jest chętnie wykorzystywana w środowiskach charakteryzujących się niskim stężeniem chloru oraz zasolenia, ze względu na swój brak odporności na korozję międzykrystaliczną. Szczegółowe dane dotyczące składu chemicznego umieszczone są w Tabeli 1. Wartości własności wytrzymałościowych zawarte są w Tabeli 2. Do badań użyto arkusza blachy o grubości 8mm, który przed przystąpieniem do procesu napawania został dokładnie oczyszczony i odtłuszczony.

Tablica 1. Skład chemiczny stali 1.4301

Table 1. Chemical composition of 1.4301 steel

Zawartość pierwiastków [%]							
C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni
0,023	0,432	1,351	0,0169	0,0099	0,0376	18,225	8,112

Tablica 2. Własności wytrzymałościowe stali 1.4301

Table 2. Mechanical properties of 1.4301 steel

Własności wytrzymałościowe						
Rm [N/mm ²]	Rp 0,2 [N/mm ²]	RP 1 [N/mm ²]	A5D [%]	A50 [%]	HRB B	HRB T
621	315	367	52,8	56,2	87	86

Materiałem dodatkowym użytym do wykonania obu rodzajów próbek był drut wysokowęglowy samoosłonowy o rdzeniu proszkowym i średnicy 2,8mm. Jego skład chemiczny został zamieszczony w Tabeli 3. Po przeprowadzeniu procesu uzyskano żeliwne stopiwo o wysokiej zawartości chromu. Wysoka zawartość tego pierwiastka oraz węgla sprzyja wydzielaniu się węglików chromu, odpowiadających między innymi za bardzo dobrą odporność napoiny na ścieranie oraz wysoką twardość, która powinna oscylować blisko 720HV. Jednak taka wartość jest możliwa do uzyskiwana dopiero po wykonaniu co najmniej 3 warstw, jak zastrzega producent w atencji.

Tablica 3. Skład chemiczny drutu proszkowego samoosłonowego

Table 3. Chemical composition of self-shielding flux cored wire

Zawartość pierwiastków [%]									
C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Ni	Nb	Fe
5,3	1,8	0,8	0,01	0,01	0,04	28,0	0,1	<0,01	reszta

2.3 Parametry procesu

Próbki wykonano ściegami prostymi przy użyciu maszyny półautomatowej, a parametry procesu umieszczono w Tabeli 4. W trakcie napawania przestrzegano reżimu temperaturowego dla stali austenitycznej, w związku z tym temperatura międzysciegowa nie przekraczała 150°C, dzięki czemu ograniczono wystąpienie zmian strukturalnych i własnościowych stali mogących powstać pod wpływem przegrzania stali. Po wykonaniu odpowiedniej ilości ściegów próbki zostawiono do swobodnego stygnięcia.

Tablica 4. Parametry procesu napawania utwardzającego

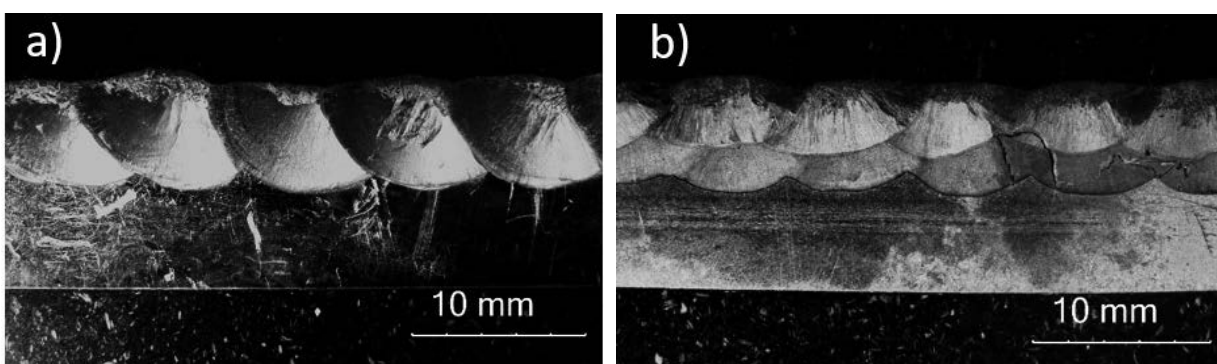
Table 4. Hardfacing parameters

Parametry procesu	Wartości dla próbki nr 1	Wartości dla próbki nr 2
Natężenie prądu [A]	408-426 oraz 426-456	300-330 oraz 270-290
Napięcie łuku [V]	28,9	28,9
Prędkość napawania [m/min]	0,8	0,8
Prędkość podawania drutu [m/min]	5,15	2,3 – 2,4
Rodzaj i biegunowość prądu	DC (+)	DC (+)

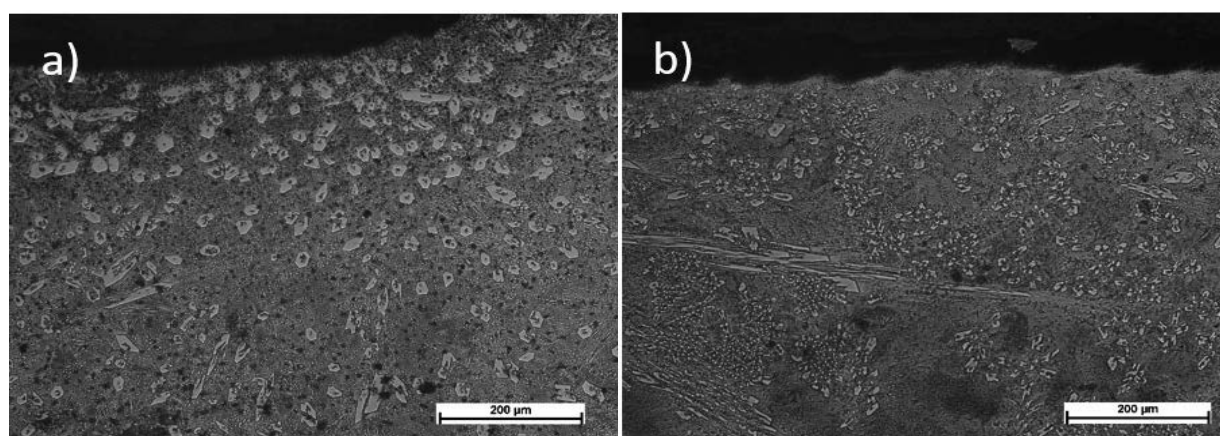
3. PRZEBIEG I WYNIKI BADAŃ

3.1 Badania mikroskopowe

Do badań wybrano środkowe obszary wykonanych napoin, gdyż wtedy osiągnięto najbardziej stabilne parametry napawania. Samo cięcie zostało wykonane za pomocą strumienia wody, co maksymalnie ograniczono wpływ ciepła wydzielającego się przy tego typu procesach. Wybrane elementy zainkludowano w żywicy termoutwardzalnej, a następnie wyszlifowano ich powierzchnię. Przed przystąpieniem do obserwacji mikroskopowych wypolerowane zgłady wytrawiono za pomocą odczynnika 89 wg zgodnie z normą ASTM. Dobór preparatu był podyktowany materiałem podłoża, który cechuje się mniejszym stopniem wytrawienia niż materiał dodatkowy. Na rysunkach 1a i 1b został przedstawiony widok wytrawionych próbek. Na rysunku 1b zostało uchwycone pęknięcie w napoinie, co jest charakterystyczne dla użytego materiału dodatkowego, którym było żeliwo wysokochromowe o wysokiej twardości. Pęknięcie nie propagowało w głąb materiału podstawowego.



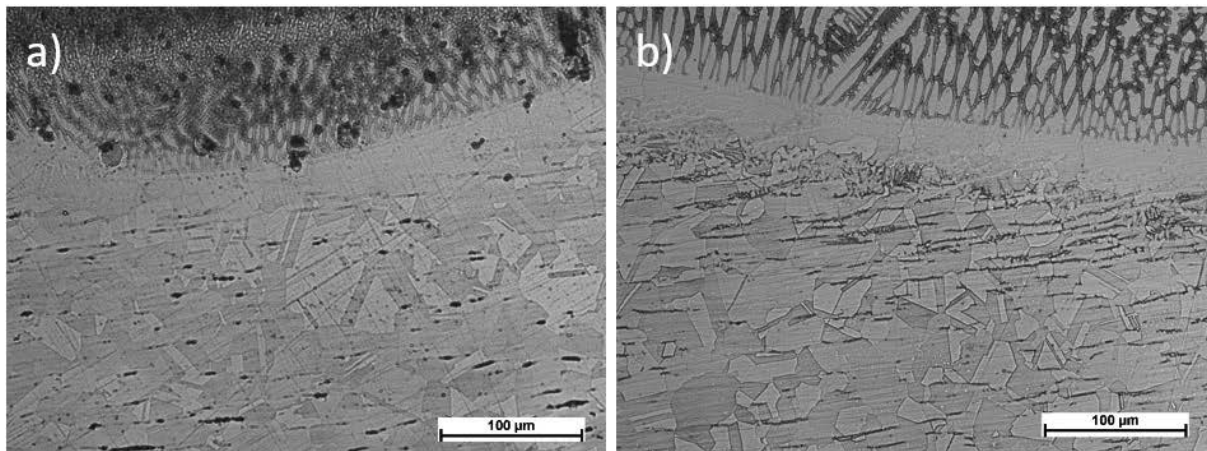
Rysunek 1. Obraz zgładów po wytrawieniu z napoiną a) próbka 1x4mm, b) próbka 2x2mm
Figure 1. Image of etched specimen with clad beads a) specimen 1x4mm, b) specimen 2x2mm



Rysunek 2. Mikrostruktura lica napoiny a) próbka 1x4mm, b) próbka 2x2mm w powiększeniu 100x
Figure 2. Microstructure of the clad's surface a) specimen 1x4mm, b) specimen 2x2mm in 100x magnification

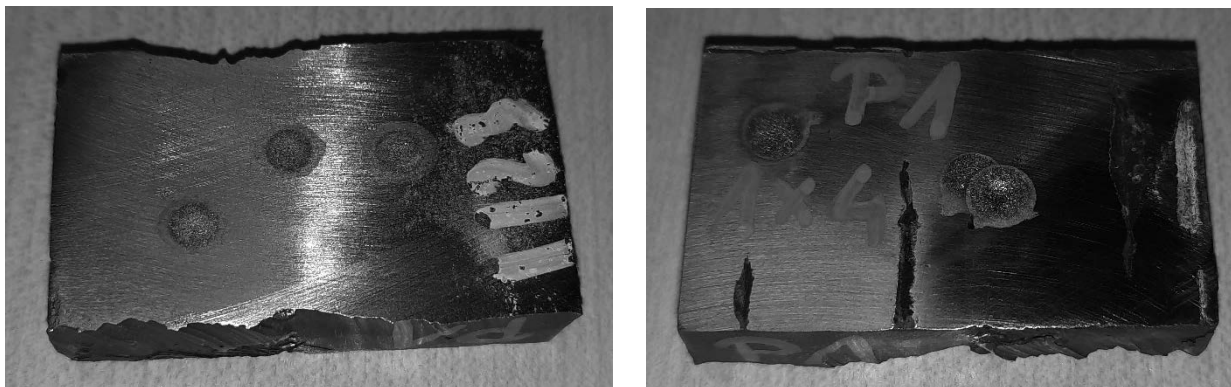
Następnie przy użyciu mikroskopu świetlnego wykonano obserwacje struktury. Pierwszym badanym obszarem była napoina, gdzie widoczna jest koncentracja największej ilości węglików przy licu, wynikająca z ich dyfuzji w trakcie krzepnięcia stopiwa. W obu próbkach nagromadzenie węglików w tym obszarze jest porównywalne, a ich kształty są nieregularne i przybierają różne formy, których postacie są przedstawione na rysunku 2 oraz rysunku 3.

Następnym porównywanym obszarem była linia wtopienia, która jest wyraźna, wąska i od niej propaguje wzrost dendrytów w napoinie.



Rysunek 3. Mikrostruktura linii wtopienia a) próbka 1x4mm, b) próbka 2x2mm w powiększeniu 200x

Figure 3. Microstructure of the fusion line a) specimen 1x4mm, b) specimen 2x2mm in 200x magnification



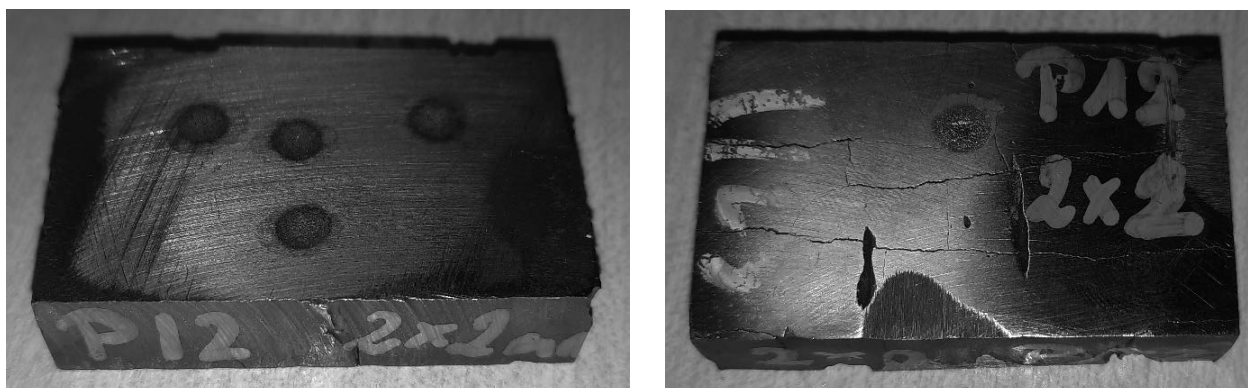
Rysunek 4. Miejsca wykonania badań składu chemicznego na próbce P1

Figure 4. Areas of chemical composition test on specimen P1

Obserwacja mikrostruktury materiału podłoża nie uwidoczniła zmian po przeprowadzeniu procesu napawania. Jest to spowodowane odpowiednim doбором parametrów oraz nieprzekraczaniem temperatury maksymalnej dla stali austenitycznej, która przez to zachowuje dalej swoje własności odporności na korozję.

3.2 Analiza składu chemicznego

Aby porównać stopień wymieszania materiału dodatkowego z materiałem podłoża po przeprowadzeniu napawania utwardzającego, próbki poddano analizie składu chemicznego. Zeszlifowano je zarówno od strony lica napoiny, jak i od strony podłoża materiału, aby wyrównać powierzchnię i uzyskać jak najdokładniejsze wyniki – zostało to przedstawione na rysunku 4 oraz na rysunku 5. Badanie przeprowadzono za pomocą spektrometru emisyjnego „Bruker Q4 Tasman 170” przy użyciu wzorców odniesienia 2A, 3A, MW21, MW34, MW37 zgodnie z Procedurą Badawczą nr 07.01.00 wyd. IX z 20.05.2016r. Wyniki analizy przedstawiono w Tabeli 5 oraz Tabeli 6.



Rysunek 5. Miejsca wykonania badań składu chemicznego na próbce P12

Figure 5. Areas of chemical composition test on specimen P12

Opis oznaczenia próbek w tabelach:

- **P1/N** – próbka z napawaną 1 warstwą o grubości 4mm - wyniki analizy składu chemicznego lica napoiny
- **P1/MR** – próbka napawaną 1 warstwą o grubości 4mm - wyniki analizy od strony materiału rodzimego
- **P12/N** – próbka z 2 warstwami napoiny - wyniki analizy składu chemicznego lica napoiny
- **P12/MR** – próbka z 2 warstwami napoiny - wyniki analizy od strony materiału rodzimego

Tablica 5. Wyniki badań analizy składu chemicznego dla próbki P1 – 1x4mm

Table 5. Results of chemical composition analysis of specimen P1- 1x4mm

Pierw.	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Nb	Al	B	W
	[%]													
P1/N	~5,17	0,905	1,142	0,020	0,0103	23,83	2,21	0,083	<0,005	0,061	0,002	>0,054	~0,238	0,057
±	0,32	0,066	0,122	0,003	0,0012	1,20	0,70	0,023	-	0,003	0,003	-	0,054	0,028
P1/MR	0,069	1,063	0,334	0,022	0,0079	18,51	8,15	0,307	0,097	0,063	0,012	0,007	<0,001	0,069
±	0,006	0,070	0,017	0,003	0,0005	0,37	0,47	0,003	0,007	0,002	0,003	0,003	-	0,034

Tablica 6. Wyniki badań analizy składu chemicznego dla próbki P12 – 2x2mm
 Table 6. Results of chemical composition analysis of specimen P12- 2x2mm

Pierw.	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Nb	Al	B	W
	[%]													
P12/N	~5,25	0,850	1,218	0,020	0,0110	24,77	2,22	0,089	<0,005	0,049	0,003	>0,054	~0,254	0,055
±	0,33	0,038	0,116	0,003	0,0016	0,54	0,48	0,007	-	0,002	0,004	-	0,047	0,03
P12/MR	0,063	1,071	0,353	0,023	0,0078	18,55	8,12	0,316	0,098	0,063	0,012	0,007	<0,001	0,062
±	0,011	0,070	0,047	0,003	0,0009	0,54	0,48	0,013	0,011	0,002	0,003	0,003	-	0,033

Uśrednione wyniki analizy składu chemicznego wskazały, że doszło do wymieszania się materiału napoiny z materiałem podłoża w obu próbkach, przez co zawartość węgla wzrosła w materiale rodzimym o ok. 0,04%. Zmianie uległa także zawartość Mn, którego wzrost o prawie 0,3% odnotowuje w napoinie, a spadek o ok. 0,75% w materiale rodzimym. Znaczne różnice w zawartości procentowej miały miejsce dla Cr - wzrost o prawie 0,3% w materiale rodzimym, a tym samym spadek w napoinie aż o 4%. Niemniej jednak, producent materiału dodatkowego zaznacza, że własności mechaniczne oraz skład chemiczny uzyskanego stopiwa zawarty w dostarczonym atencie jest osiągnięty dopiero po wykonaniu co najmniej 3 warstw.

4. PODSUMOWANIE

Po przeprowadzeniu obserwacji mikroskopowych można zauważyć, że szerokość linii wtopienia między napoiną, a materiałem rodzimym w obu próbkach jest porównywalnie wąska oraz zarówno w technice jednowarstwowej, jak i dwuwarstwowej połączenie spełnia wymagania jakościowe i nie obserwuje się żadnych niezgodności spawalniczych wskazujących na tej podstawie przewagę jednej techniki nad drugą. Z kolei badania analizy składu chemicznego wskazują dość znaczące różnice zawartości pierwiastków w przebadanych próbkach od strony lica napoin, przy równoczesnym otrzymaniu bardzo podobnych wartości procentowych pojedynczych pierwiastków w materiałach rodzimych próbek. Jest to korzystny wynik, gdyż można przypuszczać, że własności odporności korozyjnej stali austenitycznej zostały zachowane. Niemniej jednak chcąc zachować również dobre własności odporności na ścieranie dla napoiny, należy wybrać technikę zapewniającą jak najbardziej zbliżony skład chemiczny warstwy ochronnej do tego, który jest deklarowany przez producenta. Kluczowymi w tym wypadku są wartości pierwiastków takich jak węgiel i chrom, gdyż dzięki ich obecności podczas napawania dochodzi do utworzenia się twardych węglików chromu zapewniających trudnościeralność powłoki. Takie wymagania spełnia próbka wykonana techniką napawania dwuwarstwowego.

LITERATURA

1. B. Antoszewski, Inżynieria powierzchni – wybrane zagadnienia, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Kielce 2011.
2. A. Lisiecki, Tribology and Surface Engineering, *Coatings* 2019.

3. M. Gucwa, R. Bęczkowski, J. Winczek, T. Wyleciał , The Effect of Type of Welding Sequence During Hardfacing Chromium Cast Iron for Erosion Resistance , Archives of Foundry Engineering, Volume 17 Issue 3/2017.
4. C. Tippayasam, C. Taengwa, J.Palomas, T. Siripongsakul, T. Thaweechai, A. Kaewvilai, Effects of flux-cored arc welding technology on microstructure and wear resistance of Fe-Cr-C hardfacing alloy, Materials Today Communications, Volume 35, June 2023.
5. M. Pokusová, A. Brúsilová, L. Šooš, I. Berta, Abrasion wear behavior of high-chromium cast iron, Archives of Foundry Engineering, 16(2), 69-74, 2016.
6. Klimpel A. Napawanie i natryskiwanie cieplne Technologie. WNT, Warszawa, 2000.
7. T. Poloczek, A. Czupryński, M. Żuk, M. Chruściel, Structure and tribological properties of wear-resistant layers produced in process of plasma powder surfacing, Welding Technologies, 91, 35–41, Rev. 2019.
8. H. Rojacz, C. Katsich, M. Varga, E. Badisch , How the micro-mechanical stability of carbides in chromium-rich hardfacings influences the impact-abrasion resistance at elevated temperatures, Wear, Volume 522, 1 June 2023.
9. P. G. Riofrío, J.A.M. Ferreira, C.A. Capela, Imperfections and Modelling of the Weld Bead Profile of Laser Butt Joints in HSLA Steel Thin Plate, Metals 2021.
10. M. Consonni, C.F. Wee, C.Schneider, 50th annual conference of the British Institute of Non-Destructive Testing, Telford, UK, 2011.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

The influence of manganese residue filler on the mechanical properties of silicone-based composites

M. Mrówka^a, G. Moskal^a

^a Silesian University of Technology, Faculty of Materials Engineering, Department of Materials Technology

email: maciej.mrowka@polsl.pl, grzegorz.moskal@polsl.pl

Abstract: One application of silicone is its use in the production of durable and resistant protective coatings. Its mechanical and tribological properties can be improved when inorganic compounds are added as fillers. These compounds may be acquired as waste from high-tonnage industrial processes. However, neutralizing such waste can be time consuming and costly. One possible solution is to use post-production waste as composite fillers. Here, the authors investigated the effect of introducing fillers from post-production waste, and its effect on changing the physical properties of silicone composites. This study used waste in the form of manganese oxide and waste manganese residue. The composites were made by gravity casting. The composite materials were tested on tensile test. During the tests, it was shown that the composites had worse mechanical properties than the silicone used as a filler.

Keywords: silicone, composite, manganese residue, mechanical properties, waste management

1. INTRODUCTION

The growing amount of production waste has caused scientists to investigate new ways of recycling [1]. Many inorganic compounds are found in industrial waste that have been used as fillers in composites, whose matrices are polymers [2]. Compounds that use these fillers demonstrate changed physicochemical properties in relation to the base material [3]. Research on these composites investigates whether the addition of inorganic compounds can improve their physical properties, compared to the material used as the matrix. The literature describes the effect of introducing Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO , CuO , SiC , ZrO_2 , Si_3N_4 , SiO_2 , and CaCO_3 particulate fillers, which have been incorporated into PPS, PEEK, epoxy, PMMA, and PTFE matrices, to improve their physical performance [4-8].

There are few literature examples of composites that contain a silicone matrix. In recent years, however, there has been an increased interest in this type of material, and most publications available on silicone-based composites are from the last 5 years.

Encouraged by these results, the authors obtained manganese oxide and manganese residue from the Zakłady Górniczo-Hutnicze "Bolesław" S.A. Capital Group (Bukowno, Poland).

These materials are waste products of the electrolysis process, when used with steel-lead alloy anodes. The authors examined the benefit of these waste products as fillers on the mechanical and tribological properties of composites, whose matrix was the same silicone that was used in the previous research. The use of waste materials from high-volume industrial processes is an important part of caring for the natural environment. Currently, paths for the recycling of waste in various branches of the economy are being sought. This will reduce the need to store and process industrial waste. The usage of waste materials from manganese processing as fillers is not mentioned in the available literature. The authors expect that, when used as a filler, the manganese residue (MR) product that is left over from the electrolysis reaction process, with anodes made of a silver-lead alloy, will reduce the abrasion of silicone-based composites. The mechanical characteristics of the obtained composites will be assessed when both manganese (II) oxide and manganese residue are used as a filler.

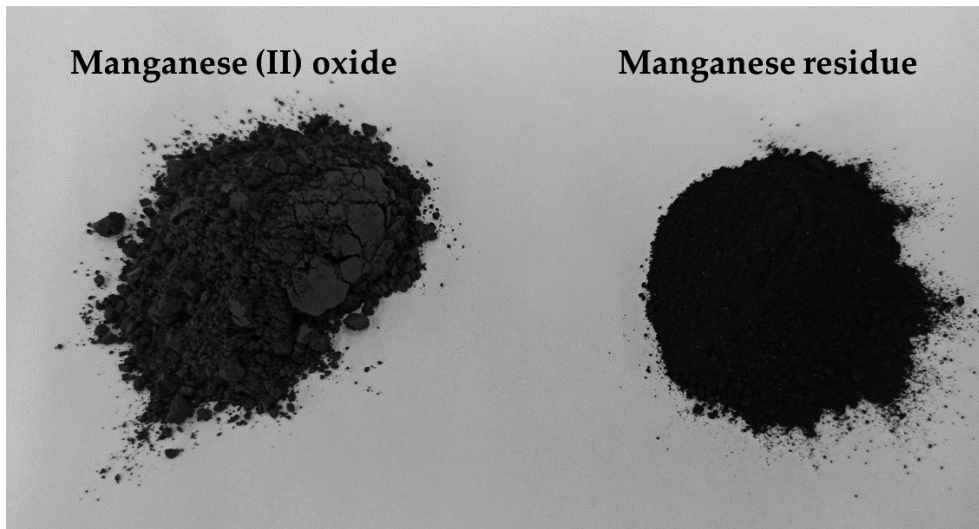
2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Materials

Condensation-cured RTV-2 silicone rubber Feingosil 128 PU was purchased from Kauposil. Manganese (II) oxide (MnO) was obtained from the company Oxymine S.A. Oxydes Minéraux de Poissy (France). The sieve analysis showed: 100% of the grain size <0.1 mm. Chemical analysis of manganese (II) oxide: 78% MnO, 5,9% Fe, 2,7% CaO, 1,5% Al₂O₃, 1,3% MnO₂ and 10,6% the rest substances. Manganese residue as a product of the electrolysis reaction process on anodes made of a silver-lead alloy was provided by Zakłady Górniczo-Hutnicze "Bolesław" S.A. Capital Group (Bukowno, Poland). The sieve analysis showed: 92.5% of grains <0.1 mm and 7.5% of grains 0.1–0.315 mm. Chemical composition of the manganese residue provided by the chemical laboratory of Zakłady Górniczo-Hutnicze "Bolesław" shows: 72% MnO₂, 11% SiO₂, 7% MnO, 5,5% ZnSO₄ and 4,5% the rest substances.

2.2. Composites preparation

The composites were prepared by gravity casting with 2.5, 5, 7.5 and 10% wt. fillers. The silicone matrix was gradually heat treated at 110°C for 180 minutes, before adding fillers, until a constant weight was obtained. Materials that are used in the research as fillers are presented in Figure 1. The silicone components were mixed with the fillers using a high-shear mixer, then the catalyst was added. 72 hours after being poured into molds, the samples were cut by punching.



Rysunek 1. Napełniacze użyte w badaniach

Figure 1. Materials used as fillers

2.3. Tensile test

A tensile test was performed in accordance with EN ISO 527-1 [9]. The measurements were carried out according to EN ISO 527-1 [9] for 5 samples (type 5-B) cut from each composition and their native samples. The tests were carried out on an Instron 4465 testing machine. The test speed was 500 mm/min. The tensile strength and elongation at break were determined.

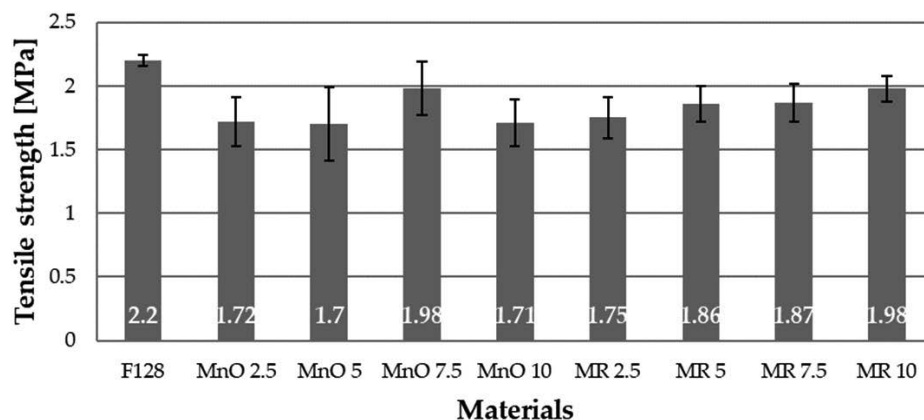
3. RESULTS AND DISCUSSION

The mechanical properties for all tested materials are shown in Figures 2–3 and in Table 1. Figure 2 shows the tensile strength values, while Figure 3 shows the elongation at break values.

Tabela 1. Wartości uzyskanych właściwości mechanicznych

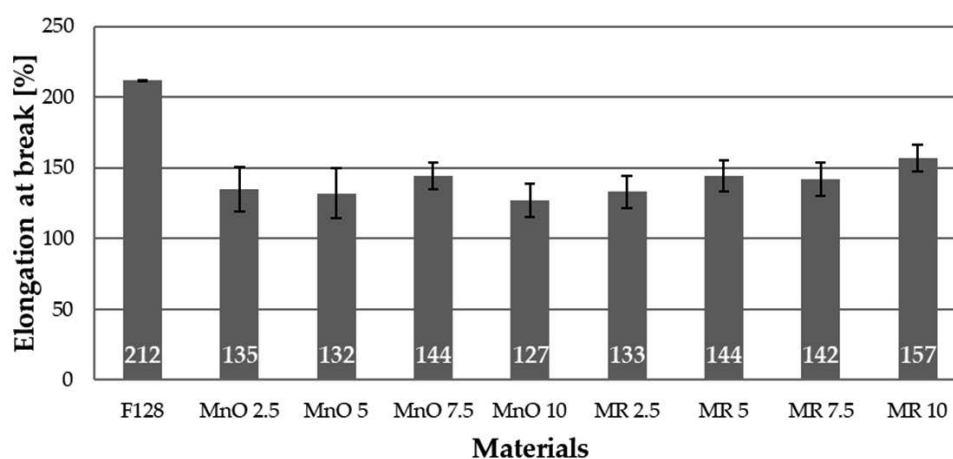
Table 1. The values of mechanical properties of tested materials

Material	Tensile Strength [MPa]	Elongation at break [%]
F128	2.2	212
MnO 2.5	1.72	135
MnO 5	1.7	132
MnO 7.5	1.98	144
MnO 10	1.71	127
MR 2.5	1.75	133
MR 5	1.86	144
MR 7.5	1.87	142
MR 10	1.98	157



Rysunek 2. Wytrzymałość na rozciąganie
Figure 2. Tensile strength

The tensile strength value for F128 silicone is 2.2 MPa, the highest value among all the tested materials. For the MnO 2.5 material, a decrease in the tensile strength value by 22% was observed, compared to the base material (1.72 MPa). The tensile strength value for the MnO 5 material, equal to 1.7 MPa, is like the value for MnO 2.5. For the MnO 7.5 material, a significant increase in the tensile strength value was observed in comparison with the two composites containing 2.5 and 5% of the filler in the structure. MnO 7.5 is characterized by a tensile strength value equal to 1.98 MPa. For the MnO 10 material, the tensile strength value decreased again to a value like that of MnO 2.5 and MnO 5 (1.71 MPa). For the composites that used a manganese residue filler, it was noticed that tensile strength increased, along with concentration of the filler. The tensile strength value for MR 2.5 is 1.75 MPa, MR 5 – 1.86 MPa, MR 7.5 – 1.87 MPa and MR 10 – 1.98 MPa. The tensile strength value for MR 10 is equal to the MnO 7.5 value and both these values represent the highest tensile strength values among the tested materials.



Rysunek 3. Wydłużenie przy zerwaniu
Figure 3. Elongation at break

The elongation at break value for F128 silicone has the highest value of all tested materials (212%). All composite materials are characterized by an elongation at break, which is lower

than that of the silicone used as a matrix. For the MnO 2.5 material, the elongation at break value is 135%, and for MnO 5 – 132%. For the MnO 7.5 material, an increase in elongation at break to the level of 144% is observed, but for MnO 10 a decrease to the level of 127% is observed. The elongation at break value for the MnO 10 material is the lowest among all tested materials and is over 40% lower than the elongation at break value for F128. For materials where manganese residue was used as a filler, the MR 2.5 material has elongation at break equal to 133%, while MR 5 and MR 7.5 materials have similar values of 144 and 142%, respectively. For MR 10 material, an increase in the value of elongation at break to 157% is observed. The elongation at break value for MR 10 is the highest value among all composite materials produced.

4. CONCLUSION

The addition of manganese-containing substances: manganese oxide and manganese residue have a positive effect on the tribological properties of the newly obtained silicone-based composites. However, the static tensile tests demonstrated a decrease in elongation at break and tensile strength compared to the native silicone. So far, the influence of both fillers on other physical properties of composite materials has not been investigated. It can be assumed that manganese fillers can reduce abrasive wear or increase the flexibility of composite materials. However, additional research is needed to prove this.

BIBLIOGRAPHY

1. A. Hejna, J. Lenza, K. Formela, J. Korol, Studies on the Combined Impact of Starch Source and Multiple Processing on Selected Properties of Thermoplastic Starch/Ethylene-Vinyl Acetate Blends, *Journal of Polymers and the Environment* 27 (2019) 1112.
2. A. Krzyżak, D. Racinowski, R. Szczepaniak, M. Mucha, E. Kosicka, The Impact of Selected Atmospheric Conditions on the Process of Abrasive Wear of CFRP, *Materials* 13 (2020) 3965.
3. E. Kosicka, M. Borowiec, M. Kowalczyk, A. Krzyżak, R. Szczepaniak, Influence of the Selected Physical Modifier on the Dynamical Behavior of the Polymer Composites Used in the Aviation Industry, *Materials* 13 (2020) 5479.
4. K. Friedrich, Polymer composites for tribological applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 1 (2018) 3.
5. Ch. J. Schwartz, S. Bahadur, Studies on the tribological behavior and transfer film-counterface bond strength for polyphenylene sulfide filled with nanoscale alumina particles. *Wear* 237 (2000) 261.
6. Q-J. Xue, Q-H. Wang, Wear mechanisms of polyetheretherketone composites filled with various kinds of SiC, *Wear* 213 (1997) 54.
7. Q. Wang, Q. Xue, H. Liu, W. Shen, J. Xu, The effect of particle size of nanometer ZrO₂ on the tribological behavior of PEEK, *Wear* 198 (1996) 216.
8. W. G. Sawyer, K. D. Freudenberg, P. Bhimaraj, L. A. Schadler, A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with alumina nanoparticles, *Wear* 254 (2003) 573.
9. Polish Committee for Standardization. *Plastics—Determination of Tensile Properties—Part 1: General Principles*; Polish Committee for Standardization: Warsaw, Poland, 2012; EN ISO 527-1:2012.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Projekt komory rękawicowej typu glove box

S. Musioł^a, G. Pośpiech^a, N. Tomanek^a, S. Nowak^a, J. Popis^b, S. Lesz^b

^a Student/ka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów

Inżynierskich i Biomedycznych, SKN Materiałów Magnetycznych i Kompozytowych
email: sm307814@student.polsl.pl

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: julia.popis@polsl.pl

Streszczenie: Celem pracy jest zaprojektowanie komory rękawicowej zwanej glove box lub dry box. Komora rękawicowa jest przeznaczona do przeprowadzania różnorodnych procesów produkcyjnych jak i laboratoryjnych w kontrolowanej atmosferze suchej azotu, argonu lub helu. Najważniejszym zadaniem komory rękawicowej typu glove box jest oddzielenie badanego obiektu od otaczających go czynników atmosferycznych. W pracy opisane zostały podstawowe elementy konstrukcyjne oraz zastosowania sprzętu.

Abstract: The aims of this work is create glove box. The glove box is designed to carry out various production and laboratory processes in a controlled dry atmosphere of nitrogen, argon or helium. The most important task of the glove box is to separate the tested object from the atmospheric factors. The paper describes the basic construction elements and applications of the equipment.

Słowa kluczowe: komora rękawicowa, glove box, dry box

1. WSTĘP

Komora rękawicowa typu glove box jest to szczelny pojemnik, wykorzystywany do przeprowadzania różnego rodzaju czynności z obiektami wymagającymi zastosowania atmosfery ochronnej. Istnieją dwa rodzaje komór rękawicowych [1,2]:

- do pracy z substancjami niebezpiecznymi, np. radioaktywnymi lub mogącymi spowodować skażenie chemiczne lub biologiczne,
- do pracy z substancjami wrażliwymi na działanie wilgoci lub powietrza tzw. dry box.

Komora rękawicowa typu glove box złożona jest z wielu istotnych elementów, z którymi należy się zapoznać przed rozpoczęciem pracy, ponieważ nieznaną sprawę może doprowadzić do wielu nieoczekiwanych konsekwencji. Glove box składa się ze szczelnej

najczęściej stalowej komory z szybą ze szkła hartowanego, do której przymocowane są przez porty, gumowe rękawice. Część lub całość pojemnika jest zwykle przezroczysta, w celu zapewnienia widoczności obiektów znajdujących się wewnątrz. Manipulacja przedmiotami odbywa się z wykorzystaniem odpowiednich rękawic z kauczuku butylowego lub materiału o podwyższonej odporności chemicznej - Hypalonu (chlorosulfonowana guma polietylenowa), które stanowią ochronę przed niebezpiecznymi substancjami. Najczęstszą przyczyną występujących awarii komory jest pęknięcie rękawic, która może spowodować przedostanie się otaczającej atmosfery do środka, a tym samym wywołać niebezpieczeństwo. Aby temu zapobiec ważne jest by pamiętać o odpowiednim doborze rękawic do wykonywanych badań, oraz sprawdzeniu ich szczelności przed każdym rozpoczęciem pracy. Szczególnie istotny jest dobór rękawic w przypadku, kiedy mamy do czynienia z elementami nuklearnymi [3,4].

W bocznej części komory rękawicowej typu glove box znajduje się śluza transportowa z próżnią, która wykorzystywana jest do wprowadzania badanych materiałów i substancji. Rolą śluzy jest podanie elementów dostosowując atmosferę, która je otacza do atmosfery kontrolowanej znajdującej się w komorze. Glove box powinien być również wyposażony w bezpiecznik cieczowy, który podtrzymuje i normalizuje nadciśnienie wewnątrz a także stanowi ochronę w przypadku wplynięcia powietrza do środka. Wnętrze komory wypełnione jest zazwyczaj gazem obojętnym, którym może być hel, argon, bądź azot z domieszką wodoru. Wodór stanowi ochronę przed atomami tlenu w celu zabezpieczenia substancji przed utlenianiem. Wewnątrz komory umieszczany jest filtr HEPA, który umożliwia wychwytywanie i filtrowanie drobnych cząstek, kurzu, oparów, bakterii i aerozoli. Stosowany jest w przemyśle nuklearnym, farmaceutycznym i wszystkich sektorach, w których występują niebezpieczne procesy, zapewniając zatrzymanie zanieczyszczających lub toksycznych mikrocząstek oraz ochronę operatora i otaczającego środowiska. Wykorzystywany jest również w zaawansowanych badaniach i nanonauce, zapobiegając rozprzestrzenianiu się i zanieczyszczeniu niepożądanych cząstek [1, 3-7].

Dry box przeznaczony jest do badań materiałów wrażliwych na wilgoć oraz powietrze. Jest on komorą suchą, wewnątrz której znajduje się wysuszony gaz obojętny, którym może być argon, hel lub azot z domieszką wodoru. Wodór ma za zadanie wyłapać atomy tlenu zanim znajdujące się we wnętrzu komory materiały wrażliwe utlenią się. Takie komory wyposażone są w czujniki stężenia tlenu oraz pary wodnej, aby jeszcze bardziej zapobiegać utlenianiu się materiałów. Niektóre mogą również posiadać czujniki, które kontrolują obecność gazów reaktywnych takich jak amoniak czy też chlor. Atmosfera wewnątrz powinna być poddawana częstej recyrkulacji pomiędzy filtrami tlenu, a filtrami pary wodnej, aby stworzyć obszar, którego właściwości będziemy mogli łatwo kontrolować. Przed rozpoczęciem pracy w komorze po wprowadzeniu potrzebnych nam elementów do śluzy należy najpierw kilkakrotnie odpompować i wypełnić ją atmosferą panującą w komorze, a następnie przełożyć elementy ze śluzy do środka komory używając przy tym gumowych rękawic. Znalazły również zastosowanie w pracy, która wymaga wysokiej sterylności lub badań związków wysoce reaktywnych. Ma to miejsce między innymi w farmaceutyce czy medycynie. [6,7].

Najczęściej komory rękawicowe wykorzystuje się przy produkcji przykładowo implantów, turbin odrzutowych, czy odlewów tytanowych. Dzięki zastosowaniu komór z atmosferą ochronną możliwe jest bezpieczne łączenie elementów w środowisku pozbawionym tlenu oraz wilgoci, które mogłyby negatywnie na nie wpłynąć [8].

Glove box znajduje zastosowanie w różnych dziedzinach, takich jak chemia, biologia, fizyka czy inżynieria materiałowa. Często jest niezbędny przy wykonywaniu eksperymentów w kontrolowanej atmosferze, manipulacji substancjami w sterylnej lub beztlenowej atmosferze.

Stosowany jest do ochrony przed niebezpiecznymi czynnikami chemicznymi czy też w celu zapewnienia czystości i uniknięcia wnikania zanieczyszczeń. Glove box wykorzystywany jest w pracach z substancjami czułymi na wilgoć lub tlen, przy produkcji materiałów bez zanieczyszczeń, bądź badań nad bateriami i ogniwami paliwowymi, przy manipulacji substancjami chemicznymi wymagającymi specjalnych warunków ochronnych oraz podczas eksperymentów prowadzonych w kontrolowanym środowisku [8,9].

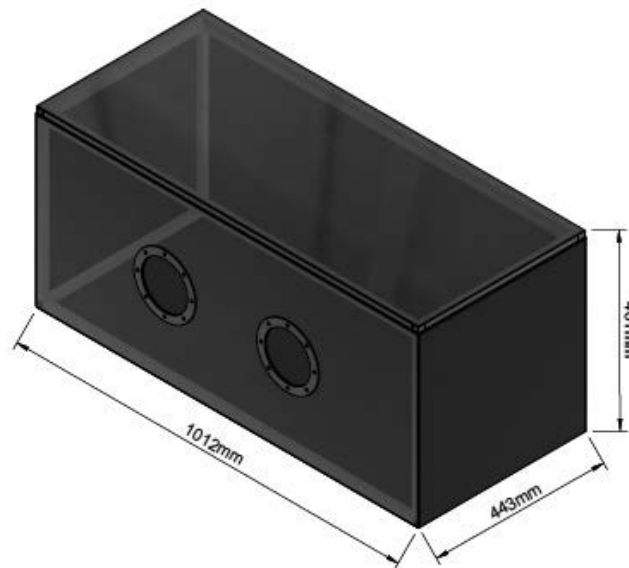
Komory rękawicowe typu glove box wykorzystywane są w celu przeprowadzenia wielu różnych procesów laboratoryjnych oraz produkcyjnych w kontrolowanej atmosferze, oddzielając badany obiekt od zewnętrznych czynników atmosferycznych, które mogą źle na niego wpływać. Są to materiały wrażliwe na wilgoć oraz utlenianie się, którymi są między innymi: lit, sód, potas, wapń, krzem, związki organiczne, nieorganiczne, różne folie, sprzęt medyczny, urządzenia elektroniczne, czy nawet aplikacje nuklearne. Komora do pracy z substancjami niebezpiecznymi przeznaczona jest głównie do badań materiałów, które mogą spowodować różne skażenia biologiczne, chemiczne lub nawet radioaktywne [9, 10].

Komory rękawicowe typu glove box można również ze sobą łączyć tworząc linie produkcyjne, które wykorzystywane są między innymi do produkcji baterii litowo-jonowych bądź litowo-polimerowych. Szczególnie należy pamiętać, że lit jest pierwiastkiem wysoce reaktywnym, dlatego ważne jest aby prace z nim odbywały się w kontrolowanych warunkach atmosferycznych aby wykluczyć możliwe niebezpieczeństwa [3,11].

W poniższej pracy został przedstawiony projekt wykonania komory rękawicowej typu glove box, który przeznaczony jest do kontaktu z pierwiastkami szybko utleniającymi się na powietrzu. W komorze z doprowadzonym gazem obojętnym – argonem, odważane są pierwiastki przeznaczone do syntezy odpowiednimi metodami.

2. MATERIAŁY I Dyskusja

Glove box w kształcie prostopadłościanu o wymiarach 1012x443x461 mm, został wykonany z bezbarwnych płyt polimetakrylanu metylu. Płyty z podanego tworzywa sztucznego zostały umieszczone w ramach stalowych. Otwory na rękawice ochronne zostały wycięte i zabezpieczone pierścieniami uszczelniającymi. Do przygotowania preparatów konieczna jest atmosfera argonu. Zatem ze względu na jego właściwości fizyczne (gęstość argonu jest większa od gęstości powietrza) komora jest otwierana od góry. Projekt izometryczny komory rękawicowej typu glove box przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Projekt izometryczny komory rękawicowej typu glove box

Figure 1. 3D glove box project

W komorze rękawicowej zamontowano wagę laboratoryjną. Rozwiązanie to pozwoli na odważanie pierwiastków silnie utleniających się w atmosferze powietrza, przeznaczonych m.in. do przygotowania materiałów potencjalnie wykorzystywanych w biomateriałach oraz do magazynowania wodoru.

BIBLIOGRAFIA

1. American Glovebox Society, Guideline for gloveboxes third edition (AGS-G001-2007)
2. Strona internetowa: <https://www.ossila.com/en-pl/pages/what-is-glove-box>
3. Strona internetowa: <https://hogerbox.com/>
4. Strona internetowa: <http://cheminst.com.pl/produkt/podkategoria/78/Typu-glove-box>
5. Strona internetowa: <https://www.jacomex.com/equipment/glove-box-hepa-filter/>
6. Norma EN 1822
7. Strona internetowa: <https://www.labconco.com/product/protector-filtered-glove-boxes/10>
8. Strona internetowa: <https://elektronikab2b.pl/technika/18458-komory-rekawicowe-podstawowe-elementy-konstrukcyjne-i-przykladowe-zastosowania>
9. Strona internetowa: <https://biospherix.com/xvivo-system-model-x3/>
10. Strona internetowa: <https://www.terrauniversal.com/glove-boxes-isolators.php>
11. Strona internetowa: <https://ehs.princeton.edu/laboratory-research/laboratory-safety/laboratory-equipment-and-engineering/glove-boxes>



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIAAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Optimization of VR performance by utilizing eye tracking for foveated rendering

D. Myszor^a, P. Bartosz^b, J. Sarno^b

^a Silesian University of Technology, Faculty of Automatic Control, Electronics and Computer Science, Department of Algorithmics and Software

^b Silesian University of Technology, Faculty of Automatic Control, Electronics and Computer Science, Virtual Flying Student Research Group, email: dariusz.myszor@polsl.pl

Abstract: The article presents research on utilizing built-in eye tracking to improve the performance of virtual reality headsets by foveated rendering.

Key Words: virtual reality, foveated rendering, eye tracking, performance optimization

1. INTRODUCTION

Recently SKN vFly acquired Pico 4 Enterprise VR headset with a lot of integrated features. One of those is an eye-tracking module capable of low latency tracking of the user gaze. It enables the application of foveated rendering which improves the quality of displayed VR content and reduces computational requirements. In addition, this feature is included in newly released headsets and it is official support by main VR standards like OpenXR. The goal of this article is to research the real capability in performance increase provided by this method.

2. PROJECT ASSUMPTIONS

To test the influence of foveated rendering on the performance of VR devices certain assumptions were made:

- All tests were done on the same hardware.
- All tests were done with the same software.
- All test scenarios were the same between test subjects.
- All tests were done in a safe controlled environment.
- The hardware chosen for tests should be easy to use and represent the commercially available devices well.
- All test subjects should be presented with all scenarios.

3. VIRTUAL REALITY HEADSET

VR (Virtual Reality) headset is a head-mounted device that provides virtual reality for the wearer, such devices are used in many industries as well as for entertainment purposes. Virtual reality is obtained by displaying the content on one or many screens located near the wearers'

eyes. Displayed content is provided through the lenses that help to focus the vision on the screen plane. Some headsets require an external system (computer with graphic card) to function and provide only some tracking and display capabilities, while others are self-contained providing processing power, memory, and battery packs thus allowing mobile use, but at the same time these systems usually have limited performance. Some recent VR headsets provide additional tracking capabilities, like eye tracking and face tracking to better immerse the user in the VR world. An example of such VR could be Pico 4 Enterprise, Oculus Pro or PlayStation VR 2.



Picture 1. Pico 4 Enterprise headset.

4. FOVEATED RENDERING

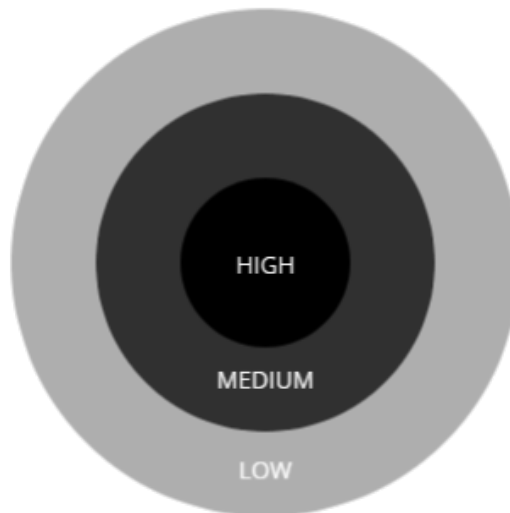
Foveated rendering is a special process used in devices (especially virtual reality ones) to improve performance. It is based on the way humans perceive the world. Human eyes have full acuity only in a tiny area in front of them, called gazed direction, the further from the center you go from it the less acute vision becomes [1]. Full acuity extends only around 2.6° from the gaze direction, by utilizing this fall-off in visual acuity and lowering the render resolution of the VR headset in conjunction with it, it is possible to achieve the same quality of the image but with much less computational power needed.

Foveated Rendering can be split into two categories:

1. Fixed Foveated Rendering - It works by rendering an image in full quality in the middle of the view or predetermined fixed point and then lowering resolution gradually from it creating more and more blurry output the further from the center you are. This can be implemented on any device as it does not need specialized additional hardware and can

improve performance by significant amounts. However, this method has massive drawbacks as it is fixed in point. If a person looks at any spot away from a predetermined one, the image is blurry, to mitigate this effect the device cannot lower the border resolution too much, therefore performance gain is limited in relation to the dynamic method. It is possible of course to predict or guide the gaze point by proper level design and adjusting the center of full resolution according to it.

2. Dynamic Foveated Rendering - Works by utilization of built-in eye tracking hardware, to read the gaze point of the user, and creation of a resolution gradient based on eye position. This allows for a much more aggressive falloff curve as well as a lower minimal resolution which maximizes possible gains in performance from this effect.



Picture 2. Foveated rendering quality scaling diagram.

5. PERFORMANCE METRIC

To measure the performance of a VR in our tests the number of rendered frames per second (fps) was used. The number of frames rendered per second on the headset is one of the most important metrics to judge performance because it directly influences user experience. Low framerate, or lack of framerate stability, may cause VR motion sickness and discomfort during the use of a VR headset. The number of displayed frames per second is not a valid metric, as it is capped by the refresh rate of the headset's screen. For that reason rendered frames per second make up a better metric as they represent the actual performance of the device. The rendered fps are also directly impacted by the tested methods as they focus on decreasing the number of pixels to be rendered in each frame.

6. TESTS

The tests were performed with Pico 4 Enterprise headset because it possessed the eye-tracking hardware and SDK required to test dynamic foveated rendering. The test scenarios were created in Unity engine, as it was an easily available engine supporting dynamic foveated rendering. The application was built and uploaded onto the VR headset that was used to run the tests.

All test subjects were tasked to play through four scenarios:

- Open Environment - Simple scene designed as an outdoor garden area at noon with several pieces of small architecture scattered around.
 - Static position - The user was placed in the middle of the garden fixed in place, and could only look around, but was not allowed to move.
 - Free movement - The user was spawned in the middle of the garden and was free to explore the surrounding area.
- Closed Environment - Simple scene designed as a middle-sized living room with some furniture next to the walls and an open area in the middle. All the windows were covered with blinds.
 - Static position - The user was placed in the middle of the living room fixed in place, and could only look around, but was not allowed to move.
 - Free movement - The user was spawned in the middle of the living room and was free to explore the entire room.

All of the scenarios were repeated by subjects three times, one for each tested setting:

- No foveated rendering - Base setting with no foveated rendering feature active.
- Fixed foveated rendering - Set to middle settings in SDK, the rest of the settings were on recommended values.
- Dynamic foveated rendering - All settings were set on recommended values.

These were the only differences in engine settings between each test.

All test scenarios lasted for exactly 5 minutes. During that time test subjects were tasked to look at certain elements of the scene for about half of the time, while the rest of the time they were allowed to freely explore the scenario.

During all of the scenarios, the performance of the headset was recorded into a log file for later analysis. Additionally, after each scenario subjects were asked about their experiences.

All of the test subjects were between ages 19 and 26 and had previous experience with VR and no motion sickness.

Each of the subjects was allowed to take breaks between scenarios, water was provided to test subjects during breaks.

7. RESULTS

Results of the test showed massive potential in both fixed and dynamic foveated rendering. Base scenarios which were the ones with no foveated rendering features activated both were stable in around 85 to 97 fps rendered. Fixed foveated rendering scenarios scored 51-74% improvement in rendered fps counts in comparison to base ones. Scenarios with dynamic foveated rendering active achieved a huge increase in rendered fps counts of about 312-340% improvement over the base.

In addition to that, interesting turned out to be the opinions of the test subjects. All of them reported basically no difference in image quality between dynamic and no foveated rendering, while the fixed foveated rendering was reportedly visibly worse, especially when looking to the side without turning the head. Intriguing there were no significant differences reported between

each setting when in motion, with the exception of slight discomfort in fixed foveated rendering while walking due to blurry ground while gazing down or head turning. This is most likely the result of behaviour during motion, where humans tend to move their eyes first, snapping onto points of interest, after which heads start to rotate. [2]

LITERATURE

1. Mohanto, Bipul, et al. "An integrative view of foveated rendering." *Computers & Graphics* 102 (2022): 474-501.
2. Chen, Po-Yin, et al. "Gaze shift dynamic visual acuity: A functional test of gaze stability that distinguishes unilateral vestibular hypofunction." *Journal of Vestibular Research* 31.1 (2021): 23-32.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Optimization of user experience ergonomics used in visual brain-computer interfaces

D. Myszor^a, P. Bartosz^b, J. Sarno^b, M. Wieczorek^b, M. Wola^c, K. Cichecka^d, M. Łoś^d, M. Polak^d, N. Krzywda^d

^a Silesian University of Technology, Faculty of Automatic Control, Electronics and Computer Science, Department of Algorithmics and Software

^b Silesian University of Technology, Faculty of Automatic Control, Electronics and Computer Science, Virtual Flying Student Research Group

^c Silesian University of Technology, Faculty of Automatic Control, Electronics and Computer Science, Virtual Flying Student Research Group

^d Silesian University of Technology, Faculty of Environmental and Energy Engineering, Virtual Flying Student Research Club, email: dariusz.myszor@polsl.pl

Abstract: The article presents research on ergonomics of different approaches for the creation of user interfaces used in conjunction with visual-based brain-computer interfaces utilized in the manipulation of objects in virtual space.

Key Words: Brain-Computer Interface, User experience, Input optimization, Neural

1. INTRODUCTION

As part of the research project realized under the IDUB - "Inicjatywa Doskonałości - Uczelnia Badawcza" project, students designed and tested several user interface concepts for the usage with NextMind BCI. The goal of the project was to find the optimal design for the manipulation of objects in virtual space. To achieve this goal several specialized testing systems were created and used to validate different approaches rigorously. The test subjects' group was composed mostly of students from the research team. Tests were repeated multiple times to ensure that proper data was gathered. This testing campaign resulted in seven UI configurations, distinguished by multiple settings variations.



Figure 1. The team discussing testing results after the experiment.

2. PROJECT ASSUMPTIONS

To test different approaches, for the creation of user interfaces, certain assumptions were made:

- All tests should be done with similar hardware
- Test scenarios should differ only in the user interface, the goals of scenarios should not differ between them
- The most important metric is the ease of use of each interface, it can be measured by how quickly a test subject can complete a scenario with a given user interface
- The scenarios should be compared to a base scenario with the most basic user interface
- The test subjects should be presented with all scenarios in random order so that familiarity with a system does not influence obtained results
- The hardware chosen for tests should be easy to use and represent the commercially available devices well

3. VISUAL-BASED BRAIN-COMPUTER INTERFACE

EEG (electroencephalograph) is a device utilized in the field of bioinformatics research, for the purpose of capturing and analyzing the bioelectrical activity of the brain. In the developed interfaces, SSVEP (Steady-State Visual Evoked Potentials) phenomenon was applied. This is one of the most practical types of brain stimulation in this type of device. Using these signals, the EEG device captures the bioelectrical signal of the visual cortex of the brain, which tunes to the blinking frequency of the given object on which the subject focuses his gaze. Out of commercially available devices, the “Next Mind” interface was chosen, because of its simple design, ease of use and very good integration with the Unity engine. The exploitation of this device allowed for the quick creation of a test application and facilitated the gathering of the data.

4. USER INTERFACES

For the tests seven user interfaces were created. Three of them were designed to test different approaches for the creation of brain-computer interface-based applications UI. The rest were created as slight variations to test how small changes influence the ergonomics and usability of an interface. The goal of the user was to move the virtual object to its target location. Control over virtual object movement was obtained by gazing at controlling components displayed on the UI.

User interface designs:

- Screen border interface - interfaces in which the whole screen was surrounded by a frame of flashing objects. The main variation was the controlling object's shape and how they fill the corners of the screen:
 - Rectangular - chosen as a baseline interface
 - Trapezoidal

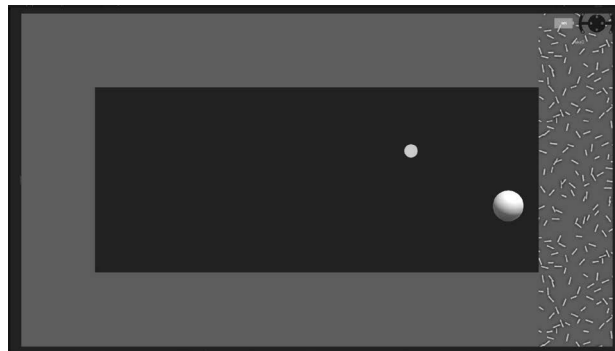


Figure 2. Example of rectangular screen border interface.

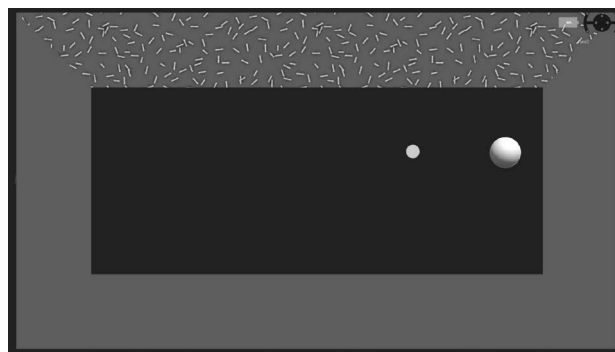


Figure 3. Example of trapezoidal screen border interface.

Edge screen buttons - interfaces with smaller flashing objects located in cardinal directions. The main variation was the shape of the objects, as well as their dimensionality:

- Squares
- Circles
- Spheres

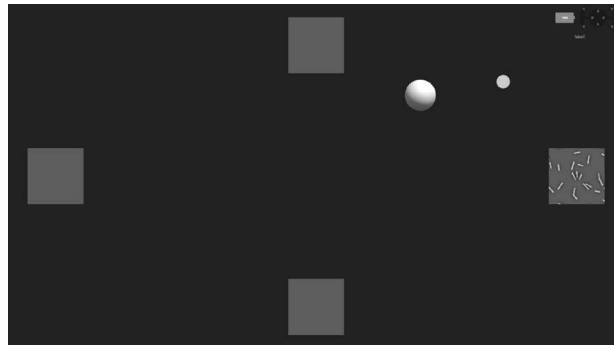


Figure 4. Example of edge screen squares interface.

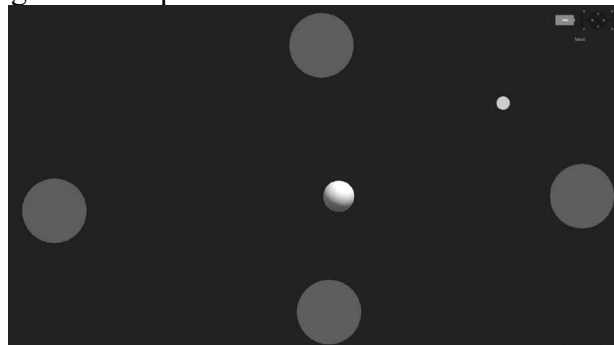


Figure 5. Example of edge screen circles interface.

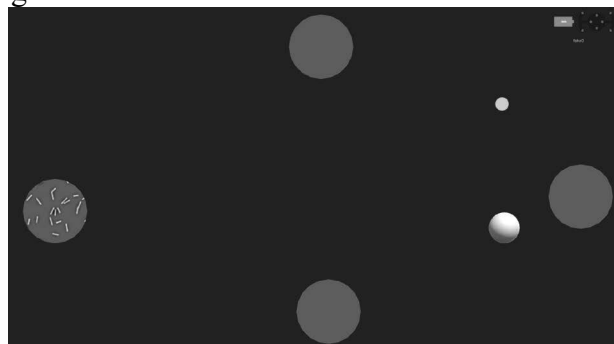


Figure 6. Example of edge screen spheres interface.

- Buttons following controlled object - interfaces with smaller flashing objects located around the manipulated object and programmed to follow it. The main variation was the shape of the objects:
 - Squares
 - Arrows

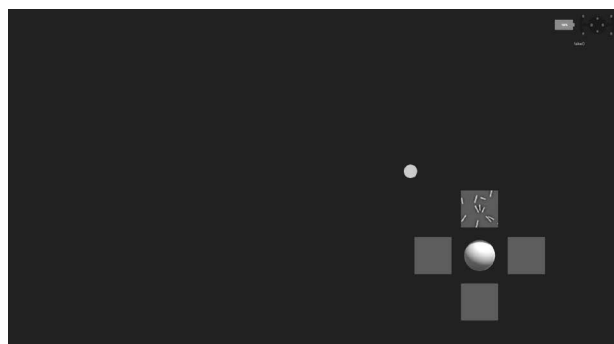


Figure 7. Example of following squares interfaces.

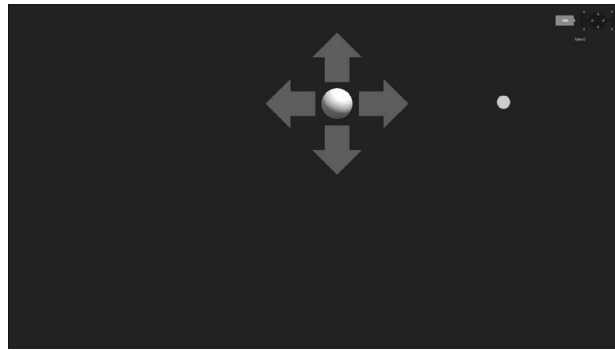


Figure 8. Example of following arrow interfaces.

5. ERGONOMY METRICS

The main metric, for the UI quality assessment, was the time required to complete the test scenario. As the primary focus of the research was put on the ergonomics and usability of the interfaces created for the purpose of object manipulation, using this metric allows for easy and reliable comparison of user data while showing how easy the UI is to use in intended tasks.

Additionally, time spent moving the object in the wrong direction was used as a secondary metric. This shows if the interface was hard to control or understand. For results with longer scenario completion time, low values obtained on the secondary metric mean the UI was very unresponsive, while higher values obtained at the secondary metric mean the UI was responsive but hard to control.

6. TEST ENVIRONMENT AND SUBJECTS

To ensure testing produces reliable and replicable data, the team designed both test scenarios and prepared proper adequate testing areas as well as the equipment. This attention to detail resulted in stable and consistent results between sessions for the same test subjects.

6.1. Test bench

To ensure minimal external interference all data were collected in the same controlled environment. All experiments were conducted at SUT Virtual Flight Laboratory, which is equipped with special dividers allowing for the separation of the testing area and improving the soundproofing of the test space. As a benefit, the room had windows installed that overlooked the corridor allowing for observation of ongoing experiments without interference.

For all tests, the same computer set was used to ensure data differences were the results of researched changes, not the hardware configuration.



Figure 9. Student undertaking one of the testing scenarios

It is worth noting that the external stimuli, such as conversation or changes in lighting, didn't influence the operation of the NextMind interface, thanks to the built-in filtering algorithms and limiting the measurement to the detection of specific waves and patterns. NextMind, however, has proven to be very sensitive to Bluetooth connection quality, requiring a stable and fast Bluetooth 5 connection to function properly. In order to reduce the impact of these factors on the research, it was decided to take additional measures to isolate the participant and to select equipment with an appropriate built-in bluetooth module.

6.2. Test design

All tests were performed on the same base scenario, in which the subject was tasked to move one sphere to the specified location three times in a row. This base scenario was performed with different settings and UI configurations in a random order for each test subject. In addition to that, subjects did this test campaign multiple times. During each test campaign subjects were allowed to take breaks between each test to relax and rest.

6.3. Test subjects

Group of subjects for the experiment consisted mostly of research team members and a couple of student volunteers interested in research from biotechnology majors. This resulted in the involvement of around a dozen test subjects allowing for acquiring a variety of useful and interesting data. In addition, two people from the test group are neurodivergent, resulting in very interesting data however, they were too little of a sample to result in proper research in that instance, but still showed potential for further research into the topic. Unfortunately, the group distribution limited gathered data mostly to the 18-26 age group, leaving possibilities to expand research in the future.

7. TEST RESULTS

As a result of the performed research, a complete set of data from the test campaign was obtained on the NextMind device. During these experiments, two categories of data were collected:

- Scenario pass time:

This metric measures the time required to complete a single scenario (from connecting the interface with the scenario environment, to reaching the final point with the controlled object).

Below results have been divided by scenarios

- Rectangular Frame Interface - A basic scenario - buttons had the form of rectangles adjacent to the edges of the screen, occupying the entire edges. The results from this scenario were taken as a benchmark for the other scenarios.
- Trapezoidal Frame Interface - Similar to the base scenario, but the buttons were trapezoid-shaped so that each edge of the screen was fully covered by the same button. On average, this scenario took 2% longer than the base scenario, so it can be assumed that this shape did not affect the results.
- Circle Edge Interface - In this scenario, the buttons were placed on the edges and they were shaped like flat circles. On average, it took 27% longer than the base scenario.
- Spherical Edge Interface - Same as above, but the buttons were 3D spheres, which meant that the pattern used in the SSVEP technique was curved in perspective. On average, 10% longer than the base scenario.
- Square Edge Interface - Same as Circle Edge Interface, but with squares instead of circles. On average 50% longer than the test scenario.
- Square Follower Interface - Same as the above scenario, but buttons were placed near the sphere and moved with it, 219% longer on average than the base scenario.
- Arrow Follower Interface - Arrow buttons were attached to the sphere and they followed the sphere. On average 185% longer than the base scenario.

From the above data, it can be concluded that interfaces with the most separated elements (edge and frame interfaces) work best. At the same time, it is a very bad approach to create interface elements attached to the moved objects. Additionally, square UI elements produced consistently worse results than other shapes.

- Mismaneuver time:

This metric measured the time the user spent during the test manoeuvring the sphere in the wrong direction - moving away from the target point.

The times measured in this category were relatively small compared to the scenario run time. The average scenario time was between 44 and 145 seconds, while the average manoeuvre times were between 1.36 and 1.52 seconds. The lowest values were achieved by scenarios with a spherical and circular edge interface. Their values were often lower than 0.70 seconds, from which it can be concluded that they are characterized by greater accuracy.

In addition, one member of the research group was diagnosed with autism and ADHD, which significantly worsened his performance in all scenarios compared to the rest of the research

participants. While this is too small of a sample to obtain credible and reliable data, it suggests an interesting relationship that can be investigated further.

The research group was in the age range of 18-26 and evenly divided between both sexes. It would be beneficial to expand this group in future studies in order to fully validate the collected data in terms of the influence of age.

LITERATURE

1. Nguyen, Trung-Hau, and Wan-Young Chung. "A single-channel SSVEP-based BCI speller using deep learning." *IEEE Access* 7 (2018): 1752-1763.
2. Ishizuka, Kazumi, Nobuaki Kobayashi, and Ken Saito. "High accuracy and short delay 1ch-ssvep quadcopter-BMI using deep learning." *Journal of Robotics and Mechatronics* 32.4 (2020): 738-744.
3. Ingel, Anti, and Raul Vicente. "Information Bottleneck as Optimisation Method for SSVEP-Based BCI." *Frontiers in Human Neuroscience* 15 (2021): 675091.
4. Cieszyński, Łukasz. "Generowanie stymulacji świetlnych za pomocą diody LED na potrzeby interfejsu mózg-komputer." *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki i Informatyki Politechniki Koszalińskiej* 10 (2016): 225-235.
5. Zawisłak, Tomasz. "Sposoby generowania stymulacji wywołujących SSVEP z zastosowaniem monitorów LCD." *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki i Informatyki Politechniki Koszalińskiej* 11 (2017): 123-131.
6. Siribunyaphat, Nannaphat, and Yunyong Punsawad. "Steady-State Visual Evoked Potential-Based Brain-Computer Interface Using a Novel Visual Stimulus with Quick Response (QR) Code Pattern." *Sensors* 22.4 (2022): 1439.
7. Robben, Arne, et al. "Combining object detection and brain computer interfacing: Towards a new way of subject-environment interaction." *2011 IEEE International Workshop on Machine Learning for Signal Processing*. IEEE, 2011.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Design of a multi-purpose automatic unmanned aerial vehicle

D. Myszor ^a, W. Cofalik ^b, P. Mondry ^b, V. Morawiec ^b, P. Karski ^b

^a Silesian University of Technology, Faculty of Automatic Control, Electronics and Computer Science, Department of Algorithmics and Software.

^b Silesian University of Technology, Virtual Flying Student Research Club, e-mail: dariusz.myszor@polsl.pl

Abstract: The article presents the BSP design process, a brief description of the construction assumptions and technologies used during platform design. In addition, the exploited flight controller, its functions and software managing automatic functions are presented.

Keywords: UAV, design, feasibility study

1. INTRODUCTION

As part of the PBL project entitled "Design and implementation of a multi-purpose Automatic Unmanned Aerial Vehicle", an airframe model was designed to integrate it with the PixHawk (PX) flight controller. The PixHawk controller utilized Ardupilot software. The mission planning software is a community-developed OpenSource project. Ardupilot cooperates with various flight controllers such as the aforementioned Pixhawk. Its advantage is the ability to integrate with any type of unmanned model. In addition, it is possible to test the programmed route in the X-PLANE 11 flight simulator.

The project itself is developmental. In the first stage, it is planned to create a simple and cheap flying platform and integrate it with a flight controller, that will allow to programming the route. After testing the platform, it will be possible to draw conclusions and introduce possible changes in the airframe structure and the flight control software itself.

2. FEASIBILITY

2.1. Trend analysis

Trend analysis allows for defining the basic requirements of the structure when they are not predetermined [1, 10]. Six competitive micro-class unmanned aerial vehicles were selected to conduct the trend analysis. Among the many technical parameters describing these constructions, several basic ones were selected. It is worth mentioning, that one must be careful when setting

targets for each parameter, as an attempt to complete them may result in failure of the entire project. Table 1 summarises the basic technical parameters of selected UAVs, where L – wingspan; m – mass; d – length; W/S – load on the bearing surface; Vmin – minimum speed; t – maximum flight time.

Table 1. Basic technical parameters of selected UAVs

BSP	L [m]	m [kg]	d[m]	W/S [-]	Vmin [ms]	T [min]
UAS hummingbird	1,96	5,5	1,073	-	~12	150
Lockheed Martin Desert Hawk III	1,32	3,86	-	13,3	~15.5	90
Multiplex BK TwinStar ND	1,42	1,5	0,750	31	-	10
AeroVironment RQ- 14A Dragon Eye	1,14	2,7	0,910	-	~18	45-60
RQ-11B Raven	1,37	1,9	-	7.9	~13	60-90
Switchblade 600	-	22,7	1,300	-	~31	40

2.2 Design assumptions

The trends analysis made it possible to formulate the basic design assumptions:

- Planned performance and functionality: cruising altitude up to 120 m AGL (Above the Ground Level); cruising speed 70 km/h; stall speed 36 km/h; a rate of climb of not less than 5 m/s; maximum weight 2 kg; live camera video transmission; transmission of current flight parameters using the telemetry module; the possibility of automatic take-off and landing.
- Construction assumptions: simple construction; low manufacturing and operating costs; simple operation; susceptibility to modifications in order to implement additional measuring equipment

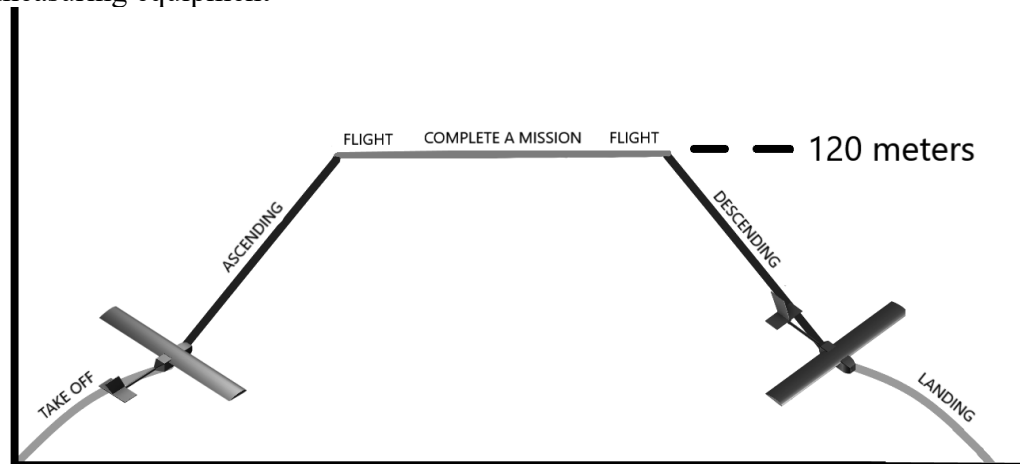


Figure 1. Example of mission profile

2.3 Constructional solutions:

Wing: the constructional material of wings should be easy to process and durable. In addition, the cost of making such a wing should be as low as possible. Such properties have XPS foam (extruded polystyrene), the manufacturer states that the compressive stress strength is 300 kPa. Choosing a trapezoidal contour seems to be the best solution because it introduces a compromise between aerodynamic properties and construction technology. A trapezoidal contour has the closest aerodynamic properties to an elliptical contour, and it does not require advanced tools. The trapezoidal contour is also advantageous in terms of strength, as it has a thick base in relation to the thin wing tip [8]. The point of application of the resultant lift force of each wing is close to the plane of symmetry of the airframe, which means a decrease in loads caused by the bending moment of the wings.

Hull: in order to minimize costs and simplify the construction very strongly, the hull will consist of two pipes. In the front part of the airframe, where the avionics will be located, the fuselage will be made of PVC pipe cut to the appropriate length, while the tail part will be a CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) pipe. Elements of the fuselage and tail will be connected to each other using 3D printing.

Control and propulsion: the drone will use control surfaces in the form of: ailerons on the tips of the wings, elevator and rudder on the rear tail. The rear tail will exploit a classic layout. Constructed UAV will not use flaps nor spoilers, this is due to the low aerodynamic excellence of the designed UAV [1]. A brushless electric motor with a pulling propeller will be used as a drive source. The power unit will be placed in the front part of the fuselage.

3. POWER SUPPLING SYSTEM

Battery pack (Figure 2) will be made of 4s1p made of Sony US18650VTC4 cells dot-welded with an 8mm x 0.2mm nickel plate. Two such packages connected in parallel to obtain greater capacitance and discharge current were used to power the UAV. Below (table 2) are the specifications of the cells given by the manufacturer and the parameters of the packages [7].

Table 2. Manufacturer's cell parameters and package parameters

Accumulator	1x18650 Sony	4s1p	2x 4s1p
Voltage [V]	3.7	14.8	14.8
Max current [A]	30	30	60
Capacity [Ah]	2.1	2.1	4.2
Capacity [Wh]	7.77	31.08	62.16
Weight [g]	45	208	416



Figure 2. Battery pack made of Sony US18650VTC4 cells

4. DRIVE SYSTEM

The drive system will consist of the components shown below:

- The Kavan 3530 1400 kv electric motor combined with the Aeronaut CamCarbon 9.5x5 propeller allows for creating the thrust needed to take off from the ground and fly the model.
- ESC (Electronic Speed Controller) Kavan 50 A, 3-6 S controls the engine speed and allows to transfer the power from the battery.

Placing the powertrain at the front of the model will make it easier to cool the engine.

Thanks to the use of the above-mentioned components and calculations, the parameters summarised in (Table 3) were achieved:

Table 3, Calculated drive system performance

Parameter	Value
Static thrust	1947 g
Optimal electrical power	273.4 Watts
Engine efficiency	85 %
Propeller speed	98 km/h
Revolutions max.	12,800 min ⁻¹
Approximate flight time	15 mins

5. WING LOBE

Choosing the right profile of the wing is an important step in the design of any aircraft. The multitude of available profiles allows one to choose a profile with properties that will meet the assumptions of a given structure. For this project, the Clarc-Y profile was selected [2]. This is a profile that can be used for flows with low Reynolds numbers. The profile has moderate stall characteristics, which facilitates piloting and obtainment of large angles of attack.

Airfoil data: span 1700 mm; bearing area 0.32 dm²; wing extension $\lambda = 5.3$; wing taper = $\frac{l_K}{l_N} 0.72$ [1, 10].

The elements that reinforce the wing are aluminium pipe glued in the centre wing. Girder strips, utilized in the construction, will be made of pine wood. On the leading and trailing edges, balsa slats will be pasted and polished to the shape of the profile. These elements will be responsible for transmitting the bending moment of the wing. The twisting forces of the wing will be transmitted through a caisson made of glass-resin laminate.

Performance characteristics: was based on the performance calculations, results are presented in

Table 3. Calculated performance characteristics for the accepted drone wing data

Stall speed	32 km/h
Rate of climb	9 m/s
Top speed	88 km/h
Wing load	47 g/dm ²

6. CONTROL SYSTEM

Pixhawk and its hardware:

- The main Pixhawk processor is STM32F427VIT6 with an ARM Cortex-M4 core, 2MB of Flash memory and 256kB of RAM. It supports USB communication and manages input and output ports. The board is also equipped with an accelerometer and magnetometer.
- The telemetry module is based on ESP-07 with ESP8266 chip with 4MB of flash memory. The MAVESP8266 firmware has been uploaded to the board, that allows communication with Pixhawk via the UART interface using the MAVLink2 protocol [4].
- The mini OSD module managed by MVOSD software allows overlaying of flight parameters on the image from the camera. Communication with Pixhawk takes place via UART and MAVLink1 protocol.
- GPS module UBLOX NEO-M8N is responsible for determining the geographical location during the mission, it communicates via UART. The internal magnetometer communicates via I2C bus.
- Futaba T10J transmitter allows the user to remotely control the UAV. In the airframe there is a Futaba R2001SB receiver connected to PX via SBUS.
- The video transmitter transmits the image from the airframe camera, enabling a live view of flight parameters.
- The power module is responsible for measuring the battery voltage and current consumed by the equipment.
- 9g servos responsible for controlling the ailerons, rudder and altitude.

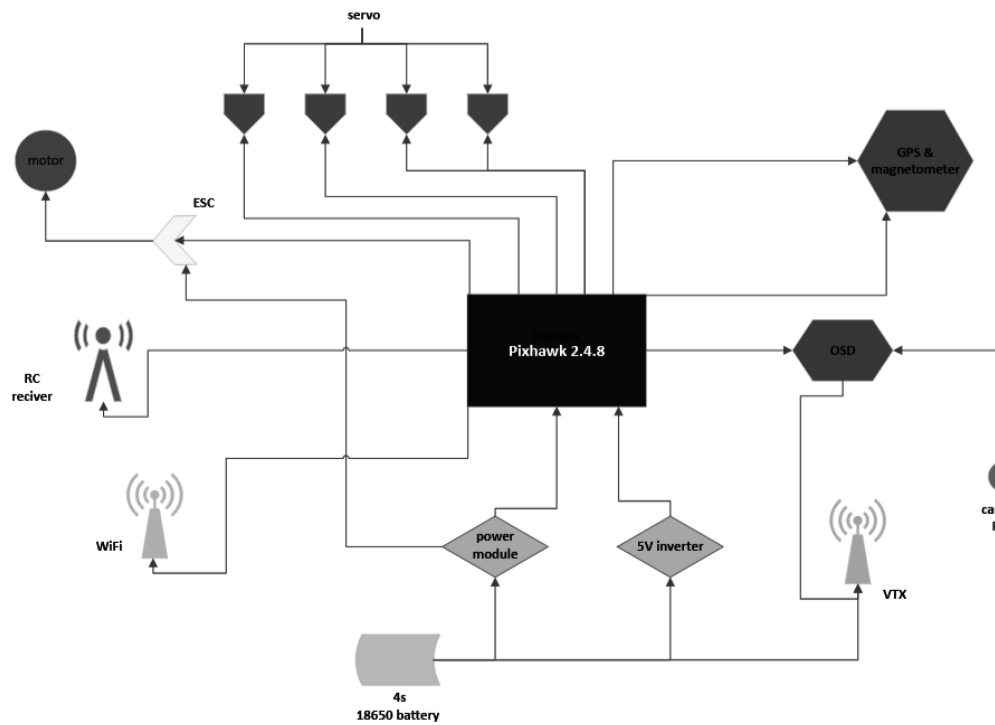


Figure 3. Schematic arrangement of avionics system UAV



Figure 4. Ardupilot mission sample plan

7. PROJECT

In order to visualize and construct the unmanned aircraft, the model was developed in Autodesk Inventor (Figure 5). In order, for the model, to maintain stability and balance during the flight, calculations were made to approximate the size of the rear tail, its volumetric characteristics and other geometric dimensions. A necessary condition for an aircraft to be in equilibrium is that the sum of all moments and the forces which act on the aircraft are equal to zero [1]. Figure 6 shows a dimensioned airframe model.

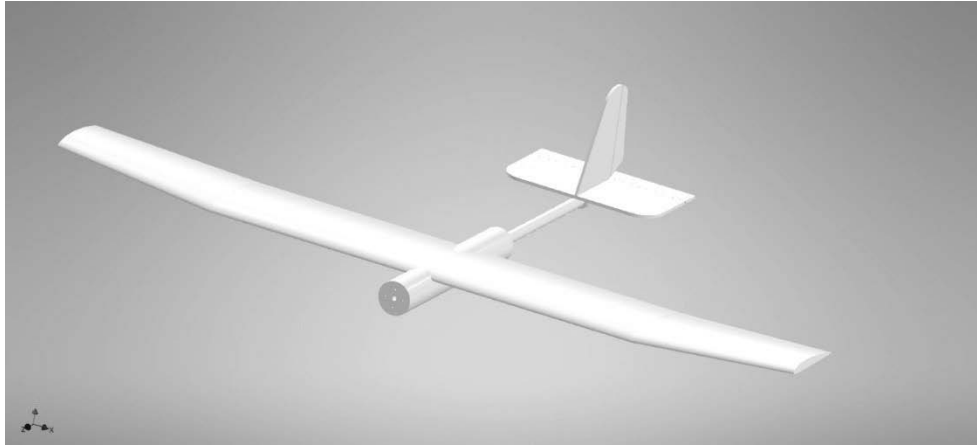


Figure 5. UAV visualization

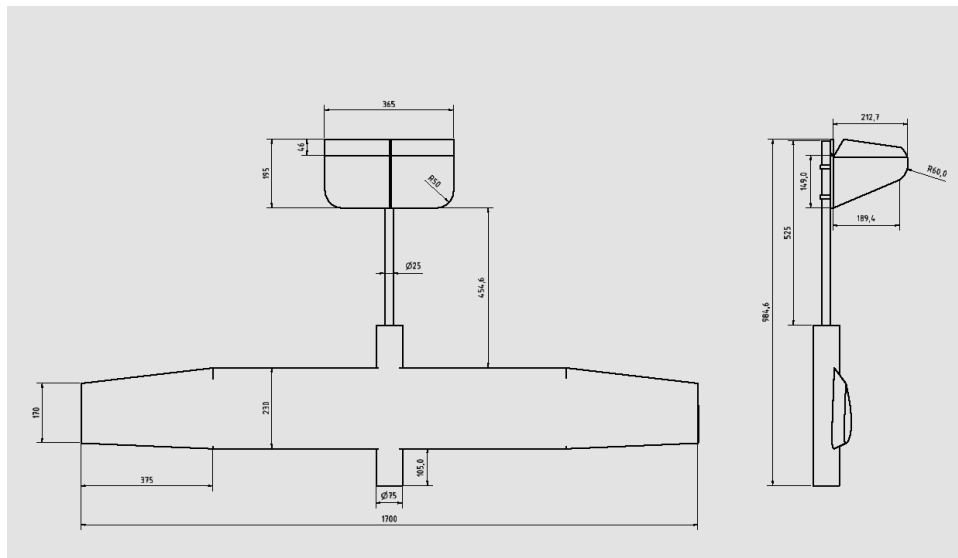


Figure 6. Drawing showing general geometric dimensions

8. SUMMARY

The article describes the process of designing an unmanned aerial vehicle. All stages of prototype airframe designing, starting from the analysis of trends, the formulation of basic design assumptions, and the selection of appropriate technologies as well as components that meet the technical and economic assumptions of the project, were presented. The work and analyses

carried out during the design process made it possible to build a UAV, compliant with the standards of establishment, which will ensure the correctness of the pilotage. The applied technologies and materials will reduce the cost of producing a prototype.

REFERENCES

1. Galiński, Cezary. Wybrane zagadnienia projektowania samolotów. Wydawnictwa Naukowe Instytutu Lotnictwa, 2016.
2. <http://airfoiltools.com/> [dostęp 31.05.2023]
3. <http://airfoiltools.com/> [dostęp 31.05.2023]
4. <http://www.mwosd.com/>, [dostęp 31.05.2023]
<https://rays-blog.de/2016/10/21/224/adding-wi-fi-telemetry-to-pixhawk-flight-controller-with-esp8266-module/>, [dostęp 31.05.2023]
5. <https://ardupilot.org/>, [dostęp 31.05.2023]
6. <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/882052/STMICROELECTRONICS/STM32F427VIT6/1950/1/STM32F427VIT6.html>, [dostęp 31.05.2023]
7. <https://www.powerstream.com/p/us18650vtc4.pdf>, [dostęp 31.05.2023]
8. M. Imiołek, W stronę dronów, czyli kilka słów o Projektowaniu Bezzałogowych Samolotów, Kraków 2020
9. R. Austin, Unnamed Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment, John Wiley and Sons Ltd. 2010
10. S. Danielecki, Projektowanie Samolotów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Numerical research of gear-lever of the planetary drive mechanisms of basic needles of warp knitting machines with the use of the software environment PRANS-PK

V. Neimak^a, O. Polishchuk^b, T. Romanets^c, M. Bonek^d

^a Khmelnytskyi National University, Faculty of Engineering Mechanics, Khmelnytskyi, Ukraine, email: nejmakvit@gmail.com

^b Khmelnytskyi National University, Faculty of Engineering Mechanics, Khmelnytskyi, Ukraine, email: opolishchuk71@gmail.com

^c Khmelnytskyi National University, Faculty of Engineering Mechanics, Khmelnytskyi, Ukraine, email: tromanec@gmail.com

^d Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials, Gliwice, Poland email: mirosław.bonek@polsl.pl

Abstract: gear-lever mechanisms are among the most promising for the creation of modern machines and devices. But the dynamics of these mechanisms on frequency of circulation (over 1500 rotations per minute) in modern warp knitting machine hasn't been investigated yet. The availability of unbalanced masses on such frequencies of circulation leads to substantial loading on a shaft and a mechanism holder

The article presents the results of numerical research of gear-lever of the planetary drive mechanisms of basic needles of warp knitting machines. A model is developed for determining the kinetic and kinetostatic characteristics of the proposed mechanism. Software PRANS-PK is used for numerical research.

Keywords: gear-lever of the planetary mechanism, numerical research.

1. INTRODUCTION

In the laboratory of the Department of Machines and Apparatus of the Khmelnytskyi National University, one- and two-stage gear-lever planetary mechanisms for driving the working bodies of warp-knitting machines (WKM) were developed.

Works [1,2] proved the possibility of using gear-lever mechanisms as a drive for warp knitting machines based on satellite curves that are able to reproduce these mechanisms. However, the dynamics of these mechanisms at rotation frequencies at which modern warp knitting machines operate - more than 1500 rpm - have not been studied. At such rotation frequencies, the presence of unbalanced masses leads to significant dynamic loads on the shafts and supports of the mechanism. Unbalanced forces, variable in magnitude and direction, can cause vibration of both individual links and the entire mechanism as a whole, and the largest

vibrations are caused by the inertial forces of rotating masses and reciprocating masses. In work [3], possible balancing options were analyzed and a number of measures were taken for this purpose.

2. OBJECTS AND METHODS OF RESEARCH

The next stage is the study of the dynamic loads of gear-lever planetary mechanisms, in particular, the determination of the reactions in the supports that occur during movement. Determination and analysis of dynamic characteristics of gear-lever planetary mechanisms will make it possible to compare them with other mechanisms used as WKM drives, to develop and test methods for reducing dynamic loads.

The diagram of a single-stage gear-lever planetary mechanism is shown in Fig. 1.

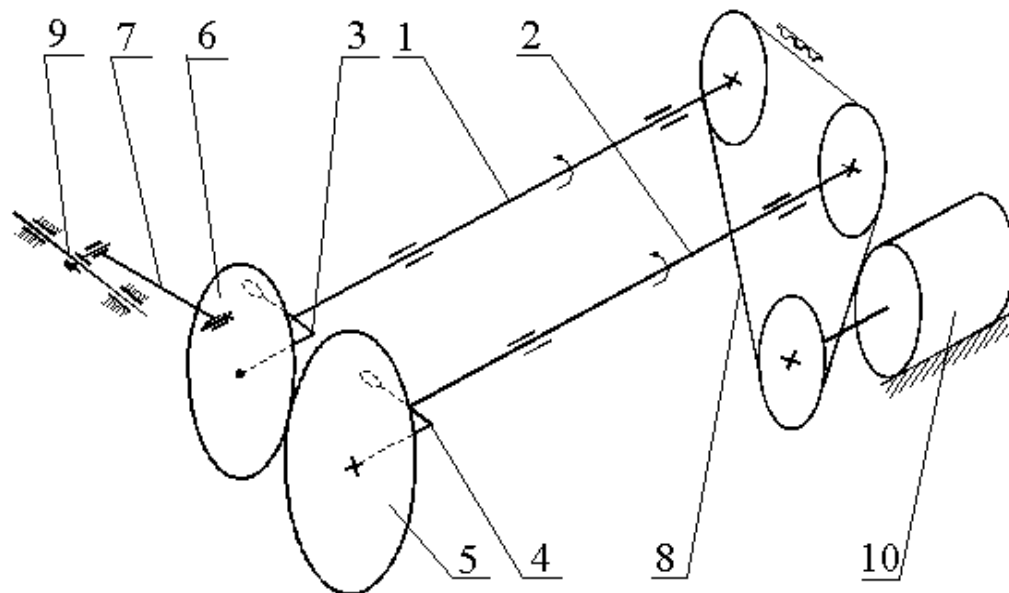


Figure 1 - Gear-lever planetary mechanism: 1,2 – shafts, 3,4 – cranks, 5 – central wheel, 6 – satellite, 7 – connecting rod, 8 – toothed belt transmission, 9 – slider, 10 – engine

In the field of automation of the design of drives and dynamic systems, which consist of electronic control systems, electrohydraulic and hydraulic amplifiers, electric, hydraulic or pneumatic motors, mechanical gears and mechanisms, transmissions, the PRANS-PK system developed at the National Technical University of Ukraine "Kyiv" is widely used Polytechnic Institute of Ukraine named after Ihor Sikorsky". The advantages of the system in comparison with domestic and foreign analogues are the possibility of automated execution of the entire complex of works of the circuit and technical stage of designing dynamic systems with elements that differ in physical composition.

There is a well-known technique of kinematic analysis using PC, which consists in determining the positions of all hinges depending on the movement of the driving links [4]. The calculation is carried out with the help of geometric dependencies, original for each mechanism. At the same time, ambiguities arise, which are related to the definition of the sign before the square root, the number of the quadrant of the angle, etc. Such ambiguities make it

much more difficult to compile a solution algorithm. In fact, it is necessary to compile a time-consuming program for each mechanism.

The method of dynamic and kinematic analysis of some planar mechanisms, which is used by the developers of the PRANS-PK package [5], is based on the same principle. Several of the simplest mechanisms are considered as transmitting two generalized variables: speed and power (speed and force, angular velocity and moment). These variables are connected by the same geometrical dependencies. The dynamic influence of the intermediate links of the mechanism is proposed to be taken into account by reducing their masses to the input and output links, which reduces the accuracy of the analysis. In addition, when using this technique, it is impossible to estimate the internal dynamic parameters of the mechanism, for example, the forces in the hinges, the relative speed of rotation of the links, which are important to take into account, especially when analyzing high-speed mechanisms [4].

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

A well-known analysis technique is based on the description of the hinge-lever link as a solid body with mass m and moment of inertia J [5].

The positions of the hinges are given by vectors from the center of mass of the link. An example of a link model of a planar mechanism is shown in Fig. 2.

Marked: CM - center of mass, 1,2 – hinges, \bar{L}_i – position vector of the i -th joint relative to the center of mass, \bar{F}_i – force vector from the i -th joint, \bar{V}_i – velocity vector of the i -th joint, ω – angular velocity of rotation, M – driving torque.

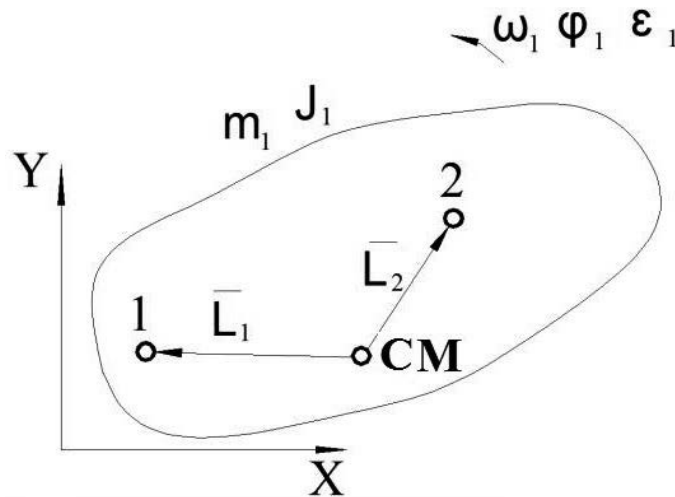


Figure 2 - Physical model of a two-hinged link: CM - center of mass, 1,2 – hinges, \bar{L}_i – position vector of the i -th joint relative to the center of mass, \bar{F}_i – force vector from the i -th joint, \bar{V}_i – velocity vector of the i -th joint, ω – angular velocity of rotation, M – driving torque

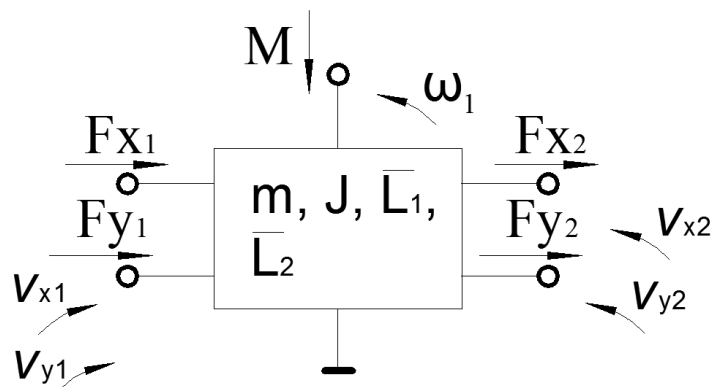


Figure 3 - Electric model of a two-hinged link

The movement of the link as a solid body under the action of the forces in the hinges and the moment is described by the equations of motion of the center of mass after bringing all forces to this center and rotating the link around the center of mass:

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^{i=3} F_{iX} &= m \cdot \frac{dV_{X...M}}{dt}, \\
 \sum_{i=1}^{i=3} F_{iY} &= m \cdot \frac{dV_{Y...M}}{dt}, \\
 \sum_{i=1}^{i=3} M_{Fi...M} + M &= J \cdot \frac{d\omega}{dt}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

The package of application programs PRANS-PK allows you to make a universal model of such a body, which requires only the length L of the hinge vectors and the initial values of the angles α between them and the coordinate axes, the mass and the moment of inertia of the link to be specified. The scheme of replacing the model is shown in fig. 3.

A technique based on modeling the movement of mechanism links as separate solid bodies in the plane of the axes $X-Y$ in time under the action of reactions in the hinges is proposed. Each link is represented in the mechanism model using a typical electrical model. The connection of links with hinges corresponds to the electrical connection of typical models of links with corresponding electrical terminals (poles). A special pole that models the riser as a mechanism link is called the base and its electric potential is zero. The potential of each of the poles of the links relative to the base is equal to the speed of movement of the corresponding hinge relative to the riser along the axis X or axis Y . The electric current between the connected poles of two links corresponds to the force of interaction of these links along the same axes. Some features of the use of such electric models of links as components of a flat mechanism are proposed.

The calculation of the model on a computer is based on Kirchhoff's laws, in which the sum of the currents to the node and the sum of the voltage drops along the closed electric circuit are equal to zero. In the methodology, the link model contains dependent voltage sources in the chains of motion along the axes $X-Y$ and dependent current sources in the chains of rotary motion. Dependence of sources means the constant calculation of the values of these sources according to certain strict and correct formulas. Closing electric circuits as models of links with

so-called of academic science fully corresponds to the closure of the circuit of the mechanism by separate links. However, due to inaccuracies in the calculations of dependent sources, Kirchhoff's laws are performed with a certain accuracy and the equality of the sums of variables to zero is not achieved.

For these reasons, it is suggested that when connecting models of links into a single electric circuit, at least one connection should be made through a dependent current source (not voltage), the voltage of which will make it possible to obtain a zero sum of voltages and currents. For the stiffness of such a connection with the so-called mechanics, such a source of current (force) can be defined as the force of elastic-plastic contact between two metal surfaces. This force acts on two surfaces with a significant force when the speeds and positions of both surfaces are different. For such modeling, there are special elements in the PRANS-PK, which are reflected by the corresponding current sources.

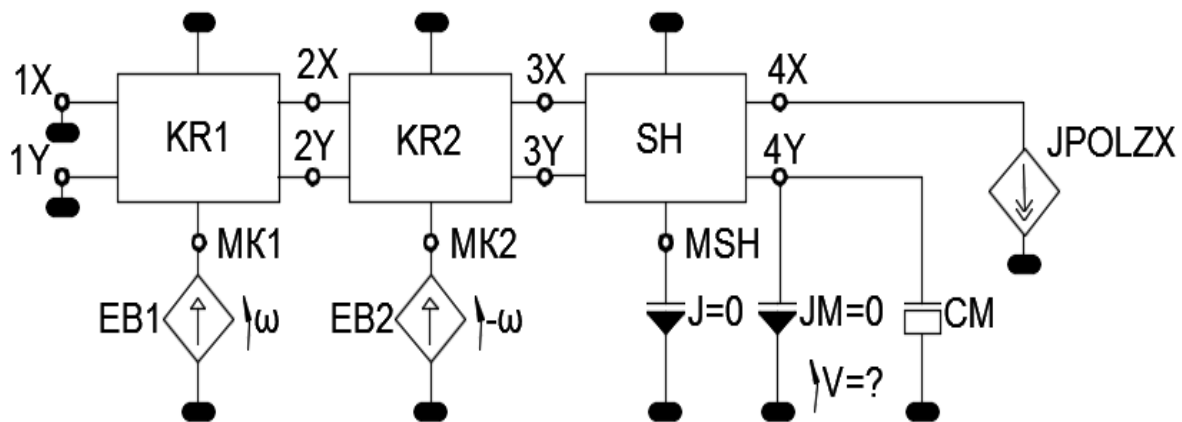


Figure 4 - Scheme of replacement of the gear-lever planetary mechanism for driving groove needles of warp knitting machines

Marked: EB1 – source of angular velocity of crank KR1; MK1 is a node, the voltage on which is equal to the angular speed of rotation of the crank KR1; 1X, 1Y – speed nodes of the crank support KR1 along the X and Y axes (the voltage on them is equal to 0); KR1 – KR1 crank link model; 2X, 2Y – speed nodes of hinge 2; KR2 – KR2 crank link model; EB1 – the source of the angular velocity of the crank KR2 (directed in the opposite direction of the velocity of EB1); 3X, 3Y – speed nodes of hinge 3; SH – connecting rod model SH; MSH – node, the voltage on which is equal to the angular speed of rotation of the connecting rod MSH; 4X, $J=0$ – connecting rod angular speed meter SH; 4Y – speed nodes of hinge 4; J – limiter of movement of the slider along the horizontal; JM – slider speed meter; CM – sliding mass; JM and CM are elements of the slider displacement finder integrator.

By connecting such models, that is, specifying which hinges of which links are connected to each other by corresponding poles, we get the opportunity to build a mechanism model of any complexity.

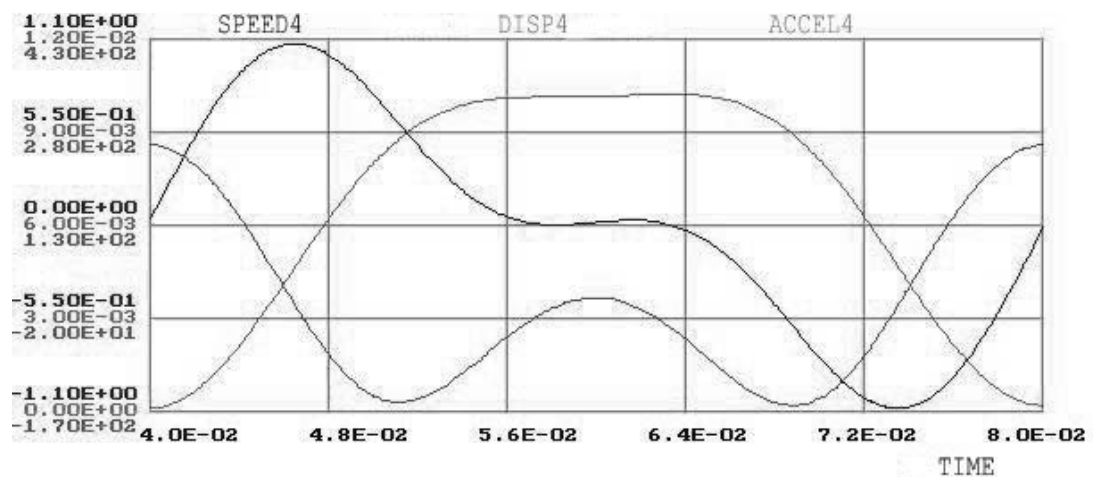


Figure 5 - Results of kinematic studies of the toothed-lever planetary mechanism for driving groove needles of warp knitting machines: DISP4 – displacement of the slider, m, SPEED4 – speed of the slider, m/s, ACCEL4 – acceleration of the slider, m/s²

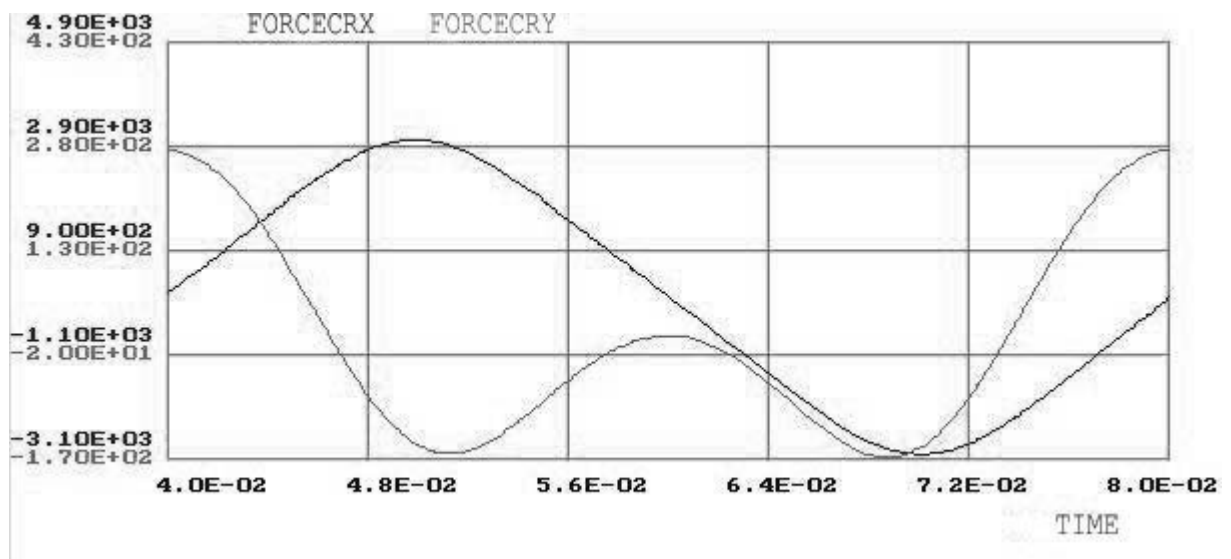


Figure 6 - Results of kinetostatic studies of the gear-lever planetary mechanism for driving groove needles of warp knitting machines: FORCECRX - the force of interaction of the crank with the support along the X, N axis, FORCECRY - the force of interaction of the crank with the support along the Y, N axis

The test calculation was carried out for a gear-lever mechanism with the following parameters:

- weights: crank 1 – 770 g, crank 2 – 24.8 g, connecting rod – 37.6 g, slider 23.3 g;
- moments of inertia: crank 1 – 0.43 g·m², crank 2 – 0.0035 g·m², connecting rod – 0.012 g·m²;
- link lengths: crank 1 – 10 mm, crank 2 – 5 mm, connecting rod – 40.8 mm;
- placement of links: crank 1 – vertically upwards, crank 2 – horizontally, slider – vertically;
- crank rotation speed – 1500 rpm.

4. CONCLUSIONS

The analysis of the mechanism with the help of the PRANS-PK package made it possible to determine all kinematic and dynamic parameters: absolute and relative speeds, angles of rotation, acceleration, reactions in the hinges due to the action of the inertial forces of the movement of the links, which reached values of about 5500 N, the moment on the crank, inertia link moments.

Thus, after carrying out numerical studies at PRANS-PK, graphic dependences of kinematic and kinetostatic parameters of the gear-lever planetary mechanism for driving groove needles of warp knitting machines were obtained. The next stage of research is the introduction into the system of the effective resistance force (technological load) and the comparison of the parameters of this mechanism with the existing mechanisms for driving groove needles of basic knitting machines.

BIBLIOGRAPHY

1. Karelin V.S. Design of lever and gear-lever mechanisms / V.S. Karelin. – M.: Mechanical engineering, 1986. – 184 p.
2. Smutko S.V. Development of universal gear-important planetary mechanisms for the drive of hinged organs of the basic knitting machines: dissertation.... candidate of technical sciences: 05.05.10 / Smutko Svitlana Valeriivna – Khmelnytsky, 2001. – 206 p.
3. Neimak V.S. Balancing of a single-stage gear-lever planetary mechanism / V.S. Neimak, G.B. Paraska. – Bulletin of the Khmelnytskyi National University. – 2004. – №5. – P.60-63.
4. Chkalov V.V. Automation of circuit design in mechanical engineering / V.V. Chkalov, A.I. Petrenko, V.V. Ladogubets. – K.:UMK BO,1988.-180 p.
5. Voronin G.F. Development of the technique of kinematic and dynamic analysis of hinge-important mechanisms for the help of digital electronic-calculating machines / G.F. Voronin. – Bulletin of Podillya Technological University. – 1998. – №4. Vol.2. – P.86-88.

Zastosowanie regresji wielokrotnej do obliczania temperatury początku przemiany martenzytycznej

W. Niechoj^a, J. Trzaska^b

^a Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: jacek.trzaska@polsl.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono równanie do obliczania temperatury początku przemiany martenzytycznej (M_s) na podstawie składu chemicznego stali. Do opracowania równania wykorzystano metodę regresji wielokrotnej. Równanie porównano z zależnościami prezentowanymi w literaturze. Obliczenia weryfikacyjne przeprowadzono na podstawie danych, które nie były wykorzystane do obliczania parametrów modelu.

Abstract: The equation for calculating the temperature of the start of martensitic transformation (M_s) based on the chemical composition of the steel was presented in the study. Multiple regression analysis was used to develop the equation. The equation was compared with relationships presented in the literature. Validation calculations were conducted using data that were not used to calculate the model parameters.

Słowa kluczowe: obróbka cieplna, przemiany fazowe, stal, analiza danych, regresja wielokrotna.

1. WSTĘP

Temperatura początku przemiany martenzytycznej (M_s) jest ważnym parametrem, którego znajomość jest konieczna podczas projektowania operacji obróbki cieplnej stali. Węgiel oraz inne pierwiastki stopowe w większości obniżają temperaturę M_s zwiększając ryzyko wystąpienia pęknięć podczas hartowania. Obniżanie temperatury M_s powoduje również zwykle zwiększenie udziału austenitu po hartowaniu [1].

Obliczenie temperatury M_s na podstawie składu chemicznego stali wymaga przyjęcia założenia, że w czasie austenitowania wszystkie pierwiastki zostały rozpuszczone w austenicie. Pierwsze równania, które opisywały zależność między składem chemicznym stali a temperaturą M_s zostały opublikowane w latach 40. XX wieku. Jeden z pierwszych modeli przedstawili w 1944 roku Payson i Savage [2]. Badacze wykorzystali częściowo wyniki badań Greningera [3], który analizował wpływ węgla na temperaturę M_s oraz Greningera i Troiano [4] badających również wpływ innych pierwiastków. Badania obejmowały 17 stali, których skład chemiczny został specjalnie dobrany na potrzeby eksperymentu. W kolejnych latach powstawały nowe zależności, które są wykorzystywane również obecnie [5-12]. Do

opracowania równań stosowano metodę regresji wielokrotnej przyjmując najczęściej liniową postać ogólną modelu. Równania umożliwiające obliczenie temperatury Ms na podstawie składu chemicznego stali zostały zebrane między innymi w pracach [13, 14]. Wyniki prac dotyczących obliczania temperatury Ms są nadal publikowane. Do tworzenia modeli, obok regresji wielokrotnej stosowane są sztuczne sieci neuronowe [14] oraz inne metody uczenia maszynowego [15].

W artykule przedstawiono równanie do obliczania temperatury Ms na podstawie składu chemicznego stali. Do opracowania modelu wykorzystano metodę regresji wielokrotnej oraz zbiór danych empirycznych zebrany na podstawie literatury. Opracowane równanie porównano z równaniami przedstawianymi w literaturze. Do tych obliczeń wykorzystano zbiór danych, który nie był wykorzystany do obliczania współczynników równania regresji. Obliczenia przeprowadzono w programie Excel z wykorzystaniem dodatku Analysis ToolPak.

2. DANE DO OBLICZEŃ I METODA

Celem pracy było opracowanie modelu pozwalającego na oszacowanie temperatury Ms stali na podstawie składu chemicznego, a następnie porównanie tego modelu z równaniami przedstawianymi w literaturze. Do opracowania modelu zastosowano regresję wielokrotną. Zrealizowanie celu pracy wymagało przygotowania zbioru danych empirycznych, który zawierał informacje o składach chemicznych stali i wartości temperatury Ms. Na podstawie danych publikowanych w literaturze zebrano zbiór składający się z około 500 przykładów. Dla każdego przypadku określony był skład chemiczny stali w postaci stężeń masowych pierwiastków: C, Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V oraz temperatura Ms. Przeprowadzono statystyczną analizę zbioru danych. Sprawdzone, czy występują obserwacje odstające. Badano rozkłady zmiennych. Wykonano histogramy wszystkich zmiennych zależnych oraz temperatury Ms. W wyniku analizy w zbiorze danych pozostało 466 przypadków. Obliczono statystyki opisowe: zakres wartości zmiennych, średnią arytmetyczną, odchylenie standardowe, medianę, kurtozę, skośność i dominantę. Wyniki przedstawiono w tabeli 1. Wartości minimalne i maksymalne stężeń masowych pierwiastków przedstawione w tabeli 1 definiują zakres, w którym równanie może być stosowane.

Table 1. Statystyki opisowe zbioru danych wykorzystanego do opracowania modelu

Table 1. Descriptive statistics of the dataset used for model development

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Ms
Min	0,06	0,13	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	238
Max	0,68	2,00	1,90	2,00	3,00	1,24	0,38	465
Średnia	0,34	0,87	0,45	0,64	0,53	0,23	0,03	227
Odch. standardowe	0,13	0,36	0,41	0,52	0,79	0,26	0,07	53
Mediana	0,36	0,80	0,29	0,72	0,12	0,18	0,00	340
Kurtoza	-0,57	0,13	2,77	-0,82	1,13	1,57	5,77	-0,75
Skośność	0,00	0,87	2,03	0,30	1,51	1,34	2,44	0,25
Dominanta	0,40	0,80	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	350

Przeprowadzono analizę współliniowości zmiennych niezależnych. . Efekt współliniowości występuje w przypadku istniejącej korelacji między zmiennymi niezależnymi. Efekt ten istotnie utrudnia ocenę wpływu zmiennych niezależnych na zmienną zależną. Wpływ zmiennej niezależnej jest obciążony wpływem zmiennych z nią skorelowanych. W tym celu obliczono współczynnik korelacji dla każdej pary zmiennych niezależnych. Na tej podstawie stwierdzono, że efekt współliniowości zmiennych niezależnych nie występuje. Ze zbioru danych w sposób losowy wybrano 45 przykładów. Wydzielono w ten sposób zbiór weryfikacyjny, który został wykorzystany do porównania opracowanego modelu z równaniami przedstawionymi w literaturze.

Analizowano różne postaci równania, w tym interakcję zmiennych niezależnych w postaci iloczynów. Obliczenia wykonano w programie Excel z wykorzystaniem dodatku Analysis ToolPak. Współczynniki równania regresji obliczono metodą najmniejszych kwadratów. Do oceny istotności równania regresji zastosowano test F Fishera-Snedecora. Istotność zmiennych niezależnych analizowano za pomocą testu t-Studenta przyjmując poziom istotności $\alpha=0,05$. Wyniki testu F potwierdziły związek między temperaturą M_s a stężeniami masowymi pierwiastków, które zostały wykorzystane jako zmienne niezależne modelu. Ocena istotności zmiennych niezależnych potwierdziła ich wpływ na zmienną opisywaną. We wszystkich przypadkach uzyskano wartość-p mniejszą od założonego poziomu istotności α , co można interpretować: prawdopodobieństwo, że zmienna niezależna nie ma wpływu na temperaturę M_s jest bliskie zeru (mniejsze od 0,05). Na podstawie wartości współczynnika determinacji $R^2(0,86)$, oraz błędu standardowego ($19,8\text{ }^\circ\text{C}$) wybrano równanie (1).

$$M_s = 538 - 395 \cdot C - 35 \cdot Mn - 12 \cdot Si - 13 \cdot Cr - 18 \cdot Ni - 17 \cdot Mo \quad (1)$$

3. WERYFIKACJA MODELU

Na podstawie danych ze zbioru weryfikacyjnego obliczono temperaturę M_s wykorzystując równanie (1) oraz popularne zależności prezentowane w literaturze (2)-(10).

Payson i Savage [2]

$$M_s(^{\circ}F) = 930 - 570 \cdot C - 60 \cdot Mn - 50 \cdot Cr - 30 \cdot Ni - 20 \cdot Si - 20 \cdot Mo - 20 \cdot W \quad (2)$$

Grange i Stewart [5]

$$M_s(^{\circ}F) = 1000 - 650 \cdot C - 70 \cdot Mn - 70 \cdot Cr - 35 \cdot Ni - 50 \cdot Mo \quad (3)$$

Nehrenberg [6]

$$M_s(^{\circ}F) = 930 - 540 \cdot C - 60 \cdot Mn - 40 \cdot Cr - 30 \cdot Ni - 20 \cdot Si - 20 \cdot Mo \quad (4)$$

Steven i Haynes [7]

$$M_s(^{\circ}C) = 561 - 474 \cdot C - 33 \cdot Mn - 17 \cdot Ni - 17 \cdot Cr - 21 \cdot Mo \quad (5)$$

Andrews [8]

$$M_s(^{\circ}C) = 539 - 423 \cdot C - 30,4 \cdot Mn - 17,7 \cdot Ni - 12,1 \cdot Cr - 7,5 \cdot Mo \quad (6)$$

Eldis [9]

$$M_s(^{\circ}C) = 531 - 391,2 \cdot C - 43,3 \cdot Mn - 21,8 \cdot Ni - 16,2 \cdot Cr \quad (7)$$

Kunitake [10]

$$M_s(^{\circ}C) = 560,5 - 407,3 \cdot C - 37,8 \cdot Mn - 14,8 \cdot Cr - 19,5 \cdot Ni - 4,5 \cdot Mo - 7,3 \cdot Si - 20,5 \cdot Cu \quad (8)$$

Lorenz [11]

$$M_s(^{\circ}C) = 506,6 - 338,7 \cdot C - 18,3 \cdot Mn - 14,5 \cdot Cr - 1,3 \cdot Si \quad (9)$$

Sverdlin i Ness [12]

$$M_s(^{\circ}C) = 520 - 320 \cdot C - 50 \cdot Mn - 30 \cdot Cr - 20 \cdot (Ni + Mo) - 5 \cdot (Cu + Si) \quad (10)$$

Do oceny równań wykorzystano statystyki: średni błąd bezwzględny, odchylenie standardowe błędów, współczynnik korelacji Pearsona oraz iloraz odchyleń standardowych. Iloraz odchylenia standardowego błędów prognozy i odchylenia standardowego zmiennej zależnej pozwala na odniesienie wartości błędów modelu do zakresu wartości zmiennej zależnej. Im mniejszy jest błąd predykcji modelu i większy zakres wartości zmiennej zależnej, tym iloraz odchyleń standardowych przyjmuje mniejsze wartości i osiąga wartość zero dla idealnej prognozy. Wartości statystyk zebrano w tabeli 2.

Tabela 1. Wartości statystyk wykorzystanych do oceny równań

Table 1. Values of statistics used for evaluating equations

	Średni błąd bezwzględny, $^{\circ}C$	Odchylenie standardowe błędów, $^{\circ}C$	Iloraz odchyleń standardowych	Współczynnik korelacji
Równanie (1)	15,9	14,7	0,25	0,94
Payson i Savage (2)	26,0	21,6	0,37	0,90
Grange i Stewart (3)	23,1	21,7	0,37	0,90
Nehrenberg (4)	21,8	19,9	0,34	0,92
Steven i Haynes (5)	15,6	13,1	0,22	0,94
Andrews (6)	15,6	14,9	0,25	0,94
Eldis (7)	16,7	16,6	0,28	0,93
Kunitake (8)	24,4	17,1	0,29	0,93
Lorenz (9)	28,2	24,0	0,41	0,88
Sverdlin i Ness (10)	25,3	21,6	0,37	0,89

Na podstawie analizy statystyk przedstawionych w tabeli 2 można stwierdzić, że zależność między składem chemicznym stali a temperaturą M_s dla danych ze zbioru weryfikacyjnego najlepiej opisuje równanie (5). Zbliżone wartości statystyk uzyskano dla równania (6) oraz równania (1). Różnice są niewielkie i mogą być statystycznie nieistotne. W celu potwierdzenia tezy, że opracowane równanie (1) umożliwia obliczenie temperatury M_s z porównywalnym do równań (5) i (6) błędem przeprowadzono test istotności średnich. Wykorzystano test t-Studenta. Równość wariancji potwierdzono na podstawie testu Fishera. Obliczona wartość p w odniesieniu do równania (5) oraz równania (6) była równa 0,93. Na tej podstawie można wnioskować, że różnica między średnimi nie jest istotna statystycznie z prawdopodobieństwem równym 0,93.

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono równanie do obliczania temperatury początku przemiany martenzytycznej na podstawie składu chemicznego stali. Równanie może być stosowane w zakresie stężeń masowych pierwiastków opisanym w tablicy 1. Do opracowania równania wykorzystano dane zebrane z literatury, które zawierały stężenia masowe pierwiastków oraz wyznaczoną eksperymentalnie wartość temperatury M_s . Współczynniki równania obliczono metodą regresji wielokrotnej. Opracowany model temperatury M_s porównano z popularnymi równaniami prezentowanymi w publikacjach naukowych. Do tych obliczeń wykorzystano zbiór danych, który nie był wykorzystany do obliczania współczynników równania.

Przedstawiane w publikacjach naukowych równania do obliczania temperatury M_s mogą być wykorzystane w szerokim zakresie stężeń masowych pierwiastków lub są przeznaczone do określonych grup stali. Bardziej ogólne modele charakteryzują się zwykle większym błędem obliczeń. Metoda regresji wielokrotnej może zostać zastosowana w zakresie wartości zmiennych niezależnych charakterystycznym dla rozwiązywanego problemu. Warunkiem koniecznym do efektywnego jej zastosowania jest przygotowanie reprezentatywnego zbioru danych doświadczalnych.

BIBLIOGRAFIA

1. J. Pacyna, Projektowanie składów chemicznych stali. Wydawnictwo Wydziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej AGH, Kraków 1997.
2. P. Payson, C.H. Savage, Martensite Reactions in Alloy Steels, Transactions ASM 33 (1944) 261-275.
3. A.B. Greninger, The Martensite Thermal Arrest in Iron-Carbon Alloys and Plain Carbon Steels, Transactions ASM 30 (1942) 1-26.
4. A.B. Greninger, A.R. Troiano, Kinetics of the Austenite to Martensite Transformation in Steel, Transactions ASM 28 (1940) 537-574.
5. R.A. Grange, H.M. Stewart, The Temperature Range of Martensite Formation, Transactions of the AIME 167 (1946) 467-490.
6. A.E. Nehrenberg, The Temperature Range of Martensite Formation, Transactions of the AIME 167 (1946) 494-498.

7. W. Steven, A.G. Haynes, The Temperature of Formation of Martensite and Bainite in Low-Alloy Steels. Some effects of chemical composition, *Journal of the Iron and Steel Institute* 183 (1956) 349-359.
8. K.W. Andrews, Empirical formulae for the calculation of some transformation temperatures, *Journal of the Iron and Steel Institute* 203 (1965) 721-727.
9. G.T. Eldis, A Critical Review of Data Sources for Isothermal and Continuous Cooling Transformation Diagrams, [in:] Doane D.V., Kirkaldy J.S. (eds.): *Hardenability Concepts with Applications to Steel*. The Metallurgical Society of AIME, New York 1978, 126-148.
10. T. Kunitake, Prediction of A_{c1} , A_{c3} and M_s Temperatures by Empirical Formulas, *Heat Treating (Japan)* 41 (2001) 164-168.
11. U. Lorenz, Anwendung von Werkstoffmodellen auf die Phasenumwandlung und die Austenitkonditionierung von Stählen. RWTH Aachen University, Aachen 2004.
12. A.V. Sverdlin, A.R. Ness, The Effects of Alloying Elements on the Heat Treatment of Steel, [in:] *Steel Heat Treatment Handbook*. Marcel Dekker, New York 1997, 45-91.
13. A.A. Gorni, Steel Forming And Heat Treating Handbook, www.gorni.eng.br/e/Gorni_SFHTHandbook.pdf, 2019.
14. J. Trzaska, Metodologia prognozowania anizotermicznych krzywych przemian fazowych stali konstrukcyjnych i maszynowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2017.
15. M. Rahaman, W. Mu, J. Odqvist, P. Hedström, Machine Learning to Predict the Martensite Start Temperature in Steels, *Metall. Mater. Trans. A* 50 (2019) 2081–2091.

Próba udarności nowo opracowanych w pełni biodegradowalnych materiałów kompozytowych do kontaktu z żywnością z naturalnym napelniaczem

K. Niesporek^a, O. Baszczeńska^a, A.J. Nowak^b

^a Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych, email: kamil.niesporek@polsl.pl; oliwia.baszczenska@polsl.pl

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska. email: agnieszka.j.nowak@polsl.pl

Streszczenie: Zwracając uwagę na problem zanieczyszczenia tworzywami sztucznymi środowiska naturalnego podjęto się opracowania nowego biodegradowalnego materiału kompozytowego z zastosowaniem naturalnych napelniaczy w postaci łupin orzecha włoskiego i skorupki jaj kurzych. Osnowę kompozytu stanowił biopolimer o nazwie handlowej BIOPLAST GS 2189. W pracy skupiono się na próbie udarności metodą Charpy'ego znormalizowanych próbek wytworzonych metodą wtrysku. Stwierdzono pogorszenie odporności materiału na obciążenia udarowe wraz z wzrostem udziału naturalnych napelniaczy.

Abstract: Addressing the problem of plastic pollution in the environment, a new biodegradable composite material was developed using natural fillers in the form of walnut shells and chicken shells. The matrix of the composite was a biopolymer with the trade name BIOPLAST GS 2189. The study focused on Charpy impact testing of standardised injection moulded samples. A deterioration of the material's resistance to fracture under impact loading was found as the proportion of natural fillers increased.

Słowa kluczowe: kompozyty biodegradowalne, naturalne napelniacze, badania wytrzymałościowe, próba udarności, polimery

1. WSTĘP

W wyniku zmiany trendów konsumpcyjnych oraz żywieniowych społeczeństw zachodnich w ostatnich kilkunastu latach można zanotować wyraźny wzrost zapotrzebowania na tworzywa sztuczne przeznaczone do kontaktu z żywnością. Obecne wzorce konsumpcji, polegające na kupowaniu gotowych posiłków lub zamawianiu jedzenia na wynos przekłada się na wzrost zapotrzebowania na tego typu produkty [1]. Jednakże ich obecna produkcja bazuje głównie na tworzywach sztucznych takich jak np. polipropylen, polietylen czy polistyren będącymi syntetycznymi związkami pochodnymi ropy naftowej. Materiały te oprócz stosunkowo niskimi kosztami produkcji charakteryzują się wysoką trwałością oraz sterylnością. Niestety ich zastosowanie wiąże się z negatywnym wpływem na środowisko naturalne.

Negatywne oddziaływania termoplastycznych tworzyw sztucznych na środowisko jest powiązane z całym procesem przetwórczym oraz wydobywczym ropy naftowej, której złoża są ograniczone [2]. Kolejny problem stanowi kwestia ich recyklingu i biodegradowalności. W ostatnich latach często poruszają się zagadnienie zanieczyszczenia wód gruntowych oraz oceanów tworzywami sztucznymi w tym tzw. mikro plastikiem [3-5]. Jego oddziaływanie na organizmy żywe nadal nie zostało dokładnie zbadane. Według dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej aż od 80% do 85% odpadów morskich stanowią tworzywa sztuczne [6]. Dodatkowo rosnąca świadomość konsumencka obejmująca nurty proekologiczne, a także szereg rezolucji prawnych wymusza intensyfikację badań nad opracowaniem nowych biodegradowalnych materiałów bezpiecznych dla środowiska naturalnego o parametrach zbliżonych do tych konwencjonalnych tworzyw sztucznych stosowanych na opakowania [6].

Próby wytrzymałościowe stanowią nieodłączny element testowy nowo opracowanych materiałów w celu określenia ich przydatności, sprecyzowania sektora zastosowań oraz wraz z czynnikami ekonomicznymi decydują o ich dalszej komercjalizacji. W przypadku materiałów kompozytowych przeprowadza się próby rozciągania, ściskania, zginania, udarności, twardości oraz testy zmęczeniowe. W pracy przedstawiono wyniki przeprowadzonych pomiarów udarności nowo opracowanych w pełni biodegradowalnych materiałów kompozytowych z zastosowaniem naturalnych napełniaczy.

2. CHARAKTERYSTYKA KOMPONENTÓW BIOKOMPOZYTU

W celu zapewnienia odpowiednich parametrów ekologicznych odnośnie biodegradowalności, a także spełnienia rygorystycznych przepisów dotyczących materiałów do kontaktu z żywnością jako osnowę zastosowano biopolimer o handlowej nazwie BIOPLAST GS 2189 [7]. Własności biopolimeru (na podstawie danych udostępnionych przez producenta) zostały przedstawione w tabeli. 1.

Tab. 1 Parametry biopolimeru BIOPLAST GS 2189 według danych udostępnionych przez producenta [7].

Table 1. Biopolymer parameters of BIOPLAST GS 2189 according to data made available by the manufacturer [7].

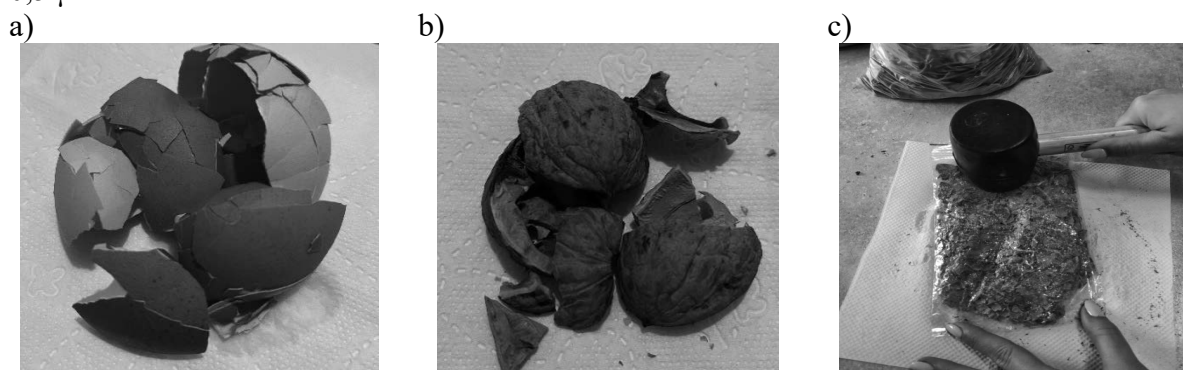
Parametr	Wartość	Jednostka
Wielkość granulatu	3,0	mm
Gęstość nasypowa	860	kg/m ³
Gęstość	1,35	g/cm ³
Temperatura mięknięcia metodą Vicata	58	°C
Masowy wskaźnik szybkości płynięcia MFR (190°C, 2,16 kg)	35	g/10 min
Zawartość wody	< 0,2	% mas
Przepuszczalność tlenu (400 µm)	50	cm ³ /(m ² d bar)
Przepuszczalność dwutlenku węgla (400 µm)	175	cm ³ /(m ² d bar)
Przepuszczalność pary wodnej (400 µm)	8	g/(m ² d)

BIOPLAST GS2189 wykazuje się stosunkowo niską temperaturą mięknięcia wynoszącą 58°C oraz wysokim masowym wskaźnikiem płynięcia MFR. Umożliwia to jego odpowiednią homogenizację jak i formowanie standaryzowanych próbek metodą wtrysku.

W przypadku doboru naturalnych napełniaczy opracowanego materiału kompozytowego zdecydowano się na zastosowanie zmielonych odpadów w postaci łupin orzecha włoskiego i skorup kurzego jaja ze względu na ich biodegradowalność, możliwość kontaktu z żywnością oraz łatwą dostępność.

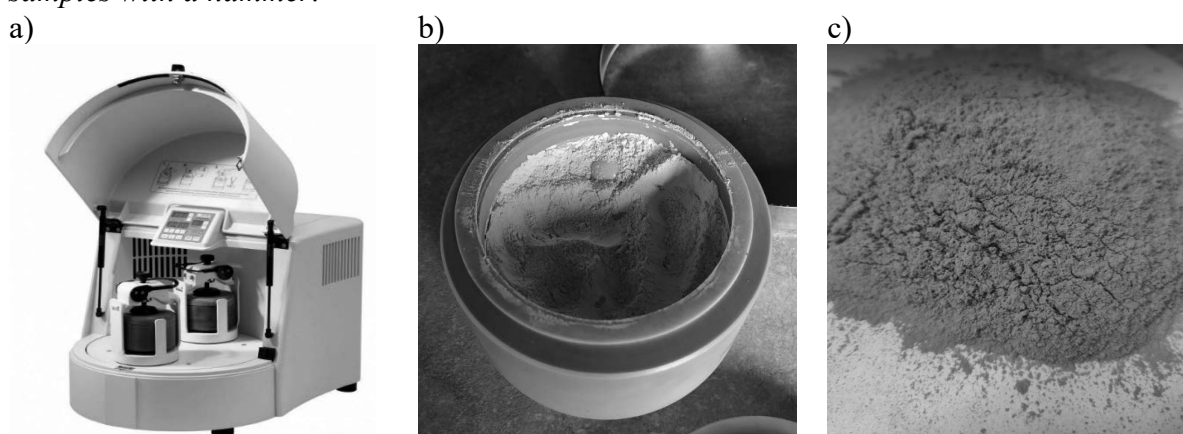
3. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK

Początkowym etapem w procesie przygotowania próbek było oczyszczenie skorupki orzecha i jajek z tłustych błonek zawartych w napełniaczach. Następnie dokonano mechanicznego rozdrobnienia próbek za pomocą młotka (rysunek 1). Wstępnie rozdrobnione skorupki oraz łupiny poddane zostały mieleniu przy pomocy młynka planetarno-kulowego, wypełnionego dwudziestoma kulkami wykonanymi z tlenku cyrkonu. Proces mielenia trwał 10 minut przy prędkości 400 obr/min. Na rysunku 2 przedstawiono sproszkowane łupiny po procesie mielenia. Zmielone napełniacze zostały przesiane na wytrząsarce przez sito o frakcji 0,5 μm .



Rys. 1 Wstępne przygotowanie próbek: a) skorupki jaja kurzego, b) łupiny orzecha włoskiego, c) mechaniczne rozdrobnienie próbek przy pomocy młotka.

Fig. 1 Pre-preparation of samples: a) eggshells, b) walnut shells, c) mechanical grinding of samples with a hammer.



Rys. 2 Proces uzyskiwania mączki: a) młynek planetarno-kulowy, b) misa mieląca, c) sproszkowane łupiny orzecha włoskiego.

Fig. 2 Process for obtaining meal: a) planetary ball mill, b) grinding bowl, c) powdered walnut shells..

3.1. Proces homogenizacji

Homogenizacji napełniaczy dokonano z Bioplastem GS2189 na gniotowniku Zamak Mercator VM-30 dla różnych udziałów procentowych Bioplast/Napełniacz: 90/10, 80/20, 70/30, 50/50. W tabeli 2 przedstawiono parametry procesu homogenizacji, który odbywał się w dwóch etapach.

Tab. 2 Parametry procesu homogenizacji.

Table 2 Homogenisation process parameters.

Etap	Temperatura, °C	Prędkość obrotowa łopatek, obr/min	Czas mieszania, min
1	180	10	5
2	180	20	5

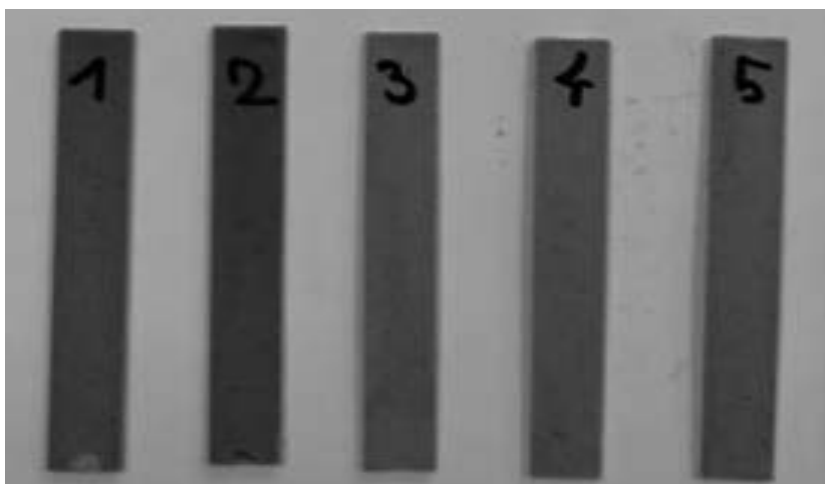
3.2. Wtrysk

Otrzymany materiał kompozytowy o zróżnicowanym udziale rodzaju napełniaczy poddano procesowi wtrysku w celu wytworzenia znormalizowanych próbek odpowiednich do przeprowadzenia badań udarności. W tym celu posłużono się wtryskarką laboratoryjną firmy Zamak Mercator. Dla każdego udziału procentowego osnowa/napełniacz wytworzono po 5 belek, przykładowe zdjęcie wytworzonych próbek metodą wtrysku przedstawiono na rysunku 3. Parametry wtrysku takie jak ciśnienie i temperatura formy oraz blendu były dobierane indywidualnie dla poszczególnych udziałów i rodzaju napełniaczy na podstawie własnych obserwacji ze względu na złożoność procesu. Zostały one przedstawione w tabeli 3.

Tab. 3 Parametry procesu wtrysku.

Table 3 Injection process parameters.

Udziały Osnowa/napełniacz	Ciśnienie robocze, bar	Temperatura, °C		Czas wtrysku, s
		Wtrysku	Formy	
Napełniacz w postaci mączki łupin orzecha włoskiego				
90/10	4	180	60	4
80/20	4	180	70	4
70/30	4,7	180	95	4
50/50	4,7	180	95	4
Napełniacz w postaci mączki skorupki jaja kurzego				
90/10	4	180	60	6
80/20	4	190	70	8
70/30	4,7	210	95	8
50/50	4,7	210	95	6



Rys. 3 Przykładowe belki z wytworzone metodą wtrysku.

Fig. 3 Examples of beams by injection moulding.

4. METODYKA PRÓBY UDARNOŚCI

Pomiary udarności zostały wykonane metodą Charpy'ego za pomocą młota wahadłowego Zwick/Roell HIT 25P. Badanie odbywało się zgodnie z normą: PN-EN ISO 179-2 [8] poprzez łamanie znormalizowanej próbki w kształcie belki podpartej na obu końcach za pomocą jednokrotnego uderzenia swobodnie opadającego młota wahadłowego. Dla każdego z udziałów napelnacza wykonano po 5 pomiarów. Rozstaw podpór podczas badania był stały i wynosił 30 mm, natomiast energie młota dla 3 pierwszych próbek wynosząca 5J uznano za wartość zbyt wysoką, dlatego została skorygowana do 1J w celu poprawy otrzymywanych wyników pomiarów. Przed badaniem dokonano pomiarów grubości i szerokości każdej z próbek za pomocą suwmiarki. Rysunek 4 przedstawia podpartą znormalizowaną próbkę poddaną próbie udarności. Wartością otrzymaną podczas badania była energia łamania próbki umożliwiającą wyznaczenie udarności według poniższego wzoru:

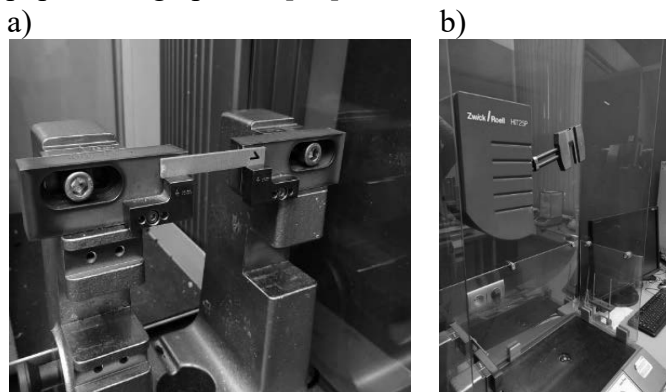
$$KC = \frac{K}{A_0} \cdot 10^3 \left[\frac{kJ}{m^2} \right] \quad (1)$$

Gdzie:

KC - udarność

K - energia łamania [J]

A_0 - pole przekroju poprzecznego próbki [m^2]



Rys. 4 Przeprowadzona próba udarności: a) próbka podparta na dwóch podporach; b) młot 5J.

Fig. 4 Charpy impact test carried out: a) sample supported on two props; b) 5J hammer.

5. WYNIKI PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

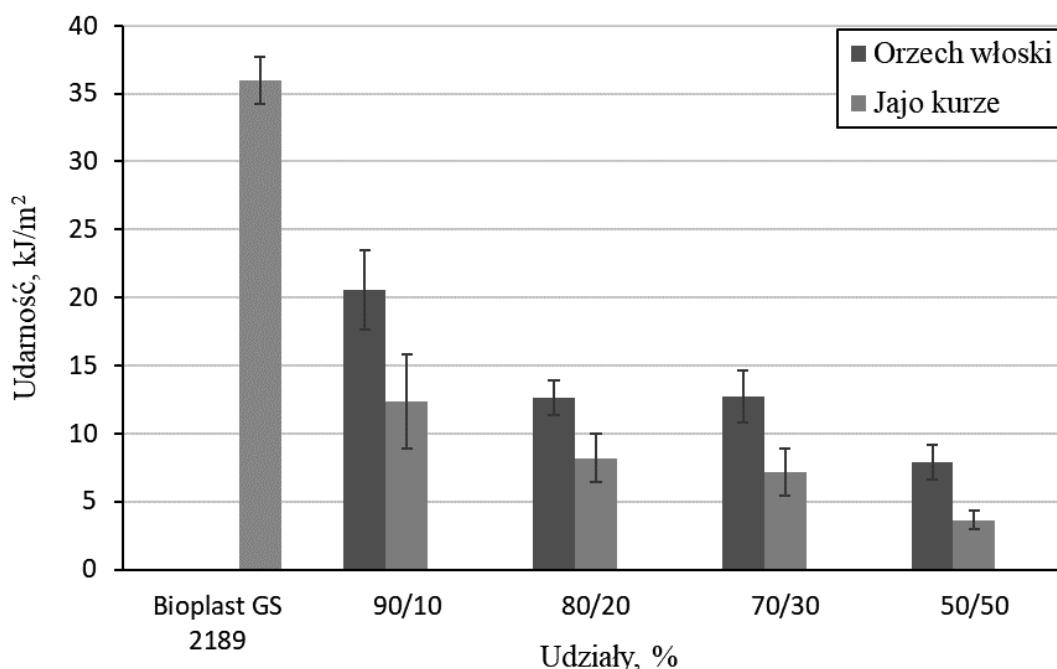
Uzyskane wyniki pomiarów przeprowadzonych prób udarności dla różnych udziałów napełniaczy w postaci mączki łupin orzecha włoskiego i skorupki jaja kurzego zawarto w tabeli 4. Dodatkowo umieszczono w niej również informacje na temat udarności czystego Bioplastu GS 2189. Graficzną prezentację wyników przedstawiono natomiast na rysunku 5.

Zastosowanie naturalnych napełniaczy w postaci mączki łupin orzecha włoskiego i skorupki jaj kurzych wyraźnie zmniejsza udarność badanych materiałów. Zauważyć można, że spadek ten następuje dla obu badanych napełniaczy i postępuje wraz ze spadkiem udziału osnowy w biokompozycie. Następuje więc wyraźny spadek wytrzymałości materiału na obciążenia udarowe. Udarność czystego biopolimeru wynosi 35,95 kJ/m². Najwyższą wartość udarności próbki kompozytu odnotowano dla napełniacza w postaci mączki łupin orzecha włoskiego dla udziału 90/10 wynoszącą 20,56 kJ/m² co stanowi około 57% udarności materiału bazowego. Ogólnie rzecz biorąc napełniacz ten wykazywał się dużo większą udarnością we wszystkich badanych udziałach względem napełniacza w postaci mączki skorupki jaja kurzego. W przypadku udziałów 80/20 i 70/30 nie odnotowano znaczącego obniżenia udarności dla obu napełniaczy. Wyniki charakteryzuje odchylenie standardowe w zakresie od 0,68 do 3,45 co jest związane z niedoskonałością wytwarzania próbek metodą wtrysku.

Tab. 4 Wartości udarności w zależności od udziału procentowego napełniacza dla łupin orzecha włoskiego i skorupki jaj kurzych.

Table 3 Impact strength values as a function of filler percentage for walnut shells and chicken eggshells.

Udziały Osnowa/napełniacz	Udarność, kJ/m ²	Odchylenie standardowe	Przedział ufności 95%	
Napełniacz w postaci mączki łupin orzecha włoskiego				
90/10	20,56	2,92	16,93	24,19
80/20	12,62	1,26	10,63	14,62
70/30	12,73	1,90	10,37	15,08
50/50	7,86	1,28	6,27	9,45
Napełniacz w postaci mączki skorupki jaja kurzego				
90/10	12,37	3,45	8,09	16,66
80/20	8,20	1,75	6,03	10,38
70/30	7,14	1,76	4,96	9,32
50/50	3,61	0,68	2,76	4,46
Czysty Bioplast GS 2189				
-	35,95	1,75	34,70	37,21



Rys. 5 Udarność w zależności od udziału i rodzaju zastosowanego napełniacza.

Fig. 5 Impact strength as a function of the proportion and type of filler used.

6. WNIOSKI

Badania nad opracowaniem nowych materiałów biokompozytowych mogą przyczynić się do zmniejszenia zanieczyszczenia środowiska naturalnego tworzywami sztucznymi. Zastosowanie naturalnych napełniaczy w postaci biodegradowalnych odpadów rolniczych czy spożywczych pozwala na znaczne obniżenie kosztów produkcji materiałów opartych na wciąż drogich biopolimerach. Należy jednak pamiętać, by nowo opracowane biokompozyty mogły zastąpić konwencjonalne materiały powinny wykazywać się odpowiednimi parametrami wytrzymałościowymi. Przeprowadzone badania wykazały, że wzrost udziału napełniaczy w postaci mączki z łupin orzecha włoskiego i skorupki jaj kurzych przekłada się na obniżenie udarności wytworzonego biokompozytu. Serie próbek z wykorzystaniem mączki orzecha włoskiego wykazywały się znacznie większą udarnością względem próbek z mączką skorupki jaj kurzych. Udarności próbki czystego biopolimeru wyniosła $35,95 \text{ kJ/m}^2$. Najwyższe wartości udarności próbek kompozytowych uzyskano dla udziału napełniacza 90/10 i wynosiły odpowiednio $20,56 \text{ kJ/m}^2$ i $12,37 \text{ kJ/m}^2$ dla mączki orzecha i jaj kurzych. Następuje więc wyraźny spadek odporności materiału na obciążenia udarowe względem materiału bazowego. Spadek udarności był niewielki w przypadku obniżenia udziału osnowy z 80/20 do 70/30 dla obu zastosowanych napełniaczy. Stwierdzono zatem, że biokompozyt 70/30 z napełniaczem mączki łupin orzecha włoskiego o udarności $12,73 \text{ kJ/m}^2$ ma najbardziej korzystny stosunek udarności do procentowego udziału naturalnego napełniacza. Materiał ten może być z powodzeniem stosowany tam gdzie nie jest wymagana wysoka wytrzymałość na obciążenia udarowe. W przypadku konieczności zastosowania wytrzymalszego materiału należałoby wybrać biokompozyt 90/10 również z napełniaczem w postaci mączki łupin orzecha

włoskiego, którego udarność jest znacznie wyższa i najbardziej zbliżona do udarność materiału bazowego.

Odnotowania wymaga fakt, że część belek uległa wygięciu podczas wyjmowania ich z formy co związane jest z problematyką metody wtrysku, może przełożyć się to na uzyskane wyniki pomiarów. Kolejnym aspektem stanowi możliwość powstawania pęcherzy powietrznych podczas wtryskowego formowania próbek, co potencjalnie mogło wpłynąć na wytrzymałość wytworzonych próbek. Uzyskane wyniki wraz z przeprowadzeniem innych prób wytrzymałościowych pozwolą na określenie sektora zastosowań opracowanego materiału.

Uwagi ogólne: Niniejsze opracowanie powstało dzięki realizacji projektu PBL pt. „Analiza materiałowa nowo opracowanego w pełni biodegradowalnego kompozytu polimerowego, w tym oznaczenie pojemności cieplnej właściwej” realizowanego w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza. Zarządzenie nr 55/2020 Rektora Politechniki Śląskiej. Prace były realizowane przez członków Studenckiego Koła Naukowego Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych i Kompozytów „HEAD TO HEAD” działającego przy Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych na wydziale Mechanicznym Technologicznym.

LITERATURA

1. Sattlegger, L., Stieß, I., Raschewski, L., & Reindl, K. (2020). Plastic packaging, food supply, and everyday life adopting a social practice perspective in social-ecological research. *Nature and Culture*, 15(2), 146–172. <https://doi.org/10.3167/NC.2020.150203>
2. Qasim, U., Osman, A. I., Al-Muhtaseb, A. H., Farrell, C., Al-Abri, M., Ali, M., Vo, D. V. N., Jamil, F., & Rooney, D. W. (2021). Renewable cellulosic nanocomposites for food packaging to avoid fossil fuel plastic pollution: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(1), 613–641. <https://doi.org/10.1007/S10311-020-01090-X>
3. Ford, H. v., Jones, N. H., Davies, A. J., Godley, B. J., Jambeck, J. R., Napper, I. E., Suckling, C. C., Williams, G. J., Woodall, L. C., & Koldewey, H. J. (2022). The fundamental links between climate change and marine plastic pollution. *The Science of the Total Environment*, 806(Pt 1). <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.150392>
4. Jagiełowicz, P. (2020). Plastik i jego oddziaływanie na środowisko. *Tutoring Gedanensis*, 5(1), 29–35.
5. Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768–771. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1260352/SUPPL_FILE/JAMBECK.SM.PDF
6. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/904 z dnia 5 czerwca 2019 r. w sprawie zmiany dyrektywy 2008/98/WE w odniesieniu do plastiku jednorazowego użytku i odpadów rybołówstwa. *Dz.U.U.E.L.2019. 155:1-19.*
7. <https://pl.biotech.de/bioplast> dostęp: 5.04.2023
8. PN-EN ISO 179-2:2019-05. Tworzywa sztuczne. Oznaczanie udarnośći metodą Charpy'ego. Część 2: Wyznaczanie udarnośći. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Application of Innovative Laser Technology to Improve the Functional Properties of Surface of Steel

Z. Noor Ul Ain ^a, M. Madani ^a, M. Bonek ^b

^a Montan University Leoben, Department of Ferrous Metallurgy
email: syeda-noor-ul-ain.zahraa@stud.unileoben.ac.at

^b Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials
email: mirosław.bonek@polsl.pl,

Abstract: Steel components utilized in industrial applications necessitate specific surface qualities such as high resistance to corrosion, wear, and hardness. However, alloys possessing these desired characteristics are typically expensive. There is a pressing need to reduce the cost of these components without compromising their performance requirements. In this context, laser surface processing has emerged as a practical solution to enhance the surface qualities of various materials. By utilizing the intense heat generated by a laser beam, this technique enables the modification of the structural and physical properties of the material. Laser surface processing encompasses two distinct variations: direct operations that use generated heat for such as hardening and melting, and processes that involve the utilization of filler material, such as alloying and cladding. This article discusses the application of laser technology to enhance the functional properties of steel surfaces.

Keywords: materials, laser treatment, steel, surface treatment, laser cladding, laser hardening, laser alloying.

1. INTRODUCTION

Innovative laser technology provides unparalleled precision, control and efficiency in modifying the surface properties of steel. Using the power of focused laser beams, engineers and scientists have unlocked a wide range of applications that significantly improve the functional properties of steel surfaces. From increasing wear resistance and hardness to improving corrosion resistance and tribological properties, lasers have opened up new possibilities for the steel industry [1].

In various industry sectors, there is a need to improve the performance of material surfaces in wear and corrosion environments that conventional surface modifications and coatings cannot meet. For example, tool steels, which are commonly used to produce molds, dies and other components under very high loads, are used in almost all sectors of industry. These tool steels require high resistance to wear and corrosion, both for cold work and for hot work [2].

In the last two decades, various alternative methods have been developed for surface treatment through laser-assisted material processing [3, 4].

The rapid advancements in these methods have motivated the industries to adopt these laser surface treatments as a more efficient alternative to conventional methods [5].

One of the most important ways to enhance the surface properties of materials is laser surface engineering [6, 7]. Laser surface engineering encompasses several applications in the steel industry. They are mainly related to enhancing surface-dependent properties, like hardness, friction, fatigue and resistance to wear, corrosion, etc.

Below are a few innovative laser surface engineering technologies currently being used on industrial scale [8]:

- 1) Laser hardening involves heating the steel surface with a focused laser beam and controlled cooling, resulting in localized hardening and enhanced wear resistance, fatigue strength, and durability.
- 2) Laser cladding utilizes a laser beam to fuse wear-resistant or corrosion-resistant materials onto the steel surface, offering precise control over coating thickness and composition.
- 3) Laser surface alloying involves melting the steel surface and introducing alloying elements, leading to a hardened layer with enhanced surface hardness, wear resistance, and corrosion resistance.
- 4) Laser texturing creates controlled patterns on steel surfaces, improving tribological properties such as reduced friction, better adhesion, and enhanced lubrication retention.
- 5) Laser cleaning selectively removes contaminants and coatings from steel surfaces using a laser beam, enabling improved adhesion for subsequent processes.

We will explore three of these most used processes and uncover how each process contributes to the transformation of steel surfaces.

1.1. Laser Hardening:

Laser hardening is a process where a high power-density laser beam impinges on the steel surface and changes its microstructure. A beam heats the surface close to its melting point (typically 900-1400 °C). This changes the grain structure to an austenitic one.

The hot steel cools rapidly such that the steel is quenched, and a fine-grained microstructure called martensite is formed. This martensite zone can be as deep as 2 mm, improving the steel's hardness and resistance to wear [9].

The hardness due to laser treatment is higher than the conventional furnace hardness and is inside the so-called super-hardness band [10, 11]. We can use the laser hardening process for all steels and irons that are currently being hardened by conventional means. Even low-carbon steels that normally cannot be induction hardened can be laser hardened due to extremely high cooling rates obtained by self-quenching.

1.1.2. Process development

The possibility of using laser pulses to generate shock waves was discovered in the 1960s, and research into laser-induced shock waves of increased effectiveness began. These shock waves have been found to generate compressive stresses exceeding the yield strength of metals. Researchers in the United States and France have initiated feasibility studies to use laser shock peening (LSP) as an alternative to shot peening and deep rolling to modify material properties. Recent studies have shown that laser-induced shock waves are used in laser stretch forming to create residual compressive stress in steels and aluminium alloys, improving fatigue life and

strength. LSP has advantages over shot peening such as reduced roughness, no geometric restrictions on the treated area, and improved resistance to fretting and stress corrosion cracking. The surface hardening effect of LSP decreases away from the surface [12–14].

1.1.3. Applications

Laser Shock Peening (LSP) has garnered significant interest for applications involving heavily-loaded parts due to its ability to greatly increase fatigue resistance and strength. General Electric holds more than 20 patents related to LSP, with applications found in high-cost, low-volume parts such as compressor blades, turbine fan blades, rotor components, discs, gear shafts, and bearing components. LSP is employed to enhance durability and resistance to foreign object damage in turbine fan blades, as well as to repair micro cracks in fastener holes of aircraft skins [15, 16, 12, 17].

1.2.1 Laser Cladding

Laser cladding is a versatile technique for applying functional layers and restoring parts by depositing a cladding material onto workpiece surfaces. It involves using powder injection, pre-placed powder, or wire feeding methods, with a laser beam generating a molten pool to melt the additional material. Various materials can be deposited, and the process is done track by track, allowing for targeted treatment. The thickness of each layer ranges from 0.05 to 2 mm, and multilayer cladding enables thicker coatings.

Laser-based material deposition is widely used for precise coating deposition and additive layer manufacturing. Specialized nozzle systems, equipment, and manufacturing strategies allow for the production of coatings and components in different sizes, from small to large areas or volumes. Powder injection can be off-axis or co-axial, with particles preheated or melted by the laser beam. Cross jets protect optical components, and heat shields safeguard equipment during long operations. Laser-clad surfaces exhibit a small dilution zone between the substrate and clad material, achieved by carefully adjusting process parameters and material combinations to match the workpiece's geometry.

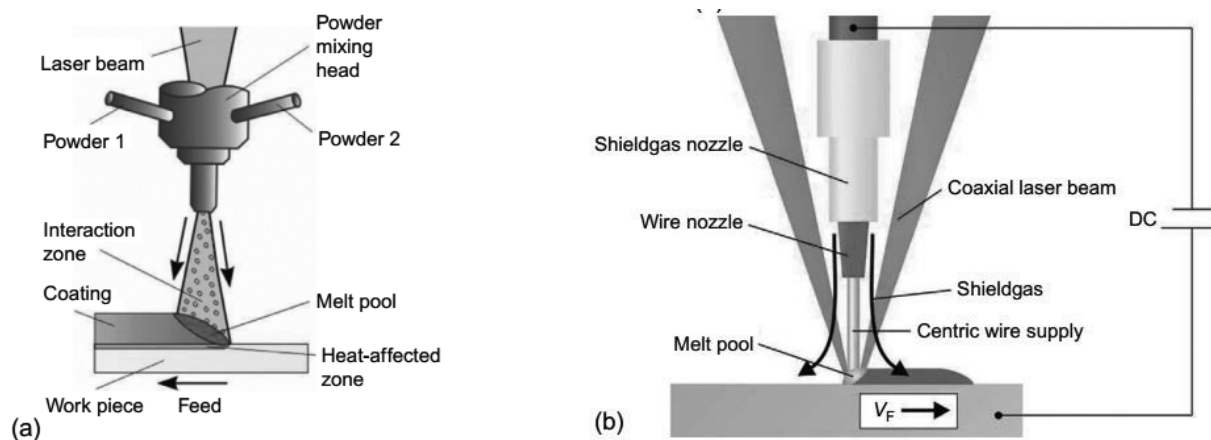


Figure 1. Schematic of a powder-based (a) and wire-based (b) cladding process that can also be used for 3D additive layer manufacturing [18]

1.2.2. Process development

Comparing the setup of a submillimeter cladding machine using a fiber laser source with high-power laser systems featuring larger melt-pool dimensions reveals significantly improved deposition rates. Previously, Nd:YAG and CO₂ laser sources were widely used but are gradually being replaced by more efficient and cost-effective diode laser sources, which can now reach power levels of up to 15 kW. This transition is especially important for applications that demand large surface coatings and the production of modern metal matrix composites utilized in industries such as mining, oil and gas, and tool and die manufacturing. These industries rely on high-power setups to meet their requirements effectively [18].

Despite its advantages, the current technology of laser cladding has encountered challenges in achieving high deposition rates when coating large areas with protective and functional coatings, such as clads for hydraulic cylinders. Industrial users require both superior coating quality and high productivity with cost efficiency [19, 20].

At present, two practical solutions are available to tackle this challenge using modern laser and laser-hybrid technologies. The commercial availability of high-power diode lasers, capable of reaching up to 10 kW, has paved the way for significantly improved deposition rates.

High-power diode lasers (HPDL) have a relatively high efficiency of around 35%, but their beam quality is comparably low. A study conducted by [21] demonstrated that HPDL is a valuable tool for laser cladding. While it is not problematic to achieve the required power density on the surface, the limitation arises when attempting to reach bores or other deep surfaces. Currently, there is no known experience regarding the use of high-power fiber lasers, which are now entering the market. These fiber lasers may be integrated into mobile clad installations, which are expected to be the next development for in-situ applications in repair laser cladding. Ongoing research activities aim to enhance the treatment time and process efficiency of laser cladding. The focus of this work is to gain a comprehensive understanding of laser cladding processes with high scan velocities, laser powers, and powder feed rates [22, 23]. Two main classes of material combinations are distinguished, clad materials on ferrous and on nonferrous substrates. Most cladding is done to improve surface properties of relatively heavy and cheap substrate materials. Therefore the ferrous substrates forms are now the majority.

- 1) Ferrous substrates: Co base powders, Ni base alloys, Fe base alloys
- 2) Non- Ferrous substrates: Ni base substrates, Al and Ti base substrates

1.2.3 Applications

Laser cladding is applied for coating, repair and refurbishment, rapid prototyping and rapid tooling.

Probably the most cladding applications are primarily concerned with creating a wear-resistant layer on mechanical components. A notable example is the cladding of hydraulic cylinders for heavy roof supports in Australian coal mines. This coating technique significantly extended the life of these components compared to the previously used method of applying hard chromium on steel. Additionally, the company has successfully used the panels to repair parts of heavy coal trucks.

Corrosion resistant layers are applied in marine applications, new as well for repair as well in high temperature applications in industrial furnaces but also in aircraft engines [24, 25, 7].

1.3. Laser alloying and dispersing

Laser alloying is the process of using a laser beam to melt the surface layer of a workpiece and add filler material to change the chemical composition of the metal. The process can be performed in one step, where gas, powder, or wire is continuously fed into the weld pool through a nozzle attached to the laser tool. Alternatively, this can be done in a two-step process in which a layer of filler material is pre-deposited on the workpiece surface and then melted and mixed with the base material by laser remelting [15, 26, 8].

For larger surfaces, the limited width of the treated surface layer that can be achieved in a single pass requires multiple successive laser processes. In the case of laser alloying, the usual goal is to completely dissolve the solid constituents of the filler and evenly distribute the alloying elements in the melt. Laser dispersion, on the other hand, follows the same process principle, where solid particles are introduced into a molten bath, but do not completely dissolve, producing a metal matrix composite rather than an alloy [27].

In that case, after the agglomeration process, rapid cooling and solidification occurs as the laser beam passes through the surface. Cooling rates range from 10^3 to 10^6 K/s and solidification rates are similar to laser remelting. These rapid cooling and solidification conditions in combination with laser parameters and transfer speeds may lead to fine microstructures under non-equilibrium conditions.

1.3.2. Process development

Laser alloying and dispersing processes aim to enhance the properties of materials' surface layers. High-power CO₂, Nd:YAG, and diode lasers are commonly used for these purposes, with recent preference for diode lasers due to their shorter wavelengths and higher efficiency. Process development focuses on filler material delivery, laser parameter optimization, and online monitoring and control. Gas alloying can be performed in ambient or controlled atmospheres, while powder feedstock alloying requires careful nozzle design. Laser parameters affect the melt pool geometry, and sensors are used for process monitoring. Real-time control systems and model-free fuzzy control methods improve stability and reproducibility. Overall, advancements in laser alloying and dispersing techniques aim to achieve improved alloying results and process control [26, 28].

1.3.3 Applications

Laser alloying and dispersing have demonstrated their capability to produce layers with exceptional properties, making them suitable for various applications. Recent investigations have deepened our understanding of the process behavior and enabled advancements in process control for industrial applications. Examples of prospective applications include improving the wear resistance of metal forming tools through laser dispersing of zirconia in tool steel and cast iron, enhancing the wear and corrosion resistance of titanium for medical technology applications through controlled atmosphere gas alloying, and providing cost-effective wear-resistant surfaces on aluminium engine blocks via laser surface alloying. The use of diode lasers in alloying processes has shown promise for reducing processing time and achieving economical alloying in mass production. Overall, laser alloying technology is becoming increasingly attractive for a wide range of industrial applications [8, 12, 15, 26, 27].

2. CONCLUSION

All laser surface modification techniques have great potential to cover different surface property requirements. More research can be done on optimization and process development in terms of efficiency, process speed, etc. This will help in achieving a broader application of laser surface treatment technology in industry. Computational modelling is also very critical in this development. Table 1 below shows some representative parameters for the laser surface modification processes discussed in the article.

Table 1 : Process parameters for laser surface modification techniques.

Methods	Laser type	Typical Values	
		Average laser power in kW	Treated area per time [cm ² /min]
Laser Hardening	Excimer, Nd:YAG, Nd:Glass	0.04 – 0.16	0.3 - 60
Laser Cladding	Diode, Nd:YAG, CO ₂	0.2 - 5	10 - 50
Laser Alloying	Diode, Nd:YAG, CO ₂	2 - 6	1.5 - 50

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was created as a result of the project based learning - PBL in the framework of EURECA PRO/European University in Responsible Consumption and Production as research and academic collaborations between University of Leoben, Austria and Silesian University of Technology, Poland.

REFERENCES

- [1] H. Vasudev, C. Prakash, Handbook of Laser-Based Sustainable Surface Modification and Manufacturing Techniques, Taylor & Francis Group, Milton 2023.
- [2] M. A. Montealegre, G. Castro, P. Rey, J.L. Arias, P. Vázquez, M. González, CM, 2010, 1, 19.
- [3] B.L. Mordike, Progress in Materials Science, 1997, 42, 357.
- [4] P. Schaaf, Progress in Materials Science, 2002, 47, 1.
- [5] A. Kruusing, Optics and Lasers in Engineering, 2004, 41, 307.
- [6] W.M. Steen, Laser Material Processing, Springer London, London 1998.
- [7] W.M. Steen, J. Opt. A: Pure Appl. Opt., 2003, 5, S3-S7.
- [8] A. Sharma, ed., Engineering steels and high entropy-alloys, IntechOpen, London 2020.
- [9] R. Fakir, N. Barka, J. Brousseau, Case Studies in Thermal Engineering, 2018, 11, 15.
- [10] R. Ganeev, Journal of Materials Processing Technology, 2002, 121, 414.

- [11] Alaa Fadhil I Idan, Akimov O., Golovko L., Goncharuk O., Kostyk K., A.F.I. Idan, A. O., G. L., G. O., K. K., *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2016, 2, 69.
- [12] C. Montross, *International Journal of Fatigue*, 2002, 24, 1021.
- [13] I. Altenberger, I. Nikitin, *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*, 2004, 59, 269.
- [14] A. Ahmad Siddiqui, A. Kumar Dubey, in *Engineering steels and high entropy-alloys*, (Ed: A. Sharma), IntechOpen, London 2020.
- [15] W. Zhang, Y.L. Yao, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, 124, 369.
- [16] W. Zhang, Y.L. Yao, I.C. Noyan, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, 126, 10.
- [17] C. Leyens, E. Beyer, in *Laser Surface Engineering*, Elsevier 2015, pp. 181–192.
- [18] *Laser Surface Engineering*, Elsevier 2015.
- [19] E. Beyer, ed., *Lasers in manufacturing 2005: Proceedings of the Third International WLT Conference Lasers in Manufacturing, LIM 2005, Munich, Germany, June 13th - 16th, 2005*, AT-Fachverl., Stuttgart 2005.
- [20] F. Vollertsen, K. Partes, J. Meijer, E. Beyer, F. Dausinger, A. Ostendorf, A. Otto, *International Journal of Human Resources Development and Management*, 2005.
- [21] S. Barnes, N. Timms, B. Bryden, I. Pashby, *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 138, 411.
- [22] D. Koti, J. Powell, H. Naesstroem, K.T. Voisey, *Journal of Laser Applications*, 2023, 35, 12025.
- [23] J.M. Dowden, *The theory of laser materials processing: Heat and mass transfer in modern technology* / John Dowden (ed.), Springer; Bristol : Canopus Academic Pub, Dordrecht 2009.
- [24] J. M. Dowden, ed., *The theory of laser materials processing: Heat and mass transfer in modern technology* / John Dowden (ed.), Springer; Bristol : Canopus Academic Pub, Dordrecht 2009.
- [25] W. M. Steen, ed., *Laser material processing*, 3rd ed., Springer, London, New York 2003.
- [26] J. Yao, L. Wang, Q. Zhang, F. Kong, C. Lou, Z. Chen, *Optics & Laser Technology*, 2008, 40, 838.
- [27] J. Domagała-Dubieli, K. Bilewska, M. Pawlyta, J. Kulasa, D. Janicki, *Materials* (Basel, Switzerland), 2022, 15.
- [28] J. Lawrence, L. Li, *Applied Surface Science*, 2000, 154-155, 664.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Improving the service life of elements made in 3D printing technology by using an additional temperature control system in the printer's construction

S. Nowak^a, M. Brączek^a, J. Bugła^a, E. Nawalińska^a, M.M. Szindler^b, J. Popis^b, M. Szindler^c, B. Tomiczek^c

^a Students of the Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, e-mail: sn307434@student.polsl.pl

^b Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials, e-mail: magdalena.szindler@polsl.pl

^c Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Scientific and Didactic Laboratory of Nanotechnology and Material Technologies

Abstract: The work presents the process of designing and printing samples using 3D printing technology. The aim of the project is to select the parameters of 3D printing and to create new solutions introducing improvements in the printer, thanks to which it is possible to eliminate the biggest disadvantage of printed objects, which is the low tensile strength of the layers. Layer separation, sometimes referred to as delamination, is a problem in 3D printing related to poor adhesion between layers. It results in a reduction of tensile strength by about 50%. Improving layer adhesion would result in increased durability of printed elements, and thus a reduction in operating costs. In the era of climate change, every opportunity to save energy and materials is a sought-after feature. The solution to this problem proposed by the team of students consists in introducing an additional element to the 3D printing technology that will temporarily increase the temperature of the material, thanks to which the adhesion of the layers will increase, and thus the tensile strength will be improved. It was assumed that a diffuse laser beam was used to liquefy the material.

Keywords: 3D print, layer adhesion, temperature control system, strength properties

1. INTRODUCTION

In recent years, there has been a dynamic development of 3D printing. Thanks to new technologies, innovative solutions, and modern devices, it is possible to create unique projects. An interesting solution is 3D printers that enable the creation of spatial prints. 3D printing allows for the production of objects used in everyday life, as well as machine parts and biomedical implants. Prototype designs of individual components can also be used in the aerospace industry and by architects to prepare miniature versions of buildings [1-2].

The origins of 3D printing technology date back to the 1970s. In 1971, Frenchman Pierre A. L. Ciraud wrote a paper on a method of producing objects with arbitrary geometry by adding

material in powder form, using a source of energy. Two years later, a paper was published that became the basis of the technology known today as Selective Laser Sintering (SLS). Charles Hull is considered the father of 3D printing as he created the first official method of three-dimensional printing - stereolithography (SLA) - and was the first to establish a company producing 3D printers, 3D Systems [1-3].

The Fused Deposition Modeling (FDM) or Fused Filament Fabrication (FFF) technology belongs to the group of additive manufacturing techniques, characterized by the extrusion of material from printing heads. It is currently the most widespread 3D printing method worldwide. It uses thermoplastics in the manufacturing process to shape geometries at high temperatures. Models printed using this technology are created by layering successive semi-liquid material, which is extruded from a heated nozzle. The material used takes the form of a filament with a constant diameter (1.75 mm or 2.85 mm) wound onto a spool [2-5].

Filament with the consumable material is suspended on the arm of the 3D printer and can be located in various parts of the device. During printing, it is continuously delivered to the extruder and the printing head of the device. To facilitate this, the filament is usually guided to the extruder through a tube. The extruder consists of a gear wheel and a bearing, between which the filament is fed. The bearing is pressed against the gear wheel by a spring. The gear wheel is driven by a stepper motor, which feeds the filament to the printing head of the 3D printer. The printing head is heated to a temperature that melts the filament. Typically, temperatures range from 190°C to 260°C. The filament is not transformed into a liquid state, it does not drip from the printing head, but rather a semi-liquid state that is sufficient to draw shapes on the 3D printer's build plate. The extruded filament, once deposited on the build plate, solidifies immediately (although in the case of printing models on a heated build plate, it remains pliable). The printing head moves over the build plate in the XY axes (or the head moves in the X axis, and the build plate in the Y axis) and, similar to a plotter, applies the semi-liquid plastic material onto the surface of the build plate, drawing the shape with it. In this way, the first layer of the model is created. After drawing the first layer, depending on the design of the 3D printer, the build plate is lowered in the Z-axis, or the printing head is raised in the Z-axis, and another layer of the 3D model is applied. Layer by layer, the three-dimensional model is created [3-5].

The materials used in the FDM method are ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), one of the most popular thermoplastics used in the industry, PLA (Polylactic Acid), a thermoplastic derived from organic compounds, nylon (Polyamide), a highly durable material used in applications like ropes, PETG (Polyethylene Terephthalate), a material commonly used in plastic bottle production, and TPU (Thermoplastic Polyurethane), a flexible material resembling rubber [5].

A crucial characteristic of the printed material is proper layer adhesion. The extruded molten material from the printing nozzle is pressed onto the previously deposited layer. The high process temperature and applied pressure allow for the re-melting of the upper surface of the previously applied layer and its optimal fusion with the newly added layer of thermoplastic material. The orientation of the printed object on the build platform is a significant factor influencing on its mechanical properties. FDM-printed parts exhibit significant anisotropy, meaning they demonstrate different mechanical properties in different directions. The bonding strength between individual layers is always lower than the strength of the constituting material. Consequently, the strength of parts in the Z-axis will always be lower than the strength achieved in the XY plane [1,6].

FDM technology is one of the most cost-effective methods for producing components from thermoplastic materials due to its short production process and minimal material waste. This technology allows for printing parts with high-strength thermoplastics that exhibit excellent mechanical properties and resistance to high temperatures and chemicals. It enables the production of dimensionally accurate printed parts with tolerances ranging from ± 0.15 to ± 0.3 mm, depending on the placement on the build platform and complexity of the geometry. However, FDM prints display significant anisotropy in different parts. The strength properties in the Z-axis are considerably lower than those achieved in the XY plane. Therefore, FDM technology is not suitable for constructing heavily mechanically stressed parts or components. Additional finishing processes are necessary to remove characteristic layer lines [2,6].

To achieve better print quality, heated build chambers are often used in 3D printers. The heated build chamber aims to maintain a constant temperature during the print, thereby avoiding conditions that negatively impact print quality. Such a chamber is particularly important for printing with thermoplastics like ABS or nylon, which require stable thermal conditions. By employing a heated build chamber, the risk of material shrinkage during printing is reduced, leading to more accurate and precise prints and fewer print defects such as cracks and distortions. Additionally, a heated build chamber allows for printing larger parts with a homogeneous structure, resulting in better print quality [7,8]. The use of a heated build chamber also reduces print time, increasing work efficiency [9].

The most commonly used 3D printing technologies include [9-11]:

- FDM/FFF technology, such as HP Multi Jet Fusion, which is the most established 3D printing technology on the market. Among companies that utilize FDM/FFF, 71% employ the technology in-house;
- SLS technology - the majority of users (42%) rely on external services;
- SLA - in the past, stereolithography was the primary technology, but it was quickly replaced by faster technologies, but in 2020, the SLA market size was estimated at \$1.6 billion;
- Metal 3D printing - is gaining popularity due to increasing concerns about the use of plastics in various industries. In 2018, 65% of 3D printers used plastics, while 36% used metals.

This work presents a project of a 3D printed element using a 3D printer. The samples were printed with PLA. Subsequently, an additional heating source in the form of a laser beam was introduced. The mechanical properties of both types of samples were examined. The study aims to compare the layer adhesion relative to the baseline strength of the tested material.

2. MATERIALS AND METHODS

The models of rectangular samples were programmed using a standardized command language for CNC devices. The samples for testing were prepared using the FDM process on an Ender-5 Pro 3D printer. The PLA filament with a diameter of 1.75 ± 0.05 mm and a density of 1.24 g/cm^3 was used for printing the samples. The nozzle temperature during printing reached 200°C . The printing speed was set at 40 mm/s, and the layer thickness was 0.32 mm. In order to improve the strength properties of the printed elements, a laser with a power of 1.5 W and a wavelength of 450 nm was used to provide heat to the place of contact between the extruded material and the already printed one. The applied solution is designed to improve the adhesion of the layers and thus increase the mechanical strength of the printed samples. To compare the use of a laser in the process, a set of samples was printed vertically without using and with different laser power: 30, 50, 70 and 100%.

Impact tests were carried out using the Zwick Roell HIT25P Charpy. Sample breakthroughs were then observed using a Leica DVM6 digital microscope.

3. RESULTS

Charpy impact test results are shown in Figure 1. Table 1 explains the designation of the test samples. Samples were examined without the use of the laser as well as with its use with the power of: 30, 50, 70 and 100%.

Table 1. Explanation of sample markings

Sample	1	2	3	4	5	6
Explanation	Cura 5.2.1 slicer default settings	Custom G-code	Custom G-code + Laser 30%PWM	Custom G-code + Laser 50%PWM	Custom G-code + Laser 70%PWM	Custom G-code + Laser 100%PWM

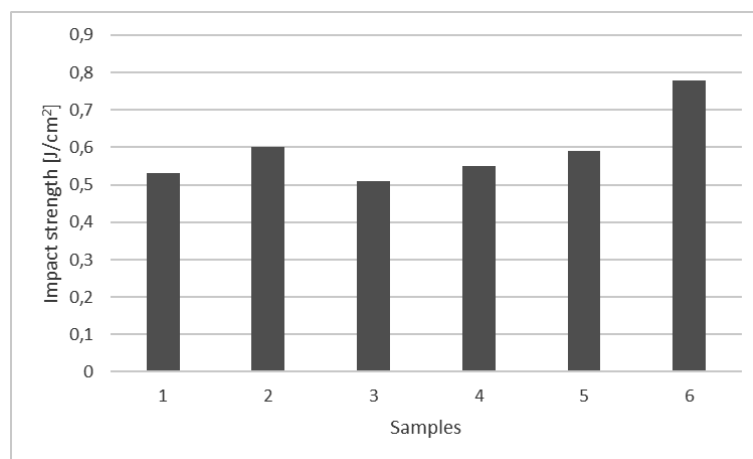


Figure 1. Charpy impact test results

The highest impact strength value obtained in the presented tests is 0.78 J/cm^2 using 100% laser power. For comparison, the highest impact strength for samples printed without a laser is 0.6 J/cm^2 . Scaffolds printed with PLA in the Charpy impact test obtained 0.53 J/cm^2 [12].

Figure 2 shows the fracture images of the samples after the impact test. Figure 2 a) shows a sample without the use of a laser with visible single lines in the layer. Figure 2 b) shows a sample using 100% laser power, which results in a uniform print structure.

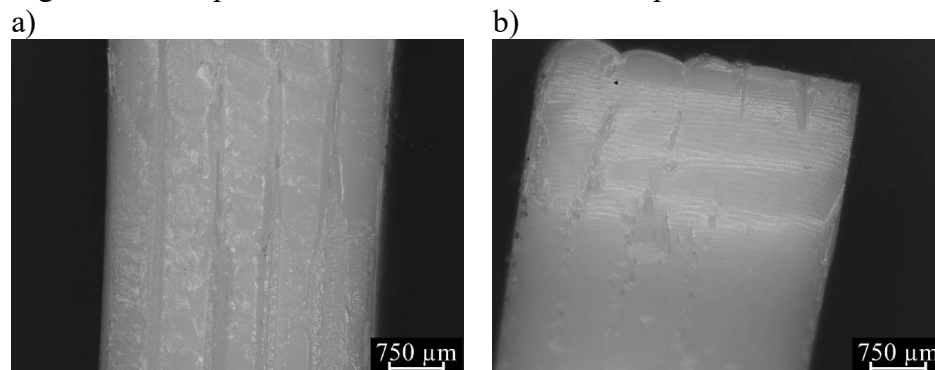


Figure 2. Digital microscope photos of sample breakthroughs a). without the use of a laser, b). using a laser

4. CONCLUSIONS

The obtained results of impact strength show that with the increase of the laser power, the resistance to cracking under dynamic load increases. The best results were obtained for samples with 100% laser power and is equal 0.78 J/cm^2 . The use of a laser in 3D printing as an additional source of heat results in unification of the structure and increase in mechanical strength.

BIBLIOGRAPHY

1. S. Aranda, 3D Printing Failures: 2022 Edition: How to Diagnose and Repair ALL Desktop 3D Printing Issues, ISBN: 979-8784041258, 2021.
2. L. Wallach Kloski, N. Kloski, Getting Started with 3D Printing: A Hands-on Guide to the Hardware, Software, and Services That Make the 3D Printing Ecosystem, Make Community, LLC, 2021.
3. N. Shahrubudin, T.C. Lee, R. Ramlan, An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications, *Procedia Manufacturing* 35, 2019, 1286–1296.
4. A. M. T. Syed, P. K. Elias, B. Amit, B. Susmita, O. Lisa, & C. Charitidis: Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities, *Materials today*, Vol. 1, pp. 1-16, 2017.
5. L. Jian-Yuan, A. Jia, & K. C. Chee: Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials, *Applied materials today*, Vol 7, pp. 120-133, 2017.
6. Website: <https://get3d.pl/2021/07/05/podgrzewana-komora-robocza-czy-to-istotny-element-drukarki-3d/>
7. J. Zaburko, A. Urzędowski, J. Szyłczyk-Cieplak, A. Trník, Z. Suchorab, G. Łagód, Analysis of thermal operating conditions of 3D printers with printing chamber, *Central European Symposium on Thermophysics 2021 (CEST 2021)*.
8. Website https://minifactory.fi/technology/heatedchamber/?gclid=CjwKCAjw0N6hBhAU EiwAXabTWmpH4gd6slEOCp5XQmNwoPU8OqkZtFqHH5CwqHQ4xKf_tkmGqOgbxoCIFsQAvD_BwE
9. Website: <https://www.tonerbuzz.com/blog/3d-printing-statistics/>
10. B. Redwood, F. Schöffner, B. Garret, *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*, 3D Hubs, 2017.
11. J. Maszybrocka, M. Dworak, G. Nowakowska, P. Osak, B. Łosiewicz: The Influence of the Gradient Infill of PLA Samples Produced with the FDM Technique on Their Mechanical Properties, *Materials* 2022, 15(4), 1304.
12. K. V. Niaza, F. S. Senatov, A. S. Stepashkin, N. Y. Anisimova, M. V. Kiselevsky, Long-Term Creep and Impact Strength of Biocompatible 3D-printed PLA-based Scaffolds, *Nano Hybrids and Composites*, 2017, 13, 15–20.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Influence of laser surface treatment on structure and properties of the steel

E. Oghenerukevwe ^a, J. Munyika Kapala ^a, M. Bonek ^b

^a Montanuniversitaet Leoben, Austria, Department of Metallurgy,

email: eru.oghenerukevwe@stud.unileoben.ac.at, joseph-munyika.kapala@stud.unileoben.ac.at

^b Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials

email: mirosław.bonek@polsl.pl

Abstract: The project aims at acquiring by students the ability to analyze the available literature and test results of tool materials in order to obtain the influence of technological parameters of the laser surface treatment on the property of these steels with a special tribological characteristic. The scientific goal of the project is the impact of the use of the laser effect in the process of laser heat treatment and laser alloying of surface layers of steels, such as tool materials, on functional properties. The alloying process is to take into account the enrichment of the structure, additional increase hardness and microhardness, and improvement in the quality of the tribological surface layers. Research undertaken to optimize the technological conditions of laser remelting/alloying in order to give a specific fine-grained structure of the surface layer, additionally, a significant increase in the tribological properties of the surface.

Keywords: steel, laser treatment, microstructure,

1. INTRODUCTION

Engineering materials e.g., steels, have been used for multiple applications which range from domestic to industrial applications e.g., automotive, aerospace, and tooling industries due to their properties such as anti-corrosion resistance, wear resistance, oxidation, and strength to weight ratios [1]. The failure of the materials occur through various mechanisms and usually start at the surface due to degradation via exposure to weather elements or operational usage/applied load. Steel is used in many applications due to its relatively low cost, good availability, its good mechanical properties and corrosion resistance coupled with excellent machining and welding properties. Also, they were affected by service conditions, which affects its service life.

This will require mitigation or elimination methods which also includes topological modification and/or changing the microstructure of the region that is near the surface of the produced component without affecting its weight or chemical composition. This is carried out via several techniques e.g., include coating (e.g., nitriding and physical/chemical vapor

deposition), ion implantation, and direct surface modification (e.g., laser peening [2], ultrasonic peening [3], shot peening [4]).

These methods are expensive, poor precision, require the use of chemicals which are limited in supply, uneven passivation regions, and may have negative environmental impact. Therefore, there is a need to develop and adopt methods that will meet the requirements of the United Nations SDGs with regards to responsible consumption and production (SDG 12) when manufacturing and processing steels and steel products.

Light amplification by stimulated emission of radiation (laser) is a monochromatic, convergent, coherent beam of electromagnetic radiation with a wavelength which range from ultra-violet to infrared. Under different configurations, it can be linearly propagated and focussed on a spot/substrate in an object placed in any medium under an interaction/pulse time (10^{-3} to 10^{-15} s) [5].

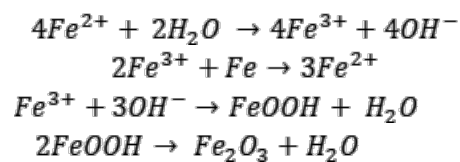
Laser processing technology is an economic, environmentally friendly, and efficient technology when there is a requirement for improved performance from steel components which can lead to cost reduction via increased product life [1,5-7]. It is increasingly preferable to other traditional methods which require heat treatment because longer process times due to the need for longer cooling periods [7].

Laser material processing is classified based on the need for energy (limited or high) and the level of phase transformations (little or significant). When laser is used for surface modification and material processing of steel, it can change the surface chemistry and topology of the material and improve its electrochemical characteristics. This is due to high-speed shear phase transformations within the steel matrix which will lead to the generation of thermoplastic stresses during the heating and cooling phase [8,9].

It is influenced by laser and technological parameters (e.g., the distance between raster lines, scanning speed, laser power and pulse width) [10] and material properties e.g., microchemical heterogeneity, degree of carbide dissolution, and the presence of non-metallic inclusions (NMI) [8-11].

1.1. Advantages and limitations

An advantage of laser surface treatment is improvement of resistance to cavitation erosion and substrate corrosion via surface passivation due to the formation of compact and well-covered protective films [3,4]. The reaction is shown below:



Laser irradiation can alter the chemical composition due to chromium depletion after growth of Cr-containing oxide) and microstructure of the surface thus deteriorating the corrosion resistance [11]. Also, it was observed that a higher corrosion resistance occurred in austenitic steel after it was exposed to selective laser melting and cooled rapidly due to a homogenous distribution of alloying elements and the non-formation of Cr-depleted regions [12].

Other advantages include ease of use [1], relatively low cost of the technology and high productivity, variable beam sizes, efficient processing of materials [9], a reduced heat affected zone (HAZ) [11], and the elimination of finishing operation and/or surface cleaning [11].

There are several limitations of laser surface treatment, and they include [13]:

- There is a high initial capital cost (CAPEX) due to the acquisition of laser sources with high output power, the training of operators [1] and the purchase of special clothing.
- The formation of films made of chromium carbides can lead to the local depletion of the chromium and lead to the reduction of the corrosion performance. Also, the presence of intermetallic phases can lead to pitting corrosion.
- It is difficult to treat the surface of components with complex and intricate geometry.
 - There is a possibility of material hardness and wear.

1.2. Key effects of laser surface treatment of steel

There are some key effects of laser surface treatment on steel, and they include:

• Residual Stress Modification:

When steel is subjected to stress beyond their elastic limits, it undergo plastic deformation and the residual stress remains in the material even in the absence of external loading or thermal gradients. Residual stresses can lead to cracking, corrosion, warping and distortion of the steel component

Residual Stress relief methods include low-temperature stress relief, mechanical stress relief, and surface modification. Laser treatment can heat up the surface of steel and when it is cooled, a thermal gradient is created between the surface and interior of the object. When the region in the material tries to cool, it is constrained by the material in the outer region. The thermal gradient can induce residual compressive stress on the steel surface and tensile residual stresses in the inner region. This leads to the development of non-uniform stress and localized variations of the amount of thermal contraction.

• Phase transformation

Phase transformation is a change in the metallurgical phases present in an alloy, and mechanical processing can induce residual stress in metals due to a change in density and strength. During a phase transformation in steel, there is a volume difference between the newly formed phase and the surrounding unaffected material, and it leads to the creation of residual stress which can lead to expansion or contraction of the material [14].

The resultant deformation varies linearly with the applied stress and the fractional volume change on transformation and inversely as the flow stress of the weaker phase. There is the occurrence of plastic flow which is usually confined to the weaker phase which is a result of strain accommodation due to the transformation front [14].

In steel, there is the phase transformation from austenite to martensite and this is shown below in Figure 1. Depending on the steel composition, the laser parameters can be modified to influence phase transformation in order to improve the steel's mechanical properties e.g., improvement in hardness and strength [14].

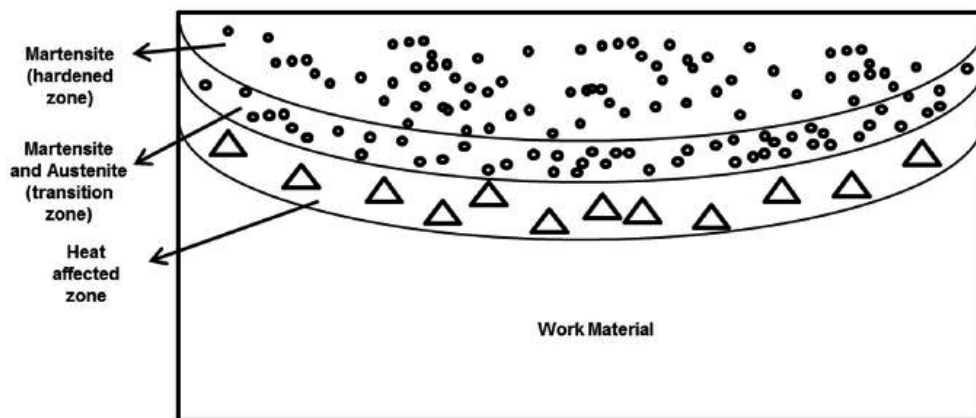


Figure 1. Schematic of different zones of laser transformation hardening [15].

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was created as a result of the project based learning - PBL in the framework of EURECA PRO/European University in Responsible Consumption and Production as research and academic collaborations between University of Leoben, Austria and Silesian University of Technology, Poland.

BIBLIOGRAPHY

1. A.H. Al-Moubaraki, Potential of borage flowers aqueous extract, *Borago officinalis* L., against the corrosion of mild steel in phosphoric acid, *Anti-Corros. Methods Mater* 65 (1) (Jan. 2018) 53–65, <https://doi.org/10.1108/ACMM-04-2017-1788>.
2. Kim, J.H.; Lee, W.R.; Kim, T.G.; Cheong, S.K. Micro-shockwave measurement and evaluation of laser shock peening. *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B* 2011, 35, 1041–1046.
3. Amini, S.; Kariman, S.A.; Teimouri, R. The effects of ultrasonic peening on chemical corrosion behavior of aluminum 7075. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017, 91, 1091–1102.
4. Tsai, W.T.; Chang, C.S.; Lee, J.T. Effects of shot peening on corrosion and stress corrosion cracking behaviors of sensitized alloy 600 in thiosulfate solution. *Corros. Sci.* 1994, 50, 98–105.
5. Dutta Majumdar, J., Manna, I. Laser processing of materials. *Sadhana* 28, 495–562 (2003). <https://doi.org/10.1007/BF02706446>.
6. Alan Harnett, Muhannad Ahmed Obeidi, Inam Ul Ahad, Ahmed R. Al-Hamaoy, Comparing the surface hardness of mild steel processed with CO₂ and fibre lasers, *Results in Materials*, Volume 18, 2023, 100400, ISSN 2590-048X, <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100400>.
7. Gisario, A., Barletta, M. & Veniali, F. Laser polishing: a review of a constantly growing technology in the surface finishing of components made by additive manufacturing. *Int J Adv Manuf Technol* 120, 1433–1472 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08840-x>

8. Kim, J.H.; Lee, W.R.; Kim, T.G.; Cheong, S.K. Micro-shockwave measurement and evaluation of laser shock peening. *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B* 2011, 35, 1041–1046.
9. Amini, S.; Kariman, S.A.; Teimouri, R. The effects of ultrasonic peening on chemical corrosion behavior of aluminum 7075. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017, 91, 1091–1102.
10. Ma, C.; Andani, M.T.; Qin, H.; Moghaddam, N.S.; Ibrahim, H.; Jahadakbar, A.; Amerinatanzi, A.; Ren, Z.; Zhang, H.; Doll, G.L.; et al. Improving surface finish and wear resistance of additive manufactured nickel-titanium by ultrasonic nano-crystal surface modification. *J. Mater. Process. Technol.* 2017, 249, 433–440.
11. Adijans, Imants & Lazov, Lyubomir & Ilieva, M & Nikolova, M. (2023). Investigation of the change in wettability properties and corrosion behavior of AISI 304 after laser surface texturing. *Journal of Physics: Conference Series*. 2487. 012040. 10.1088/17426596/2487/1/012040.
12. Sun S-H, Ishimoto T, Hagihara K, Tsutsumi Y, Hanawa T and Nakano T 2019 Excellent mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel with a unique crystallographic lamellar microstructure via selective laser melting *Scripta Mater.* 159 89-93.
13. Kim, K.T.; Kim, Y.S. Effect of the amplitude in ultrasonic nano-crystalline surface modification on the corrosion properties of alloy 600. *Corros. Sci. Technol.* 2019, 18, 196–205.
14. Greenwood Geoffrey Wilson and Johnson R. H. 1965, The deformation of metals under small stresses during phase transformations. *Proc. R. Soc. Lond.* A283403–422, <http://doi.org/10.1098/rspa.1965.0029>
15. Jeyaprakash, N. & Yang, Che-Hua & Kumar Durairaj, Dr-Raj. (2020). Laser Surface Modification of Materials. 10.5772/intechopen.94439.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Návrh rámu dronu pre priemyselné využitie

M. Orolin^a, E. Tillová^a, P. Palček^a, M. Bonek^b

^a Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra materiálového inžinierstva, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

email: orolin2@stud.uniza.sk

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, ul. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice, Poland

Abstrakt: Príspevok s názvom „Trendy v konštrukcii autonómnych lietajúcich prostriedkov pre priemyselné využitie“ je zameraný na návrh konceptu modulárneho lietajúceho prostriedku. V práci som sa zaoberal všeobecnou stavbou dronov a momentálnymi trendmi v priemysle

Abstract: The presented article entitled "Trends in the design of autonomous flying vehicles for industrial applications" is focused on the design of a modular aircraft concept. In my work I dealt with the general construction of drones and current trends in the industry.

Keywords: dron, návrh rámu

1. ÚVOD

Drony sa stali významnou súčasťou moderného sveta a ich dôležitosť nadálej rastie. Pomáhajú zvyšovať produktivitu a efektivitu práce, znižovať výrobné náklady a pracovné zaťaženie a rovnako pomáhajú aj pri zdokonaľovaní služieb a obchodných stratégií. Dron je označenie pre bezpilotné lietadlo (UAV – unmanned aerial vehicle), teda lietadlo bez posádky, ktoré môže byť riadené na diaľku alebo lietať samostatne pomocou naprogramovaných plánov či pomocou zložitejších autonómnych systémov.

Drony si v súčasnosti získavajú pozornosť verejnosti a sú používané stále väčším množstvom ľudí. Hoci ich cesta sa začala písať už na konci prvej svetovej vojny, ich komerčné využívanie sa začalo až v posledných rokoch. Drony ponúkajú široké spektrum užitočných vlastností, sú využívané v obrovskom množstve vedných odborov, ale aj v umení a svoje neodmysliteľné miesto majú predovšetkým v armádnom sektore.

Počas druhej svetovej vojny boli už použité lietadlá s rádiovým navádzaním. Postupným zdokonaľovaním vznikli autopiloty, ktoré pomáhali pilotom v nepriaznivých poveternostných podmienkach a za zlej viditeľnosti. Aktuálne riadi autopilot 95 % letu lietadla. Z týchto systémov sa postupne vyvinuli plne autonómne letúne, ktoré sa používajú na monitorovanie, špionáž a prieskumy. Za zmienku stoja bezpilotné lietadlá, ktoré boli spočiatku využívané

armádou ako testovacie terče protiletadlových striel, neskôr ako prieskumné lietadlá, až sa nakoniec použili ich ozbrojené verzie na diaľkové ostreľovanie a bombardovanie.

Dnes sú známe drony, ktoré umožňujú upevnenie rôznych nástrojov, akými sú napr. skenery, rôzne typy radarov alebo kamier. Výstupy z týchto nástrojov sú používané napr. v kartografii, lesníctve, ekológii, stavebníctve a pod. Bezpilotné lietadlá, lietajúce mini roboty alebo miniatúrne bezpilotné lietadlá nachádzajú svoje uplatnenie aj v sektore verejných služieb, napríklad pri reakcii na katastrofy, pri policajných akciách či pri hasení požiarov.

Každý dron predstavuje zložitý mechanizmus, pri zostrojovaní ktorého sú potrebné vedomosti z viacerých vedných odborov, predovšetkým elektroniky, mechaniky, fyziky, informatiky a matematiky.

Úlohou riešenej práce bolo pozrieť sa na jednotlivé časti dronu a navrhnúť koncept modulárnej konštrukcie autonómneho lietajúceho prostriedku a vrátane kompletnej technickej dokumentácie.

2. NÁVRH KONCEPTU MODULÁRNEJ KONŠTRUKCIE AUTONÓMNEHO LIETAJÚCEHO PROSTRIEDKU

Pod pojmom bezpilotný vzdušný prostriedok, často nazývaný aj dron, rozumieme diaľkovo riadené alebo autonómne lietadlo alebo model lietadla, resp. vzdušného prostriedku. Termín dron však môže byť veľmi zavádzajúci, pretože existuje mnoho rôznych druhov. Dnes je tradičný dron tvorený rámom. Pre každé rameno je samostatný motor, ktorý má prevažne jednu vrtuľu. Má tiež elektronický regulátor otáčok, ktorý prevádzkuje motory. Riadiaca jednotka (letový kontrolér) spracováva všetky podstatné informácie o ovládaní dronu pilotom a o pohybe dronu z inerciálnej mernej jednotky (IMU), ktorá je internou alebo externou súčasťou riadiacej jednotky a vytvára signály pre ovládanie motorov. Vysielač a prijímač pomáhajú pri komunikácii medzi dronom a osobou na zemi, ktorá ho ovláda. Prijímač je pripojený k riadiacej jednotke. Poslednou hlavnou súčasťou je batéria, poháňajúca celé toto zariadenie.

Telo dronu môže mať rôzne podoby a rôzne formy pohonov. Najčastejšie sa stretávame s dronmi, ktoré sa pohybujú za pomoci vrtúľ. Podľa počtu vrtúľ rozoznávame helikoptéry, trikopty, kvadkopty a multikopty. Drony však môžu mať aj inú konštrukciu, napr. vo forme tzv. svahového krídla. Súčasťou UAV je aj nezávislý systém riadenia, ktorý je umiestnený priamo na zariadení a umožňuje autonómne vykonávanie niektorých úloh.

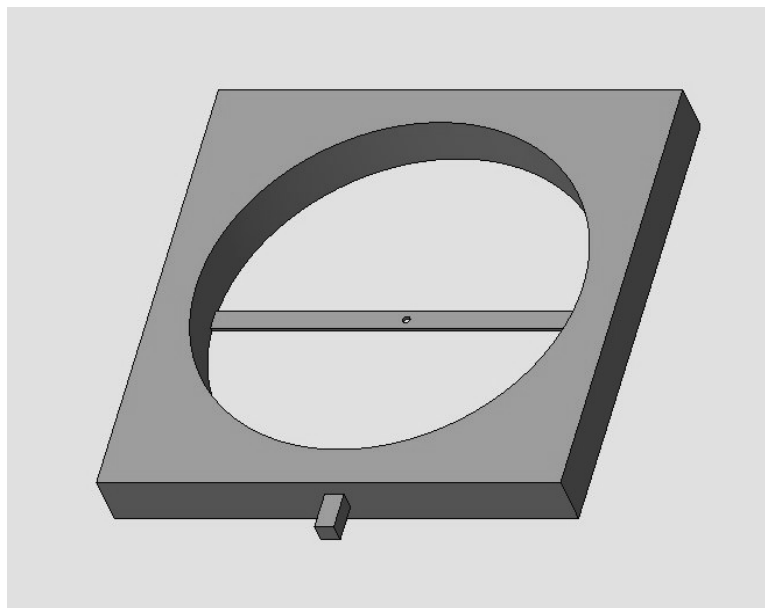
Drony sú vybavené výkonnými senzormi, najmä kamerovými systémami a rôznymi druhmi snímačov na rozpoznávanie prostredia a objektov v prostredí. Okrem toho môže byť dron vybavený aj nosným zariadením na prevážanie ďalších objektov podľa konkrétneho spôsobu využitia. Samotný prostriedok je súčasťou širšieho systému, ktorý pozostáva z ďalších súčastí. K najdôležitejším patrí pozemný, resp. vzdialený systém riadenia, systém na prenos, uchovávanie a spracovanie dát a ďalšie podporné systémy.

Prvým krokom pri navrhovaní dronu je určenie jeho typu s ohľadom na akú činnosť sa bude dron používať. Návrh dronu bol modelovaný v programe Creo Parametric. Pri vlastnom navrhovaní boli na začiatku zvolené tri veľkosti lietajúceho prostriedku. Každá veľkosť mala rovnaké časti, až na batériu a rám. Veľa modulárnych lietajúcich prostriedkov má len jeden rám, do ktorého sa napojí toľko ramien koľko chceme, resp. koľko potrebujeme. V práci sme sa rozhodli pripraviť tri rozdielne rámy a po vytvorení všetkých častí bol poskladaný výsledný návrh.

Rám je základná súčasť dronu a z jeho konštrukcie sa odvíjajú požiadavky na jeho vlastnosti. Základnou požiadavkou, ktorú je potrebné si na začiatku zadefinovať je počet motorov, resp. ramien. S týmto počtom súvisí výsledné správanie sa a výkon dronu. Najčastejšie sa využíva párný počet ramien, ale môžeme nájsť aj drony s nepárnym počtom ramien, ako napr. trikoptéra. Ramená sú spojené tzv. centrálnou doskou, ktorá sa skladá z dvoch častí - horný a spodný plát.

2.1 Rameno

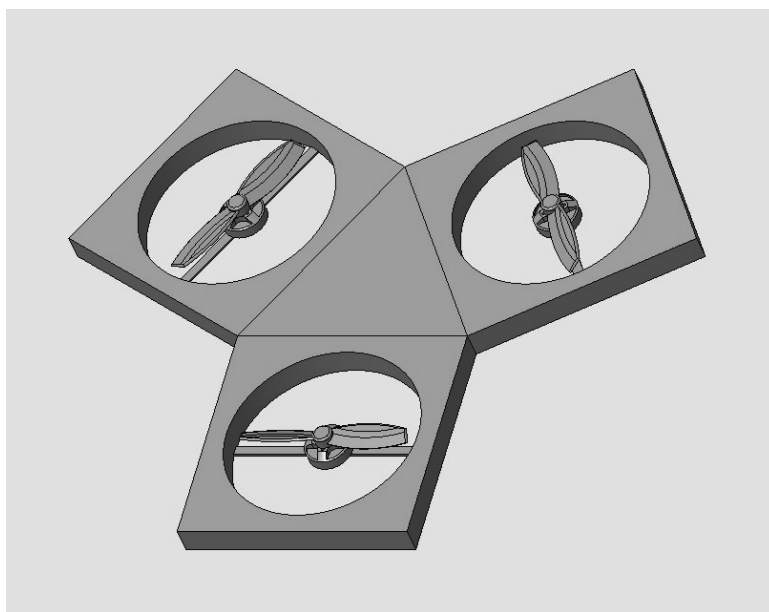
Je časť dronu, ktorá je pripevnená na ráme a nachádza sa na nej motor s vrtľou. Jeho veľkosť a tvar závisia od daného motora a vrtule. Pri väčšine vyrobených modelov, sú ramená spojené s rámom, tak že ich nejde oddeliť. Pri modulárnych dronoch sa spravidla ramená dajú oddeliť od rámu. Pre pripravovaný dron boli navrhnuté ramená tvaru hranola (obr. 1) s vybratím materiálu pre motor a vrtľu a pridaným úchytom. Toto rameno je vhodné do každého predchádzajúceho rámu.



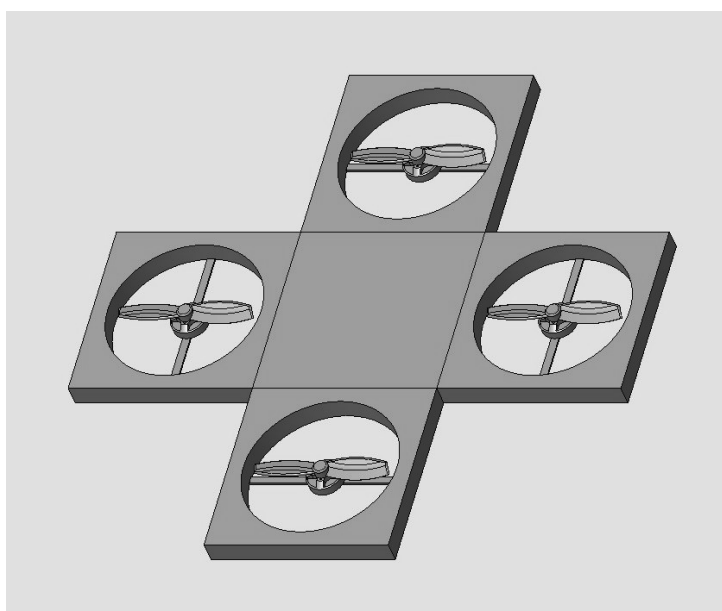
Obr. 1 Navrhnuté rameno
Figure 1. Designed arm

2.2 Rám - trikoptéra

Rám je v tomto prípade najmenší z navrhnutých druhov. Má tvar trojbokého hranola a má tri ramená (obr. 2). Bateria musí byť v tomto menšia ako pri zvyšných dvoch návrhoch, kvôli veľkosti rámu, menšiemu počtu motorov a celkovej hmotnosti. Výhodou tohto návrhu je výsledný neobvyklý vzhľad dronu. Najlepšie letové vlastnosti dosahuje takýto dron pri lete vpred. Sú agilnejšie a ovládateľnejšie ako napr. kvadroptéry, preto sú ideálne skôr pre kaskadérske kúsky a akrobatické manévry. Na druhej strane nevýhodou rámu typu - trikoptéra je asymetrický dizajn.



Obr.2 Navrhnutá trikoptéra
Figure 2. Designed threcopter



Obr. 3 Navrhnutá kvadrokoptéra
Figure 3. Designed quadcopter

2.3 Rám - kvadrokoptéra

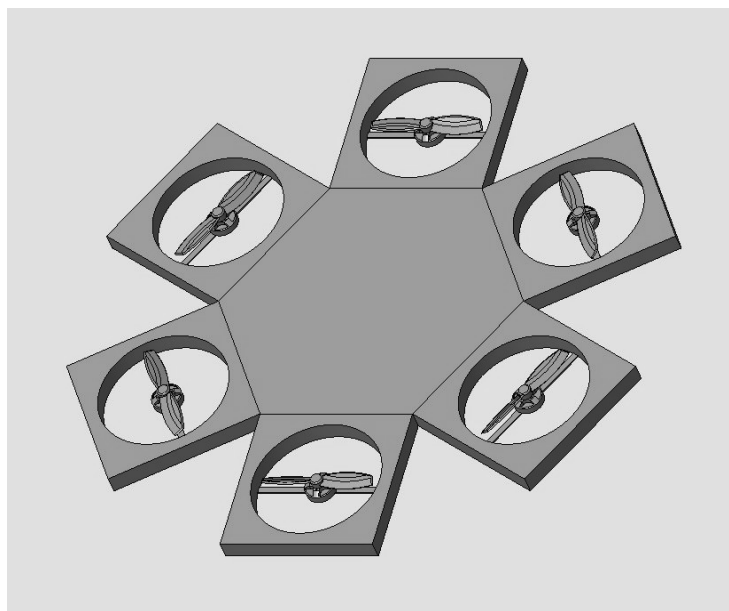
Kvadrokoptéra je konštrukčne síce jednoduchšia, avšak vo veľkosti je energeticky oveľa menej efektívna v porovnaní s trikoptérou. Veľkosťne je to stredne veľký typ dronu z pomedzi návrhov, rám je tvaru štvorbokého hranola a má štyri ramená (obr. 3). Dĺžka ramien, a teda vzdialenosť vrtúľ, je na väčšine kvadrokoptér rovnaká. Rotory sú umiestnené v pôdoryse vo

vrcholoch štvorca prípadne obdĺžnika. To umožňuje stroju jednoducho meniť smer letu. Vďaka svojej konštrukcii má kvadroptéra výbornú manévrovateľnosť a obsahuje menej pohyblivých mechanických častí. Vrtule s menším priemerom majú pri rotácii nižšiu kineckú energiu a menší točivý moment, tým je menej energeticky a časovo náročné meniť ich rýchlosť otáčania. Pre najväčšiu efektivitu kvadroptéry je nutné použiť všetky vrtule rovnakého priemeru, aby mohli mať všetky motory rovnaké otáčky a vrtule poskytovali totožný vztlak. Tieto výhody voči helikoptéram platia žiaľ len pre malé kvadroptéry, väčšie osobné helikoptéry sú efektívnejšie než rovnako veľké osobné kvadroptéry. Medzi dronmi je to najbežnejší tvar, má výborný pomer medzi rýchlosťou a ovládateľnosťou.

Výhodou tohto návrhu je, že je to najbežnejšia konštrukcia s viacerými rotormi - najjednoduchší a najuniverzálnejší dizajn. V štandardnej konfigurácii sú ramená / motory symetrické okolo dvoch osí. Takmer všetky letové riadiace jednotky na trhu v súčasnosti môžu pracovať s týmto typom designu. Sú ľahké, ľahko sa s nimi lieta a dajú sa využiť pre rôzne aplikácie. Na druhej strane, žiadny rám nie je dokonalý. Nevýhodou kvadroptéry je nedostatok tzv. nadbytočnosti, t. j. ak systém zlyhá, resp. ak zlyhá jeden motor, alebo vrtuľa, zvyšné motory, alebo vrtule nie sú schopné kompenzovať výkon a dron padá. Je preto potrebné a zásadné zvoliť správny spôsob nielen návrhu ale aj montáže.

2.4 Hexakoptéra

Je najväčším z pomedzi predstavených návrhov dronu. Ako hovorí predpona, hexakoptéra („hexa = šesť“) je typ rámu, ktorý má tvar šesťbokého hranola a má šesť ramien (obr. 4). Ku každému je pripojený potom jeden motor. Tento druh býva väčšinou určený na nesenie nejakej veci, napríklad väčšej kamery, nádrže alebo úložného priestoru. Vďaka šiestim motorom dokáže uniesť väčšiu hmotnosť. Hexakoptéra môže existovať v jednom z dvoch usporiadaní – prvé, v ktorom je predná časť tela umiestnená medzi dvomi motormi a druhé, v ktorej je predná časť tela umiestnená za jediným motorom.



Obr. 4 Navrhnutá hexakoptéra
Figure 4. Designed hexacopter

Výhodou posledného návrhu je, že v prípade potreby umožňuje konštrukcia hexakoptéry ľahké prídanie dvoch ďalších lúčov a motorov, čo zvýši celkový ťah, v dôsledku čoho takýto dron dokáže zdvihnúť väčšie užitočné zaťaženie. Sú stabilnejšie vo vzduchu. V prípade poruchy jedného z motorov je možné, že dron bude schopný mäkkého pristátia a nehavaruje. Konštrukcia rámu je modulárna. Ďalšou veľkou výhodou je, že takmer všetky riadiace jednotky podporujú tento typ rámu. Nevýhodou je objemná a drahá konštrukcia. Dodatočné motory a súčiastky zvyšujú hmotnosť helikoptéry, preto aby bola dĺžka letu rovnaká ako u kvadroptéry, je potrebné nainštalovať kapacitnejšie batérie.

3. ZÁVER

Navrhnutý bol vlastný modulárny dron, ktorý bol následne aj namodelovaný. Navrhnuté boli tri modely rámu autonómneho lietajúceho prostriedku - dronu, rozdelené podľa veľkosti. Pri navrhovaní a modelovaní sa nevyskytol žiadny väčší problém, ktorý by sa rýchlo neodstránil.

POĎAKOVANIE

Príspevok vznikol v rámci riešenia spoločného slovensko-poľského projektu TalentDetector 2023 ako výsledok spolupráce medzi Politechnikou Slaskou (Poľsko) a Žilinskou univerzitou v Žiline a projektov KEGA č. 004ŽU-4/2023 a KEGA č.009ŽU-4/2023.

LITERATÚRA

1. Dronenodes, Drone motors fundamentals (online), <https://dronenodes.com/drone-motors-brushless-guide>, 2018.
2. Tahitianrider, DIY modular and transformable FPV racing quadcopter, (online), <https://www.instructables.com/DIY-Modular-Transformable-FPV-Racing-Quadcopter>, 2017.
3. Ludicam, How much weight can a drone carry (online). <https://lucidcam.com/how-much-weight-can-a-drone-carry>, 2021.
4. L. Nagel, Types of drones and UAVs, (online), <https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/types-of-drones>, 2021.
5. J. G. Leishman, Principles of Helicopter Aerodynamics, New York, NY, Cambridge University Press. 2000.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Charakterystyka i własności materiałów polimerowych stosowanych na stabilizatory kości

J. Pająk^a, R. Gabryś^a, A. Włodarczyk-Fligier^b, A. Kania^b, M. Polok-Rubiniec^b

^a Studenci kierunków Mechatronika Przemysłowa oraz Inżynieria Produkcji i Zarządzanie na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej

email: rg302613@student.polsl.pl

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email: anna.wlodarczyk@polsl.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono własności wybranych materiałów polimerowych wykorzystywanych do produkcji stabilizatorów kości.

Abstract: The article presents the properties of selected polymers used in production of bone stabilizers.

Słowa kluczowe: materiały, medycyna, polimery, tworzywa sztuczne

1. WSTĘP

Orteza inaczej zwana stabilizatorem, ma za zadanie stabilizować układ mięśniowo-szkieletowy, unieruchomić bądź też odciążać chory staw lub skorygować niewłaściwą pozycję ciała. Ortezy stosowane są po złamaniach kości, skręceniach, w chorobach reumatologicznych, neurologicznych, a także podczas korekcji wad postawy oraz wrodzonych. Stabilizatory i ortozy mogą też być stosowane jako element terapii pooperacyjnej [1,2]. Są one alternatywą dla gipsu (orteza jest lżejsza, bardziej komfortowa podczas użytkowania). Dużą zaletą stabilizatorów jest odpowiednio większy przepływ powietrza oraz możliwość doboru rozmiaru idealnie do kończyny.

Głównymi materiałami stosowanymi do wytwarzania stabilizatorów są:

- PLA (polilaktyd) – materiał stosowany do produkcji ortez za pomocą wytwarzania addytywnego. Polilaktyd stosowany jest również do wytwarzania różnego rodzaju implantów dzięki swojej biokompatybilności,
- PP (polipropylen) – materiał, który dzięki swoim własnościom takim jak: trudna ścieralność, zdolność pochłaniania wstrząsów, a także lekkość, dobrze nadaje się do produkcji ortez,
- PU (poliuretan) – poliuretan w ortezach znajduje zastosowanie głównie jako pianka, która odpowiada za komfort użytkowania,

- PA (poliamid) – materiał, który dzięki swoim własnościom takim jak: odporność na wstrząsy, sztywność, a także elastyczność, dobrze sprawuje się w użytkowaniu ortez,
- ABS (akrylonitryl-butadien-styren) – popularny materiał stosowany w wielu dziedzinach, odznaczający się wysoką udurownością [3,4,5,9].

2. CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH MATERIAŁÓW POLIMEROWYCH DO PRODUKCJI ORTEZ

Materiały polimerowe to substancje organiczne zbudowane z łańcuchów powtarzających się jednostek. Ich własności zależą od składu chemicznego, długości łańcuchów i sposobu ich uporządkowania [4]. Charakteryzują się lekkością, elastycznością i wytrzymałością mechaniczną. Mają również zdolność do formowania się w kształty, co czyni je idealnymi do produkcji wielu przedmiotów, od plastikowych zabawek po części samochodowe. Materiały polimerowe są również wykorzystywane w medycynie, np. do produkcji implantów [13], ze względu na biokompatybilność z organizmem. Ich własności sprawiają, że są one coraz częściej wykorzystywane w różnych dziedzinach życia.

2.1. Polilaktyd

Polilaktyd należy do grupy polimerów termoplastycznych i otrzymywany jest z surowców pochodzenia naturalnego. Materiał ten charakteryzują dobre własności mechaniczne, które są zbliżone do PET (politereftalan etylenu), a także PS (polistyren).

Ważną charakterystyczną cechą tego materiału jest niska cena, biokompatybilność a także biodegradowalność. Polilaktyd jest jednym z najczęściej wykorzystywanych materiałów w technologii druku 3D. Kolejną charakterystyczną jego cechą jest sposób pozyskiwania z surowców odnawialnych [3]. W tabeli 1 zostały przedstawione własności mechaniczne i fizyczne PLA [9,10].

Tabela 1. Własności fizyczne PLA [9,10]

Table 1. Physical properties of PLA [9,10]

Gęstość [kg/m ³]	1210 - 1250
Temperatura topnienia [°C]	150 - 162
Temperatura wytłaczania [°C]	190 - 230
Temperatura zeszklenia [°C]	60
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	230
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	60
Moduł Younga [GPa]	3,5

2.2. Polipropylen

Ze względu na swoją obojętność fizjologiczną, odporność na działanie czynników chemicznych oraz możliwość pracy w temperaturach powyżej 100 °C, polipropylen bardzo dobrze sprawdza się w produkcji sprzętu medycznego, w tym między innymi ortez. Głównymi zaletami polipropylenu jest wytrzymałość na rozciąganie, zdolność pochłaniania wstrząsów, a także sztywność wykonanego elementu. Do wad polipropylenu należy zaliczyć

odporność na niskie temperatury (materiał kruszy się poniżej $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Własności mechaniczne polipropylenu mogą się od siebie różnić, ze względu na metodę wytwarzania [4]. W tabeli 2 przedstawiono podstawowe własności PP [5,10].

Tabela 2. Własności fizyczne PP [5,10]

Table 2. Physical properties of PP [5,10]

Gęstość [kg/m^3]	900 - 910
Temperatura topnienia [$^{\circ}\text{C}$]	160
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	20 - 38
Twardość [Sh D]	75 - 85

2.3. Poliuretan

Poliuretan jest to polimer wytwarzany za pomocą addycyjnej polimeryzacji wielofunkcyjnych izocyjanów z polioliami. Jest to materiał słabo odporny na wysokie temperatury, ze względu na to, że poliuterany należą do polimerów łatwiej topliwych od poliamidów, co przekłada się na łatwość ich przetwarzania, ustępując jednak odporności mechanicznej. Stosuje się je do wytwarzania włókien elastycznych, a także elastomerów [4]. Główne własności poliuretanu przedstawiono w tabeli 3 [3,11].

Tabela 3. Własności fizyczne PU [3,11]

Table 3. Physical properties of PU [3,11]

Gęstość [kg/m^3]	1100 - 1280
Temperatura topnienia [$^{\circ}\text{C}$]	80
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	20 - 70
Twardość [Sh A]	35 - 98

2.4. Poliamidy

Poliamidy posiadają dużą wytrzymałość na rozciąganie oraz dobre własności mechaniczne. Ma on różne odmiany strukturalne z czego największe znaczenie techniczne mają poliamidy 6, 6.6, 10, 11 oraz 12. Stosowany jest do produkcji tkanin, a także w przemyśle medycznym dzięki biokompatybilności.

Tabela 4. Własności fizyczne PA [4,5,10]

Table 4. Physical properties of PA [4,5,10]

Gęstość [kg/m^3]	1130
Temperatura topnienia [$^{\circ}\text{C}$]	215
Temperatura wytłaczania [$^{\circ}\text{C}$]	270
Temperatura zeszklenia [$^{\circ}\text{C}$]	45
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	10
Wytrzymałość na ścislenie [MPa]	98

Poliamidy stosowane są również do wyrobów technicznych takich jak łożyska, koła zębate, a także w przemyśle kablowym. Poliamidy mają małą udarność (gdy są wysuszone) oraz dużą wytrzymałość na rozciąganie i moduł sprężystości (Tabela 4) [4,6,14].

2.5. ABS (akrylonitrylo - butadieno-styren)

ABS otrzymywany jest w procesie szczepienia kopolimeru styren/akrylonitryl do matrycy polibutadienowo - akrylanowej. Odznacza się wysoką udarnością i odpornością na zarysowania. Ponadto posiada dość dobrą izolacyjność termiczną, a także odporność chemiczną wobec ługów, rozcieńczonych kwasów, olejów i tłuszczów. Jest to drugie najpopularniejsze tworzywo stosowane w metodzie wytwarzania addytywnego. Podstawowe własności ABS zaprezentowano w tabeli 5 [4].

Tabela 5. Własności fizyczne ABS [4,8]

Table 5. Physical properties of ABS [4,8]

Gęstość [kg/m ³]	1030
Temperatura topnienia [°C]	230
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	40 - 65
Twardość [Sh D]	90 - 100

3. PODSUMOWANIE

Tworzywa sztuczne stosowane do produkcji ortez posiadają różne własności dzięki czemu można dostosować materiał do konkretnych potrzeb. Bardzo często spotyka się stabilizatory wykonane z różnych polimerów dzięki czemu idealnie mogą spełniać swoje zadanie podczas rekonwalescencji.

Medycyna nie jest też jedynym odbiorcą w której materiały polimerowe są stosowane dzięki czemu polimery są uniwersalne i zaspokajają różne potrzeby w różnych dziedzinach przemysłu.

LITERATURA

1. Orteza - co to jest i kiedy należy ją stosować?, Medyczny Store, (2021).
2. Co to jest orteza i jakie ma zastosowanie?, Acus Med blog, (2020).
3. P. Ruśkowski, Polilaktyd w zastosowaniach medycznych, Tworzywa Sztuczne w Przemysle, (2017) 32-35.
4. J. Koszkuł, Materiały polimerowe, Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, (1999) 88-101.
5. Wprowadzenie do chemii polimerów, Bortel Edgar, Kraków : nakł. UJ, 6-7 (1994), 115-116.
6. Audra J. Wolfe, Nylon: A Revolution in Textiles, Science History Institute, (2008).
7. M. Wiśniewska (red.). Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, seria: Encyklopedia dla Wszystkich, Chemia, (2001).
8. ABS – poli (akrylonitryl-co-butadien-co-styren) - wzór, właściwości, zastosowanie, Grupa Azoty, (2022).

9. R. Pugliese, B. Beltrami, S. Regondi, C. Lunetta, Polymeric biomaterials for 3D printing in medicine: An overview, Science Direct, (2021) 1-7.
10. PN-EN ISO 527-1, Tworzywa sztuczne -- Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu - Część 1: Zasady ogólne, (2020).
11. Poliuretan, Plastem, (2022).

Praca powstała w wyniku realizacji projektu Project Based Learning (PBL) pt. Opracowanie projektów i wydruk w technologii 3D modeli ortez dla sportowców z urazami kończyn.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Komputerowe wspomaganie projektowania uchwytu rowerowego na telefon

M. Pogoda^a, M. Spilka^b

^a Student kierunku Mechanika i Budowa Maszyn na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej, email: matepog577@student.polsl.pl

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: monika.spilka@polsl.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono procedurę projektowania uniwersalnego uchwytu rowerowego na telefon, z wykorzystaniem oprogramowania CAD. Stosując program „Autodesk Inventor”, zaprojektowano części składowe uchwytu, które następnie wydrukowano za pomocą drukarki 3D. Ponadto zamieszczono wyniki testu funkcjonalności uchwytu oraz oszacowano koszty wytworzenia zaprojektowanego uchwytu rowerowego na telefon.

Abstract: The paper presents the design procedure for a universal bicycle phone holder, using CAD software. With the use of the "Autodesk Inventor" program, the components of the holder were designed, which were then printed with a 3D printer. In addition, the results of the functionality test of the holder are presented and the production costs of the designed bicycle holder for the phone are estimated.

Słowa kluczowe: projektowanie CAD, druk 3D, metoda FDM, optymalizacja wielokryterialna

1. WSTĘP

Ważną rolę od powstania potrzeby aż do jej zaspokojenia odgrywa projektowanie, które może mieć swoje odniesienie w projektowaniu procesów technologicznych oraz projektowaniu przedmiotów zaspokajających ludzkie potrzeby. Od kreatywności projektantów zależy jak wielki będzie postęp w tworzeniu nowych produktów oraz procesów.

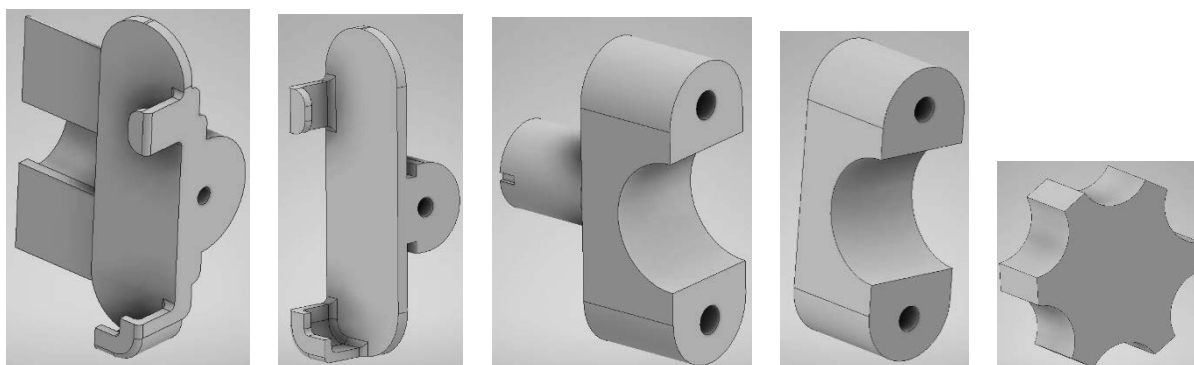
Projektowanie wspomagane komputerowo CAD (Computer Aided Design) jest zastosowaniem systemów komputerowych do tworzenia, projektowania i modyfikacji danych mniej lub bardziej skomplikowanych projektów. Za pomocą CAD można bezproblemowo tworzyć innowacyjne rozwiązania technologiczne lub przeprojektowywać istniejące już na rynku rozwiązania tak aby dostosować je do określonych potrzeb [1-3].

Od lat stosowany i rozwijany druk 3D obejmuje szeroki zakres zastosowania, jednakże żadna z 7 technologii druku 3D nie jest najlepsza. Jedną z najbardziej popularnych metod druku 3D, która należy do technologii Materials Extrusion jest metoda FDM (Fused Deposition Modeling), która jest bardzo prosta i nie wymaga stosowania rozpuszczalników i klejów. Zaletą metody FDM jest również cena drukarki, która jest stosunkowo niska [4,5].

2. ETAPY TWORZENIA UCHWYTU ROWEROWEGO NA TELEFON

2.1. Projektowanie CAD

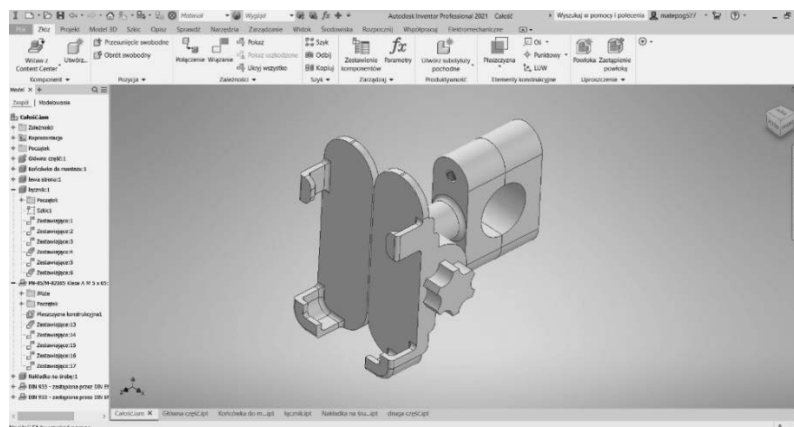
Za pomocą oprogramowania „Autodesk Inventor” zaprojektowano 5 części, składających się na uchwyt rowerowy na telefon (rys. 1). Część nr 1 stanowi główną część, do której przymocowane będą pozostałe części. Zadaniem części nr 2 będzie przesuwanie się w bok w celu otwarcia uchwytu i możliwości zamocowania telefonu, a kolejno ściśnięcie telefonu tak aby nie wypadł z uchwytu. Część nr 3 pełni funkcję łącznika z częścią nr 1, zaś za pomocą części nr 4 połączonej z częścią nr 3 można zamocować uchwyt do kierownicy rowerowej. Część nr 5 jest nakładką na śrubę, która dzięki zastosowanemu kształtowi umożliwia łatwe otwieranie i zamykanie uchwytu bez użycia narzędzi.



Rysunek 1. Zaprojektowane części składowe (1-5) uchwytu rowerowego na telefon

Figure 1. Designed components (1-5) of the bicycle phone holder

Kolejno zaprojektowane części zostały ze sobą powiązane, co pozwoliło stworzyć podgląd całego uchwytu (rys. 2).



Rysunek 2. Połączone części składowe uchwytu rowerowego na telefon

Figure 2. Combined components of a bicycle phone holder

2.2. Dobór optymalnego materiału

Dobór odpowiedniego materiału do wytworzenia uchwytu rowerowego przeprowadzono z wykorzystaniem metody optymalizacji wielokryterialnej. Jako kryteria doboru wybrano: cenę, masę, wytrzymałość na zginanie oraz wytrzymałość na rozciąganie. Zastosowany materiał powinien być jak najtańszy w zakupie przy zachowaniu najlepszych wyników wytrzymałościowych. Dostępne materiały, spośród których wybrano optymalny to: Fiberlogy PLA, Fiberlogy ABS, Fiberlogy PET-G. W tabeli 1 przedstawiono parametry poszczególnych materiałów, takie jak: gęstość, wytrzymałość na zginanie, wytrzymałość na rozciąganie, a także cenę materiału. Obliczenia wykonane w programie MS Excel zostały przedstawione na rysunku 3 wraz z kryteriami oraz rozwiązaniami.

Tabela 1. Zestawienie informacji na temat materiałów [6-8]

Table 1. Information about materials

Materiał	Gęstość [g/cm ³]	Wytrzymałość na zginanie [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Cena [PLN netto]*
Fiberlogy PLA	1,24	81	53	55,67
Fiberlogy ABS	1,04	60	32	56,00
Fiberlogy PET-G	1,27	71	50	52,84

*Ceny pochodzą z oficjalnych sklepów, które dystrybuują materiały producenta Fiberlogy na terenie Polski z dnia 21.11.2022 za 0,85 kg filamentu.

	K1	K2	K3	K4	W	R1	R2	R3	R100%
K1	x	0,5	0	0	0,5	2	2	3	3
K2	0,5	x	0	0	0,5	2	3	1	3
K3	1	1	x	1	3	3	2	3	3
K4	1	1	0	x	2	3	1	2	3
z=						17	10,5	15	18
%=						94%	58%	83%	100%

Rysunek 3. Optymalizacja wielokryterialna wykonana w programie MS Excel

Figure 3. Multi-criteria optimization performed in MS Excel

W wyniku wykonanych obliczeń optymalnym materiałem okazał się PLA, który spełnia założone kryteria w 94%.

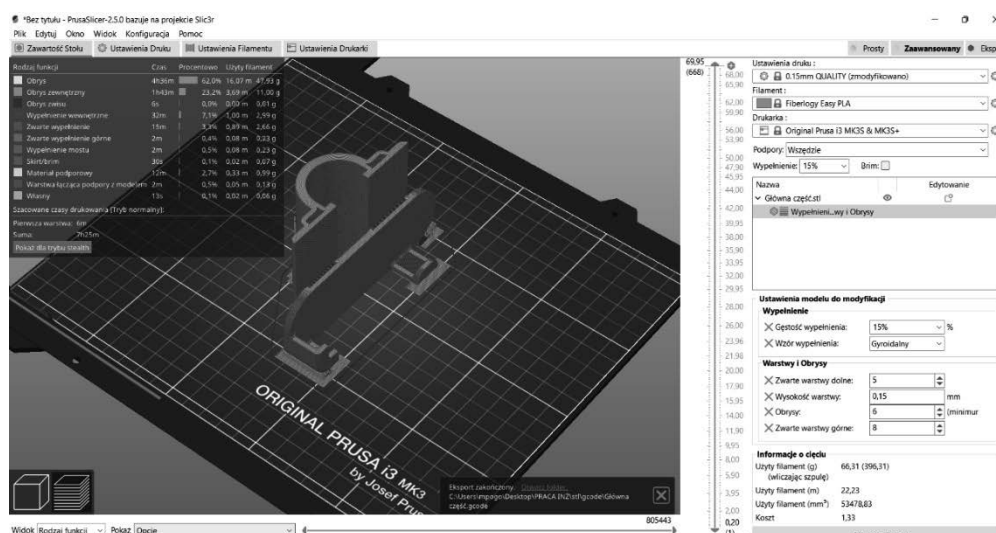
2.3. Dobór odpowiednich ustawień druku 3D

Podczas doboru ustawień druku wybrano odpowiednie wartości parametrów, takich jak:

- gęstość wypełnienia,

- wzór wypełnienia,
- zwarte warstwy dolne,
- zwarte warstwy górne,
- obrisy.

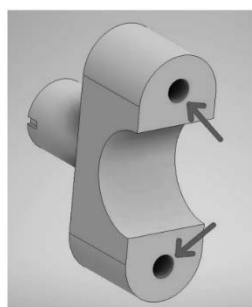
Dla wszystkich części wybrano gęstość wypełnienia 15%, ponieważ jest to wartość, która pozwala zaoszczędzić materiał, nie tracąc przy tym jego własności mechanicznych. Większy wpływ na wytrzymałość części ma liczba obrysów, dlatego w częściach, od których wymagana jest większa wytrzymałość, zastosowano większą liczbę obrysów. Podobnie jak gęstość wypełnienia, tak samo wzór wypełnienia dla wszystkich części postanowiono wybrać Gyroidalny, stanowiący jeden z najlepszych wzorów gdyż zapewnia wzmocnienie drukowanej części w każdym kierunku, szybko się drukuje i nie zużywa dużej ilości materiału. Bardzo ważne podczas dobierania ustawień druku jest także odpowiednie położenie drukowanej części, co ma bardzo duży wpływ na wielkość zużytego materiału na podpory. Wyboru odpowiednich ustawień druku dokonano za pomocą programu PrusaSlicer (rys. 4). Części zostały wydrukowane na drukarce Prusa i3 MK3S+.



Rysunek 4. Ustawienia druku części nr 1
Figure 4. Print settings of part number 1

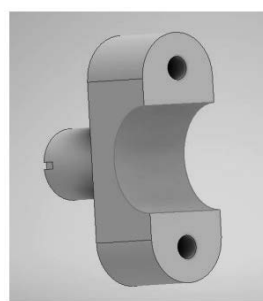
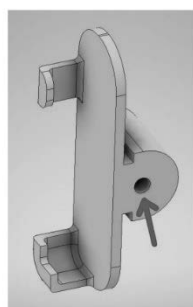
2.4. Instrukcja montażu uchwytu

W pierwszej kolejności po zakończonym drukowaniu poszczególnych części oderwano powstałe podczas drukowania podpory. Następnie zamontowano wkładkę gwintowaną w odpowiednie otwory (rys. 5) W celu uniknięcia poślizgu pomiędzy uchwytem, a kierownicą roweru, do której ma zostać zamocowany uchwyt, na powierzchniach stykających uchwytu z kierownicą naklejono taśmy antypoślizgowe (rys. 6). Za pomocą kleju połączono ze sobą części nr 1 i 3 (rys. 7), a następnie połączono część nr 5 ze śrubą DIN 933 M5x65 (rys. 8). Kolejno zamontowano część nr 2 w uchwycie (rys. 9) oraz skręcono część nr 4 z resztą uchwytu za pomocą śrub DIN933 M5x50 (rys. 10).



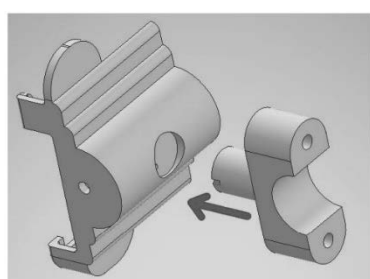
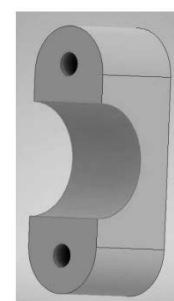
Rysunek 5. Miejsca montażu wkładki gwintowanej

Figure 5. Threaded insert mounting locations



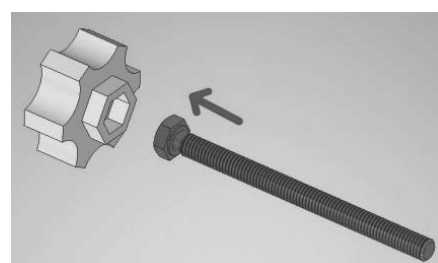
Rysunek 6. Miejsca klejenia taśmy antypoślizgowej

Figure 6. Places of gluing anti-slip tape



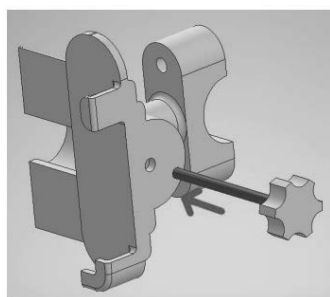
Rysunek 7. Sposób połączenia części nr 1 i 3

Figure 7. The method of connecting parts No. 1 and 3



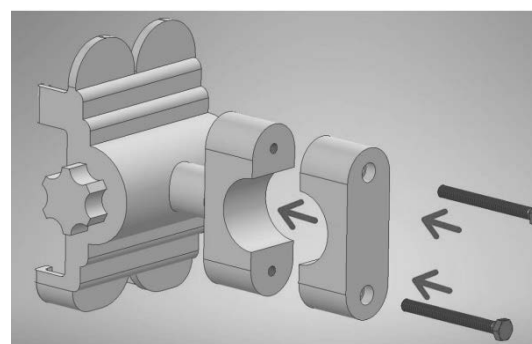
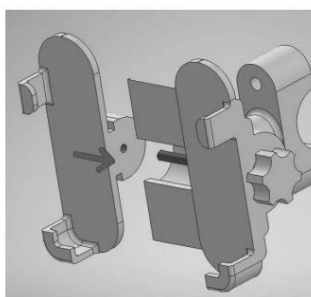
Rysunek 8. Sposób połączenia części nr 5 i śruby DIN933 M5x65

Figure 8. The method of connecting part No. 5 and the DIN933 M5x65 screw



Rysunek 9. Sposób połączenia śruby DIN933 M5x65 z uchwytem

Figure 9. The method of connecting the screw DIN933 M5x65 with the handle



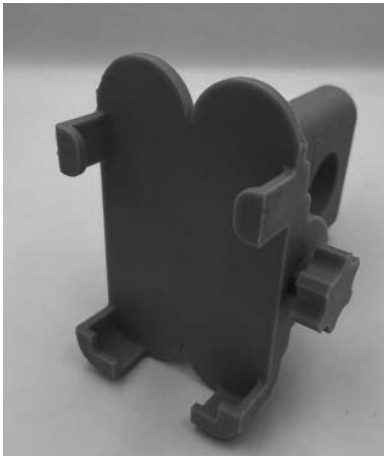
Rysunek 10. Sposób połączenia śrub DIN933 M5x50 z uchwytem

Figure 10. The method of connecting the screws DIN933 M5x50 with the handle

3. PODSUMOWANIE

Zaprojektowany i wytworzony uchwyt rowerowy (rys. 11) przeszedł pozytywnie test na trasie o długości 10 km, na drodze o różnych rodzajach nawierzchni. Korzystanie z uchwytu jest bardzo wygodne i nie sprawia żadnych trudności, a telefon zamocowany w uchwycie jest stabilny i nie ma możliwości wysunięcia (rys. 12). W uchwycie jest możliwość zamontowania telefonu

o szerokości w przedziale 70-98 mm, co sprawia, że bezproblemowo można zamocować większość telefonów dostępnych na rynku. Ponadto obliczono koszt wytworzenia jednej sztuki uchwytu rowerowego, który wyniósł 16,49 zł netto, co również jest atutem zaprojektowanego produktu.



Rysunek 11. Zaprojektowany i wytworzony uniwersalny uchwyt rowerowy na telefon, z wykorzystaniem oprogramowania CAD oraz druku 3D

Figure 11. Designed and manufactured universal bicycle phone holder, using CAD software and 3D printing



Rysunek 12. Uchwyt z zamontowanym telefonem

Figure 12. Holder with mounted phone

LITERATURA

1. B. Gorczyński, Z. Budniak, Nowoczesne systemy CAD w projektowaniu formy wtryskowej do formowania pokrywy bezpieczników pojazdu samochodowego, *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* 14/10 (2013) 121-125.
2. J. Jajczyk, R. Kamiński, Wykorzystanie oprogramowania CAD do trójwymiarowej wizualizacji elementów elektrowni wiatrowej, *Electrical Engineering* 81 (2015) 127-134.
3. P. Gendarz, S. Salamon, P. Chwastyk, *Projektowanie inżynierskie i grafika inżynierska*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, 2014.
4. P. Holzmann, R.J. Breiteneker, A.A. Soomro, E.J. Schwarz, User entrepreneur business models in 3D printing, *Journal of Manufacturing Technology Management* 28/1 (2017) 75-94.
5. C. Fiał, M. Pieknik, Druk 3D jako technologia przyszłości - część 1, *Technologia i Jakość Wytrobów* 65 (2020) 92-105.
6. Technical Data Sheet ABS, 2022, strona internetowa: https://fiberlogy.com/wp-content/uploads/2021/12/FIBERLOGY_ABS_TDS.pdf (dostęp z dnia 01.06.2023).
7. Technical Data Sheet PLA, 2022, strona internetowa: https://fiberlogy.com/wp-content/uploads/2021/12/FIBERLOGY_EASY_PLA_TDS.pdf (dostęp z dnia 01.06.2023).
8. Technical Data Sheet PET-G, 2019, strona internetowa: <https://fiberlogy.com/wp-content/uploads/2019/04/TDS-EASY-PET-G-PL.pdf> (dostęp z dnia 01.06.2023).



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Analiza rozkładu naprężeń, przemieszczeń oraz odkształcenia w trakcie obrotu łopaty turbiny wiatrowej

J. Polisa^a, J. Bicz^a, K. Gajewski^a, A. Śliwa^b

^a Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email: jakupol064@student.polsl.pl; jakubic839@student.polsl.pl; krzygaj974@student.polsl.pl

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych,
email: agata.sliwa@polsl.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę MES rozkładu naprężeń, przemieszczeń oraz odkształceń powstałych w wyniku działania określonej siły na łopaty turbiny wiatrowej w zależności od zastosowanego materiału takiego jak: superstop żelaza A286, stop Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (SS), nylon 6/10. Analizę przeprowadzono przy użyciu oprogramowania SOLIDWORKS. Określono miejsca o najwyższej wartości naprężeń i przemieszczeń oraz wartość siły krytycznej przy której następuje odkształcenie elementu.

Abstract: The work shows a MES analysis of Huber - Mises stresses, displacements and deformations resulting from the application of a specific force on wind turbine blades depending on the material used, such as: superalloy iron A286, Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (SS) alloy, nylon 6/10. The analysis was carried out using SOLIDWORKS software. The areas of highest stress and displacement were determined, as well as the value of the critical force at which deformation of the component occurs.

Słowa kluczowe: turbina wiatrowa, turbina VAWT, turbina Savoniusa, dobór materiałów, naprężenia, analiza MES, obrót.

1. WPROWADZENIE

1.1 Perspektywy rozwoju energetyki wiatrowej

Konieczność redukcji emisji gazów cieplarnianych przez sektor energetyczny, przyczyniła się do znaczącego wzrostu zainteresowania odnawialnymi źródłami energii na przestrzeni ostatnich dekad. Udział energii ze źródeł odnawialnych w europejskim miksie energetycznym podwoił się w latach 2004 - 2017 z poziomu 8,5 do 17%. Zakłada się, że do 2030 roku udział ten wzrośnie do 32%, przy spadku emisji dwutlenku węgla w sektorze elektroenergetycznym o 40%. Rozwój alternatywnych źródeł energii jest również efektem narastającego globalnego kryzysu energetycznego, wynikającego z gwałtownego wzrostu zapotrzebowania na energię przy zmniejszających się zasobach surowców naturalnych [1,2].

Energetyka wiatrowa jest najszybciej rozwijającą się technologią wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych, jak również - wyłączając hydroenergetykę - najpowszechniej wykorzystywaną. Istotną zaletą generacji energii z wiatru jest możliwość wytwarzania znacznej ilości energii, przy relatywnie niskich kosztach wytwarzania. Intensywny postęp w dziedzinie turbin wiatrowych, jaki dokonał się na przestrzeni ostatnich dwóch dekad przełożył się na wzrost efektywności i mocy współczesnych siłowni wiatrowych. Obniżyły się również koszty generacji energii z wiatru – tylko pomiędzy 2008 a 2015 rokiem nastąpił ich spadek o jedną trzecią. Obecnie projektowane turbiny wiatrowe uwzględniają wykorzystanie najnowszych technologii materiałowych i efektywniejszych profili aerodynamicznych łopat, co stwarza pole do dalszego postępu w tej dziedzinie [2,3].

Ze względu na rosnące zainteresowanie turbinami analogicznie wzrasta zapotrzebowanie na opracowanie materiału, który będzie posiadał możliwie najlepsze własności z punktu widzenia jego zastosowania przy jak najmniejszych kosztach jego produkcji i eksploatacji. Jednak jednym z najważniejszych czynników na którym nie należy oszczędzać jest bezpieczeństwo konstrukcji a co za tym idzie osób postronnych. W tym celu powstała ta praca, w której dokonano symulacji komputerowej w programie SOLIDWORKS za pomocą której określono jak łopatki turbin wiatrowych wykonanych z trzech różnych materiałów zachowują się, gdy zostaną poddane działaniu bardzo dużych sił konkretnie 1500 N.

1.2 Konstrukcja turbin wiatrowych

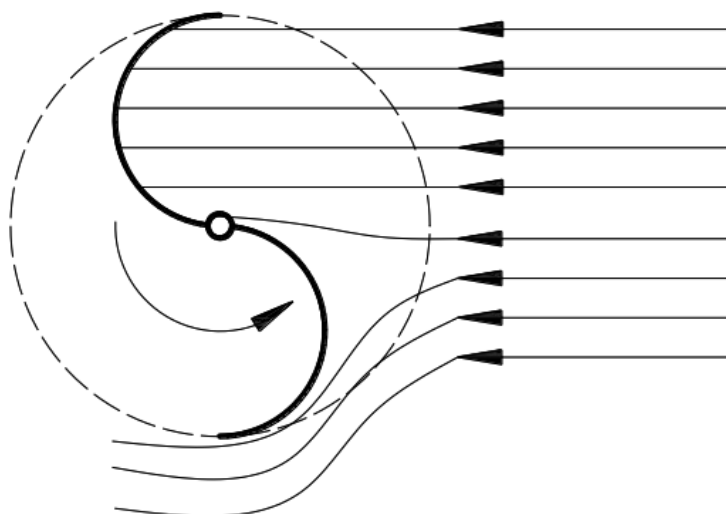
Najogólniej, ze względu na budowę turbiny wiatrowe podzielić można na dwie grupy – o poziomej osi obrotu wirnika oraz o pionowej osi obrotu wirnika [4].

Turbiny o poziomej osi obrotu wirnika – tak zwane turbiny typu HAWT (z jęz. ang; Horizontal Axis Wind Turbine), są najbardziej rozpowszechnione w energetyce wiatrowej. Stosowane są różne rozwiązania, jeśli chodzi o liczbę łopat wirnika – najbardziej rozpoznawalne są konstrukcje wyposażone w trzy łopaty, jednakże spotyka się również urządzenia o jednej (występuje wówczas konieczność zastosowania przeciwwagi) lub dwóch łopatach. Wszystkie urządzenia typu HAWT wymagają wyposażenia w pomocnicze urządzenia regulujące położenie wirnika - co wynika z faktu, że turbina musi być zawsze zwrócona osią wirnika w kierunku wiatru. Turbiny tego typu cechują się relatywnie wysokim poziomem hałasu, a zakres prędkości wiatru przy jakiej mogą pracować jest ograniczony – zazwyczaj wynosi on od 4 do 25 m/s dla standardowych, komercyjnie wykorzystywanych turbin trójłopatowych. Przekłada się to na ograniczenia w doborze lokalizacji siłowni wiatrowych [4,5].

Drugi rodzaj turbin wiatrowych - urządzenia o pionowej osi obrotu – VAWT (z jęz. ang; Vertical Axis Wind Turbine) jest rzadziej stosowany. Wynika to przede wszystkim z ich niższej sprawności i przerywanego charakteru pracy [4].

Wyróżnić można tutaj turbinę Darrieusa, która wykorzystuje siłę nośną generowaną na łopatach wirnika. W tym rozwiązaniu prędkość łopaty wirnika może osiągać nawet wartości wyższe niż prędkość wiatru. Turbina tego typu posiada dwie lub trzy długie, cienkie łopaty w kształcie litery “C” łączące się na górze i dole osi obrotu – w wariantcie określanym jako C-Rotor, bądź łopaty proste równoległe do osi obrotu – w wariantcie H-Rotor. Cechą charakterystyczną jest sinusoidalny charakter momentu obrotowego generowanego przez turbinę - ponieważ maksymalny moment generowany jest przez każdą z łopat jedynie przy odpowiednim ustawieniu, dwa razy na obrót. Turbiny te cechuje bardzo niski moment startowy, co wymusza konieczność rozruchu wirnika przy użyciu zewnętrznego napędu [4,5].

Innym rodzajem turbiny typu VAWT jest turbina Savoniusa, działająca na zasadzie oporu – została przedstawiona na rysunku 1. Wykorzystuje ona różnicę ciśnień występującą pomiędzy dwoma stronami łopaty wirnika. Turbina tego typu generuje znaczny moment obrotowy, obracając się z relatywnie niską prędkością. Cechuje się ona niskim poziomem generowanego hałasu oraz prostotą konstrukcji, która przekłada się na niskie koszty wytwarzania i obsługi. Ponadto, urządzenia te mogą pracować w szerokim zakresie prędkości wiatru, co pozwala na ich zastosowanie w warunkach cechujących się występowaniem wiatrów turbulentnych, jak na przykład środowisko miejskie. Do głównych wad tego rodzaju konstrukcji należy konieczność stosowania przekładni, utrudniającej rozruch turbiny. Turbiny Savoniusa znalazły jak dotąd najszersze zastosowanie spośród turbin o pionowej osi obrotu [4-6].



Rysunek 1. Zasada działania turbiny Savoniusa [4]

Figure 1. Savonius turbine principle [4]

Turbiny o pionowej osi obrotu są perspektywicznym rozwiązaniem umożliwiającym generację energii odnawialnej w warunkach, w których z różnych względów niemożliwe byłoby zastosowanie standardowych, dużych turbin o osi poziomej - jak na przykład dachy budynków mieszkalnych. Ponadto prosta konstrukcja i mniejsze wymagania względem stosowanych do ich konstrukcji materiałów - a co za tym idzie niższy koszt wytwarzania, mogą przyczynić się do ich przyszłej popularyzacji, w tym również jako taniego źródła energii w krajach rozwijających się [7].

2. ZAŁOŻENIA MODELOWE

Analizowanym elementem turbiny wiatrowej są jej łopatki. Łopatki znajdują się na okrągłej podstawie o średnicy 600 mm oraz 15 mm grubości. Sama łopatka posiada wymiary 150x300x217x108 mm. Długości te określają kolejno: wysokość łopatki, długość boku przy podstawie, długość boku górnego oraz bok łączący pod kątem 80° dolny bok z górnym. Turbina posiada dziewięć łopat odstęp pomiędzy dwiema łopatkami turbiny wynosi 40°. Głównym założeniem jest sprawny obrót łopatek turbiny wiatrowej podczas pracy w otwartym środowisku, przy zastosowaniu znacznego obciążenia, dlatego na wstępie zostały założone dwa czynniki:

- Działanie warunków pogodowych na turbiny a zatem odporność materiału na warunki atmosferyczne, w tym samą siłę wiatru,
- Odpowiednie własności mechaniczne łopat oraz ich ciężar.

Weryfikowany detal musi spełniać szereg kryteriów, aby mógł zostać dopuszczony do eksploatacji. Wartości jakich nasz element nie może przekroczyć zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Maksymalne dopuszczalne wartości dla materiałów podczas przeprowadzania analizy
Table 1. Maximum permissible values for the materials during the analysis

Wartość maksymalna naprężeń [MPa]	Maksymalna wielkość przemieszczenia [mm]	Maksymalna wartość odkształcenia
850	0,25	0,030

3. DOBÓR MATERIAŁÓW

Superstop żelaza A286

Superstop żelaza A-286 to utwardzany wydzieleniowo austenityczny superstop na bazie żelaza oraz niklu z dodatkiem molibdenu oraz tytanu. Znajduje on zastosowanie w warunkach wymagających od materiału wysokiej wytrzymałości, odporności na działanie warunków atmosferycznych oraz odporności na korozję. Dzięki zawartości niklu oraz chromu stop posiada doskonałą odporność na utlenianie w temperaturze pracy do 700°C. Wysoka wytrzymałość i doskonała obrabialność stopu A-286 przyczyniła się do jego szerokiego wykorzystania w przemyśle lotniczym na przykład w silnikach odrzutowych i wszelkiego rodzaju przemysłowych turbinach. Znajduje również zastosowanie na elementy złączne w silnikach samochodowych i elementy kolektorów narażonych na wysokie temperatury i obciążenia, a także w morskim przemyśle petrochemicznym [8].

Tabela 2. Skład chemiczny superstopu żelaza A286 [8]

Table 2. Chemical composition of superalloyed iron A286 [8]

Pierwiastek	Min. [%]	Max. [%]
Ni	24	27
Fe	Równowaga*	
Cr	13,5	16
Ti	1,90	2,35
Mo	1	1,5
V	0,10	0,50
C	-	0,08

Mn	-	2
Si	-	1
Al	-	0,35
S	-	0,030
B	0,003	0,01

* Odniesienie do równowagi składu stopu nie gwarantuje, że jest to wyłącznie wymieniony pierwiastek, ale że dominuje, a inne występują tylko w minimalnych ilościach.

Tabela 3. Wybrane właściwości mechaniczne i fizyczne superstopu żelaza A286 [8]

Table 3. Selected mechanical and physical properties of the iron superalloy A286 [8]

Gęstość [g/cm ³]	7,94
Temperatura topnienia [°C]	1370-1430
Ciepło właściwe [J/kg*°C]	420
Moduł Younga [GPa]	201
Współczynnik Poissona	0,31
Współczynnik sprężystości [N/m ²]	2.01e+11
Współczynnik naprężenia ściskającego [N/m ²]	7,71e+10
Wytrzymałość na rozciąganie [N/m ²]	620000000
Granica plastyczności [N/m ²]	275000000
Masa właściwa [kg/m ³]	7 920
Współczynnik rozszerzalności cieplnej [K]	1,65e-05
Współczynnik przewodzenia ciepła [W/m*K]	15,1

Stop Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (SS)

Stop Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (SS) jest metastabilnym stopem typu β , który jest w stanie osiągnąć szeroki zakres właściwości mechanicznych. W stanie wyżarzonym stop cechuje się wysoką plastycznością i może być obrabiany na zimno. Wysoki poziom wytrzymałości można uzyskać poprzez obróbkę plastyczną na zimno, przesycanie oraz starzenie lub kombinację tych procesów. W porównaniu do stopów dwufazowych, metastabilne stopy typu β , do których zalicza się rozpatrywany materiał pozwalają uzyskać wyższe własności wytrzymałościowe, co jest efektem wydzielania się fazy α w wyniku procesu starzenia. Materiał ten wykazuje wyjątkowo wysoką odporność na korozję i bardzo dobrą wytrzymałość na zmęczenie. Zachowuje wysokie parametry wytrzymałościowe do temperatury 350°C. Stop Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr, ze względu na wysoką wytrzymałość i odporność na korozję znajduje szerokie

zastosowanie, między innymi, w przemyśle chemicznym i petrochemicznym, samochodowym i lotniczym [9-11].

Tabela 4. Skład chemiczny stopu Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (SS) [11]

Table 4. Chemical composition of Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr alloy (SS) [11]

Pierwiastek	Min. [%]	Max. [%]
Ti	71,1	77,0
Al	3,0	4,0
V	7,5	8,5
Cr	5,5	6,5
Mo	3,5	4,5
Zr	3,5	4,5
Fe	-	0,30
O	-	0,12
C	-	0,05
N	-	0,02

Tabela 5. Wybrane właściwości mechaniczne i fizyczne stopu Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (SS) [11]

Table 5. Selected mechanical and physical properties of Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (SS) alloy [11]

Gęstość [g/cm ³]	4,82
Temperatura topnienia [°C]	1650
Granica plastyczności [MPa]	1138
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	1227
Twardość nominalna [HRC]	30-45
Przewodność cieplna [W/(m·C)]	6,2
Ciepło właściwe [J/kg*°C]	515
Oporność elektryczna [10 ⁻⁶ *Ω]	160
Współczynnik Poissona	0,33
Masa właściwa [kg/m ³]	4 820
Współczynnik sprężystości [N/m ²]	1,04e+11
Współczynnik przewodzenia ciepła [W/m*K]	6,2

Nylon 6/10

Nylon 6/10 to nazwa handlowa nadana przez przedsiębiorstwo DuPont poliamidowi 6-10, jako który określa się związek poli(iminosebacoyliminoheksan-1,6-diyl). Nylon znajduje szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu - wytwarza się z niego części maszyn, takie jak prowadnice, koła zębate, przełączniki, kolektory wlotów paliwa, ślimaki, rolki, ale również przedmioty codziennego użytku, jak chociażby piłki do koszykówki, szczoteczki do zębów, itp. Ze względu na utrudniony recykling łopatek turbin wiatrowych bazujących na systemach żywic termoutwardzalnych - takich jak epoksydy, poliestry i estry winylowe, które po utwardzeniu nie mogą być ponownie formowane lub kształtowane, zaczęto eksperymentować z zastosowaniem tworzyw termoplastycznych, między innymi właśnie nylonem 6/10. W przeciwieństwie do materiałów termoutwardzalnych, tworzywa termoplastyczne można podgrzać w celu oddzielenia poszczególnych polimerów, co znacznie ułatwia ich recykling. Technikami umożliwiającymi uzyskanie łopatek turbinowych z nylonu są, między innymi, technologie addytywne. W obecnej fazie badań natrafiono na dwa problemy wymagające znalezienia rozwiązania. Wczesne badania wykazały, że laminaty wykonane z nylonu 6/10 mogą mieć problem z wchłanianiem wilgoci chociaż nie przeprowadzono do tej pory żadnych eksperymentów, aby ocenić poziom wrażliwości laminatów łopatek wiatrowych na wilgoć w suchym oraz mokrym środowisku. Drugim wykazanym problemem jest ich temperatura egzotermiczna. Zdecydowana większość łopatek wiatrowych o skali megawatowej, produkowanych obecnie na świecie wykorzystuje oprzyrządowanie FRP (z jęz. ang; Fiber Reinforced Polymer). Te istniejące formy mogą wytrzymać temperaturę przetwarzania do około 100°C. Temperatury egzotermiczne podczas przetwarzania nylonu 6/10 sięgają znacznie powyżej 100°C. Zasadniczą zaletą nad pozostałymi materiałami nylonu jest jego zdecydowanie niższa masa, niższe koszty produkcji czy też łatwość formowania wyrobu [12].

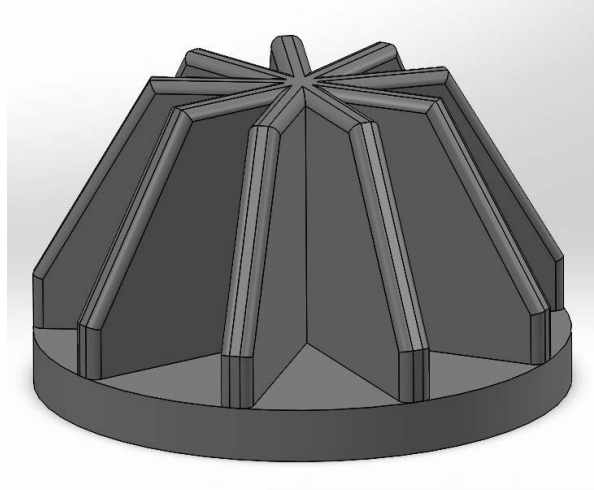
Tabela.6. Wybrane właściwości mechaniczne i fizyczne nylonu 6/10 [12]

Table 6. Selected mechanical and physical properties of nylon 6/10 [12]

Gęstość [g/cm ³]	1,15
Współczynnik sprężystości [N/m ²]	8300000000
Współczynnik Poissona	0,28
Współczynnik naprężenia ściskającego [N/m ²]	3200000000
Masa właściwa [kg/m ³]	1400
Wytrzymałość na rozciąganie [N/m ²]	142559000
Granica plastyczności [N/m ²]	139043000
Ciepło właściwe [J/kg*°C]	1500
Współczynnik przewodzenia ciepła [W/m*K]	0,53
Współczynnik rozszerzalności cieplnej [K]	3e-05

4. MODEL GEOMETRYCZNY CAD

W celu przeprowadzenia analizy wytrzymałościowej za pomocą symulacji komputerowej wykonano model turbiny wiatrowej przy użyciu programu SOLIDWORKS. Zaprojektowany model turbiny został przedstawiony na rysunku 2.



Rysunek 2. Model CAD turbiny wiatrowej
Figure 2. CAD model of a wind turbine

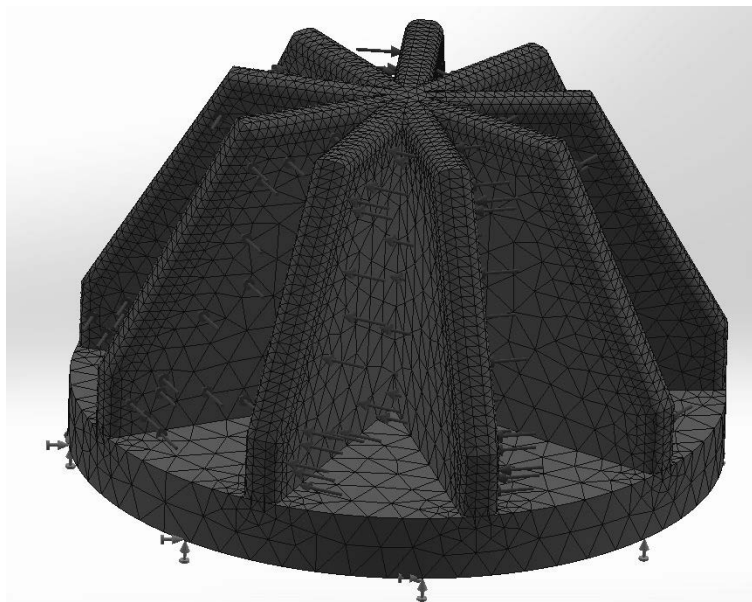
5. WARUNKI BRZEGOWE

W symulacji komputerowej przyjęto następujące warunki brzegowe:

- Na model turbiny została nałożona siatka elementów skończonych (rysunek 3),
- Przyłożono siłę 1500N działającą na każdą łopatkę poziomo w tym samym kierunku dla każdej łopatki (rysunek 4),
- Podstawa elementu została unieruchomiona stosując funkcję “nieruchoma geometria” (rysunek 4).



Rysunek 3. Model CAD z nałożoną siatką elementów skończonych
Figure 3. CAD model with superimposed finite element mesh



Rysunek 4. Model CAD z nałożoną siatką elementów skończonych, widocznym kierunkiem działania sił oraz unieruchomioną podstawą elementu

Figure 4. CAD model with superimposed finite element mesh, visible direction of forces and immobilized element base

6. ANALIZA WYNIKÓW

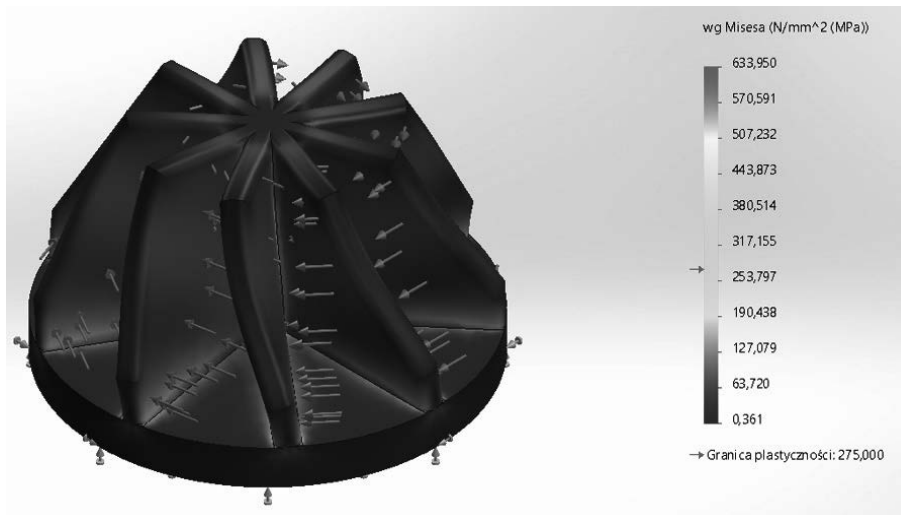
6.1 Wyniki analizy numerycznej naprężeń

Analizę wykonano w oparciu o hipotezę Hubera-Misesa. Po obciążeniu elementu otrzymano wykresy naprężeń, których wartości wyrażono w MPa. Na rysunkach 5-7 przedstawiono rozkład naprężeń powstających podczas zadanego obciążenia. Na podstawie wyników uzyskanych za pomocą symulacji komputerowej stwierdzono, że największe naprężenia występują na styku łopatki turbiny z jej nieruchomą podstawą. Dotyczy to wszystkich analizowanych materiałów. Uzyskane wartości przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7. Uzyskane w wyniku symulacji komputerowej wartości maksymalnych naprężeń dla konkretnych materiałów

Table 7. Computer simulated maximum stress values for specific materials

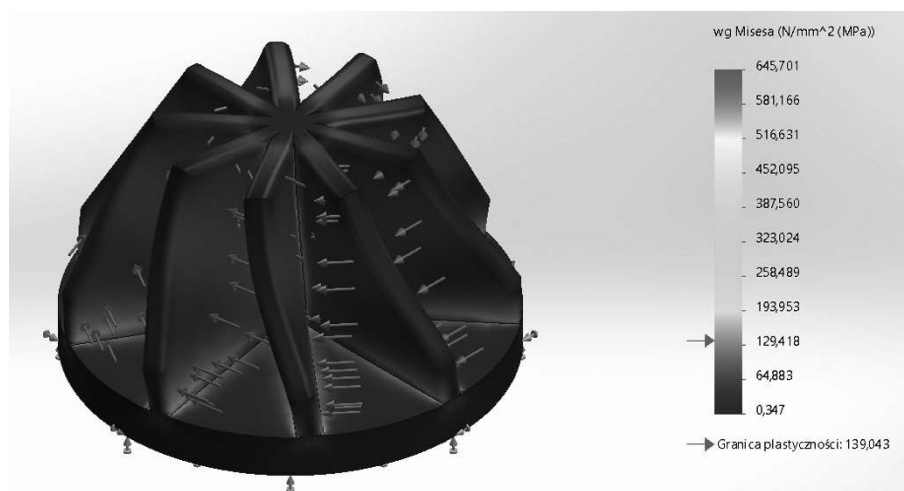
Zastosowany materiał	Wartość maksymalna naprężeń [MPa]
Superstop żelaza A286	633,950
Stop Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (SS)	625,412
Nylon 6/10	645,701



Rysunek 5. Rozkład naprężeń zredukowanych wg. Hubera-Misesa dla superstopu żelaza A286
 Figure 5. Huber-Mises reduced stress distribution for the iron superalloy A286



Rysunek 6. Rozkład naprężeń zredukowanych wg. Hubera-Misesa dla stopu Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (SS)
 Figure 6. Huber-Mises stress reduction distribution for Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr alloy (SS)



Rysunek 7. Rozkład naprężeń zredukowanych wg. Hubera-Misesa dla nylonu 6/10
 Figure 7. Huber-Mises stress distribution for nylon 6/10

6.2 Wyniki analizy numerycznej przemieszczeń

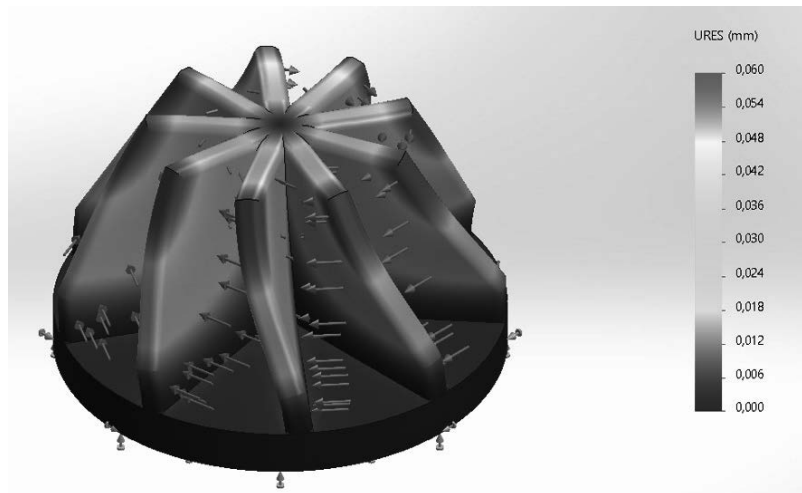
Celem następnie przeprowadzonej symulacji komputerowej było określenie wielkości przemieszczenia pod działaniem zadanej siły i wygenerowanie wykresów przemieszczeń konstrukcji, które przedstawiono na rysunkach 8-10. W wyniku działania obciążenia może dojść do zmiany wymiarów geometrycznych naszego modelu. Największe przemieszczenie w każdym analizowanym materiale występowało na wierzchołkach łopatek. Przemieszczenie, mało od wierzchołków wzdłuż brzegów łopatek w kierunku podstawy elementu. Uzyskane wartości przedstawiono w tabeli 8.

Tabela 8. Uzyskane w wyniku symulacji komputerowej wartości maksymalnych wielkości przemieszczenia dla konkretnych materiałów

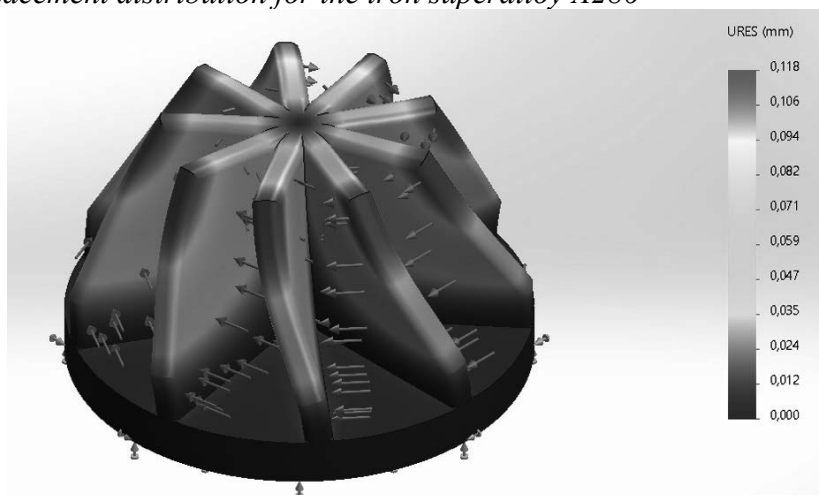
Table 8. Computer simulated maximum displacement values for specific materials

Zastosowany materiał	Maksymalna wielkość przemieszczenia [mm]
Superstop żelaza A286	0,060
Stop Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (SS)	0,118
Nylon 6/10	1,449

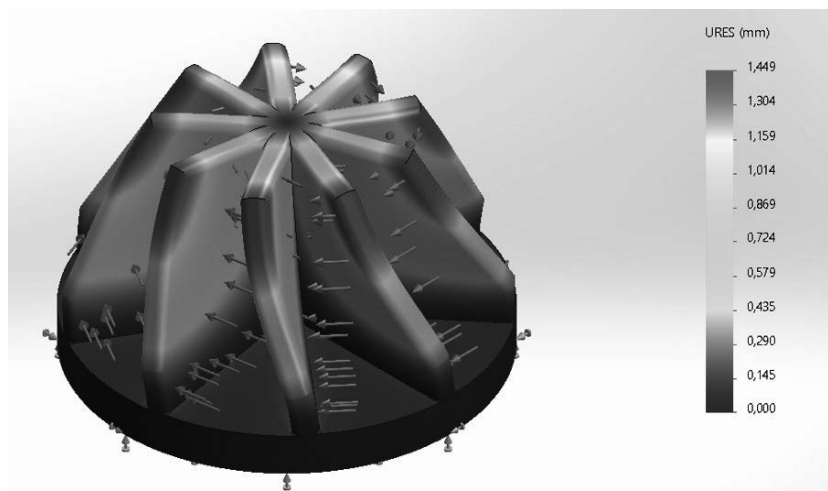
W przypadku superstopu żelaza A286 oraz stopu Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr przemieszczenia są pomijalnie małe w stosunku do wymiarów naszego modelu, nie są zatem istotne z punktu widzenia funkcjonalności konstrukcji. Natomiast w przypadku analizy modelu wykonanego z nylonu 6/10 przemieszczenie jest znacznie większe w porównaniu do pozostałych rozpatrywanych materiałów, jak również jest na tyle istotne, iż mogłoby stanowić zagrożenie dla funkcjonowania i bezpieczeństwa naszej konstrukcji.



Rysunek 8. Rozkład przemieszczeń dla superstopu żelaza A286
Figure 8. Displacement distribution for the iron superalloy A286



Rysunek 9. Rozkład przemieszczeń dla stopu Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (SS)
Figure 9. Displacement distribution for Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr alloy (SS)



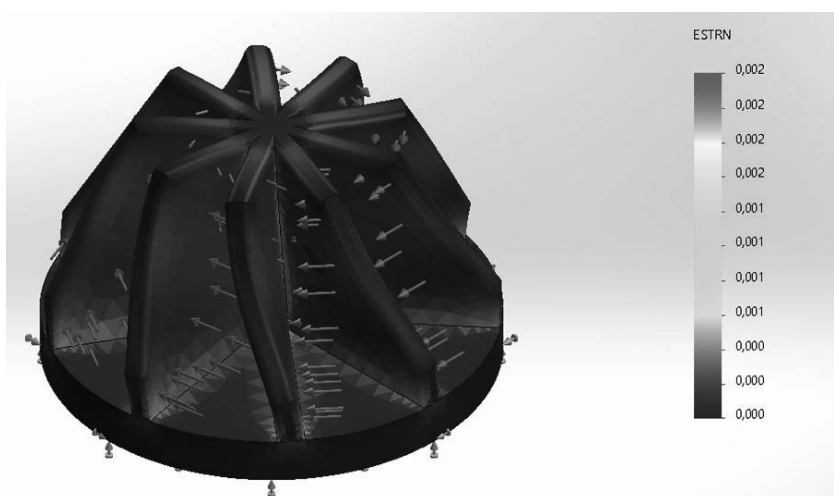
Rysunek 10. Rozkład przemieszczeń dla nylonu 6/10
Figure 10. Displacement distribution for nylon 6/10

6.3 Wyniki analizy numerycznej odkształcenia równoważnego

Ostatnia przeprowadzona symulacja miała na celu określenia siły krytycznej powodującej odkształcenie. Na rysunkach 11-13 przedstawiono odkształcenie równoważne reprezentowane przez największą siłę potrzebną do odkształcenia w danej osi. Uzyskane wartości przedstawiono w tabeli 9.

Tabela 9. Uzyskane w wyniku symulacji komputerowej wartości maksymalnych odkształceń
Table 9. The maximum deformation values obtained from the computer simulation

Zastosowany materiał	Maksymalna wartość odkształcenia
Superstop żelaza A286	0,002
Stop Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (SS)	0,005
Nylon 6/10	0,058



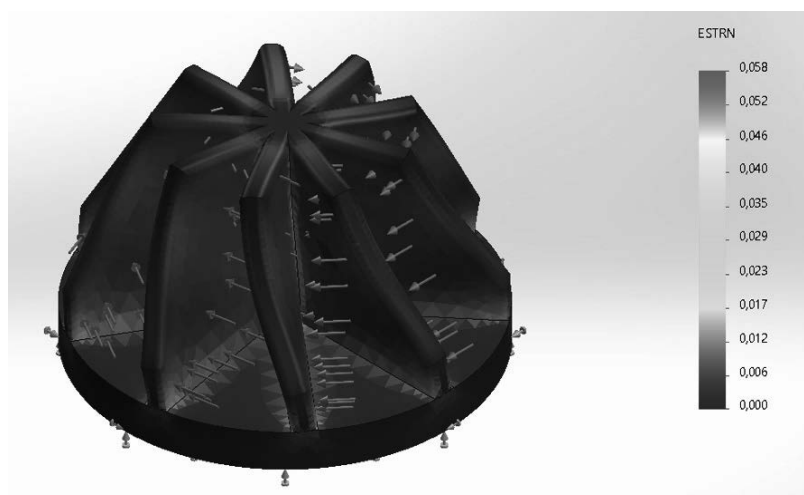
Rysunek 11. Odkształcenie równoważne dla superstopu żelaza A286

Figure 11. Equivalent deformation for iron superalloy A286



Rysunek 12. Odkształcenie równoważne dla stopu Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (SS)

Figure 12. Equivalent deformation for Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr alloy (SS)



Rysunek 13. Odształcenie równoważne dla nylon 6/10

Figure 13. Equivalent deformation for nylon 6/10

Całościowe wyniki wykonanych symulacji przedstawiono w tabeli 10.

Tabela 10. Zestawienie całościowe wyników z przeprowadzonych symulacji komputerowych
Table 10. Summary of overall results from computer simulations carried out

Zastosowany materiał	Wartość maksymalna naprężeń [MPa]	Maksymalna wielkość przemieszczenia [mm]	Maksymalna wartość odkształcenia	Granica plastyczności [MPa]	Masa [kg]
Superstop żelaza A286	633,950	0,060	0,002	275	17,24
Stop Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (SS)	625,412	0,118	0,005	1034,214	10,50
Nylon 6/10	645,701	1.449	0,058	139,043	3,04

7. PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki analizy wytrzymałościowej wskazują, że superstop żelaza A286 oraz stop Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (SS) nadają się na zastosowanie jako materiał na łopatki turbin wiatrowych, nawet przy działaniu znacznych obciążeń i pomnożeniu otrzymanych wyników przez współczynnik bezpieczeństwa konstrukcji który wynosi 1,2. W przypadku nylonu przy działaniu dużych sił dochodzi do znacznej deformacji materiału, która może znacząco ograniczyć funkcjonalność urządzenia i stanowić potencjalne zagrożenie dla bezpieczeństwa jego użytkowania. Odształcenie w tym przypadku spowodowane jest ograniczonymi

własnościami mechanicznymi materiałów polimerowych. Trwają jednak zaawansowane prace nad wdrożeniem tej grupy materiałów jako zamienników stopów tytanu czy też nadstopów niklu w produkcji łopatek turbin wiatrowych, stosując technologię druku 3D.

Największe naprężenia uzyskano dla nylonu. Warto jednak zauważyć, że różnice pomiędzy poszczególnymi materiałami są nieznaczne, a żadne z nich nie przekracza granicy wytrzymałości określonej w założeniach modelowych.

Największe przemieszczenie wykazuje model wykonany z nylonu. Jest ono aż dwudziestoczekrotnie większe niż w przypadku superstopu żelaza A286 oraz dwunastokrotnie niż w przypadku stopu Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (SS).

Największe odkształcenie uzyskano dla modelu wykonanego z nylonu, który przekroczył maksymalną wartość dopuszczanych odkształceń nieomal dwukrotnie. W przypadku stopów tytanu i superstopu żelaza odnotowane wartości odkształceń były ponad dziesięciokrotnie mniejsze.

Spośród rozpatrywanych, za najbardziej optymalny materiał, z przeznaczeniem na łopatki turbiny wiatrowej typu VAWT, uznać można stop tytanu Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (SS), ze względu na jego wystarczające własności wytrzymałościowe, a co za tym idzie niskie wartości przemieszczeń i odkształceń - przy relatywnie niskim ciężarze właściwym.

LITERATURA

1. Bórawski, P., Bełdycka-Bórawska, A., Jankowski, K. J., Dubis, B., Dunn, J. W.; Development of wind energy market in the European Union, *Renewable Energy*, 2022
2. Sadorsky P.; Wind energy for sustainable development: Driving factors and future outlook, *Journal of Cleaner Production*, 289, 2021
3. Bošnjaković M., Katinić M., Santa R., Marić D.; Wind Turbine Technology Trends; *Applied Sciences* 12(17), 2022
4. Doliński Ł.; Zastosowanie transformaty falkowej do detekcji uszkodzeń w kompozytowych łopatkach turbin wiatrowych, praca doktorska; Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, 2013
5. Baworski A., Garbala, K., Czech P., Witaszek K.; Estimation of the ability to use a mass of air from a moving vehicle in wind turbine propulsion; *Scientific Journal of Silesian University of Technology, Series Transport*, 88, 2015, p.5-17
6. Khaled R. Abdelaziz, Mohamed A.A. Nawar, Ahmed Ramadan, Youssef A. Attai, Mohamed H. Mohamed; Performance improvement of a Savonius turbine by using auxiliary blades, *Energy*, Volume 244, Part A, 2022
7. Gatlewar A. R., Mandavgade N. K., Kanojiya M. T., Kalbande V. N.; Material selection for rotor blade of vertical axis wind turbine; *Materials Today: Proceedings*, 46, 2021
8. https://www.haraldpohl.com/globalassets/pdf/082_incoloy-alloy-a-286.pdf - dostęp dnia 08.04.2023
9. Cao S., Zhou X., Lim C. V. S., Boyer R. R., Williams J. C., Wu, X; A strong and ductile Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (Beta-C) alloy achieved by introducing trace carbon addition and cold work; *Scripta Materialia*, 178, 2020, p.124–128
10. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9364> - dostęp dnia 08.04.2023
11. <https://titanium.co.id/ti-3al-8v-6cr-4mo-4zr/> - dostęp dnia 08.04.2023
12. Snowberg D.; IACMI Project 4.2: Thermoplastic Composite Development for Wind Turbine Blades. Final Technical Report PA16-0349-4.2-01; December 7, 2021, p.122-124



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Obróbka laserowa materiałów konstrukcyjnych i narzędziowych

J. Polisa^a, Z. Buchaj^b, D. Pakuła^c, M. Staszuk^c

^a Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, email: jakupol064@student.polsl.pl

^b Student Politechniki Śląskiej, Wydział Inżynierii Biomedycznej, email: zb301191@student.polsl.pl

^c Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: daniel.pakuła@polsl.pl; marcin.staszuk@polsl.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono podsumowanie aktualnego stanu wiedzy na temat wybranych zastosowań technik obróbki laserowej materiałów konstrukcyjnych i narzędziowych. Szczególną uwagę poświęcono zagadnieniom dotyczącym teksturowania laserowego oraz LIPSS (Laser Induced Periodic Surface Structures).

Abstract: This paper presents a summary of the current state of knowledge on selected applications of laser processing techniques for structural and tooling materials. Special attention is given to laser texturing and LIPSS (Laser Induced Periodic Surface Structures).

Słowa kluczowe: Teksturowanie laserowe, LIPSS, obróbka laserowa, materiały konstrukcyjne, materiały narzędziowe.

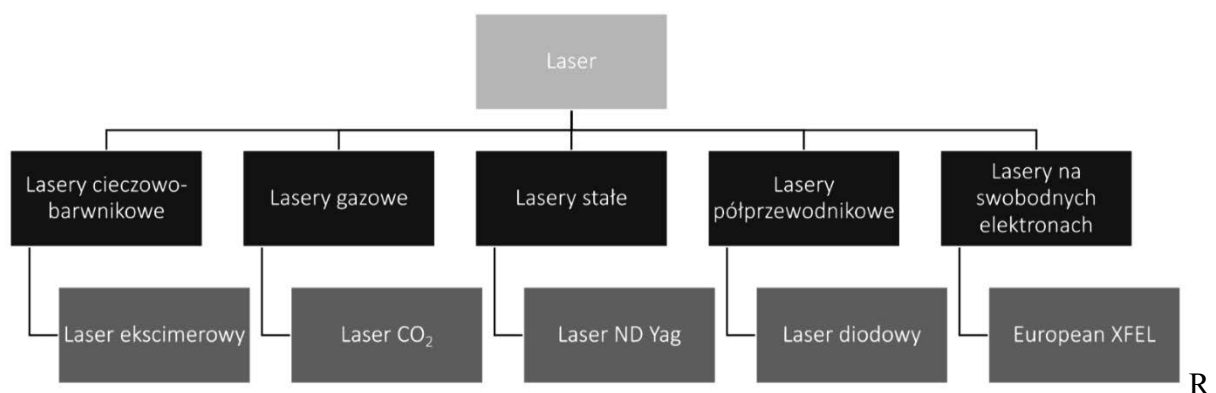
1. WPROWADZENIE

Rozwój sektora naukowo-badawczego oraz przemysłu wymaga od inżynierów, badaczy, producentów oraz projektantów opracowania a następnie wdrożenia technologii obróbki powierzchniowej materiału, która umożliwi uzyskanie pożądanych własności gotowego detalu jak najmniejszym kosztem ekonomicznym z możliwie najwyższą precyzją wykonania. Dodatkowo specyficzne warunki zastosowania wielu elementów wymaga połączenia wzajemnie wykluczających się właściwości. Właściwości takie występują w wielu typowych produktach, które muszą pełnić wiele funkcji, takich jak koła zębate, których korpus musi być wystarczająco wytrzymały, aby wytrzymać działanie obciążeń oraz różnego rodzaju naprężeń. Jednocześnie jego warstwa wierzchnia musi być twarda oraz odporna na ścieranie, aby zapobiec zużyciu. Wpływ powierzchniowej obróbki laserowej ze szczególnym uwzględnieniem teksturowania laserowego oraz LIPSS (j.ang. Laser Induced Periodic Surface Structures) na uzyskanie wspomnianych właściwości przez materiały, został omówiony w przedstawionym artykule [1,2].

Przełomowe wydarzenie, jakim było odkrycie lasera, przez Maiman'a w 1960 roku zapoczątkowało bardzo szybki rozwój technik laserowych. Od połowy lat 70-tych lasery znalazły zastosowanie w przemyśle głównie do cięcia, spawania i znakowania, a także w

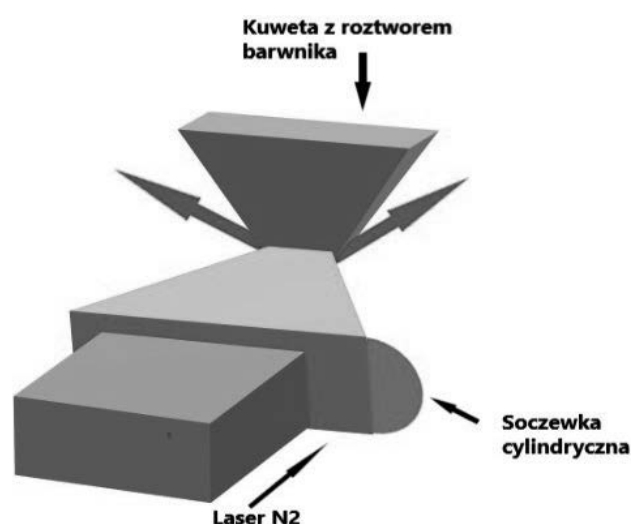
technice wojskowej, kosmicznej oraz medycynie i geodezji. Rozwój technik laserowych związanych z ulepszaniem powierzchni, takich jak hartowanie, stopowanie, natapianie, szklwienie oraz wytwarzanie cienkich warstw nastąpił w latach 80-tych i na początku lat 90-tych. W przemyśle wykorzystuje się głównie lasery o mocy powyżej 1 kW, molekularne CO₂, a w ostatnich latach również lasery na ciele stałym Nd-YAG, ekscimerowe i diodowe [3].

Laser z definicji oznacza wzmocnienie światła poprzez wymuszoną emisję promieniowania natomiast zasada jego działania jest oparta na wymuszonej emisji promieniowania elektromagnetycznego zachodzącej w układach atomów, jonów lub cząsteczek doprowadzonych przez tzw. pompowanie optyczne (wzbudzenie) do stanu inwersji obsadzeń odpowiednich poziomów energetycznych. Bardzo istotną kwestią jest dobranie urządzenia laserowego do odpowiedniego ośrodka, ale także materiału, który ma zostać poddany potencjalnej obróbce powierzchniowej [4,5]. Podział laserów ze względu na ośrodek pracy wraz z przykładowymi laserami znajdującymi się w danej grupie pokazano na rysunku 1 natomiast na rysunkach 2-6 przedstawiono schematy budowy poszczególnych laserów.



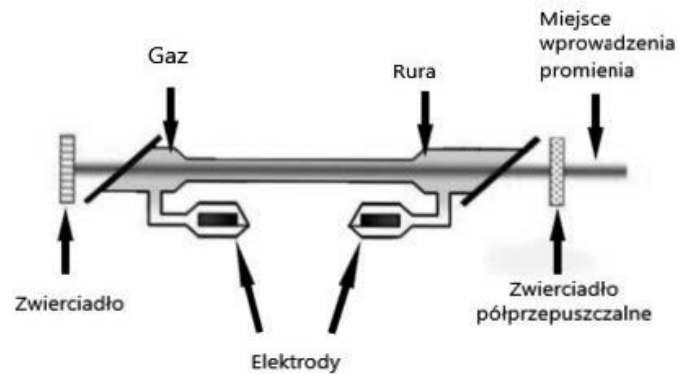
Rysunek 1. Podział laserów ze względu na ośrodek pracy [4,5]

Figure 1. Division of lasers according to the medium [4,5]



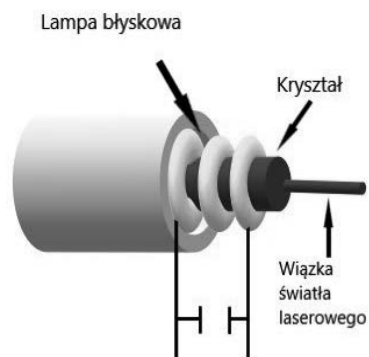
Rysunek 2. Budowa lasera ekscimerowego - działającego w ośrodku ciekłym [4]

Figure 2. Structure of an excimer laser - operating in a liquid medium [4]



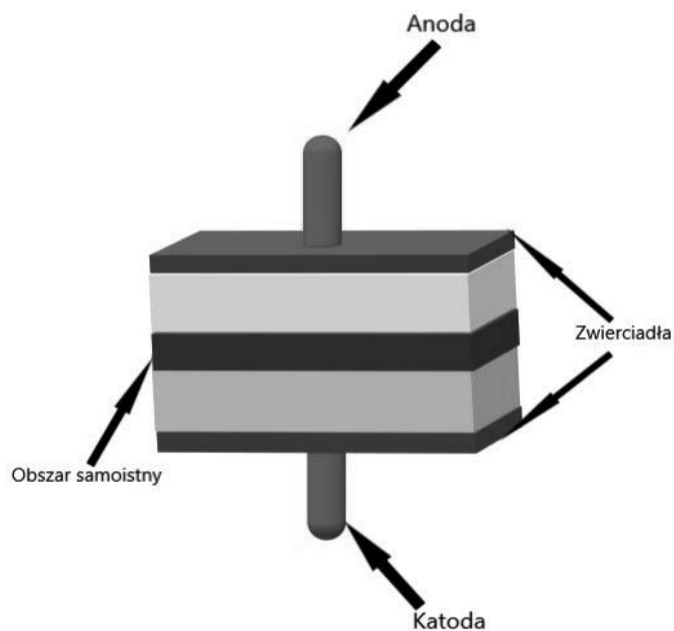
Rysunek 3. Budowa lasera działającego w ośrodku gazowym [4]

Figure 3. Construction of a laser operating in a gaseous medium [4]



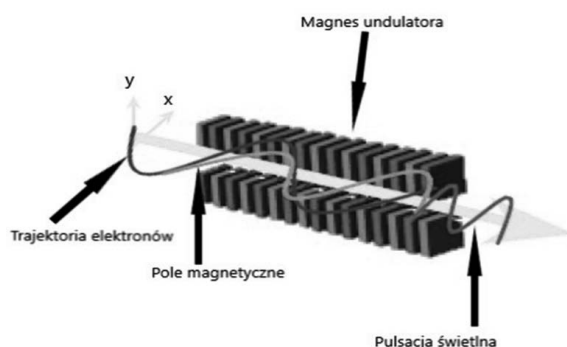
Rysunek 4. Budowa lasera działającego w ośrodku stałym [4]

Figure 4. Structure of a laser operating in a solid state medium [4]



Rysunek 5. Budowa lasera diodowego – laser półprzewodnikowy [4]

Figure 5. Diode laser structure - semiconductor laser [4]



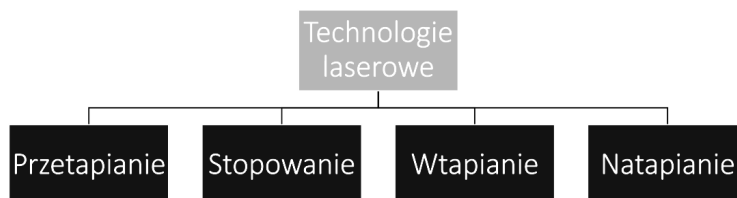
Rysunek 6. Laser działający na swobodnych elektronach [4]

Figure 6. Free-electron laser [4]

Każdy ze wspomnianych wyżej laserów posiada charakterystyczne cechy, mające kluczowy wpływ na materiały poddawane obróbce. Jeśli chodzi o lasery CO₂, czyli lasery gazowe, w których ośrodkiem czynnym jest mieszanina dwutlenku węgla, azotu oraz helu, emitują one falę w zakresie podczerwieni. Częstkami czynnymi w laserze molekularnym są cząsteczki dwutlenku węgla. Poziomy laserowe odpowiadają energiom drgań cząsteczki CO₂, związanym z rozciąganiem podłużnym symetrycznym lub niesymetrycznym i rozciąganiem poprzecznym deformacyjnym, z kolei cząsteczki azotu przekazują energię bezpośrednio na górny poziom wzbudzonej cząsteczki dwutlenku węgla, co umożliwia uzyskanie inwersji obsadzeń. W przypadku laserów ND-YAG, substancją czynną w tym wypadku jest należący do lantanowców neodym. Długość aktywnego ośrodka objętościowego takiego lasera oscyluje w granicach 1 mm. Możliwość budowy lasera o tak małych wymiarach powstała w wyniku opanowania technologii diod generujących wiązkę o mocy rzędu watów z możliwością dopasowania pasma emisji tych diod do pasma maksymalnej absorpcji neodymu ($\lambda=0,81 \mu\text{m}$). Długość fali emitowanej przez laser wiązki to $\lambda=1,06 \mu\text{m}$. Lasery ekscimerowe – inaczej lasery barwnikowe, to urządzenia wykorzystujące barwnik organiczny w postaci ciekłego roztworu jako ośrodek czynny. Cząsteczki barwnika mogą oddawać pochłoniętą na skutek pompowania energię między innymi w drodze emisji wymuszonej, w szerokim zakresie długości fal co daje tej metodzie znaczą przewagę nad metodami w ośrodkach gazowych i stałych. Głównie wykorzystywaną substancją w tej technice jest rodamina 6G. Lasery półprzewodnikowe - określane również jako lasery diodowe są to lasery, których obszarem czynnym jest półprzewodnik. Najczęściej mają postać złącz p-n w których obszar czynny jest pompowany przez przepływający przez złącze prąd elektryczny. Są to najbardziej perspektywiczne lasery z punktu widzenia ich zastosowań w fotonice ze względu na małe wymiary, dość wysokie moce, łatwość modulacji prądem sterującym o wysokiej częstotliwości i możliwość uzyskania promieniowania od pasma bliskiej podczerwieni do skrajnego fioletowego pasma widzialnego. Laser na swobodnych elektronach to urządzenie emitujące spójne promieniowanie elektromagnetyczne. W przeciwieństwie do zwykłych laserów, w których promieniowanie jest generowane w materii, lasery na swobodnych elektronach emitują promieniowanie od elektronów poruszających się bardzo szybko w specjalnie ukształtowanym polu magnetycznym (w warunkach próżni). W laserze tego typu długość emitowanej fali nie jest ograniczona przez konkretne przejścia między dyskretnymi poziomami energii w materii, ale wynika z konstrukcji

urządzenia, dzięki czemu można go łatwo przestroić i posiada najszerszy zakres emitowanych częstotliwości spośród wszystkich laserów [4,5].

W zależności od gęstości mocy wiązki laserowej oraz czasu oddziaływania wiązki na materiał, technologie laserowe zapewniające wymagane właściwości powierzchniowe materiału zostały przedstawione na rysunku 7.



Rysunek 7. Podział technologii laserowych w zależności od gęstości mocy wiązki laserowej oraz czasu oddziaływania wiązki na materiał [6]

Figure 7. Division of laser technologies according to the power density of the laser beam and the exposure time of the beam on the material [6]

Przetapianie polega na bardzo szybkim nagrzewaniu powierzchni obrabianej wiązką laserową, czego efektem jest stopienie materiału na głębokość zależną od parametrów prowadzonego procesu. W zależności od rodzaju materiału, w czasie procesu stosuje się gazy ochronne (argon, hel, gazy aktywne chemicznie - Ar+CO₂, CO₂, Ar+N₂). Stopowanie polega na wzbogacaniu przetopionych warstw wierzchnich materiałów w dodatki stopowe (pochodzące np. z WC, VC, TaC) przy jednoczesnej zmianie struktury osnowy warstwy wierzchniej. Wtapianie jest to proces, który zachodzi w wyniku podawania bezpośrednio do jeziora ciekłego metalu materiału dodatkowego w postaci proszku, pasty często w atmosferze gazów aktywnych chemicznie, np. azotu. Natapianie (napawanie) polega na nałożeniu powłoki metodą spawalniczą przez dokładne stopienie materiału dodatkowego (spoiwa) z nadtopionym materiałem podłoża. Napawanie stosuje się zazwyczaj w celu regeneracji zużytych części maszyn i urządzeń oraz wytworzenia użytkowej warstwy wierzchniej na nowych elementach. Grubość warstwy wynosi od 0,1 do 10 mm wzwyż w przypadku zastosowania napawania wielowarstwowego [6,7].

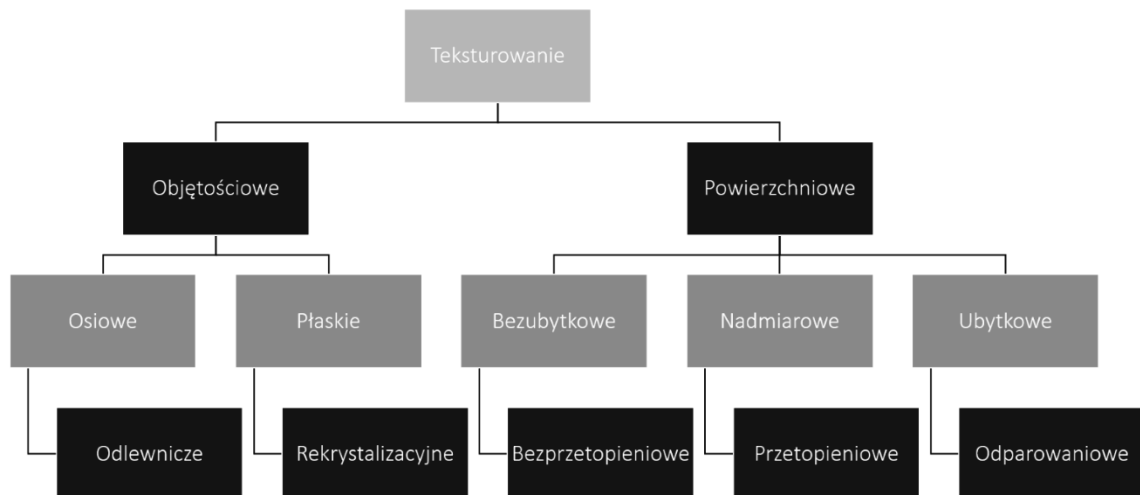
2. TEKSTUROWANIE LASEROWE

Jednym z najnowszych źródeł energii w procesie teksturowania jest promieniowanie laserowe, które oferuje wiele korzyści zarówno technologicznych jak i fizycznych. Dzięki nim są one wykorzystywane z dużym powodzeniem, zwłaszcza w inżynierii powierzchni [1,9].

W laserowym teksturowaniu powierzchni wiązka laserowa o wysokiej gęstości energii jest wykorzystywana do systematycznego projektowania powierzchni narzędzia. W procesie teksturowania laserowego, laser o wysokiej częstotliwości impulsów i wysokiej powtarzalności indukuje zmiany strukturalne poprzez miejscowe topienie powierzchni. Po zestaleniu stopionej powierzchni tworzy się jej specjalna mikro- i nanostrukturalna topografia. Wiele części maszyn i urządzeń wymaga dziś specjalnie zaprojektowanych powierzchni o starannie zaplanowanej chropowatości, która decyduje o właściwościach warstwy wierzchniej. W zależności od głębokości i częstotliwości chropowatości materiał może mieć zupełnie inne właściwości,

zarówno trybologiczne, jak i optyczne, czy też zmieniające zwilżalność warstwy wierzchniej [1,8].

Rozmieszczenie składników, stopień ich krystalizacji, orientacja, wielkość i kształt ziaren w materiale polikrystalicznym nazywane jest teksturą krystaliczną. Tekstura powoduje anizotropię właściwości fizycznych krystalitów [1]. Podział rodzajów teksturowania przedstawiono na rysunku 8.



Rysunek 8. Podział rodzajów teksturowania [1]

Figure 8. Breakdown of texture types [1]

Pod względem formy możemy wyróżnić teksturę krystaliczną osiową oraz teksturę płaską. Tekstura krystaliczna osiowa wykazuje orientacje krystalitów względem pewnego kierunku natomiast tekstura płaska względem pewnej płaszczyzny. Tekstura krystaliczna osiowa powstaje m.in. podczas procesów odlewniczych na skutek kierunkowego odprowadzania ciepła w trakcie stygnięcia odlewu. W przypadku tekstury płaskiej może ona powstać na skutek przebiegu procesu rekrystalizacji. Kształtowanie się struktury w wyniku rekrystalizacji zależy głównie od tekstury odkształcenia (spowodowanej działaniem sił kierunkowych podczas obróbki plastycznej materiałów na zimno), składu chemicznego stopu oraz temperatury wyżarzania [1,9].

Odnośnie teksturowania laserowego powierzchni można wyróżnić teksturowanie bezubytkowe, nadmiarowe lub ubytkowe. Podczas teksturowania bezubytkowego materiał nie jest usuwany z obszaru oddziaływania wiązki laserowej (plamki laserowej) ale tylko w przypadku zmian strukturalnych przedmiotu obrabianego spowodowanych przemianami fazowymi w ciele stałym lub przetapianiem i krzepnięciem materiału. Techniki te obejmują hartowanie laserowe bezprzetopieniowe oraz przetopieniowe [1,10].

Przykładem teksturowania laserowego bezubytkowego jest bezprzetopieniowe teksturowanie utwardzające za pomocą promieniowania lasera. Zwykle ma na celu podgrzanie modyfikowanego materiału do odpowiedniej temperatury wywołując tym samym przemiany fazowe z następnym szybkim chłodzeniem powodując hartowanie materiału w celu utwardzenia jego warstwy wierzchniej pozostawiając jednocześnie plastyczny rdzeń wewnątrz detalu [1,9,10].

Teksturowanie nadmiarowe obejmuje dostarczenie materiału stopowego (składnika) do obszaru padania wiązki laserowej (poprzez wstrzyknięcie składnika stopowego do jeziora laserowego

lub poprzez nałożenie stopionej laserowo powłoki tego elementu). Techniki te obejmują stopowanie laserowe wtopieniowe, przetopieniowe oraz natopieniowe [1].

Przykładem tego rodzaju teksturowania jest teksturowanie przetopieniowe, najczęściej stosowana technika laserowa. Gdy warstwa powierzchniowa materiału lub elementu maszyny jest podgrzewana przez długi czas (od kilku do kilkudziesięciu milisekund), efekt termiczny staje się dominujący, podgrzewając i topiąc obrabiany materiał. W wyniku zjawiska samochłodzenia zachodzą przemiany fazowe prowadzące do fragmentacji mikrostrukturalnej. Bardzo często wzrasta mikrotwardość, zwłaszcza w stopach Fe-C i innych stopach, które przechodzą proces hartowania. Przy dużej mocy lasera można uzyskać bardzo duże gęstości mocy po skupieniu wiązki laserowej na niewielkim obszarze. Pozwala to na wnikanie promieniowania bardzo głęboko w materiał dzięki dobrej przewodności cieplnej. Następnie uzyskuje się technicznie cenną nadtopioną lub przetopioną warstwę powierzchniową oraz głębszy obszar (strefa wpływu ciepła SWC). Nowoczesne procesy technologiczne, związane głównie z modyfikacją warstw wierzchnich, dominują w mikro- i nanoskali. Dzięki temu zabiegi te mogą być stosowane jako zabiegi końcowe. Szczególnym przypadkiem są setki mikrometrów dla bardzo krótkich impulsów (mikrosekundy, nanosekundy, pikosekundy, femtosekundy) [1,9,10].

Teksturowanie ubytkowe polega na usunięciu materiału z obszaru padania wiązki laserowej w wyniku odparowania i ablacji obrabianego materiału. Wśród tego typu technologii laserowych wyróżniamy: znakowanie, grawerowanie, tworzenie tak zwanych „kieszeni smarowych” (obszarów na zasobniki smaru), chropowacenie powierzchni czy też hartowanie laserowe [1].

Technologie ubytkowe, stosowane są w celu uzyskania trwałej i estetycznej tekstury powierzchniowej. Najczęściej stosowanymi zjawiskami są ablacja laserowa z efektami termicznymi oraz wyrzucaniem i częściowym odparowaniem obrabianego materiału. Procesy technologii ubytkowej mogą być wykorzystywane do teksturowania metodą osadzania laserowego. Odbywa się to przy dużych i bardzo dużych gęstościach mocy promieniowania laserowego (np. $10^7 \div 10^{11}$ W/cm²) i krótkich czasach naświetlania (nano lub pikosekundy). Celem mikroobróbki laserowej jest uzyskanie efektu czystej ablacji laserowej (gwałtowne rozrywanie wiązań atomowych oraz przejście materii w stan pary bez tzw. efektu termicznego). Efekty termiczne związane z ablacją powodują skutki uboczne w postaci intensywnego nagrzewania, topnienia i wytłaczania ciekłego materiału, tworząc strefy wpływu ciepła, w których zachodzą zmiany fazowe oraz strukturalne [1,10].

Teksturowanie laserowe w medycynie znalazło zastosowanie przy obróbce implantów oraz protez których wymiary w połączeniu z rodzajem stosowanego materiału może uniemożliwić zastosowanie konwencjonalnych metod obróbki powierzchni. Jednak za pomocą obróbki laserowej możliwe jest uzyskanie oczekiwanych własności przez biomateriał takich jak: odporność korozyjna, osteointegracja, biokompatybilność oraz duży stosunek jego wytrzymałości do wagi [9]. Przykładowy element, którego powierzchnia została zmodyfikowana za pomocą teksturowania laserowego przedstawia rysunek 9.



Rysunek 9. Proteza stawu kolanowego [9]

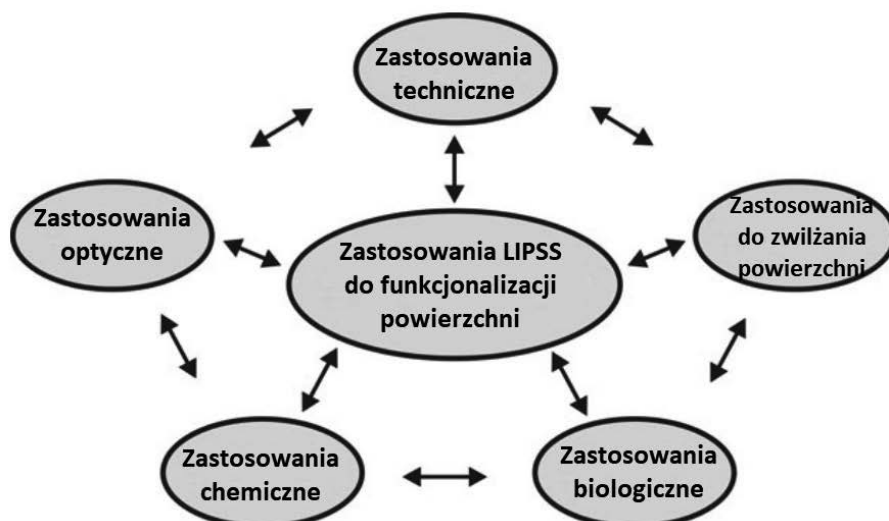
Figure 9. Knee replacement [9]

3. LIPSS

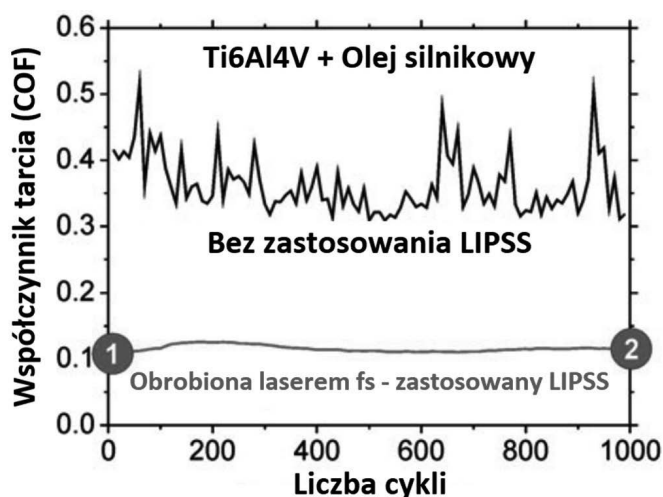
Laserowo indukowane periodyczne struktury powierzchniowe LIPSS (j.ang. Laser Induced Periodic Surface Structures) są zjawiskiem uniwersalnym i mogą być generowane na niemal każdym materiale poprzez napromieniowanie liniowo spolaryzowanym promieniowaniem. Powstają w sposób "samo układający się" i często towarzyszą aplikacjom związanym z przetwarzaniem materiałów. LIPSS mogą być wytwarzane w jednoetapowym procesie oraz umożliwiają nanostrukturyzację powierzchni, a co za tym idzie dostosowanie optycznych, mechanicznych i chemicznych właściwości powierzchni. Typowo, charakteryzują się one rozmiarami strukturalnymi od kilku mikrometrów do mniej niż 100 nanometrów i wykazują wyraźną korelację z kierunkiem polaryzacji światła użytego do ich wytworzenia [11].

Laserowo indukowane periodyczne struktury powierzchniowe, często określane są jako ripples, reprezentują uniwersalne zjawisko, które występuje na prawie każdym materiale stałym po ekspozycji na intensywne liniowo spolaryzowane spójne promieniowanie elektromagnetyczne. Typowo powstają one jako relief powierzchniowy złożony z quasi-okresowych linii i wykazują wyraźną zależność od długości fali (λ) oraz kierunku polaryzacji promieniowania. LIPSS powstają w szerokim zakresie czasów trwania impulsu (τ), od fali ciągłej do kilku femtosekund (fs) [11].

LIPSS może być wykorzystany do wielu zastosowań technicznych. Nanostruktury mogą być wytwarzane w jednoetapowym procesie, który umożliwia różne funkcjonalizacje powierzchni w celu kontroli mechanicznych, optycznych lub chemicznych właściwości powierzchni. Praktyczną korzyścią wynikającą ze stosowania LIPSS jest możliwość uzyskania oczekiwanej struktury powierzchni materiału powstałej w wyniku bezkontaktowej obróbki w środowisku otoczenia. Tym samym unikając stosowania kosztownych metod technologii próżniowych, metod litograficznych czy też dodatkowych procesów chemicznych. Ponadto, wytwarzanie LIPSS może być realizowane w sposób szeregowy lub równoległy i jest kompatybilne z obecnymi przemysłowymi technologiami wytwarzania. Rysunek 10 przedstawia przegląd różnych zastosowań LIPSS do funkcjonalizacji powierzchni. Strzałki wskazują na relacje pomiędzy konkretnymi aplikacjami, zastosowaniami [11].



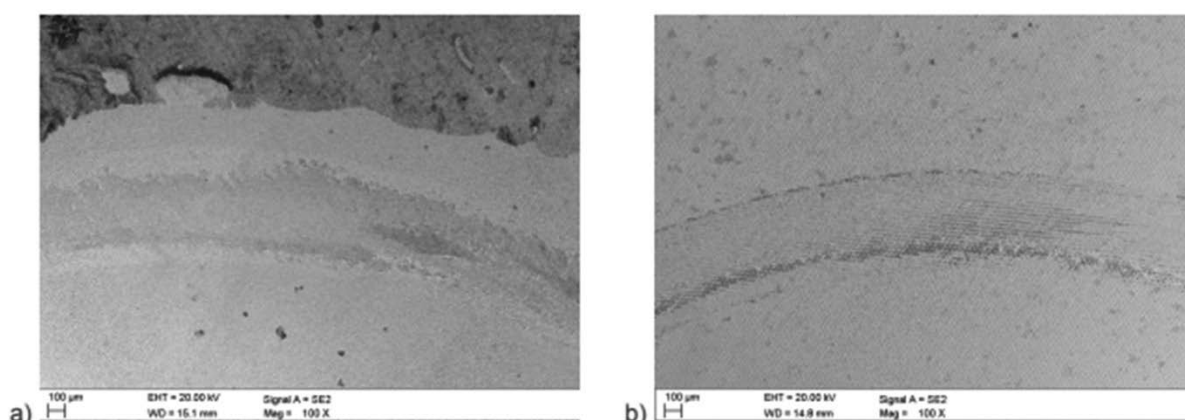
Rysunek 10. Przykładowe zastosowania LIPSS do funkcjonalizacji powierzchni [11]
 Figure 10. Examples of LIPSS applications for surface functionalisation [11]



Rysunek 11. Pomiar współczynnika tarcia (COF) w funkcji liczby cykli ślizgowych dla powierzchni T6Al4V pokrytej laserem (krzywa czerwona. Dla porównania jako odniesienie podano COF powierzchni polerowanej (czarna krzywa) [12]
 Figure 11. Measurement of the coefficient of friction (COF) as a function of the number of sliding cycles for a laser-coated T6Al4V surface (red curve. For comparison, the COF of a polished surface is given as a reference (black curve) [12]

Jednym z zastosowań LIPSS w inżynierii powierzchni jest zmniejszenie tarcia oraz zużycia materiałów. Badania nad zastosowanie LIPSS wykazały poprawę właściwości trybologicznych powierzchni na materiałach w warunkach zarówno smarowanych, jak i niesmarowanych, wykazano również korzystne (niskie tarcie) właściwości przetworzonej ceramiki z węgla krzemu stosowanej do uszczelnień smarowanych wodą. Potwierdzono zmniejszenie tarcia i zużycia dla metali w różnych warunkach badań trybologicznych. Na rysunku 11 przedstawiono pomiar współczynnika tarcia COF (j.ang. Coefficient of Friction) w funkcji liczby cykli

ślizgowych dla powierzchni ze stopu tytanu o strukturze laserowej (czerwona krzywa). Dla porównania jako odniesienie podano COF polerowanej powierzchni (czarna krzywa). Początkowo wypolerowana powierzchnia wykazuje COF w zakresie od 0,3 do 0,5 podczas 1000 cykli ślizgowych. Na powierzchni poddanej obróbce laserem fs pokrytej LSFL (j.ang.: Low-spatial-frequency LIPSS) jest on zmniejszony ponad dwukrotnie (COF 0,12-0,14) [12,13]. Teksturowanie laserowe znacznie zwiększa odporność na ścieranie spiekanych materiałów narzędziowych. Przeprowadzony test odporności na ścieranie pokazuje, że znacznie zmniejsza się szerokość śladu, a w konsekwencji następuje utrata objętości materiału ściernego i masy próbki. Krawędzie śladu próbki nieteksturowanej są nieregularne oraz postrzępione w porównaniu z regularnymi kształtami krawędzi próbki teksturowanej. Dominującym w tym badaniach mechanizmem zniszczenia jest mechanizm ścierny (rysunek 12) [8].



Rysunek 12. Ślady zużycia trybologicznego na powierzchni: a) węglików spiekanych przed teksturowaniem laserowym, b) węglików spiekanych po teksturowaniu laserowym [8]

Figure 12. Traces of tribological wear on the surface of: a) carbides before laser texturing, b) carbides after laser texturing [8]

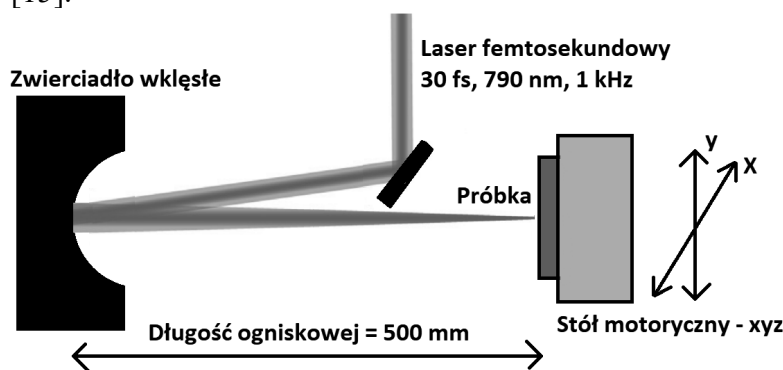
Znaczna poprawa odporności na ścieranie powierzchni węglików spiekanych wynika z faktu uzyskania regularnej mikro oraz nanometrycznej struktury powierzchni. Utworzona tekstura zmniejsza powierzchnię styku w układzie trybologicznym zapewniając w ten sposób zmniejszenie współczynnika tarcia [8].

LIPSS znajduje zastosowanie również w sektorze biomedycznym jako technika umożliwiająca uzyskanie powierzchni antybakteryjnych. W wilgotnym środowisku LIPSS może być stosowany do zmniejszenia pokrycia powierzchni przez niepożądane błony bakteryjne, które stanowią zagrożenie w wielu zastosowaniach medycznych lub przemysłowych. Takie biofilmy składają się z kolonii wielu komórek bakteryjnych, które przylegają do powierzchni [11].

Biofilm to zespół komórek bakteryjnych, które nieodwracalnie przylegają do powierzchni biotycznej lub abiotycznej i są zamknięte w macierzy zewnątrzkomórkowych substancji polimerycznych (EPS), głównie polisacharydów. Rozwój biofilmu jest procesem stopniowym, który rozpoczyna się od przylegania drobnoustrojów do powierzchni, a następnie proliferacji komórek i wytwarzania macierzy EPS. Bakterie zorganizowane w biofilm wykazują zmieniony fenotyp w odniesieniu do tempa wzrostu i transkrypcji genów oraz wykazują zwiększoną odporność na stropy środowiskowe, takie jak rozpuszczalniki organiczne czy antybiotyki. Z punktu widzenia medycyny, biofilmy stanowią duże zagrożenie dla zakażeń bakteryjnych, które są powszechnie odporne na leczenie antybiotykami. Duży odsetek zakażeń szpitalnych związany jest z kolonizacją bakteryjną na urządzeniach medycznych używanych w trakcie

hospitalizacji, takich jak cewniki moczowe czy respiratory. Również przewlekłe infekcje, takie jak zapalenie przyzębia czy mukowiscydoza, są często przypisywane biofilmom [14].

Do napromieniowania powierzchni stali w celu uzyskania powierzchni antybakteryjnej użyto systemu wzmacniacza lasera femtosekundowego. Laser generuje liniowo spolaryzowane impulsy laserowe o czasie trwania impulsu 30 fs, długości fali centralnej 790 nm oraz częstotliwości powtarzania impulsów $f = 1$ kHz. Sferyczne zwierciadło dielektryczne o ogniskowej 500 mm ogniskowało gaussowską wiązkę laserową do średnicy plamki wiązki. Energia impulsu była mierzona za pomocą detektora piroelektrycznego. Próbki były montowane do stoły motorycznego o osiach działania x-y-z i umieszczone w pozycji ogniskowania pod normalnym kątem padania światła. Na rysunku 13 przedstawiono układ eksperymentalny [15].



Rysunek 13. Schemat układu do obróbki laserowej fs [15]

Figure 13. Schematic of the fs laser processing system [15]

Wyniki badań wykazały wyraźny efekt antyadhezyjny w przypadku odpornej na korozję stali V4A i *E. coli* jako szczepu testowego. W przypadku podatnej na korozję stali S235JRC, efekt ten nie został wykryty. Uzyskane wyniki potwierdziły zależność pomiędzy geometrią komórek bakteryjnych a efektem antyadhezyjnym, ponieważ charakterystyka kolonizacji *S. aureus* znacznie różni się od charakterystyki kolonizacji *E. coli*, mimo że badany był ten sam materiał. Technika obróbki laserem femtosekundowym okazała się być skuteczna w kontrolowaniu kolonizacji bakterii [15].

4. PODSUMOWANIE

Obróbka laserowa materiałów konstrukcyjnych i narzędziowych jest metodą charakteryzującą się wysoką precyzją. Ze względu na specyficzne własności wiązki lasera jesteśmy w stanie kontrolować strukturę materiału warstwy wierzchniej. A co za tym idzie wpływać na właściwości materiału w zależności od założonych wymagań jakich oczekujemy od gotowego detalu. Uzyskanie konkretnych właściwości materiału jest możliwe między innymi poprzez manipulowanie głębokością wtopienia lasera.

Ze względu na bardzo precyzyjną kontrolę właściwości materiałów nie tylko konstrukcyjnych czy narzędziowych, ale również biomedycznych, obróbka laserowa znajduje szerokie spektrum zastosowań zarówno w przemyśle jak i sektorze badawczo-rozwojowym. Jednak przed technikami laserowymi nadal stoją wyzwania na skalę przemysłową, takie jak powtarzalność procesu wytwarzania, niezawodność czy też efektywność finansowa.

Ponad 50 lat po pierwszym odkryciu laserowo indukowanych periodycznie struktur powierzchniowych, temat LIPSS rozwinął się dynamicznie zarówno w sektorze pracy naukowej jak i przemysłowej. Najistotniejszy fundamentalny wkład w ich zrozumienie powstał w latach 80. ubiegłego wieku dla krótkich impulsów (ns-)laserowych. Od przełomu tysiącleci, dzięki zwiększonej dostępności ultrakrótkich impulsów laserowych oraz odkryciu nowego typu niezwykle małych LIPSS o okresach sięgających poniżej 100-nm, temat ten gwałtownie się rozwinął i dokonano wielu znaczących postępów w jego zrozumieniu. Obecnie, przemysłowe zastosowania LIPSS są aktywnie badane, między innymi do poprawy wydajności trybologicznej powierzchni stałych, kontroli właściwości zwilżania i przyczepności w celu opracowania powierzchni antybakteryjnych.

PODZIĘKOWANIE

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

LITERATURA:

1. T. Burakowski, W. Napadłek, Rodzaje teksturowania laserowego w tribologii, *Tribologia* 4 (2010): str. 34-42.
2. F. Chen, C. Zhang, F. Chen, Z. Huang, M. Jia, G. Chen, Y. Ye, Y. Lin, W. Liu, B. Chen, Q. Shen, L. Zhang, E.J. Lavernia; Additive manufacturing of functionally graded materials, review; 2019: str. 1-5; <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100901>.
3. J. Radziejewska - Laserowa modyfikacja właściwości warstwy wierzchniej wspomaganą nagniataniem Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk Warszawa 2011 prace IPPT – IFTR Reports 3/2011: str. 16-28; ISBN 978-83-89687-70-8.
4. B. Ziętek, Lasery, UMK, 2008; str. 368-646; ISBN 978-83-231-2195-4
5. H. Abramczyk, Typy laserów, Wstęp do spektroskopii Laserowej, PWN, 2000: str. 53-88; ISBN 978-83-01-13141-8.
6. L.A. Dobrzański, Anna D. Dobrzańska-Danikiewicz, Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich, 2011: str.185-193; ISBN 83-89728-93-1.
7. M. Bonek, Technologie laserowe w inżynierii powierzchni, Politechnika Śląska
8. D. Pakuła, M. Staszuk, M. Wawrzyczek, P. Kozmin, A. Cermak, Influence of laser texturing on tribological properties of tool materials, *Metal* 2019, 22-24 maj 2019, Berno: str. 1-6; <https://doi.org/10.37904/metal.2019.888>.
9. 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: str. 1-16; DOI:10.1016/j.jmapro.2020.02.009.
10. 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: str. 346-357; <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2021.04.004>.

11. J. Bonse, S. Kirner, J. Krüger, Laser-Induced Periodic Surface Structures (LIPSS), Handbook of Laser Micro- and Nano-Engineering (K. Sugioka, Ed), wrzesień 2020: str. 1-59; DOI:10.1007/978-3-319-69537-2_17-2.
12. J. Bonse, S. Höhm, M.Hartelt, Femtosecond laser-induced surface nanostructures for tribological applications, Optically Induced Nanostructures Chapter: 7, maj 2015: str. 141-156; DOI:10.1515/9783110354324-011.
13. CY. Chen, CJ. Chung, BH. Wu, WL. Li, CW. Chien, PH. Wu, CW. Cheng., Microstructure and lubricating property of ultra-fast laser pulse textured silicon carbide seals. *Appl Phys A* 107, 2012: str. 345–350; <https://doi.org/10.1007/s00339-012-6822-9>.
14. D. Monroe, Looking for chinks in the armor of bacterial biofilms, *PLOS Biology* 5(11), listopad 2007: str. 24-25; <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0050307>.
15. N. Epperlein, F. Menzel, K. Schwibbert, R. Koter, J. Bonse, J. Sameith, J. Krüger, J. Toepel, Influence of femtosecond laser produced nanostructures on biofilm growth on steel, Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), październik 2017: str. 418-424; <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.02.174>.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Klasyfikacja funkcjonalnych materiałów gradientowych ze względu na wartość naprężeń szczątkowych oraz stopień kontroli gradientu

J. Polis^a, A. Kloc-Ptaszna^b

^a Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny

email: jakupol064@student.polsl.pl

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych,

email: anna.kloc@polsl.pl

Streszczenie: W ciągu ostatnich kilku lat zaproponowano wiele klasyfikacji funkcjonalnych materiałów gradientowych (FGM). W niniejszym raporcie przedstawiono przegląd oraz opis wybranych klasyfikacji materiałów FGM ze względu na wartość naprężeń szczątkowych oraz stopnia kontroli gradientu.

Abstract: In recent years, many classifications have been proposed for functionally graded materials (FGMs). This report presents an overview and description of selected classifications of FGM materials with respect to the value of residual stresses and the degree of gradient control.

Słowa kluczowe: FGM, klasyfikacja FGM, materiały gradientowe, naprężenia szczątkowe, stopień kontroli gradientu.

1. WSTĘP

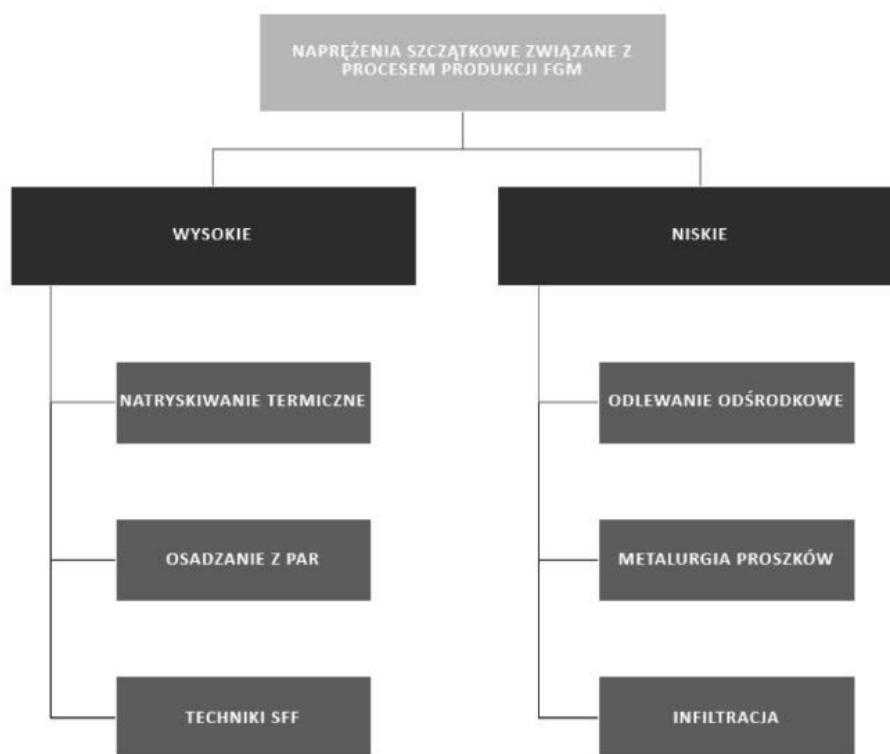
Funkcjonalne materiały gradientowe (j.ang.: Functionally Graded Materials – FGM), w przeciwieństwie do materiałów takich jak na przykład kompozyty, wyróżniają się stopniową zmianą własności od jednego punktu do drugiego w określonym kierunku. Część badaczy uważa ten typ materiałów za rozwinięcie konwencjonalnych materiałów kompozytowych. Istnieje jednak w tej materii niejednoznaczność – materiały gradientowe nie wykazują bowiem granicy rozdziału między składowymi, która jest jedną z cech pozwalających zdefiniować dany materiał jako materiał kompozytowy [1,2].

Materiały gradientowe są grupą materiałów, która obecnie przeżywa gwałtowny rozwój. Ze względu na ich doskonałe własności mechaniczne i fizyczne, pozwalające na szereg zastosowań niemal we wszystkich dziedzinach inżynierii, cieszą się one coraz większym zainteresowaniem, zarówno ze strony sektora naukowo-badawczego, jak również przemysłu. Zastosowanie przemysłowe materiałów gradientowych zwróciło uwagę na kwestię odpowiedniej klasyfikacji tych materiałów, w tym także z uwzględnieniem warunków oraz technologii wytwarzania przyczyniających się do powstawania w materiale naprężeń

szczątkowych. Inną kluczową dla uzyskiwanych własności, a co za tym idzie wymagającą odpowiedniego uszeregowania kwestią jest możliwość kontroli gradientu odpowiadająca danym technikom wytwarzania [1,2].

2. PODZIAŁ PROCESÓW WYTWARZANIA FUNKCJONALNYCH MATERIAŁÓW GRADIENTOWYCH ZE WZGLĘDU NA WARTOŚĆ NAPRĘŻEŃ SZCZĄTKOWYCH

W zależności od metody wytwarzania FGM, w materiale powstają naprężenia szczątkowe o różnej wartości. Rysunek 1 przedstawia klasyfikację metod wytwarzania FGM ze względu na poziom występujących naprężeń szczątkowych. Chociaż powszechnie zaleca się obróbkę cieplną odprężającą, w celu usunięcia lub zmniejszenia wpływu naprężeń szczątkowych, nie zostały dotychczas opublikowane badania dotyczące dodatkowej obróbki produktów FGM w celu optymalizacji wartości naprężeń szczątkowych [3]. W tabeli 1 zestawione zostały wartości naprężeń szczątkowych w różnych procesach produkcyjnych dla różnych współczynników rozszerzalności cieplnej (CTE) i znacznych zmian temperatury produkcji.



Rysunek 1. Klasyfikacja procesów wytwarzania funkcjonalnych materiałów gradientowych ze względu na wartość naprężeń szczątkowych [3]

Figure 1. Classification of manufacturing processes of functionally graded materials according to a residual stress value [3]

Jednym z procesów, w wyniku których powstają naprężenia szczątkowe w materiale jest natryskiwanie plazmowe. Natryskiwanie plazmowe cechuje się dużą elastycznością oraz niskimi kosztami, w porównaniu z innymi metodami powlekania materiałów. Znajduje ono

zastosowanie między innymi w nakładaniu powłok stanowiących bariery termiczne. Jednak w trakcie wytwarzania powłok na skutek działania rozległych naprężeń mechanicznych oraz termicznych występowało słabe wiązanie pomiędzy powłoką a podłożem. W celu ograniczenia wpływu naprężeń, zastosowano warstwowe natryskiwanie plazmą tworząc poszczególne warstwy w sposób umożliwiający stworzenie materiału gradientowego. Wykazano, że ze wzrostem liczby poszczególnych warstw następuje zwiększenie siły wiązania. Uzyskano w ten sposób powłokę ZrO₂-NiCrAlY FGM charakteryzującą się występowaniem znikomych naprężeń szczątkowych oraz znaczną siłą wiązania [4].

Tablica 1. Zestawienie wartości naprężeń szczątkowych występujących w funkcjonalnych materiałach gradientowych dla najpopularniejszych technik ich wytwarzania [3]

Table 1. Comparison of residual stresses value in functionally graded materials for their most common manufacturing techniques [3]

Proces	Naprężenia minimalne [MPa]	Naprężenia maksymalne [MPa]
Odlewanie odśrodkowe	-50	+35
Metalurgia proszków	-40	+100
Osadzanie z par	-150	+200
Osadzanie elektrolityczne	-200	+250
Platerowanie laserowe	-50	+300
Formowanie termiczne i plazmowe natryskowe	-100	+200
Infiltracja	Do +80	

Na przygotowanej powłoce przeprowadzono prasowanie izostatyczne na gorąco, określane jako HIP (j.ang.: Hot Isostatic Pressing) oraz odpuszczanie, co spowodowało poprawę wytrzymałości wiązania ze względu na zagęszczenie mikrostruktury, interdyfuzję między warstwami oraz redukcję występujących naprężeń termicznych [4]. Autorzy w swojej pracy przedstawili rozkład mikrotwardości w powłoce dwuwarstwowej (duplex) oraz powłoce pięciowarstwowej (materiał gradientowy). Zauważono znaczącą różnicę między obydwoimi typami powłok. W powłoce pięciowarstwowej siła wiązania między powłoką a podłożem jest większa, dzięki zmniejszeniu różnicy modułu sprężystości między warstwami ceramicznymi i metalowymi [4].

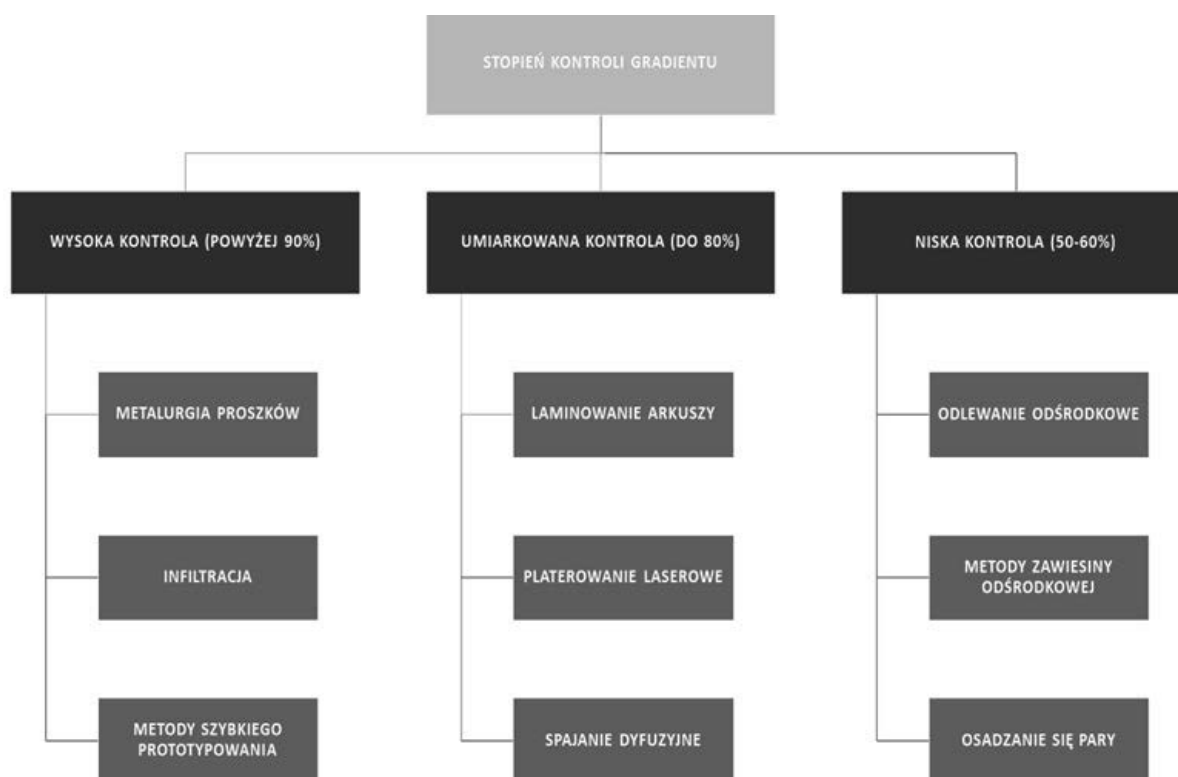
3. PODZIAŁ WEDŁUG STOPNIA KONTROLI GRADIENTU

Funkcjonalne materiały gradientowe można sklasyfikować również według stopnia kontroli gradientu w procesie ich wytwarzania, dzieląc je na trzy główne kategorie: o wysokim stopniu kontroli, umiarkowanym stopniu kontroli i niskim stopniu kontroli, tak jak zostało to przedstawione na rysunku 2. Kontrola gradientu jest zdefiniowana jako stopień, w jakim osiągnięta jest wcześniej zaprojektowana zmiana właściwości – regulowana przez stężenie cząstek lub zbrojenia wzdłuż kierunku gradientu. Metody przetwarzania określane jako cechujące się wysokim stopniem kontroli gradientu mogą realizować zaprojektowany gradient właściwości z dokładnością wyższą niż 90% [5].

Wysoki stopień kontroli wynika ze zdolności danego procesu do dokładnego umiejscowienia składników wzmacniających. Jest to łatwiejsze do uzyskania w procesach realizowanych w

stanie stałym niż w stanie ciekłym. Chociaż techniki wytwarzania funkcjonalnych materiałów gradientowych o niskim stopniu kontroli zapewniają płynniejszą zmianę właściwości w porównaniu z tymi w których stopień kontroli jest umiarkowany, kontrola parametrów procesu w pierwszej z grup jest znacznie bardziej złożona ze względu na większą liczbę parametrów wpływających na efekt końcowy, jak również możliwe interakcje między nimi. Na przykład zakres wielkości cząstek proszku stosowanego w metalurgii proszków może wahać się od 4 do 200 μm [6].

Ponadto istnieje szeroki zakres zmienności parametrów wytwarzania, wpływających na wynikowy gradient, takich jak na przykład wielkość ziarna cząstek proszku, czy też lepkość osnowy w różnych punktach w objętości materiału podczas krzepnięcia stosując metodę odlewania odśrodkowego. Metody przetwarzania o umiarkowanym i niskim stopniu kontroli gradientu zwykle nie są standardowo przystosowane do osiągnięcia określonego gradientu własności, a ich zastosowanie opiera się na wcześniejszych doświadczeniach. Metody o niskim stopniu kontroli gradientu cechują się zmiennością w zakresie od 50% do 60%, natomiast w grupie metod o umiarkowanej dokładności wynosi ona między 60% a 80% [7].



Rysunek 2. Podział materiałów gradientowych ze względu na stopień kontroli gradientu [5]
 Figures 2. Division of gradient materials due to the degree of gradient control [5]

4. PODSUMOWANIE

Oszacowanie poziomu naprężeń szczątkowych w materiale jest istotne z punktu widzenia wytrzymałości i użyteczności wyrobu. Gromadzące się w materiale naprężenia, na skutek działania zewnętrznych sił lub samych warunków pracy, mogą prowadzić do powstawania

w materiale mikropęknięć bądź delaminacji powłoki, a co za tym idzie utratę własności oczekiwanych od wyrobu. W konsekwencji, przy projektowaniu funkcjonalnych materiałów gradientowych konieczne jest uwzględnienie wpływu danej metody wytwarzania na wprowadzane do materiału naprężenia. Stąd, klasyfikacja technik wytwarzania funkcjonalnych materiałów gradientowych ze względu na poziom powstających w nich naprężeń szczytkowych, stanowi ułatwienie w procesie projektowania materiału i procesu jego wytwarzania.

Klasyfikacja ze względu na stopień kontroli gradientu pozwala na dobór metody wytwarzania odpowiedniej do oczekiwanej dokładności. Różne procesy wytwarzania funkcjonalnych materiałów gradientowych cechują się różnym stopniem kontroli gradientu, co przekłada się na wynikowe własności wyrobów. Co za tym idzie, stopień kontroli gradientu jest istotny z punktu widzenia planowanych własności późniejszego produktu.

BIBLIOGRAFIA:

1. B. Saleh, J. Jiang, R. Fathi, T. Al-hababi, Q. Xu, L. Wang, A. Ma; 30 Years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, Applications and Future Challenges; 2020.
2. R. Gabrielli, I.G. Turner, C.R. Bowen; Development of modelling methods for materials to be used as bone substitutes; Key Engineering Materials, 2008.
3. B.C. Pai, T.P.D. Rajan; Development in manufacturing processes of functionally graded materials; 2009.
4. S.P. Rityuj , G.S. Srinivasu, K.S. Raj; Recent advances in the manufacturing processes of functionally graded materials: a review; De Gruyter, September 14, 2016.
5. P. Popoola, G. Farotade, G. Fatoba, O. Popoola; Laser engineering net shaping method in the area of development of functionally graded materials (FGMs) for aero engine applications; 2016.
6. B. Saleh, J. Jiang, R.. Fathi, T. Al-hababi, Q. Xu, L. Wang, A. Ma; 30 Years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, Applications and Future Challenges; 2020.
7. H. Shi, P. Zhou, J. Li, C. Liu, L. Wang; Functional Gradient Metallic Biomaterials: Techniques, Current Scenery, and Future Prospects in the Biomedical Field; 2021.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Klasyfikacja funkcjonalnych materiałów gradientowych ze względu na ich zastosowanie

J. Polis^a, A. Kloc-Ptaszna^b

^a Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny
email: jakupol064@student.polsl.pl

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych,
email: anna.kloc@polsl.pl

Streszczenie: W ciągu ostatnich kilku lat zaproponowano wiele klasyfikacji funkcjonalnych materiałów gradientowych (FGM). W niniejszym raporcie przedstawiono przegląd oraz opis wybranych klasyfikacji materiałów FGM ze względu na ich zastosowanie.

Abstract: In recent years, many classifications of functional gradient materials (FGMs) have been proposed. This report presents an overview and description of the classifications of FGM materials due to their application.

Słowa kluczowe: FGM, klasyfikacja FGM, materiały gradientowe, funkcjonalne materiały gradientowe, gradient, zastosowanie materiałów gradientowych.

1. WSTĘP

W ciągu ostatnich lat zaproponowano oraz wdrożono wiele obszarów zastosowania funkcjonalnych materiałów gradientowych (j. ang. Functionally Graded Materials – FGM). W pracy dokonano przeglądu klasyfikacji tej grupy materiałów właśnie w oparciu o ich zastosowanie. Materiały gradientowe znajdują zastosowanie jako implanty, bariery termiczne, materiały do konwersji energii, narzędzia do cięcia metalu, elementy mechaniczne jak koła zębate. Znajdują również zastosowanie w optyce oraz optoelektronice [1].

Dostępnych jest szereg metod umożliwiających otrzymanie materiału gradientowego, w tym między innymi metalurgia proszków, odlewanie odśrodkowe, natryskiwanie termiczne lub plazmowe, przetwarzanie elektrochemiczne oraz chemiczne osadzanie z fazy gazowej (j.ang.: Chemical Vapour Deposition – CVD) oraz fizyczne osadzanie z fazy gazowej (j.ang. Physical Vapour Deposition – PVD). Wśród najnowocześniejszych procesów, dzięki którym możliwe jest otrzymanie materiału gradientowego wyróżnia się m.in.: CDC (j.ang. Cast Decant-Cast) i FSP (j. ang.: Friction Stir Processing). FGM zyskały na znaczeniu ze względu na ich możliwość dostosowania własności i brak widocznej granicy rozdziału pomiędzy jego składowymi co jest trudne do uzyskania w przypadku konwencjonalnych kompozytów [1].

2. PODZIAŁ ZE WZGLĘDU NA ZASTOSOWANIA W PRZEMYSŁE

Na przestrzeni ostatnich lat, miał miejsce wzrost zainteresowania użyciem FMG w wielu dziedzinach przemysłu, co jest efektem ich licznych przewag nad konkurencyjnymi materiałami, takimi jak chociażby kompozyty. Użycie tych materiałów pozwala na połączenie dwóch często wykluczających się własności, a jednocześnie stopniowa zmiana własności na przekroju materiału pozwala wyeliminować potencjalne spiętrzenia naprężeń i problemy z adhezją [2,3]. Najistotniejsze obszary zastosowania funkcjonalnych materiałów gradientowych przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Główne obszary zastosowania FGM [3]

Figure 1. Main areas of FGM application [3]

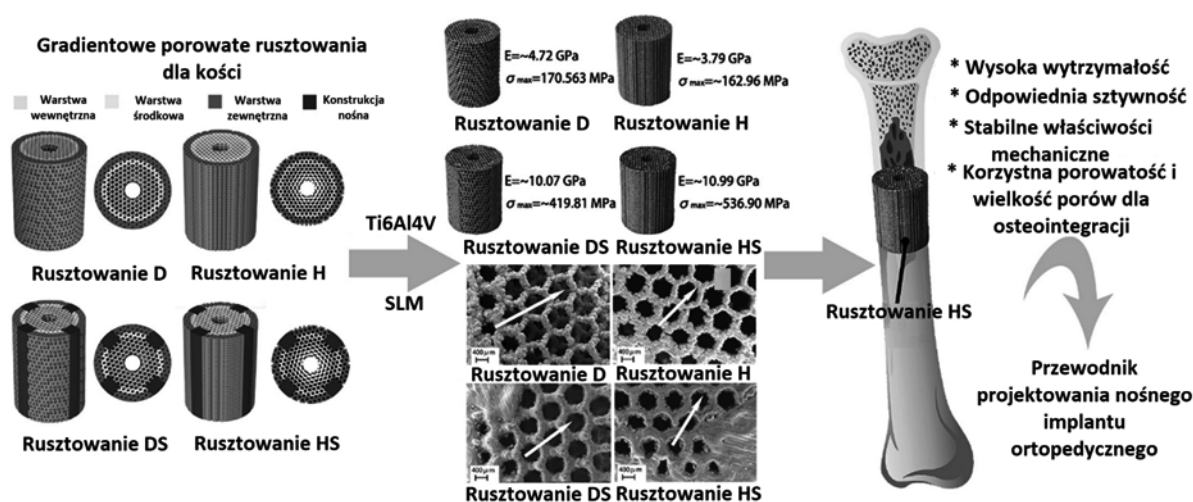
Rosnącym obszarem zastosowania funkcjonalnych materiałów gradientowych jest sektor biomedyczny. Przykładem mogą tu być protezy łączące materiał o wysokiej biokompatybilności, lecz o relatywnie niskich własnościach mechanicznych – jak hydroksyapatyt (HAP) – z materiałem o wyższej wytrzymałości, którym zazwyczaj jest tytan, w sposób gradientowy. Jednocześnie umożliwia to optymalizację własności w celu dostosowania ich do otaczającej tkanki i lepszej integracji, poprzez zmianę modułu sprężystości możliwą przy odmiennych składach HAP/Ti [4,5].

Obecność materiałów o strukturze gradientowej w ludzkim ciele jest naturalna – przykładem są tu kości i zęby. Tkanka kostna składa się z twardej fazy nieorganicznej – hydroksyapatytu, który nadaje wytrzymałość i miękkiej fazy organicznej – kolagenu, o większej ciągliwości. Zewnętrzna warstwa kości cechuje się niską porowatością, na poziomie 10%, a jednocześnie wykazuje mniejszy udział kolagenu, dzięki czemu posiada ona relatywnie wysokie własności wytrzymałościowe i odporność na ścieranie – jest natomiast krucha. Z kolei, w głąb kości porowatość wzrasta, a jednocześnie zwiększa się udział w tkance kostnej kolagenu, dzięki czemu staje się ona bardziej elastyczna [4,5].

W celu naśladowania naturalnej struktury kości tworzone są implanty o zmieniającej się w głąb materiału porowatości. Możliwości wytwarzania tego rodzaju komponentów stwarzają technologie wytwarzania addytywnego, takie jak SLM (ang.: Selective Laser Melting). W technice tej proszek metalowy topiony jest przy użyciu lasera, warstwa po warstwie, w wyniku czego uzyskiwany jest wcześniej zaprojektowany kształt. Próbkę wytworzoną tą techniką, wykonaną ze stopu tytanu Ti6Al4V zaprezentowano na rysunku 2. Cechują się one porowatością zmieniającą się w płaszczyźnie promieniowej z dwoma obszarami o odmiennej porowatości. Region o wysokiej porowatości jest podobny do kości gąbczastej w części wewnętrznej, a jednocześnie przez wysoką porowatość, przyczynia się do lepszej osteointegracji implantu. Z kolei, region o niskiej porowatości jest podobny do kości korowej w zewnętrznych obszarach implantu o wysokim potencjale nośnym [6].

Osteointegracja jest procesem, w którym indukowana jest osteogeneza. Jest to zjawisko regularnie obserwowane w każdym procesie gojenia kości. Osteoindukcja oznacza rekrutację niedojrzałych komórek i stymulację tych komórek do rozwoju w preosteoblasty. Podczas

procesu regeneracji kości, na przykład po ich złamaniu, większość procesu gojenia kości zależy od osteoindukcji. Osteokondukcja oznacza, że kość rośnie na powierzchni. Zjawisko to jest regularnie obserwowane w przypadku implantów kostnych. W przypadku materiałów o niskiej biokompatybilności, takich jak miedź, srebro czy cement kostny, osteokondukcja nie zachodzi bądź zachodzi w niewielkim stopniu. Osteointegracja natomiast to stabilne zakotwiczenie implantu, osiągnięte przez bezpośredni kontakt kości z implantem. W implantologii twarzoczaszki ten sposób zakotwiczenia jest jedynym, dla którego odnotowano wysokie wskaźniki powodzenia. Osteointegracja jest możliwa w innych częściach ciała, ale jej znaczenie dla zakotwiczenia głównych artroplastyk jest przedmiotem dyskusji. Wrastanie kości w porowatą protezę może, ale nie musi, oznaczać osteointegrację [8].

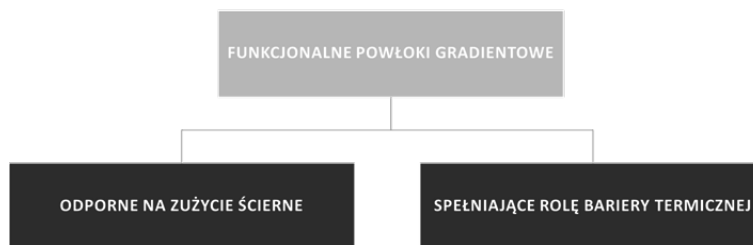


Rysunek 2. Rusztowanie kostne o gradientowo zmiennej porowatości wykonane ze stopu Ti6Al4V w technice selektywnego topienia laserowego [7]

Figure 2. A gradually porous bone scaffold made of Ti6Al4V using a selective laser melting technique [7]

3. PODZIAŁ FUNKCYJNALNYCH POWŁOK GRADIENTOWYCH ZE WZGLĘDU NA ZASTOSOWANIE

Powłoki wykonane z funkcjonalnych materiałów gradientowych stosowane są przede wszystkim w dwóch dziedzinach – na materiały narzędziowe, w celu poprawy odporności na zużycie ścierne oraz jako powłoki mające na celu zwiększenie odporności na wysoką temperaturę środowiska pracy – podział ten zilustrowano na rysunku 3. Czynnikiem motywującym zastosowanie funkcjonalnych powłok gradientowych jest uniknięcie spiętrzenia naprężeń występującego w przypadku standardowych, jednorodnych powłok, na granicy rozdziału powłoki i podłoża. W wielu przypadkach występuje różnica własności pomiędzy powłoką a podłożem, wywołująca w tym obszarze koncentrację naprężeń zarówno podczas wytwarzania jak i podczas samej eksploatacji narzędzi. Powoduje to szybką degradację w tym obszarze, polegającą na powstawaniu pęknięć oraz delaminacji powłoki. Zastosowanie funkcjonalnych powłok gradientowych umożliwia rozwiązanie tego problemu [9].

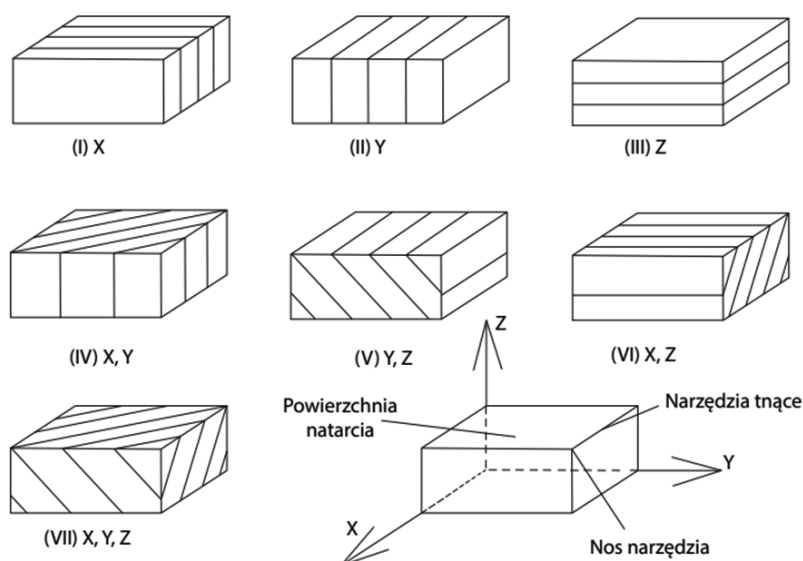


Rysunek 3. Zastosowanie funkcjonalnych powłok gradientowych [9]

Figure 3. Application of functionally graded coatings [9]

Obszary zastosowań powłok gradientowych są wyznaczone przez ich specyficzne własności, takie jak odporność na wysokotemperaturowe utlenianie, na przykład w przypadku narzędzi mających kontakt z płynnym szkłem. Powłoki gradientowe wykazują dużą odporność na działanie erozji oraz na zużycie ścierne – co stwarza pole do ich zastosowania w nowoczesnych narzędziach skrawających [9,10].

Dla określonej krawędzi skrawającej istnieje siedem możliwych typów rozkładu składu, jak pokazano na rysunku 4. Spośród nich typy I, II i III są z rozkładem składu zmieniającym się tylko w jednym kierunku. Rozkład składu zmienia się w dwóch kierunkach dla typów IV, V i VI, natomiast w typie VII rozkład składu zmienia się we wszystkich trzech kierunkach [10].



Rysunek 4. Kompozycyjne typy dystrybucji narzędzi FGM [10]

Figure 4. Compositional distribution types of FGM tools [10]

Wśród współczesnych technologii funkcjonalnych powłok gradientowych odnoszących się do narzędzi skrawających, a zwłaszcza wielostrzowych płytek skrawających z węglików spiekanych, cermetali, tlenkowej i azotkowej ceramiki spiekanej oraz z sialonów, znaczącą rolę mogą obecnie odegrać narzędziowe materiały gradientowe. W tym - jak już było wspomniane

wcześniej - uzyskane w wyniku nanoszenia gradientowych powłok poprzez fizyczne, niekiedy również chemiczne osadzanie z fazy gazowej – odpowiednio PVD i CVD [11].

4. PODSUMOWANIE

Funkcjonalne materiały gradientowe ze względu na swoje własności ugruntowały swoją pozycję wśród nowoczesnych zaawansowanych materiałów. Stały się one konkurentem dla pozostałych grup materiałów w szerokim gronie zastosowań, zwłaszcza w lotnictwie, medycynie czy też energetyce. Przekłada się to na szerokie zainteresowanie tymi materiałami w przemyśle oraz sektorze badawczo-rozwojowym. W konsekwencji, wymaga to zastosowania szeregu klasyfikacji uwzględniających różny punkt widzenia na materiał. Umożliwia to lepszy wgląd w określone właściwości, cechy, które w danej chwili interesują inżynierów, projektantów, producentów jak również badaczy. Nie jest możliwe sklasyfikowanie wszystkich materiałów za pomocą jednego sztywnego podziału, dlatego dokonujemy tego na podstawie pomniejszych podziałów odnoszących się do interesującego nas parametru, struktury materiału czy też jak w przypadku tej pracy zastosowania.

BIBLIOGRAFIA:

1. R. Singh Parihar, S. Gangi Setti and R. Kumar Sahu; Recent advances in the manufacturing processes of functionally graded materials: a review; *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 25, no. 2, 2018, p. 309-336.
2. A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, K. Gołombek, D. Pakuła, J. Mikuła, M. Staszuk, L.W. Żukowska; Long-term development directions of PVD/CVD coatings deposited onto sintered tool materials; *Archives of Materials Science Engineering* 49/2, 2011.
3. N. Radhika, R. Raghu; Three body abrasion wear behaviour of functionally graded aluminium/B4C metal matrix composite using design of experiments; 2014.
4. J. Lelątko, T. Goryczka, T. Wierzchoń, M. Ossowski, B. Łosiewicz, E. Rówiński, H. Morawiec; Surface modification of NiTi alloy by low-temperature nitriding process; *EDP Sciences, ESOMAT*, 2009.
5. Y. Li-Kai, S. Ping, G. Rui-Fen, L. Yun-Liang, J. Qi-Chuan; A novel strategy for fabricating biomimetic gradient metal-ceramic composites by dynamic freeze casting and pressure infiltration; *Scripta Materialia* No. 167, 2019, p. 101–104.
6. L. Yuan, S. Ding, C. Wen; Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures; 2019.
7. Y.-Z. Xiong, R.-N. Gao, H. Zhang, L.-L. Dong, J.-T. Li, X. Li; Rationally designed functionally graded porous Ti6Al4V scaffolds with high strength and toughness built via selective laser melting for load-bearing orthopedic applications; *Journal of Mechanical Behaviour of Biomedical Materials*, 2020.
8. T. Albrektsson, C. Johansson; Osteoinduction, osteoconduction and osseointegration; *European Spine Journal*, number 10, Supplement 2, 2001.
9. A.M. Miteva; An overview of the functionally graded materials; *Space Material Science Development – Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences*, 2014.

10. X. Ai, J. Zhao, C. Huang, J. Zhang; Development of an advanced ceramic tool material functionally gradient cutting ceramic; Department of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, 1997.
11. B.C. Pai, T.P.D. Rajan; Development in manufacturing processes of functionally graded materials; 2009.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Development of technology for processing of polymer waste of light industry into finished products using 3D printers

A. Polishchuk^a, O. Polishchuk^b, M. Bonek^c, Z. Brytan^d, S. Lisevich^e

^a Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: andrepol215@gmail.com.

^b Khmelnytskyi National University, Faculty of Mechanical Engineering, Transport and Architecture, Khmelnytskyi, Ukraine email: opolishchuk71@gmail.com.

^c Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials, Gliwice, Poland email: mirosław.bonek@polsl.pl.

^d Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials, Gliwice, Poland email: zbigniew.brytan@polsl.pl.

^e Khmelnytskyi National University, Faculty of Engineering Mechanics, Khmelnytskyi, Ukraine email: lisevichsv@gmail.com.

Abstract: The article describes the prospects of using polymer waste for the manufacture of finished products for various industries. The characteristics of polyester and nylon used in the manufacture of light industry products are described. The existing methods of processing waste polymer materials, as well as the stages of production of polymer granules from them, are given. The technology of processing polymer waste into finished products using the 3D printing method is offered. The equipment for crushing light industrial waste is described. Grinding of selected polymers is carried out on it. Experimental research is being conducted on the processing of shredded waste into filament for 3D printing using an extrusion machine.

Keywords: polymer, polymer waste, shredding, extrusion, 3D printing.

1. INTRODUCTION

Polymers are the most popular materials in the production of containers, packaging, tape, packaging film, clothes, shoes and other products. The widespread use of plastic has created the problem of its accumulation, which can be dealt with only by establishing its secondary processing, which is the main, rather even the only, way to solve the problem of environmental pollution.

Today, a global problem can become a global source of income and a real salvation for all living things. When mountains of plastic waste occupy entire landfills, there are more and more people who make money recycling it. It is important to understand that if you do not establish a timely process of collecting, sorting and processing plastic waste, very soon it will go far beyond landfills.

Accumulation of polymer waste is the main negative impact of humans on the environment. Trying to make modern life simple and comfortable, people think about harm to nature last. The problem of the accumulation of polymer waste is particularly acute today, as it has a deadly effect on the environment and its inhabitants, including people themselves.

Without solving the problem of recycling polymer materials, it is impossible to solve the environmental problems of any country, moreover, other methods of disposal of such waste can only worsen the situation. Combustion of plastic in primitive low-temperature plants and simply in landfills leads to the release of substances extremely dangerous to health, primarily dioxins. Modern waste incineration plants using pyrolysis partially solve this problem, but only recycling is a cardinal and, moreover, economically beneficial solution .

Moreover, as a result of processing by various methods, additional products are created for other industries, nature is polluted to a much lesser extent, and the use of secondary waste allows you to significantly reduce the use of primary non-renewable raw materials - oil and gas, reduce electricity consumption and reduce carbon dioxide emissions. Thus, the secondary processing of polymeric materials makes its contribution to combating global warming.

According to statistical data, the use of secondary raw materials in the world is steadily increasing. This is not surprising - according to some indicators, stocks of secondary raw materials already exceed the amount of available primary materials. Therefore, scientists of all countries are making significant efforts to create, develop and improve technologies for processing various types of waste.

The purpose of the work is to development of a technology for the processing of products containing of plastic waste into consumables for 3D printing [1-7].

2. FORMULATION OF THE PROBLEM

The problem of processing of plastic waste and the rational use of crushed polymers can be solved by creating new efficient equipment for grinding and technologies for further processing.

Given the urgency of the creation of new technologies of fast production, the task of research is to develop units and details of equipment of grinding polymers and the creation of products by 3D printing using recyclables.

3. PRESENTING MAIN MATERIAL

Plastic is a material that is easily recycled and can be used in the second cycle without losing its basic properties. Many objects necessary in everyday life are made from secondary plastic. They are used to make: building materials (tiles, paving slabs, etc.); bags, suitcases and backpacks, which are in no way inferior to products made from primary raw materials; sports equipment, bicycles, etc.; packages, packaging materials; clothes (suits, jackets, t-shirts), shoes (sports sneakers); furniture (tables, chairs, benches); road surfaces and others.

Modern light industry uses various types of raw materials for the manufacture of clothing and household items. Among synthetic polymers, the leading positions in the world are occupied by polyester (Polyester) and nylon (Nylon) .

Polyester - fibers that appeared thanks to the active evolution of the oil refining industry. This is a type of synthetic material. Outwardly, it resembles fine wool, but in terms of consumer properties, it is closer to cotton. It is made from a melt of polyethylene terephthalate - a strong, wear-resistant thermoplastic , which is a good dielectric.

One of the varieties of polyester fiber.

Polyester is one of the most common and modern materials used to create various types of synthetic fabrics. This material began to be actively used in light industry only in the early 60s of the 20th century.

It is used when sewing everyday clothes and accessories: pants; skirts; dresses; raincoats; coat; a jacket; sports suits; t-shirts; shorts; patch; tie

Polyester is used to make home textiles, including bed linen, curtains, and tablecloths. The fabric is also suitable for dragging furniture. It is economically beneficial, as polyester is inexpensive – cheaper than other upholstery materials.

Many items of tourist and fishing equipment, starting with protective covers and ending with sunbeds, are made of this material. Awnings, tents and sleeping bags are made from it.

From the same fabric, only of a different density, medical films and covering materials for gardeners are made. In the food industry, it is used as a filter material for filtering solutions. This synthetic material is also in demand in the shoe industry, as well as in the production of workwear.

Nylon is a trivial name for a synthetic fiber made from polyamide (PA). This is the general name of a family of synthetic polymers consisting of polyamide, which are repeating units connected by amide bonds. It is a thermoplastic material that is usually made from petroleum. It can be processed in a molten form into fibers, films or molded into the necessary products. Nylon polymers can be mixed with various additives to obtain materials with specified properties.

There are many types of nylon polymers, among which the most common are: nylon 1.6; nylon 4.6; nylon 510; nylon 6; nylon 6.6 and others.

Nylon 1.6. It has a high moisture absorption capacity due to the significant density of amide residues in the polymer. Nylon 1.6 is not usually used to make fabrics.

Nylon 4.6. It has a higher melting point than other types of nylon. It is mainly used as engine components (transmissions, brakes, air cooling systems). Its advantages are a higher temperature of thermal deformation, a higher crystallinity in comparison with some types of nylon.

Nylon 510. It has excellent properties, but its production is more expensive. The production of fabrics from this polymer is not carried out. It is used in most cases for industrial and scientific purposes. Its advantages include strength and durability. Among the disadvantages is the high cost of production.

Nylon 6. Nylon 6 fibers are strong, have high tensile strength, elasticity and shine. Its melting point is 215 °C. It is used in many branches of industry, in particular: automotive, electronic, electrical engineering, aircraft construction, garment industry, etc.

The advantages of nylon 6 are that its fibers do not wrinkle and are highly resistant to abrasion and chemicals such as acids and alkalis. The disadvantage is that it is relatively difficult to recycle due to the extremely low viscosity of the melt.

Nylon 6.6. It is a more crystalline version of nylon 6. It is also called polyamide 66 or PA 66. It has improved mechanical properties due to its more ordered molecular structure. Machinable nylon 6.6 has improved heat resistance and lower water absorption rates compared to standard nylon 6. Applications of nylon 6.6 include wear-resistant linings, guide wheels, and slide bearings. Its advantages are that it has a higher yield strength than nylon 6 and nylon 610. It has high strength, impact toughness, stiffness and low friction coefficient over a wide temperature range. In addition, it is resistant to lubricants, chemical reagents and solvents. The

disadvantages of nylon 6.6 are its high hygroscopicity, reduced viscosity in a dry environment, and the difficulty of controlling the forming process.

Nylon 66 (anid), usually available as monofilament or complex filaments. It is used for the production of hosiery, artificial fur, etc. The density of nylon of this type is 1.14. This is the most common polyamide, the volume of which on the market is more than 40%.

Nylon type PA6 and PA66 is most often used for plastic injection molding. Nylon has excellent strength, stiffness, heat resistance, wear resistance and lubricating properties, as well as chemical resistance to hydrocarbons.

In addition, nylon has a relatively low cost compared to the characteristics of engineering polymers, is easy to process, and can be reinforced with glass fiber or carbon fiber to improve mechanical and thermal properties.

In connection with a wide range of properties, this material has found use in various industries.

In light industry, due to different density, stiffness and purpose, different grades of nylon are used. Let's consider the main types of polyamide fabrics used:

- nylon 7 - the properties of the fabric can be compared with the previous type, namely nylon 66, but this type is more elastic and durable. Known as enant;

- kapron - an elastic type that has found wide application in the production of clothes and accessories. Melting point - 215 °C;

- undekan or rilsan - elastic polyamide fiber, which is widely used in the manufacture of raincoats;

- nylon 4 or 40d - known as ripstop. Combined fabric of reinforced thread with nylon. It has high tensile strength;

- ballistic nylon - a type of ripstop. It is made of 1050D or 840D threads. It is used in the manufacture of military clothing and body armor. Ballistics protects the military from shrapnel wounds and blast waves. Nowadays it is replaced by Kevlar;

- nylon 600D - a thin and light variety. It is mainly used for sewing backpacks;

- nylon PA12 - an improved type of anide, known as nylon waterproof. Neutral to solvents and salts. Strong and wear-resistant, but has a lower melting point - 178 °C;

- suture nylon - a material used in surgery. Threads are obtained from it, which fasten wounds and postoperative sutures;

- spandex is a completely synthetic material based on nylon, acetate and other polymers. This light, flexible material is used in many areas, from furniture upholstery to medical gloves;

- velsoft - strong fabric made of polyamide. For synthetic products of the new generation, a new technology for the production of ultra-thin fibers with a maximum diameter of 0.06 millimeters was developed and tested.

A wide range of finished products made of polyester and nylon raises the question of their further disposal after the period of operation or processing into finished products.

Polyester fibers are not biodegradable. For example, in clothes, their number is about 16%. One of the advantages of such fibers is that they can be processed into primary (new) fibers. Recycled polyester fibers, made mainly from plastic bottles, increased their market share from 8% in 2007 to 14% in 2017.

Most light industrial products are still thrown away and burned in incinerators or end up in landfills. Among them are products containing polyester (mylar) and nylon fibers.

Recycling also faces a number of challenges, meaning that globally only less than one percent of all materials used in clothing are recycled back into clothing. This reflects the lack of technologies for their further processing. In addition, the existing technologies that allow the

processing of clothing into virgin fibers are still imperfect. Therefore, the creation of a technology for the processing of products containing polyester or nylon fibers into new finished products is an urgent task.

One of the advantages is that when heated, polyester and nylon melt, and if they are passed through small holes, thin skeins are obtained. When cooled, they harden and form threads.

Today there are 5 ways of processing polymer materials.

Pyrolysis is the effect of temperature on a substance with or without oxygen.

Hydrolysis is a method of processing using extremely high temperatures and pressure. At the output, higher quality raw materials are obtained than when using pyrolysis.

Glycolysis is a method in which very high temperatures and pressures are applied using ethylene glycol and a catalyst, which helps to obtain a pure and high-quality product.

Methanolysis is the processing of plastic waste using methanol. This method is the most common.

Mechanical recycling is a method, the essence of which is the mechanical grinding of plastic waste for the purpose of further heat treatment.

All these methods have a common goal - obtaining high-quality raw materials that could be used in production. One of the most popular forms of raw materials is plastic granule.

Secondary granule is the result of processing primary plastic, i.e. plastic waste. Today, plastic granules are the main material for the production of various plastic products. Plastic granulation technology is quite simple and not too expensive, many companies specialize in processing plastic into granules.

The processing of plastic into granules takes place in stages:

1. Sorting. Waste is sorted by appearance and color - this step is usually done manually.
2. Crushing. Shredding of sorted waste in special crushing equipment.
3. Cleaning and washing. The resulting crushed raw materials are thoroughly washed and cleaned of impurities.
4. Drying. The mixture obtained in the previous stages is well dried.
5. Heating. The dry mass is heated to a specific temperature. The heating temperature depends on the type of polymer.
6. Formation. The mass is squeezed out through special thread-like openings by the extrusion method.
7. Cooling. After squeezing, the mass is immediately placed in cold water.
8. Formation of granules. After cooling, the threads are cut into granules.

An alternative method is the hot cutting method, in which immediately after extrusion the mass is cut into granules, bypassing the cooling stage.

9. Production of the finished product.

The need to process plastic waste is caused not only by a large amount of garbage, but also by the need of many modern enterprises for secondary raw materials. Thus, the business built on the processing of plastic waste and the production of secondary raw materials is one of the most promising today.

Due to its physical and chemical properties, plastic, as already mentioned above, can go through an infinite number of cycles of production and processing. The development of new technologies and equipment for processing will help to solve the problem of excess plastic waste, and in the future eliminate the need for new plastic production.

A new technology for processing polymer waste into finished products by 3D printing is proposed, which includes:

1. Sorting.
2. Crushing.
3. Cleaning and washing.
4. Drying.

Some milled materials may not require steps 3 and 4.

5. Heating the crushed material in the extruder of the 3D printer and extrusion of the molten polymer.

6. Formation of the finished product. The mass is squeezed out through the nozzle of the extruder and the finished product is formed layer by layer.

Thus, the number of operations to obtain the finished product is reduced.

For the purpose of further experimental research, textile materials made of polyester and nylon were selected.

The development of an effective shredding device for the processing of light industrial waste continues to be relevant. There are many devices for processing secondary waste, but all of them have their own shortcomings, which does not allow to make the shredding process simple and efficient. The main problem in the design of grinding devices is the imperfection of the developed methods of calculating the equipment structures, as well as the technological process.

An experimental installation was used to grind polymer waste from light industry, which allows to implement the process of grinding textile materials with the possibility of taking into account all factors that have an impact on this process. The design of the installation allows you to change within certain limits the technological and structural parameters, which allows you to study their influence on the grinding process and carry out the necessary measurements. But the main thing is that it allows you to adjust the size of the fiber that will be obtained after the grinding process. This issue is relevant when used as an initial value for 3D printing.

The schematic diagram of the experimental setup is presented in Fig. 1.

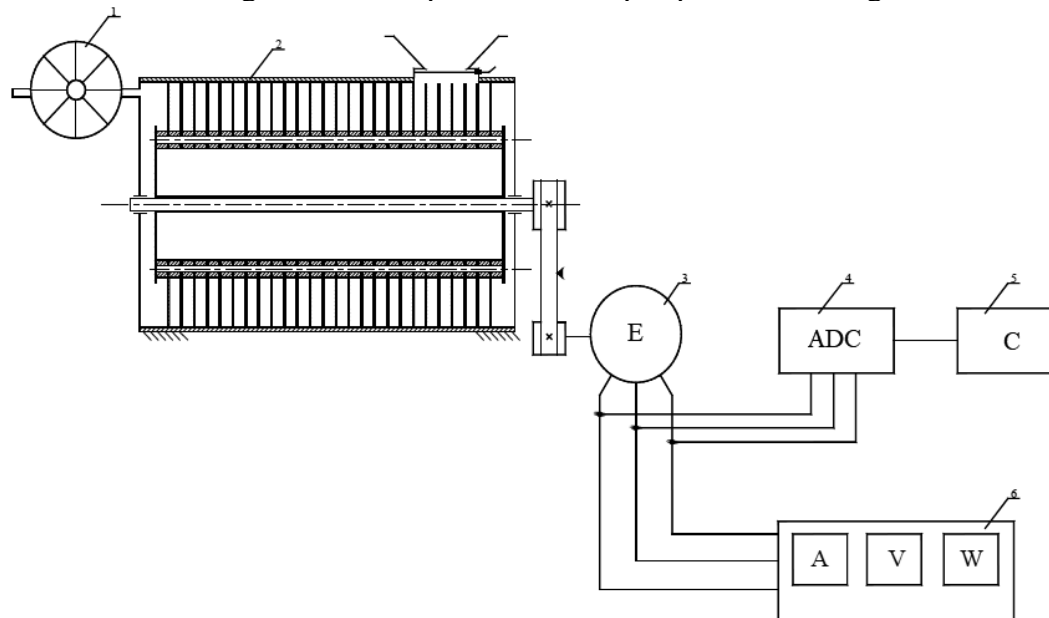


Figure 1 - Schematic diagram of an experimental installation for grinding textile materials: 1 – centrifugal fan; 2 – hammer grinder; 3 – electric motor; 4 – analog-digital converter; 5 – computer; 6 – block (ammeter, voltmeter and wattmeter)

The installation works as follows: the hammer shredder is driven by an electric motor due to the V-belt transmission, after which the waste textile materials falling through the loading hole into the working area, namely the grinding area. In the grinding zone, when interacting with the working body - hammers, pieces of textile material are separated into individual fibers and, through a centrifugal fan, fall into the hopper.

As samples during experimental studies of the process of shredding fibrous polymer waste, waste from textile materials, which were formed by the method of cutting parts of flooring products, were used. Samples of the following materials were used for grinding: mylar and nylon.

Grinding of the selected materials was carried out using the experimental setup. The obtained samples are presented in Fig. 2.



Figure 2 – Samples of crushed polymers: a - polyester (Lavsan); b - nylon

In order to conduct an exploratory experiment to confirm that the crushed waste of polymer materials can be remelted, the extrusion machine shown in Fig. 3 was used.

Extrusion machine consists of the following parts: a housing with a heating system (1) to the required melting temperature of the polymer; loading unit (2) through which pre-prepared crushed polymer enters the body cavity; housing cavity with an auger for moving raw materials from the loading unit to the forming nozzle; screw drive; extrusion head (Fig. 4); filament cooling and winding systems (Fig. 5); a control and management system that supports the necessary technological mode.

An auger design was developed and manufactured for feeding crushed polymer in the form of fibers or small pieces of textile material.

The control and management system includes: the button for turning on the power of the extruder; heater power button; the start button of the motor-reducer of the auger for feeding pellets from the hopper to the melting chamber; the button for turning on the polymer thread feeding and winding system. The control system of the device also includes a thermal controller that regulates the temperature of the nozzle and the melting zone. The system allows you to adjust the speed of rotation of the auger, the speed of pulling and winding the thread.

The principle of operation of the extruder is as follows. After heating to the desired extrusion temperature, the selected crushed polymer material is held for 5-10 minutes in order to warm the material cylinder from the inside. After that, the motor-reducer is turned on.

Polymeric material in the form of crushed waste is pre-dried to remove moisture in a drying cabinet, and then poured into the hopper of the extruder.



Figure 3 – Extrusion machine: 1 - housing with a heating system; 2 - loading block

Plastic from the filled hopper is captured by the auger and enters the working area of the extruder body, where under the action of pressure, friction and heat coming from the outside, it is heated and melted to the state required by the conditions of the technological process. Molten polymer is fed by auger towards the die. Due to the shape of the screw in the cylinder, pressure is created in the exit zone of the molten polymer, which causes the material to "swell" after exiting the extruder. The exit hole of the extrusion head regulates the diameter of the polymer thread.



Figure 4 – Extrusion head



Figure 5 - Systems of cooling and winding of polymer thread

The extruded thread is fed through a forced cooling system and is uniformly wound on a spool (Fig. 5).

Among other parameters characterizing the grinding of polymer materials, namely mylar and nylon, is their melting point. The melting point is the temperature at which the material is fed from the die extrusion machine. This temperature is individual for each material. During extrusion, it is necessary to adhere to the corresponding value as accurately as possible in order to obtain products with the expected physical, mechanical and temperature properties. For this reason, the melting temperature must be set correctly in the casting machine or 3D printer.

In order to determine the optimal melting temperature of the considered polymers, experimental studies were conducted.

Discrepancy temperature in the extruder optimal temperature melting polymer led to the emergence various defects : undermelting ; overheating ; scoring the die etc. (Fig. 6).



Figure 6 - Defects heating polymers

As a result of research, the optimal melting temperatures were determined for: polyester - 235 °C; for nylon - 245 °C.

An example of high-quality extrusion of molten nylon is shown in Fig. 7.

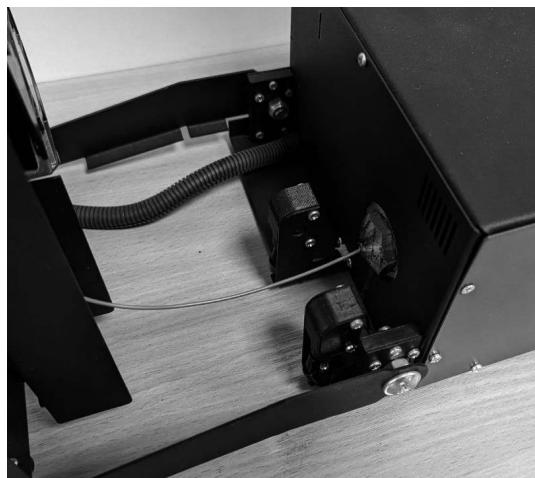


Figure 7 – Extrusion of molten nylon through a die extrusion machine

4. CONCLUSIONS

The conducted experimental studies confirmed the possibility of re-processing the crushed waste of polymer materials into finished products using 3D printers, which use granules or crushed polymer waste as raw materials.

For this purpose, it is necessary to develop the design of a 3D -printer, carry out the process of printing finished products on it, and investigate their properties.

BIBLIOGRAPHY

1. Zozulya P.F., Polishchuk O.S., Polishchuk A.O. Prospects for the use of 3D printing in light industry. Bulletin of Khmelnytskyi National University, 2017. № 4. – P. 102-104, (in Ukraine).
2. Zozulya P.F., Polishchuk O.S., Nejmak V.S., Polishchuk A.O. Application of 3D printing technology in the footwear industry. Scientific notes. Lutsk National University, 2019. – Issue №67. – P.48-52, (in Ukraine).
3. O. Polishchuk, M. Bonek, M. Skyba, A. Polishchuk, S. Lisevich Prospects of using composite filaments with high metal content for manufacture of industrial machine building products method of 3d printing. Monograph: editor by Musial J., Polishchuk O., Skyba M. Bydgoszcz, Poland, 2021. – P.390-396, (in Poland).
4. Zozulia P., Pyshcheniuk N., Skyba M., Polishchuk O., Malec M. General classification of 3D printing. Analytical study of a device for loading of pet bottles in rotary crushers. Actual problem of modern science. Monograph: editor by Musial J., Polishchuk O., Sorokaty R. Bydgoszcz, Poland, - 2017. - P.413-421, (in Poland)
7. Polishchuk O.S., Zozulya P.F., Polishchuk A.O. Generalized classification of filaments for 3D printing. Bulletin of Khmelnytskyi National University, 2017. № 6. – P. 51-59.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Application of neural networks to analyze groundwater quality

P. Radek^a, M. Sładek^a, J. Tłołka^a, B. Zieliński^a, P. Kołodziejczyk^a, M. Ziółkowska^b,
M.M. Szindler^c, M. Szindler^d, A. Kania^c

^a Student of Silesian University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, Akademicka 3, 44-100 Gliwice

^b Student of Silesian University of Technology Faculty of Mechanical Engineering, Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice

^c Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering and Biomedical Materials, Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice, email: magdalena.szindler@polsl.pl

^d Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Scientific and Didactic Laboratory of Nanotechnology and Material Technologies, Towarowa 7, 44-100 Gliwice, email: marek.szindler@polsl.pl

Abstract: The article describes the issues of neural networks in the context of their application to water quality testing. The article explains why water testing is important and explains how neural networks can help in water quality testing. The goal of the study was to obtain a network that efficiently determines the level of magnesium in groundwater and then writes the results to a database. As part of the research, a number of activities were carried out, which led to the creation of neural networks that efficiently determine the level of magnesium in water.

Keywords: water pollution, spectrophotometry, artificial intelligence, neural network

1. INTRODUCTION

The groundwater pollution is a serious environmental problem with negative consequences for both humans and ecosystems. Harmful and pathogenic elements that get into water and remain in it can lead to loss of health of people and animals using it. Such harmful and pathogenic elements can be metal particles. Long-term exposure to heavy metals can lead to neurological, endocrine and other diseases and disorders. Examples of such conditions include osteoarticular lesions, renal tubular damage, atherosclerosis or eye disorders. Metallic pollution of groundwater can come from a variety of sources, such as industry, mining, agriculture or municipal waste, which is why it is so important to analyze and monitor it. There are many methods of groundwater testing among which can be distinguished [1]:

- physico-chemical measurements - this method takes groundwater samples and studies its chemical composition, such as concentrations of mineral salts, heavy metals, organic compounds, pH and temperature;

- geophysical measurements - used to assess groundwater parameters by analyzing geophysical data, such as electrical resistivity, seismic wave propagation velocity or magnetic properties of rocks. These methods allow aquifers to be mapped and their depths to be determined;
- numerical modelling - used to simulate the movement of groundwater in an area. These models are based on mathematical equations that take into account the physical properties of ground water and are calibrated against actual field data;
- isotope-based measurements - based on the analysis of isotopes of ground water. Water isotopes have different physical and chemical properties, which makes it possible to determine the origin and age of water. These methods are particularly useful for investigating groundwater sources and tracking water flow;
- biological analyses - used to assess groundwater quality by analyzing microorganisms and other aquatic organisms. These methods can also be used to assess human impact on the aquatic environment. In practice, combinations of different methods are often used to obtain a comprehensive assessment of groundwater parameters;
- physical and chemical measurements often use advanced testing techniques such as spectrometry. Spectrometry is an analytical technique that deals with the regression and interpretation of spectra produced by the interaction of electromagnetic radiation with matter. Spectrometry methods are divided by the type of radiation used into different types of UV, VIS, IR and NMR.

Physical and chemical measurements often use a different type of radiation e.g. UV, VIS, IR and NMR (Tab. 1). The equipment used for spectrometric studies is a spectrometer. The most common method for analyzing spectra is UV/VIS spectroscopy, it belongs to the absorption spectrometric methods using radiation in the range of 200-800 nm wavelength. The following figure shows what range of electromagnetic wavelengths the interval takes for visible light (Fig. 1) [2-4].

Table 1. Types of spectrometry and parameters of electromagnetic radiation [2]

Type of spectroscopy	Electromagnetic radiation	Valid scale used on the spectra	Wavelength range [m]
NMR	radio, microwaves	$\delta = 0 - 12 \text{ ppm}$ (^1H NMR) $\delta = 0 - 250 \text{ ppm}$ (^{13}C NMR)	$> 5 \cdot 10^{-4}$
IR	infrared	$1/\lambda = 4000 - 600 \text{ cm}^{-1}$	$0.25 - 1.7 \cdot 10^{-5}$
VIS	visible	$\lambda = 400 - 800 \text{ nm}$	$4 - 8 \cdot 10^{-7}$
UV	ultraviolet	$\lambda = 200 - 400 \text{ nm}$	$2 - 4 \cdot 10^{-7}$

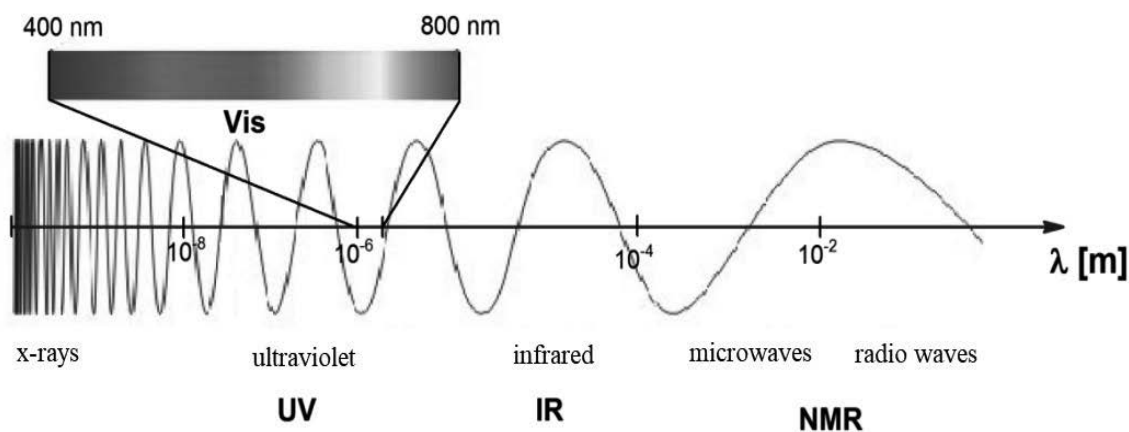


Figure 1. Ranges of electromagnetic radiation used in spectroscopy [2]

This method makes it possible to identify the absorbing substance and determine its content, purity, as well as determine the structure of molecules. Organic compounds possessing chromophore groups, within which an electron transition from the ground state to the excited state can occur, are capable of absorbing UV-VIS radiation [2]. This methodology is particularly useful in the study of organic and inorganic compounds in groundwater, such as pesticides, phenols, nitrates and heavy metals. It allows quantitative and qualitative analysis of water constituents by determining their absorption spectra in the UV-VIS range. Each of these compounds has a characteristic absorption spectrum that can be used to identify and quantify them. Physical and chemical properties such as colour and turbidity can also be determined. Water colour is related to the content of organic and inorganic compounds, and water turbidity can be caused by the presence of organic or inorganic suspended solids. The UV-VIS method is not only fast and accurate, but also easy to perform. It requires only the right equipment such as a UV-VIS spectrophotometer and proper preparation of groundwater samples. So many advantages translate into the frequent use of this method in routine groundwater testing [5].

The use of automation in the process of testing ground water samples enables faster and more accurate determination of chemical composition. Thus, it enables more efficient detection of harmful substances. As a result, measures can be implemented immediately to reduce the effects of water contamination. This automation is based on the use of various technologies, such as spectroscopy, chromatography, the use of ion-selective probes or biochemical methods. In this way, the results obtained make it possible to better understand the impact of chemicals on the water environment and to take preventive measures that can help protect and improve groundwater quality. One way to automate this process is to use neural networks [5].

Since the construction of the first computer, one of the goals of its development has been to produce as much autonomy for this device as possible. In pop culture and more specifically in the science fiction section, self-reliance and awareness of artificial intelligence is invoked. The solution that enables development in this area is artificial neural networks. In theory, they have existed for a long time, but only in recent years, thanks to dynamic development, sufficiently powerful computer units with adequate computing power have been created [6]. Neural networks are a technical model patterning their actions on the basis of neurons in the brain. The whole is built of layers, of which the input layer, output layer and hidden layers can be distinguished. Neurons are connected in a network with set parameters, which are modified during the process of so-called learning. The phenomenon of learning neural networks occurs by feeding as much of the input data set as possible. An important factor that develops the

performance of the algorithm is its control and monitoring of the number of errors made. The computational efficiency of the network and the time it takes to reach a fully learned state are checked. There are mainly two ways to prepare the network, the so-called "controlled" learning and "no teacher" learning [7]. An example of a neural network model is shown below (Fig. 2).

The method is used in most control programs, from exclusive everyday appliances to specialized automation equipment and high-tech machinery (adaptive control systems). It is used in medicine, sales forecasting, stock market operations, analysis of industrial operations and spectral analysis. An equally important area of application of artificial neural networks is the field of image, colour and object recognition and processing. An ever-growing direction of application is conversion, filtering, approximation, as well as other mappings and transformations (such as Fourier) [8]. The most important advantage of neural networks is their ability to operate in parallel. Current technical systems are concurrent systems, that is, processing is based on the coexistence of multiple threads or processes on shared data. In the case of networks, the degree and concurrency is hundreds of times higher than in most modern multiprocessor systems. The result is a significant acceleration of computation. Another advantage is the ease of programming through learning. The design of the algorithm for processing a given piece of information is replaced by setting and modifying the combination of network elements and their weighting factors according to the learning strategy. As a result, the network programs itself. Neural networks work on the principle of learning, this process is carried out by inputting input data. Due to the volume of information required, it has become necessary for neural networks to store and automatically retrieve a huge amount of data. These requirements can easily be met by databases [9].

SQL is a structured and declarative query language used to manage relational databases (Figure 3). Data is stored in tables. It is a domain-specific language used to create, modify relational databases and to insert and retrieve data from these databases. These systems rely on the SQL language, which is used to create, modify and retrieve data from databases. SQL allows you to manage a database by adding, deleting and modifying records, and allows you to perform complex queries that allow you to filter, sort and combine data. SQL databases are widely used in fields such as business, science and technology, where data is a key resource for decision-making and research [10-12].

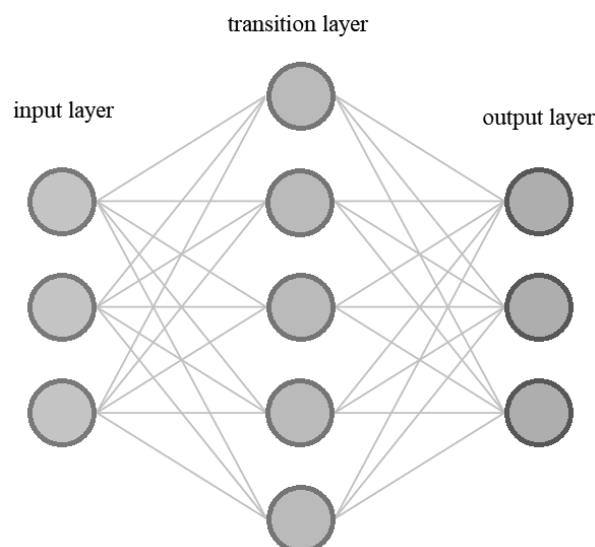


Figure 2. Neural network diagram

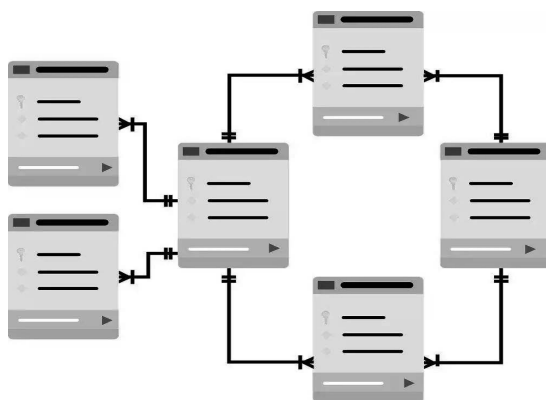


Figure. 3. Relational SQL database [12]

2. MATERIAL DESCRIPTIONS AND RESEARCH METHODOLOGY

In order to teach neural networks to recognize the appropriate concentrations of metal ions, it is necessary to make reference samples. Standard samples for determining magnesium content in water were made from magnesium salt ($\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$). They were made for seven levels of magnesium content in water ranging from 0 to 10 mg/L. To obtain the appropriate concentration of magnesium in water, magnesium chloride hexahydrate $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ (from Pol-Aura) was dissolved in distilled water keeping in mind the molar mass of each compound. Reference samples were stained using drop tests from JBL for magnesium levels. Samples prepared in this way were examined using an Evolution 220 spectrophotometer from Thermo Scientific. The results obtained were used to create a database for learning neural networks. Table 2 shows the designations of the reference samples that were prepared to train the neural network. Reference samples are the data set that is used for machine learning. For neural networks, these samples are presented as input to the network, which is then trained to detect patterns or relationships between data. In this way, the network can learn to predict outcomes for new data. A table containing a set of reference samples is a key element in the process of training neural networks [13]. Properly selected and prepared samples can lead to better prediction results for new data and ultimately improve the quality and efficiency of machine learning.

Table 2. Magnesium content of individual reference samples

No.	Sample name	Magnesium concentration [mg/l]	Solution salts of magnesium [mg/100ml]
1.	Mg1	1	0.837
2.	Mg2	2	1.674
3.	Mg3	3	2.511
4.	Mg6	6	5.022
5.	Mg8	8	6.696
6.	Mg10	10	8.370

The network model was developed in the PyCharm 2022.3.3 environment. The network was developed using the Tensorflow library. It consists of three layers. The input layer consists of 64 neurons and uses the Rectified Linear Units (ReLU) activator. This function maintains the linear nature of activation for positive values, which facilitates the neural network's learning of nonlinear relationships. The second so-called transition layer has 32 neurons and is also activated by ReLU. The last layer has 8 neurons, as this is how many thresholds of magnesium content in the water under study were ultimately predicted [14-16]. The program analyzes the spectrum, which it retrieves from the database, and then performs a neural network study in a predetermined band. The results of the analysis are then saved to the database and assigned to a specific sample.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Absorbance spectra were measured in the range from 260 to 800nm. Fig. 4 shows the spectra of the reference samples. The recorded spectra are characterized by an apparent high absorbance in the range from 360nm to 460nm. However, 500 to 510nm was taken as the wavelength range for neural network learning, which is characteristic of magnesium absorption and changes with magnesium concentration.

Based on the obtained spectra, the range from 500 to 510nm was determined, in which the neural network will determine the magnesium content. The neural network for specific absorbance thresholds returns a value that determines the magnesium content. The absorbance thresholds are shown in table 3. The limits were determined based on the results obtained from drop tests and tests conducted with a spectrometer to determine the spectrum for specific magnesium contents. For ease of learning the network, the absorbance value was multiplied 100 times.

Having model thresholds and a learned network, it was decided to test samples taken from groundwater. The spectra of each water are shown in Figure 5. The results that were obtained were uploaded to the database, and are shown in Figure 6 and Figure 7. By analyzing the feedback from the neural network and spectra from the spectrometer, it can be concluded that it correctly estimates the concentration of magnesium in the water.

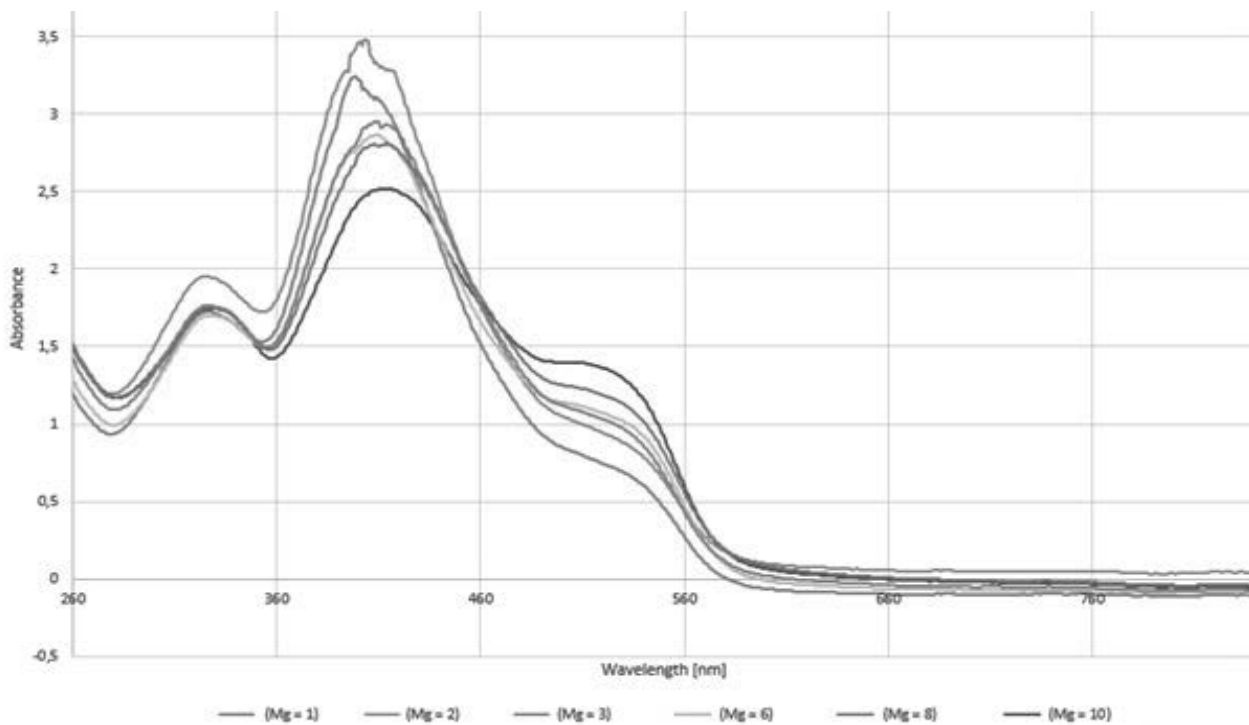


Figure 4. Wavelength dependence of absorbance for reference samples

Table 3. Training thresholds

Magnesium content	Threshold absorbance
Mg < 1	0 - 81
Mg = 1	82 - 87
Mg = 2	88 - 107
Mg = 3	108 - 113
Mg = 6	114 - 119
Mg = 8	120 - 125
Mg = 10	126 - 140
Mg > 10	141 - 500

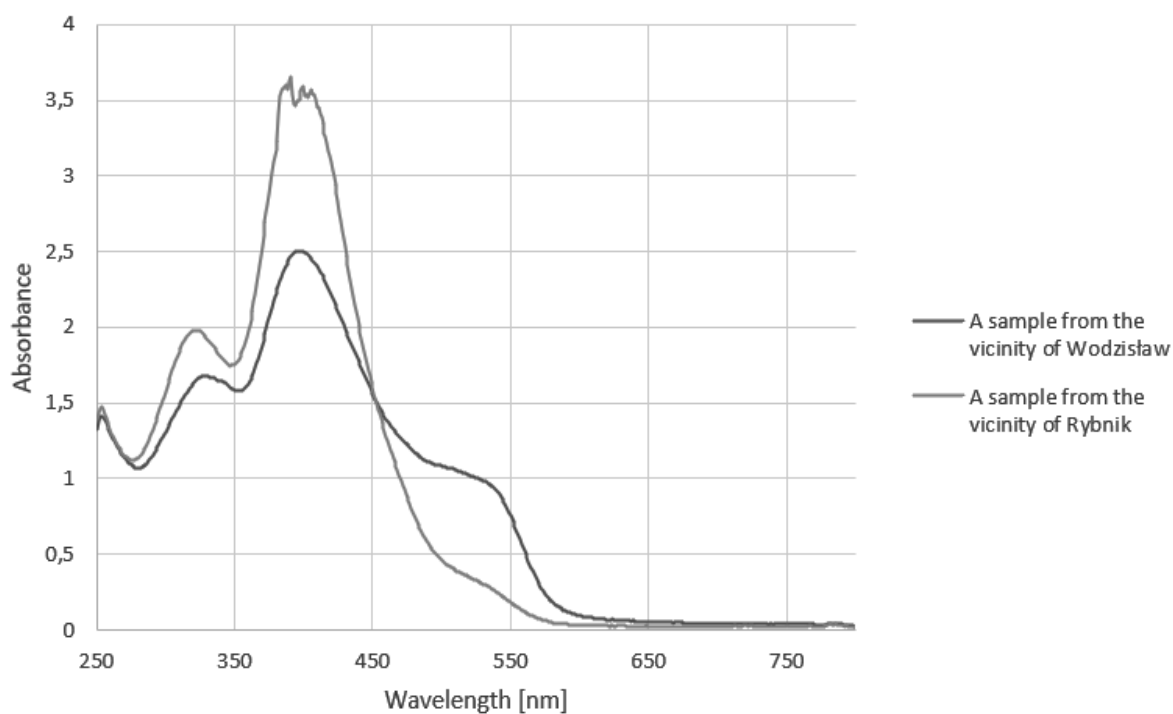


Figure 5. Wavelength dependence of absorbance for groundwater samples

Spectrum	Absorbance	Results
510.00	42	Magnesium < 1mg/l
509.00	43	Magnesium < 1mg/l
508.00	43	Magnesium < 1mg/l
507.00	44	Magnesium < 1mg/l
506.00	45	Magnesium < 1mg/l
505.00	45	Magnesium < 1mg/l
504.00	46	Magnesium < 1mg/l
503.00	47	Magnesium < 1mg/l
502.00	48	Magnesium < 1mg/l
501.00	49	Magnesium < 1mg/l
500.00	50	Magnesium < 1mg/l

Figure 6. Results of groundwater analysis for first sample

Spectrum	Absorbance	Results
510.00	108	Magnesium = 3mg/l
509.00	107	Magnesium = 2mg/l
508.00	108	Magnesium = 3mg/l
507.00	108	Magnesium = 3mg/l
506.00	108	Magnesium = 3mg/l
505.00	108	Magnesium = 3mg/l
504.00	108	Magnesium = 3mg/l
503.00	108	Magnesium = 3mg/l
502.00	109	Magnesium = 3mg/l
501.00	109	Magnesium = 3mg/l
500.00	109	Magnesium = 3mg/l

Figure 7. Results of groundwater analysis for second sample

4. SUMMARY

The spectrophotometry method is a highly effective way to determine the concentration of an element in water. Properly prepared samples, combined with neural networks, are efficiently analyzed, so that the dangers of metals deficiency or supersaturation are eliminated. Improvements that can be made here include an automatic sample preparation system. Traditionally, it requires a user to feed three different reagents, mix the sample and examine it in the spectrometer. Optimally, the researcher should only place the water in the device he or she wants to test, and the rest of the steps would operate automatically.

BIBLIOGRAPHY

- [1] D.N. Lerner, B. Harris, *Understanding and managing groundwater quality*, CRC Press
- [2] B. Drożdż, *Spektroskopowe metody identyfikacji zw. org.*, <https://farmacja.cm.uj.edu.pl> (2019)
- [3] M. Jabłońska, M. Szymczyk, *Metody spektroskopowe i ich zastosowanie w analizie chemicznej, cz. III. Spektroskopia UV-VIS*, *Laboratorium - Przegląd Ogólnopolski* 10 (2008) 10-13
- [4] A. Baker, *Fluorescence Excitation-Emission Matrix Characterization of Some Dissolved Organic Matter: Implications for Fluorescence Monitoring of Natural Waters*, *Environmental Monitoring and Assessment*, PubMed (2001)
- [5] A. Serafinowicz, *Czym są i jak działają sieci neuronowe?*
- [6] R. Tadeusiewicz, M. Szaleniec, *Leksykon sieci neuronowych*, Wydawnictwo fundacji "Projekt nauka", Wrocław, 2015.
- [7] J. Korbicz, A. Obuchowicz, D. Uciński, *Sztuczne sieci neuronowe: podstawy i zastosowania*, Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa, 1994.
- [8] R. Tadeusiewicz, *Sieci neuronowe*, Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa, 1993.
- [9] C. J. Date, *An Introduction to Database Systems*, Addison-Wesley Professional
- [10] R. Ramakrishnan, J. Gehrke, *Database Management Systems*, McGraw-Hill (2003)
- [11] TeamQuest, *Relacyjne bazy danych – dlaczego warto je znać?*
- [12] I.A. Abdulkareem, A.S. Dawood, A.A. Abbas, *Integration of an artificial neural network and a simulated annealing algorithm for the optimization of the river water pollution index*, *ScienceDirect, Regional Studies in Marine Science*, 56 (2022)
- [13] X. Zhao, X. Liu, Y. Xing, L. Wang, Y. Wang, *Evaluation of water quality using Takagi-Sugeno fuzzy neural network and determination of heavy metal pollution index in a typical site upstream of the Yellow River*, *ScienceDirect, Environmental Research*, 211 (2022)
- [14] L. Zhang, X. Han, B. Yuan, A. Zhang, J. Feng, J. Zhang, *Mechanism of purification of low-pollution river water using a modified biological contact oxidation process and artificial neural network modeling*, *ScienceDirect, Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9/2 (2021)
- [15] X. Jiang, P. Zhang, J. Huang, *Prediction method of environmental pollution in smart city based on neural network technology*, *ScienceDirect, Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 36 (2022)
- [16] A. Ibrahim, A. Ismail, H. Juahir, A.B., Ilyasu, B.T. Wailare, M. Mukhtar, H. Aminu, *Water quality modeling using principal component analysis and artificial neural network*, *ScienceDirect, Marine Pollution Bulletin*, 187 (2023)



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Prototyp generatora niskich napięć z wykorzystaniem zjawiska piezoelektrycznego

M. Rak^a, M. Bilewicz^b, A. Katunin^c, M. Chomiak^d, J. Wojnarowski^a, J. Sławińska^e,
M. Żebrowski^a, J. Patera^a, A. Sosnowski^a

^a Politechnika Śląska, Student Wydziału Mechanicznego Technologicznego, kierunek Mechanika i Budowa Maszyn, Gliwice

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Gliwice, email: marcin.bilewicz@polsl.pl

^c Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Gliwice

^d Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, Gliwice

^e Politechnika Śląska, Studentka Wydziału Automatyki Elektroniki i Informatyki, kierunek Biotechnologia, Gliwice

Streszczenie: Niniejsza praca skupia się na opracowaniu i skonstruowaniu generatora niskich napięć z wykorzystaniem zjawiska piezoelektrycznego prostego. W tym celu zastosowane zostaną piezoelektryczne przetworniki, które pod wpływem odkształcania będą generować prąd. W zależności od finalnego kształtu konstrukcji, układu elektrycznego, typu elementów piezoelektrycznych oraz rodzaju odkształceń jakim będą poddawane elementy piezoelektryczne będą wykonane badania w celu zweryfikowania sprawności całego układu. Badania przysłużą się do poszerzenia wiedzy z zakresu odnawialnych źródeł energii oraz zaawansowanych zastosowań materiałów piezoelektrycznych

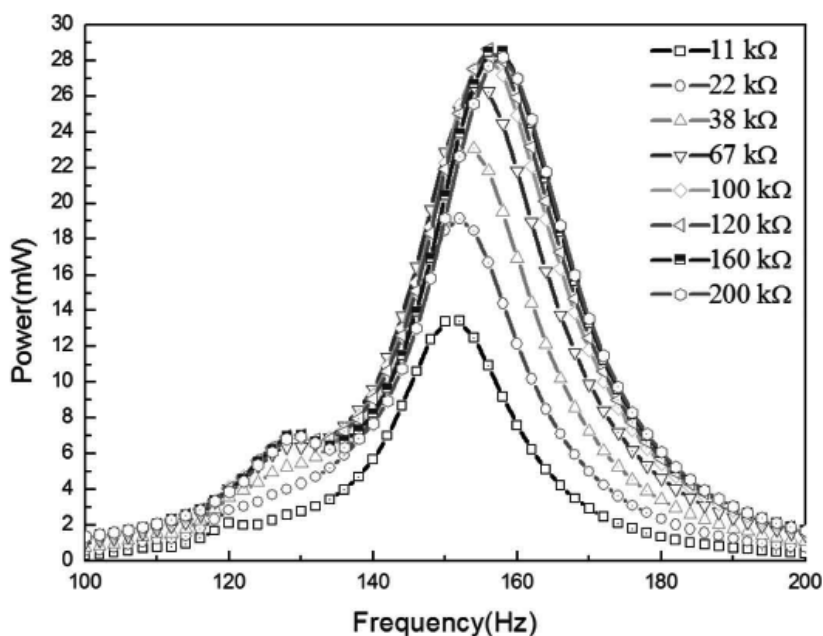
Abstract: The work focuses on the development and construction of a low voltage generator using the simple piezoelectric effect. For this purpose, piezoelectric transducers will be used, which will generate current under the influence of deformation. Depending on the final shape of the structure, the electrical system, the type of piezoelectrics and the type of deformations to which the piezoelectrics will be subjected, tests will be carried out to verify the efficiency of the entire system. The research will contribute to expanding knowledge in the field of renewable energy sources and advanced applications of piezoelectric materials.

Słowa kluczowe: przetworniki piezoelektryczne, generator prądu, energia odnawialna, zjawisko piezoelektryczne proste, modelowanie 3D

1. WSTĘP

W ostatnich dziesięcioleciach technologia elementów piezoelektrycznych znacznie rozwinęła się i znalazła szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach nauki i przemysłu. Elementy piezoelektryczne, takie jak kryształy, ceramika i polimery, wykazują unikalne właściwości, w tym zdolność do przekształcania energii mechanicznej w energię elektryczną i odwrotnie. Wiele badań koncentruje się na zrozumieniu i optymalnym wykorzystaniu tych właściwości w praktycznych zastosowaniach. Jednym z kluczowych czynników, który ma istotny wpływ na zachowanie elementów piezoelektrycznych, jest częstotliwość drgań. Częstotliwość jest fundamentalnym parametrem, który może wpływać na wydajność, stabilność, czułość i charakterystyki elektryczne elementów piezoelektrycznych. Zrozumienie wpływu częstotliwości drgań na te elementy jest niezbędne dla optymalnego projektowania urządzeń, w których są one wykorzystywane [1-4].

W niniejszym artykule naukowym skupimy się na badaniu wpływu częstotliwości drgań na zachowanie elementów piezoelektrycznych. Przedstawimy przegląd najnowszych badań i osiągnięć dotyczących tego zagadnienia, analizując zarówno teoretyczne podstawy, jak i wyniki eksperymentalne. Celem artykułu jest zgłębienie wiedzy na temat zależności pomiędzy częstotliwością drgań a właściwościami piezoelektrycznymi, a także zidentyfikowanie czynników, które należy uwzględnić przy projektowaniu.

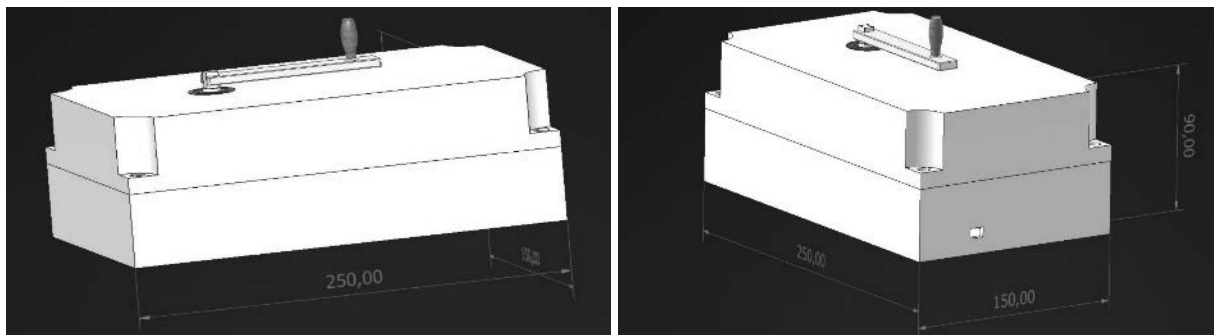


Rysunek 1 Przykładowy przebieg charakterystyki materiału piezoelektrycznego
Figure 1 An example of piezoelectric material characteristics [1]

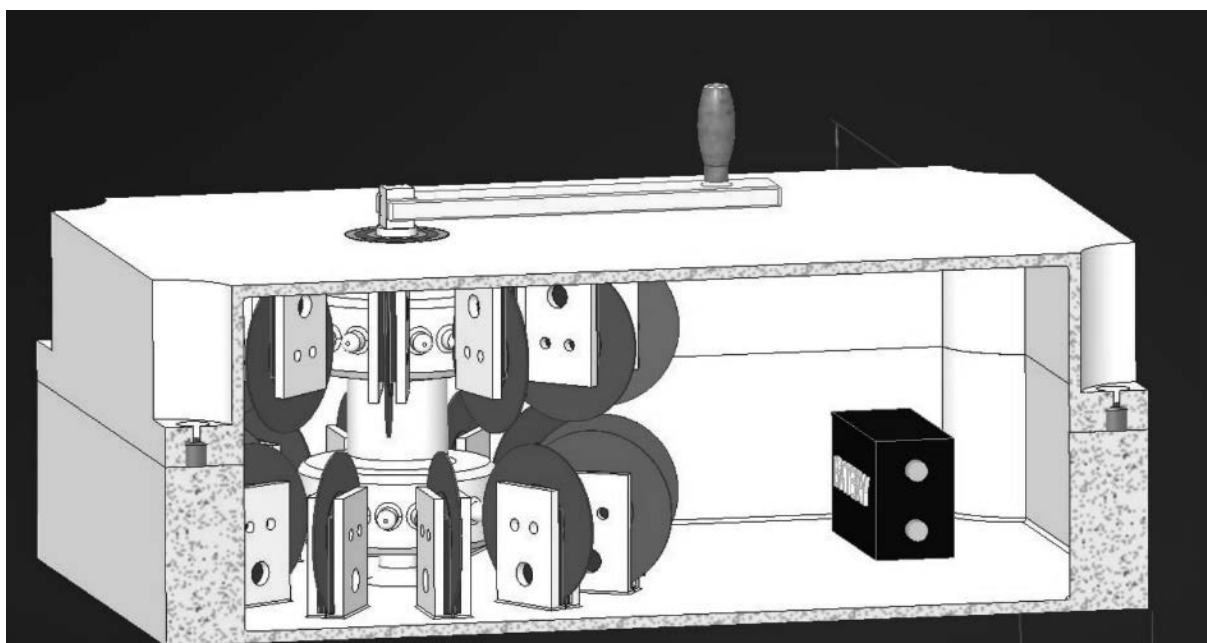
Przedstawienie kompleksowego spojrzenia na ten temat może przyczynić się do dalszego rozwoju technologii elementów piezoelektrycznych i znalezienia nowych zastosowań. Ponadto, badanie wpływu częstotliwości drgań na zachowanie elementów piezoelektrycznych pod kątem generowania ładunków elektrycznych ma istotne znaczenie dla dziedzin takich jak elektronika i medycyna. Dzięki lepszemu zrozumieniu tej tematyki możemy doskonalić projektowanie i wykorzystanie elementów piezoelektrycznych w szerokim spektrum aplikacji, co może prowadzić do innowacji i poprawy efektywności technologicznej.

2. KONCEPCJA MODELU GENERATORA

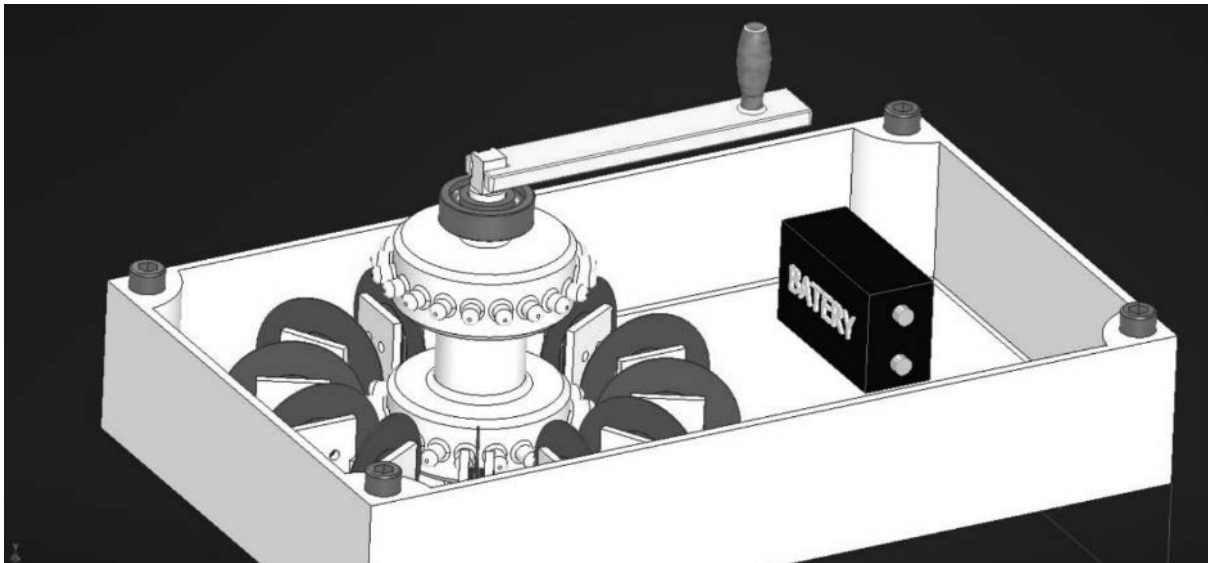
Model generatora został zaprojektowany z zachowaniem optymalizacji ze względu na wymiar finalny całego urządzenia, sił potrzebnych do nadania momentu obrotowego. Model składa się z zespołu elementów piezoelektrycznych utwierdzonych kołowo w gniazdach montażowych przewodzących ładunek elektryczny, gniazda umożliwiają szybki montaż a także demontaż podzespołów w razie zużycia. W modelu przewidziana została zamontowania dwóch rzędów materiałów piezoelektrycznych w celu zwiększenia efektywności generowania prądu.



Rysunek 2 Model generatora piezoelektrycznego – widok obudowy
Figure 2 Piezoelectric generator model - view of the outer casing



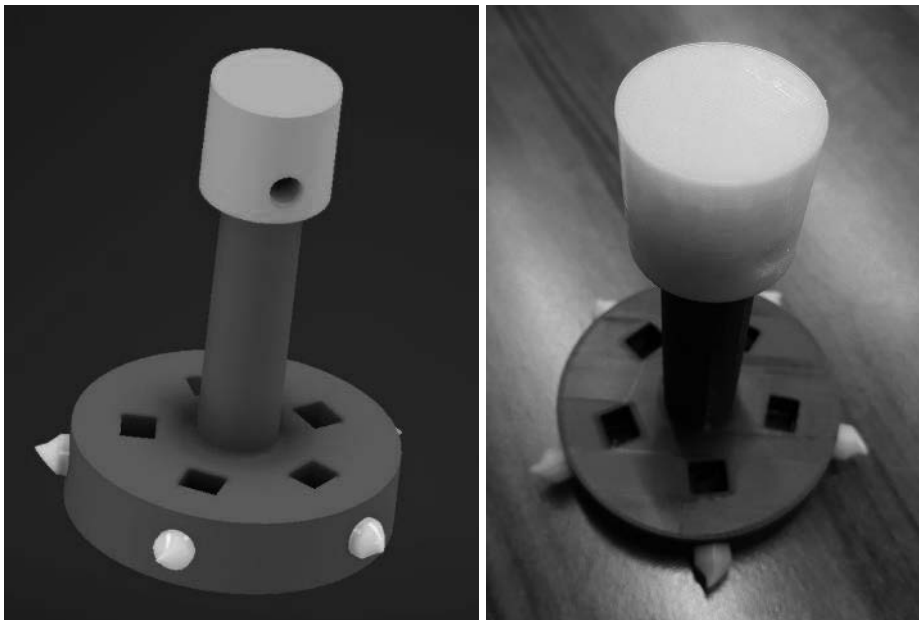
Rysunek 3a Model generatora piezoelektrycznego – widok wewnętrzny
Figure 3a Piezoelectric generator model – internal view



Rysunek 3b Model generatora piezoelektrycznego – widok wewnętrzny

Figure 3b Piezoelectric generator model – internal view

Bijak zaprojektowano w dwóch wersjach, z gniazdami na 3 oraz 5 wypustek. Finalną wersję bijaka dobrać będzie można po analizie badań wykonanych na wibrometrze. Ilość wypustek będzie miała wpływ na dobór przekładni multiplikującej celem zwiększenia efektywności generowanego prądu poprzez zwiększenie częstotliwości drgań elementów piezoelektrycznych. Całość korpusu oraz elementy bijaka zostały wykonane techniką druku 3D, co zapewnia lekkość prototypu, swobodę wprowadzania poprawek w konstrukcji oraz jego względną wytrzymałość (rys 4).



Rysunek 4 (po lewej) Model z 5 gniazdami, (po prawej) wydrukowany model z 5 gniazdami

Figure 4 (on the left) model with 5 sockets, (on the right) printed model with 5 sockets

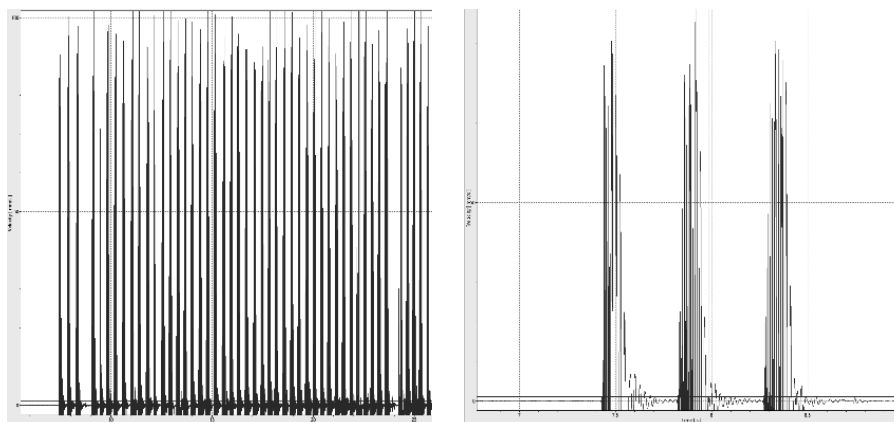
3. BADANIA DRGAŃ

W celu optymalizacji liczby obrotów oraz wymuszania drgań na elemencie piezoelektrycznym przeprowadzono badania z wykorzystaniem wibrometru Polytec PSV-400 (rys. 5)



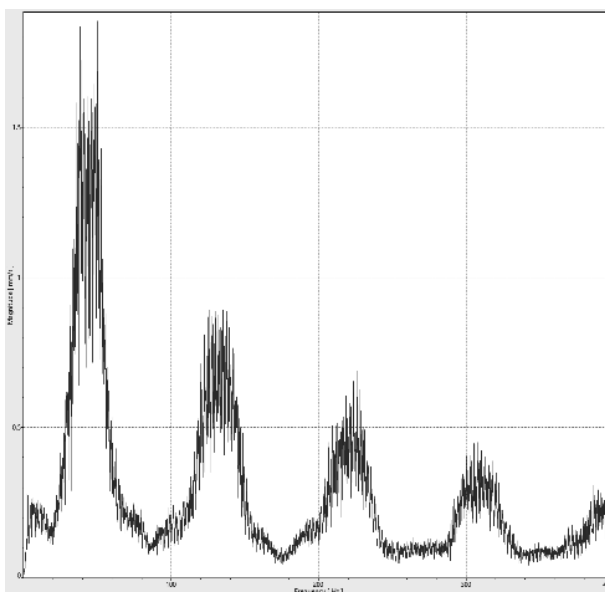
Rysunek 5 Badania drgań przy użyciu wibrometru Polytec PSV-400
Figure 5 Vibration tests using the Polytec PSV-400 vibrometer

Badania wykazały, że po wymuszeniu drgań na elementach piezoelektrycznych wygasają one po ok. 150ms (rys.6), natomiast jak można zauważyć, jakiegokolwiek użyteczne drgania trwają ok. 100~200ms. Ta informacja niezbędna będzie do określenia przełożenia przekładni mając na względzie, iż bijak zaopatrzony będzie w 3 lub 5 wypustek. Długość ramienia obrotu bijaka w modelu wynosi 90mm, z takim ramieniem przeciętna osoba jest w stanie wykonać 2,3 obr/sekundę.



Rysunek 6 Zarejestrowane drgania – widoczne efektywne drgania w przedziale 100-200 ms
Figure 6 Registered vibrations - visible effective vibrations in the range of 100-200 ms

Amplituda drgań stopniowo się zmniejsza w funkcji częstotliwości (rys. 5). Zoptymalizowanie urządzenia będzie bazowało na otrzymanych wynikach badania drgań – prędkość obrotu bijaka oraz liczba gniazd powinny korelować z otrzymanymi wynikami analizy modalnej i mieścić się w efektywnym zakresie zapewniającym dostarczanie energii przez elementy piezoelektryczne.



Rysunek 5 Widmo częstotliwościowe
Figure 5 Frequency spectrum

4. WNIOSKI

Wstępne badania odpowiedzi na wymuszenie impulsowe potwierdzają efektywny okres w jakim element piezoelektryczny może dostarczać energię elektryczną i wynosi on od 100 do 200ms. Kolejne wymuszenie drgania powinno następować w okresach co ok. 200 ms – badania na finalnym prototypie powinny zostać powtórzone w celu weryfikacji założonej tezy.

Wykorzystanie modelowania trójwymiarowego oraz drukarki FDM jako nowoczesnych narzędzi inżynierskich w przypadku tworzenia prototypu okazało się bardzo dobrym rozwiązaniem. Technologia ta zapewnia sztywność konstrukcji, swobodę wprowadzania zmian w projekcie oraz stosunkowo krótki czas oczekiwania na gotowy element.

Wstępne pomiary multimetrem energii uzyskiwanej z prototypu są obiecujące. Na tym etapie wymagane są ostatnie korekty i wprowadzanie finalnych rozwiązań w celu zoptymalizowania działania urządzenia. Jako, że urządzenie jest prototypem pozostaje otwarta przestrzeń do wprowadzania i usprawniania urządzenia.

LITERATURA

1. W. Wang, T. Yang, X. Chen, X. Yao; *Vibration Energy Harvesting Using a Piezoelectric Circular Diaphragm Array*; 09.2012.
2. P. Nowakowski; T. Łukasik; *Wybrane techniki komputerowe w projektowaniu i wytwarzaniu*; Politechnika Śląska 2003.
3. A. Jaskulski; *Autodesk Inventor 2022 PL/2022+ Fusion 360 : podstawy metodyki projektowania*; Gliwice 2021.
4. P. Kroupka; 24.07.2020; *Efekt piezoelektryczny*; Iviter.pl; <https://iviter.pl/encyklopedia/efekt-piezoelektryczny>.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Partycypacja pracowników w procesie doskonalenia w oparciu o spełnienie wymagań w zakresie zarządzania procesami.

M. Roszak^a, A. Siwczyk^b

^a Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials

email: marek.roszak@polsl.pl

^b University of Occupational Safety Management, Katowice, Poland,
asiwczyk@wszop.edu.pl

Abstract: Artykuł prezentuje autorski pogląd na temat partycypacji pracowników w procesie doskonalenia. Określono zakres działań wymaganych w normie ISO 9001 zgodnie z podejściem procesowym mających za zadanie kształtowania poziomu świadomości pracowników i aktywizacji ich do podejmowania działań doskonalących.

Keywords: doskonalenie, pracownik, system zarządzania, podejście procesowe

1. WPROWADZENIE

Doskonalenie stanowi współcześnie kryterium które w strukturze wymagań dla znormalizowanych systemów zarządzania ma swoje istotne odzwierciedlenie [1]. Zdolność organizacji do dostarczania wyrobów i usług spełniających wymagania a także stwarzanie szans na zwiększenie zadowolenia klienta stanowią potrzebę wdrażania i utrzymywania znormalizowanych systemów zarządzania, aby uzyskać ww. cele organizacje muszą implementować działania związane z doskonaleniem.

Źródłem doskonalenia są pracownicy organizacji, stanowią o potencjale podejmowanych inicjatyw doskonalących, a ich zaangażowanie w proces doskonalenia stanowi jedne z warunków realizacji działań doskonalących [4].

Kształtowanie zaangażowania pracowników w zakresie zarządzania jakością powinno opierać się na budowie kultury organizacji w tym budowie kultury jakości organizacji poprzez konsekwentne budowanie ich świadomości projakościowej [5].

Kształtowanie zaangażowania pracowników powinno opierać się o odpowiednim zrozumieniu i implementacji podejścia procesowe i określonych w tym względzie wymagań w normie ISO 9001 odnoszących się do zarządzania procesami, stanowiąc dowód wdrożonego i utrzymywanego jednego z ważniejszych mechanizmów systemu zarządzania jakością jaki stanowi doskonalenie [1,6].

2. ZARZĄDZANIE PROCESAMI A KSZTAŁTOWANIE ZAANGAŻOWANIA PRACOWNIKÓW

Zaangażowanie pracowników stanowi jedną z zasad zarządzania jakością, na których oparte są aktualne wymagania dla systemu zarządzania jakością opisane w normie ISO 9001. Organizacje oczekują aby ich pracownicy charakteryzowali się zaangażowaniem i oddaniem w pracę zarówno samodzielnie, jak i w zespołach pracowniczych, byli kreatywni w podejściu do osiągania celów organizacji – w tym jakościowych, byli odpowiedzialni za skuteczność i wydajność realizowanych zadań a także chętni do uczestniczenia i wnoszenia własnego wkładu w wszelkie działania doskonalące [3]. Uzyskanie powyższego stanu w organizacjach możliwe jest tylko poprzez stymulowanie odpowiedniego poziomu zaangażowania pracowników a także stwarzanie pracownikom odpowiednich warunków dających możliwość ekspresji potencjału związanego z zaangażowaniem.

Współczesne podejście do zarządzania organizacjami postulowane jest poprzez implementację podejścia procesowego, tak więc budowę organizacji procesocentrycznych, a odejście od postrzegania i zarządzania organizacjami przez pryzmat ich struktury organizacyjnej. Podejście procesowe również stanowi jedną z zasad zarządzania na której powinien być budowany system zarządzania jakością w organizacjach. Norma ISO 9001 odwołuje się do podejścia procesowego, i zaleca jego przyjęcie jako wartości pozwalającej bardziej skutecznie zarządzać organizacją, a także wdrażać i doskonalić system zarządzania jakością. W punkcie 4 w normie ISO 9001 zostały określone wymagania dotyczące implementacji podejścia procesowe [1,2].

Implementacja wymagań normy ISO 9001 w zakresie podejścia procesowe w znaczący sposób powinna być również wykorzystania do kształtowania zaangażowania pracowników w proces doskonalenia [2].

Poniżej (tabela 1) zaprezentowano sposób interpretacji i przykłady podejścia do wykorzystania podejścia procesowego i związanego z nim wymagań normy ISO 9001 w procesie kształtowania zaangażowania pracowników mającego bezpośredni wpływ na kształtowanie ich partycypacji w procesie doskonalenia [2].

Tabela 1. Charakterystyka działań (opracowanie własne)[2]

Podpunkt punktu normy PN EN ISO 9001:2015 / 4.4.1	Wymaganie	Charakterystyka
a)	Określić wymagane wejścia i oczekiwane wyjścia z procesów	<i>Pracownik zna i rozumie cel / cele dla procesów w których uczestniczy. Świadomość celu / celów działa stymulująco na zaangażowanie pracownika. Uzmysławia jak ważny jest pracownik i zakres jego działań w procesie osiągnięcia tych celów.</i>
b)	Określić sekwencję procesów i ich wzajemne	<i>Pracownik zna i rozumie z jakimi procesami jest powiązany proces / procesy w których uczestniczy. Świadomość realizowanych działań w odniesieniu do</i>

	oddziaływanie	<i>sekwencyjności operacji charakteryzujących proces / procesy pozwala pracownikowi na postulowanie działań doskonalących w miejscu styku operacji/ procesów.</i>
c)	Określić i stosować kryteria i metody potrzebne do zapewnienia skutecznej realizacji i nadzorowania procesów	<i>Pracownik zna i rozumie „co” i „w jakim celu” jest monitorowane dla procesu w którym on uczestniczy. Świadomość kryteriów nadzorowania pozwala na krytyczne spojrzenie na osiągnięte wartości wskaźników i postulowanie działań dających potencjalną możliwość doskonalenia.</i>
d)	Określić zasoby potrzebne dla procesów i zapewnić ich dostępność	<i>Pracownik zna i rozumie z jakich zasobów będzie korzystał. Świadomość wymagań stawianych zasobom używanym w zakresie operacji w których uczestniczy pracownik wpływa na uwrażliwienie jego postawy pod względem krytycznej ceny używanych zasobów, jak również zgłaszania zauważonych odchyleń od wymagań.</i>
e)	Przypisać odpowiedzialności i uprawnienia w procesach	<i>Pracownik zna i rozumie jakie posiada odpowiedzialności i uprawnienia. Świadomość odpowiedzialności w szczególności dotyczącej wpływu realizowanych działań przez pracownika na spełnienie wymagań ma podstawowe znaczenie w kontekście budowy postaw angażujących pracownika w zgłaszanie wszelkich potencjalnych zagrożeń i szans mogących mieć istotny wpływ na zakres ponoszonej odpowiedzialności.</i>
f)	Uwzględnić ryzyka i szanse	<i>Pracownik zna i rozumie jakie ryzyka zdefiniowano dla procesów w których uczestniczy, co pozwala na dostrzeganie przez niego szans dotyczących zmian. Świadomość ryzyka określonego dla procesów stanowi czynnik determinujący potrzebę poszukiwania rozwiązań dających potencjalne możliwości ich minimalizacji ale także poszukiwania rozwiązań kształtujących nowe możliwości.</i>
g)	Ocenić procesy i wdrażać zmiany niezbędne do zapewnienia, aby procesy osiągały zamierzone wyniki	<i>Pracownik zna i rozumie jakie wyniki zostają osiągnięte dla procesów w których uczestniczy. Świadomość wyników jakie osiągają procesy w których pracownik jest zaangażowany stanowi czynnik stymulujący aktywne zaangażowanie pracownika w poszukiwanie potencjalnych rozwiązań dających możliwość wpływu na zwiększenie poziomu jakości procesów / produktów.</i>

3. PODSUMOWANIE

Partycypacja pracowników w procesie doskonalenia stanowi ważny czynnik kształtujący dynamikę tego procesu. Oddolne inicjatywy pracowników stanowiące zgłoszenia potencjalnych działań doskonalących są znanym i uznanym narzędziem wewnętrznego oddziaływania na poziom doskonalenia w organizacji.

Implementacja podejścia procesowego w organizacji ukierunkowana także na działania stymulujące zaangażowanie pracowników zgodnie z zaprezentowany podejściem w tabeli 1, powinna stanowić ważny czynnik kształtujący postawy pracowników, poprzez kształtowanie ich świadomości.

Świadomość pracowników jest czynnikiem determinującym nie tylko chęć ale zrozumienie potrzeby aktywnego włączenia się pracowników w działania na rzecz doskonalenia.

Nie tylko system zachęt stosowany w organizacjach jest ważny, jako czynnik stymulujący pracowników do angażowania się w działania doskonalące, ale właśnie tzw. świadomość konieczności, stanowiąca jeden z dziesięciu kroków poprawy jakości określona przez J. M. Jurana, określana w następujący sposób: „*Zbuduj świadomość konieczności i możliwości doskonalenia.*” [7].

Implementacji działań związanych z podejściem procesowym i wynikający z niego potencjał do kształtowania zarówno wspomnianej „*świadomości konieczności*”, ale także wdrażania mechanizmów zarządczych w organizacjach dających możliwość podejmowania inicjatyw doskonalących przez pracowników, co dotyczyć może np. zgłaszania potrzeb pracowników związanych np. z brakiem wiedzy, wymaganego doświadczenia, czy potrzeby doskonalenia swoich umiejętności w zakresie realizowanych zadań.

Potencjał wynikający z implementowania w organizacji podejścia procesowe, jak wykazano w niniejszym opracowaniu w bardzo istotny sposób odnosi się do aspektów zarządzania kapitałem intelektualnym organizacji poprzez stymulowanie działań związanych z partycypacją pracowników w działania doskonalące w oparciu o działania i mechanizmy zarządcze związane z kształtowaniem ich świadomości.

LITERATURA

1. PN-EN ISO 9001:2015, Systemy zarządzania jakością - Wymagania, PKN, Warszawa, 2015
2. M. Roszak; Partycypacja pracowników w procesie doskonalenia organizacji a systemowe mechanizmy zarządzania jakością, Ogólnopolska Konferencja Jakościowa: Przyszłość zarządzana przez jakość, Gliwice, maj, 2023
3. A. Siwczyk, M. Roszak; Wiedza – potencjał w zarządzaniu procesem technologicznym. Przyczynek do badań. [w:] Modele organizacyjne w warunkach rewolucji 4.0, [red.] E. Skrzypek, Wyd. UMCS, Lublin, (2021).
4. M. Dźwigoł-Barosz; Doskonalenie kompetencji pracowników w procesie przygotowania kadry zarządzającej organizacji inteligentnej. Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie. Politechnika Śląska 63. (2013).
5. J. Rosak-Szyrocka; Znaczenie jakości i doskonalenia w przedsiębiorstwie produkcyjnym." Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie, Politechnika Śląska 117, (2018).
6. A. Wierzbic; Motywowanie pracowników służby jakości jako inwestycja w sukces przedsiębiorstwa., Prace Naukowe UE we Wrocławiu 301, (2013).
7. J. J. Dahlgaard; Podstawy zarządzania jakością, Wyd.Naukowe PWN, Warszawa (2000).



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Impact of warranty claims on changes implemented in product and manufacturing process according APQP requirements

Ł. Rudolf ^a, M. Roszak ^b

^a School of Doctors, Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials, email: lukasz.rudolf@polsl.pl

^b Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials, email: marek.roszak@polsl.pl

Abstract: The article presents the impact of warranty claims on changes implemented in the product and its manufacturing process, in accordance with the APQP (Advanced Product Quality Planning) requirements. The described warranty claim management process universally illustrates the relationships between the various levels of the supply chain and the end user of the product.

Keywords: warranty claims, APQP, manufacturing process, continuous improvement

1. INTRODUCTION

The purpose of implementing and maintaining a quality management system is to provide the customer with products that meet his expectations, however, sooner or later every organization will have to deal with a complaint from the customer. Complaints management in an organization is a very important process, thanks to which the organization is aware of the actual situation in which it finds itself in terms of meeting customer requirements, which usually translates into overall customer satisfaction with the cooperation and perception of the organization against the competition.

Each complaint or return from the customer should be properly analysed within a short time from its notification, thanks to which the organization does not risk that it continues to produce products with defects reported by the customer. In addition, a quick solution to the problem reported in the complaint increases the customer's confidence, which is extremely important in shaping positive customer relationships.

The information collected during the analysis of complaint problems is an important element of the continuous improvement process, thanks to which it is possible to improve the product and its manufacturing process in accordance with the Deming cycle (Plan, Do, Check, Act) [1, 2].

2. WARRANTY CLAIMS AS A FACTOR DETERMINING THE NEED FOR CHANGES

Receiving a complaint from a customer related to our product, which was delivered damaged or does not meet the specified requirements, should immediately start a process aimed at determining the root cause of the complaint. Fig. 1 shows the relationship between the various levels of the supply chain depending on the phase in which the project is and the final use of the product at the time of the complaint.

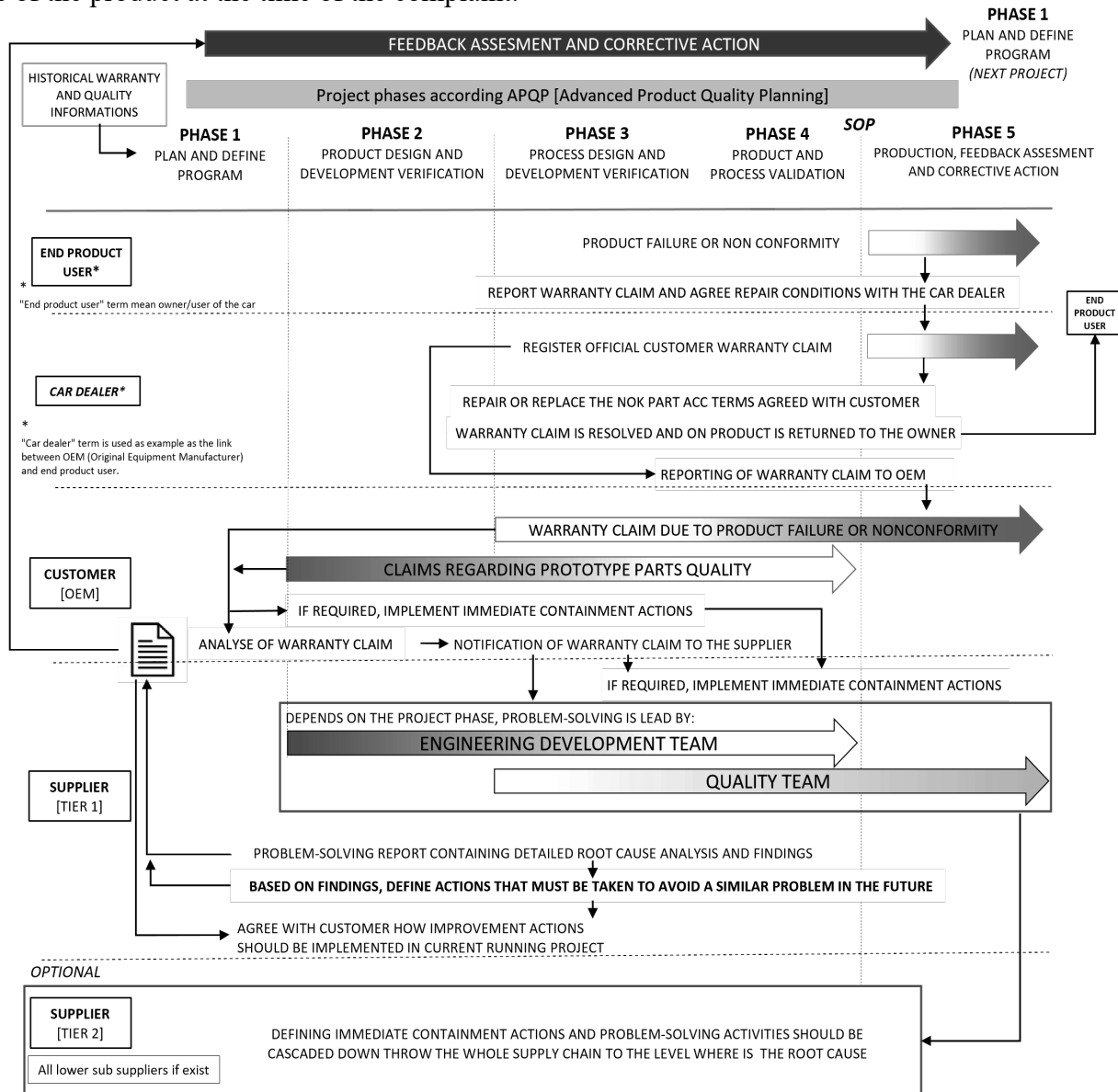


Fig. 1. Interaction between end product user, OEM and supplier when warranty claim appears (own elaboration based on [3])

Each complaint officially reported by the customer should be analysed in a structured manner so as not to skip any of the stages of its analysis. Initially, it should be verified whether the complaint is justified, it often happens that the person submitting the complaint on the part

of the client incorrectly interprets the requirements specified for the product, which results, for example, in the lack of grounds for filing a complaint.

Depending on the APQP phase in which the project is, the product development department (in the case of prototype parts) or the quality department (in the case of serial production parts) may be responsible for complaints. The level of responsibility of the two departments for leading the activities related to the resolution of complaints issues varies, but in most cases, even if the claimed product is in series production and the non-conformities is a fault in the series process, the product development department should be involved in the analysis of the complaint. If the person responsible for the complaint considers that the complaint is justified, the level of risk between the complaint and the products that have already been shipped or are currently being manufactured and the number of potentially affected components that may have been manufactured and shipped to the customer should be determined. The above action is necessary to take (if necessary) to minimize the effects and risks resulting from the emergence of the problem, both for the organization and the client.

After immediate actions are implemented, an analysis should be initiated to determine the reasons for nonconformity and to define corrective actions. The most universal and recommended method is the 8D method, which is used to determine causes, temporary, corrective and corrective actions and to carry out verification of these actions.

Actions defined after analysing the warranty complain are implemented in accordance with the plan agreed with the client, depending on what phase (phases according APQP) the project is in, the implementation of changes will look different. It is most difficult to implement changes in phases 4 and 5 of APQP, when the level of advancement of the product and production process is high, and any changes generate high costs and delays in the project implementation schedule [4].

3. CASE STUDY

Figure 2 shows an example of warranty claim management developed as part of research carried out at Tenneco Automotive Eastern Europe. The customer filed complaints for one shock absorber two months after the SOP (SOP- start of production, phase 5 according to APQP). The subject of the complaint was the presence of oil visible on the connection of two elements included in the car shock absorber, the sealing of which was ensured by an o-ring seal. After receiving the complained components from the customer, the inspection carried out did not confirm the leakage and damage to the seal, which was the initial hypothesis.

The next step was to analyse the process of assembling the elements at the connection where oil was detected. Inspection on the assembly line showed that before assembly, one of the elements is immersed in a container with oil to facilitate assembly and protect the o-ring from damage. The oil level in the tank at the assembly station varied significantly between the maximum and minimum values, which resulted in too much oil coverage of the submerged component when the value in the tank was exceeded. In the presented situation, after assembly, the excess oil remaining at the joint of the two elements was incorrectly classified as a potential leak.

Conclusions after the analysis of complaints were used to develop a plan of corrective actions aimed at appropriate modification of the assembly operation to eliminate the use of excessive amounts of oil.

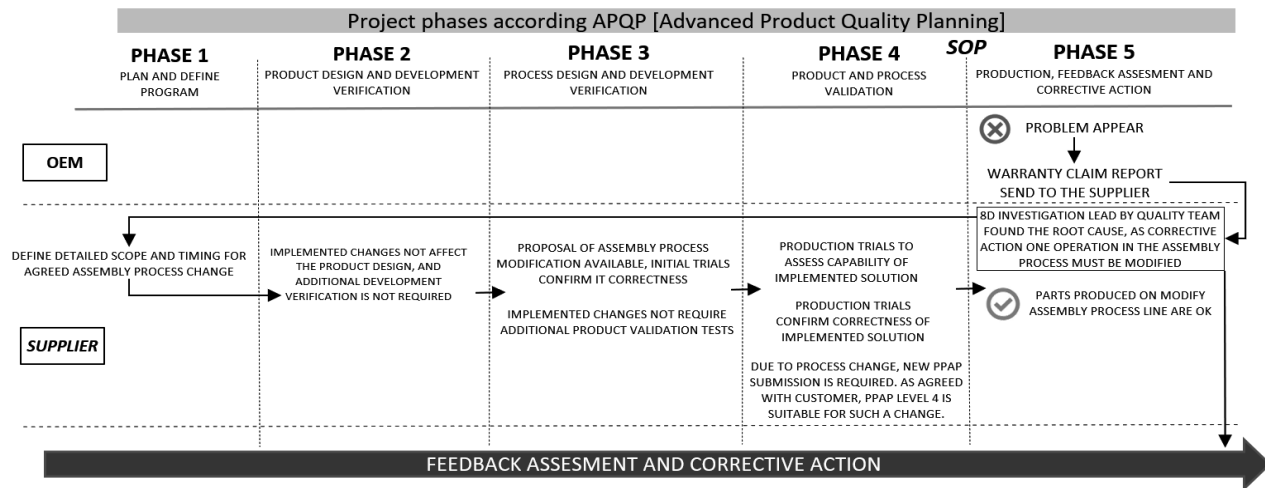


Fig. 2. An example of warranty management case and how it affects APQP phases (own elaboration based on [3])

4. CONCLUSION

Appropriate warranty claims management has a significant impact on how the organization is perceived by the customer. A quick and effective complaint process allows you to properly identify the incompatible population on the market and decide what to do with it to minimize losses on the part of the supplier and the customer. Often, proper implementation of corrective actions requires repeated passage through all APQP phases (in short, not all elements need to be repeated), because of which it is ensured that the solutions that will be implemented will be effective. All conclusions resulting from the warranty claim analysis, should be used in the organization as “Lessons Learned” for current and future projects, as part of the continuous improvement process, in accordance with the Deming cycle (Plan, Do, Check, Act) [5, 6].

BIBLIOGRAPHY

- [1] D. H. Stamatis; Advanced product quality planning: the road to success. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429401077>, (2018).
- [2] W. R. Blichke, M. R. Karim, D. P. Murthy; Warranty data collection and analysis. London: Springer, (2011).
- [3] Automotive Industry Action Group Association. Advanced Product Quality Planning and Control Plan (APQP) Reference Manual. 2nd Edition. AIAG (2008).
- [4] S. Wu; Warranty data analysis: A review. Quality and Reliability Engineering International, 28(8), 795-805, (2012).
- [5] M. M. M. Jagtap, S. N. Teli; PDCA Cycle As TQM Tool-continuous improvement of warranty. International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering (IJRMEE), 2(4), 1-5, (2015).
- [6] Ł. Rudolf, M. T. Roszak; Design review as element of quality planning process to eliminate nonconformities in technical project documentation. METALURGIJA 62 (2023) 3-4, 16th SYMPOSIUM „MATERIALS AND METALLURGY“, supplement „Book of Abstracts“, pp: 489-498.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Badania układów metal-polimer do zastosowań medycznych

S. Sacha^a, W. Cieślak^a, W. Wiśniewska^a, M. Rzepiela^a, M. Gawlas^a, K. Cesarz-Andraczke^b,
A. Kania^b

^a Studenci kierunku Inżynieria Produkcji i Zarządzania na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej

email: sebasac428@student.polsl.pl

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email: aneta.kania@polsl.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań układów stop magnezu - polimer pod kątem możliwości zastosowania ich jako potencjalnego biomateriału na resorbowalne implanty medyczne. Oceniono postęp efektu samonaprawiania się powłok polimerowych na stopie magnezu po zanurzeniu w roztworze symulującym płyny ustrojowe człowieka.

Abstract: The article presents the study's results of magnesium alloy - polymer systems in terms of using them as a potential biomaterial for resorbable medical implants. The progress of the self-healing effect of polymer coatings on a magnesium alloy after immersion in a solution simulating human body fluids was assessed.

Słowa kluczowe: mechanizm samonaprawy, polilaktyd, biopolimery, stopy Mg

1. WSTĘP

Implanty medyczne są zaprojektowane w sposób zapewniający stabilizację złamanej kości lub wręcz zastępują uszkodzone struktury w układzie kostnym i stawowym. W zakresie resorbowalnych materiałów ortopedycznych w praktyce medycznej znajdują zastosowanie głównie materiały ceramiczne (tj. hydroksyapatyt) oraz materiały polimerowe (tj. polilaktyd – PLA) do wypełniania głównie ubytków kostnych. Polimery resorbowalne to polimery, które mogą ulec naturalnemu rozkładowi i wchłonięciu przez organizm człowieka. Materiały te charakteryzuje zdolność do rozkładu i eliminacji z organizmu w procesach metabolicznych lub przez działanie enzymów produktów degradacji. Wyroby z polimerów resorbowalnych znalazły wiele zastosowań w medycynie, m.in. służą do wytwarzania nici chirurgicznych, mikroporowatych podłoży do regeneracji tkanek, śrub, nitów oraz płytek do mocowania złamań kostnych w szczególności chirurgii szczękowo-twarzowej [1].

W zakresie resorbowalnych biomateriałów na implanty ortopedyczne rozpatrywane są również stopy magnezu. Jednakże ich szybkość degradacji, a następnie wchłaniania jest zbyt duża i wymaga kontrolowania. Jednym ze sposobów zmniejszenia lub nawet czasowego

zablokowania degradacji stopów magnezu są powłoki ochronne. Wśród powłok ochronnych rozpatruje się samonaprawialne powłoki, które czasowo mogłyby zablokować szybkość degradacji, ale może również zapewnić możliwość kontrolowania procesu degradacji stopów Mg poprzez zmiany składu chemicznego lub metod wytwarzania powłok ochronnych.

Polilaktyd (PLA), jest rodzajem polimeru syntetycznego należącego do grupy poliestrów. Jest on wytwarzany z fermentacji glukozy, a głównym jego składnikiem jest kwas mlekowy. Jest on biodegradowalnym materiałem, co oznacza, że może ulec rozkładowi biologicznemu bez wywoływania szkodliwych skutków zdrowotnych dla organizmu człowieka [2]. Podczas interakcji stopu Mg z powłoką z nanowłókiem PLA następuje wzrost hydrofobowości powierzchni, co jest istotną nowością dla dalszych potencjalnych zastosowań biodegradowalnych stopów Mg, takich, jak zmniejszenie adhezji płytek krwi w zakrzepicy czy uwalnianie leków [3].

Biopolimery również są stosowane w medycynie, głównie jako nośniki leków. Kazeina, czyli białko występujące naturalnie w mleku jest białkiem najbardziej przydatnym jako materiał budulcowy do syntezy hemoglobiny i białek osocza krwi. Kazeina jako powłoka na powierzchni stopu Mg mogłaby być potencjalnie materiałem biokompatybilnym i ulegać samorozpadowi w organizmie człowieka [4].

Dodanie kazeiny do polilaktydu ma na celu wspomaganie regeneracji biomateriału, polegające na ochronie przed uszkodzeniem powierzchni stopu magnezu pokrytego powłoką. Do badań rozpatruje się tylko polimery syntetyczne oraz polimery naturalne, które będą nietoksyczne i prawdopodobnie tolerowane przez organizm człowieka [5].

W pracy przedstawiono wyniki badań efektu samonaprawiania się materiału złożonego z polilaktydu oraz kazeiny.

2. METODOLOGIA BADAŃ

Materiałem do badań był stop $MgCa_2Zn_1Gd_3$. Próbkę do powlekania miały przekrój okrągły o wymiarach 13 mm x 7 mm. Powierzchnie próbek przed powlekaniami zostały poddane procesowi szlifowania i piaskowania, które odbyło się za pomocą piaskarki, piaskiem Al_2O_3 o średnicy ziarna 50 μm . Następnie odtłuszczono powierzchnię próbek acetonem.

Pierwsza mieszanina powłokowa (1) składała się z: 5 g polilaktydu (PLA) oraz 200 ml chlorku metylenu (CH_2Cl_2). Proces mieszania składników odbywał się w zlewkach, które były umieszczone w kąpielii wodnej o temperaturze około 60 °C.

Druga mieszanina powłokowa (2) składała się z: 5 g polilaktydu, 2,5 g NaOH, 2,5 g kazeiny, 50 ml wody destylowanej oraz 200 ml chlorku metylenu. Do zlewki z 50 ml wody destylowanej dodano 2,5 g kazeiny i następnie składniki mieszano w kąpielii wodnej o temperaturze około 37 °C. Kolejno, do roztworu dodano wodorotlenek sodu dla uzyskania jednorodnej mieszaniny. Tak powstałą mieszaninę dodano do mieszaniny 1.

Przy użyciu metody dip coating otrzymano dwa warianty powłok z następującymi oznaczeniami:

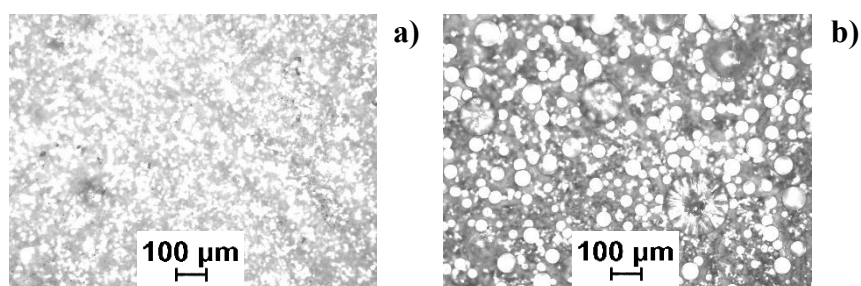
- 5 g PLA, 200 g CH_2Cl_2 – oznaczona jako *PLA(1)*,
- 5 g PLA, 200 g CH_2Cl_2 , 2,5 g kazeiny, 2,5 g NaOH, 50 ml wody destylowanej – oznaczona jako *PLA/KAZ(2)*.

Próbki powleczone suszono na powietrzu przez 48 h. Następnie powłoki celowo uszkodzono nożem. Kolejno wykonano badania immersyjne próbek powleczonych w roztworze Ringer'a (skład: $8,6 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$ NaCl, $0,3 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$ KCl, $0,48 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$ $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) przez 1 godzinę

w temperaturze $37 \text{ }^\circ\text{C}$. Obserwacje mikroskopowe przed zanurzeniem próbek dokonano przy użyciu mikroskopu firmy Zeiss. Powierzchnie próbek po zanurzeniu w roztworze Ringer'a obserwowano w mikroskopie Zeiss oraz DVM6A firmy Leica.

3. WYNIKI I DYSKUSJA BADAŃ

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki obserwacji mikroskopowych próbek powleczonych powłoką *PLA(1)* oraz próbki *PLA/KAZ(2)*. W strukturze powłok widoczne są pęcherzyki powietrzne powstałe w wyniku mieszania składników mieszaniny powłokowej.

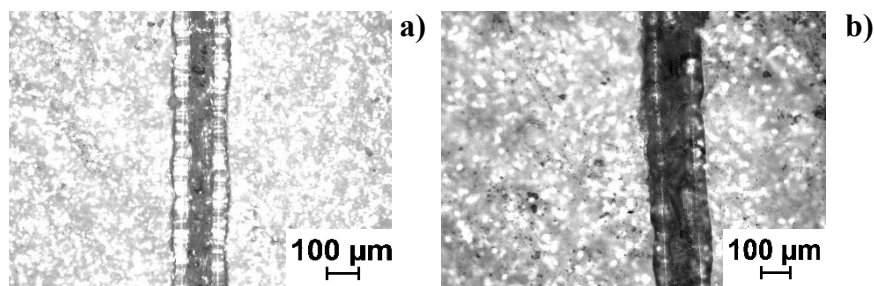


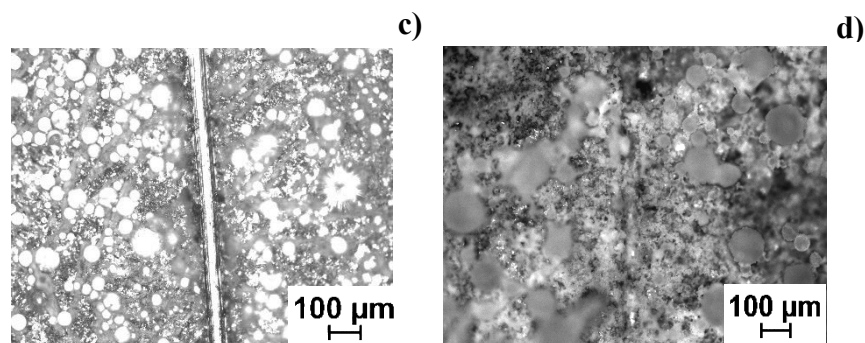
Rysunek 1. Powierzchnia próbek: a) *PLA(1)*, b) *PLA/KAZ(2)*.

Figure 1. Sample's surface: a) *PLA(1)*, b) *PLA/KAZ(2)*.

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki obserwacji rys wykonanych przed badaniem immersyjnym (rys. 2a,c) próbek *PLA(1)* oraz próbki *PLA/KAZ(2)*, odpowiednio. Dla celów porównawczych przedstawiono zdjęcia rys po godzinym zanurzeniu w roztworze Ringer'a w temperaturze $37 \text{ }^\circ\text{C}$ (rys. 2b,d).

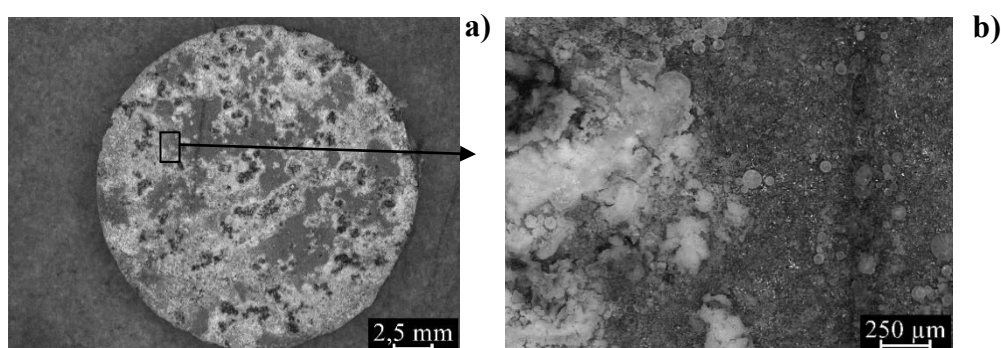
Próbka *PLA(1)* nie wykazała żadnych widocznych efektów samonaprawiania się. Zdjęcia powierzchni powleczonej próbki zarówno przed (rys. 2a), jak i po godzinym zanurzeniu (rys. 2b) są bardzo podobne pod względem wizualnym. Z kolei rysa na próbce *PLA/KAZ(2)* po godzinym zanurzeniu w roztworze Ringer'a (rys. 2c) znacznie różni się od rysy sprzed zanurzenia (rys. 2d). W celu oceny efektu samonaprawiania się powłoki na próbce *PLA/KAZ(2)*, wykonano dodatkowo zdjęcia w mikroskopie DVM6A firmy Leica. Nie widać już śladów po ostrzu na dnie rysy oraz widoczny jest materiał powłoki i prawdopodobnie produkty degradacji w obszarze rysy (rys. 3).





Rysunek 2. Celowe uszkodzenie próbki PLA(1) oraz PLA/KAZ(2) przed (a,c) oraz po zanurzeniu (b,d) w roztworze Ringer'a w temperaturze 37 °C, odpowiednio.

Figure 2. Intentional damage to the PLA(1) and PLA/KAZ(2) samples before (a,c) and after immersion (b,d) in Ringer's solution at 37 °C, respectively.



Rysunek 3. Powierzchnia próbki PLA(1) po godzinnym zanurzeniu w roztworze Ringer'a w temperaturze 37 °C (a,b).

Figure 3. The surface of PLA(1) after an hour of immersion in Ringer's solution at 37 °C (a,b).

4. PODSUMOWANIE

Wykonane badania wykazują, iż roztwór 5 g PLA, 200 g CH_2Cl_2 z dodatkiem 2,5 g kazeiny, 2,5 g NaOH, 50 ml wody destylowanej wykazuje pewną zdolność do regeneracji. Zmiany w obszarze rysy wskazują na zapęszczanie uszkodzenia, prawdopodobnie produktami korozji i materiałem powłokowym. Powierzchnia próbki po zanurzeniu w roztworze Ringer'a jest niejednorodna, co wskazuje, że proces degradacji postępuje w różnym stopniu, obszarowo na badanej próbce PLA/KAZ(2). Wyniki badań potwierdzają możliwość regeneracji wytworzonych powłok. Jednakże konieczne jest wykonanie dalszych badań w kierunku osiągnięcia bardziej równomiernego postępu degradacji.

LITERATURA

1. S. Gogolewski, Biomateriały polimerowe. Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna, Tom 4 [w:] Biomateriały, Błażewicz S., Stoch L. (red.). Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2003.

2. J. Kączkowski, Podstawy biochemii, WNT, Warszawa, 2004.
3. M.E. Voicu, I. Demetrescu, A. Dorobantu, M. Enachescu, G. Buica, D. Ionita, Mg alloy interaction with electrospun PLA nanofiber coating in understanding changes in corrosion, wettability and pH, *Nanomaterials* 12 (2022) 1-14.
4. A. Kania, K. Cesarz-Andraczke, Z. Brytan, Ł. Reimann, P. Smolarczyk, The Influence of Casein Coatings on the Corrosion Behavior of Mg-Based Alloys, *Materials* 15 (2022) 1-20.
5. J. Gawęcki (pod red.), Białka w żywności i żywieniu, Wydawnictwo AR w Poznaniu, Poznań, 2003.

Praca powstała w wyniku realizacji projektu Project Based Learning (PBL) pt. Opracowanie niezniszczalnych powłok, które same będą się naprawiać.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Removal of Heavy Metals & Bacterial Infection from Industrial Wastewater Using Nanocomposite of Silver Nanoparticles & Household Wastes

S. Salahi ^a

^a Gazi University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, email: shanli.salahi@gazi.edu.tr , shanli.salahi@gmail.com

Abstract: Persistent toxic compounds such as heavy metals, radioactive substances and chemicals released from industrial wastewater and accumulated in water and soil cause negative effects on the health of living organisms such as humans and plants, bringing environmental and health problems. For this reason, intensive scientific research and development studies are carried out worldwide for the purification of heavy metals from industrial wastewater. The aim of the current research is to investigate the successful use of bioabsorbers that absorb impurities such as cadmium chloride, mercury chloride, lead and copper from aqueous solution and form layers in household waste. In this research, green synthesis method was used for the synthesis of nanoparticles. Non-toxic and environmentally friendly non-toxic silver nanocomposite is used as a bio-absorbent to ensure that the wastewater is bacteria-healthy and eliminate microbes.

Keywords: Bio Absorbents, Industrial Effluents, Green Synthesis, Nanocomposite of Silver Nanoparticles

1. INTRODUCTION

The progress of human civilization, advancements in diverse technologies, and the growing global population have led to the emergence of a prevalent issue known as pollution in numerous countries. Industrial waste discharges into aquatic environments have become a significant concern, as they pose potential threats to both aquatic life and human well-being. These discharges have garnered particular attention due to their toxic nature and the consequential adverse effects they entail. Globally, there is a pressing demand for extensive scientific research and development efforts aimed at addressing the purification of heavy metals from industrial wastewater. This urgency stems from the widespread presence of persistent toxic compounds, such as heavy metals, radioactive substances, and chemicals, that are released into the environment. These pollutants possess the detrimental capability to accumulate in water and soil, thereby posing significant risks to the health of both living organisms, including humans and plants. Consequently, they contribute to the onset of various environmental and health problems, including different forms of cancer. In light of these

adverse effects, it becomes imperative to prioritize the search for effective solutions in the removal of heavy metals from industrial wastewater [1-2].

Industrial wastewater treatment includes techniques to change the physical and chemical properties of water. Removal of heavy metal ions from industrial wastewater can be done by different methods. Adsorption is one of these techniques and is environmentally friendly. To date, many methods have been used to adsorb heavy metals. The use of biological adsorbents is one of these methods. This method has attracted great attention because it is economical, provides easy access to the desired materials and conforms to environmental standards [3-4].

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Preparation of Bio-Waste (Fruit Peels) Powder

Household waste including banana peels, orange peels, and tomato peels was collected and washed. Afterward, the peels were cut into small pieces and dried at 80°C in an oven for 24 hours to remove their moisture. The dried material was then ground into a powder and passed through a sieve.

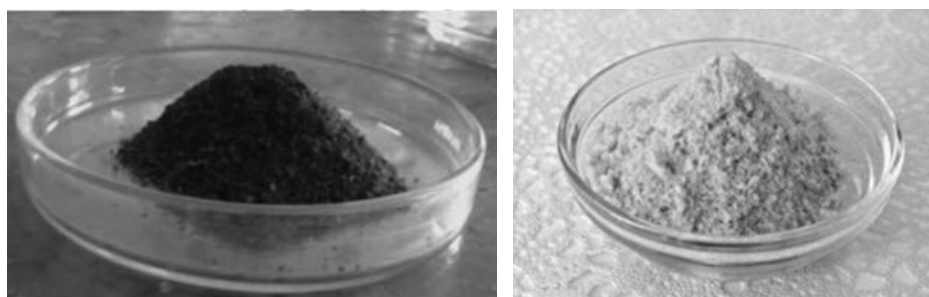


Figure 1. Powdered form Of BANANA and ORANGE peels used as bio-adsorbents

2.2. Sample Preparation Process for AAS Analysis

One gram of each of the prepared powders was added to separate solutions containing HgCl_2 , $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, and CdCl_2 , respectively. The resulting mixtures underwent stirring for a duration of 90 minutes at 1100 rpm using a magnetic stirrer, while maintaining room temperature. Following this, the prepared solutions were subjected to purification using Whatman 40 filter paper. The filtrated samples were subjected to analysis through atomic absorption spectrophotometry (AAS) in order to ascertain the concentration of metal ions. Subsequently, the purified samples were stored at a temperature of 4°C until the atomic absorption test was performed.

2.3. Synthesis of Silver Nanoparticles

A 100 ml solution of silver nitrate was prepared with a concentration of 0.001 normal. Subsequently, the solutions were placed on a magnetic stirrer, and 3 grams of prepared powder were introduced into solution. The mixtures were incubated in a dark environment to promote the formation of silver nanoparticles. For the purification of the synthesized nanoparticles, the

colloidal solution was subjected to centrifugation at a speed of 12,000 rpm for a duration of 20 minutes. Subsequently, the supernatant was carefully separated, while the sediment underwent three cycles of washing with distilled water. After each wash, centrifugation was carried out to facilitate the separation process. The resulting sediment was then subjected to drying for subsequent characterization of the formed nanoparticles, including SEM and EDX analysis.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

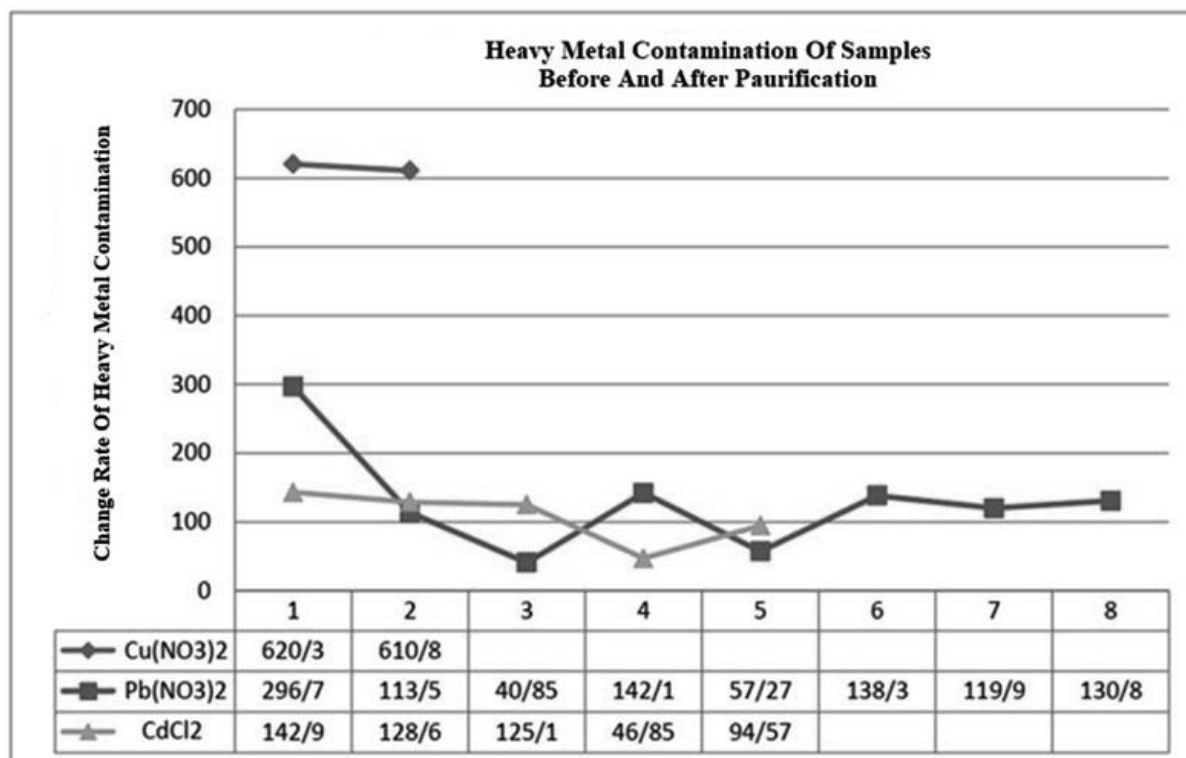


Figure 2. Comparison of Heavy Metals Contamination levels before and after the utilization of Household Bio-Waste Materials. The first column of each rows represents the Heavy Metal content in Waste Water samples prepared in the laboratory, which serves as the Control samples. The subsequent columns indicate the Quantities of Heavy Metals detected after the implementation of Bio-Materials

The initial sample pertains to the utilization of banana peel for the refinement of copper nitrate, with a focus on evaluating the outcomes in terms of pollution reduction. The second contamination is related to lead nitrate, with the first one being the control pollution sample. The subsequent samples are as follows: lead nitrate refined with banana peel, banana peel + orange peel, orange peel, orange peel + tomato peel, banana peel + tomato peel, tomato peel, and UV + tomato peel. The third sample is related to cadmium chloride, with the first one being the control sample. The subsequent samples provide the results of refining cadmium chloride with tomato peel, UV + tomato peel, banana peel, and orange peel, respectively.

The results of atomic absorption analysis indicate a decrease in pollution contamination in samples prepared in the laboratory environment. Therefore, this study demonstrates a

promising approach of using fruit peels as absorbents for the filtration of heavy metals in the industrial wastewater treatment process [5-7].

The absorption activities of banana, orange, and tomato peels primarily stem from the presence of amide, carboxyl, and hydroxyl groups on their surfaces, which enable them to remove heavy metals and various metal ions from industrial wastewater. The main reasons that facilitate the use of fruit peels such as banana peels, orange and tomato peels in this field are as follows:

- They possess excellent absorption properties,
- Being cost-effective,
- Their environmentally friendly properties ,and
- They are easy to prepare and apply

In order to guarantee the microbial safety of the treated water subsequent to the heavy metal filtration procedure, an additional filtration step has been implemented utilizing silver nanoparticles synthesized via a biological (green) approach. These nanoparticles are produced using bio-reducing agents, such as fruit peels, rendering them non-toxic and environmentally benign [8,10].

The mixtures of powder and silver nitrate were incubated in a dark environment to promote the formation of silver nanoparticles. The observation of a color transformation from yellow to dark brown in the solution indicated the occurrence of nanoparticle formation after 80 minutes.

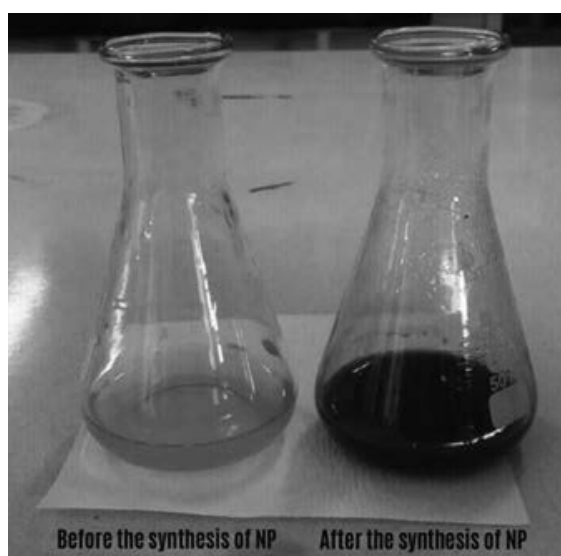


Figure 3. Before and after the synthesis of silver nanoparticles

In order to analyze the diameter and morphology of synthesized silver nanoparticles, scanning electron microscopy (SEM) images were prepared, as illustrated in Figure 4. The images provide evidence that the nanoparticles exhibit a spherical shape and possess an estimated diameter within the range of 18-80 nanometers. Furthermore, for the purity analysis of the produced nanoparticles, EDX analysis was performed, which indicated the purity of the sample.

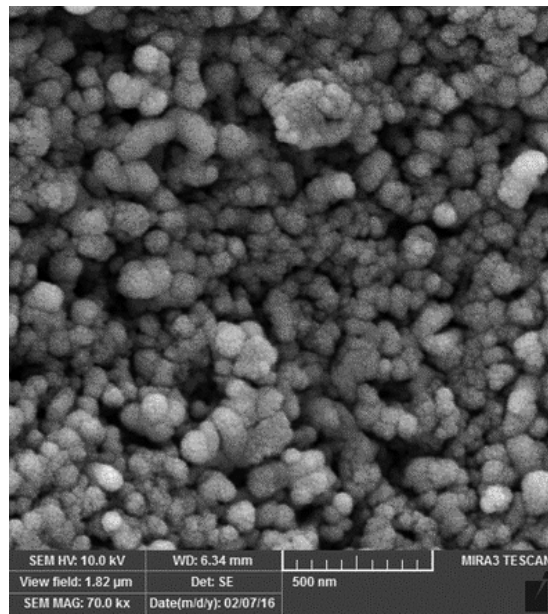
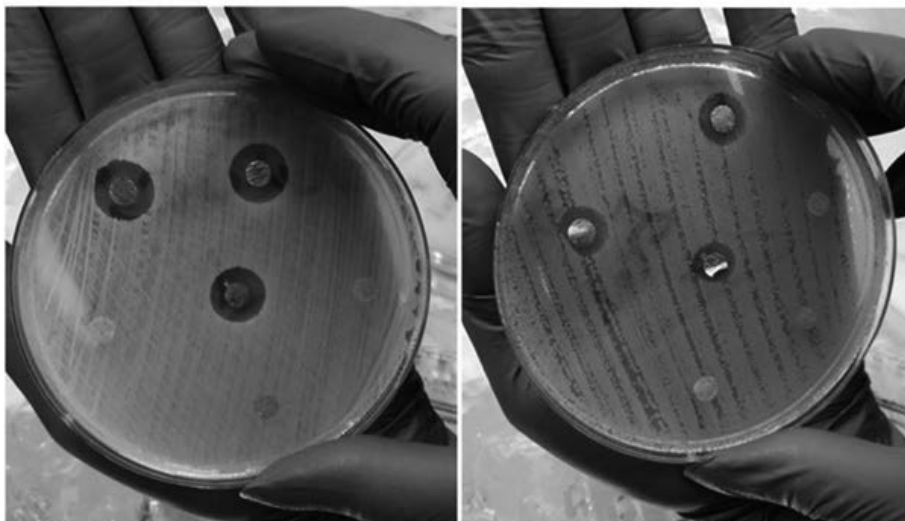


Figure 4. SEM image of synthesized silver nanoparticles

The table 1 and figure 5 present the results illustrating the inhibitory effects of the used materials on the growth of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* bacteria. The diameter of the growth inhibition zone observed for *Escherichia coli* bacteria on the bacterial plate was found to be smaller in comparison to that of *Staphylococcus aureus*. This discrepancy suggests a stronger inhibitory effect of silver nanoparticles on *Staphylococcus aureus* bacteria. Furthermore, no inhibition zone was observed in the control disk.



Staphylococcus aureus
ATCC: 25923

E.coli
ATCC: 25922

Figure 5. Growth inhibition halo in *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* cultures

Table 1. Average diameter (mm) of growth inhibition zones of the tested Bacteria against prepared disks

Bacteria	Control Disk	Orange Peel Extract	Banana Peel Extract	Tomato Peel Extract	Orange Peel Nano Composite	Banana Peel Nano Composite	Tomato Peel Nano Compositet
Staphylococcus aureus	0	0	0	0	15	15	13
E.Coli	0	0	0	0	10	10	9

4. CONCLUSION

Wastewater pollution is one of the fundamental issues of the environment; therefore, wastewater management and treatment are crucial topics in urban development. In the conducted experiment, banana peel, orange peel, and tomato peel obtained from household waste were utilized, resulting in a remarkable maximum filtration efficiency of up to 67% for heavy metals. Hence, this project can be utilized for the treatment of industrial wastewater, and the water purified from any heavy metals can be used for irrigation of agricultural lands and cultivation of aquatic products. Additionally, this project holds special importance in terms of facilitating the reuse of domestic waste within the city, reducing the amount of leakage water resulting from domestic waste, preventing the spread of microbes from domestic waste into the environment, and preserving the environment.

BIBLIOGRAPHY

1. N. Sridhar, J. S. Senthilkumar, M. R. Subburayan, Removal of Toxic Metals (Lead & Copper) from Automotive Industry Waste Water By Using Fruit Peels, International of Advanced information and Communication Technology 1-2 (2014).
2. M. A. Hossain, H. H. Ngo, W. S. Guo, T. V. Nguyen, Biosorption of Cu(II) From Water by Banana Peel Based Biosorbent: Experiments and Models of Adsorption and Desorption, Journal of Water Sustainability, 2-1 (2012) 87–104.
3. K. Prabu, S. Shankarlal, E. Natarajan, A Biosorption of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions Using Fish Scale (Catla catla), World Journal of Fish and Marine Sciences 4 (2012) 73-77.
4. S. Singhal, S. Agarwal, K. D. Bahukhandi, R. Sharma, N. Singhal, Bio-adsorbent: A costeffective method for effluent treatment, International Journal of Environmental Sciences and Research, 3-1 (2014) 151-156.
5. A. Begum, S.Y., Noorjahan, C.M., D. Sharif S., Physico-chemical and fungal analysis of a fertilizer factory effluent, Nature of Environmental Pollution Technology, 4 (2005) 529-531.
6. G. Annadural, R. S. Juang, D. J. Lee, Adsorption of heavy metals from water using banana and orange peels, Water Science and Technology 47-1 (2003) 185-190.

7. Igwe, J. C. , Abia. A.A. , A bioseparation process for removing heavy metals from waste water using biosorbents, *African Journal of Biotechnology* 5-12 (2006) 1167-1179.
8. L. Tavera-Davila, H. B. Liu, R. Herrera-Becerra, G. Canizal, M. Balcazar, J. A. Ascencio, Analysis of Ag Nanoparticles Synthesized by Bioreduction, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 9-3 (2009) 1785–1791.
9. T., Subramani, S. K. Sindhu, Batch Study Experiments And Column Analysis For Finding Out A Suitable Biosorbent For The Removal Of Heavy Metals From Electroplating Industry Effluent, *International Journal of Engineering Research*, 2012.
10. M. Guzman, J. Dille, S. Godet, Synthesis and antibacterial activity of silver nanoparticles against gram-positive and gramnegative bacteria, *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine* 8-1 (2012) 37-45.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Obróbka laserowa jako nowoczesna technologia w inżynierii powierzchni

T. Setnik ^a, J. Płocica ^a, M. Bonek ^b

^a Uczeń V Liceum Ogólnokształcące z Oddziałami Dwujęzycznymi im. Andrzeja Struga w Gliwicach, email: rozer0902@gmail.com

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

WPROWADZENIE

W dzisiejszych czasach, wraz z dynamicznym rozwojem technologii, inżynieria powierzchni staje się coraz bardziej istotna dla wielu branż przemysłowych. Jednym z najbardziej zaawansowanych i wszechstronnych narzędzi w tej dziedzinie jest obróbka laserowa. Technologia ta rewolucjonizuje procesy obróbki powierzchni, oferując szereg korzyści i możliwości, które nie były dostępne w tradycyjnych metodach obróbki. W tym artykule przyjrzymy się bliżej obróbce laserowej jako nowoczesnej technologii w inżynierii powierzchni, omawiając różne metody oraz potencjalne zastosowania.

Obróbka laserowa jest procesem, w którym wiązka laserowa jest skierowana na materiał, co prowadzi do różnych efektów, takich jak przetopienie, odparowanie, ablacja czy modyfikacja chemiczna. Istnieje kilka głównych metod obróbki laserowej, z których każda ma swoje własne unikalne właściwości i zastosowania. Warto dodać, że jest ona jedną z wielu technologii inżynierii warstw powierzchniowych nowej generacji które realizują częściowo zadania inżynierii warstw powierzchniowych takich jak obróbka detonacyjna, obróbka elektroiskrowa.

1. CIĘCIE LASEROWE

Cięcie laserowe to nowoczesna metoda obróbki materiału podobna do obróbki mechanicznej, podstawowa różnica tkwi w stosowanym czynniku tnącym, który w przypadku cięcia laserowego stanowi gorący promień lasera oraz gaz techniczny o dużej czystości.

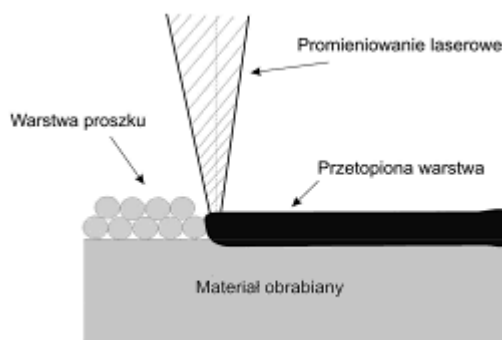
Lasery do cięcia powinny mieć co najmniej 80W mocy. Najczęściej wykorzystywanymi laserami do cięcia blach jest laser fibrowy i laser CO₂. Laser fibrowy wykorzystuje zaawansowane technologicznie komponenty światłowodowe, aby dostarczyć intensywną wiązkę światła, która może z łatwością ciąć laserowo różne materiały. Są one najlepszym wyborem dla procesów metalowych, takich jak trawienie, wyżarzanie i grawerowanie. Lasery CO₂ wykorzystują kombinację rezonatora, gazów oczyszczających i dmuchaw o dużej prędkości do tworzenia cząstek światła o dużej mocy, które zderzają się ze sobą w celu dostarczenia światła o dużej intensywności, które może przeciąć grubsze materiały ze względną łatwością.

Do cięcia laserowego wykorzystuje się wycinarki laserowe, jej typ zależy od rodzaju technologii

laserowej wykorzystywanej do cięcia, od zastosowania, czy ma ona ciąć grubsze blachy dla wielkich firm na zamówienie czy ma być to mała domowa wycinarka dla hobbisty lub mniejszego biznesu.

2. WTAPIANIE

Wtapienie to proces, gdzie wiązka lasera jest używana do stopienia warstwy metalu z jednoczesnym wtopieniem i nanoszeniem proszku, gazu bądź taśmy materiału, z którego chcemy utworzyć kolejną warstwę na powierzchni Materiału obrabianego. Możemy stosować tą technikę, przy wtapieniu substancji, która pozwoli nam uniknąć korozji metalu bądź zmienić właściwości jego powierzchni, opcji jest wiele w zależności od tego co chcemy osiągnąć.



Rys. 1. Na powyższym rysunku widzimy wiązkę lasera która wtapia warstwę proszku w materiał obrabiany.

3. PRZETAPIANIE

Przetapianie polega na naniesieniu na podłoże materiału stopującego i na przetopieniu go razem z warstwą wierzchnią materiału podłoża. Przetapianie rozpoczyna się od powłoki z materiału stopującego i rozprzestrzenia się na warstwę wierzchnią podłoża. Materiał stopujący całkowicie rozpuszcza się w materiale podłoża. Przy przetapianiu zawsze powstaje plazma i parowanie materiału. Materiał stopujący nanosi się przez naparowywanie, osadzanie elektrolityczne, malowanie, natryskiwanie, pokrywanie pastami, proszkami. Większa chropowatość podłoża polepsza adhezję proszku do podłoża. Przeciętna grubość warstw przetapianych wynosi $0,3 \div 0,4$ mm. Najczęściej stopuje się różne gatunki stali, żeliwa, stopy aluminium, tytanu. Stosuje się na elementy części maszyn lub narzędzi pracujących szczególnie w trudnych warunkach np. krawędzie tnące narzędzi skrawających.

4. ABLACJA

Ablacja to zjawisko które jest wykorzystywane w technologii PLD (Pulsed Laser Desposition). Polega ono na swoistym bombardowaniu fotonów na powierzchni Materiału obrabianego poprzez promieniowanie laserowe. Ten proces fizyczny jest złożony i wieloetapowy w wyniku czego z powierzchni naświetlanego materiału występuje emisja cząstek. Możemy też z jej pomocą oczyszczać z dużą precyzją oczywiście rzecz jest niezastąpiona a w niektórych przypadkach jedyna skuteczna.

Wyróżniamy 2 typy ablacji:

- -fotochemiczną która umożliwia rozrywanie jego wiązań międzyatomowych, gdzie efekty cieplne pojawiają się tylko na obrzeżach obszaru naświetlanego
- -fototermiczną która polega na zmianie temperatury, gdzie po szybkim jej wzroście na powierzchni materiału obrabianego.

5. ZNAKOWANIE LASEROWE

Znakowanie laserowe to usuwanie cienkiej warstwy farby z powierzchni przedmiotu bądź zmiana barwy powierzchni. Stosuje się je przy liniach produkcyjnych z bardzo wysoką wydajnością np. 80 000 produktów na godzinę oraz gdy chcemy uzyskać trwałe i estetyczne nadruki. Jego mocną stroną jest trwałość i nieusuwalność bo aby zniszczyć nadruk trzeba zniszczyć także powierzchnie np. Data przydatności na produktach spożywczych. Wyróżniamy też dwie podstawowe technologie:

System Galwo (Gantry Laser Workstation) gdzie, zogniskowana wiązka laserowa jest kierowana przy pomocy dwóch zwierciadeł sterowanych elektromagnetycznie bezpośrednio na powierzchni materiału.

Naświetlanie powierzchni przedmiotu przez specjalnie przygotowaną maskę ze wzorem. Tutaj nie ma wielkiej filozofii ot kładziemy swego rodzaju szablon na miejsce które chcemy oznakować i ustalamy głębokość znakowania.

Z materiałów które możemy znakować laserowo to: różnego rodzaju metale np. aluminium , złoto, srebro, tworzywa sztuczne, folie i opakowanie, laminaty. Do znakowania laserowego wykorzystuje się różnego rodzaju lasery (światłowodowe i CO₂) w zależności od materiału.

5. GRAWEROWANIE LASEROWE

Grawerowanie laserowe jest wykorzystywane do wykonywania indywidualnych motywów bądź nadawania indywidualności wyrobom np. Trofea sportowe, pióra albo komponenty z wygrawerowanym logiem danej firmy. Dużą zaletą grawerowania jest to, że można wygrawerować praktycznie dowolny wzór na różnych materiałach. Od technicznej strony nie ma filozofii ot wystawiamy materiał na działanie wiązki laserowej, który jest przez nią bardzo nagrzewamy i w zależności od czasu ekspozycji dochodzi do zmiany koloru, kontrastu bądź do całkowitego wypalenia i spalania materiału jest też bardzo trwałe i odporne na ścieranie.

Możemy wyróżnić 2 typy grawerowania

- Rastrowe to grawerowanie grafiki złożonej z poszczególnych pikseli
- Wektorowe to grawerowanie, gdzie grafika składa się z linii i krzywych odczytywanych po kolei "wektor po wektorze" przez laser.

Zaletami grawerowania laserowego są: bezkontaktowa obróbka materiału, brak problemu zużywania się narzędzi np. wiertła, duża precyzja i ekonomiczna produkcja

PODSUMOWANIE

Podsumowując współczesna technologia pomaga nam wykonywać rzeczy jeszcze precyzyjniej niż wcześniej oraz otwiera dla nas nowe drogi. Technologia ta wciąż jest rozwijana więc w niedalekiej przyszłości możemy spodziewać się kolejnych wiadomości z tej dziedziny.

PODZIĘKOWANIE

Praca powstała w wyniku realizacji projektu realizowanego z uczniami szkoły ponadpodstawowej w ramach kształcenia zorientowanego projektowo - PBL, w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza, Politechnika Śląska.

BIBLIOGRAFIA

1. https://pl.wikipedia.org/wiki/Cięcie_laserowe
2. https://rcin.org.pl/Content/7592/WA727_21529_57370-3-2011_Laserowa-modyfikacja.pdf
3. <https://pl.wikipedia.org/wiki/Laser>
4. <https://www.pimib.polsl.pl/pdf/30/303.pdf>
5. <https://www.troteclaser.com/pl/pomoc-i-wsparcie/faqs/jak-znakowac-laserem>
6. <https://www.troteclaser.com/pl/pomoc-i-wsparcie/faqs/jak-grawerowac-laserem>



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Integracja znormalizowanych systemów zarządzania a wymagania specyfikacji PAS 99:2012

M. Skorek^a, M. Molenda^b, M. Roszak^c

^a School of Doctors, Silesian University of Technology, PGO S.A. Pioma-Odlewnia, Oddział w Piotrkowie Trybunalskim

email: m.skorek@polsl.pl

^b Silesian University of Technology, Faculty of Organization and Management, Department of Economics and Computer Science

email: michal.molenda@polsl.pl

^c Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials, Gliwice, Poland

email: marek.roszak@polsl.pl

Streszczenie: Znormalizowane systemy zarządzania pozwalają przedsiębiorstwom na ich wdrażanie oraz łączenie, tworząc zintegrowane systemy zarządzania. Do najważniejszych korzyści z ich integracji należą ujednoczenie celów, procesów i zasobów. Specyfikacją, która pozwala w łatwiejszy sposób łączenia systemów zarządzania to PAS 99:2012. Korzystanie z tego standardu przez przedsiębiorstwo niesie za sobą wiele korzyści, które przedstawiono w niniejszym opracowaniu.

Słowa klucz: system zarządzania, integracja, system zintegrowany, znormalizowany, PAS 99

1. WSTĘP

Integracja znormalizowanych systemów zarządzania jest procesem polegającym na połączeniu co najmniej dwóch systemów zarządzania, które funkcjonują w przedsiębiorstwie.

Integracja systemów zarządzania ma na celu przynieść przedsiębiorstwu wiele korzyści min. wzrost prestiżu i konkurencyjności, poprawę jakości oferowanych usług czy wprowadzenie spójności w zakresie dokumentacji systemowej [1]. Uzyskanie założonego celu nie jest jednak proste i wymaga przemyślanych działań zarówno na etapie integracji systemów, jak i ich utrzymania i doskonalenia.

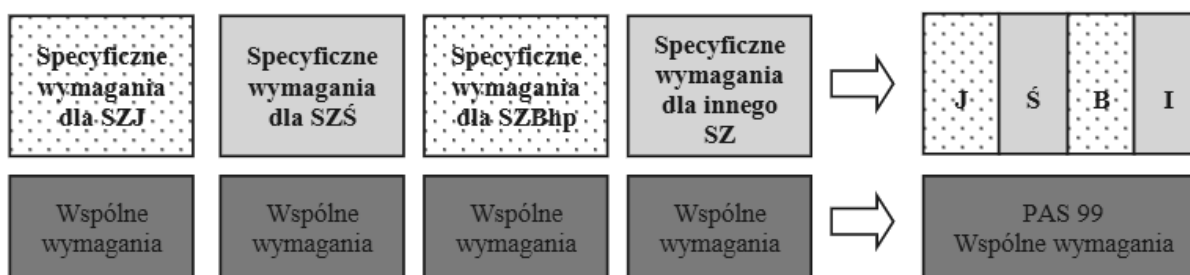
W celu określenia ram dotyczących integracji znormalizowanych systemów zarządzania opracowano specyfikację PAS 99 – Publicly Available Specification for Common Management Systems. Specyfikacja stanowi wsparcie organizacji we wdrażaniu zintegrowanego systemu zarządzania [2].

2. INTEGRACJA SYSTEMÓW ZNORMALIZOWANYCH

Integracja systemów zarządzania stanowi obszar zainteresowania i poznania badawczego w aspekcie teoretycznym, jak i praktycznym od połowy 90 lat XX wieku. Wraz z kolejnymi nowelizacjami znormalizowanych systemów zarządzania, w tym w szczególności ostatnią dotyczącą przyjęcia jednolitej struktury norm z zakresu zarządzania, przedsiębiorstwa mogą w pełni wykorzystać potencjał jaki niesie ze sobą integracja znormalizowanych systemów zarządzania.

Wytyczne do uzasadnienia i opracowania standardów systemów zarządzania zostały w 2001 wydane w formie przewodnika ISO Guide 72 - Guidelines for the justification and development of management system standards. W przewodniku tym określono min. wytyczne dotyczące terminologii, struktury i wspólnych elementów norm dotyczących systemów zarządzania, tak aby zwiększyć kompatybilność systemów oraz ułatwić ich wdrażanie. Dokument wyróżnia trzy typy norm : typ A, typ B, typ C. Pierwszy z nich zawiera wymagania norm systemu zarządzania. Typ B to wytyczne norm. Natomiast typ C to normy związane z systemem zarządzania [3]. W oparciu o wymagania ISO Guide 72:2001 w roku 2006 brytyjska jednostka certyfikująca BSI wydała specyfikację PAS 99 (Publicly Available Specification - Specification of common management system requirements as a framework for integration) [4]. Dokument ten w 2012 roku zaktualizowano, zgodnie z oczekiwaniami dotyczącymi zmiany w podejściu struktury norm odnoszących się do systemów zarządzania. Rolą specyfikacji PAS 99 jest usprawnienie procesu integracji znormalizowanych systemach zarządzania, które posiadają wspólne wymagania i mogą wspólnie być zarządzane w drodze ich integracji.

Na rysunku 1 przedstawiono filozofię zastosowania standardu PAS 99 w zakresie integracji systemów zarządzania [6]

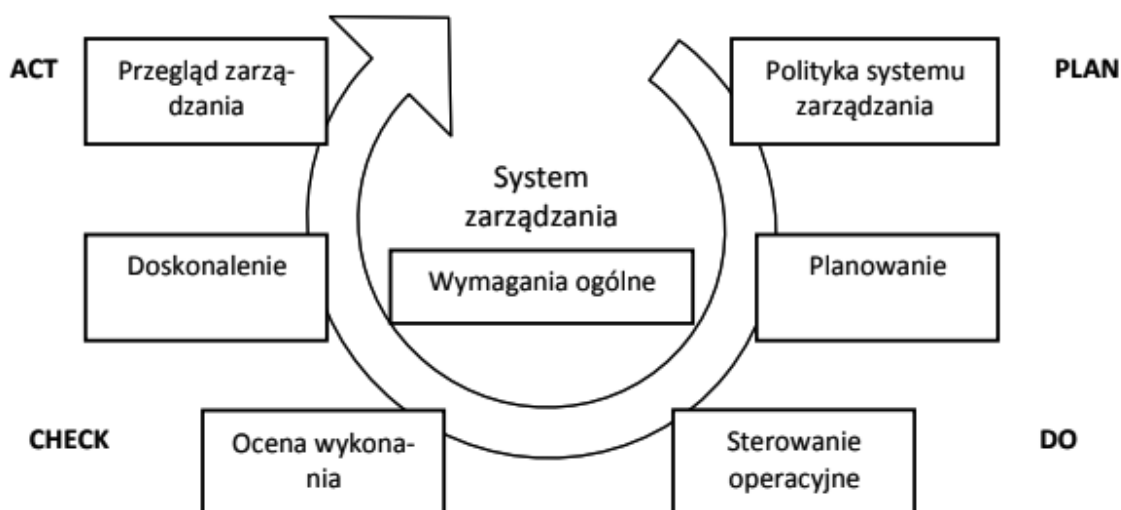


Rysunek 1. Filozofia zastosowania standardu PAS 99 w integracji systemów zarządzania [6].

Wytyczne zawarte w PAS 99:2012 to zbiór podstawowych wymagań, które mogą być użyte jako schemat integracji systemów zarządzania.

Systemy, które obejmuje PAS 99:2012 to min: zarządzanie jakością, zarządzanie środowiskowe, zarządzanie BHP, zarządzanie bezpieczeństwem informacji, zarządzanie bezpieczeństwem żywności, zarządzanie usługami.

W strukturze dokumentu zasadniczą rolę pełni cykl PDCA, który również jest stosowany w prawie wszystkich standardach systemów zarządzania. Rysunek 2 przedstawia model zintegrowanego systemu zarządzania zawarty w specyfikacji PAS 99:2012 [5].



Rysunek 2. Model zintegrowanego systemu zarządzania wg PAS 99:2012 [5]

3. WYMAGANIA I KORZYŚCI DOTYCZĄCE INTEGRACJI ZNORMALIZOWANYCH SYSTEMÓW ZARZĄDZANIA

Specyfikacja PAS 99 jest pierwszą na świecie specyfikacją zawierającą wymagania dla zintegrowanego systemu zarządzania. Integracja systemów zarządzania zgodnie z wytycznymi zawartymi w specyfikacji pozwala usprawnić sposób integracji systemów zarządzania czy to wspólnie wdrażanych czy już oddzielnie funkcjonujących w przedsiębiorstwie. Korzystanie z tej specyfikacji przez przedsiębiorstwa powinno mieć wpływ na skuteczność i osiągnięcie zamierzonych celów związanych z integracją systemów.

Do korzyści jakie niesie za sobą zastosowanie specyfikacji PAS podczas integracji systemów należą [7,8]:

- spełnienie wymagań norm poprzez ustanowienie jednej procedury dla kilku systemów;
- zmniejszenie kosztów audytów poprzez przeprowadzenie jednego audytu dla kilku systemów;
- polepszenie produktywności przedsiębiorstwa w związku z brakiem powielania tych samych zadań dla różnych systemów;
- jasno określone obowiązki i zadania pracowników, co powinno minimalizować wszelkie rozbieżności w szczególności w procesach decyzyjnych;
- wspólne cele dla integrowanych systemów w tym uzyskiwanie efektu synergii;
- ułatwienie procesu ciągłego doskonalenia systemów zarządzania;
- minimalizacji ilości przeglądów dla integrowanych systemów zarządzania;
- zapewnienie holistycznego podejścia do zarządzania ryzykiem odnosząc je wielokontekstowo;
- zmniejszenie ilości dokumentacji wewnętrznej dla systemów poprzez jej integrację;
- zmniejszenie konfliktów między systemami w zakresie rozbieżności np. stawianych celów;
- zwiększenie efektywności audytów wewnętrznych oraz zewnętrznych systemów [10].

Przedsiębiorstwo, które chce osiągnąć wyżej wymienione korzyści powinno spełnić wymagania jakie są stawiane w specyfikacji PAS 99:2012.

Jednym z takich wymagań jest integracja dokumentacji wewnętrznej. Należą do niej min. księga jakości, procedury, instrukcje, mapy procesów, polityki jakości oraz cele organizacji. Kolejnym wymaganiem jest przeprowadzenie audytów z określoną częstotliwością zgodnie z planem organizacji wraz z ich raportowaniem oraz zarządzaniem ryzykiem w organizacji. Dokument zawiera również wymagania dotyczące korekt, działań zapobiegawczych, przeglądu niezgodności a także usprawniających procesy, oraz przeglądu kierownictwa [9].

4. PODSUMOWANIE

Specyfikacja PAS 99:2012 zawiera podstawowe wymagania w zakresie integracji znormalizowanych systemów zarządzania, które mogą posłużyć jako wytyczne do integracji systemów zarządzania.

Do najważniejszych wymagań związanych z integracją systemów zarządzania zaliczyć można: politykę systemu zarządzania, planowanie, sterowanie operacyjne, ocenę wykonania, doskonalenie oraz przegląd zarządzania. Zakres wymagań specyfikacji oparty jest na cyklu PDCA.

BIBLIOGRAFIA

1. <http://www.bpic.pl/sample-data-articles/pas-99-zintegrowane-systemy-zarzadzania/>
2. PAS 99:2012, Integrated Management System, ISO, Geneva, 2012.
3. <https://www.iso.org/standard/34142.html>
4. <https://www.bsigroup.com/globalassets/localfiles/pl-pl/PAS%2099/bsi-pas99-features-and-benefits-uk-en.pdf>
5. P. Kafel, P. Nowicki, T. Sikora, Ocena polityki zintegrowanego systemu zarządzania, *Economy and Management*. 1/2012.
6. P. Jedynak, Relacje organizacji z otoczeniem. Perspektywa znormalizowanych systemów zarządzania, *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, nr 376, s. 323-335, 2015.
7. A. Kania, M. Spilka, Analysis of integrated management system of the quality, environment and occupational safety, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2016.
8. P. Kafel, Benefits of management system integration, *Studia Oeconomic Posnaniensia*, 2016.
9. P. Nowicki, P. Kafel, T. Sikora, Selected requirements of integrated management system based on PAS 99 specification, *International Journal for Quality Research* 7(1), s. 97–106, 2013.
10. T. M. Roszak, Integracja wymagań systemowych w ujęciu procesowym. *Problemy jakości*, 12, s. 12-17, (2016).

Struktura i własności rur ze stali austenitycznych spawanych doczołowo metodą TiG

A. Skwara^{a*}, T. Słaboszewski^a, A. Ludwig^a, P. Kozłowski^a, Z. Litwina, M. Kciuk^b,
A. Czupryński^c, W. Kwaśny^c

^a Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

^c Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Spawalnictwa

*email: adriskw109@student.polsl.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań spawanych ręczną i automatyczną metodą TIG rur ze stali nierdzewnej austenitycznej chromowo niklowej gatunku 304 L. W celu określenia wpływu metody spawania na strukturę i własności uzyskanych połączeń przeprowadzono badania: rentgenowskie, radiograficzne, odporności korozyjnej, nieniszczące i pomiary własności mechanicznych.

Abstract: The results of the research on TIG welded joints of manually and automatically welded pipes made of austenitic chromium-nickel stainless steel grade 304 L are presented in this work. To determine the influence of the welding method on the structure and properties of the obtained connections, the following investigations were carried out: X-ray examinations, radiographic tests, corrosion resistance tests, non-destructive testing, and measurements of mechanical properties.

Słowa kluczowe: Metoda TIG, radiografia, odporność korozyjna

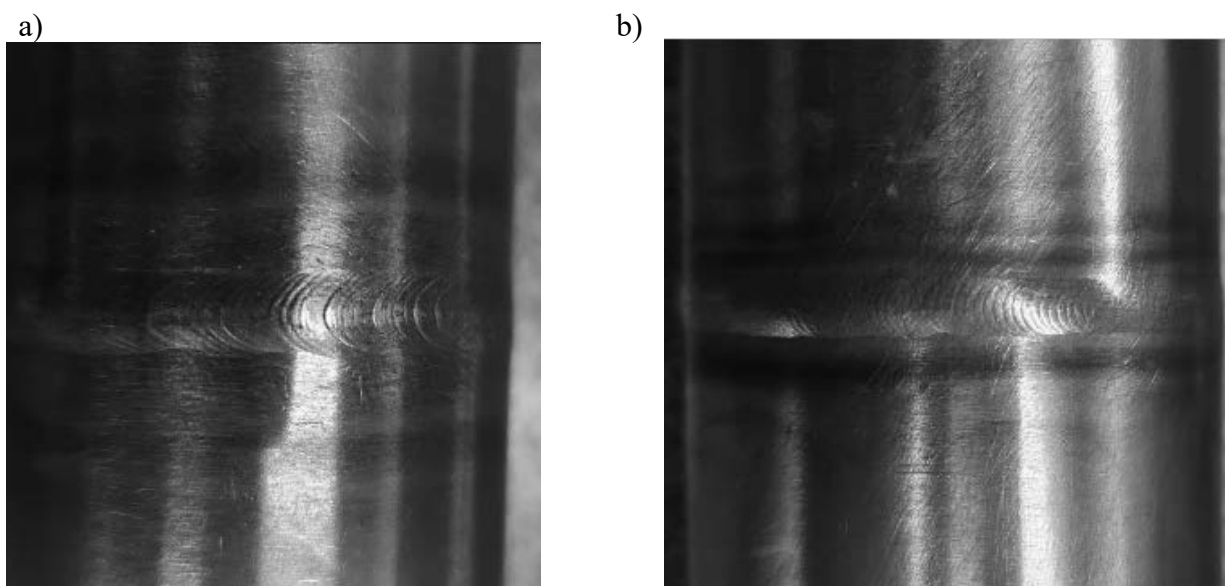
1. WSTĘP

Spawanie jest kluczowym procesem łączenia materiałów, który odgrywa istotną rolę w różnorodnych gałęziach przemysłu. Polega na łączeniu dwóch elementów materiałowych poprzez stopienie ich krawędzi i utworzenie trwałego złącza. Wybór odpowiedniej metody spawania ma istotne znaczenie dla jakości i wytrzymałości takiego połączenia. Spawanie metodą TIG (Tungsten Inert Gas) jest jedną z najpopularniejszych technik spawalniczych, wykorzystującą łuk elektryczny do łączenia metali. Metoda TIG jest często stosowana przy spawaniu aluminium, stali nierdzewnej i innych metali o wysokiej czystości. Dzięki kontroli parametrów, takich jak prąd spawania, prędkość podawania elektrody i strumień gazu ochronnego, spawacze mogą osiągnąć bardzo wysoką jakość połączeń. Ta precyzja sprawia, że spawanie TIG jest szczególnie popularne w branżach, takich jak lotnictwo, medycyna i przemysł precyzyjny, gdzie wymagane są łączenia o doskonałej jakości i wytrzymałości [1-4].

Celem wykonanych badań było określenie jakości złączy spawanych metodą TIG rur ze stali nierdzewnej austenitycznej chromowo-niklowej gatunku 304 L oraz ocena wpływu parametrów technologicznych i trybu pracy (ręczny/automatyczny) na jakość uzyskanych połączeń.

2. MATERIAŁ DO BADAŃ

Badaniom zostały poddane złącza doczołowe rur $\varnothing 52 \times 2$ mm wykonanych ze stali nierdzewnej austenitycznej chromowo-niklowej gatunku 304L (1.4307), (tab.1). Połączenia wykonano ręcznie metodą TIG (141) z materiałem dodatkowym w postaci drutu litego Lincoln Electric 304 LSi o średnicy $\varnothing 1,6$ mm oraz metodą spawania orbitalnego w głowicy otwartej bez spoiwa.



Rys 1. Spaw rury austenitycznej wykonanej a) ręcznie , b) metodą automatyczną
Fig 1. Weld austenitic pipe made a) manual method , b) by automatic method

Tablica 1. Skład chemiczny badanej stali

Tab 1. Chemical composition of the tested steel

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	N [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Cu [%]	Inne [%]
<0,03	<1,0	<2,0	<0,04 5	<0,01 5	<0,11	17,50- 19,50	-	8,00- 10,50	-	-

3. PRZEBIEG BADAŃ

Obserwacje struktury badanych materiałów przeprowadzono na mikroskopie Eclipse MA 100 przy powiększeniu x50, x100 i x200.

Mikrotwardość badanych próbek przeprowadzono za pomocą mikrotwardościomierza Vickersa 401 MVD przy obciążeniu 1000 kG, a czas pomiaru wynosił 10 sekund.

Badania penetracyjne to jedna z metod badawczych stosowanych do kontroli jakości spoin. Jest wykonywana po ocenie wizualnej, a polega na wprowadzeniu środka penetracyjnego do szczeliny i/lub porów, który wnika w ewentualne szczeliny. Nałożono środek dewelopujący, który wchłania resztki penetrantu z ukrytych szczelin, powodując powstanie wyraźnych linii na powierzchni materiału. Przed rozpoczęciem badania penetracyjnego próbki poddano czyszczeniu szczotką drucianą ze stali nierdzewnej, a następnie ocenie wizualnej. Próbki poddano odtłuszczeniu zmywaczem „MR 79” złożonym z mieszaniny rozpuszczalników organicznych – acetonu. Po dokładnym oczyszczeniu próbek naniesiono penetrant „MR 67PS III Ce-2”, który jest na bazie glikolu etylowego. Po 20 minutach oczyszczono próbki z nadmiaru penetranta. Następnie pokryto próbki warstwą wywoływacza „MR70” i pozostawiono go do wyschnięcia.

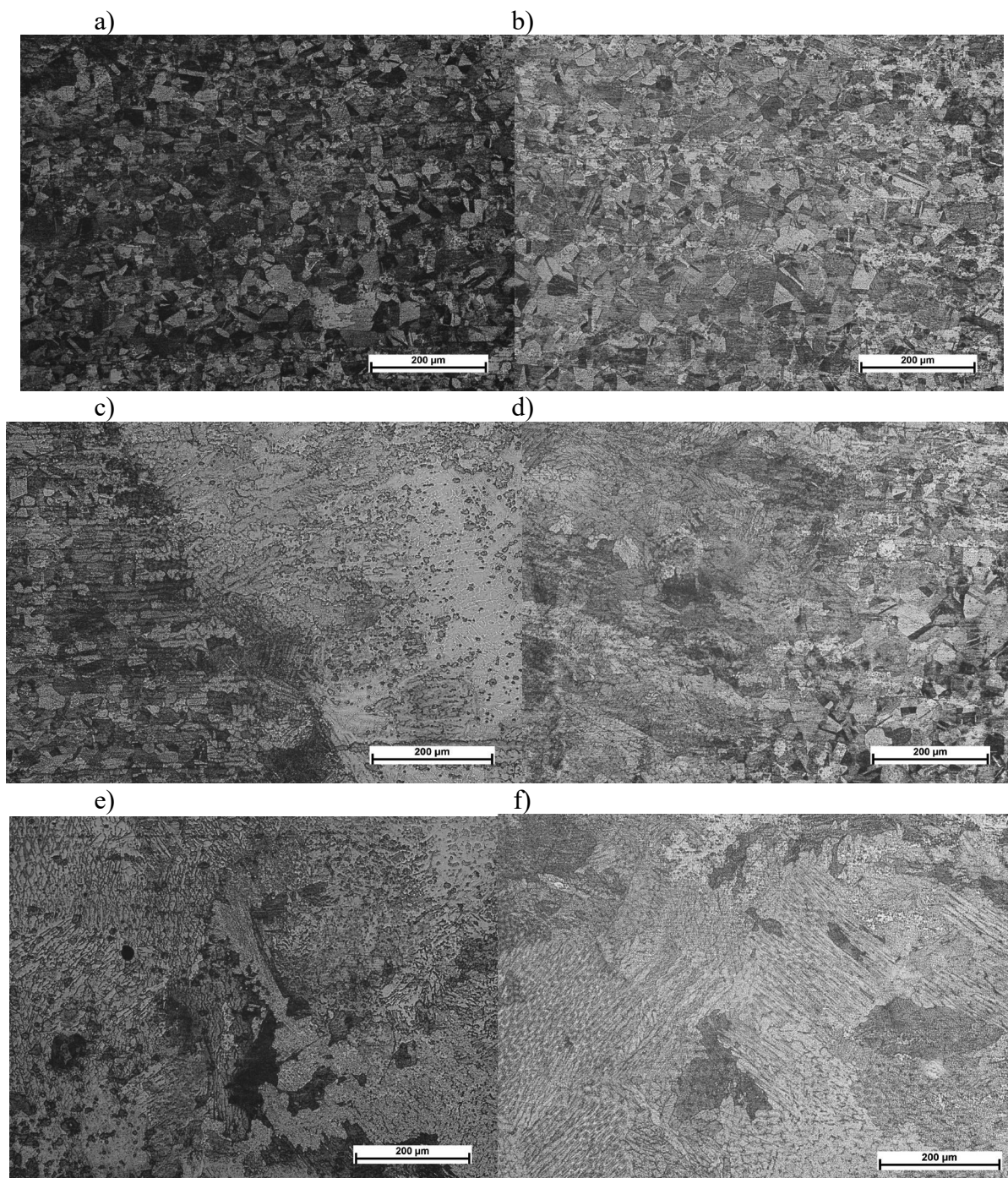
Badania radiograficzne spoin wykonano na urządzeniu Andrex CMA 208 przy zastosowaniu napięcia lampy 140 kV oraz prądu anodowego lampy 10 mA. Zastosowano eliptyczny układ badania w klasie badania B, przy zachowaniu odległości źródła od obiektu 600 mm.

Badania strukturalne analizowanych materiałów przeprowadzono na dyfraktometrze X'Pert PRO firmy Panalytical stosując filtrowane promieniowanie lampy o anodzie kobaltowej ($K\alpha=0,17909\text{nm}$) zasilanej napięciem 40 kV przy natężeniu prądu żarzenia 30 mA. Rentgenowską jakościową analizę fazową analizowanych materiałów przeprowadzono w układzie Bragg-Brentano z wykorzystaniem detektora paskowego Xcelerator.

W ramach badań korozyjnych przeprowadzono próbę Straussa, która miała na celu identyfikację korozji międzykrystalicznej złącza spawanego uzyskanego ręcznie oraz automatycznie. W tym celu przygotowano roztwór korozyjny z odczynników o czystości analitycznej. W 700 cm³ wody destylowanej rozpuszczono 100 g pięciowodnego siarczanu (VI) miedzi (II) ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), a następnie dodano 184 g (100 cm³) kwasu siarkowego (VI). Całość dopełniono wodą destylowaną do 1000 cm³. Próbki do badań umieszczono na dnie kolby stożkowej na miedzi o czystości elektrolitycznej, unikając kontaktu próbek między sobą. Początkowo materiał do badań zanurzono w zimnym roztworze, który następnie doprowadzono do wrzenia (220°C) i od tego momentu wrzenie utrzymywano przez 20 godzin. W dalszej kolejności próbki poddano próbie zginania w celu ujawnienia występowania pęknięć spowodowanych korozją międzykrystaliczną. Obserwacje mikroskopowe przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopu świetlnego Axio Observer.Z1m firmy ZEISS wraz z oprogramowaniem Axio Vision przy powiększeniu 500x.

4. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

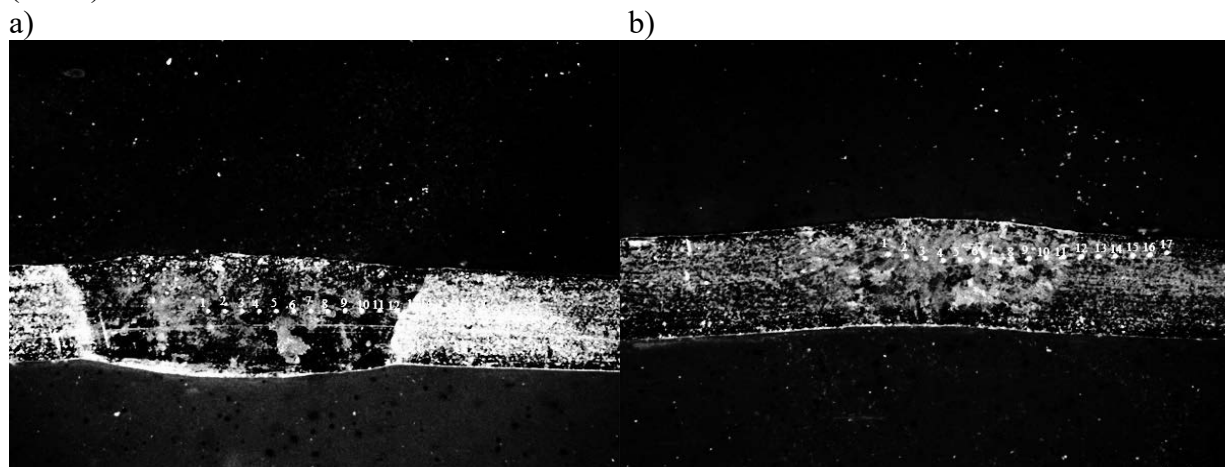
Badania metalograficzne pozwoliły na określenie zmian w strukturze badanych materiałów w zależności od wybranych obszarów analizy. Na rysunku 2a-2f przedstawiono strukturę w materiale rodzimym, strefie wpływu ciepła oraz w części centralnej połączenia (spawanie ręczne/ automatyczne).



Rys 2. a) materiał rodzimy (metoda ręczna, x100) b) materiał rodzimy (metoda automatyczna, x100), c) strefa wpływu ciepła (metodą ręczną, x100), d) strefa wpływu ciepła (metodą automatyczną, x100), e) środek połączenia (metoda ręczna, x100), f) środek połączenia (metoda automatyczna).

Fig 2. (a) native material (manual method, x100) (b) native material (automatic method, x100), (c) heat affected zone (manual method, x100), (d) heat affected zone (automatic method, x100), (e) joint center (manual method, x100), (f) joint center (automatic method).

Wyniki pomiarów mikrotwardości, przeprowadzone od środka połączenia do materiału rodzimego (rys. 3) wykazały brak różnic w uzyskanych rezultatach dla obu metod łączenia (tab. 2).



Rys 3. Złącze doczołowe próbki uzyskane metodą TIG rur ze stali nierdzewnej austenitycznej chromowo niklowej gatunku 304 spawanej a) ręcznie, b) automatycznie

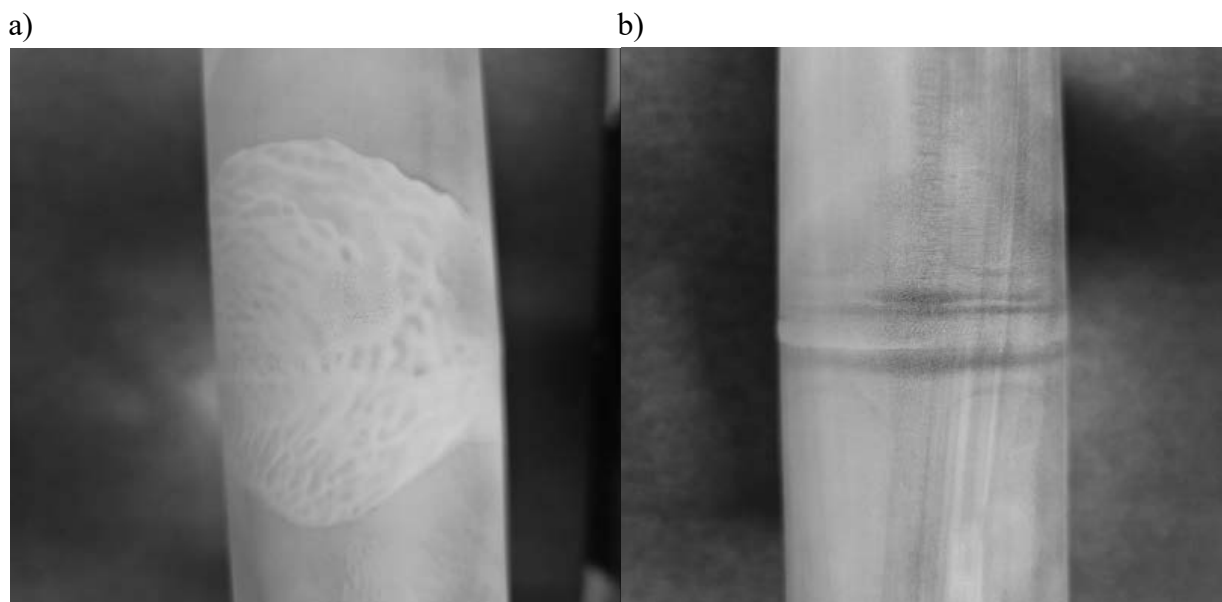
Fig 3. The butt joint of the sample obtained by TIG method of austenitic chromium-nickel stainless steel pipe grade 304 welded a) manually, b) automatically.

Tablica 2. Wyniki badania mikrotwardości

Tab 2. Microhardness test results

L.P	Ręcznie [HV 0,5]	Automatycznie [HV 0,5]
1.	241	259
2.	246	251
3.	244	258
4.	262	243
5.	262	248
6.	235	232
7.	230	222
8.	216	206
9.	206	225
10.	230	194
11.	246	197
12.	217	191
13.	239	203
14.	221	216
15.	230	229
16.	213	237
17.	255	247

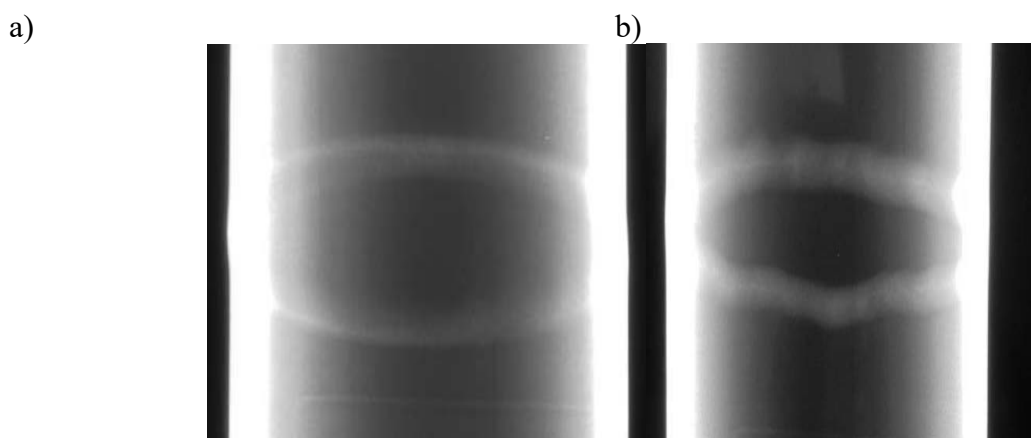
Badania penetracyjne nie wykazały żadnych niezgodności spawalniczych, a poziom jakości spoin oceniono na „B” wg normy EN ISO 5817 (rys 4).



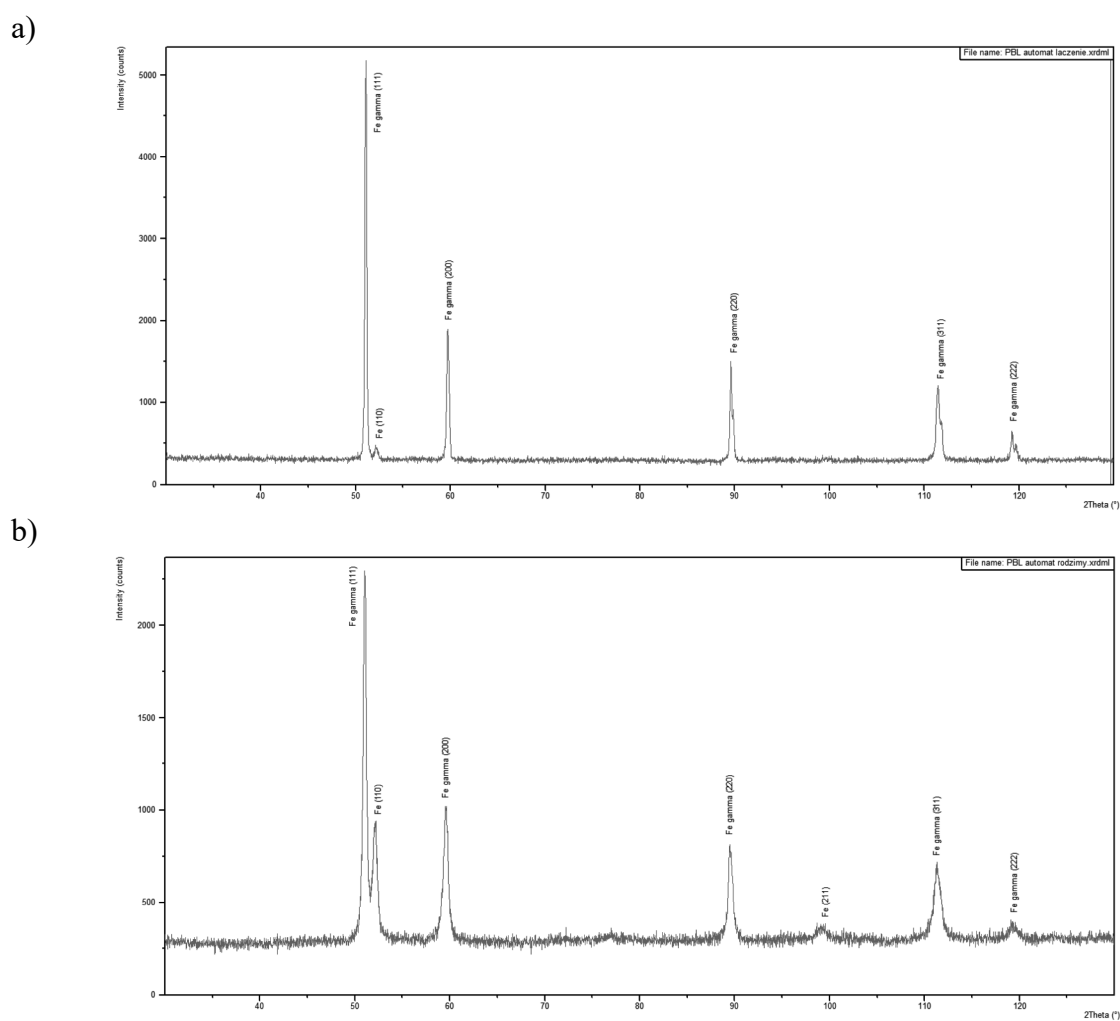
Rys 4. Zdjęcia po przebiegu badań penetracyjnych próbki a) ręcznej, b) automatycznej
Fig 4. Photos after completion of penetration tests of a) manual sample, b) automatic sample

Analiza radiogramów (rys. 5) wykazała, że oba połączenia charakteryzowały się wysoką jakością, gdzie uzyskana minimalna wartość zaciemnienia wynosiła powyżej 2,9 przy zachowaniu widoczności pręcika W17. W przypadku analizowanych radiogramów nie stwierdzono występowania niezgodności spawalniczych. Wszystkie radiogramy spełniają 1 poziom akceptacji zgodnie z normą PN-EN ISO 10675, potwierdzając wysoką jakość wytworzonych spoin.

Metodą rentgenowskiej jakościowej analizy fazowej zidentyfikowano, niezależnie od metody łączenia, (tryb ręczny/automatyczny) oraz obszaru analizy (strefa łączenia/materiał rodzimy) refleksy od Fe oraz Fe gamma, o czym świadczą refleksy od płaszczyzn krystalograficznych tych faz. Udział Fe i Fe gamma, oszacowany metodą Averbacha i Cohena (opierającą się na założeniu, że natężenie promieniowania ugiętego na płaszczyznach krystalograficznych fazy alfa i gamma jest proporcjonalny do udziały tych faz w stali) wykazał, wyższą zawartość Fe gamma w strefie połączenia (96% Fe gamma i 4% Fe) niż w materiale rodzimym (88% Fe gamma i 12% Fe) niezależnie od metody łączenia. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe dyfraktogramy rentgenowskie wraz z opisem występujących faz dla materiału rodzimego i strefy połączenia cienkościennych rur wykonanych ze stali 304L (tryb pracy automatyczny).



Rys 5. Radiogram złączy doczołowych uzyskanych metodą a) automatyczną, b) ręczną
 Fig 5. Radiogram of butt joints obtained by a) automatic method, b) manual method



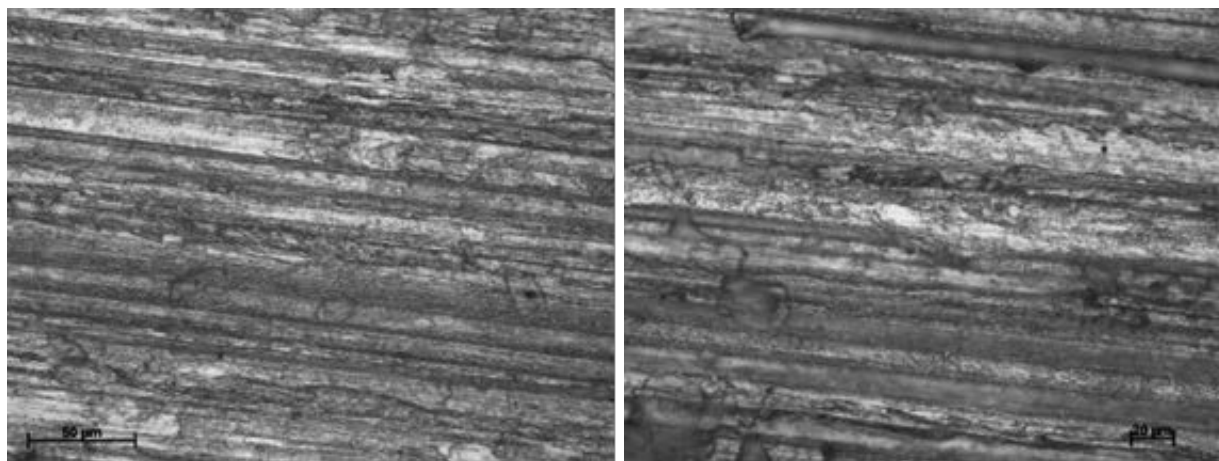
Rys 6. Dyfraktogram próbek spawanych automatycznie w a) miejscu łączenia, b) materiale rodzimym

Fig 6. Diffractogram of welded specimens automatically in a) the joining point, b) the native material

Wyniki badań korozyjnych dowiodły, że niezależnie od metody łączenia w trakcie badania podczas próby zginania próbki nie uległy pękaniu, na powierzchni nie zaobserwowano szczelin. W wyniku obserwacji metalograficznych w badanych próbkach nie stwierdzono uszkodzeń korozyjnych, charakterystycznych dla korozji międzykrystalicznej.

a)

b)



Rys. 7. Zdjęcia badania korozji naprężeniowej złącza wykonanego w sposób a) automatyczny, 500x b) ręczny, 500x

Fig. 7. Photos of the stress corrosion test of the joint made by a) automatic, 500x b) manual, 500x

5. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań, wykazano, że niezależnie od metody spawania i trybu pracy uzyskano złącza charakteryzujące się taką samą strukturą i zbliżonymi wartościami własności mechanicznych. Przeprowadzone badania nieniszczące oraz odporności korozyjnej obu połączeń nie wykazały różnic a obie techniki spawania zapewniły brak niezgodności spawalniczych i akceptowalną jakość połączenia. Przeprowadzone badania i uzyskane rezultaty wskazują na konieczność oceny uzyskanych połączeń pod względem wydajności procesu.

Artykuł częściowo finansowany w ramach projektu PBL „Porównanie technologii spawania doczołowego metodą TIG rur ze stali austenitycznych na jakość złączy i wydajność procesu” prowadzonego pod kierunkiem dr hab. inż. W. Kwaśnego, prof. P.Ś. i dr hab. inż. A. Czupryńskiego, prof. P.Ś.

LITERATURA

- [1] K, Gajewski, M. Magaczewski, D. Maliszak, M. Mężyński, M. Sas, R. Jaguś, M. Kciuk, M. Spilka “Odporność Korozyjna stali austenitycznej 0H18N9” Talent Detector International Students Scientific Conference 2023
- [2] K. Ferenc “Spawalnictwo”
- [3] B. Krupisz “Spawanie łukowe elektrodą nietopliwą wolframową w osłonach gazu (TIG)”
- [4] Saggau R., Pries H., Dilge.: Corrosion on stainless – steel components as a result of temper colours.. WELD.CUTT., 2005, nr 1, s.16-19



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Nanomaterials based on SnSe - characterization and application

W. Smok^a, P. Jarka^a

^a Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials
email: weronika.smok@polsl.pl

Abstract: The aim of the work was to review the latest achievements in the field of manufacturing, characterization and application potential of nanomaterials based on tin selenide. In addition, SnSe applications in optoelectronics, electronics and energy will be described, resulting from the unique optical, electrical and thermal properties of this semiconductor.

Keywords: nanomaterials, electrospinning, tin selenide.

1. INTRODUCTION

Tin selenide (SnSe) is currently one of the most popular compounds from the transition metal chalcogenides group, which is due to its unusual semiconductor properties - a narrow band gap of about 0.9 eV. Additional advantages of this semiconductor include low price, low toxicity, high earth-abundance and very low thermal conductivity [1].

So far, nanomaterials based on SnSe have been produced in the form of nanofibers (Fig. 1), nanowires, nanoparticles and thin films using methods such as spin-coating, dip-coating, atomic layer deposition, wet chemistry, pulsed laser deposition. In recent years, there has been increased interest in producing this type of material by electrospinning followed by calcination (Fig. 1). This method is simple, scalable, reproducible and enables the production of high-quality nanofibers and nanowires from transition metal chalcogenides [2]–[6].

There are few reports on the production of SnSe by electrospinning. However, Y. H. Cai et al. in their work [7] presented a method of obtaining SnSe nanofibers by electrospinning from a PVP/DMF/SnCl₂·2H₂O solution, which was spun at constant process parameters, the nozzle-collector distance of 17 cm, the voltage of 13.5 kV and the flow rate of 3 μl/min. The obtained fibers were calcined in a tubular furnace in a nitrogen atmosphere at 700°C for 2h. The SnSe fibers obtained in this way were used to build a gas sensor, which was characterized by high sensitivity (31.07), low detection base limit (0.5 ppm) and good stability and selectivity.

Thus, the application of the electrospinning method to produce SnSe nanostructures requires further study and development.

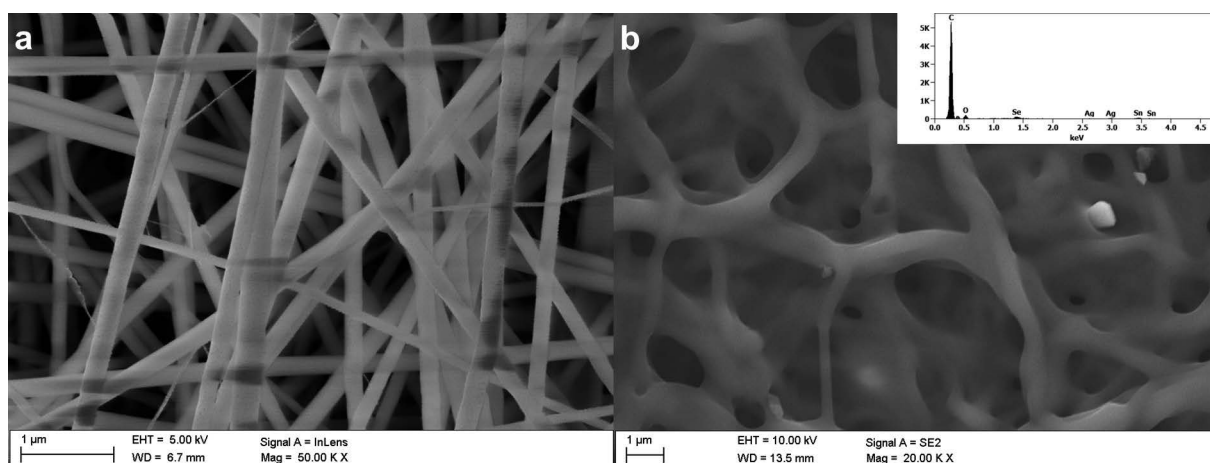


Figure 1. SEM images of as-spun PVP/SnCl₄/Se nanofibers (a) and SnSe/C nanofibers after calcination in 600 °C with EDX confirming the chemical composition of the fibers (b) [own study]

2. APPLICATION

Unique electrical and thermal properties create a number of SnSe applications in the energy and renewable energy industry, optoelectronics and environmental protection (Fig.).

Recently, a lot of research attention has been drawn to electrical energy storage devices such as lithium-ion batteries (LIBs), sodium-ion batteries (SIBs) and supercapacitors. SnSe is currently recognized as one of the most promising energy storage materials due to its good chemical stability, low price and environmental friendliness. M.A. Dar et al. [8] using the solvothermal method with ethylene glycol solvent manufactured an electrode with SnSe nanoflowers, the specific capacitance of which was 443 F/g. S.Y. Ahmed et al. [9] fabricated a supercapacitor with an SnSe electrode doped with reduced graphene oxide, fabricated by a one-step solvothermal method. The obtained device had a capacity of 568 F/g and a specific energy of 30.5 Whkg⁻¹ at a specific power of 1.007 kWkg⁻¹. K. Guo et al. [10] using the electrospinning method followed by calcination, they produced N-doped carbon nanofibers with tin selenide nanosheets on their surface. The electrode obtained from this material showed a specific capacity of 576 F/g and a high rate performance of 576 F/g as an anode for SIBs.

Thermoelectric materials are those that can convert heat energy into electricity and vice versa. A good thermoelectric material has high electrical conductivity and very low thermal conductivity. SnSe also meets these requirements with a figure of merit (ZT) value of 2.6 at 923 K for bulk single crystal. Unfortunately, SnSe in the form of nanomaterials has a much lower ZT value, but their huge possibilities of using them in cooling integrated chips encourage scientists to constant research. K. Singh et al. [11] showed that a thin SnSe film obtained by thermal evaporation has a ZT value of 0.64 and a power factor value of ~2.2 μWcm⁻¹K⁻² at 750 K. S. Saini et al. [12] using pulsed laser deposition developed SnSe thin films which ZT and power factor were respectively 0.45 and 1.96 μWcm⁻¹K⁻² at 800 K.

SnSe is also an extremely important material from the point of view of photovoltaics. Modern dye-sensitized solar cells are made of a photoanode, an electrolyte and a counter electrode, which is responsible for the redox pair reduction process. So far, the most common counter electrode material has been platinum, but due to its high price, scientists are intensively looking for alternatives to it. It is worth to pay attention to tin selenide, which can replace

platinum in DSSCs providing similar efficiency. A. Zatirostami [13] observed that the use of SnSe electrodeposited on ITO as a counter electrode allowed to achieve the efficiency of DSSCs of 4.9%, for comparison DSSC with a classic platinum electrode achieved an efficiency of 5.6%. D. K. Kumar et al. [14] deposited SnSe on a substrate by screen printing as CE in DSSC and showed that its efficiency (5.75%) is lower than that of a cell with a platinum electrode (8.09%), which indicates the need for further development of SnSe-based electrodes.

It is also worth to note the possibility of using tunable narrow bandgap and large absorption coefficient ($\sim 105 \text{ cm}^{-1}$) in the visible region of SnSe as a photocatalyst in water purification from dyes. L. Cheng et al. [15] using the SnO₂ electrospinning method followed by double-crucible selenidation produced SnSe nanofibers, which were then used as a photocatalyst for the degradation of rhodamine B (RhB) in an aqueous solution. SnSe nanofibers allowed 92.86% degradation of RhB after 20 min under the ultraviolet light irradiation. E. Kharatzadeh et al. [16] using a simple co-precipitation method, manufactured a nanocomposite SnSe/S-rGO photocatalyst. The obtained nanomaterial showed over 96% degradation of Methylene Blue (MB) during 65-minute irradiation under visible light.

3. CONCLUSION

The above reports indicate that nanostructured tin selenide is an extremely versatile and important material for the further development of many industries, which results from its unusual physicochemical properties. Therefore, it is extremely important to produce high-quality nanomaterials based on SnSe, which is possible using methods such as spin-coating, electrospinning, solvo- and hydrothermal methods, and co-precipitation. SnSe manufactured by various methods is mainly used in energy storage devices, including LIBs, SIBs and supercapacitors, but also in photocatalysis and construction of modern thermoelectric devices and innovative photovoltaic cells. The multiplicity of SnSe applications makes it necessary to constantly develop this topic.

BIBLIOGRAPHY

1. M. Kumar, S. Rani, Y. Singh, K. S. Gour, and V. N. Singh, Tin-selenide as a futuristic material: properties and applications, *RSC Advances*, vol. 11, no. 12, 6477–6503
2. S. Liu, X. Zhang, H. Shao, J. Xu, F. Chen, and Y. Feng, Preparation of MoS₂ nanofibers by electrospinning, *Materials Letters*, 73 (2012) 223–225.
3. H. Yan et al., Synthesis of SnS/C nanofibers membrane as self-standing anode for high-performance sodium-ion batteries by a smart process, *Journal of Alloys and Compounds*, 843 (2020) 155899.
4. C. Cui, G. Zhou, W. Wei, L. Chen, C. Li, and J. Yue, Boosting sodium-ion storage performance of MoSe₂@C electrospinning nanofibers by embedding graphene nanosheets, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 727, pp. 1280–1287, Dec. 2017,
5. W. Ding, Y. Gao, Y. Zhang, Z. Zou, and C. Jiang, MoSe₂ nanosheets confined in N-doped carbon fibers as robust and capacitive anode of high performance Na-ion capacitors, *Journal of Energy Storage*, 52 (2022) 104669.
6. R. Li et al., Embedding amorphous SnS in electrospun porous carbon nanofibers for efficient potassium storage with ultralong cycle life, *Composites Part B: Engineering*, 243

- (2022) 110132.
7. Y. H. Cai et al., A Triethylamine Gas Sensor Based on SnSe Nanofibers with Ppb-Level Detection Limit, SSRN Electronic Journal, 2022.
 8. M. A. Dar et al., The features of the solvothermal synthesis of SnSe nanosheets and nanoflowers for supercapacitor applications, *Inorganic Chemistry Communications*, 153 (2023) 110838.
 9. S. Y. Ahmed, S. G. Mohamed, S. Y. Attia, Y. F. Barakat, M. A. Shoeib, and N. S. Tantawy, High electrochemical energy-storage performance promoted by SnSe nanorods anchored on rGO nanosheets, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 883 (2021) 115063.
 10. K. Guo, X. Wang, Y. Min, and Q. Xu, 3D electronic channels wrapped Large-Sized SnSe as flexible electrode for Sodium-Ion batteries, *Applied Surface Science*, 606 (2022) 154955.
 11. K. Singh, Soni, S. Anwar, P. Dubey, and S. K. Mishra, Influence of temperatures on structure, thermoelectric, and mechanical properties of nanocrystalline SnSe thin films deposited by thermal evaporation, *Mater. Today Commun.*, vol. 32, p. 103880, Aug. 2022
 12. S. Saini, P. Mele, and A. Tiwari, Influence of the planar orientation of the substrate on thermoelectric response of SnSe thin films, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 129 (2019) 347–353.
 13. A. Zatirostami, Electro-deposited SnSe on ITO: A low-cost and high-performance counter electrode for DSSCs, *Journal of Alloys and Compounds*, 844 (2020) 156151.
 14. D. Kishore Kumar et al., Screen printed tin selenide films used as the counter electrodes in dye sensitized solar cells, *Solar Energy*, 190 (2019) 28–33.
 15. L. Cheng et al., Synthesis, characterization and photocatalytic performance of SnS nanofibers and SnSe nanofibers derived from the electrospinning-made SnO₂ nanofibers, *Materials Research*, 20 (2017) 1748–1755.
 16. E. Kharatzadeh, S. R. Masharian, and R. Yousefi, Comparison of the photocatalytic performance of S-SnSe/GO and SnSe/S-GO nanocomposites for dye photodegradation, *Materials Research Bulletin*, 135 (2021) 111127.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Metody wytwarzania ortez dla sportowców z urazami kończyn

S. Sochaj^a, K. Tobolik^a, A. Kania^b, M. Polok-Rubiniec^b, A. Włodarczyk-Fligier^b

^a Studenci kierunków Mechatronika Przemysłowa oraz Inżynieria Produkcji i Zarządzania na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej

email: ss307100@student.polsl.pl

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email: aneta.kania@polsl.pl

Streszczenie: W artykule dokonano charakterystyki ortez i materiałów, z których zostały wykonane. Omówiono budowę ortez oraz techniki ich wytwarzania.

Abstract: The article presents the characteristics of orthoses and the materials from which they were made. The construction of orthoses and the methods of their production are discussed.

Słowa kluczowe: orteza, budowa ortezy, materiały przeznaczone na ortezy, druk 3D

1. WSTĘP

Ortezy są jedną z kilku technik leczenia złamań, skręceń, zwichnięć oraz stłuczeń. Posiadają wiele zalet, wśród których wymienia się: większy komfort użytkowania, mniejsza masa w porównaniu do gipsu, znacznie lepsza higiena chorego miejsca oraz większa ruchliwość. Odpowiednia orteza może zapewnić wysoką sprawność stawu jeszcze w trakcie leczenia, pozwalając swobodnie poruszać się. Wadą ortez jest ich cena, która jest wyższa od gipsu, ponieważ orteza jest produkowana ze znacznie droższych materiałów. Kolejną wadą jest dopasowanie indywidualnie do potrzeb pacjenta, rodzaju choroby lub uszkodzenia. Błędne dopasowanie może pogorszyć stan stawu albo go zniszczyć.

Wielu sportowców stosuje ortezy z uwagi na komfort użytkowania, szybkość leczenia i częste urazy tego samego stawu.

Orteza zazwyczaj składa się z mocowania, które obejmuje kończynę ponad albo poniżej chorego miejsca. Kolejnym elementem budowy jest szyna łącząca mocowanie ortezy z przegubem, który zależnie od miejsca odpowiednio obraca się. Ortezy odsłaniają część kończyny, pozostawiając możliwość ruchu, a do tego, w odróżnieniu do popularnych usztywnień gipsowych, można je dowolnie zdejmować i zakładać, co znacznie poprawia higienę oraz komfort.

2. MATERIAŁY WYKORZYSTYWANE DO PRODUKCJI ORTEZ

Obecnie ortozy są zbudowane z bardzo wytrzymałych i lekkich materiałów. Niestety, takie materiały bardzo zwiększają cenę ortozy, dlatego koszt stabilizatorów, przykładowo stosowanych na kolano, waha się od 400 zł do ponad 5 000 zł. Najdroższe ortozy są zbudowane z materiałów takich, jak karbon [1] lub tytan [2]. Są one wytwarzane za pomocą nowoczesnych technologii, aby zwiększyć wytrzymałość i dokładność wymiarową produktu. Takie ortozy posiadają także specjalne zawiasy, które mają za zadanie zwiększyć kontrolę ruchu w wielu kierunkach. Zawiasy są zbudowane z najnowocześniejszych materiałów. Zależnie od konstrukcji zawiasu, mogą one posiadać liny z polimerów albo przekładnie z lekkich i wytrzymałych materiałów.

Ortozy z „najwyższej półki” posiadają znacznie lepsze wkładki, których zadaniem jest najlepiej przylegać do skóry. Takie wkładki zazwyczaj są antybakteryjne, znacznie lepiej przepuszczają powietrze, ale też utrzymują stałą temperaturę wokół uszkodzonego stawu.

Stabilizatory mają za zadanie nie tylko wspomagać i usztywniać chory staw, ale także chronić go przed oddziaływaniem z zewnątrz, aby nie pogorszyć urazu.

Tańsze ortozy są zbudowane z bardziej popularnych i powszechnych materiałów takich, jak: aluminium, stal i sztuczne tkaniny (Rysunek 1). Szkielet wykonany z metalu jest główną konstrukcją ortozy, odpowiedzialną za usztywnienie, a elementy z tkanin mają za zadanie poprawiać wygodę użytkownika oraz izolować termicznie. Takie rozwiązania znacznie zmniejszają ceny ortez z kilku tysięcy do nawet paruset złotych. Niestety, z ceną ściśle powiązany jest komfort użytkownika, wytrzymałość i precyzja wykonania ortozy.



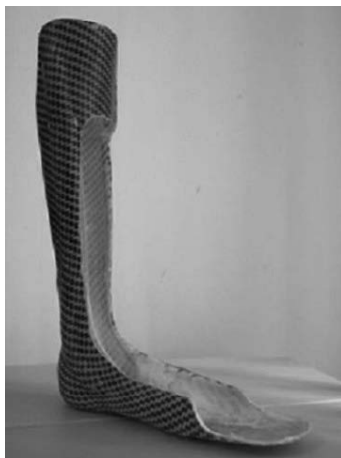
Rysunek 1. Orteza na staw kolanowy wykonana z włókna węglowego [3]

Figure 1. Knee brace made of carbon fiber [3]

3. METODY WYTWARZANIA ORTEZ

Współcześnie ortezy można wytwarzać na wiele różnych sposobów. Wśród nich wyróżnić warto, m.in. frezowanie CNC, druk 3D oraz odlewanie z przygotowanych wcześniej form [4,5].

Do wyprodukowania ortez z włókna węglowego konieczne jest opracowanie modelu 3D. Następnie tworzy się formę i dopiero wtedy taką formę wypełnia się włóknem węglowym z żywicą, która kolejno poddawana jest obróbce termicznej. Następnym etapem jest wykańczanie elementu i lakierowanie jego powierzchni (Rysunek 2).



Rysunek 2. Orteza z włókna węglowego [5]
Figure 2. Orthose of carbon fiber elements [5]

Innym sposobem wytwarzania ortez jest druk 3D (Rysunek 3) [6]. Technika ta pozwala produkować bardzo skomplikowane struktury. Zwiększa to znacznie wytrzymałość przy zachowaniu tej samej masy. Druk 3D, w dzisiejszych czasach, pozwala nie tylko na drukowanie z tworzyw sztucznych, ale także z metali.



Rysunek 3. Orteza wykonana metodą druku 3D [7]
Figure 3. Orthosis made by 3D printing [7]

Kolejną metodą wytwarzania ortez jest frezowanie CNC. Jest to bardziej kosztowny sposób produkcji, ale pozwala też na dużo większą swobodę kształtowania projektu. Obrabiarki CNC, są bardzo dokładne i pozwalają na obróbkę w wielu płaszczyznach, co znacząco poprawia jakość, kształt i teksturę ortezy. Kolejną zaletą jest bardzo dokładna powtarzalność elementów. Natomiast największym minusem metody jest duża ilość odpadów w postaci metalowych wiórów, ponieważ każdy element jest wykonywany z pełnego bloku albo ze wstępnego odlewu.

4. PODSUMOWANIE

Ortezy mogą być stosowane przy wielu kontuzjach i pozwalają na znacznie większy komfort użytkowania w porównaniu do innych form stabilizatorów. Są przy tym jednak często droższe, nawet jeśli są wykonane z niskiej klasy materiałów.

Rozwój technologii wytwarzania ortez z wykorzystaniem druku 3D może spowodować pojawienie się na rynku wielu wysokiej jakości usztywniaczy w przystępnych cenach. Należy pamiętać, że wysokiej klasy ortezy ruchome są dla wielu osób zbyt drogie. Pacjenci są zatem zmuszeni, by używać tańszych odpowiedników, które mogą ograniczać ruch oraz wydłużać proces leczenia.

LITERATURA

1. P. Mayer, J.W. Kaczmar, Właściwości i zastosowania włókien węglowych i szklanych, *Tworzywa Sztuczne i Chemia* 6 (2008) 52-56.
2. R. Dindorf, Rozwój zaopatrzenia ortopedycznego z elementami płynowymi, *Pomiary Automatyka Robotyka* 6 (2004) 4-9.
3. W. Hanger, Stabilizatory stawu kolanowego – badania nad efektywnością ich stosowania po leczeniu rekonstrukcyjnym przedniego więzadła krzyżowego, *Ortopedia, Traumatologia, Rehabilitacja* 6/8 (2006) 699-703.
4. K. Jochymczyk-Woźniak, I. Chuchnowska, W. Wolański, R. Michnik, M. Śmiech, R. Czernia, M. Gzik, Badania Wspomagające Przygotowanie spersonalizowanych ortez typu AFO/DAFO, *Modelowanie Inżynierskie* 25/56 (2015) 40-47.
5. G. Bogusławski, J. Gralewski, R. Grądzki, Modelowanie ortezy kończyny dolnej, *Aktualne Problemy Biomechaniki* 7 (2013) 23-26.
6. J. Gralewski, G. Bogusławski, Projektowanie ortezy stawu skokowego, XIII Konferencja Naukowa im. prof. Dagmary Tejszerskiej: Majówka Młodych Biomechaników, Ustroń, 20-22.05.2016, 39-40.
7. L. Tomala, Polscy inżynierowie szykują tanie ortezy i protezy z druku 3D, <https://www.bankier.pl/wiadomosc/Polscy-inzynierowie-szykuja-tanie-ortezy-i-protezy-z-druku-3D-8378264.html>, 2023.

Praca powstała w wyniku realizacji projektu Project Based Learning (PBL) pt. Opracowanie projektów i wydruk w technologii 3D modeli ortez dla sportowców z urazami kończyn.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Characterization and mechanical behavior of E2594 super duplex stainless steel weld metal

M. Sözeri^a, U. Özdemir^b, T. Fındık^b

^a Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Metallurgical and Materials Engineering
email: sozerimustafa@gmail.com

^b Gazi University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering

Abstract: The microstructural and mechanical properties of E2594 super duplex stainless steel weld metal were investigated in this study. The welding method applied in this study is shielded metal arc welding (SMAW). The mechanical properties of the weld were evaluated by hardness, tensile, and impact tests together with microstructural characterization. Austenite and ferrite phases were found in balance in the weld zone microstructure. The microstructure and mechanical results showed that the tensile strength and yield strength of the welds were found appropriate and also approximate to bulk UNS S32750 grade super duplex stainless steel which is equivalent to E2594 filler metal chemical composition. The impact toughness results and lateral expansion calculations depicted that weld metal is ductile.

Keywords: Super duplex stainless steels, SMAW, characterization, mechanical properties.

1. INTRODUCTION

Super duplex stainless steel UNS S32750 is a high-performance material that is used in a variety of applications, including marine, oil and gas, petrochemical, pressure vessels, offshore, and chemical processing. It is known for its excellent corrosion resistance, strength, and toughness [1-3]. Super duplex stainless steel (SDSS) is a type of stainless steel that contains a high percentage of chromium and molybdenum. This gives it excellent corrosion resistance in a variety of environments [4-6]. Super duplex stainless steel is also strong and tough, making it ideal for applications where high strength and toughness are required [6,7]. The reason why SDSS is used in application areas is due to the combination of austenite and ferrite phase [8-9]. Scholars have conducted research to manage the ratio of the two phases in the weld metal and to prevent secondary phase formation. They investigated the control of microstructure development in the weld metal and its relationship to properties. The microstructure and properties of welded joints are greatly affected by thermal cycles that change during welding [10]. Undesirable secondary phase formations can often be seen in the

SDSS weld metal. These phases, besides carbides and nitrides, both chi (χ) and sigma (σ) are the most known phases [10-12]. Sigma phase transforms from the ferrite phase ; (σ) $\alpha \rightarrow \sigma + \gamma_2$, but it is not well-known exactly at what temperature this transformation takes place [7,10,13]. Researchers have reported the temperature range associated with this transformation, exposure to range of temperature 973 °K to 1273 °K [14-17].

To produce a weld metal with the desired properties, it is important to prevent the formation of unwanted phases. Undesirable phases can weaken the mechanical properties of the weld zone and prevents achieving the desired performance. It is important that the heat input to the weld seam is prolonged and not excessive to ensure approximately a 1:1 austenite-to-ferrite phase ratio [18-20]. Ideally, the heat input should be in the range of 0.5-2.0 kJ/mm for duplex stainless steels [18]. Intermetallic compounds precipitate in the temperature range of 600-1000 °C, although they vary within themselves [18]. In particular, the σ phase, which forms in a very short time at 850-900 °C, and the χ phase, which starts to form at 830 °C, are the most important characteristics of the material. mechanical and corrosive resistance [19]. As a result, it is important to form the weld seam with appropriate heat input to prevent the formation of undesirable phases and not to weaken the properties of the weld zone [21,22]. In this study, the mechanical properties of SDSS were investigated based on the heat input literature studies and the requirements of AWS A5.4 standard.

2. EXPERIMENTAL STUDIES

The base metal in this investigation is typically S355JR grade hot rolled low carbon structural steel. Tables 1 and 2 show the chemical compositions of the structural steel and filler metal used in this study, respectively. The extent of the influence of certain elements in duplex stainless steels is formulated by the pitting corrosion resistance equivalence (PRE_N) [23]. The most commonly used PRE_N formula is:

- $PRE_N = Cr + 3.3Mo + 16N$

Since the filler metal is also in the super duplex stainless steel norm, it is expected to meet a minimum PRE_N value of 40.

Table 1. The chemical composition of S355JR structural steel used in this study (weight-%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Fe
0.11	0.15	0.64	0.02	0.03	0.21	0.07	0.08	Rest

The filler metal used in the study is commercially available under the name ELOX B 2594, which has a basic coating character and meets the AWS 5.4 E2594-15 norm. All-weld-test assembly was prepared in accordance with AWS 5.4 standard with dimensions of 300 x 216 x 20 and a 20-degree groove with backing. A schematic illustration of the test coupon is shown in Figure 1.

Table 2. The chemical composition of filler materials used in this study (weight-%)

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	Fe	PRE_N
AWS A5.4 Req.	0.04 (max)	1.0 (max)	0.5-2.0	24-27	8-10.5	3.5-4.5	0.2-0.3	-	40 (min)
E 2594-15	0.04	0.25	1.61	25.15	8.39	4.06	0.21	Rest	41.9

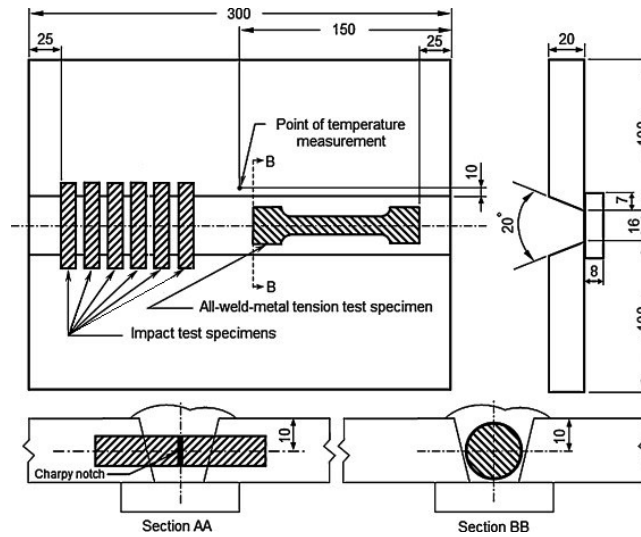


Figure 1. Schematically representation of prepared all-weld-test assembly [24]

A total of 11 weld layers were made, with the cap layer consisting of 5 passes and the other 10 layers consisting of 3 overlapping passes. The welding parameters kept constant throughout the welding process are given in Table 3. Post-weld heat treatment (PWHT) was not applied in this study since it usually has a deleterious effect on duplex stainless steels and is not recommended by AWS A 5.4.

Table 3. Welding parameters of the specimen

Parameters	
Dimensions (mm)	Ø 2.5 x 300
Current Type & Polarity	DC (+)
Current (A)	110
Voltage (V)	35
Heat Input (kJ/mm)	1.142
Preheat Temp. (°C)	No
Interpass Temp. (°C)	130

The test piece, which cooled to room temperature after welding, was cut in accordance with AWS standard, and tensile, notch impact, and microstructure specimens were prepared. Tensile tests were performed at room temperature on an Instron 3369 universal testing machine with a load capacity of 50 kN and a constant crosshead speed of 1 mm.min⁻¹, corresponding to a strain rate of 6.67x10⁻⁴ s⁻¹. Charpy V-notch impact test was performed with three specimens each at +20 °C, -20 °C and -40 °C on Instron-Wolpert PW30 test machine with 300 J capacity. The lateral expansion value, which is a measure of the ductility of the material, was calculated from the post-test cross-sectional areas of the V-notch impact specimens. For metallographic examinations, the specimen was subjected to mechanical grinding followed by polishing up to 1 µm diamond suspension and finally etched with (300 ml HCl + 100 ml HNO₃) aqua regia solution. Leica DMI 5000M optical microscope was used to examine microstructures. Hardness tests were performed on the MICROBUL 1000-DN universal hardness tester with the Brinell HB method.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The etched macrograph image of the cross-sectional area sample taken from the test piece is given in Figure 2. As a result of the visual inspection, it was seen that all passes of the weld metal solidified as overlap without completely melting the one below; porosity, undercut and crack signs were not observed.

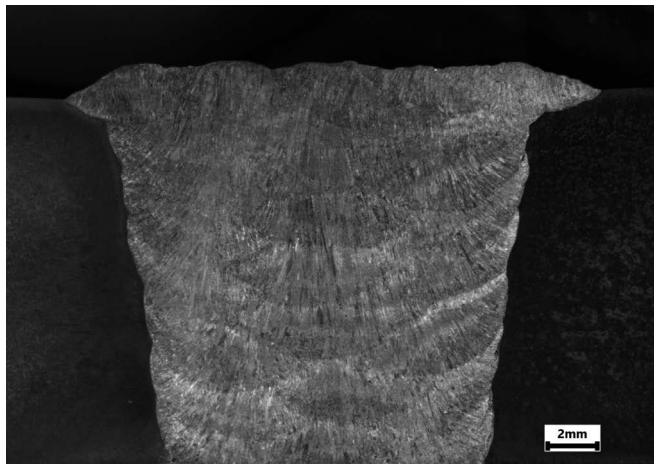


Figure 2. Macrograph image of cross-sectioned weld metal

3.1. Microstructure

It appears that during the solidification process in the welded region, the austenite phase undergoes a morphological transformation. In Figure 3, it is depicted as microstructure of the weld metal consist of grain boundary austenite (GBA), widmanstätten austenite (WA) and intragranular austenite (IGA) in a ferrite matrix. A continuous network of austenite known as grain boundary allotriomorphs or GBA. This particular phase of austenite originates directly from the ferrite matrix through nucleation. It seems that in the welded region, the GBA phase, which forms as a continuous network of austenite along the grain boundaries, undergoes further transformation. Specifically, WA grains develop from this GBA phase. WA is a specific microstructural feature characterized by elongated grains of austenite that form within a material. These grains typically have a distinctive pattern, resembling plates or needles, and are formed due to the diffusion of atoms during slow cooling or annealing processes. The GBA phase, enriched in nickel compared to the surrounding ferrite matrix, acts as a precursor for the formation of WA grains. The higher nickel content in the GBA phase may influence the growth and morphology of the austenite grains, leading to the formation of elongated WA grains. The IGA, shown clearly in Figure 3d, is formed as a result of the effect of the cooling rate. It is also prone to pitting corrosion due to lower alloying elements.

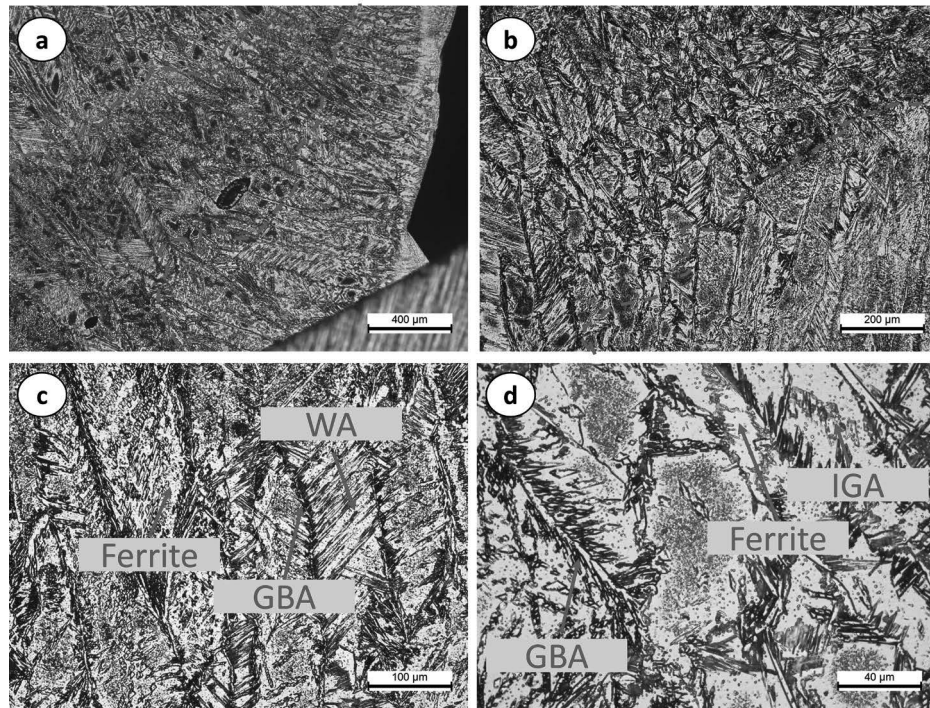


Figure 3. Microstructure images of the E2594 weld metal; a) 5X b) 10X c) 20X d) 50X magnifications.

3.2. Mechanical Properties

The mechanical test results of the welded specimen are given in Table 4 in comparison with the requirements of AWS A 5.4 standard. The weld metal exhibited tensile strength and elongation values above the standard's requirements and despite the dramatic decrease in testing temperature, it demonstrated almost similar impact toughness results. Ductile-to-brittle transition (DBT), also known as the transition from ductile fracture with large plastic deformation to brittle fracture with limited plasticity, is a characteristic of embrittlement. As the temperature drops, metallic material fracture usually shifts from ductile to brittle [25]. The change can be seen in the energy absorption versus temperature curve obtained from the Charpy V-notched impact test. A material with a greater DBT temperature is more prone to unstable brittle fracture than a material with a lower DBT temperature [26,27]. Since nickel, which is highly present in the chemical composition of the weld metal, allows the movement of dislocations at low temperatures due to its FCC lattice structure, the DBT is smooth rather than drastic.

Table 4. Mechanical test results of the specimen and standard requirements

	Yield Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Total Elongation (%)	Avg. Charpy V-Notch Impact Strength (J)			Avg. Lateral Expansion (mm)		
				+20 °C	-20 °C	-40 °C	+20 °C	-20 °C	-40 °C
AWS 5.4 Req.	-	760 (min)	15 (min)	-	-	-	-	-	-
E2594-15	733	888	18	40	33	30	0.48	0.42	0.33

In the hardness tests, the average hardness of the base metal was found to be 160 HB, and 309 HB for the weld metal. Keeping the interpass temperature low prevented heat treatment of the base metal and preserved the hardness values before the welding process. Considering that the as-cast hardness of UNS S32750 super duplex stainless steel is max. 310 HB, it can be said that the low interpass temperature and heat input prevent the formation of harmful phases (σ , χ , Cr₂N) that may arise due to high temperatures and slow cooling in the multi-pass weld metal and the heat effect from causing mechanical degradation [23]. These harmful phases were not found in microstructure examinations either.

4. CONCLUSIONS

The purpose of this project was to characterize the microstructure and mechanical properties of weld metal made of E2594 super duplex stainless steel. Welding of super and hyper duplex stainless steels carries the risks of formation of harmful phases and intermetallic compounds, alteration of ferrite/austenite balance, and indirectly, the mechanical properties of the weld metal may not meet the corresponding duplex material.

Microstructure images show that the ferrite-austenite ratio in the weld metal is balanced, no harmful phases and precipitates such as σ , χ , Cr₂N are formed, no carbides are observed due to the low carbon content and the microstructure mainly consists of GBA, IGA, WA and ferrite matrix. The results of the mechanical tests were in line with the mechanical properties of bulk UNS S32750 material. V-notch impact tests at different temperatures revealed that the weld metal has a smooth ductile-to-brittle-transition (DBT).

BIBLIOGRAPHY

1. A.R. Kannan, N.S. Shanmugam, V. Rajkumar, M. Vishnukumar, Insight into the microstructural features and corrosion properties of wire arc additive manufactured super duplex stainless steel (ER2594), *Materials Letters* 270 (2020) 127680.
2. J.C. Lippold, D.J. Kotecki, *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel*, John Wiley & Sons, USA (2014).
3. Z. Liu, C. Fan, C. Yang, Z. Ming, Z. Hua, S. Lin, L. Wang, Investigation of the weldability of dissimilar joint between high nitrogen steel and low alloy steel by comparing filler metals, *Materials Today Communications* 35 (2023) 105551.
4. J.S. Park, D.M. Cho, S.G. Hong, S.J. Kim, Effects of reducing atmospheres of bright annealing on the surface and corrosion characteristics of super duplex stainless steel tubes, *Surface and Coatings Technology* 423 (2021) 127621.
5. E.B. Haugan, M. Næss, C.T. Rodriguez, R. Johnsen, M. Iannuzzi, Effect of Tungsten on the Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Type 25Cr Super Duplex Stainless Steels, *Corrosion The Journal of Science and Engineering* 73(1) (2017) 53-67.
6. V.A. Hosseini, et. al. Fe and Cr phase separation in super and hyper duplex stainless steel plates and welds after very short aging times, *Materials & Design* 210 (2021) 110055.
7. W. Min, L. Guoping, W. Lixin, H. Lifeng, W. Yinghui, Temperature dependence of precipitation mechanism of intragranular χ phase in super duplex stainless steel S32750, *Materials Letters* 287 (2021) 129304.

8. H. Liu, et. al. Microstructural Characterization of Welded Joint in Duplex Stainless Steel by Laser Continuous Heat Treatment, *Journal of Iron and Steel Research, International* 21(7) (2014) 710-714.
9. F. Khoshnaw, et. al. Microstructural and thermoanalytical characterization of super duplex stainless steel - UNS S32760-F55, *Materials Today Communications* 28 (2021).
10. W. Qi, G. Guochao, J. Chuanbao, L. Kan, W. Chuansong, Investigation of microstructure evolution, mechanical and corrosion properties of SAF 2507 super duplex stainless steel joints by keyhole plasma arc welding, *Journal of Materials Research and Technology* 22 (2023) 355-374.
11. H. Chih-Chun, W. Weite, Overview of Intermetallic Sigma (σ) Phase Precipitation in Stainless Steels, *International Scholarly Research Network* 732471 (2012) 16.
12. V.A. Hosseini, L. Karlsson, S. Wessman, N. Fuertes, Effect of Sigma Phase Morphology on the Degradation of Properties in a Super Duplex Stainless Steel, *Materials* 11(6) (2018) 933.
13. Y. Zhao, Y.Wang, S. Tang, W. Zhang, Z. Liu, Edge cracking prevention in 2507 super duplex stainless steel by twin-roll strip casting and its microstructure and properties, *Journal of Materials Processing Technology* 266 (2019) 246-254.
14. B. Raha, Study on deleterious phases precipitation on super duplex stainless steel grade 6A-ASTM A890, *Materials Today Proceedings* 5.2 (2018) 7836-7844.
15. N. Llorca-Isern, H. López-Luque, I. López-Jiménez, M. Victoria Biezma, Identification of sigma and chi phases in duplex stainless steels, *Materials Characterization* 112 (2016) 20-29.
16. R. Magnabosco, Kinetics of sigma phase formation in a duplex stainless steel, *Materials Research* 12 (2009) 321-327.
17. M. Yousefieh, M. Shamanian, and A. Saatchi, Optimization of the pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW) parameters for corrosion resistance of super duplex stainless steel (UNS S32760) welds using the Taguchi method, *Journal of Alloys and Compounds* 509(3) (2011) 782-788.
18. S.S.M. Tavares, J.M. Pardal, L.D. Lima, I.N. Bastos, A.M. Nascimento, J.A. de Souza, Characterization of microstructure, chemical composition, corrosion resistance and toughness of a multipass weld joint of superduplex stainless steel UNS S32750, *Materials Characterization* 58 (2007) 610-616.
19. V. Muthupandi, P. Bala Srinivasan, S.K. Seshadri, S. Sundaresan, Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steels, *Mater Sci Eng A Struct Mater Prop Microstruct Process* 358 (2003) 9-16.
20. Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steels, *International Molybdenum Association*, London, 1999.
21. S. B. Luo, et al. "Specific heat capacity of liquid and solid Ni83. 5Ti16. 5 eutectic alloy, *Chemical Physics Letters* 679 (2017) 172-175.
22. M. A. Domínguez-Aguilar and R. C. Newman, Detection of deleterious phases in duplex stainless steel by weak galvanostatic polarization in alkaline solution, *Corrosion Science* 48.9 (2006): 2560-2576.
23. U. Özdemir, T. Fındık, C. Yılmaz, Hiper Dupleks Paslanmaz Çelikler ve Kaynaklanabilirliği, *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology* 11 (1) (2023) 284-299.

24. T. Fındık, U. Özdemir, Optimizing Si-Content on E6013 Weld Metal to Improve Impact Toughness for Naval Industry, International Conference on New Approaches in Engineering (ICNAE'22), Konya, 2022.
25. M. Lin, H. Yu, Y. Ding, V. Olden, A. Alvaro, J. He, Z. Zhang, Simulation of ductile-to-brittle transition combining complete Gurson model and CZM with application to hydrogen embrittlement, *Engineering Fracture Mechanics* 268 (2022) 108511.
26. Y.J. Chao, J.D. Ward, R.G. Sands, Charpy impact energy, fracture toughness and ductile–brittle transition temperature of dual-phase 590 Steel, *Mater. Des.*, 28 (2) (2007) 551-557.
27. T. Hanamura, F. Yin, K. Nagai, Ductile-brittle transition temperature of ultrafine ferrite/cementite microstructure in a low carbon steel controlled by effective grain size, *ISIJ Int.*, 44 (3) (2004) 610-617.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Vplyv tlakových zvyškových napätí na tribologické vlastnosti nízko legovanej ocele

P. Špuro^a, M. Vicen^a, F. Nový^a, M. Bonek^b

^aŽilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra materiálového inžinierstva, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

email: spuro@stud.uniza.sk

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, ul. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice, Poland

Abstract: Cieľom práce bolo overiť vplyv tlakových zvyškových napätí na tribologické vlastnosti ušľachtilej, nízko legovanej ocele. Práca zahŕňala úpravu povrchu experimentálneho materiálu mechanickým spevnením, tryskaním. Experiment bol zameraný na stanovenie a porovnanie tribologických vlastností dvoch stavov materiálov (základný materiál a tryskaný materiál).

Keywords: ocel' C55, shot peening, tribologia, koeficient trenia, zvyškové napätia

1. ÚVOD

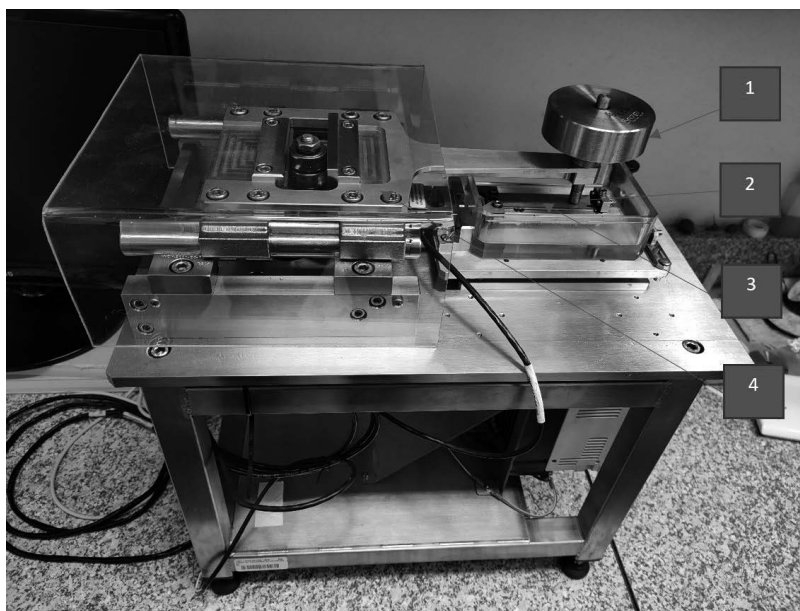
Najefektívnejší vplyv na zvýšenie tlakových zvyškových napätí má metóda shot peening, čo v preklade znamená tryskanie. Metóda shot peening sa rozdeľuje na vysoko energetický shot peening – SSP a konvenčný shot peening - CSP. Tieto metódy sa líšia rôznymi parametrami, ako sú napríklad pokrytie alebo intenzita tryskania. Taktiež veľký účinok na výsledný efekt má aj druh tryskacieho média.

Príspevok sa zaoberá určovaním tribologických charakteristík, dvoch rôznych stavov materiálov. Určovanie tribologických charakteristík je aj dnes predmetom výskumu. Tento sa zaoberá hlavne tým, ako sa dá zvýšiť, prípadne znížiť koeficient trenia a znížiť opotrebovanie materiálu.

2. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Experimentálne zariadenie, na ktorom sa vykonávajú skúšky trenia sa volá lineárny tribometer. Toto zariadenie vykonáva lineárny vratný priamočiary pohyb po vzorke s určitou normálovou silou. Na zisťovanie trenia bola použitá SiC guľôčka. Guľôčka sa neodvaľuje po vzorke, ale vytvára šmykové trenie. Lineárny tribometer, ktorý sa nachádza v laboratóriu Žilinskej univerzity v Žiline je dokumentovaný na obr. 1. Tribologický systém sa skladá z nasledovných častí:

- Závažie.
- SiC guľôčka, ktorá vykonáva trenie na vzorke.
- Skúšobná vzorka.
- Transformátor pohybu- slúži na zmenu rotačného pohybu na lineárny vratný pohyb.



Obr. 1. Lineárny tribometer

Figure 1. Linear tribometer

Ako experimentálny materiál bola použitá uhlíková oceľ C55. Uvedenú oceľ je možné použiť na výrobu hriadeľov, ozubených kolies, vretien, čapov lamiel, spojok a iných konštrukčných súčastí.

Pred vlastným hodnotením tribologických vlastností bolo overené chemické zloženie experimentálneho materiálu, ktoré sa porovnávalo s chemickým zložením, ktoré predpisuje norma. Chemické zloženie bolo stanovené na zariadení SPECTROMAXx. Namerané výsledky boli v súlade s tým, čo predpisuje norma (tab. 1). Následne sa vykonala skúška tvrdosti podľa Rockwella (HRC). Zistená hodnota tvrdosti sa rovnako zhodovala s tou, ktorú predpisuje norma (tab. 1).

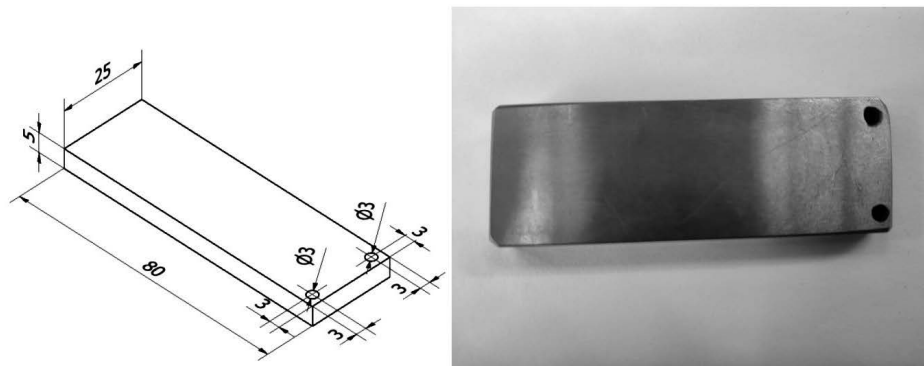
Tabuľka 1. Porovnanie chemického zloženia a tvrdosti podľa Rockwella

Table 1. Comparison of chemical composition and Rockwell hardness

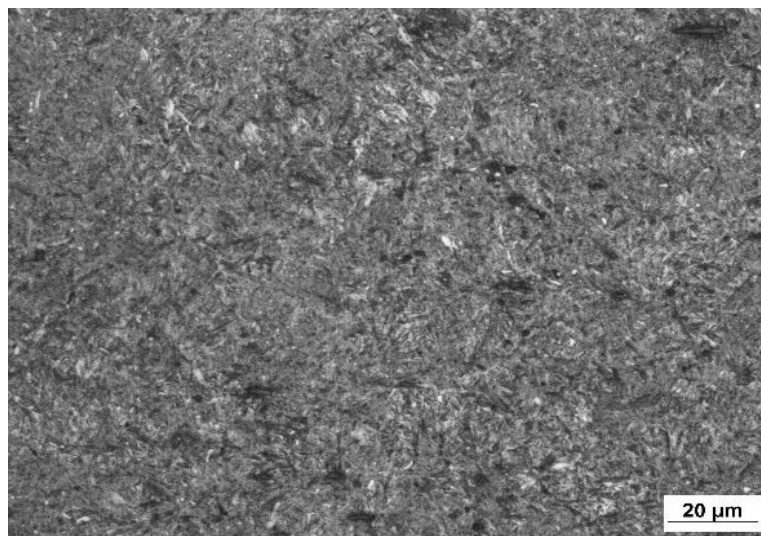
Prvok	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe	HRC
Zistené	0,597	0,398	0,860	0,037	0,0124	0,345	0,033	0,193	zvyšok	45
Predpísané normou	0,52-0,60	max. 0,40	0,60-0,90	max. 0,045	max. 0,045	max. 0,40	max. 0,10	max. 0,40	zvyšok	45

Na experiment boli použité skúšobné vzorky vyrobené z uhlíkovej ocele C55, ktoré sa trieskovým obrábaním upravili na požadované miery (Obr. 2). Skúšobné vzorky boli tepelne spracované nasledovným postupom: austenitizácia pri teplote $850\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 30 minút. Po austenitizácii sa vzorky zakalili do oleja Durixol V70 s teplotou $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nasledovalo

vysokoteplotné popúšťanie, ktoré trvalo 120 minút a vykonalo sa pri teplote $450\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. Vzorka sa následne ochladila na vzduchu. Týmto tepelným spracovaním sa dosiahla tvrdá štruktúra, ktorou je vysoko popustený martenzit a s určitým podielom zvyškového austenitu (obr. 3). Mikroštruktúra bola pozorovaná a dokumentovaná na mikroskope Axio observer od spoločnosti Zeiss.



Obr. 2. Tvar a rozmery skúšobnej vzorky pred tryskaním
Figure 2. Shape and dimensions of the test specimen before shot peening



Obr. 3. Mikroštruktúra ocele C55, lept. 0,5% Nital
Figure 3. Microstructure of C55 steel, etch. 0.5% Nital

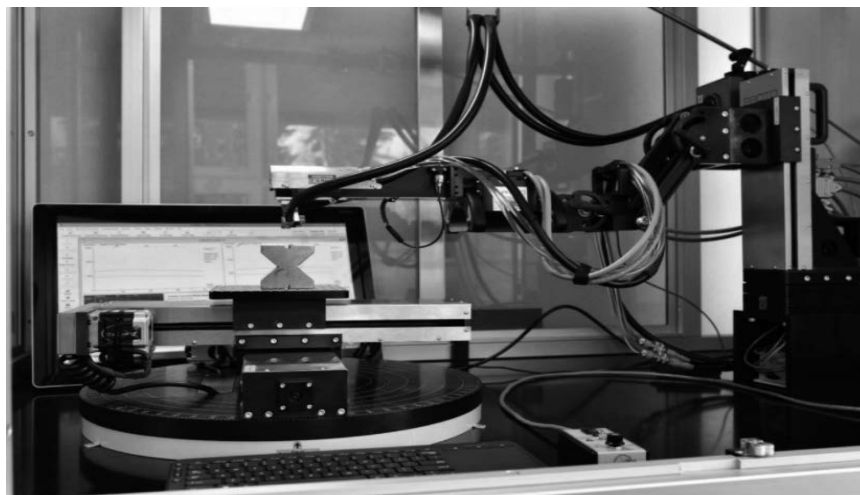
Pripravených bolo 6 vzoriek. Tri pre základný materiál a tri pre tryskaný materiál. Tryskanie bolo vykonávané v spolupráci s Politecnico di Milano (Taliansko) - Peen Service, na tryskacom zariadení, ktoré je zobrazené na Obr. 4. Tryskanie bolo vykonané pri 100 % pokrytí povrchu a s intenzitou 12 A. Ako tryskacie médium boli použité guľôčky s priemerom 0,42 mm, ktoré dopadali na povrch materiálu pod uhlom 90 stupňov. Skúšobná vzorka má tvar kvádra s dĺžkou 80 mm, šírkou 25 mm a hrúbkou 5 mm.



Obr. 2. Zariadenie pre tryskanie materiálov

Figure 4. Equipment for shot peening materials

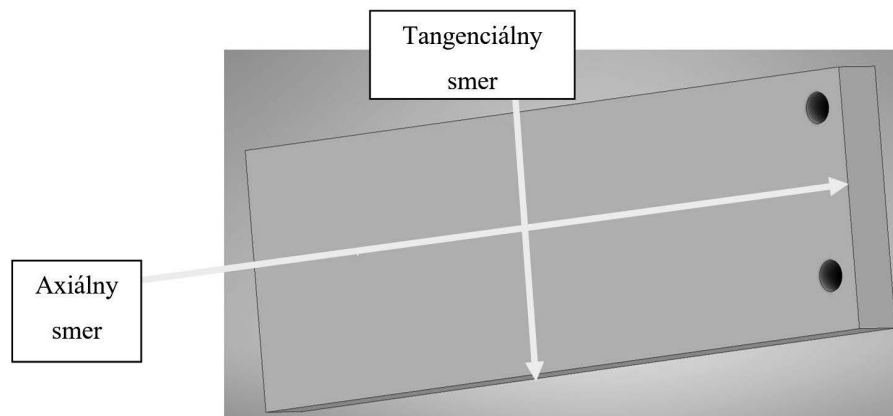
Meranie zvyškových napätí bolo realizované na zariadení ProtoiXRD, ktoré je zobrazené na obr. 5. Zariadenie sa nachádza vo výskumnom centre Žilinskej univerzity v Žiline. Toto zariadenie používa metódu röntgenovej difrakcie. Je možné ju zaradiť medzi nedeštruktívne metódy. To je veľká výhoda, pretože vzorka sa pred tribologickými testami nesmie poškodiť. Zvyškové napätia sa merali v axiálnom aj tangenciálnom smere (obr. 6).



Obr. 5 Zariadenie na meranie zvyškových napätí - ProtoiXRD [1]

Figure 5. Equipment for measuring residual stresses – ProtoiXRD

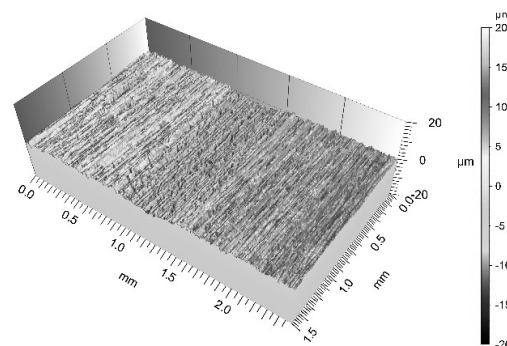
Merania koeficientu trenia boli realizované na lineárnom tribometri. Koeficient trenia bol stanovený v atmosférických podmienkach bez prítomnosti maziva metódou tzv. Ball-on-Plate. Ako protikus bola použitá guľôčka z karbidu kremíka, ktorá vykonávala lineárny vratný priamočiary pohyb s rýchlosťou 0,1 m/s. Dĺžka trvania jedného testu bola 42 minút. Počas testu bola guľôčka z karbidu kremíka zaťažovaná normálovou silou $F_N = 2\text{ N}$, $F_N = 5\text{ N}$ a $F_N = 10\text{ N}$.



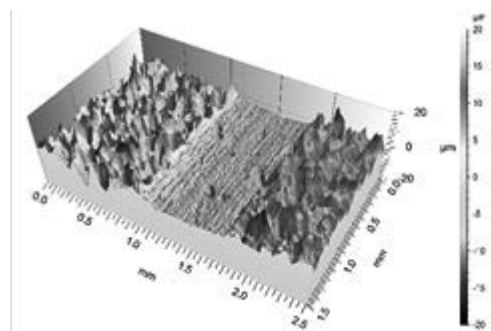
Obr. 3 Schematické znázornenie merania zvyškových napätí na oceli C55
 Figure 6. Schematic representation of residual stress measurement on C55 steel

3. VÝSLEDKY

Na obrázku 7 a 8 je dokumentovaná topografia povrchu pred a po tribologických testoch.



Obr. 7. Topografia ocele C55 (základný materiál)
 Figure 7. C55 steel topography (base material)



Obr. 8. Topografia po tribologických testoch
 Figure 8. Topography after tribological tests

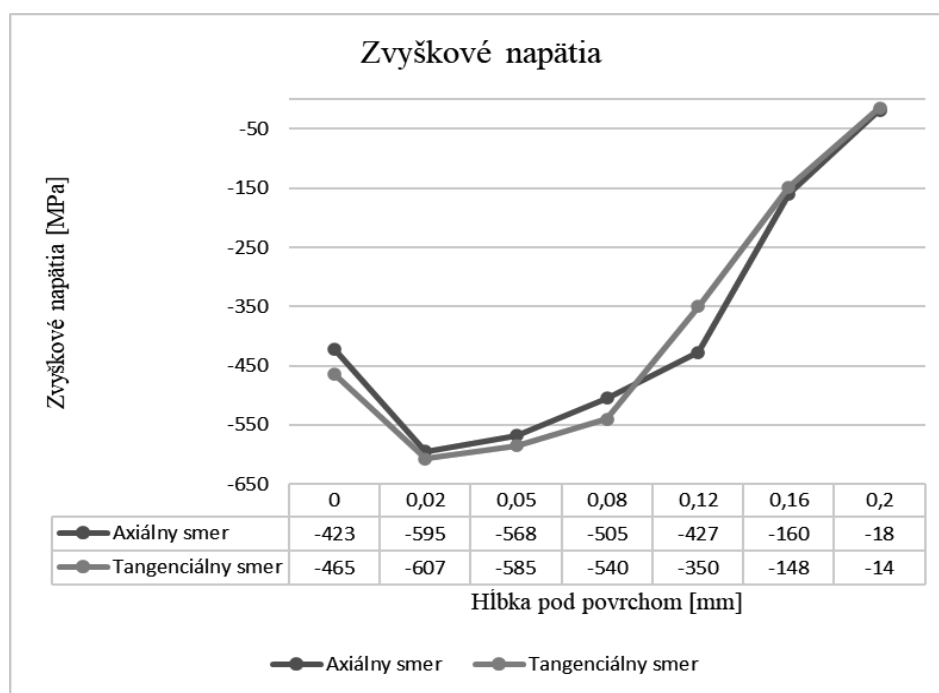
Zvyškové napätia v axiálnom aj tangenciálnom smere namerané na zariadení protoiXRD boli dokumentované v tab. 2 a tab. 3.

Tab. 2. Axiálne zvyškové napätia ocele C55 po tryskaní
Table 2. Axial residual stresses of C55 steel after blasting

	1	2	3	4	5	6	7
Hĺbka pod povrchom [mm]	0	0,02	0,05	0,08	0,12	0,16	0,2
zvyškové napätie [MPa]	-423	-595	-568	-505	-427	-160	-18

Tab. 3. Zvyškové napätia v tangenciálnom smere
Table 3. Residual stresses in the tangential direction

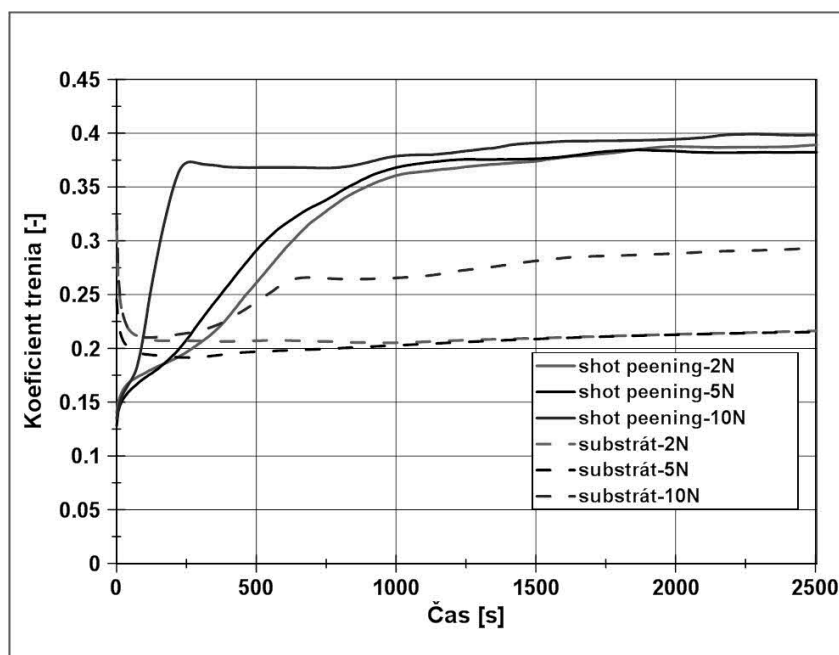
	1	2	3	4	5	6	7
Hĺbka pod povrchom [mm]	0	0,02	0,05	0,08	0,12	0,16	0,2
zvyškové napätie [MPa]	-465	-607	-585	-540	-350	-148	-14



Obr. 9. Priebeh zvyškových napätí po tryskaní v oceli C55
Figure 9. The course of residual stresses after blasting in C55 steel

Obr. 9 graficky znázorňuje, že maximálna hodnota tlakových zvyškových napätí v axiálnom a tangenciálnom smere je v hĺbke 0,02 mm. Maximálne hodnoty zvyškových napätí boli v axiálnom smere -595 MPa a v tangenciálnom -607 MPa. V hĺbke 0,2 mm bola najnižšia hodnota nameraná -18 MPa v axiálnom a hodnota -14 MPa v tangenciálnom. Krivka so zvyškovými napätiami v axiálnom smere je takmer totžná s krivkou so zvyškovými napätiami v tangenciálnom smere.

Pri vratnom lineárnom pohybe tribometra vznikalo trenie medzi guľôčkou a skúšobnou vzorkou pri rôznej záťaži. Toto trenie bolo zaznamenané systémom NIS Elements, ktorý zmeral koeficient trenia. Následne pomocou programu NI Diadem boli vyhodnotené výsledky koeficientu trenia, ktoré sú graficky zobrazené na obr. 10.



Obr. 10. Porovnanie koeficientu trenia tryskanej a netryskanej vzorky pri všetkých zaťaženiach
Figure 10. Comparison of friction coefficient of blasted and unblasted specimen at all loads

Najväčšia diferencia v koeficiente trenia medzi tryskanou a netryskanou vzorkou nastala v prípade zaťaženia 5 N. Najmenší rozdiel je pri zaťažení 10 N. Je možné pozorovať, že so stúpajúcim zaťažením na tryskanú vzorku sa koeficient trenia zvýši za kratší čas, čiže má strmší charakter. Naopak pri netryskanej vzorke na začiatku, so stupňujúcim sa zaťažením, má vzorka menší prepád v koeficiente trenia. Výkyvy v netryskanej vzorke mohli byť spôsobené nedokonalne rovnomerne hladkým povrchom. Je dôležité poznamenať, že v prípade, ak by sa test vykonával za prítomnosti mazania, koeficient trenia by pravdepodobne klesol v porovnaní s brúsenou vzorkou. Je to spôsobené tým, že jamky vytvorené po shot peeningu slúžia ako zachytávače maziva a napomáhajú kontaktnému mazaniu a taktiež zvýšením mikrotvrdosti v povrchovej vrstve [2].

4. ZÁVER

Práca sa zaoberá posudzovaním účinku tryskania na koeficient trenia s nadväzujúcou diskusiou vplyvu tryskania na zvyškové tlakové napätia. Posudzovala sa stredneuhlíková oceľ C55. Realizáciou experimentov boli získané nasledovné poznatky:

- Po tepelnom spracovaní sa v oceli C55 dosiahla štruktúra, ktorá bola tvorená jemným popusteným martenzitom a zvyškovým austenitom.

- Chemické zloženie, ktoré predpisuje norma sa výrazne nelíši od zisteného chemického zloženia.
- Meraním tvrdosti podľa Rockwella sa zistila tvrdosť 45 HRC.
- Zvyškové napätia boli takmer totožné v axiálnom aj tangenciálnom smere.
- Maximálne zvyškové napätia boli namerané v hĺbke 0,02 mm pod povrchom. (v axiálnom - 595 MPa aj tangenciálnom smere -607 MPa).
- Minimálne zvyškové napätia boli namerané v hĺbke 0,2 mm (v axiálnom -18 MPa a tangenciálnom -14 MPa).
- Koeficient trenia pri zaťažení 10 N stúpol v tryskanej vzorke pri teste bez použitia maziva 1,37 krát.
- Koeficient trenia pri zaťažení 5 N stúpol v tryskanej vzorke pri teste bez použitia maziva 1,8 krát.
- Koeficient trenia pri zaťažení 2 N stúpol v tryskanej vzorke pri teste bez použitia maziva 1,69 krát.

POĎAKOVANIE

Príspevok vznikol v rámci riešenia spoločného slovensko-poľského projektu TalentDetector 2023 ako výsledok spolupráce medzi Politechnikou Slaskou (Poľsko) a Žilinskou univerzitou v Žiline a projektov KEGA č. 004ŽU-4/2023 a KEGA č.009ŽU-4/2023.

LITERATÚRA

1. <https://vyskumnecentrum.sk/>
2. BABIĆ, M. - MITROVIĆ, S. - ADAMOVIĆ, D. - DŽUNIC, D. - ŽIVIĆ, F. The Effect of Shot Peening on Tribological Behavior of Alloyed. [Online] [Dátum: 12. Marec 2022.] <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2011074.pdf>.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Energia elektryczna ze Słońca

W. Stolarczyk^a, Z. Zakrzewska^a, J. Popis^b, B. Hrapkowicz^b, A. Drygala^b

^a uczennica Akademickiego Liceum Ogólnokształcącego Politechniki Śląskiej w Gliwicach

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, ul. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice
email: aleksandra.drygala@polsl.pl

Streszczenie: Słońce jest głównym źródłem energii docierającej do Ziemi. Urządzeniem umożliwiającym bezpośrednią konwersję energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną jest ogniwo fotowoltaiczne. W ramach niniejszej pracy określono optoelektryczne własności ogniw słonecznych wykonanych na bazie mono- i polikrystalicznego krzemu.

Abstract: The Sun is the major source of energy and is vital to life on Earth. The device that enables direct conversion of solar radiation into electrical energy is a solar cell. In this study, the opto-electrical properties of solar cells based on mono- and polycrystalline silicon were determined.

Słowa kluczowe: fotowoltaika, krzem monokrystaliczny, krzem polikrystaliczny, ogniwo fotowoltaiczne

1. WSTĘP

Przez wzgląd na stale pogarszającą się sytuację klimatyczną już od dłuższego czasu poszukuje się alternatyw dla nieodnawialnych źródeł energii. W ramach tych dążeń prowadzi się inwestycje i badania mające na celu pomoc w pozyskiwaniu energii z wody, biomasy, ruchu mas powietrza oraz z promieniowania docierającego do Ziemi ze Słońca. Energia słoneczna to zasób, który w perspektywie wielu kolejnych pokoleń jest praktycznie niewyczerpalny, co czyni go świetną alternatywą dla powszechnie stosowanych rozwiązań [1]. Nawet wiatr jako inne, z pozoru niezwiązane ze Słońcem odnawialne źródło energii swoje istnienie zawdzięcza ogrzewaniu się mieszaniny gazów na równiku, które następnie unoszą się w kierunku biegunów. Dzieje się tak, ponieważ wzrost temperatury prowadzi do wzrostu objętości mas powietrza w wyniku czego na równiku powstają obszary niskiego ciśnienia, do którego „zasysane” jest zimne powietrze [2]. Ilość energii dostarczanej przez Słońce do Ziemi jest na tyle duża, że w całości zagospodarowana mogłaby zaspokoić nasze obecne zapotrzebowanie na prąd [3].

Ogniwo fotowoltaiczne (*gr. phos* - światło i *volt* - jednostka siły elektromotorycznej) to urządzenie, w którym zachodzi konwersja energii pochodzącej z promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Działanie ogniw fotowoltaicznych opiera się na efekcie fotowoltaicznym odkrytym w 1839 roku podczas badania baterii elektrochemicznej przez A. E. Becquerela.

Zaobserwował on wzrost napięcia na elektrodzie baterii po oświetleniu jej światłem słonecznym. Pierwsze ogniwo słoneczne powstało w 1883 roku przy użyciu płytki ze złączem niemetal-metal zbudowanej z warstwy selenu i złotych drucików. Współcześnie do produkcji ogniw słonecznych wykorzystuje się materiały półprzewodnikowe, najczęściej krzem [1, 4].

1.1 KLASYFIKACJA OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH

Na przestrzeni ostatnich lat obserwuje się dynamiczny rozwój technologii ogniw słonecznych. Ze względu na rodzaj materiału półprzewodnikowego ogniwa fotowoltaiczne można podzielić na takie, które są wykonane z [5]:

- pierwiastków elementarnych np. krzem, rzadziej german,
- związków półprzewodnikowych grup III i V (np. GaAs, InP), II i VI (np. CdTe, CdS), I, III i VI (np. CuInSe₂ (CIS), CuInGaSe₂ (CIGS)).

Ogniwa słoneczne można również sklasyfikować pod kątem organizacji struktury materiału na [6]:

- monokrystaliczne,
- polikrystaliczne,
- amorficzne.

Urządzenia fotowoltaiczne wykonane z monokryształów uzyskują najwyższe sprawności. Im bardziej jednolita jest struktura krystaliczna ogniwa słonecznego, tym jest ono wydajniejsze. Z kolei polikrystaliczne i amorficzne materiały są tańsze i łatwiejsze w produkcji i mogą być osadzone na różnorodnych i tanich podłożach takich jak szkło, plastik czy metal, co zwiększa obszar ich aplikacji [5,6].

Za kolejne kryterium podziału można przyjąć grubość materiału półprzewodnikowego, przy czym minimalna jej wartość, umożliwiająca prawidłowe funkcjonowanie urządzenia, zależy od wartości współczynnika absorpcji [5,7] Wyróżnia się następujące ogniwa słoneczne [5]:

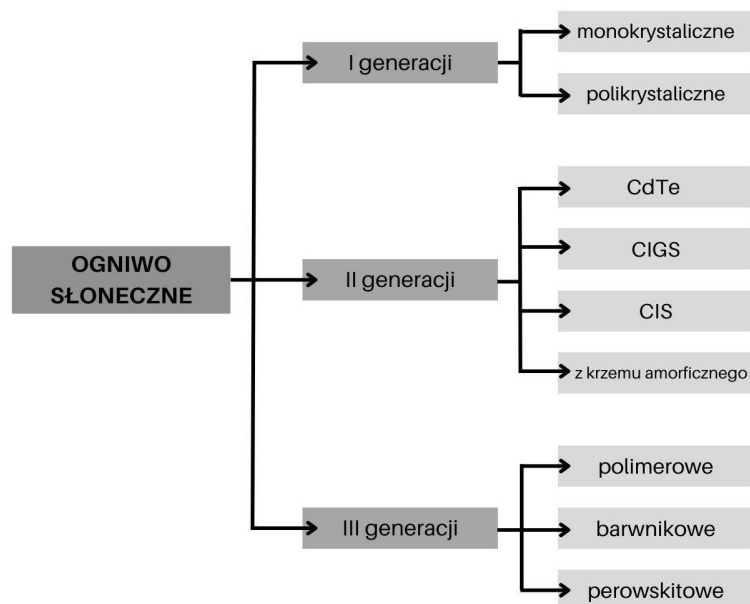
- grubowarstwowe (ok. 100-300 μm),
- cienkowarstwowe (< 100 μm).

Podział ze względu na zastosowany materiał nie jest jedynym sposobem segregacji ogniw słonecznych. Przyjęta jest także klasyfikacja technologii fotowoltaicznych dzieląca ogniwa fotowoltaiczne na trzy generacje w zależności od stopnia zaawansowania użytej technologii. (Rys. 1) [8-11].

W skład I generacji wchodzi głównie krzemowe ogniwa fotowoltaiczne zarówno mono- jak i polikrystaliczne. Krzem, ze względu na powszechne występowanie w skorupie ziemskiej jest stosunkowo tanim, nietoksycznym i wydajnym materiałem. Są to najbardziej popularne fotoogniwa na rynku - moduły z nich wykonane stanowią blisko 80% całkowitej ilości produkowanych urządzeń fotowoltaicznych. Sprawność tych ogniw wynosi do 26,8% [12], a żywotność ponad 25 lat (tyle wynosi gwarancja producentów paneli fotowoltaicznych) (Tab.1) [13].

Ogniwa II generacji także posiadają złącze p-n i działają na takiej samej zasadzie jak ogniwa I generacji. Do ich produkcji wykorzystuje się materiały takie jak CdTe, CIGS, CIS, a także krzem amorficzny. Charakteryzuje je niższa niż u ogniw fotowoltaicznych wcześniejszej generacji sprawność, a także niski koszt produkcji [4]. Najczęściej wykonywane są w technologii cienkowarstwowa, dzięki czemu możliwe jest ich wytwarzanie na podłożach elastycznych oraz obniżenie masy [14,15].

III generacja fotoogniw pozbawiona jest tradycyjnego złącza p-n. Do tej grupy zaliczane są nowe technologie bazujące na takich materiałach jak polimery, barwniki, perowskity, kropki kwantowe itp. [4,11]. Obecnie perowskitowe ogniwa fotowoltaiczne wykazują konkurencyjną sprawność w stosunku do urządzeń wykonanych na bazie krzemu krystalicznego [16].



Rys. 1. Generacje ogniw fotowoltaicznych [8,10]

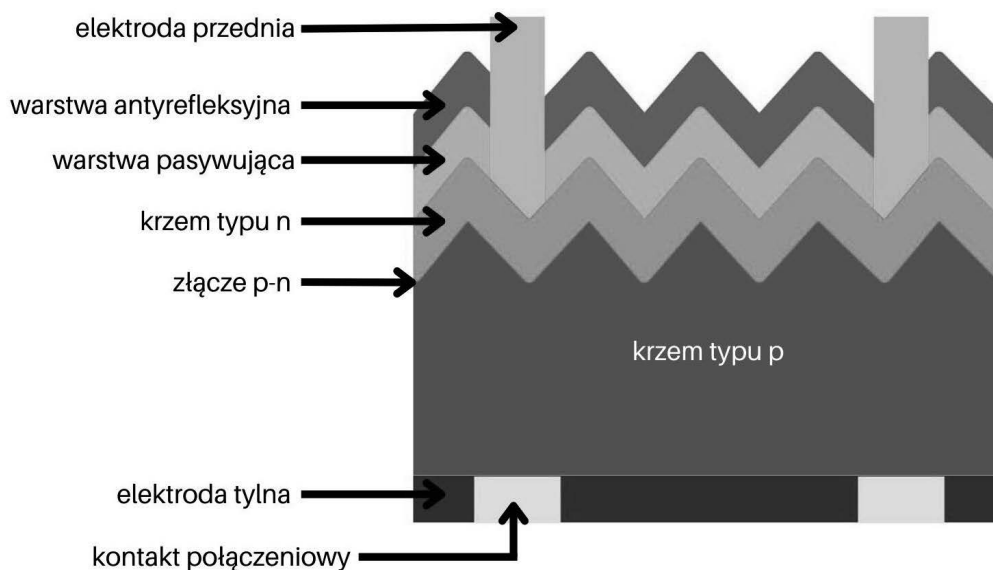
Tablica 1. Porównanie długości okresów gwarancyjnych dla modułów fotowoltaicznych różnych firm [13]

Moduł	SolarWatt Vision	SunPower MAXEON	Winaico	LG NeON R	Jinko Tiger	REC Alpha	Hanwha Q Cells	Hyundai
Okres gwarancji [lata]	30	25	25	25	25	25	25	25

1.2 BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA

Ogniwo fotowoltaiczne zbudowane jest z półprzewodnika (najczęściej krzemu), warstw pasywującej i antyrefleksyjnej, elektrod przednich i tylnych oraz kontaktów tylnych połączeniowych (Rys. 2). Powierzchnię przednią mono- lub polikrystalicznego krzemu poddaje się teksturowaniu w celu zmniejszenia odbicia światła. Następnie w wyniku dyfuzji np. fosforu do płytki krzemowej typu p (wyciętej z monokrystalicznego walca krzemu lub polikrystalicznego bloku) wytwarza się warstwę typu n. W ten sposób powstaje złącze p-n na głębokości ok. 0,5 μm . W kolejnym kroku nanosi się warstwę pasywującą w celu redukcji rekombinacji powierzchniowej oraz warstwę antyrefleksyjną pozwalającą na zwiększenia absorpcji promieniowania słonecznego. Elektroda przednia naniesiona jest w postaci siatki tak, aby w jak najmniejszym stopniu przesłaniała powierzchnię czynną ogniwa, a tylna zwykle pokrywa prawie całą tylną powierzchnię urządzenia. Po wystawieniu ogniwa słonecznego na światło zachodzą w nim procesy znane jako efekt fotowoltaiczny. Zaabsorbowane przez urządzenie fotony promieniowania słonecznego (o energii równej lub większej od energii odpowiadającej szerokości przerwy energetycznej) generują pary elektron-dziura, czyli nośniki prądu elektrycznego. Następnie wygenerowana para dyfunduje w kierunku obszaru złącza, w którym pod wpływem istnienia silnego pola elektrycznego zostają rozdzielone. Elektron

przechodzi z obszaru typu p do typu n, a dziura odwrotnie - z obszaru typu n do obszar typu p [4,6,17,18].



Rys. 2. Schemat budowy krzemowego ogniwa fotowoltaicznego [17,18]

2. MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

Charakteryzacji poddano mono- i polikrystaliczne krzemowe ogniwo fotowoltaiczne o powierzchni 156 mm x 156 mm, które udostępniła firma HELIOENERGIA Sp. z o.o. (Czerwionka-Leszczyny). Własności optyczne fotoogniw wyznaczono z wykorzystaniem spektrofotometru UV-Vis firmy Thermo Scientific. Wykonano badania współczynnika odbicia światła od powierzchni mono- i polikrystalicznego krzemowego ogniwa fotowoltaicznego w zakresie długości fali 190-1100 nm.

Własności elektryczne ogniw słonecznych określono na podstawie zmierzonych charakterystyk prądowo-napięciowych przy użyciu systemu pomiarowego SS IV CT 02 firmy PV Test Solutions Tadeusz Żdanowicz wyposażonego w symulator promieniowania słonecznego w warunkach STC (*ang. standard test conditions*) tj. w temperaturze 25°C, natężenia promieniowania słonecznego 1000 W/m² oraz AM (*ang. air mass*) 1,5.

3. WYNIKI BADAŃ

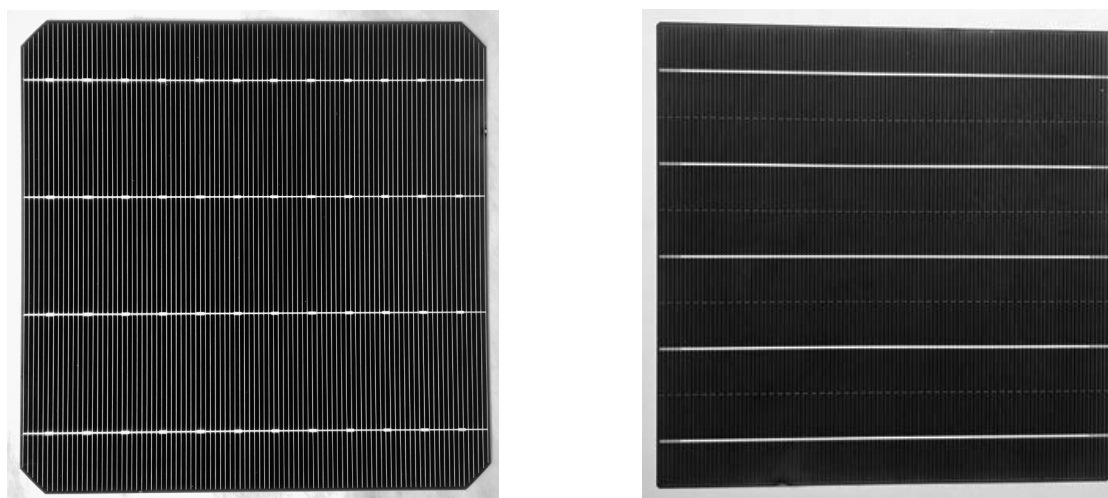
W ramach niniejszej pracy analizie poddano ogniwa słoneczne wykonane z krzemu (Rys. 3):

- monokrystalicznego,
- polikrystalicznego.

Na podstawie obserwacji okiem nieuzbrojonym stwierdzono, że na powierzchni polikrystalicznych krzemowych ogniw fotowoltaicznych widoczne są ziarna (Rys. 3b). Ponadto, fotoogniwa różnią się pomiędzy sobą liczbą elektrod zbiorczych, dla urządzeń z mono- i polikrystalików wynosi ona odpowiednio 4 i 5.

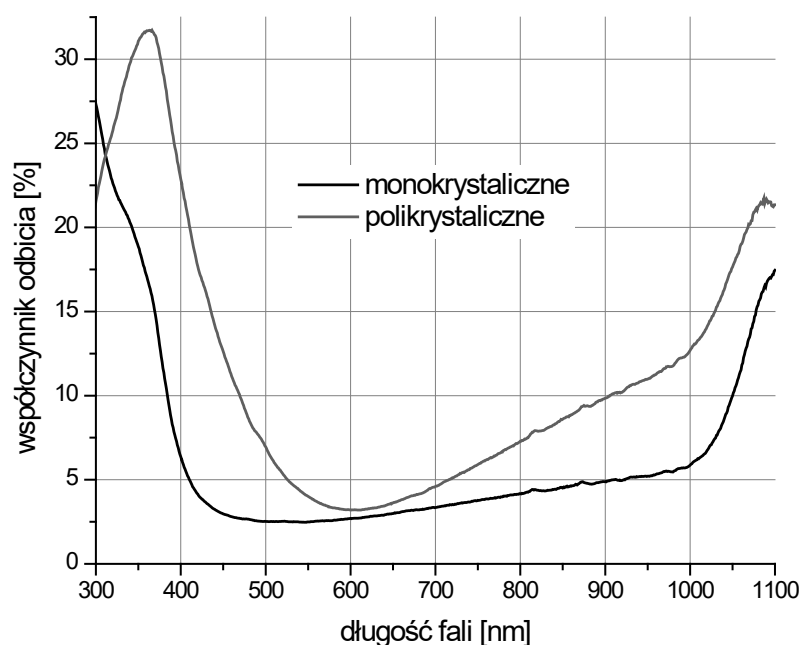
a)

b)

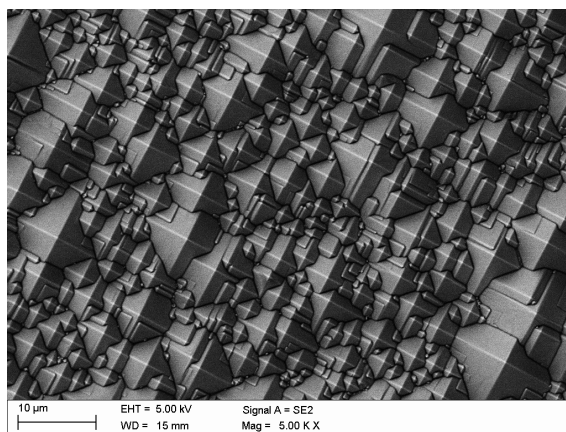


Rys. 3. Poddane badaniom własności optycznych i elektrycznych krzemowe ogniwo fotowoltaiczne a) monokrystaliczne, b) polikrystaliczne

Własności optyczne dwóch rodzajów badanych ogniw słonecznych różnią się od siebie (Rys. 4). Z punktu widzenia fotowoltaiki najlepsze własności optyczne uzyskano dla monokrystalicznego krzemowego ogniwa fotowoltaicznego. Dla tego urządzenia współczynnik odbicia światła jest mniejszy niż 5% w zakresie długości fali 410-920 nm. Prawdopodobnie jest to wynikiem efektywnego zabiegu teksturowania krzemu monokrystalicznego o orientacji krystalograficznej (100), dzięki któremu pod wpływem działania zasady potasowej lub sodowej na powierzchni tworzą się charakterystyczne “piramidki” (Rys. 5). W przypadku krzemu polikrystalicznego kształtowanie powierzchni jest utrudnione ze względu na różną orientację krystalograficzną ziarn.

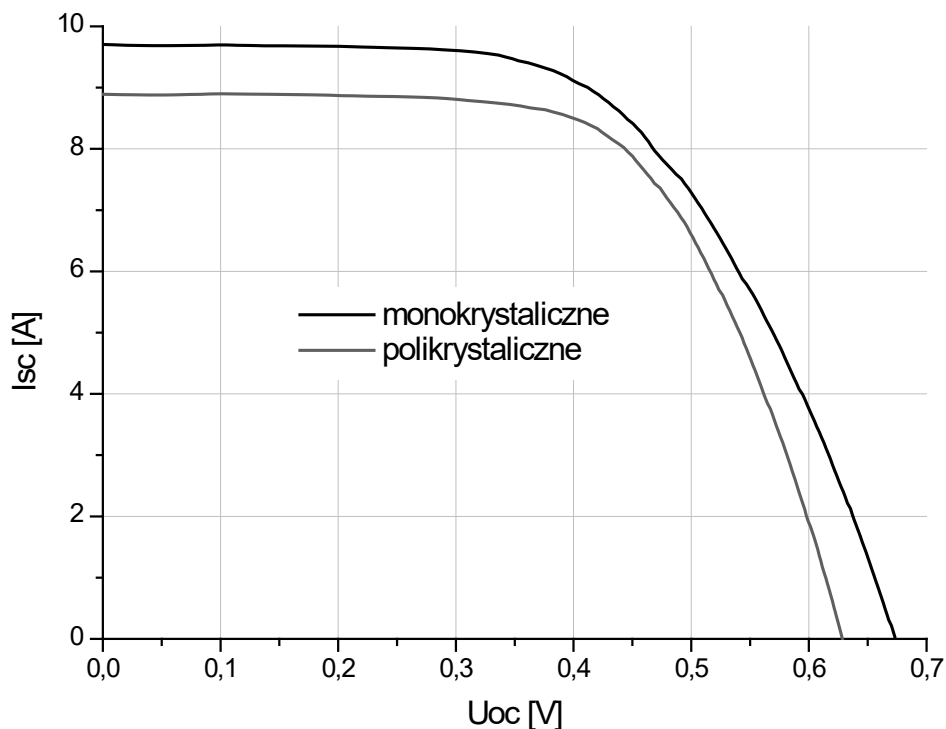


Rys. 4. Zależność współczynnika odbicia światła od długości fali dla powierzchni mono- i polikrystalicznego krzemowego ogniwa fotowoltaicznego



Rys. 5. Topografia teksturowanej powierzchni krzemu monokrystalicznego o orientacji krystalograficznej (100) [14]

Na Rysunku 6 przedstawiono zmierzone charakterystyki prądowo-napięciowe badanych ogniw fotowoltaicznych, a w Tablicy 2 zestawiono wyznaczone własności elektrycznych. Stwierdzono, że sprawność E_{ff} monokrystalicznego krzemowego ogniwa fotowoltaicznego jest o 0,91% większa w porównaniu do urządzenia wykonanego z polikrystalicznego krzemu, co jest zgodne danymi literaturowymi [5]. W krzemie polikrystalicznym znajdują się obszary graniczne między ziarnami i kryształami, które hamują przepływ elektronów i powodują ich rekombinację z dziurami. Pozostałe wielkości elektryczne takie jak prąd zwarcia I_{sc} , napięcie obwodu otwartego U_{oc} , moc maksymalna P_m są również wyższe z wyjątkiem współczynnika wypełnienia FF , który jest mniejszy o 0,05.



Rys. 6. Charakterystyki prądowo-napięciowe mono- i polikrystalicznego krzemowego ogniwa fotowoltaicznego

Tablica 2. Porównanie własności elektrycznych ogniw fotowoltaicznych wykonanych z krzemu poli- oraz monokrystalicznego, gdzie: I_m , U_m - odpowiednio prąd i napięcie w punkcie maksymalnej mocy

Rodzaj krzemowego ogniwa fotowoltaicznego	Własności elektryczne							
	T [°C]	I_{sc} [A]	U_{oc} [V]	I_m [A]	U_m [V]	P_m [W]	FF [-]	E_{ff} [%]
Polikrystaliczne	25,0	8,922	0,629	8,051	0,442	3,558	0,63	14,87
Monokrystaliczne	25,0	9,703	0,673	8,528	0,445	3,792	0,58	15,78

4. WNIOSKI

Energia słoneczna jest tanim, czystym i nieograniczonym źródłem energii. Coraz bardziej zaawansowane technologie przekształcają promieniowanie słoneczne w energię elektryczną lub ciepłą. Obecnie fotowoltaika jest prawdopodobnie najbardziej znanym sposobem wykorzystania energii słonecznej. W ramach niniejszej pracy analizie poddano własności optyczne i elektryczne mono- i polikrystalicznego krzemowego ogniwa fotowoltaicznego.

Na podstawie wykonanych badań stwierdzono, że współczynnik odbicia światła dla polikrystalicznego krzemowego fotoogniwa jest wyższy w porównaniu do monokrystalicznego urządzenia. Prawdopodobnie wynika to z faktu, że krzem polikrystaliczny składa się z ziarn o różnej orientacji krystalograficznej, co wiąże się z tym, że chemiczne teksturowanie jego powierzchni nie jest tak skuteczne jak w przypadku monokryształów krzemu o orientacji (100). Ten etap produkcji fotoogniw jest odpowiedzialny za zwiększenie absorpcji promieniowania słonecznego, co bezpośrednio wpływa na poprawę wydajności urządzenia. Pośrednio potwierdzają to wyniki badań własności elektrycznych, z których wynika, że sprawność ogniwa fotowoltaicznego wykonanego z monokrystalicznego jest wyższa o 0,91%. Jednak ostateczny wniosek dotyczący porównania badanych ogniw słonecznych nie jest możliwy ze względu na to, że autorzy nie posiadają wiedzy na temat tego, czy zostały one wykonane w tej samej technologii.

LITERATURA

- [1] M. Ilba, Energetyka słoneczna, CeDeWu, Warszawa, 2022.
- [2] Strona internetowa: <https://manoa.hawaii.edu/exploringourfluidearth/physical/atmospheric-effects/wind-formation>, dostęp dnia 31.06.2023.
- [3] Strona internetowa: <https://www.forbes.com/sites/quora/2016/09/22/we-could-power-the-entire-world-by-harnessing-solar-energy-from-1-of-the-sahara/?sh=57c96659d440>.
- [4] S. Ranjan, S. Balaji, Rocco A. Panella, B. Erik Ydstie, Silicon solar cell production, Computers & Chemical Engineering, 35, Issue 8, 2011, Pages 1439-1453, ISSN 0098-1354.
- [5] K. Znajdek, M. Sibiński, Ogniwa fotowoltaiczne różnych typów, Świat Szkła, 9 (2011).
- [6] H. Soonmi, Haradni, P. Nandi, B.S. Mwankemwa, T.D. Malevu, M.I. Malik, Overview on Different Types of Solar Cells: An Update, Appl. Sci., 13/4 (2023) 2051.

- [7] W. Mocny: Ekologiczne Źródła Energii, II Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Ekologia w Elektronice”, Warszawa, 2002.
- [8] M.A Iqbal, M. Malik, W. Shahid, S.Z.U. Din, N. Anwar, M. Ikram, F. Idress, Materials for Photovoltaics: Overview, Generations, Recent Advancements and Future Prospects. Thin Films Photovoltaics. IntechOpen. (2022).
- [9] R. Goswami, Three Generations of Solar Cells, Advanced Materials Research 1165 (2021) 113-130.
- [10] Khatibi, F.R. Astarai, M.H. Ahmadi, Generation and combination of the solar cells: A current model review, Energy Science & Engineering 7/2 (2019) 305-322.
- [11] J. Yan, B.R. Saunders, Third-generation solar cells: a review and comparison of polymer:fullerene, hybrid polymer and perovskite solar cells, RSC Advances 82 (2014).
- [12] M.A. Green, E.D. Dunlop, G. Siefer, M. Yoshita, N. Kopidakis, K. Bothe, X. Hao, Solar cell efficiency tables (Version 61), Progress in photovoltaics 31 (2023) 3-16.
- [13] Strona internetowa: <https://fotowoltaikaonline.pl/gwarancja> dostęp dnia 02.05.2023
- [14] Q. Lin, H. Huang, Y. Jing, H. Fu, P. Chang, D. Li, Y. Yao, Z. Fan: Flexible photovoltaic Technologies, Journal of Materials Chemistry C 2, (2014) 1233-1247.
- [15] T. Stapiński, K. Marszałek, M. Lipiński, P. Panek, W. Szczepanik: Investigations of solar panels with enhanced transmission glass, Microelectronic materials and technologies 1 (2012) 288-297.
- [16] H. Min, et al. Perovskite solar cells with atomically coherent interlayers on SnO₂ electrodes, Nature 598 (2021) 444–450.
- [17] L.A. Dobrzański, A. Drygała, Surface texturing of multicrystalline silicon solar cells, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 31/1 (2008) 77-82.
- [18] M. Macek, A. Drygała, Ogólna charakterystyka krzemowych ogniw fotowoltaicznych, Prace Studenckich Kół Naukowych SOKÓŁ'2010, 26 (2010) 13-24.

PODZIĘKOWANIA

Autorzy pragną podziękować firmie HELIOENERGIA Sp. z o.o. (Czerwionka-Leszczyny) za udostępnienie do badań mono- i polikrystalicznych krzemowych ogniw fotowoltaicznych.

Pracę zrealizowano w ramach projektu „Energia elektryczna ze Słońca” realizowanego z uczniami szkół ponadpodstawowych w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Anionic and cationic dyes adsorption onto sludge-based activated carbon

P. Stuchlik^a, R. Kryst^a, D. Pokoj^a, K. Hanzlik^b, N. Piekarczyk^b, B. Pieczykolan^c, A. Marszałek^c, E. Puszczalo^d, B. Solecka^e, M. Sroka^f

^a Student of Silesian University of Technology, Faculty of Chemistry

email: patrstu979@student.polsl.pl, rafakry874@student.polsl.pl, domipok608@student.polsl.pl

^b Student of Silesian University of Technology, Faculty of Energy and Environmental Engineering

email: kh301171@student.polsl.pl, np301182@student.polsl.pl

^c Silesian University of Technology, Faculty of Energy and Environmental Engineering, Department of Water and Wastewater Engineering

email: Barbara.Pieczykolan@polsl.pl, Anna.Marszalek@polsl.pl

^d Silesian University of Technology, Faculty of Energy and Environmental Engineering, Department of Air Protection

email: Ewa.Puszczalo@polsl.pl

^e Silesian University of Technology, Institute of Physics, Centre for Science and Education, Division of Applied Physics

email: Barbara.Solecka@polsl.pl

^f Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials

email: Marek.Sroka@polsl.pl

Abstract: The article describes the idea of producing the adsorbent from waste material. In the studies the anaerobically digested sludge after several treatment processes was used for adsorption of three different synthetic dyes: Acid Red 18, Acid Green 16 and Methylene Blue.

Keywords: sewage sludge, adsorption process, synthetic dyes, sludge-based activated carbon

1. INTRODUCTION

Synthetic dyes are widely used in various industries. Both cationic and anionic dyes are used. Acid Green 16 and Acid Red 18 are examples of anionic dyes, while Methylene Blue is an example of a cationic dye.

Methylene Blue (3,7-bis(dimethylamino)phenothiazine chloride,) is an aromatic, heterocyclic alkaline dye from the group of polymethine dyes. It is a positively charged compound that is well soluble in water [1,2]. At room temperature, it is a dark green, odourless powder that only in contact with water takes on its typical dark blue colour [3]. This characteristic coloration is due to chromophore and auxochrome groups located within the molecule. The coupled N-S system on

the central aromatic heterocyclic ring is a chromophore unit. On the other hand, groups having N with an unpaired electron attached to the benzene ring are auxochrome units [2]. Methylene Blue has been widely used in various industries. A large amount of this dye is used in the textile and paper industry for dyeing wool, cotton, silk or paper. In addition, the cosmetics, pharmaceutical and food industries are also willing to use it in their production [1,3]. It is also commonly found in laboratories where it is used, among others, to inhibit the growth of fungi or as a staining reagent in analyses [4]. Methylene Blue is toxic and carcinogenic, and its ease of accumulation in the body through water or the food chain poses a high risk of various types of symptoms due to its absorption [5,6]. It can cause vomiting, diarrhea, and as a result of taking large doses of abdominal and chest pains, as well as painful micturitions [7]. However, at appropriately selected doses, it has a therapeutic effect, among others, in the treatment of malaria [1]. Its presence in water reservoirs, even in low concentrations, results in the formation of coloured semi-finished products. It is characterized by a high molar absorption coefficient, which reduces the penetration of light, causes a decrease in oxygen solubility, and thus a reduction in photosynthesis, and this reduces the biodiversity of the water reservoir [3].

The dye Acid Red 18 (trisodium salt of 7-hydroxy-8-[(4-sulfo-1-naphthalenyl)azo]-1,3-naphthalene disulfonic acid) belongs to the group of azo dyes that contain one or more azo bonds in their structure. This is an example of a sulfonated dye used in many food and textile products. It is characterized by a relatively high resistance to light and oxidants, which leads to less effective purification using biological methods and conventional treatment processes [8,9]. It is most often used as a dye for beverages and sweets, but when used in excessive amounts, it can have a negative impact on human health [10]. The presence of Acid Red 18 contributes to limiting the development of some fungi, e.g. *S. Commune* [11]. Uncontrolled discharge of this dye into the natural environment with industrial sewage poses a threat to aquatic organisms and pollutes drinking water for humans and animals [12]. Acid Red 18 is well soluble in water and has a serious effect on hydrobionts even at low concentrations, blocking the access of light to water and inhibiting plant photosynthesis, which makes the removal of this dye from wastewater problematic [5].

The dye Acid Green 16 is an example of the triphenylmethane group of dyes. This dye is characterized by genotoxic and mutagenic effects in mice [13]. In its structure, it contains functional groups, such as arylamino-dimethyl and sulfone, as well as a naphthalene ring. Due to the small size of the dye particle (diameter of the cation dye – 1.51 nm) and its relatively low molecular weight (539 g/mol) it shows a tendency to form bonds and interact with the surface of the adsorbent [14]. Acid Green 16 is mainly used in industries such as the textile industry, especially for dyeing wool and silk. Wool dyeing takes place in a strongly acidic bath, and the highest dyeing temperature is 95-100°C. Silk dyeing, on the other hand, should be done in a vinegar or ant bath. Suitable for dyeing dark fabrics. It is also used to colour ink, pen, soap, paper and leather. Acid Green 16 is an effective corrosion inhibitor. The dye prevents corrosion by creating a protective layer on the metal surface [15].

As a result of industrial production, wastewater is generated that contains unused dyes. Such wastewater is strongly coloured and can have a negative impact on the environment, animal and human health. Therefore, it is necessary to purify them. One of the methods used to remove dyes from wastewater is the adsorption process. Usually commercial activated carbons are used, which have a very large specific surface area as well as significant contaminations retention properties on their surface. However, these adsorbents are expensive, so alternative adsorbents, also produced from waste, are currently being sought. One of the types of waste that can be used as a raw material for the production of an adsorbent is sewage sludge. In the studies described in

this article, anaerobic digested sewage sludge was used, which after appropriate physico-chemical treatment was used as an adsorbent for the removal of three dyes: Acid Red 18, Acid Green 16 and Methylene Blue.

2. METHODOLOGY

2.1. Adsorbent

At first, a waste adsorbent was produced, obtained from anaerobically digested sewage sludge. The sludge was collected from the municipal wastewater treatment plant and was taken from the fermentation chamber. The first stage was thickening the sludge, and then partially drying it using microwaves. After that drying process the water content was reduced to about 40% of the sludge dry weight. After that step, the sludge was transferred to a laboratory drier. This process lasted until the adsorbent was fully dried. Then the sludge was crushed to obtain a grains smaller than 0.49 mm in diameter. The last stage of the adsorbent preparation was treating it with NaOH solution. This action is aimed at introducing chemical changes on the surface of the adsorbent, leading to an increase in its sorption capacity. In this case 1 g of NaOH was added to 50 ml of water, and then 1 g of dried and ground sludge was added to this mixture. The whole was left to act on NaOH for a period of 24 hours. After this process, the sludge prepared in this way was dried again and used as an adsorbent in the tests.

2.2. Experiments' description

Studies were divided into four stages:

- Stage I: Preparation of waste adsorbent from anaerobically digested sewage sludge
- Stage II: Determination of the contact time of adsorbent with the dye at the appropriate pH conditions: from 5 minutes up to 240 minutes
- Stage III: Determination of adsorption isotherms while maintaining the appropriate pH of the conditions and appropriate contact time for an each dye: the initial dye concentration in the range 50-800 mg/dm³
- Stage IV: Determination of two isotherm models and analysis of test results: Langmuir model and Freundlich model.

A spectrophotometric method was used to determine the concentration of each dye in the solution. For each dye, a calibration curve was prepared at the appropriate wavelength. The concentration of each dye was determined using a spectrophotometer, measuring the absorbance of dye solutions at the appropriate wavelength, and then using the appropriate calibration curve.

Samples for testing the adsorption process were prepared as follows. An appropriate amount of adsorbent was introduced into a known volume of dye solution of a fixed concentration. Before the experiments, the pH of dye solution was adjusted to the appropriate value. Samples of the (adsorbent + dye solution) prepared in this way were placed on a laboratory shaker and, after a suitable period of contact, the adsorbent was separated from the dye solution by means of laboratory centrifuge. The effectiveness of the process was determined on the basis of the final concentration of the dyes (after the adsorption process) by calculating the value of the adsorbed amount of the dye by unit mass of adsorbent based on the formula (1).

$$q_e(q_t) = \frac{(C_0 - C_e)}{m_{st}} \quad (1)$$

where:

q_e – the amount of dye adsorbed at equilibrium [mg/g],
 q_t – the amount of dye adsorbed at each contact time [mg/g],
 C_e – the dye concentration at equilibrium [mg/dm³],
 C_0 – the initial dye concentration [mg/dm³],
 m_{sl} – amount of adsorbent [g/dm³].

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Impact of contact time

Experiments showed that the adsorption process proceeded most rapidly in the first minutes of the process for all dyes.

In the case of Acid Red 18, the largest increase was recorded in the first 30 minutes of the reaction at the initial dye concentration of 200 mg/dm³ (fig. 1a). Similarly, for Acid Green 16, the largest increase in the observed amount of dye adsorbed also occurred in the first 30 minutes of the reaction, after which the process efficiency remained relatively constant (fig. 1b). In contrast, the results of impact contact time for Methylene Blue showed the greatest increase in the first 180 minutes of the reaction, after which the process remained stable, showing no significant changes in efficiency (fig. 1c). Therefore, in the case of Acid Green 16 and Acid Red 18, the contact time was assumed to be 30 minutes in which the absorption equilibrium occurred. In the case of Methylene Blue dye, a time of 180 minutes was assumed.

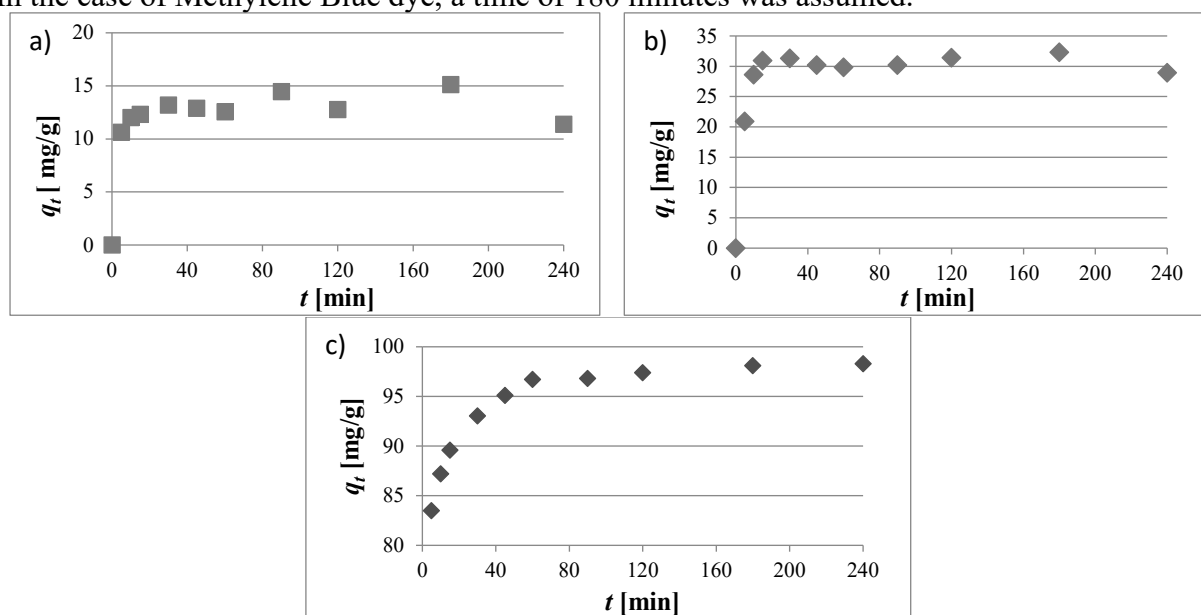


Figure 1. Impact of contact time on the adsorption efficiency: a) Acid Red 18, b) Acid Green 16, c) Methylene Blue.

3.2. Adsorption isotherm

Based on the results of tests related to the determination of the adsorption isotherm, the relationship $q_e=f(C_e)$ was plotted for each dye (fig. 2.).

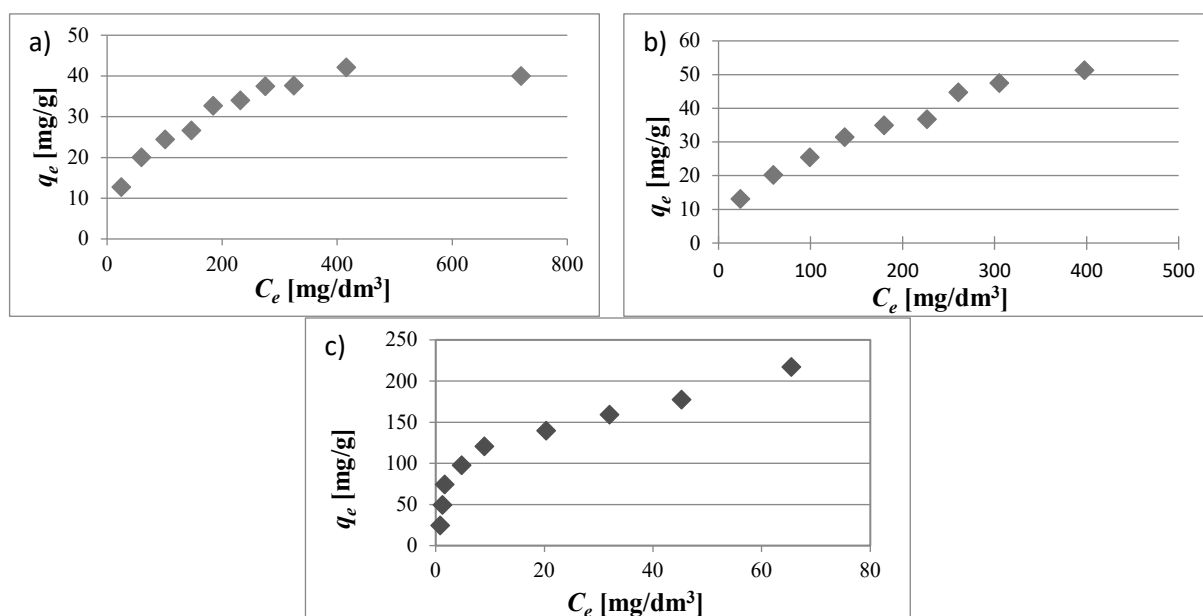


Figure 2. Adsorption isotherm for dye: a) Acid Red 18, b) Acid Green 16, c) Methylene Blue

During the research, the dye adsorption isotherm on the waste adsorbent was analysed, which was the last stage of the research. The adsorption isotherm describes the relationship between the concentration of the dye in the equilibrium solution and the amount of dye that has been adsorbed on the surface of the adsorbent. It can be stated that in the case of Acid Green 16 there was multilayer adsorption, while for the other two dyes isotherms tend towards single-layer sorption (fig. 2.).

In the case of Acid Green 16, in the studied range of initial dye concentrations, the plot of the amount of dye adsorbed as a function of equilibrium concentration showed an almost linear relationship. This means that amount of adsorbed dye increased in proportion to its concentration in the liquid phase. However, on the isotherm chart for Methylene Blue and Acid Red 18, a completely different relationship was observed on isotherm graph (fig. 2.).

Two models of isotherm were analysed: Freundlich and Langmuir. Based on the linear regression, the parameters of each model were determined. For this purpose a linear forms of those isotherm models were used and linear plots have been drawn, based on the equation 2 and 3.

Freundlich model:

$$\log q_e = \log K_F \cdot \frac{1}{n} \log C_e \quad (2)$$

where:

q_e – the amount of dye adsorbed at equilibrium [mg/g],

C_e – the dye concentration at equilibrium [mg/dm³],

K_F – Freundlich constant indicative of the relative adsorption capacity of the adsorbent [mg^(1-1/n)dm^{3(1/n)}/g]

n – Freundlich equation exponents [-],

Langmuir model:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{K_L \cdot q_m} \quad (3)$$

where:

q_e – the amount of dye adsorbed at equilibrium [mg/g],

C_e – the dye concentration at equilibrium [mg/dm^3],

K_L – Langmuir constant related to the free energy of adsorption [dm^3/mg],

q_m – maximum adsorption capacity in Langmuir model [mg/g],

Freundlich isotherm model

On the basis of the graphs on figure 3, the parameters of the Freundlich isotherm model were determined and on the basis of linear estimation, the values of the K_F and $1/n$ parameters were calculated.

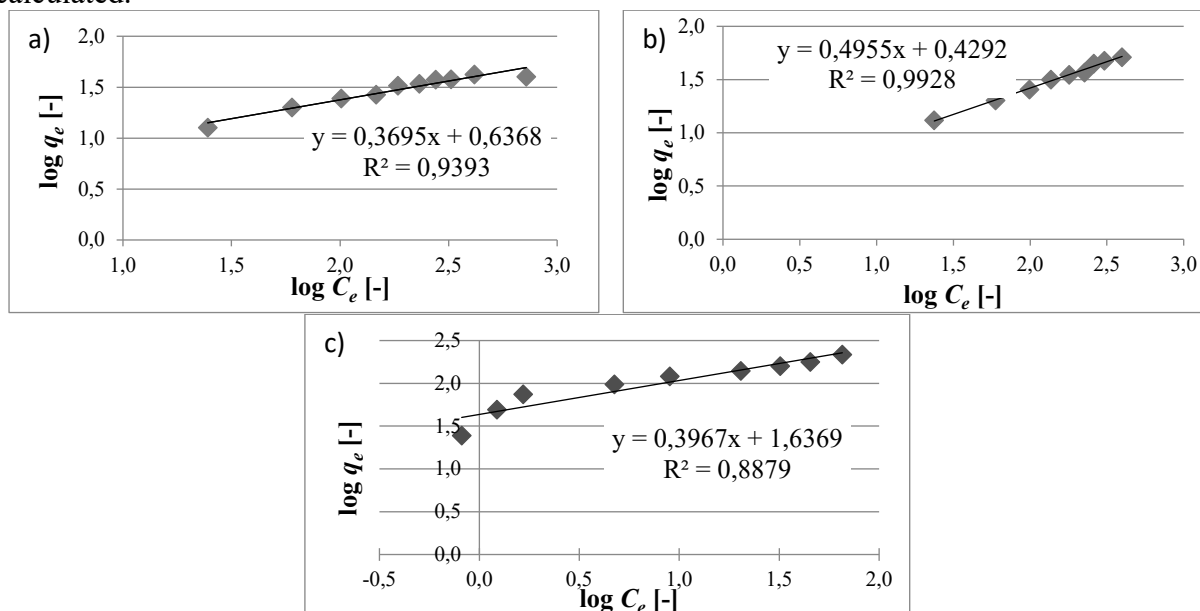


Figure 3. Linear graph of Freundlich isotherm model for dye: a) Acid Red 18, b) Acid Green 16, c) Methylene Blue

The determined values (according eq. 2) of parameters of Freundlich model:

- For Acid Red 18: $K_F = 4,3331 \text{ mg}^{(1-1/n)}\text{dm}^{3(1/n)}/\text{g}$; $1/n = 0,3695$
- For Acid Green 16: $K_F = 2,6866 \text{ mg}^{(1-1/n)}\text{dm}^{3(1/n)}/\text{g}$; $1/n = 0,4955$
- For Methylene Blue: $K_F = 43,3411 \text{ mg}^{(1-1/n)}\text{dm}^{3(1/n)}/\text{g}$; $1/n = 0,3967$

The value of $1/n$ for all dyes is lower than 1, which means that the nature of the surface is energetically diverse and indicates the process of physical sorption in each case. The highest value of the K_F coefficient was obtained for the blue dye. It follows that its adsorption capacity was the highest. In the case of other dyes, the K_F value was much smaller and almost similar. The best fit of the results to the Freundlich model was obtained for the dye Acid Green 16, because its correlation coefficient was above 0.99.

Langmuir isotherm model

The graphs in figure 3 show the graphical relationship described by the formula (3). On their basis, parameters were determined and the values of q_m and K_L parameters were calculated using linear estimation.

The determined values of the maximum adsorption capacities stand out primarily for the blue dye, where this value significantly exceeds the values of the maximum adsorption capacities of

the other two dyes. It can be noted that these results coincide with the trend observed during the analysis of the value of the K_F parameter in the Freundlich model. The value of the K_L coefficient showed that the highest affinity of the adsorbent surface to the molecules of retained compounds was obtained for the Acid Red 18 dye. A better fit of the results to the Langmuir model was obtained for the dye Acid Red 18, its correlation coefficient R^2 was 0.990.

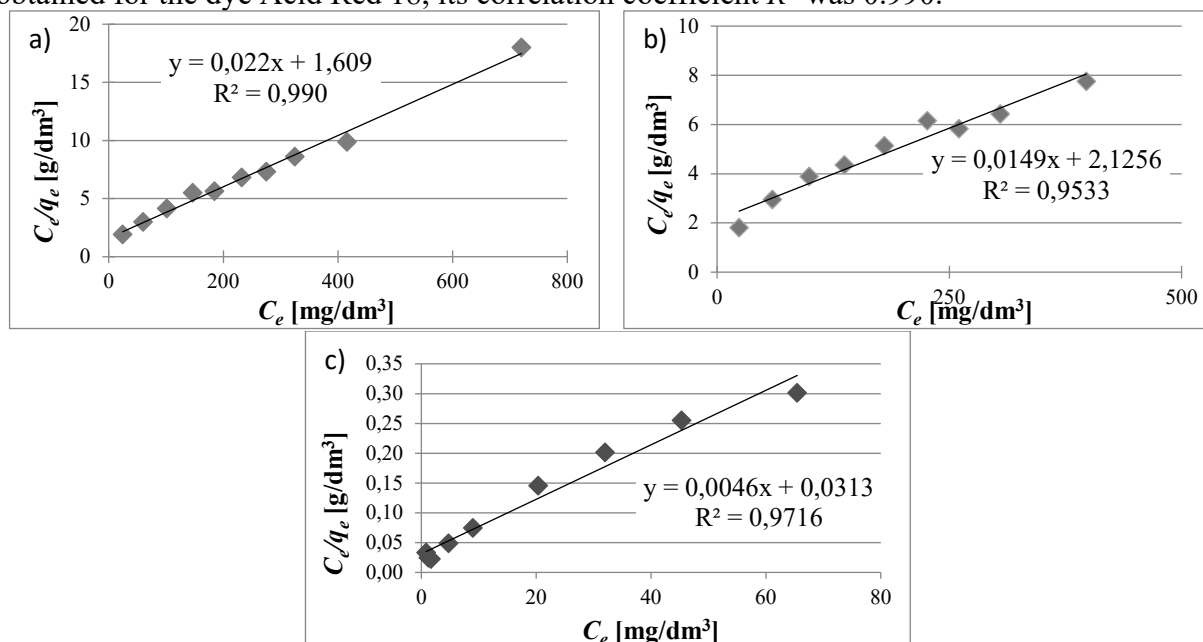


Figure 4. Linear graph of Langmuir isotherm model for dye: a) Acid Red 18, b) Acid Green 16, c) Methylene Blue

The determined values (according eq. 3) of parameters of Langmuir model:

- For Acid Red 18: $K_L = 0,0137 \text{ dm}^3/\text{mg}$; $q_m = 45,4545 \text{ mg/g}$
- For Acid Green 16: $K_L = 0,0007 \text{ dm}^3/\text{mg}$; $q_m = 67,1141 \text{ mg/g}$
- For Methylene Blue: $K_L = 0,0046 \text{ dm}^3/\text{mg}$; $q_m = 217,3913 \text{ mg/g}$

4. CONCLUSIONS

Based on the results of the conducted experiments concerning impact of contact time and sorption isotherm assessment, it can be concluded that:

- In the case of Methylene Blue dye, much higher amounts of adsorbing of dyes were observed compared to other dyes.
- In the case of Acid Green 16 and Acid Red 18, the contact time was assumed to be 30 minutes in which the adsorption balance occurred. And in the case of Methylene Blue dye, a time of 180 minutes was assumed.
- Higher values of correlation coefficients for Acid Red 18 and Methylene Blue dyes were obtained for the Langmuir model, which may suggest a single-layer sorption course. In the case of Acid Green 16 dye, the Freundlich model was fitted, indicating multilayer adsorption.
- The highest value of the maximum adsorption capacity was obtained for the dye Methylene Blue.
- The most favourable adsorption capacity was demonstrated for Methylene Blue

BIBLIOGRAPHY

1. P.O. Oladoye, T.O. Ajiboye, E.O. Omotola, O.J. Oyewola, Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater, *Results Eng.*, 16 (2022) 100678.
2. M. Vemula, Sorption Removal of Methylene Blue Dye from Aqueous Solution by Powdered Yellow Flame Tree Flower (*Peltophorum pterocarpum*), 12 (2023) 1–9.
3. I. Khan, K. Saeed, I. Zekker, B. Zhang, A.H. Hendi, A. Ahmad, S. Ahmad, N. Zada, H. Ahmad, L.A. Shah, T. Shah, I. Khan, and Photodegradation, (2022).
4. V.H.T. Pham, J. Kim, S. Chang, W. Chung, Biodegradation of Methylene Blue Using a Novel Lignin Peroxidase Enzyme Producing Bacteria , Named *Bacillus sp React3* , as a Promising Candidate for Dye-Contaminated Wastewater Treatment, (2022).
5. F. Lu, A. Dong, G. Ding, K. Xu, J. Li, L. You, Magnetic porous polymer composite for high performance adsorption of acid red 18 based on melamine resin and chitosan, *J. Mol. Liq.*, 294 (2019).
6. X. Pan, S. Cheng, T. Su, G. Zuo, W. Zhao, X. Qi, W. Wei, W. Dong, Fenton-like catalyst $\text{Fe}_3\text{O}_4@$ polydopamine- MnO_2 for enhancing removal of methylene blue in wastewater, *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, 181 (2019) 226–233.
7. K.G. Bhattacharyya, A. Sharma, Kinetics and thermodynamics of Methylene Blue adsorption on Neem (*Azadirachta indica*) leaf powder, 65 (2005).
8. A. Thiam, E. Brillas, F. Centellas, P.L. Cabot, I. Sirés, Electrochemical reactivity of Ponceau 4R (food additive E124) in different electrolytes and batch cells, *Electrochim. Acta*, 173 (2015) 523–533.
9. W. Wang, G. Huang, C. An, X. Xin, Y. Zhang, X. Liu, Transport behaviors of anionic azo dyes at interface between surfactant-modified flax shives and aqueous solution: Synchrotron infrared and adsorption studies, *Appl. Surf. Sci.*, 405 (2017) 119–128.
10. R. Dai, Y. Hu, Green/red dual emissive carbon dots for ratiometric fluorescence detection of acid red 18 in food, *Sensors Actuators B Chem.*, 370 (2022) 132420.
11. S. Renganathan, W.R. Thilagaraj, L.R. Miranda, P. Gautam, M. Velan, Accumulation of Acid Orange 7, Acid Red 18 and Reactive Black 5 by growing *Schizophyllum commune*, *Bioresour. Technol.*, 97 (2006) 2189–2193.
12. A.M.M. Vargas, A.L. Cazetta, A.C. Martins, J.C.G. Moraes, E.E. Garcia, G.F. Gauze, W.F. Costa, V.C. Almeida, Kinetic and equilibrium studies: Adsorption of food dyes Acid Yellow 6, Acid Yellow 23, and Acid Red 18 on activated carbon from flamboyant pods, *Chem. Eng. J.*, 181–182 (2012) 243–250.
13. T. Wrońska-Nofer, J. Wiśniewska-Knypl, K. Wszyńska, E. Dziubałtowska, Genotoxicity of industrial dyes under the inductive effect of ethanol on monooxygenase system in mice, *Mutat. Res. - Genet. Toxicol. Environ. Mutagen.*, 392 (1997) 229–235.
14. J. Kyzioł-Komosińska, C. Rosik-Dulewska, M. Pająk, J. Czupioł, A. Dzieniszewska, I. Krzyżewska, Sorption of acid green 16 from aqueous solution onto low-moor peat and smectite clay co-occurring in lignite of Belchatow mine field, *Rocz. Ochr. Sr.*, 17 (2015) 165–187.
15. DYE|WORLD DYE VARIETY, Acid green 16, (2019).



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Microstructure determination of AlCrTaN coatings magnetron sputtered on WC-Co substrate using X-ray diffraction

P. Šulháněk^a, L. Ďuriška^a, I. Černíčková^a, M. Haršáni^b, M. Kusý^a

^a Institute of materials, Faculty of Materials Science and Technology in Trnava. Slovak University of Technology in Bratislava

^b STATON, s.r.o., Sadová 1148, 038 53 Turany
email: martin.kusy@stuba.sk

Abstract: This work investigates microstructure of AlCrN coatings enriched with Ta which were magnetron sputtered on WC-Co substrate using physical vapor deposition. The combined analysis was used to determine texture, microstructure and coating thickness. Due to modifications in chemical composition of deposited AlCrTaN the lattice parameter variation was determined as well as variation in crystallite size and microstrain. Furthermore, texture of the coating was determined and related to the deposition geometry.

Keywords: coating, X-ray diffraction, AlCrN, microstructure

1. INTRODUCTION

Hard coatings have been used for several decades to enhance properties of cutting tools and prolong their life time. Among the most commonly used coatings are aluminium, titanium and chromium nitrides. For example, AlCrN coatings have been widely used due to their high wear resistance, toughness, oxidation resistance and thermal stability [1, 2]. Properties of the coatings can be further improved by doping with other elements such as V, Nb, Y, Ta. Addition of tantalum to AlCrN coatings has not been studied extensively. Hu et al [3] reported that tantalum addition to CrAlN coatings resulted in increased hardness and thermal stability, nevertheless, they also noted a decrease in oxidation resistance. However, studies [4, 5] of tantalum-doped AlTiN coatings have shown improved oxidation resistance, thermal stability and mechanical properties. Therefore, the effect of tantalum addition to AlCrN coatings should be studied in more detail, as it may significantly improve coatings properties.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

The AlCrTaN coatings were prepared by PVD. Two coated samples consisted of the Cr adhesive layer and the main AlCrTaN layer with various content of Ta. The coating was deposited by cathodic arc evaporation onto WC-Co substrate using tilted co-deposition. For the coating deposition, Al-Cr alloy and pure Ta cathodes were used. The coating surfaces and cross-sections were observed using JEOL 7600F scanning electron microscope (SEM) operating at the acceleration voltage of 15 kV. The chemical compositions of the coatings were studied by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) using Oxford Instruments X-max50 spectrometer including INCA software.

X-ray diffraction (XRD) experiment was performed using PANalytical Empyrean X-ray diffractometer with $\text{CoK}\alpha_{1,2}$ radiation with point focus beam and Bragg-Brentano geometry.

Measurements were carried out at 40 kV and 40 mA in the angular range between 30° and 148° with the step size 0.1° 2θ . Primary X-ray beam was modified using polycapillary optics with cross slits. Diffracted arm contained parallel plate collimator and proportional detector. Sample was positioned at reflection–transmission Chi-Phi stage. During measurement, sample was rotated around Phi axes with increment of 30° . Increment in Chi axis was adjusted to 5° . In total, 204 individual measurements were collected for each sample. Initial qualitative phase analysis was executed using XPert HighScore program. Microstructural XRD analysis was carried out using program MAUD [6]. Analysis of experimental data followed an approach described in book entitled Combined analysis [7].

3. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 shows the surfaces of the coatings with higher Ta (sample 1) and lower Ta (sample 2) content studied by SEM. Surface topography suggests presence of a texture related to the deposition process which was utilizing tilted co-deposition geometry during magnetron sputtering. In Table 1, chemical compositions of coatings with lower and higher Ta content is shown. Figure 2 represents a cross-section of the coating with elemental map. The growth of columnar grains in an oblique direction to the surface is visible. (Grain growth shows features typical of texture.) The map shows that the AlCrTaN layer is chemically homogeneous.

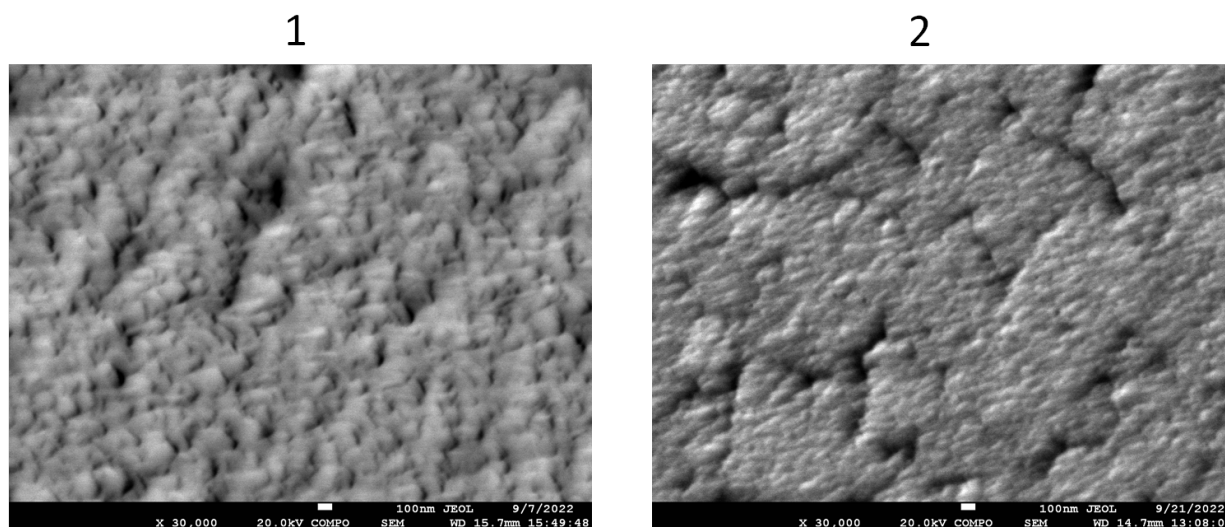


Figure 1. Surfaces of the coatings with higher Ta (sampled denoted as 1) and with lower Ta (sampled denoted as 2), as documented by SEM.

Table 1. Chemical composition of the coatings with higher Ta (sampled denoted as 1) and with lower Ta (sampled denoted as 2).

Sample	Al at. %	Cr at. %	Ta at. %	N at. %
AlCrTaN sample 1	13	16	21	49
AlCrTaN sample 2	26.5	18	8.5	47

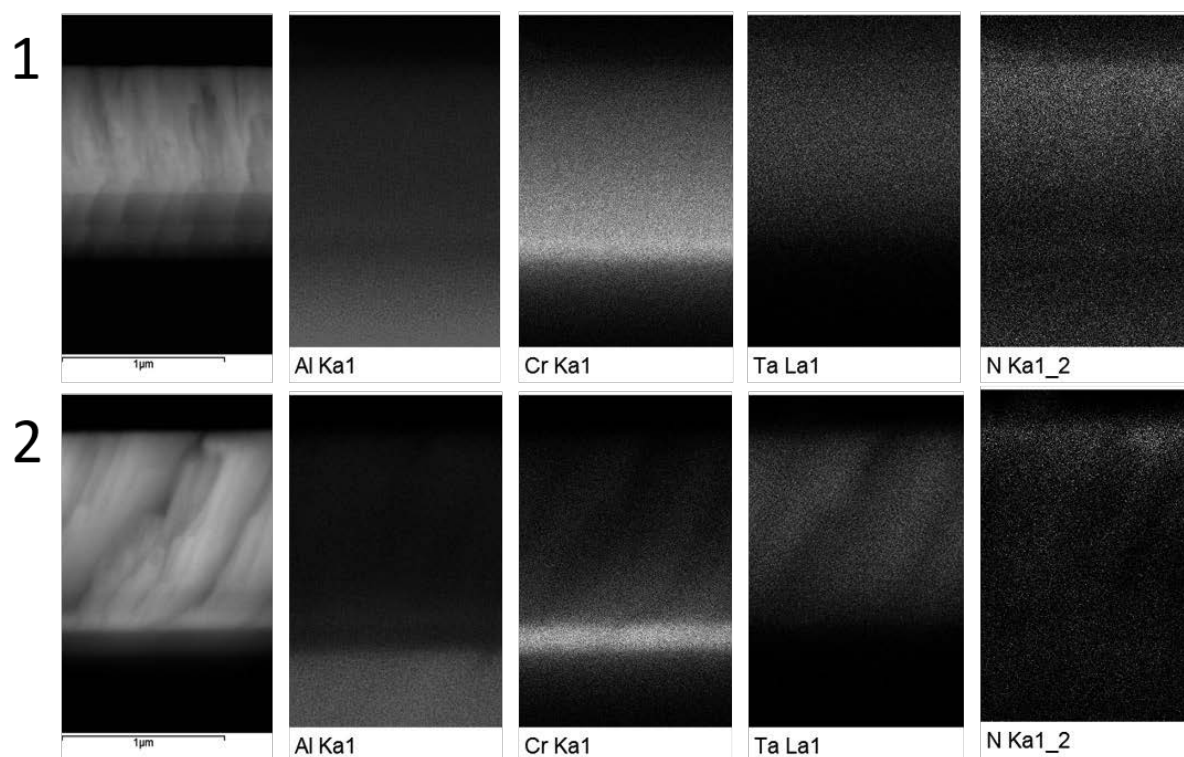


Figure 2. Cross-sections and elemental maps of the coatings with higher Ta (sample denoted as 1) and with lower Ta (sample denoted as 2), as documented by SEM/EDX. Red, green, violet and yellow (cyan) colours correspond to, Al, Cr, Ta and N, respectively.

Qualitative XRD analysis revealed presence of crystalline phases which are listed in the Table 2 together with space groups and initial lattice parameters used for the Rietveld refinement. Deposited coating is formed by AlCrN like phase, Cr was deposited as an adhesion coating. Substrate, sintered carbide, was found to be composed of WC, cubic and hexagonal modifications of Co and $C_4Co_3W_9$ intermetallic phase.

Table 2. Qualitative phase analysis of diffraction patterns, corresponding space groups and initial lattice parameters

Phase	ICSD database	Space group	Lattice parameters / Å	
			a	c
AlCrN	[8, 9]	$Fm-3m$	4.10	
Cr	98-015-0832	$Im-3m$	2.9030	
WC	98-001-5406	$P-62m$	2.9060	2.8370
Co cubic	98-004-4989	$Fm-3m$	3.5440	
Co hexagonal	98-005-3806	$P63/mmc$	2.5140	4.1050
$C_4Co_3W_9$	98-001-6888	$P63/mmc$	7.8260	7.8260

Profile fit results for a series of 84 diffractograms collected in the range from 0° to 30° Chi and 0° to 360° Phi are shown for sample 1 with higher Ta content in Figure 3a. Set of diffraction

patterns is processed as a map of intensity with diffraction angle at horizontal and number of a diffractogram at vertical axis. Bottom part represents collected intensity and upper part is a fit. Difference plot of data and fit is shown in Figure 3b.

Similarly, result of a series of 84 diffractograms collected in the same Chi and Phi ranges are shown for sample 2 with lower Ta content in Figure 4a.

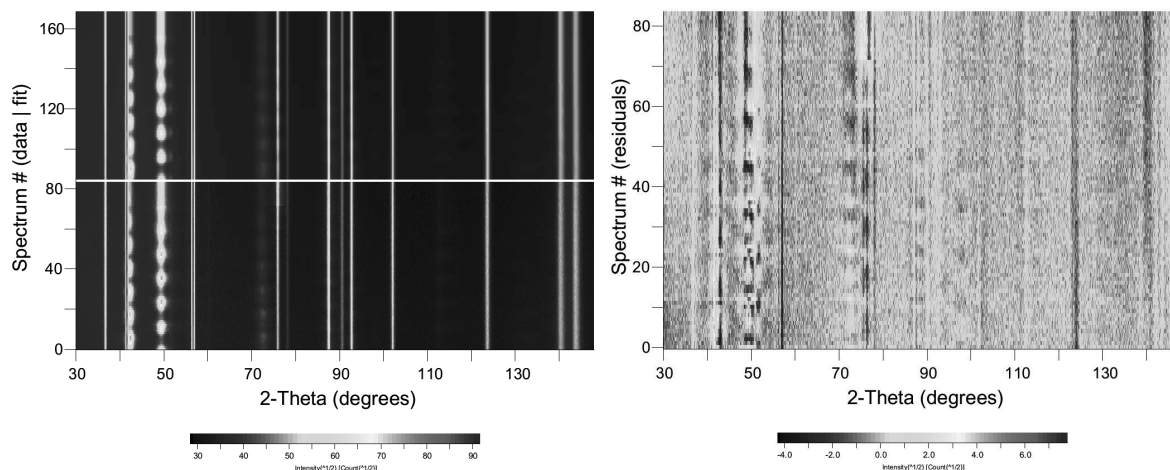


Figure 3 Sample 1 with high Ta content a) Plot of experimental data and fit, b) Plot of difference between experimental data and fit obtained using MAUD program

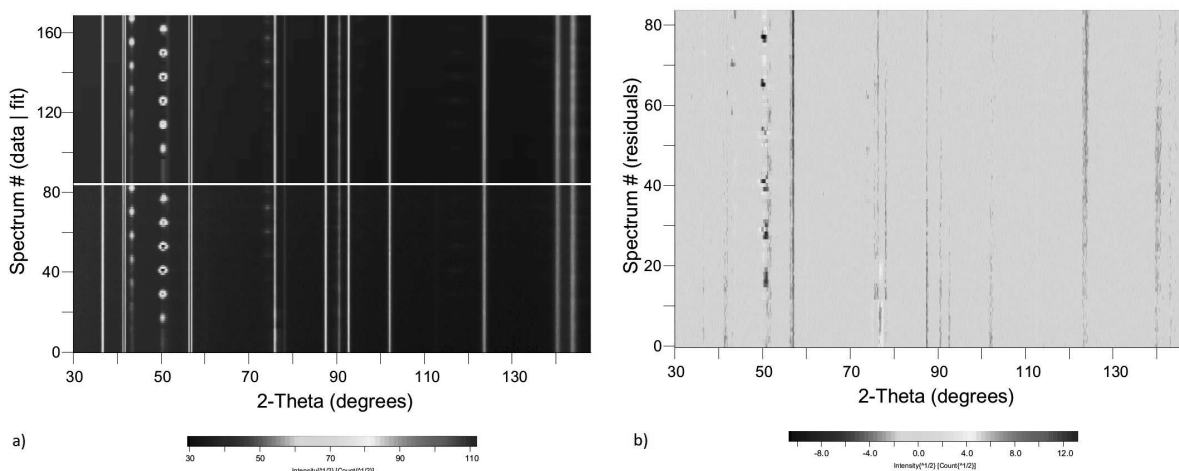


Figure 4 Sample 2 with low Ta content a) Plot of experimental data and fit, b) Plot of difference between experimental data and fit obtained using MAUD program

Analogous fits were executed for all measured datasets in case of both, sample 1 and sample 2, respectively. Resulting information related to microstructure as well as crystallographic

informations are summarized in Table 3 for AlCrTaN phase which was found to form the coating.

Table 3. Refined lattice parameters AlCrTaN and microstructural parameters of the coating

Phase	Lattice parameter a / Å	Anisotropic crystallite size / nm	Anisotropic microstrain /-	Coating thickness / nm
AlCrTaN sample 1	4.26889±0.5	20-50	0.0099 - 0.0115	976±23
AlCrTaN sample 2	4.18873±0.7	30 - 110	0.0066 - 0.0082	896±0.7

Figure 5 depicts pole figures as determined for AlCrTaN phase with higher Ta content (Figure 5a) and lower Ta content (Figure 5b), respectively. In both cases, strong [200] preferred orientation could be observed which is more pronounced in case of low Ta coating. In both cases, it is apparent, that (200) planes are not aligned with coated surface of the sample. This was caused by the fact, that tilted co-deposition was used with targets tilted by 20° with respect to sample normal. Furthermore, each sample was individually positioned in the sample with respect to targets which caused slightly different texture in each sample.

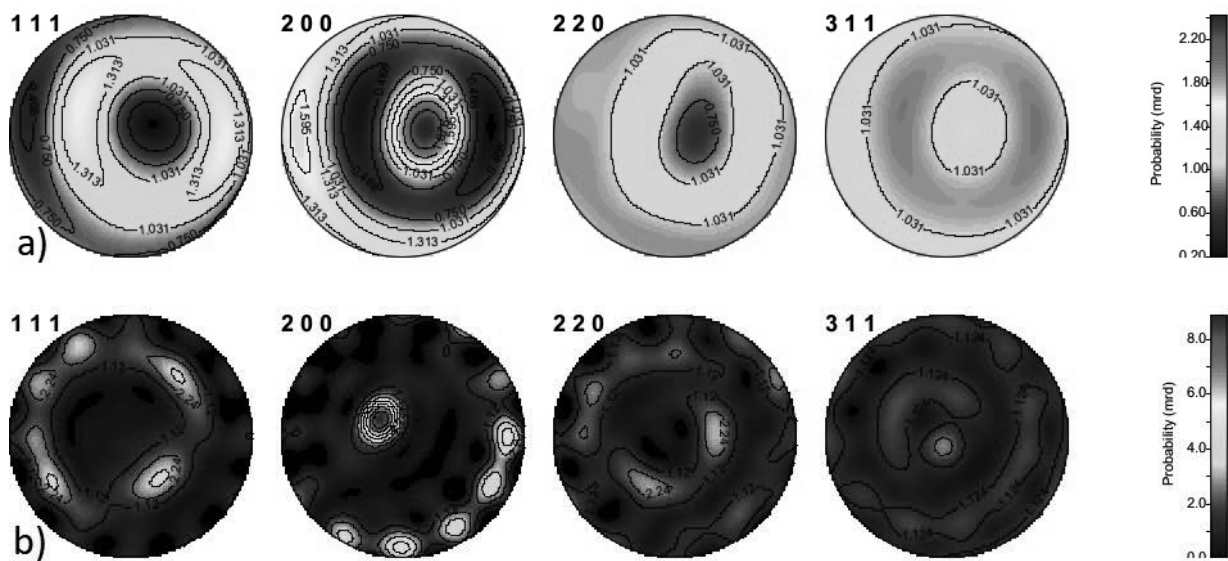


Figure 5 Pole figures of CrAlTaN a) sample 1 with higher Ta content and b) sample 2 with lower Ta content

4. CONCLUSIONS

In this study microstructure of AlCrN type coating with two different levels of Ta content was analysed using XRD combined analysis. Preliminary investigation was carried out using SEM where composition and distribution of elements was determined using SEM EDX analysis. It was shown that sample 1 was synthesised with high 21 at.% Ta content and second sample with

lower 8.5 at.% Ta content. In both cases pronounced Cr adhesive coating was confirmed. AlCrTaN coating thickness was found to be approximately 1 μm and Cr coating approximately 150 nm. Detail XRD study was performed using combined analysis implemented in MAUD program. For each sample, 204 individual measurements were collected and fit simultaneously. It was found out that two coatings differ by lattice parameter which is higher, $a = 4.2689 \text{ \AA}$, in case of AlCrTaN coating with higher Ta content, comparing to $a = 4.1887 \text{ \AA}$ with lower Ta content. Different amount of Ta embedded in the lattice of the AlCrN type coating caused also slightly different crystallite size, which is lower in case of higher Ta coating. Higher microstrain, lattice strain, was determined in case of higher Ta coating. Difference was also observed in case of preferred orientation with strong [200] preferred direction. It was however noticed that (200) crystallographic planes of AlCrTaN phase were not aligned parallel with the surface of the sample which is in agreement with tilted co-deposition configuration used during magnetron sputtering process as well as with local position of the sample with respect to individual targets.

BIBLIOGRAPHY

1. I.-S. Cho, A. Amanov, J.-D. Kim. The effects of AlCrN coating, surface modification and their combination on the tribological properties of high speed steel under dry conditions. *Tribology International* 81 (2011) 61-72
2. B. Warcholinski, A. Gilewicz, P. Myslinski, E. Dobruchowska, D. Murzynski. Structure and Properties of AlCrN Coatings Deposited Using Cathodic Arc Evaporation. *Coatings* 10(8) (2020) 793
3. C. Hu, Y. X. Xu, L. Chen, F. Pei, Y. Du. Mechanical properties, thermal stability and oxidation resistance of Ta-doped CrAlN coatings. *Surface and Coatings Technology* 368 (2019) 25-32
4. Y. Yang, Y. X. Xu, L. Chen, P. H. Mayrhofer. Improved Ti-Al-N coatings through Ta alloying and multilayer architecture. *Surface and Coatings Technology* 328 (2017) 428-435
5. A. Hemmati, M. Abdoos, S. C. Veldhuis. Developing Ti-Al-Ta-N based coatings: Thermal stability, oxidation resistance, machining performance and adaptive behavior under extreme tribological conditions. *Materials Today Communications* 31 (2022) 103373
6. L. Lutterotti, S. Matthies, H.R. Wenk, MAUD (Material Analysis Using Diffraction): A user friendly Java program for Rietveld texture analysis and more. In *Proceedings of the 12th International Conference on Textures of Materials (ICOTOM-12)*, McGill University Montreal, Montréal, QC, Canada, 9–13 August 1999; pp. 1599–1604. Available online: <http://hdl.handle.net/11572/57067> (accessed on 28 July 2021)
7. D. Chateigner. *Combined Analysis*, Wiley-ISTE, 2010, pp. 496, ISBN: 978-1-118-62250-6
8. J. Vetter, A.O. Eriksson, A. Reiter, V. Derflinger, W. Kalss. Quo Vadis: AlCr-Based Coatings in Industrial Applications. *Coatings* 2021, 11, 344. <https://doi.org/10.3390/coatings11030344>
9. M. Meindlhuber, S. Klima, N. Jäger, et al. Stress-controlled decomposition routes in cubic AlCrN films assessed by in-situ high-temperature high-energy grazing incidence transmission X-ray diffraction. *Sci Rep* 9, 18027 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54307-7>



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Influence of fatigue load conditions on the structure and hardness of the welded butt joint of Inconel 800 HT sheets

J. Supernak^a, K. Skonieczny, T. Szeliga, M. Chowaniak, R. Czarnecki, A. Czupryński,
W. Kwaśny

^a Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Welding Engineering
email: jansupe194@student.polsl.pl

Abstract: Presentation of the TIG welding method and a description of its application in the chemical and energy industries, conducting macro and microstructure tests and performing Vickers hardness measurements.

Keywords: TIG welding, corrosion-resistant steels, nickel superalloys, Inconel, chemical, petrochemical, energy industries.

1. INTRODUCTION

The demand for materials resistant to corrosion and high temperature applies primarily to the chemical, energy, and petrochemical industries. The aviation and automotive industries are also interested in materials with such properties [1, 2].

Materials for use in corrosive and elevated-temperature atmospheres can be steel alloys with an austenitic structure Cr-Ni, with the addition of various alloying elements for increasing and strength properties. Nickel superalloys can also be used, whose mechanical properties at high temperature, creep strength, and oxidation resistance allow the use of these materials in the production of aircraft engines or gas turbines [4, 5, 6].

The superalloys in the nickel matrix are reinforced with a phase γ allow operation at temperatures ranging from 540 °C to 900 °C, and to increase strength, titanium, aluminium and niobium are added to the alloy [6, 7].

Austenitic chromium-nickel alloys, whose properties allow them to work in corrosive conditions and temperatures up to 1100 °C, are called Inconel.

The most common alloys are Inconel Alloy 600, Inconel Alloy 625, Inconel Alloy 718, and in very harsh working conditions, Inconel Alloy 800 [8, 9, 10].

The Inconel 800HT alloy is characterised by very good properties and is used in very difficult operating conditions, where damage to components is caused by stresses caused by high temperature and corrosion. Unfortunately, the welding of Inconel alloys causes some problems, similar to those associated with welding other nickel alloys. The main problems are the hot cracks in the weld and the heat-affected zone. This happens when the metal solidifies

and there is a liquid or brittle film, derived from the segregation of impurities or accompanying components such as sulphur, phosphorus, oxygen, or silicon. With approximately 0.025 % nitrogen, cracks can also be caused by an increase in weld brittleness due to the presence of sulphur, phosphorus, lead, zinc, tin, bismuth, or porosity of the weld. Intergranular corrosion can lead to cracks, which can be caused by inadequate heat treatment [2, 11, 12].

The welding method of Inconel alloys plays an important role because of the possibility of minimising the phenomenon of oxidation. The TIG welding method allows for the obtainment of an accurate weld and, during joining, the protection of the liquid metal of it from the uncontrolled entry of elements contained in the atmospheric air. Properly selected chemical composition of the binder used to make the welded joint, whose heat treatment temperature does not exceed 1065 °C, allows one to minimise or eliminate microcracks in the heat-affected zone. The flux applied to the samples during TIG welding allows to increase the voltage by about 15-53% and increases the heat supply and reduces the susceptibility to hot cracking during the TIG welding process [2, 3, 4, 5, 6, 13].

Structures made of Inconel alloys welded in the right way allow them to be operated for a long period of time in difficult working conditions. Material degradation is not as fast, and the lack of defects that can occur in the material after welding reduces repair costs and increases personnel safety. It is worth noting that the use of Inconel superalloys allows to reduce the weight of the installation with excellent strength properties [2, 4, 5, 10, 13].

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

2.1. The aim of the study

The purpose of the study was to determine the effect of fatigue load on the butt welded from Inconel 800HT alloy sheets connected by the TIG method with Termanit 617 filler material, subjected to many hours of operation at 700 °C.

2.2. Materials and methods

The basic material used in the investigation was a sheet of superalloy grade Inconel 800HT ASME B407, whose chemical composition is presented in Table 1 (sample not subjected to work). The chemical composition of a sample subjected to many hours of work is shown in Table 2.

The filler material used to make the connector was Termanit 617 ES ISO 18274-S Ni 6617 (NiCr22Co12Mo9), whose chemical composition is presented in Table 3.

Table 1. Chemical composition of a sample not subjected to work

Element	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Cu	Ti	Al	Fe
Percentage [%]	0.068	0.48	0.77	0.0002	20.64	31.36	0.09	0.44	0.47	45.32

Table 2. Chemical composition of the test sample at 700°C

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Co	Ti	Al	Fe
Percentage [%]	0.097	0.45	0.71	19.4	0.16	32.2	0.15	0.5	0.42	0.92

Table 3. Chemical composition of Termanit 617 filler material

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	W	Cu	Co	Ti	Al	Fe
Percentage [%]	0.05	<0.1	<0.1	0.003	0.001	22.1	8.7	54.9	0.4	<0.1	11.0	0.3	1.3	0.9

2.3. Metallographic test

The samples were included, then sanded, polished, and etched in aqua regia (HCl+HNO₃) to reveal the weld structure, the heat zone (SWC), and the parent material (MR). To assess the correctness of the fusion with respect to the native material, images were taken on an Olympus SZX stereoscopic microscope. Microscopic studies were carried out on a Nikon Eclipse MA 100 inverted microscope to reveal the microstructure and possible incompatibilities.

2.4. Hardness measurements

The microhardness test was performed on a Vickers Wilson MVD microhardness tester. The study was carried out to determine the microhardness in the individual zones of the joint. The test diagram is shown in Figure 1. The microhardness in the central part of the weld was measured from face to root - shown in the figure as red points, then the microhardness from the center of the weld to the base material was examined – green points in Figure 1. The microhardness of the welded joint was measured in the weld, in the fusion line, in the heat-affected zone (SWC) and in the base material.

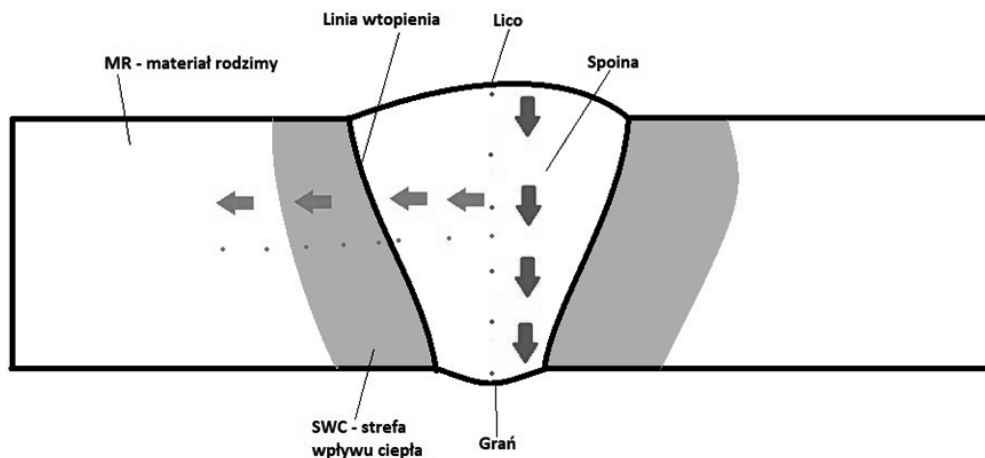


Figure 1. Diagram showing how to test microhardness

2.5. Chemical composition testing

The study of the chemical composition was carried out using the Phenom ProX electron microscope and the aim of the study was to determine the chemical composition in the individual parts of the welded joint. The chemical composition was measured in the middle of the weld, near the melting line, in the base material, in the grains and at their boundaries. A sample operated to determine the effect of work on the chemical composition of the joint was tested.

3. ANALYSIS OF RESEARCH RESULTS

3.1. Metallographic test results

The images obtained in the macrostructure study presented in Figure 2 showed a well-revealed structure of the welded joint. In the pictures you can see that there are no cracks, sticks, or voids.

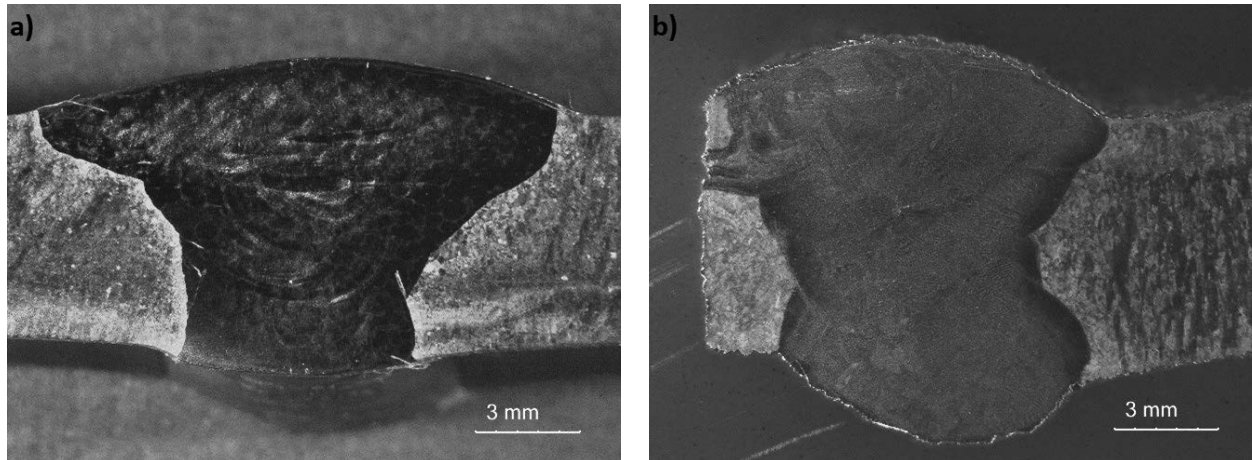


Figure 2. Macroscopic images: (a) untreated sample, (b) sample subjected to several hours of operation at 700 °C

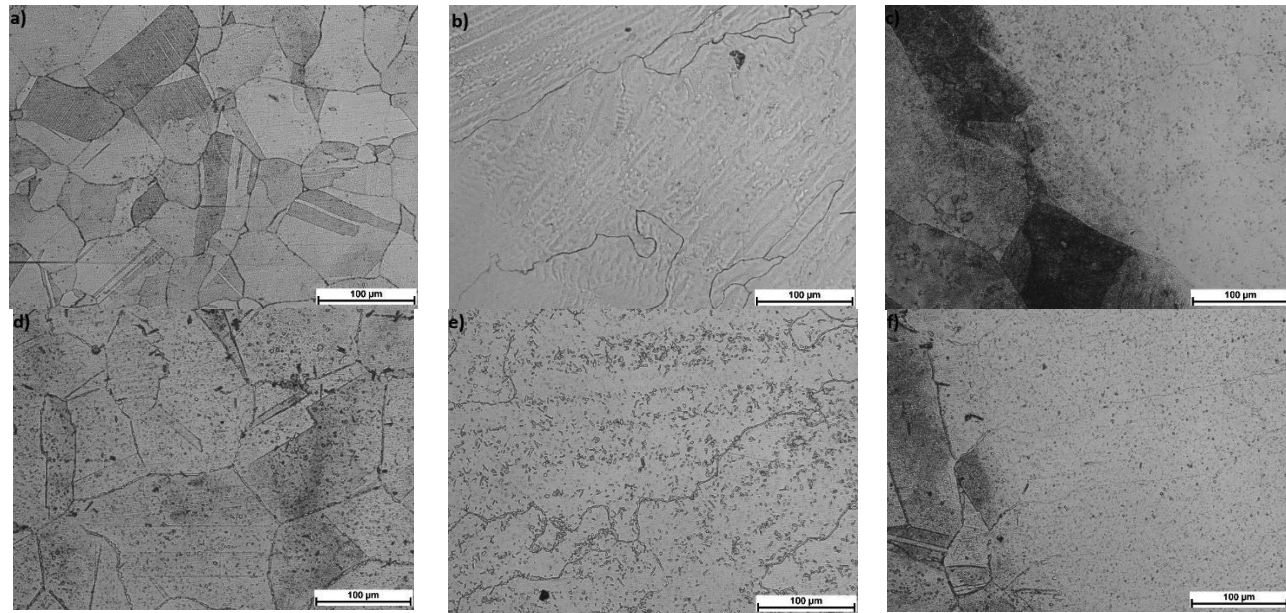


Figure 3. Macroscopic images at 200x magnification: a) base material – untreated sample, b) weld center – untreated sample, c) fusion line – untreated sample, d) base material – exploited sample, e) weld center – exploited sample, f) fusion line – exploited sample

The microstructure study showed that the base material has an austenitic structure with visible twinning, Figures 3a and 3d. The 3d figure shows the progressive degradation of the native material under the influence of long-term operation at 700 °C and the growth of grains.

For the central part of the weld, the operating temperature highlighted the grain boundaries (Figures 3b and 3e) and the signs of weld degradation. The grains in the heat-affected zone on the melt line were reduced by operation at 700 °C and the fusion line was discontinued (Figures 3c and 3f).

3.2. Microhardness measurement results

A microhardness test for a sample operated at high temperature, measured from the face towards the weld ridge, showed a decrease in the hardness of the face (Figure 4a). At the weld ridge for a sample operated at high temperature, the hardness was comparable to that of an unused specimen.

A hardness test in the centre of the sample from the centre of the weld to the material showed an overall decrease in hardness under operation at 700 °C.

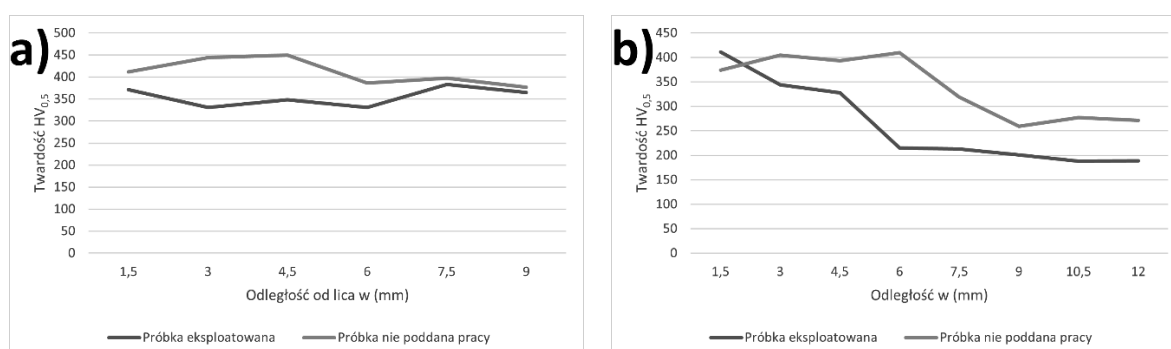


Figure 4. Diagram showing: a) hardness measured in the central part of the weld from the face towards the rot, and b) hardness measured from the centre of the weld to the base material.

3.3. Results of the chemical composition test

Examination of the chemical composition of the sample subjected to many hours of work did not show changes in the share of individual elements in the parent material and the heat affected zone. Measurements at the precipitation places indicate the separation of carbon and chromium, which may indicate the release of chromium carbides under the influence of high-temperature exploitation.

In the weld, there was a decrease in Ni, Cr, Co and Mo about 2-4%. On the other hand, the Fe content was reduced by approximately 11 % relative to its content in the filler material used to make the welded joint.

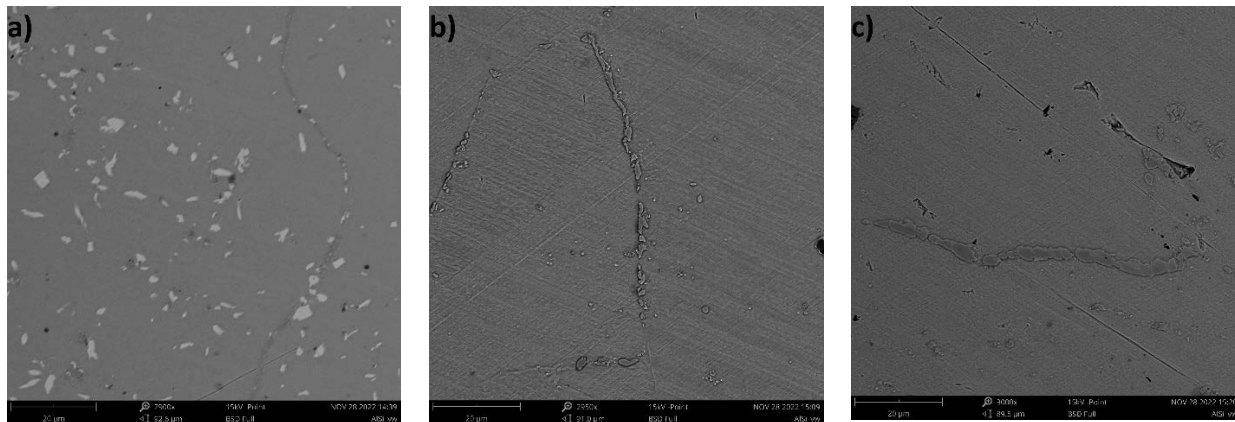


Figure 5. Photo of the exploited sample: a) weld magnification 930x, b) heat-affected zone magnification 2950x, c) parent material magnification. 3000x.

4. SUMMARY

Tests of Inconel 800HT alloy joints have shown that grain growth occurs in the exploited material under the influence of operation at 700 ° C and the microhardness is lower than in the untreated material. However, due to well-chosen welding parameters and the absence of welding incompatibilities, the joints made are of good quality. In the study of the chemical composition, a slight decrease in the content of iron, nickel, and chromium in the parent material and the heat-affected zone was detected. The macrostructure of the connectors was in line with expectations.

FUNDING

The research was carried out thanks to the funding of project-orientated education - PBL, in competition VIII under the Excellence Initiative – Research University programme. Project topic "Investigation of the structure and properties of selected welded joints used in technological installations for the petrochemical and chemical industries".

BIBLIOGRAPHY

1. Czupryński A., Podstawowe technologie spawalnicze w ćwiczeniach laboratoryjnych. Cz.1, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2019.
2. ESAB AB, Göteborg, Sweden Welding Duplex Stainless Steels – A Review Of Current Recommendations. Welding in the World volume 56, pages65–76 (2012).
3. Welding in the chemical industry. SVETSAREN, 2001, t.56, nr 2-3, s.68-72.
4. Adamiec P., Dziubiński J., Techniki wytwarzania: spawalnictwo, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1994.
5. Peruń G., Pila J., Kozuba J., Aircraft Systems, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015.
6. Ducki K.J., Mikrostrukturalne aspekty procesów odkształcania, wydzielania i umacniania w austenitycznym nadstopie Fe-Ni, Microstructural aspects of deformation, precipitation

- and strengthening processes in austenitic Fe-Ni superalloy, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010
7. Adamczyk J., Inżynieria wyrobów stalowych, Engineering of steel products, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
 8. Rathod, Dinesh W., Batish A., A-TIG welding process for enhanced-penetration in Duplex stainless-steel: effect of activated fluxes, 2010.
 9. L.Y. Xu, P. Zhu, H.Y. Jing, K. Guo, S.X. Zhong, Y.D. Han, Failure analysis of Incoloy 800HT pipe at high temperature, Engineering Failure Analysis 2013.
 10. Tong-Min Wu, Ching-Min Cheng Effects of Flux Precoating and Processs Parameter on Welding Performance of Inconel 718 Alloy TIG Welds, Journal of Materials Engineering and Performance 2014.
 11. Zalecki W., Łapczyński Z., High Temperature properties of Inconel 625 and Inconel 718 alloys, 2013.
 12. Hengst P., Horst B., Buchwalder A., Müller R., Development of a basic technology for multilayer electron beam cladding of Inconel 718 nickel-based alloy onto an austenic stainless steel, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 29 April 2022.
 13. Hernas A., Żarowytrzymałość stali i stopów. Cz. 1, Creep strength of steels and alloys, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Znaczenie standaryzacji z wykorzystaniem metody SMED na przykładzie przeprowadzonej optymalizacji procesu przezbrojenia

K. Szczyrba^a, M. Roszak^b

^a Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Studenckie Koło Naukowe Technologii Procesów Obróbki Ciepłej, email: kacpsc239@student.polsl.pl

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
email: marek.roszak@polsl.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki wdrożenia standaryzacji procesu przezbrojenia na całkowity czas procesu przezbrojenia. Projekt standaryzacji była wykonywany w ramach optymalizacji czasu przezbrajania z wykorzystaniem metody SMED w przedsiębiorstwie produkcyjnym XYZ produkującym produkty dla branży motoryzacyjnej. Porównano stan „przed” i „po” wdrożeniu zaproponowanych działań standaryzujących.

Abstract: The article presents the results of the implementation of standardization of the changeover process for the total time of the changeover process. The standardization project was underway as part of optimizing the changeover time using the SMED method in the XYZ manufacturing company producing products for the automotive industry. The state "before" and "after" the implementation of the proposed standardization measures was compared.

Słowa kluczowe: standaryzacja, przezbrojenie, optymalizacja czasu, SMED

1. WPROWADZENIE

Optymalizacja procesu produkcyjnego stanowi istotne działanie mające wpływ na kształtowanie produktywności przedsiębiorstw, jednak często zaniedbywana jest kwestia optymalizacji procesu przezbrojenia maszyn i urządzeń stanowiących komplementarną część procesu produkcyjnego. Przezbrojenie maszyn i urządzeń jest procesem, który ma bezpośredni wpływ na efektywność procesu produkcji, a jego optymalizacja pozwala na skrócenie czasu przezbrojenia i zwiększenie wydajności produkcji. Standaryzacja procesu przezbrojenia pozwala na skrócenie czasu przezbrojenia a tym samym na zwiększenie wydajności produkcji. Pomimo tego, przedsiębiorstwa często pomijają tę kwestię, co prowadzi do straty czasu.

Czas przezbrojenia jest jednym z najważniejszych aspektów zarządzania produkcją, ponieważ ma bezpośredni wpływ na efektywność i rentowność zakładu produkcyjnego. Przezbrojenie jest konieczne, gdy zmienia się rodzaj produktu lub jego specyfikację, w razie wystąpienia awarii lub podczas przeprowadzania konserwacji maszyn czy urządzeń.

W związku z tym, czas przebrojenia jest to czas, który upływa między zakończeniem produkcji jednej serii produktów a rozpoczęciem produkcji kolejnej serii [1].

Przebrojenie maszyn i urządzeń w zakładzie produkcyjnym ma znaczący wpływ na jego efektywność i rentowność, ponieważ skraca czas produkcji i obniża wydajność pracy. Oznacza to, że linia produkcyjna jest nieefektywnie wykorzystywana w czasie realizacji przebrojenia, co prowadzi do strat ekonomicznych. Dodatkowo, czas przebrojenia ma bezpośredni wpływ na czas realizacji zamówienia, czyli czas, który upływa od momentu złożenia zamówienia przez klienta do momentu dostarczenia zamawianego produktu.

Ważne jest, aby zarządzanie produkcją dotyczyło również minimalizacji czasu przebrojenia poprzez odpowiednie planowanie produkcji i optymalizację procesu przebrojenia. Aby to osiągnąć, należy przeprowadzić analizę procesu przebrojenia i określić operacje i działania, które mogą być usprawnione. Można to zrobić poprzez stosowanie elastycznych systemów produkcyjnych, automatyzację procesów oraz optymalizację procesu przebrojenia.

Marnotrawstwo czasu przebrojenia w koncepcji Lean Management jest jednym z siedmiu typów marnotrawstwa, które należy eliminować, aby poprawić efektywność i jakość produkcji. Dlatego ważne jest, aby ciągle analizować proces przebrojenia i poszukiwać sposobów na jego usprawnienie. Można to osiągnąć poprzez stosowanie elastycznych systemów produkcyjnych, automatyzację procesów oraz poprzez zastosowanie metod Lean Management takich jak SMED, która polega na skróceniu czasu przebrojenia poprzez odpowiednią organizację pracy w trakcie przebrojenia oraz odpowiednim przygotowaniem maszyn i urządzeń przed przebrojeniem [2,3].

Standaryzacja pracy jest ważnym elementem zarządzania przedsiębiorstwem, ponieważ polega na określeniu jednolitych wzorców postępowania, które mają na celu ujednoczenie sposobu wykonywania operacji przez pracowników. Dzięki temu, pracownicy są lepiej przeszkoleni, a procesy są bardziej efektywne i produktywne.

Standardy pracy opisują szczegółowy plan działania, a także narzędzia i przyrządy potrzebne do wykonania danej operacji. Są one opracowywane przez pracowników danego zakładu i stosowane tylko w tym zakładzie. Dzięki temu, standardy są dostosowane do specyficznych potrzeb i warunków danego zakładu, co zwiększa ich skuteczność [4].

Zastosowanie standaryzacji pracy przynosi wiele korzyści, takich jak [3]:

- skrócenie czasu adaptacji i przyswajania wiedzy przez nowych pracowników,
- zmniejszenie ryzyka wyprodukowania wadliwego wyrobu,
- skrócenie czasów wykonywania operacji,
- eliminacja czynności zbędnych.

Standaryzacja określa optymalną kolejność czynności przy wykonywanej danej operacji, bazując na doświadczeniach pracowników. Standardy powinny być regularnie aktualizowane i ulepszane, aby zapewnić oczekiwane korzyści. Tworzenie nowych i archiwizowanie starych standardów pozwala na utrzymanie historii i wykorzystanie jej w działaniach doskonalących. Dzięki temu, działalność przedsiębiorstwa jest stale ulepszana i dostosowywana do zmieniających się warunków rynkowych [5].

Standaryzacja powinna być stosowana w każdym obszarze działalności przedsiębiorstwa, takim jak produkcja, przygotowanie produkcji, administracja czy logistyka a także dotyczyć różnych operacji, takich jak montaż, przebrojenie, pomiary czy sprzątanie. Dzięki temu, wszystkie procesy przebiegają według określonych standardów, co zwiększa ich efektywność i ma wpływ na produktywność. W przypadku wystąpienia nieprawidłowości czy awarii maszyny, standaryzacja pozwala na szybkie i skuteczne rozwiązanie problemu, ponieważ możliwe jest sprawdzenie, czy postępowano zgodnie z wyznaczonymi standardami. Warunkuje

to, że przedsiębiorstwo jest lepiej przygotowane do radzenia sobie z trudnościami, co zwiększa jego stabilność i przewagę konkurencyjną [3].

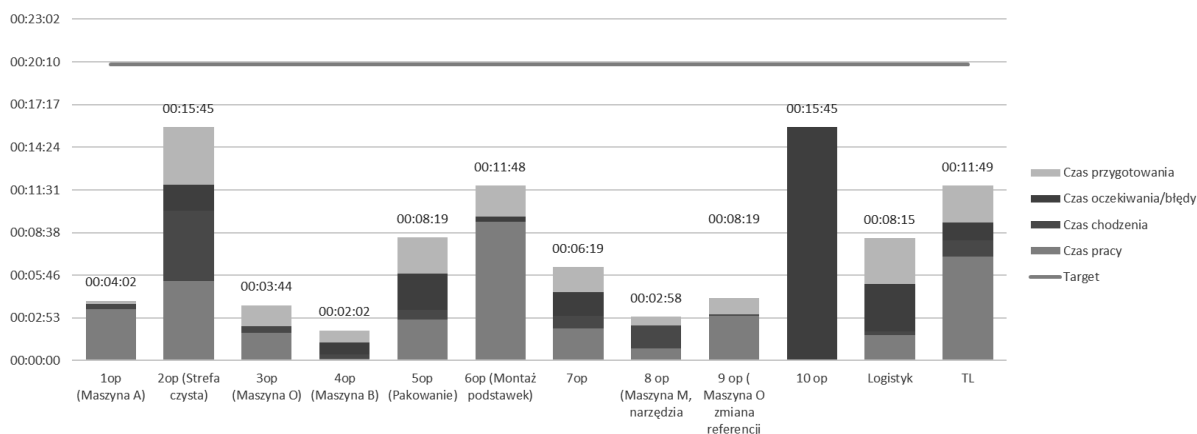
Podsumowując, standaryzacja pracy jest ważnym elementem zarządzania przedsiębiorstwem, ponieważ polega na określeniu jednolitych wzorców postępowania dla poszczególnych operacji, co ma na celu ujednoczenie sposobu wykonywania operacji przez pracowników.

2. PROJEKT STANDARYZACJI PROCESU PRZEBROJENIA

Przedsiębiorstwo XYZ specjalizuje się w produkcji amortyzatorów samochodowych. W celu skrócenia czasu przebrojenia oraz ujednoczenia przebiegu przebrojenia na półautomatycznej linii montażowej produktu końcowego, która jest obsługiwana przez 10 operatorów, logistykę i brygadziestę, zoptymalizowano proces przebrajania z wykorzystaniem narzędzi SMED. Celem optymalizacji było zwiększenie elastyczności i efektywności linii oraz eliminacja wahań czasu trwania przebrojenia spowodowanych brakiem stosowania jednolitych procedur podczas przebrojenia.

Na wykresie (rys. 1) przedstawiono całkowity czas przebrojenia linii przed optymalizacją – stan „przed”. Czasy przebrajania zmierzono przez nagranie każdego operatora kamerą i zmierzono czas trwania każdej czynności oraz określono jaki to był typ czynności (przygotowawcza, oczekiwanie/błędy, chodzenie, praca dodająca wartość przebrojeniu), co również zostało zaznaczone na wykresie.

Warto zwrócić uwagę jak wiele czasu poszczególni operatorzy poświęcali w trakcie operacji przebrojenia na czynności niedodające wartości a szczególnie dotyczy to czasów oczekiwania/błędów i przemieszczania się. Ponadto, zauważono, iż jeden operator maszyny nie brał udziału w przebrojeniu, a zakres pracy pomiędzy operatorami była nierównomiernie rozłożony, co stanowiło duży potencjał do poprawy dzięki zastosowaniu arkusza standaryzacyjnego.



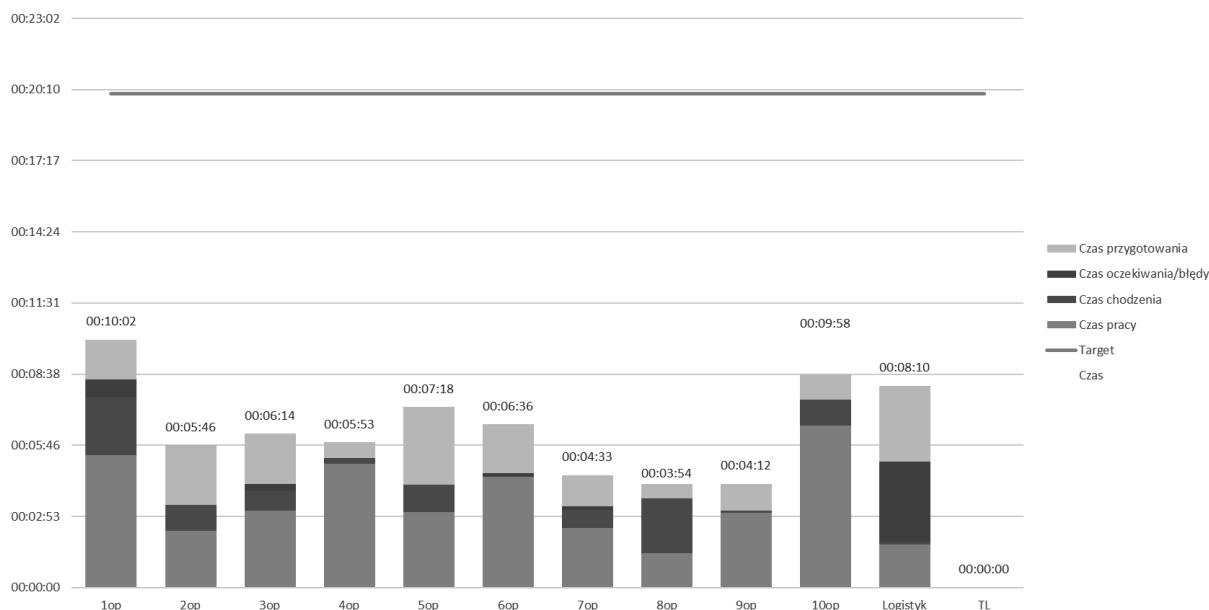
Rysunek 1. Udział rodzajów czynności wykonywanych w trakcie przebrojenia przez wszystkich operatorów przed optymalizacją (opracowanie własne) [6]

Figure 1. Proportion of types of activities performed during changeover by all operators before optimisation. (own elaboration) [6]

Standard przebrojenia (rys. 2) został opracowany celem eliminacji czynności takich jak błędy, oczekiwanie oraz nierówne rozłożenie pracą pomiędzy operatorami. W standardzie określono, jakie czynności powinien wykonać określony operator, co pozwala na uniknięcie potencjalnych błędów oraz powtarzania czynności. Równe rozłożenie obowiązków pozwala na zredukowanie całkowitego czasu przebrojenia. Również zdefiniowano, które czynności powinny być wykonane przed zatrzymaniem maszyn, co skraca czas przebrojenia wewnętrznego. Czas wymagany na wykonanie każdej czynności zdefiniowanej w arkuszu standaryzacyjnym jest wykorzystywany do kontrolowania wydajności procesu przebrojenia oraz pozwala na szybsze wykrycie ewentualnych nieprawidłowości [6].

Po implementacji opracowanego standardu przebrojenia, ponownie zmierzono czas trwania każdej czynności wykonywanej podczas procesu przebrojenia dla wszystkich operatorów, a także zidentyfikowano typ tych czynności. Na przedstawionym wykresie (rys. 3.) można zaobserwować redukcję całkowitego czasu trwania przebrojenia z 15 minut i 45 sekund do 10 minut i 2 sekund, co stanowi wartościową zmianę w procesie przebrajania o 38% dotychczasowego czasu.

Analiza procesu przebrajania po optymalizacji wykazała równomierne rozłożenie obciążenia pomiędzy operatorów oraz ograniczenie roli brygadzysty (oznaczonego jako TL) upoważnionego do nadzoru procesu. W wyniku eliminacji błędów operatorów oraz optymalizacji czasów oczekiwania, zwiększono efektywność procesu przebrajania. Czynności przygotowawcze wpływające na wąskie gardło przebrojenia wewnętrznego zostały przeniesione na etap zewnętrzny, a pozostałe czynności nie mające wpływu na całkowity czas przebrojenia są wykonywane przez operatorów podczas przebrojenia wewnętrznego.



Rysunek 3. Udział rodzajów czynności wykonywanych w trakcie przebrojenia przez wszystkich operatorów po optymalizacji. (opracowanie własne) [6]

Figure 3. Proportion of types of activities performed during changeover by all operators after optimisation. (own elaboration)[6]

STANDARD PRZEBROJENIA							
No.	Maszyna	Przebrojenie		Nr operatora	Ikony	Opis	Czas [min]
		Wew.	Zew.				
1	Maszyna A	X		1		Ustawienie wysokości stołu, wymiana tulei	5,00
2	Maszyna N		X	10		Przygotowanie sztuki do pomiaru testowego	2,50
3	Maszyna C		X	2		Przygotowanie wzorców NOK Komponentu A	1,50
4	Maszyna G		X	1		Przygotowanie paletek z Komponentem D nowej referencji	1,50
5	Maszyna L		X	6		Przygotowanie wzorców NOK Komponentu B	1,00
6	Maszyna L		X	6		Przygotowanie podstawek	3,00
7	Maszyna E	X		2		Wymiana przewodnika	0,50
8	Maszyna F	X		2		Wymiana przewodnika	0,50
9	Maszyna F	X		1		Zdemontowanie Komponentu E poprzedniej referencji z ramienia robota i pomiar dawki smaru	1,50
10	Maszyna I	X		L		Załadunek Komponentu C nowej referencji	3,00
11	Maszyna B	X		4		Usunięcie skrzyni poprzedniej referencji i podjechanie skrzynią z nową referencją komponentu B	1,00
12	Maszyna B	X		4		Wprowadzenie do panelu HMI liczby sztuk dla nowej referencji	0,25
13	Maszyna L	X		6		Wymiana podstawek w paletkach	6,00
14	Maszyna L	X		4		Zmiana wysokości chwytaka paletek	5,50
15	Maszyna K	X		7		Pomiary dawek cieczy	3,00
16	Maszyna L	X		7		Procedura sprawdzenia wzorców NOK Komponentu B w kontoli wizyjnej	0,50
17	Maszyna C	X		2		Zmiana referencji i załadunek wzorców NOK komponentu A	1,50
18	Maszyna G	X		1		Zmiana referencji i załadunek paletek z Komponentem D nowej referencji	1,00
19	Maszyna H	X		1		Pomiar koncentryczności	1,00
20	Maszyna O	X		3		Wymiana płyty, regulacja wysokości kolumny	4,00
21	Maszyna O	X		9		Zmiana referencji i drukowanie etykiet	4,50
22	Maszyna J	X		8		Wymiana szczęk	1,00
23	Maszyna M	X		8		Wymiana szczęk i środkowego narzędzia	2,00
24	Stanowiska kontroli końcowej	X		8		Przygotowanie narzędzi na stanowiskach kontroli jakości	1,50
25	Maszyna N	X		10	YY	Włożenie paletki z amortyzatorem do pomiaru testowego na linię, wymiana szczęk, zmiana rozstawu rolki	5,00
26	Maszyna N	X		10	YY	Odcięcie odcisku i pomiar	2,50
27	Maszyna P	X		7		Zmiana ilości gazu	1,00
28	Pakowanie	X		5		Wprowadzenie danych do systemu SAP i wypełnianie kart kontroli materiału	3,50
29	Pakowanie	X		5		Drukowanie kart kontroli materiału	2,50
Klucz:	Bezpieczeństwo / Ergonomia	Wąskie gardło CT	YY	Wąskie gardło CO	YY		
Stworzył:					Data:		
Podpis:							

Rysunek 2. Opracowany standard przebrojenia optymalizowanego procesu (opracowanie własne) [6]

Figure 2. Developed standard for changeover of the optimized process. (own elaboration) [6]

3. PODSUMOWANIE

Przeprowadzona w ramach projektu analiza po wprowadzeniu usprawnień w procesie przeobrażenia wykazała, że standaryzacja procesu oraz rozłożenie zadań między operatorami były kluczowymi elementami w optymalizacji przeobrażenia.

Standaryzacja procesu spowodowała, iż dla operatorów określono zakres czynności adekwatnie do rzeczywistych potrzeb, co zwiększyło efektywność przeobrażenia. Równomierne rozłożenie prac pomiędzy operatorami pozwoliło na to, aby każdy z nich specjalizował się w jakiejś części procesu, co miało istotny wpływ na zwiększenie efektywności przeobrażenia.

Uzyskano zwiększenie efektywności poddanego analizie procesu przeobrażenia oraz zminimalizowano ryzyko potencjalnego wystąpienia błędu podczas przeobrażenia stanowiska.

W wyniku przeprowadzonych działań uzyskano efektywne skrócenie czasu przeobrażenia o 38%.

LITERATURA

1. J. R. Henry; *Achieving lean changeover: putting SMED to work*. CRC Press, (2012).
2. B. Skotnicka-Zasadzień; P. Masoń; *Doskonalenie obiektów technicznych przy wykorzystaniu metody SMED*. Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie, Politechnika Śląska, 87, (2016).
3. A. Piasecka-Gąsuzak; *Poprawa innowacyjności i konkurencyjności polskich przedsiębiorstw przez zastosowanie koncepcji Lean Management*. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, (2013).
4. E. Pajak; *Zarządzanie produkcją: produkt, technologia, organizacja*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, (2021).
5. I. Masaki; *Kaizen: The key to Japan's competitive success*. McGraw-Hill/Irwin, (1986).
6. K. Szczyrba; *Optymalizacja czasu przeobrażenia automatycznej linii montażowej amortyzatora samochodowego z wykorzystaniem narzędzi SMED*, Praca inżynierska, Promotor dr hab. inż. M. Roszak, Prof. PŚ; Politechnika Śląska, (2022).



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Automatyzacja procesu cięcia laserem – kluczowe parametry optymalne grawerowania i cięcia przy zastosowaniu lasera CO₂

S. Szeja ^a, A. Zyzik ^a, M. Volkmer ^a, M. Bonek ^b

^a Student/ka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
email: szymsze085@student.polsl.pl

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

Streszczenie: W artykule opisano poszczególne parametry dobierane do efektywnego, skutecznego i optymalnego cięcia i grawerowania lasera, automatyzację procesu oraz sposoby zabezpieczeń tych urządzeń.

Abstract: The article describes the individual parameters selected for effective, efficient and optimal laser cutting and engraving, automation this process and ways to protect these devices.

Słowa kluczowe: Automatyka, robotyka, napęd, parametry, zabezpieczenia.

1. WSTĘP

Automatyzacja procesów produkcyjnych odgrywa coraz większą rolę w dzisiejszej przemyśle, przynosząc liczne korzyści w postaci zwiększonej efektywności, powtarzalności i precyzji. Wśród tych procesów, cięcie laserem wyłoniło się jako ważna technika o szerokim zastosowaniu w różnych branżach, takich jak przemysł metalowy, motoryzacyjny, elektroniczny i wiele innych.

Automatyzacja procesu cięcia laserem ma na celu wyeliminowanie czynników ludzkich i wprowadzenie zaawansowanych technologii sterowania, które umożliwią pełną kontrolę nad parametrami cięcia. To pozwala na osiągnięcie optymalnej precyzji, szybkości i jakości w produkcji. Wraz z rozwojem technologii laserowych i systemów sterowania, automatyzacja tego procesu staje się coraz bardziej zaawansowana i wszechstronna.

Niniejszy artykuł skupia się na kluczowych ustawieniach optymalnych do pracy urządzenia laserowego. Przedstawimy najważniejsze parametry do optymalizacji cięcia, omówimy rodzaje zabezpieczeń takich maszyn, a także przedstawimy wykorzystanie automatyki w obróbce laserowej.

1.1 Optymalne parametry pracy lasera

Parametry mocy i prędkości

Najważniejsze ustawienia to parametry mocy i szybkości. Zazwyczaj są one wyrażane w procentach podczas obróbki materiałów. Parametr mocy lasera opisuje moc wyjściową lasera, gdzie 100% oznacza maksymalną moc. Grawerowanie drewna lub pieczętek wymaga większej mocy lasera, natomiast mniejsze wartości są odpowiednie dla materiałów takich jak papier. Parametr szybkości lasera opisuje prędkość ruchu głowicy lasera. Duże prędkości prowadzą do krótkich czasów ekspozycji, a niskie prędkości powodują długie czasy ekspozycji. Na przykład, w przypadku grawerowania materiałów w dużym formacie, zaleca się korzystać z szybkości pomiędzy 80 a 100%, podczas gdy przy grawerowaniu szczegółowych zdjęć na drewnie prędkość nie powinna przekraczać 10%. Ustawienie to również wpływa na jakość cięcia laserowego. Warto zauważyć, że szybkość cięcia i grawerowania nie są porównywalne, a proces cięcia jest wolniejszy niż grawerowanie[1].

Parametry PPI i częstotliwość cięcia

Parametr PPI (pulses per inch) określa liczbę impulsów lasera przypadających na cal podczas procesu grawerowania. Aby osiągnąć optymalne rezultaty, wartość parametru PPI powinna być równa lub być wielokrotnością parametru DPI, który został wybrany dla ustawień druku. Jednostka DPI (dots per inch) opisuje poziom szczegółowości kształtu obrazu w urządzeniach sterowanych komputerowo do cięcia i grawerowania. Wyraża gęstość punktów obrazu, które można uchwycić, gdzie ich środki pozostają w równych odległościach od siebie, tworząc macierz rozmieszczoną w rzędach i kolumnach. W nowoczesnych laserach ustawienia PPI automatycznie dostosowują się do ustawień DPI[2].

W przypadku procesu cięcia, istotnym parametrem jest częstotliwość, wyrażana w hercach (Hz), czyli liczbie impulsów lasera na sekundę. Częstotliwość ma bezpośredni wpływ na temperaturę cięcia. Dla lasera CO₂, wartość tego parametru może wynosić od 1000 do 60 000 Hz. Aby uzyskać gładką krawędź podczas cięcia np. akrylu, potrzebna jest wyższa temperatura, dlatego wartość częstotliwości powinna wynosić co najmniej 5000 do 20 000 Hz. Z drugiej strony, przy cięciu drewna, konieczna jest niska częstotliwość 1000 Hz, aby uzyskać jak najjaśniejszą krawędź cięcia.

Parametr przejść

Parametr przejść to jedna z kluczowych wartości ustawień cięcia laserowego, która określa, jak dokładnie laser przecina materiał. Odnosi się do liczby przejść, jakie laser wykonuje wzdłuż tej samej linii cięcia, zanim materiał zostanie całkowicie przecięty.

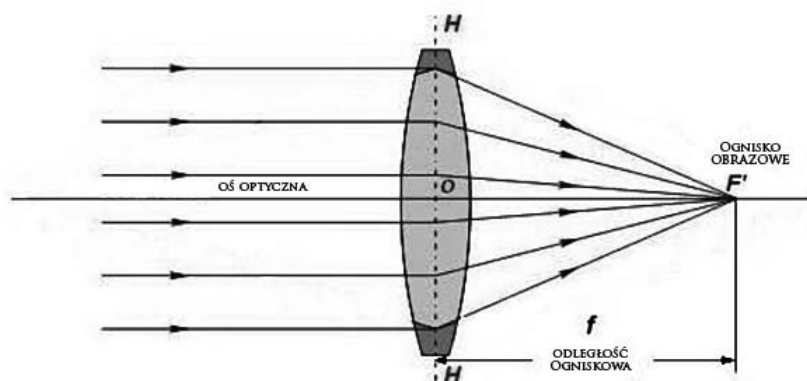
Wartość parametru przejść jest regulowana w zależności od rodzaju i grubości materiału, który jest cięty, a także od mocy i prędkości lasera. Zazwyczaj, im grubszy materiał, tym większa liczba przejść jest wymagana przy niskiej mocy i wysokiej szybkości, aby uzyskać czyste i dokładne cięcie. Dobrze dobrany parametr przejść może pomóc w uniknięciu zniekształceń materiału i zapobiec zacięciom lub przypaleniom na krawędziach ciętego materiału. Dlatego też ważne jest, aby dostosować ten parametr w sposób odpowiedni do każdego rodzaju materiału.

Parametr Air Assist

Air Assist to system w laserowych maszynach do cięcia i grawerowania, który wdmuchuje sprężone powietrze wokół obszaru, który jest aktualnie przetwarzany przez laser. Głównym celem Air Assist jest zapobieganie gromadzeniu się pyłu i zanieczyszczeń na powierzchni materiału, który jest obrabiany przez laser. Jest to szczególnie ważne w przypadku materiałów, takich jak drewno, papier i tworzywa sztuczne, gdzie nagrany materiał może topić się lub rozpuszczać, co utrudnia cięcie lub grawerowanie. Air Assist może również chronić soczewkę laserową przed uszkodzeniem, które może być spowodowane przez zanieczyszczenia lub pył osadzający się na powierzchni soczewki.

Napęd silnikowy lasera

Napęd silnikowy lasera jest jednym z kluczowych elementów ploterów laserowych CO₂ o małej i średniej mocy (50-400 W). Odpowiednie ustawienie ogniskowej jest niezwykle istotne dla jakości i skuteczności cięcia oraz grawerowania materiałów. Istnieje kilka metod na ustawienie ogniskowej do uzyskania optymalnej obróbki.



Rysunek 1. Schemat ogniskowania wiązki laserowej [3].

Pierwszym sposobem regulacji ogniskowej jest ręczne dostosowanie położenia soczewki ogniskującej. W przypadku ploterów laserowych z napędem silnikowym, zazwyczaj znajduje się ona w ruchomym modułowym bloku ogniskującym. Dzięki temu można precyzyjnie kontrolować położenie soczewki, co umożliwia dostosowanie ogniskowej do różnych grubości materiałów. Ręczna regulacja wymaga jednak czasu i precyzji, dlatego często stosuje się bardziej zaawansowane metody.

Kolejną metodą jest automatyczna regulacja ogniskowej za pomocą czujnika wysokości – czujnik indukcyjny lub ultradźwiękowy. W tym przypadku urządzenie wykorzystuje czujnik do pomiaru odległości między soczewką a powierzchnią materiału. Na podstawie tych pomiarów napęd silnikowy przemieszcza moduł ogniskujący, aby utrzymać optymalną ogniskową. Ta metoda pozwala na dynamiczne dostosowanie ogniskowej podczas cięcia lub grawerowania, co przekłada się na lepszą jakość i dokładność obróbki. Czujniki te są odporne na warunki środowiskowe takie jak wilgoć czy zakurzenie. Wadą czujników indukcyjnych niemożliwość wykrywania materiałów niemetalicznych, co wymaga zastosowania odpowiedniej metalicznej płytki przy każdej obróbce takiego materiału, np. tworzywa sztucznego czy drewna[3].

Innym podejściem jest automatyczne rozpoznawanie grubości materiału. W tym przypadku urządzenie wykorzystuje czujniki lub kamery, aby dokładnie zmierzyć grubość materiału przed przystąpieniem do cięcia. Na podstawie tych informacji napęd silnikowy dostosowuje ogniskową, aby osiągnąć optymalne wyniki. Ta metoda jest szczególnie przydatna przy obróbce materiałów o różnej grubości na jednym arkuszu.

Niektóre plotery laserowe CO₂ posiadają także funkcję automatycznego ustawiania ogniskowej na podstawie zdefiniowanych parametrów. Użytkownik może określić parametry takie jak grubość materiału, rodzaj materiału, rodzaj obróbki itp., a urządzenie automatycznie dobierze odpowiednie ustawienia ogniskowej i napędu silnikowego. Ta funkcja ułatwia obsługę plotera i pozwala zaoszczędzić czas przy zmianie materiałów.

Warto zaznaczyć, że wybór metody regulacji ogniskowej zależy od indywidualnych preferencji i potrzeb użytkownika. Każda z wymienionych metod ma swoje zalety i może być bardziej lub mniej odpowiednia w zależności od konkretnego zastosowania. Dlatego należy dokładnie poznać możliwości swojego plotera laserowego CO₂ i dostosować metodę regulacji ogniskowej do swoich potrzeb.

1.2 Zabezpieczenia lasera

Do zabezpieczania laserów przemysłowych można używać różnych rodzajów aparatów zabezpieczających elektrycznych. Ostateczny wybór zależy od konkretnego typu lasera, jego mocy, rodzaju promieniowania, wymagań bezpieczeństwa oraz lokalnych przepisów i norm.

Oto kilka przykładów aparatów zabezpieczających elektrycznych, które mogą być stosowane w przypadku laserów przemysłowych:

- **Przełączniki bezpieczeństwa:** Są to urządzenia elektromagnetyczne, które monitorują działanie lasera i reagują w przypadku wykrycia niebezpiecznej sytuacji. Przełączniki bezpieczeństwa mogą wyłączać zasilanie lasera w przypadku awarii, przekroczenia dopuszczalnych poziomów mocy lub wykrycia niepowołanego dostępu[7].
- **Czujniki optyczne:** Czujniki optyczne mogą być używane do monitorowania poziomu światła lasera lub promieniowania i reagowania w przypadku przekroczenia ustalonych limitów. Na przykład, jeśli poziom mocy lasera przekracza bezpieczne wartości, czujnik optyczny może wyzwolić alarm lub wyłączyć zasilanie lasera[7].
- **Układy kontroli i monitorowania:** Laserowe systemy przemysłowe często wykorzystują zaawansowane układy kontroli i monitorowania, które obejmują zabezpieczenia elektryczne. Mogą to być na przykład układy zabezpieczające prądowe, napięciowe lub temperaturowe, które chronią laser przed przeciążeniem lub uszkodzeniem[7].
- **Układy awaryjnego wyłączenia:** W przypadku sytuacji awaryjnych, takich jak przekroczenie dopuszczalnych poziomów promieniowania laserowego lub nagłej utraty kontroli nad laserem, stosuje się układy awaryjnego wyłączenia. Te układy mogą być wyposażone w przyciski awaryjnego wyłączenia lub czujniki bezpieczeństwa, które w przypadku zagrożenia natychmiast wyłączają zasilanie lasera[6].

Ważne jest, aby w przypadku zabezpieczania laserów przemysłowych konsultować się z producentem lasera lub specjalistą ds. bezpieczeństwa laserowego, aby dobrać odpowiednie aparaty zabezpieczające elektryczne, które spełniają wymagania bezpieczeństwa i przepisy obowiązujące w danym miejscu.

1.3 Wykorzystanie automatyki w obróbce laserowej

W przypadku obróbki laserowej, automatyka i robotyka są szeroko wykorzystywane do sterowania i kontrolowania procesu oraz manipulacji materiałami. Najpopularniejszymi przykładami łączącymi te dwie dziedziny są między innymi[4]

- **Sterowanie procesem**, gdzie automatyka i robotyka stosowana jest do monitorowania oraz sterowania parametrami obróbki, takimi jak moc lasera, prędkość przemieszczania się wiązki czy też czas trwania impulsów. Systemy automatyczne kontrolują te parametry aby zapewnić dokładność oraz powtarzalność procesu obróbki[5].
- **Manipulacja materiałami**, w której to roboty przemieszczają i pozycjonują przedmioty, które poddane są działaniu lasera. Umożliwia to precyzyjne i zautomatyzowane przetwarzanie. Roboty wyposażone są w narzędzie chwytające, które umożliwiają im trzymanie i obracanie przedmiotów w trakcie obróbki[4].
- **Programowanie ruchu** – w celu sterowania robotem w trakcie obróbki laserowej, konieczne jest programowanie jego ruchów, z pomocą napisanych programów, które określają ścieżki ruchu robotów trzymających materiały obrabiane. To wszystko ma na celu zapewnienie precyzyjnego prowadzenia wiązki laserowej w odpowiednie miejsce na obrabianym obiekcie[4].
- **Integracja systemów**, która umożliwia nam efektywną obróbkę laserową sterując laserem, systemami wizyjnymi, sensorami oraz systemami chłodzenia i odsysania, które często zintegrowane jest w jedno kompleksowe urządzenie zarządzane przez systemy automatyki[4].

Wszystkie te aspekty automatyzacji i robotyki mają na celu poprawę wydajności, precyzji oraz powtarzalności procesu. Pozwalają nam również na bardziej elastyczne, bezpieczniejsze i zautomatyzowane podejście do przemysłowych zastosowań, gdzie obróbka laserowa jest szeroko stosowana, takich jak, cięcie, znakowanie grawerowanie czy wydrążanie.

PODZIĘKOWANIE

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

LITERATURA

1. Parametry cięcia: <https://www.troteclaser.com/pl/pomoc-i-wsparcie/centrum-wsparcia/definicja-parametry-lasera>
2. Parametr DPI: <https://pl.wikipedia.org/wiki/Dpi>

3. Sposoby ustawiania ogniskowej w ploterach laserowych CO2 (50-400W):
https://atmsolutions.pl/newsroom/szczegoly/sposoby_ustawiania_ogniskowej_w_ploterach_laserowych_co2_malych_i_srednich_mocy_50_400w
4. Automatyka w obróbce laserowej: http://www.par.pl/2005/files/06-05_artykul2p.pdf
5. Wykorzystanie automatyki: <https://controlengineering.pl/zrobotyzowane-procesy-ciecia/>
6. Zabezpieczenie obwodów: <https://utrzymanieruchu.pl/zabezpieczenie-obwodow-istotna-kwestia-dla-konstruktorow-maszyn/>
7. Bezpieczeństwo w przemyśle:
<https://automatykaonline.pl/Artykuly/Bezpieczenstwo/Bezpieczenstwo-w-przemysle>

Wpływ modyfikacji narzędzi na czas przebrojenia

R. Trepia^a, M. Roszak^b

^a Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, student studiów drugiego stopnia, Studenckie Koło Naukowe Technologii Procesów Obróbki Ciepłej, email: rafatre774@student.polsl.pl

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki analizy dotyczącej wpływu modyfikacji narzędzi używanych podczas przebrajania tokarek rewolwerowych. W celu analizy czynności przebrojenia posłużono się metodologią SMED. W artykule przedstawiono wyniki badań czasu przebrojenia przed wprowadzeniem zmian i po wprowadzeniu zmian.

Abstract: The article describes the impact of tool modifications used during turret lathes changeover. In order to analyze the changeover activities, the SMED methodology was used. The article presents the changeover time before and after the changes.

Słowa kluczowe: odchudzona produkcja, przebrojenie, SMED, system produkcyjny przemysł 4.0, ciągłe doskonalenie

1. WSTĘP

Czas czwartej rewolucji przemysłowej, charakteryzuje się wdrażaniem działań mających wpływ na zwiększenie wydajności procesów produkcyjnych. W celu zwiększenia wydajności procesów produkcyjnych, należy skupić się na kulturze pracy i automatyzacji procesów. Aby poprawić standard pracy w przedsiębiorstwach produkcyjnych, należy stosować odpowiednie metody oraz narzędzia, które powinny wynikać z przyjęcia filozofii postępowania określanej mianem Lean.

W niniejszym artykule scharakteryzowano koncepcję Lean oraz narzędzia wykorzystywane w realizacji projektów dotyczących przebrojeń.

Przebrojenia są nieodłącznymi czynnościami podczas procesu produkcji, w poniższym artykule przedstawiono wyniki projektu dotyczącego wpływu implementacji modyfikacji podczas przebrajania na czas przebrojenia.

2. KONCEPCJA LEAN

Lean Manufacturing, czyli odchudzona produkcja ma na celu wzrost produktywności

i redukcje MUDY, czyli strat. Lean jest odpowiedzią na japoński system produkcyjny Toyoty (TPS - TOYOTA PRODUCTION SYSTEM), który został wprowadzony po II Wojnie Światowej w fabryce Toyoty w Japonii. Sposób wykonania produktu powinien charakteryzować się jak największą wartością dodaną VA (ang. Value Added). Wartość dodana to wartość, dzięki której przedsiębiorstwo uzyskuje zysk. Ponadto poprzez wdrożenie szczupłej produkcji w przedsiębiorstwie produkcyjnym, zwiększa się standard pracy poprzez zwiększenie efektywności pracowników. Filozofia Lean obejmuje wiele różnych technik i metod, a jedną z podstawowych koncepcji jest KAIZEN, czyli ciągłe doskonalenie [1,2].

Odchudzona produkcja jest wymagającą koncepcją w zakresie jej wdrożenia w organizacjach, oparta o zaangażowanie całego zespołu. Zasadniczym problemem stanowi powołanie odpowiedniej osoby odpowiedzialnej za wdrażanie tej filozofii w przedsiębiorstwie. Osoba ta musi posiadać zdolności przywódcze i musi rozumieć istotę filozofii Lean, w tym to, iż Lean Manufacturing zawiera wiele metod i narzędzi, a samo ich wdrożenie nie wystarcza dla osiągnięcia odpowiednich celów związanych z wdrożeniem koncepcji Lean. Przedsiębiorstwa produkcyjne powinny kierować się koncepcją Lean Manufacturing, a wdrażając Lean w przedsiębiorstwie, należy tworzyć scenariusze dotyczące zmian w oparciu o zaangażowanie i wiedzę pracowników niższego szczebla. Częstym błędem jest niepotrzebne zwalnianie pracowników z powodu wdrażania odchudzonej produkcji. Filozofia Lean nie polega na zmniejszaniu siły roboczej, ale na budowaniu kultury jakości pracy, czego oczekiwanym rezultatem jest wzrost zysku przedsiębiorstwa [3].

3. PROCES PRZEBRAJANIA

Poprzez przebrojenie maszyny rozumie się ogół czynności jakie powinien wykonać operator maszyny w celu dostosowania jej do rozpoczęcia kolejnej zaplanowanej operacji. Zakres przebrajania może obejmować zmianę lub korektę w zakresie struktury maszyny, zmiany parametrów procesu.

Przebrojenie jest marnotrawstwem i nie stanowi wartości procesu produkcyjnego, co zgodnie z filozofią Lean, rozumiane jako strata należy ograniczać. Przebrojenia nie można całkowicie wyeliminować. Należy więc odpowiednio zoptymalizować czynności przebrojenia, aby skrócić ich czas do niezbędnego minimum. Zakresy przebrojenia są zróżnicowane, co ma wpływ na długość ich czasu realizacji. Należy je wystandaryzować na tyle ile jest to możliwe. Pracownicy, którzy wykonują czynności przebrojenia powinni posiadać kwalifikacje zależne od charakterystyki przebrojenia [4].

4. METODOLOGIA SMED

Metoda SMED (*ang. Single Minute Exchange of Die*) obejmuje optymalizację czasu przebrojenia. Metoda ta pierwotnie swoje zastosowanie miała w Japonii, skąd się wywodzi. Została zainicjowana przez Shigeo Shingo, który skrócił czas ustawiania 1-tonowej prasy z 4 godzin do półtorej godziny, a po wielu warsztatach SMED, udało się czas ten skrócić do 3 minut. Kolejno, metodologia ta została wdrożona przez Shigeo Shingo w Toyocie. SMED rozumiany jest jako skróceniu czasu przebrajania do poniżej 10 minut [5].

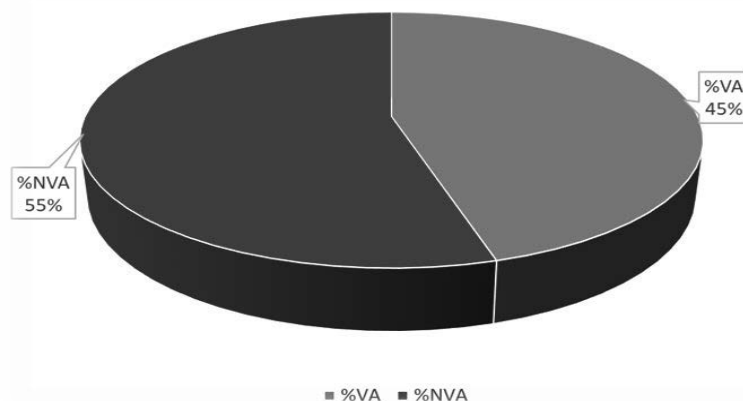
Metodologia SMED składa się z czterech etapów. Dla etapu zerowego czynności jakie należy przeprowadzić należy nagranie filmu, przedstawiającego czynności przebrojenia. Na

podstawie pozyskanego materiału należy przeanalizować wszystkie czynności operatorów, poprzez spisanie ich. Kolejno w etapie pierwszym należy dokonać podziału na czynności wewnętrzne i zewnętrzne. Czynności zewnętrzne to czynności, które mogą być wykonywane podczas uruchomienia maszyny. Czynności wewnętrzne to czynności, które muszą być wykonywane podczas wyłączenia maszyny. W etapie drugim należy dokonać transformacji czynności. Czynności wewnętrzne, które mogą być wykonywane podczas działania maszyny należy zmieniać na czynności zewnętrzne. Ostatnim trzecim etapem jest etap, w którym należy wprowadzić udoskonalenia dla czynności wewnętrznych. Z wyżej wymienionych etapów metodologii SMED nie należy pomijać żadnego, ponieważ efekt może nie być odpowiednio zadawalający [5-7].

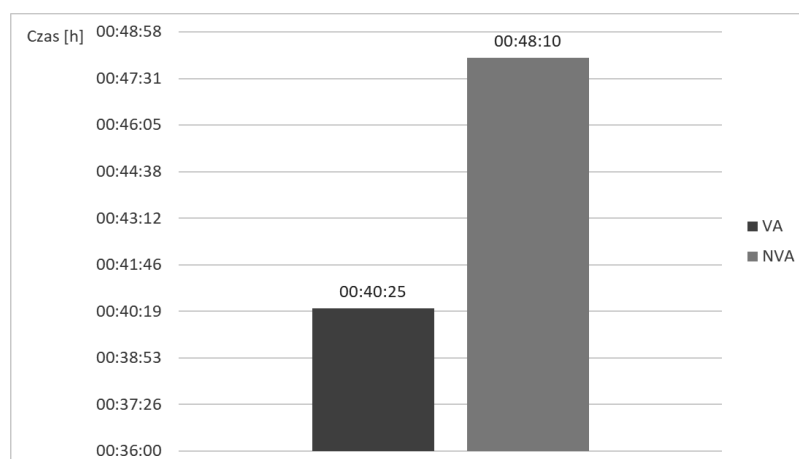
5. ANALIZA PROCESU PRZEBROJENIA PRZED MODYFIKACJAMI

Przebrojenie, którego dotyczyła analiza zostało wykonane w zakładzie XYZ w grudniu 2022 roku. Zakład zajmuje się produkcją tłoczków do amortyzatorów, stanowisko, na którym było analizowane przebrojenie, zawierało dwie tokarki rewolwerowe. Tokarki były ze sobą zsynchronizowane i obie zawierały sześć wrzecion, lecz miały zamontowane inne narzędzia. Optymalizacja przebrojenia była konieczna, ponieważ powodowała wąskie gardło w całym procesie produkcyjnym. W celu optymalizacji czasu przebrojenia, posłużono się metodologią SMED. W zakładzie zorganizowano warsztat SMED i postępowano zgodnie z metodologią [8].

Poniżej przedstawiono wyniki analiz dla procesu przebrojenia przed modyfikacjami (Rys. 1,2) [8].



Rysunek 1. Udział procentowy wartości dodanej dla procesu przebrajania dla stanu pierwotnego (opracowanie własne)[8]

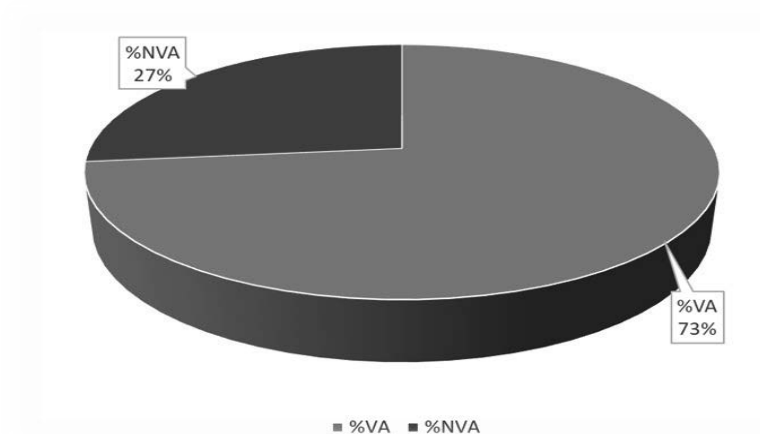


Rysunek 2. Czas całkowity dla czynności dodających wartość i nie dodających wartości dla stanu pierwotnego procesu przeobrażania (opracowanie własne)[8]

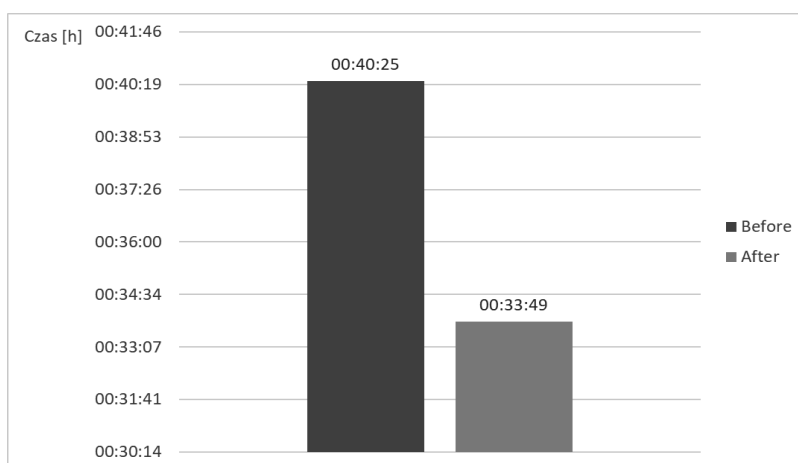
Z powyższych wykresów (Rys. 1,2) wynika, że przebrojenie w stanie pierwotnym zawierało więcej czynności, które nie stanowiły wartości dodanej. Ponadto każda czynność podczas przeobrażenia, była czynnością wewnętrzną, ze względu na specyfikę maszyn i przyjęte referencje [8].

6. ANALIZA PROCESU PRZEBRAJANIA PO MODYFIKACJACH

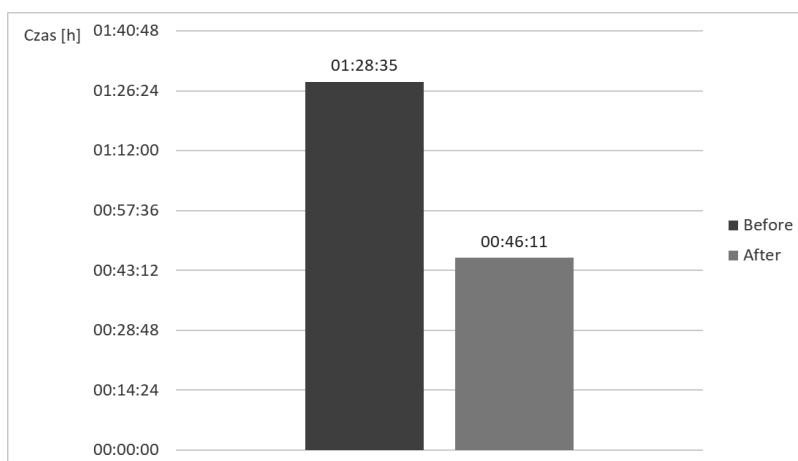
W celu optymalizacji czasu przeobrażenia, zoptymalizowano narzędzia, których używano podczas przeobrażenia. Wystandaryzowano połączenia śrubowe tak aby ustawiacz nie musiał dobierać kluczy dla narzędzi tokarskich. Dodano specjalne zderzaki na suportach, tak aby ustawiacz mógł od nich odmierzać długość, na którą ma przesunąć nóż skrawający. Pierwotnie ustawiacz musiał według uznania dobrać punkty orientacyjne i odpowiednio ustawić czujnik zegarowy, za każdym razem ustawiacz robił to inaczej. W wyniku zamontowania zderzaków na suportach, ustawiacz za każdym razem za pomocą suwmiarki jest w stanie odmierzyć określoną w znacznie krótszym czasie. Dodatkowo wdrożono specjalne kasety narzędziowe, które zawierały odpowiednio ustawione (pod każdą referencją) noże tokarskie (nóż tokarski do planowania). Ponadto zastosowano również, rozwiązania wypracowane w ramach wdrożenia zasady 5S. Dodano specjalny stół na narzędzia tak, aby były one uporządkowane, a także dodano uchwyty na pistolet ze sprężonym powietrzem. Poniżej zostały przedstawione wyniki analiz dla przeobrażenia po wprowadzonych modyfikacjach (Rys.3-5) [8].



Rysunek 3. Udział procentowy wartości dodanej dla procesu przetwarzania dla stanu po zmianach (opracowanie własne)[8]



Rysunek 4. Czas całkowity procesu przetwarzania dla stanu po zmianach (opracowanie własne)[8]



Rysunek 5. Porównanie czasów łącznych procesu przetwarzania dla stanu pierwotnego i po zmianach (opracowanie własne)[8]

Z powyższych wykresów (Rys. 3-5) wynika, że czas przebrojenia znacząco uległ poprawie. Różnica pomiędzy stanem pierwotnym i po modyfikacjach narzędzi wynosi: 42,24 minuty, czyli 52%. W wyniku zastosowania zderzaków i kaset narzędziowych czas który ustawiacz przeznaczył na korekty (dwie korekty) wyniósł 50 [s]. W stanie pierwotnym procesu przeobrażania ustawiacz na korekty (dziewięć korekt) poświęcił 5 [min] 8 [s], dziewięć korekt powodowało szereg innych czynności, których łączny czas wynosił 17 [min] 51 [s] [8].

7. PODSUMOWANIE

W wyniku realizacji projektu dotyczącego procesu przeobrażania i wdrożonym modyfikacjom uzyskano znaczącą poprawę w postaci redukcji czasu przebrojenia. Dla analizowanego przebrojenia, głównym problemem był brak rozwiązań, które umożliwiłyby sprawniejszą wymianę noży tokarskich. Dzięki przeprowadzonemu warsztatowi SMED, można było określić, co należy zmienić. Następnie w wyniku przeprowadzonej analizy udowodniono, iż zastosowane modyfikacje, mają wpływ na zwiększenie w procesie ilości czynności z wartością dodaną, a zmniejszają czynności nie dodających wartości podczas przebrojenia. W wyniku wprowadzonych zmian uzyskano redukcję czasu przeobrażania o 52%.

LITERATURA

1. J. P. Womack; D. T. Jones; Lean thinking – szczupłe myślenie. ProdPress.com, Wrocław (2008).
2. C. Wiśniewski; Wpływ wdrożenia zasad Lean Manufacturing na efektywność i jakość produkcji. Problemy eksploatacji (2010).
3. A. Grycuk; Bariery w stosowaniu koncepcji lean management. Kwartalnik Nauk o Przedsiębiorstwie. 40, 3, (2016).
4. K. Kufel; Optymalizacja modelowania przebrojeń w procesie produkcyjnym, Przedsiębiorstwo we współczesnej gospodarce-teoria i praktyka. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 2.21, (2017).
5. S. Shingo; A. Dillon; A revolution in manufacturing: the SMED system., Routledge, (2019).
6. M. Kruczek; Z. Żebrucki; Wykorzystanie techniki SMED w usprawnieniu procesu produkcyjnego, Logistyka 2, (2012).
7. B. Ulutas; An application of SMED Methodology, International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering 5.7, (2011).
8. R. Trepiak; Optymalizacja czasu przebrojenia linii technologicznej obróbki skrawaniem z wykorzystaniem metodologii SMED, Praca inżynierska, promotor dr hab. inż. M. Roszak, Prof. PŚ, Politechnika Śląska, (2022).



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Wpływ składu chemicznego na przemianę monotektoidalną stopów Zn-Al

A. Trojackska^a, K. Sakowski^b, M. Szafran^c, K. Trojackska^b, M. Krupiński^d, B. Krupińska^d,
W. Borek^d

^a Politechnika Śląska, Wydział Chemiczny, Chemia

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Inżynieria Materiałowa

^c Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Inżynieria Ogólna

^d Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, 44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18a, email: mariusz.krupinski@polsl.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono wpływ składu chemicznego na kinetykę krystalizacji oraz temperaturę przemiany monotektoidalnej w stopach Zn-Al. Badania oparto na komercyjnym stopie ZnAl₄Cu₁ oraz stopie o zmodyfikowanym składzie chemicznym dodatkiem Mg. Analizę termiczno-derywacyjną wykonano na urządzeniu UMSA MT-5 (Universal Metallurgical Simulator and Analyzer). Wykonano również badania mikrostruktury z zastosowaniem mikroskopii świetlnej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM). Modyfikacja składu chemicznego spowodowała zmiany w temperaturze przemian zachodzących w stopie.

Abstract: In the work, the influence of the chemical composition on the kinetics of crystallization and the temperature of the monotectoid transformation of Zn-Al alloys was obtained. The research was based on a commercial ZnAl₄Cu₁ alloy and an alloy with the addition of Mg as a chemical component. Thermal-derivative management analysis on the UMSA MT-5 (Universal Metallurgical Simulator and Analyzer) platform. Microstructure studies were also performed using optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM). A modification of the chemical composition that has been changed at the temperature of the transformations acting in the alloy.

Słowo kluczowe: stopy Zn-Al, kinetyka krystalizacji, przemiana monotektoidalna, mikrostruktura

1. WSTĘP

Cynk jako czysty metal ma niską temperaturę topnienia która wynosi 418°C. Najpopularniejszym zastosowaniem cynku są powłoki antykorozyjne na różnych materiałach [1].

Stopy Zn-Al są materiałami powszechnie stosowanymi w różnych obszarach techniki. Ich własności znacznie różnią się w zależności od zawartości dodatków stopowych. Nawet

niewielka modyfikacja składu chemicznego determinuje całkowicie odmienne własności materiału. Dzięki swoim własnościom stopy cynku podzielić można na stopy odlewnicze oraz do obróbki plastycznej. Stopy, w których znajduje się więcej niż 5,4 % mas. Al to stopy jedynie odlewnicze. Odlane stopy cynku zwłaszcza w formach piaskowych cechują się gruboziarnistą strukturą co negatywnie wpływa na ich własności wytrzymałościowe. Orientacyjny skład chemiczny i własności odlewniczych stopów cynku określa norma PN-EN 12844:2001[1-3]. Stopy ZnAl10Cu5 i ZnAl28Cu4 są istotne w przemyśle i są stosowane np. do produkcji przewodnic oraz jako stopy łożyskowe, a odlewy wykonywane metodą ciśnieniową stosowane są do produkcji części maszyn, gaźników samochodowych i armatury. Stop ZnAl4 stosowany jest to produkcji elektrotechnicznego osprzętu motoryzacyjnego [2, 3].

Główne składniki stopów cynku oprócz aluminium to miedź oraz mangan. Dodatki stopowe innych pierwiastków mają na celu poprawę ich wytrzymałości zmęczeniowej, zwiększenie twardości oraz wytrzymałości na rozciąganie. Takim dodatkiem może być miedź, magnez, krzem oraz tytan. Dodatek magnezu powoduje zmianę struktury oraz własności stopów Zn [4, 5].

2. MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

Badania kinetyki krystalizacji wykonano przy zastosowaniu Uniwersalnego Symulatora i Analizatora Procesów Metalurgicznych UMSA MT-5. Materiałem do badań były stopy Zn-Al, których skład chemiczny podano w tabeli 1. Do badań użyto próbek walcowych o wymiarach $\Phi=30$ mm oraz $h=35$ mm oraz masie 164g dla stopu ZnAl4Cu1 i 150g dla stopu ZnAl8Cu1Mg0,1.

Tabela. 1. Skład chemiczny badanych stopów

Table 1. Chemical composition of the tested alloys

Stop	Skład chemiczny masowy [%]			
	Al	Cu	Mg	Zn
ZnAl4Cu1	3,98	0,80	0,046	reszta
ZnAl8Cu1Mg0,1	8,25	0,76	0,100	reszta

W celu określenia zależności między składem chemicznym, przebiegiem krystalizacji, punktami charakterystycznymi przemian fazowych, a mikrostrukturą wykonano następujące badania:

- analizę termiczno-derywacyjną zrealizowaną z zastosowaniem stanowiska UMSA MT5 przy parametrach topienia zamieszczonych w tabeli 2,
- analizę mikrostruktury, która została wykonana z zastosowaniem mikroskopu optycznego Axio Observer firmy ZEISS przy powiększeniach x100, x200. Zgłady polerowano sukniem MD oraz zawiesiną diamentową 1 μm . Trawienie wykonano w odczynniku $10\text{gCrO}_3+1\text{gNa}_2\text{SO}_4+200\text{ml H}_2\text{O}$ (czas trawienia 4 s), następnie przepłukano w $40\text{gCrO}_3+200\text{mlH}_2\text{O}$,
- badania mikrostruktury z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego Zeiss Supra 35.

Do badania temperatury zastosowano termopary typu K, które umieszczono w węźle cieplnym. Stopy topiono w tyglach grafitowych i stosowano atmosferę ochronną w postaci Ar.

Tabela 2. Parametry topienia badanych stopów.

Table 2. Melting parameters of the tested alloys

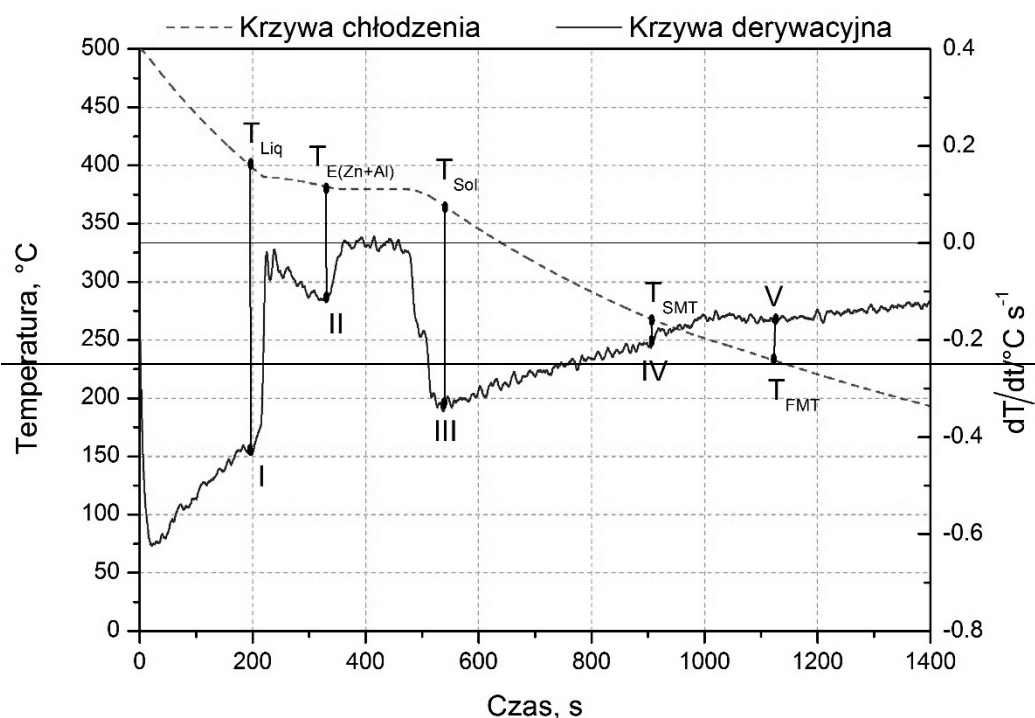
Moc generatora [W]	Zastosowana moc grzania do mocy maksymalnej [%]	Temperatura wygrzewania [°C]	Czas wygrzewania [s]
2000	50	500	180

3. WYNIKI BADAŃ WŁASNYCH

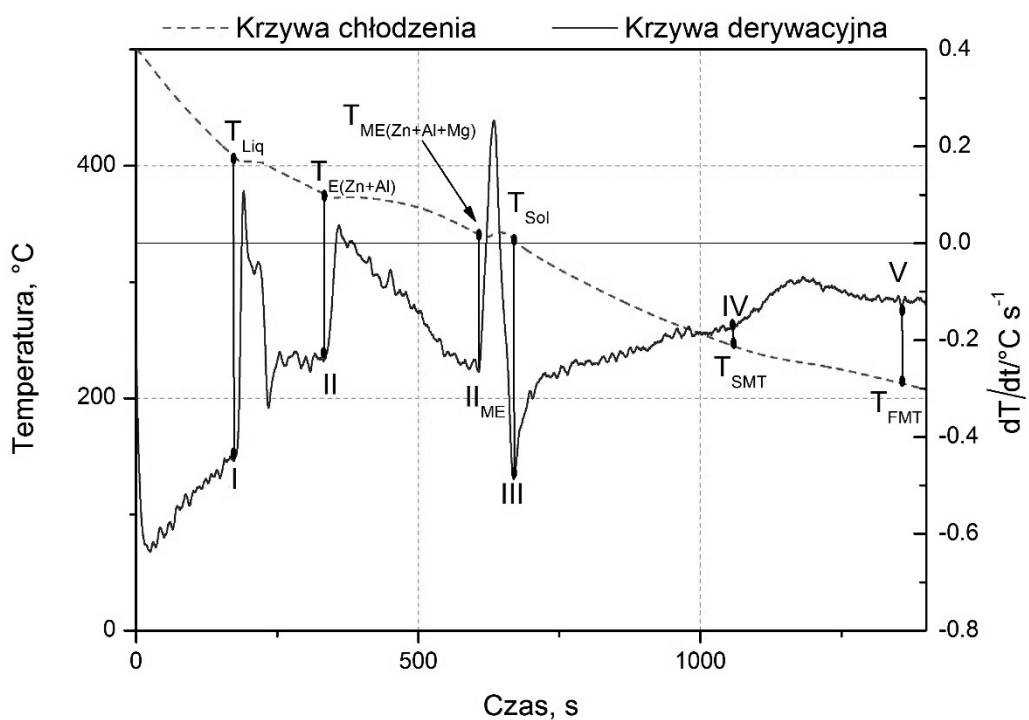
3.1 Analiza termiczno-derywacyjna

Zastosowanie analizy termiczno-derywacyjnej umożliwiło oznaczenie na krzywych derywacyjnych punktów charakterystycznych (I) początek krzepnięcia, punkt (II) początek krzepnięcia eutektyki Zn+Al oraz punkt (III) koniec krzepnięcia, a także wyznaczanie temperatury początku (T_{SMT} - Start of the Monotectoid Transformation, punkt IV) i temperatury końca (T_{FMT} - Finish of the Monotectoid Transformation, punkt V) przemiany monotektoidalnej w stanie stałym (rys. 1, 2). Dla stopu ZnAl8Cu1Mg0,1 w punkcie II_{ME} następuje krystalizacja eutektyki wieloskładnikowej Zn+Al+Mg. Wyznaczenie punktów charakterystycznych przebiegów na krzywej derywacyjnej umożliwiło wyznaczenie temperatury przemian fazowych dla badanych stopów (Tab. 3). Na rysunku 1 przedstawiono krzywą chłodzenia oraz krzywą derywacyjną dla stopu ZnAl4Cu1, a na rysunku 2 dla stopu ZnAl8Cu1Mg0,1. Na rysunku 3 porównano przebieg krzywych chłodzenia oraz krzywych derywacyjnych dla badanych stopów. Widoczna różnica w przebiegu krzywych derywacyjnych oraz punktów charakterystycznych przemiany monotektoidalnej dla badanych stopów. Szybkość chłodzenia (CR - Cooling Rate) obliczono z zależności:

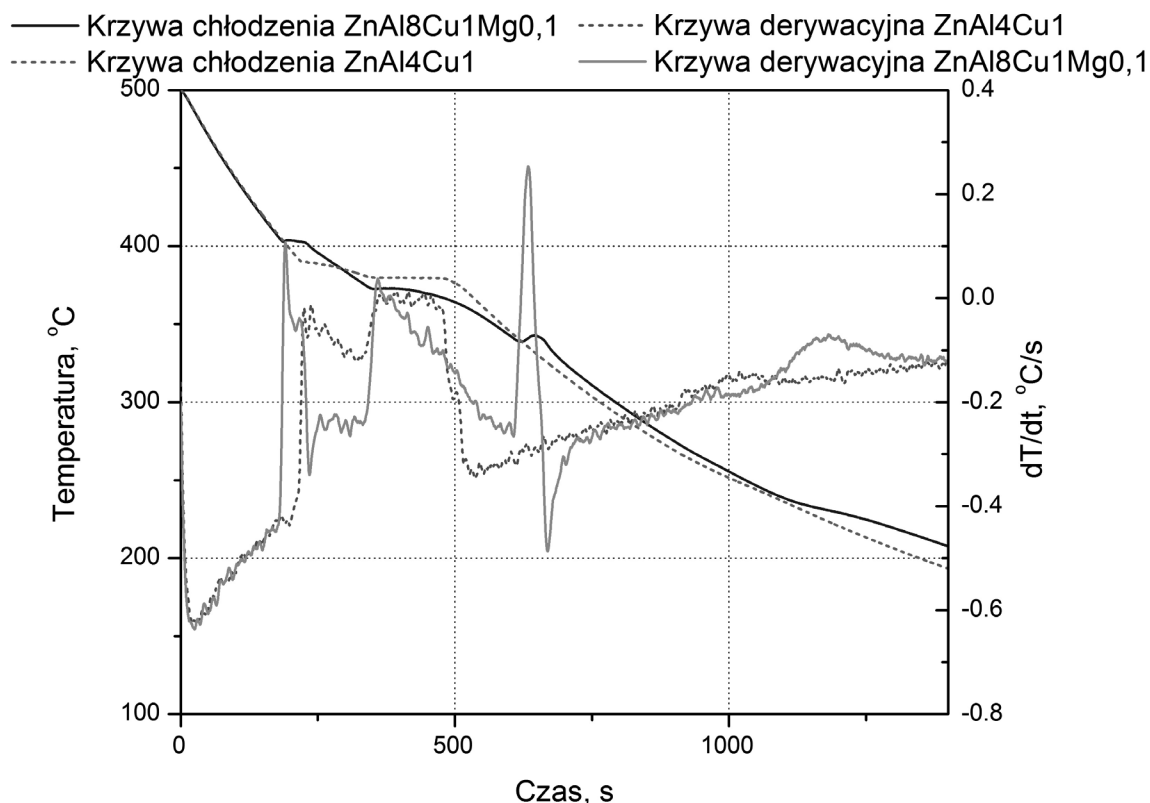
$$CR = \frac{T_{Liq} - T_{Sol}}{t_{Sol} - t_{Liq}} \text{ [}^{\circ}\text{C/s]}$$



Rys. 1. Krzywa chłodzenia oraz krzywa derywacyjna dla stopu ZnAl4Cu1, CR=0,1 °C/s
 Fig.1. Cooling curve and derivative curve for ZnAl4Cu1 alloy, CR=0,1 °C/s



Rys. 2. Krzywa chłodzenia oraz krzywa derywacyjna dla stopu ZnAl8Cu1Mg0,1, CR=1,4 °C/s
 Fig.2. Cooling curve and derivative curve for ZnAl8Cu1Mg0,1 alloy, CR=1,4 °C/s



Rys. 3. Porównanie krzywych derywacyjnych oraz krzywych chłodzenia badanych stopów
 Fig.3. Comparison of the derivation curves and the cooling curves of the tested alloys

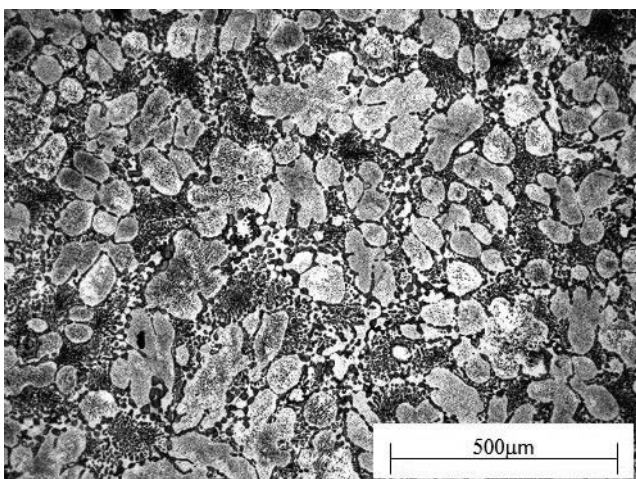
Tabela 3. Wyznaczone temperatury charakterystycznych przemian fazowych badanych stopów.
 Table 3. Determined characteristic temperature of phase transformations of the tested alloys.

	Wartość temperatury [°C]	
	ZnAl4Cu1	ZnAl8Cu1Mg0,1
Temperatura początku krystalizacji, T_{Liq}	399	406
Temperatura początku krystalizacji eutektyki Zn+Al, $T_{E(Zn+Al)}$	382	376
Temperatura początku krystalizacji eutektyki wieloskładnikowej Zn+Al+Mg, $T_{ME(Zn+Al+Mg)}$	-	341
Temperatura końca krystalizacji, T_{Sol}	367	335
Temperatura początku przemiany monotektoidalnej, T_{SMT}	267	254
Temperatura końca przemiany monotektoidalnej, T_{FMT}	231	219

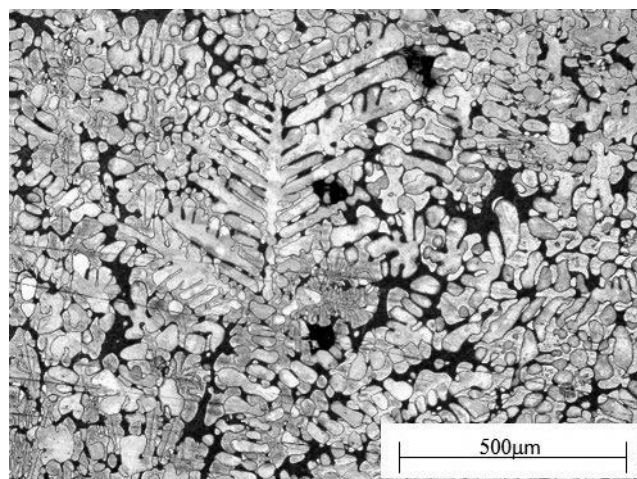
3.2 Analiza mikrostruktury

Na rysunku 4 przedstawiono mikrostrukturę stopu ZnAl4Cu1, która charakteryzuje się dendrytami fazy η oraz eutektyką płytkową $\alpha'+\eta$ (po przemianie monotektoidalnej) (Rys.4a) oraz w powiększeniu x200 (Rys. 4b). Potwierdza to również przebieg krzywej derywacyjnej na rys. 1, ponieważ widoczna jest przemiana endotermiczna, co charakteryzuje eutektykę płytkową.

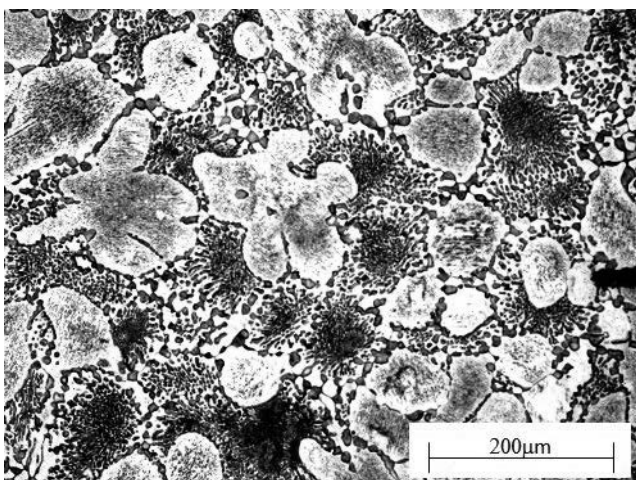
Rysunek 5 przedstawia mikrostrukturę stopu ZnAl8Cu1Mg0,1, stop ten charakteryzuje się strukturą dendrytyczną fazy α' , eutektyki $\alpha'+\eta$ oraz eutektyki wieloskładnikowej zawierającej Mg. Mikrostruktura przy powiększeniu x100 (Rys.5a) oraz powiększeniu x200 (Rys. 5b). Na rysunku 6 pokazano morfologię eutektyki ($\eta+\alpha'$) dla stopu ZnAl4Cu1 oraz eutektyki wieloskładnikowej z Mg dla stopu ZnAl8Cu1Mg0,1 na rysunku 7.



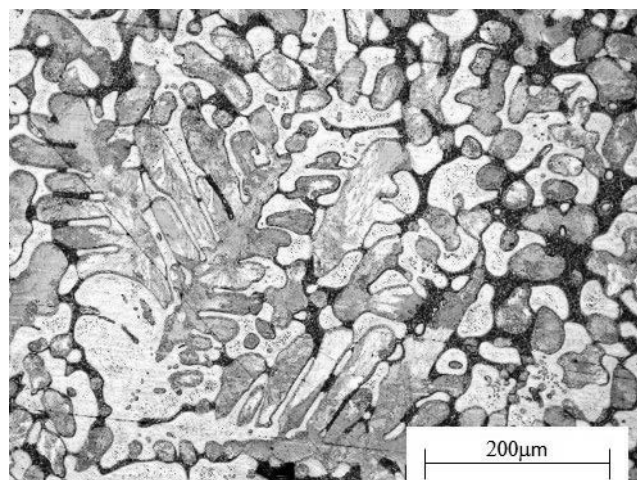
Rys. 4a. Mikrostruktura stopu ZnAl4Cu1
Fig. 4a. Microstructure of the ZnAl4Cu1 alloy



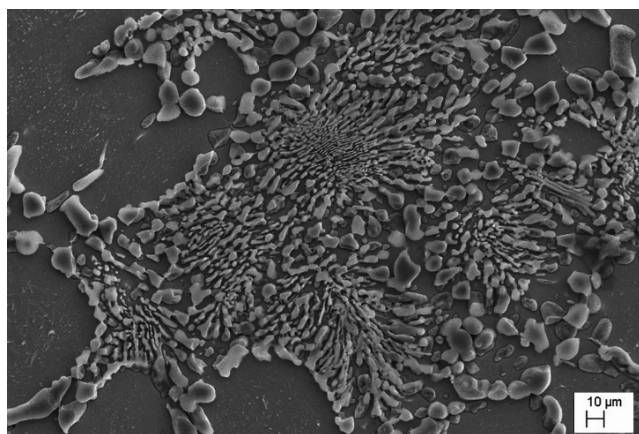
Rys. 5a. Mikrostruktura stopu ZnAl8Cu1Mg0,1
Fig. 5a. Microstructure of the ZnAl8Cu1Mg0,1 alloy



Rys. 4b. Mikrostruktura stopu ZnAl4Cu1
Fig. 4b. Microstructure of the ZnAl4Cu1 alloy

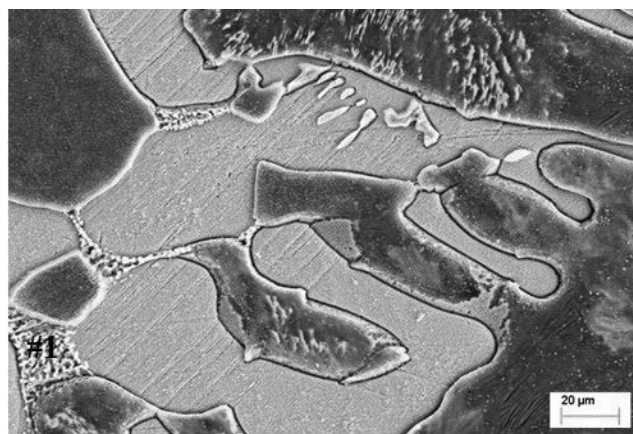


Rys. 5b. Mikrostruktura stopu ZnAl8Cu1Mg0,1
Fig. 5b. Microstructure of the ZnAl8Cu1Mg0,1 alloy



Rys. 6. Morfologia eutektyki $\eta+\alpha'$ w stopie ZnAl4Cu1; SEM

Fig.6. Morphology of the $\eta+\alpha'$ eutectic in the ZnAl4Cu1 alloy, SEM



Rys. 7. Morfologia eutektyki $\eta+\alpha'+\text{Mg}_2\text{Zn}_{11}$ (#1) w stopie ZnAl8Cu1Mg0,1; SEM

Fig.7. Morphology of the $\eta+\alpha'+\text{Mg}_2\text{Zn}_{11}$ (#1) eutectic in the ZnAl8Cu1Mg0,1 alloy, SEM

5. PODSUMOWANIE

Modyfikacja składu chemicznego wpłynęła na zmianę temperaturę początku (T_{SMT}) i końca (T_{FMT}) przemiany monotektoidalnej w badanych stopach. Stop ZnAl4Cu1 charakteryzuje się dendrytami fazy η oraz eutektyki płytkowej $\eta+\alpha'$. Stop ZnAl8Cu1Mg0,1 charakteryzuje się dendrytami fazy α' oraz eutektyki wieloskładnikowej zawierającej Mg.

PODZIĘKOWANIE

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

LITERATURA

1. J. Wysocka, Rozprawa doktorska “Charakterystyka elektrochemiczna odporności korozyjnej aluminium i jego stopów w wodnych środowiskach zasadowych” Politechnika Gdańska
2. R. Michalik, The effect modification which Rare earth elements on ZnAl22Cu3 alloy structure and mechanical properties, Arch. Metall. Mater. Vol. 58 (2013), No 1, p. 49-53.
3. R. Michalik, A. Iwaniak, J. Wieczorek, Influence of heat treatment on the wear resistance of the ZnAl40Cu1.5Ti1.5, Arch. Metall. Mater. Vol. 62 (2017), No 1, 129-136
4. M. Krupiński, K. Labisz, T. Tański, B. Krupińska, M. Król, M. Polok-Rubinić, Influence of Mg addition on crystallisation kinetics and structure of the Zn-Al-Cu alloy, Arch. Metall. Mater., Vol. 61 (2016), No 2, p. 785–790.
5. Song-Mao Liang, Zhicheng Wu, S. Sandlobes, S. Korte-Kerzel, R. Schmid-Fetzer, Journal of Materials Science Vol. 54, (2019), p. 9887–9906



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Wpływ gęstości prądu i czasu nakładania na grubość antykorozyjnych powłok cynkowych

R. Trojnar^a, D. Solipiwo^a, M. Bodio^a, A. Widak^b, M. Łągiewka^b, J. Popis^c, W. Pakieła^c, B. Grzegorzczak^c, J. Wyrwał^d, A. Zarychta^c, S. Lesz^c

^a Studenci Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny
email: radotro676@student.polsl.pl; dawiso1189@student.polsl.pl; mb304698@student.polsl.pl

^b Studenci Politechniki Śląskiej, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki
email: adriwid422@student.polsl.pl; macilag700@student.polsl.pl;

^c Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych,
email: sabina.lesz@polsl.pl; adam.zarychta@polsl.pl

^d Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, Katedra Pomiarów i Systemów Sterowania
email: janusz.wyrwal@polsl.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu gęstości prądu oraz czasu cynkowania na grubość powłok wytworzonych na stali DC01 (1.0330). Proces cynkowania próbek wykonano przy gęstościach prądu wynoszących: 1,7; 2,1 i 2,5 A/dm². Dla każdej gęstości prądu, proces wykonano przy trzech różnych czasach zanurzenia w kąpeli – 40, 80 oraz 120 min. Przed oraz po cynkowaniu, próbki zostały zważone za pomocą metody wagowej i wyznaczono średnią grubość powłoki. Grubość powłok wyznaczono także przy użyciu grubościomierza oraz skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM).

Abstract: The paper presents the results of studies on the impact of current density and galvanizing time on the thickness of the coating produced on DC01 (1.0330) steel. The galvanizing process of the samples was carried out at current densities of 1.7; 2.1 and 2.5 A/dm². For each current density, the process was carried out at three different times of submerge in the galvanizing bath - 40, 80 and 120 min. Before and after galvanizing, the samples were weighed using the gravimetric method and the average coating thickness was determined. The coating thickness was estimated using a thickness measuring tool and a scanning electron microscope (SEM), too.

Słowa kluczowe: Cynkowanie, powłoki galwaniczne, stal DC01

1. Wstęp

Cynkowanie galwaniczne jest jedną z najskuteczniejszych metod ochrony metalowych elementów przed rozwojem korozji. W ten sposób zabezpiecza się elementy szczególnie narażone na niszczenie [1-9].

Proces galwanizacji należy do tej grupy technologii, których rozwój zbiegł się w czasie z drugą rewolucją przemysłową, tj. przejściem od mechanizacji do elektryfikacji produkcji. Jego zastosowanie na skalę masową wymagało bowiem stałych dostaw energii elektrycznej. Początki galwanizacji sięgają jednak znacznie dalej w przeszłość - po raz pierwszy zastosowano ją w 1837 roku do złocenia i srebrzenia biżuterii [7].

Powierzchnia poddawana cynkowaniu musi być uprzednio oczyszczona i odtłuszczona. Po tym wszystkim, należy poddać ją trawieniu, co pozbawi ją ognisk korozji. Cynkowanie galwaniczne polega na zastosowaniu procesu elektrolizy. Prąd elektryczny jest w tym przypadku źródłem napięcia. Proces elektrolizy zaczyna się w momencie zanurzenia cynkowanego przedmiotu w roztworze elektrolitu, w którym znajdują się jony cynku. Funkcję katalizatora reakcji chemicznej pełni tu prąd, generowany przez prostownik galwaniczny i dostarczany przez zanurzone w wannie elektrody. Pod wpływem dostarczonego ładunku elektrycznego wokół elektrod powstaje pole elektrostatyczne, które powoduje przemieszczanie się jonów metalu powłokowego (zwykle anody) w kierunku metalu powlekanego (zwykle katody). W efekcie wyładowywania się jonów metalu na powierzchni detalu powstają zarodki krystalizacji, które w kolejnej fazie rozrastają się, formując trwałą powłokę [7].

Do wytwarzania powłok anodowych stosuje się przede wszystkim cynk, a w mniejszym zakresie także ustępujące mu skutecznością magnez i aluminium często także w połączeniu z cynkiem. Widoczne to jest szczególnie w sektorze produkcji maszyn i generalnie w przemyśle ciężkim, w którym kluczową rolę odgrywa odpowiednie zabezpieczenie antykorozyjne, cynk zdecydowanie wygrywa z innymi metalami powłokowymi, a cynkowanie stanowi najpopularniejszą odmianę galwanizacji [1, 2, 4, 5, 9].

Poza bardzo dobrą ochroną antykorozyjną, o sukcesie cynku w przemyśle zdecydowały także inne jego zalety, w tym m.in.: relatywnie niska cena, duża dostępność oraz dodatkowe właściwości dekoracyjne. Galwaniczne powłoki cynkowe cechują się również wysoką adhezją do podłoża (stali lub żeliwa), a jednocześnie większą elastycznością niż warstwy cynku nakładane innymi metodami. Dzięki temu zapewniają chronionej powierzchni większą odporność na uszkodzenia mechaniczne. Odporność tę można dodatkowo wzmocnić, uzupełniając elektrolit o sole chromu i kobaltu, a także stosując powłoki kompozytowe na bazie cynku i niklu (w proporcjach 87 do 13%) lub cynku i żelaza (80-90% Zn/10-20% Fe) [7].

Proces cynkowania można przeprowadzać zarówno w kąpielach kwaśnych, jak i mało kwaśnych oraz alkaicznych bez cyjankowych. Każda z nich ma swoje wady i zalety: cynk alkaiczny zapewnia lepszą ochronę antykorozyjną i podatność na pasywację, zaś sam proces cynkowania nie wymaga uzupełniania czy wymiany anod (jak w przypadku cynkowania słabo kwaśnego). Wymianie podlegają tu jednak anody w generatorze cynku, a sam roztwór musi być odpowiednio dozowany, tak aby jego stężenie w kąpeli pozostawało na stabilnym poziomie [1, 2, 4].

Oprócz składu kąpeli, o właściwościach powłoki cynkowej, decyduje także gęstość prądu. Przeważnie waha się ona w przedziale od 3 do 10 A/dm², przy czym im jest ona niższa, tym wolniej przebiega proces wyładowywania jonów na katodzie. To z kolei daje kryształom więcej czasu na wzrost, co bezpośrednio przekłada się na ich wielkość. Aby więc uzyskać powłokę drobnokrystaliczną, konieczne jest doprowadzenie prądu o relatywnie wysokiej gęstości [4].

2. BADANIA WŁASNE

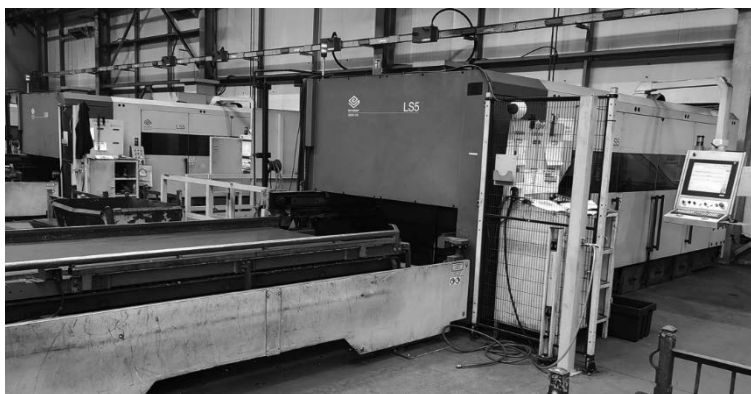
W artykule została zawarta analiza wpływu czasu cynkowania oraz gęstości prądu na grubość powłoki wytworzonej na stali DC01 (1.0330). Skład chemiczny stali podany w atestie przez dostawcę arkusza blachy oraz wymagania stężeń pierwiastków zgodnie z normą PN-EN 10152 [1] został przedstawiony w Tablicy 1. Skład chemiczny jest zgodny z wskazaną normą [1] dla stali DC01.

Tablica 1. Skład chemiczny stali DC01 [%mas.] podany w atestie przez dostawcę arkusza blachy oraz w normie PN-EN 10152 [10].

Table 1. Chemical composition of DC01 steel given in the certificate by the sheet supplier and in the PN-EN 10152 [10] standard

Dokumenty	Skład chemiczny [%mas.] stali DC01							
	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni
PN-EN 10152	0,12	0,6	-	0,045	0,045	-	-	-
Atest	0,07	0,4	0,009	0,013	0,006	0,03	0,02	0,01

Do wykonania próbek użyto arkusza blachy o grubości 2 mm i wymiarach 2000x1500 mm. Do cięcia i grawerowania blach został użyty laser firmy BLM GROUP LS5, który został przedstawiony na rysunku 1.



Rysunek 1. Laser do cięcia blach BLM GROUP LS5
Figure 1. Sheet metal cutting laser BLM GROUP LS5

Na rysunku 2 przedstawiono przykładową próbkę o wymiarach 100x40 mm wraz z grawerem dla zadanych parametrów procesu cynkowania, gdzie:

T – czas [s];

D – gęstość prądu [A/dm^2].



Rysunek 2. Próbkę ze stali DC01 przed cynkowaniem galwanicznym

Figure 2. DC01 steel sample before zinc electroplating

Proces cynkowania próbek wykonano przy gęstościach prądu wynoszących: 1,7; 2,1 i 2,5 A/dm². Dla każdej gęstości prądu proces przeprowadzono przy trzech różnych czasach zanurzenia w kąpeli – 40, 80 oraz 120 min.

Cynkowanie galwaniczne zostało przeprowadzone na zawieszkowej, zautomatyzowanej linii, która wykorzystuje kąpiel alkaliczną. Linia zawieszkowa jest w kształcie litery “U” i dzieli się na przygotowanie powierzchni po jednej stronie, stację przejazdową na środku i strefę cynkowania po drugiej stronie. Załadunek i rozładunek odbywa się ręcznie, następnie cały cykl jest zautomatyzowany i sterowany komputerowo. Najpierw odbywa się czyszczenie i podtrawianie powierzchni w HCL oraz H₃PO₄, gdzie zawartość kwasu solnego wynosi 100÷180 g/dm³, natomiast kwasu fosforowego 50÷80 g/dm³. Następnie następuje płukanie w wodzie demineralizowanej i przejazd do stacji odtłuszczania elektrochemicznego w NaOH, gdzie stężenie wodorotlenku sodu wynosi 220÷260 g/dm³. Czyszczenie i podtrawianie przeprowadzane jest w temperaturze w zakresie od 30 do 40°C, natomiast odtłuszczanie w zakresie temperatur od 40÷50 °C. Po odtłuszczeniu powierzchni materiał jest ponownie płukany a w kolejnym etapie przeprowadza się dekapowanie, czyli usuwanie warstwy tlenków z powierzchni. Proces ten przeprowadzono w roztworze kwasu solnego o stężeniu 120÷160 g/dm³. Do każdego z tych procesów użyte zostały dodatkowe środki wspomagające.

Po przygotowaniu powierzchni i kolejnym płukaniu ze środkiem zwiększającym aktywność chemiczną powierzchni, został przeprowadzony proces cynkowania w kąpeli alkalicznej. W skład kąpeli wchodzi wodorotlenek sodu w stężeniu 120÷160 g/dm³, a zawartość cynku 9÷13 g/dm³. Dodatkowo zastosowany w kąpeli został nośnik, wybłyszczacz i zmiękcacz dostarczany przez firmę zewnętrzną. Cynkowanie przeprowadzone zostało w kąpeli o temperaturze 24°C.

Kolejnym etapem po kąpeli cynkowej jest pasywacja, która jest poprzedzona płukaniem w wodzie demineralizowanej i aktywacją powierzchni. Zastosowana została pasywacja niebieska, której stężenie pH reguluje się za pomocą kwasu azotowego. Zakres pracy to 1,8 do 2,2 pH. Pasywację przeprowadza się w temperaturze zbliżonej do kąpeli galwanicznej, około 25°C. Następnym etapem jest płukanie, suszenie i rozładunek. Całość procesu wyłączając kąpiel galwaniczną trwa około godziny.

Przed oraz po cynkowaniu próbki zostały zważone na wadze przedstawionej na rysunku 3 i za pomocą metody wagowej wyznaczono średnią grubość powłoki:

$$x = \frac{(m_1 - m_2) 10\,000}{S \cdot m} \quad [2]$$

gdzie:

m_1 - masa próbek po cynkowaniu (w gramach)

m_2 - masa próbek przed cynkowaniem (w gramach)

S - pole powierzchni w cm^2 (85 cm^2)

m - masa właściwa powłoki ($7,14 \text{ g/cm}^3$)

Próbki zostały zważone na wadze analitycznej firmy RADWAG AS110R.2 PLUS, która posiada dokładność do $0,0001 \pm 0,0002 \text{ g}$ oraz maksymalny zakres pomiarowy do 110 g.



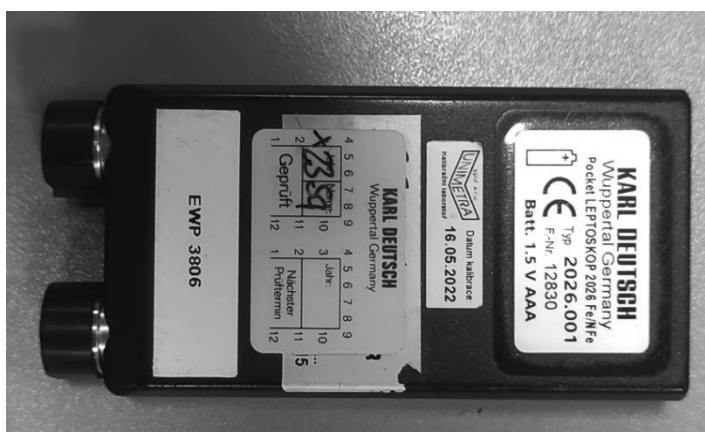
Rysunek 3. Waga analityczna firmy RADWAG AS110R.2 PLUS [11]

Figure 3. Analytical balance RADWAG AS110R.2 PLUS [11]

Grubość powłok określono przy użyciu miernika KARL DEUTSCH Pocket-LEPTOSKOP przedstawionego na rysunku 4. Miernik pozwala na zmierzenie grubości powłok niemagnetycznych na podłożach magnetycznych. Na losowo wybranych próbkach dodatkowo wykonano badania za pomocą miernika grubości DELTASCOPE FMP30 firmy Fischer (metoda indukcji magnetycznej DIN EN ISO 2178). Pomiarów dokonano w 6 miejscach (3 po stronie z grawerem jak i po stronie bez graweru). Wykonano 3 pomiary w każdym miejscu i wyciągnięto średnią wartość.

Wyniki pomiarów wykonanych przy użyciu w.w. mierników były zbliżone a różnice grubości wynosiły $\pm 3 \mu\text{m}$.

Strukturę otrzymanych powłok cynkowych zbadano przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) SUPRA 35 (Carl Zeiss, Jena, Germany), wyposażonego w detektor UltraDry EDS (Thermo Scientific, Waltham, MA, USA).



Rysunek 4. Miernik grubości powłok KARL DEUSTCH Pocket-LEPTOSKOP
 Figure 4. Coating thickness gauge KARL DEUSTSCH Pocket-LEPTOSKOP

Schematycznie miejsca pomiaru przedstawiono na rysunku 5.

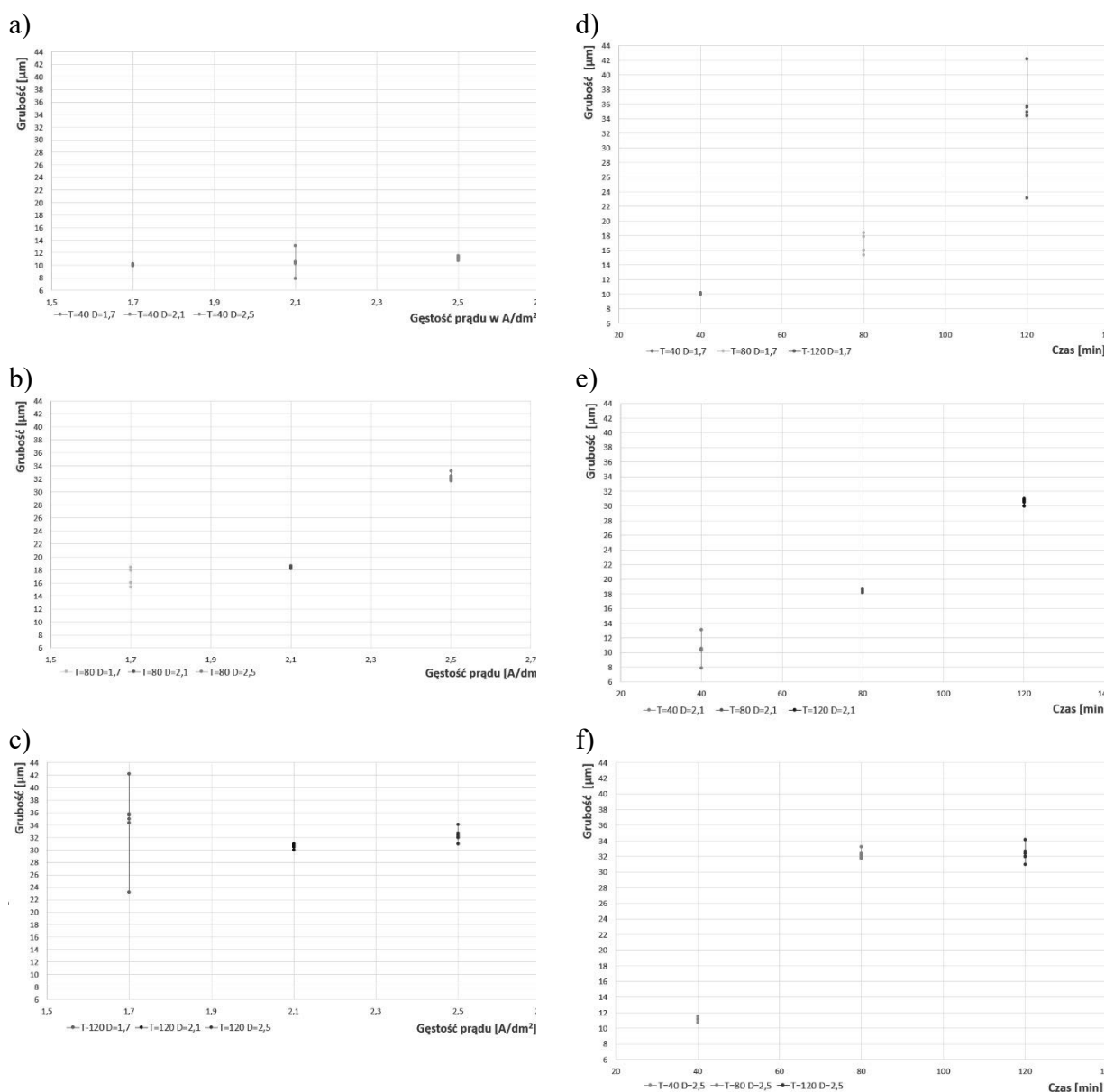


Rysunek 5. Miejsca pomiaru próbek
 Figure 5. Placement of sample measurement

3. WYNIKI

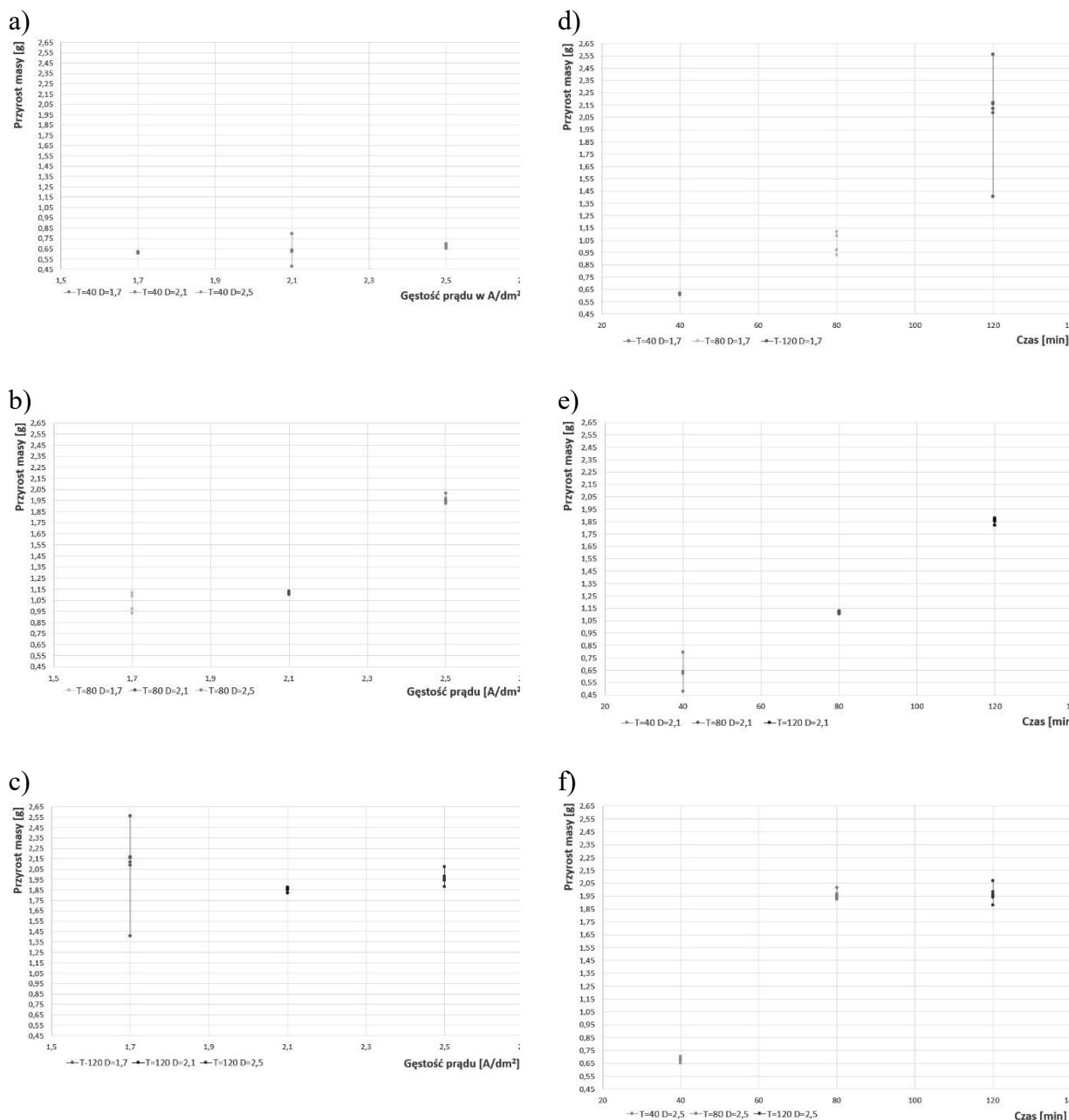
Za pomocą metody wagowej wyznaczono średnią grubość powłoki cynkowej. Na rysunku 6 przedstawiono średnią grubość powłok w zależności od czasu cynkownia (rys. 6 a, b, c) oraz gęstości prądu (rys. 6 d, e, f). Średnia masa próbki bazowej wynosiła 61,4823 g przed

cynkowaniem. Można zauważyć, że średni przyrost masy na próbkach poddanych tym samym parametrom obróbczym jest równomierny (rys. 7 a-f), a wraz z wydłużeniem czasu cynkowania (rys. 7 a, b, c) oraz ze wzrostem gęstości prądu (rys. 7 d, e, f) zauważalny jest przyrost masy próbek.



Rysunek 6. Średnia grubość powłoki wyznaczona metodą wagową dla różnych czasów cynkowania: 40 min (a), 80 min (b) i 120 min (c) oraz gęstości prądu: 1,7 A/dm² (d), 2,1 A/dm² (e) i 2,5 A/dm² (f).

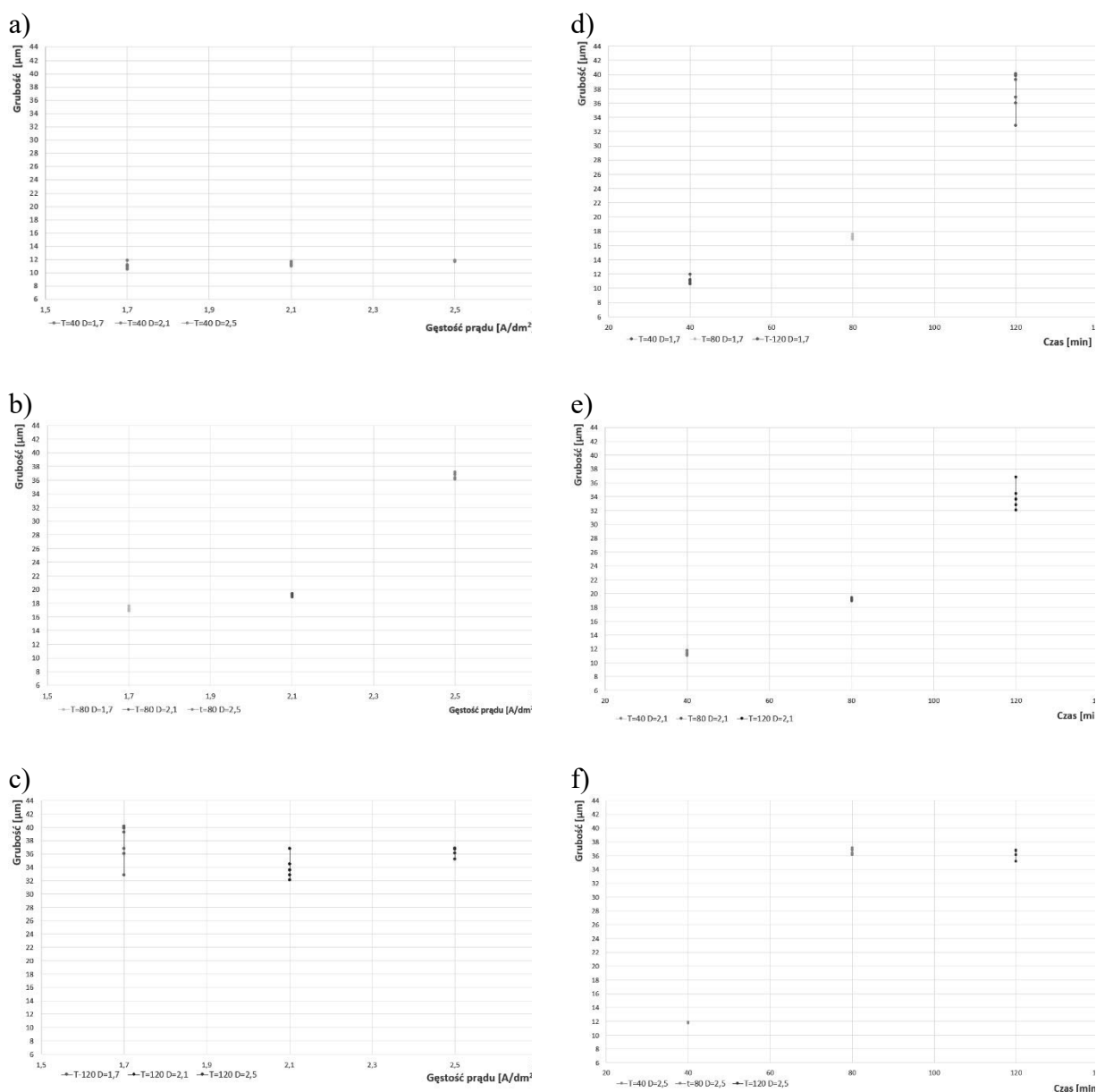
Figure 6. Average value of sample thickness based on weight method for different time of zinc electroplating: 40 min (a), 80 min (b) i 120 min (c) and current density 1,7 A/dm² (d), 2,1 A/dm² (e) and 2,5 A/dm² (f).



Rysunek 7. Przyrost masy próbek dla różnych czasów cynkowania: 40 min (a), 80 min (b) i 120 min (c) oraz gęstości prądu: 1,7 A/dm² (d), 2,1 A/dm² (e) i 2,5 A/dm² (f).

Figure 7. Weight gain for different time of zinc electroplating: 40 min (a), 80 min (b) and 120 min (c) and current density 1,7 A/dm² (d), 2,1 A/dm² (e) and 2,5 A/dm² (f).

Wyniki pomiarów grubości powłok za pomocą miernika KARL DEUSTCH Pocket-LEPTOSKOP zostały przedstawione na rysunku 8 i w tabelicy 2. W tabelicy tej zamieszczono także grubość powłok wyznaczoną metodą wagową.



Rysunek 8. Średnia grubość powłoki zmierzona za pomocą miernika KARL DEUSTCH Pocket-LEPTOSKOP dla różnych czasów cynkowania: 40 min (a), 80 min (b) i 120 min (c) oraz gęstości prądu: 1,7 A/dm² (d), 2,1 A/dm² (e) i 2,5 A/dm² (f).

Figure 8. Average value of sample thickness measured with KARL DEUTSCH Pocket-LEPTOSKOP gauge for different time of zinc electroplating: 40 min (a), 80 min (b) i 120 min (c) and current density 1,7 A/dm² (d), 2,1 A/dm² (e) and 2,5 A/dm² (f).

Wyniki badań skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) wybranych próbek zestawiono na rysunku 9 a-f. Grubość warstwy cynkowej (rys. 9 a-f) jest nieco większa od określonej za pomocą miernika grubości powłok KARL DEUTSCH Pocket-LEPTOSKOP (tablica 2) i dla próbek po cynkowaniu przy gęstości prądu 1,7; 2,1 i 2,5 A/dm² wynosi odpowiednio 13,89; 13,00; 14,02 oraz 39,38; 40,40 i 46,65 µm w czasie 40 i 120 min.

Tablica 2. Wyniki badań wpływu gęstości prądu i czasu procesu cynkowania na grubość i jakość otrzymywanych powłok. Średnią wartość grubości powłoki cynkowej wyznaczona metodą wagową (a) oraz zmierzona za pomocą miernika KARL DEUSTCH Pocket-LEPTOSKOP (b)
 Table 2. Results of the influence of current density and time of the galvanizing process on the thickness and quality of the galvanized zinc layer. Average value of zinc thickness determined by weight method (a) and thickness gauge KARL DEUTSCH Pocket-LEPTOSKOP (b).

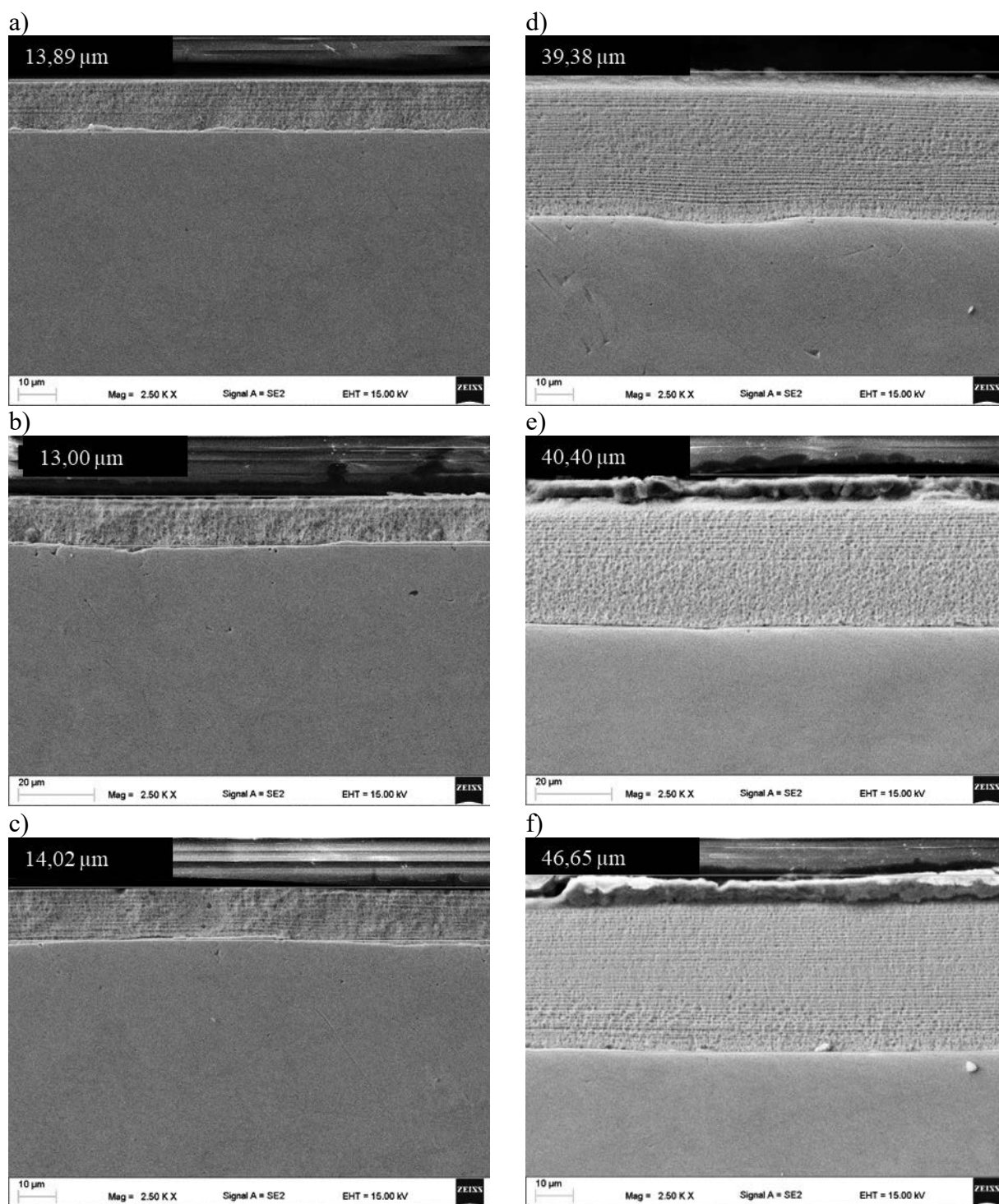
Oznaczenie próbki	Gęstość prądu [A/dm ²]	Czas nakładania [min]	Średnia grubość powłoki [μm]		Wygląd powłoki; uwagi
			a)	b)	
T40 D1,7	1,7	40	10	11	powłoki gładkie, błyszczące
T40 D2,1	2,1	40	10	11	powłoki gładkie, błyszczące
T40 D2,5	2,5	40	11	12	powłoki gładkie, błyszczące
T80 D1,7	1,7	80	17	17	powłoki gładkie, błyszczące
T80 D2,1	2,1	80	18	19	powłoki gładkie, błyszczące
T80 D2,5	2,5	80	32	37	powłoki gładkie, błyszczące
T120 D1,7	1,7	120	34	37	powłoki gładkie, błyszczące
T120 D2,1	2,1	120	31	34	powłoki gładkie, błyszczące
T120 D2,5	2,5	120	32	36	powłoki gładkie, błyszczące

Uzyskane wyniki badań pozwoliły na stwierdzenie, że grubość powłok nakładanych przez 40 minut, niezależnie od gęstości prądu jest zbliżona i wynosi $10 \pm 12 \mu\text{m}$ (tablica 2, rys. 6, 8, 9).

Przy zastosowaniu gęstości prądu $1,7 \text{ A/dm}^2$ czas procesu ma istotny wpływ na grubość wytworzonych powłok. Ze wzrostem czasu zanurzenia w kąpeli z 40 do 120 min, grubość powłok rośnie z $10 \mu\text{m}$ do $34 \mu\text{m}$ (tablica 2, rys. 6 i 8).

Największą grubość powłok ($34\text{-}37 \mu\text{m}$) otrzymano stosując czas cynkowania 120 min, niezależnie od gęstości prądu oraz krótszy czas (80 min) przy zastosowaniu gęstości prądu $2,5 \text{ A/dm}^2$.

Dla gęstości prądu $2,5 \text{ A/dm}^2$ grubość powłoki znacznie wzrasta (z 11 do $32 \mu\text{m}$) wraz ze wzrostem czasu zanurzenia w kąpeli z 40 do 80 min. Dalszy wzrost czasu procesu cynkowania nie wpływa istotnie na grubość wytwarzanych powłok (rys 6, 8, 9 tablica 2).



Rysunek 9. Powłoki cynkowe zobrazowane przy użyciu SEM wraz z pomiarem grubości. Średnia grubość powłoki dla różnych parametrów procesu cynkowania: 40 min, 1,7 A/dm² (a), 40 min, 2,1 A/dm² (b) i 40 min, 2,5 A/dm² (c) oraz 120 min, 1,7 A/dm² (d), 120 min, 2,1 A/dm² (e) i 120 min, 2,5 A/dm² (f)

Figure 9. SEM image of zinc coating with thickness measurement. Average value of sample thickness for different time of zinc electroplating: 40 min (a), 80 min (b) i 120 min (c) and current density 1,7 A/dm² (d), 2,1 A/dm² (e) i 2,5 A/dm² (f)

4. WNIOSKI

Wyniki badań pozwoliły na stwierdzenie, że:

- Grubość powłok nakładanych przez 40 minut jest zbliżona i wynosi od 10 do 12 μm , niezależnie od gęstości prądu;
- Grubość powłok rośnie z 10 do 37 μm wraz z czasem procesu cynkowania;
- Największe grubości powłok (34-37 μm) otrzymano stosując czas cynkowania 120 min, niezależnie od gęstości prądu oraz 80 min, przy zastosowaniu gęstości prądu 2,5 A/dm².

PODZIĘKOWANIA

Pracę zrealizowano w ramach kształcenia zorientowanego projektowo – PBL programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza w zakresie projektu pt.: „Analiza wpływu parametrów prądowych na grubość antykorozyjnych powłok cynkowych”.

BIBLIOGRAFIA

1. M. Blicharski, Inżynieria powierzchni, WNT, Warszawa 2016.
2. T. Biestek, S. Sękowski, Metody badań powłok metalowych, WNT, Warszawa, 1965.
3. <https://budownictwo.pl/artikel/na-czym-polega-cynkowanie-galwaniczne-148703>.
4. S. Tkaczyk (red.), Powłoki ochronne, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
5. K. Kołała, B. Oleksiak, Płatkowe powłoki cynkowe na podłożach stalowych, Zarządzanie Przedsiębiorstwem. Enterprise Management, 23,1, 2020, 23–28.
6. <https://legor.pl/podstawy-procesu-galwanicznego/>
7. <https://www.lakiernictwo.net/dzial/147-galwanotechnika/artykuly/tradycyjne-i-nowatorskie-metody,4132/5>.
8. J. Yu, L. Wang, L. Su, X. Ai and H. Yang, Temperature effects on the electrodeposition of zinc, J. Electrochem. So 150 (2003), C19–C23.
9. M. Winnicki, i in., Porównanie odporności na korozję powłok cynkowych naniesionych różnymi metodami, Przegląd Spawalnictwa 9, 2014, 34-40.
10. PN-EN 10152 Wyroby płaskie walcowane na zimno ocynkowane elektrolitycznie do obróbki plastycznej na zimno. Warunki techniczne dostawy.
11. <https://www.moga.pl/waga-analityczna-as-110-r2> (dostęp 10.05.2023).



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Wpływ obróbki cieplnej na wielkość ziarna spoiny z ferrytycznej stali nierdzewnej gatunku X2CrTiNb18

G. Walczyk^a, W. Pakieła^b, M. Roszak^b.

^a Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials, School of Doctors,
email: grzewal517@polsl.pl

^b Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials

Streszczenie: Zwiększenie własności wytrzymałościowych spoin ferrytycznych stali nierdzewnych związane jest z ograniczeniem zjawiska rozrostu ziaren ferrytu. W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących zastosowania różnych zakresów temperaturowych procesu obróbki cieplnej przeprowadzonych podczas wykonywania spoin. Wykazano istotne znaczenie wpływu temperatury obróbki cieplnej na zmianę morfologii spoiny, w tym uzyskanie ograniczenia rozrostu ziaren ferrytu.

Abstract: Increasing the strength properties of ferritic stainless steel welds is related to the reduction of the growth of ferrite grains. The paper presents the results of research on the use of various temperature ranges of the heat treatment process carried out during the execution of welds. Significant importance of the influence of the heat treatment temperature on the change of the weld morphology was demonstrated, including the reduction of ferrite grain growth.

Słowa kluczowe: ferrytyczne stale nierdzewne, obróbka cieplna, spawanie.

1. WPROWADZENIE

Ferrytyczne stale nierdzewne ze względu na dużą odporność na korozję atmosferyczną oraz dużą podatność na zjawiska rozrostu ziaren ferrytu powstającego podczas procesu cieplnego jakim jest proces spawania odznaczają się niskimi własnościami mechanicznymi z tego względu wykorzystywane są przede wszystkim jako elementy maszyn nie przenoszących dużych obciążeń, szczególnie obciążeń dynamicznych [1]. Wciąż rosnące wymagania eksploatacyjne części maszyn i urządzeń wykorzystywanych do pracy w warunkach korozji atmosferycznej wymusza konieczność opracowania coraz to lepszych pod względem własności mechanicznych gatunków stali.

Celem badań było określenie potencjalnego wpływu obróbki cieplnej na własności mechaniczne złączy spawanych z ferrytycznej stali nierdzewnej, po przez zahamowania zjawiska rozrostu ziaren ferrytu.

2. ZNACZENIE WIELKOŚCI ZIARNA NA WŁASNOŚCI SPOIN

Wielkość ziarna ferrytycznej stali nierdzewnej ma istotny wpływ na kształtowanie własnościami wytrzymałościowymi takich jak: udarność, twardość oraz wytrzymałość na rozciąganie [1]. Wraz ze wzrostem wielkości ziaren powstającego podczas wprowadzania ciepła do ferrytycznych stali nierdzewnych, stal ta wykazuje dużą podatność na działanie karbu [1,2]. Przeprowadzone przez M.O.H. Amuda i S. Mridha badania polegające na znacznym ograniczeniu wprowadzanej ilości ciepła podczas procesu spawania poprzez zastosowanie dodatkowego chłodzenia w postaci ciekłego azotu, w istotny sposób hamuje zjawisko rozrostu ziaren ferrytu powodując polepszenie własności wytrzymałościowych otrzymanych spoin [3,4]. Postuluje się również wykorzystanie operacji obróbki cieplnej po procesie spawania w celu ograniczenia rozrostu ziarna.

3. WYNIKI POMIARU WIELKOŚCI ZIARNA

3.1 Materiał do badań

W celu przeprowadzenia badania wykorzystano materiał w postaci płyty z ferrytycznej stali nierdzewnej gatunku X2CrTiNb18 o wymiarach 2,0 x 350,0 x 150,0 [mm]. Własności mechaniczne oraz skład chemiczny materiału użytego w badaniu przedstawiono w tabeli 1 i 2.

Tabela 1. Skład chemiczny stali gatunku X2CrTiNb18 [6]

X2CrTiNb18	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Nb	Ni	Ti
[wt. %]	0,017	0,57	0,410	0,024	0,002	0,014	17,63	0,371	0,22	0,137

Tabela 2. Własności wytrzymałościowe stali gatunku X2CrTiNb18 [6]

	Wytrzymałość na rozciąganie Rm [MPa]	Granica plastyczność Rp 0,2[MPa]	Wydłużenie A [%]	Twardość [HV]
X2CrTiNb18	473	317	29	154

3.2. Metoda spawania

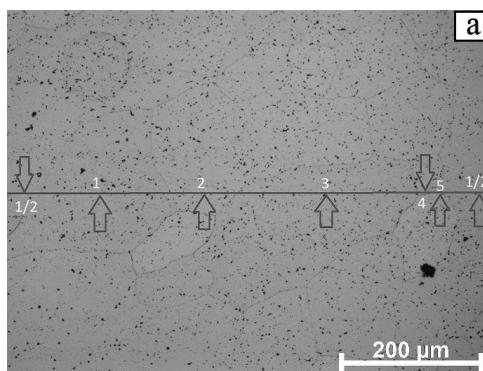
Do wykonania próbek spawalniczych zastosowano metodę spawania w osłonie gazu obojętnego elektrodą nietopliwą TIG 141 (wg PN-EN ISO 4063), próbki wykonano w pozycji PA zgodnie z parametrami procesu spawania podanymi w tabeli 3. Jako gazu osłonowego użyto argonu o oznaczeniu „I1” wg. PN-EN ISO 14175-I1-Ar w ilości 14 l/min, gazem formującym również był Argon gatunku „I1”, lecz w ilości 12 l/min. Materiał dodatkowy został wycięty z materiału podstawowego w związku z czym skład chemiczny materiału dodatkowego oraz materiału podstawowego był taki sam.

Tabela 3. Parametry spawania dla poszczególnych próbek (opracowanie własne)

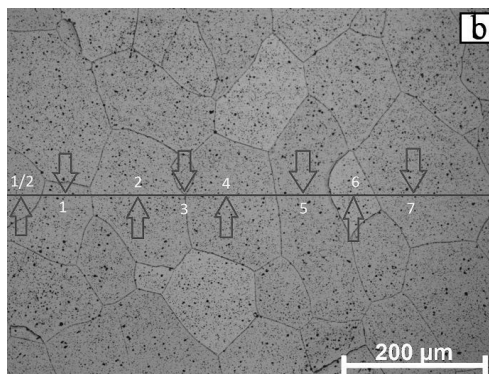
Nr. próbki	Rodzaj prądu/ biegunowość	Natężenie prądu [A]	Napięcie łuku spawalniczego [V]	Szybkość spawania [mm/s]	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/mm]	Temp. obróbki cieplnej/ Czas wygrzewania
P1	DC=(-)	65	10,7 ÷ 12,4	0,83	0,50 ÷ 0,58	-
P2	DC=(-)	65	11,2 ÷ 12,5	0,97	0,53 ÷ 0,59	880 °C/30min
P3	DC=(-)	65	10,3 ÷ 12,5	1,00	0,48 ÷ 0,59	920 °C/30min

3. PODSUMOWANIE

Pomiar wielkości ziarna wykonano metodą linii prostej PN-EN ISO 643 [5]. Porównując obszar spoiny próbki P1 (rysunek 1) wykonanej bez obróbki cieplnej po spawaniu z obszarem spoiny próbki P2 (rysunek 2) poddanej po procesie spawania obróbce cieplnej w temperaturze 880°C, można zauważyć, że próbka P1 (rysunek 1) charakteryzuje się mniejszą ilością ziaren ferrytu (6 ziaren) w porównaniu do próbki P2 (rysunek 2) w tym samym obszarze pomiaru (8 ziaren), co można interpretować jako pozytywny wpływ obróbki cieplnej przeprowadzonej w temperaturze 880°C, jako czynnik ograniczający zjawisko rozrostu ziaren ferrytu.



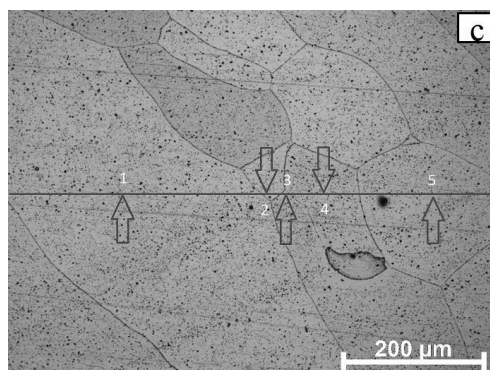
Rysunek 1. Pomiar ilości ziaren ferrytu próbki P1 (opracowanie własne)



Rysunek 2. Pomiar ilość ziaren ferrytu próbki P2 (opracowanie własne)

W przypadku zwiększenie temperatury obróbki cieplne po spawaniu do temperatury 920°C jaką zastosowano dla próbki P3 (rysunek 3) można zauważyć, że ilość ziaren mierzona w tym

samym obszarze spoiny, co dla próbek P1 i P2 zmniejszyła się czyli ziarna zwiększyły swoją objętość.



Rysunek 3. Pomiar ilości ziaren ferrytu próbki P3 (opracowanie własne)

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych obserwacji makroskopowych trzech próbek można wysunąć następujące wnioski:

1. Wprowadzenie dodatkowej operacji obróbki cieplnej po procesie spawania w przypadku spoin z ferrytycznych stali nierdzewnych, wpływa na ograniczenie rozrostu ziaren ferrytu, co można zaobserwować porównując zdjęcia makroskopowe próbek P1 z P2.
2. Zwiększenie temperatury obróbki cieplnej z 880°C do temperatury 920°C spowodowało wzrost wielkości ziaren, co można zaobserwować porównując obszar spoiny próbki P3 (5 ziaren) z próbką P1 (6 ziaren) oraz z próbką P2 (8 ziaren).
3. Największe rozdrobnienie ziarna uzyskano dla próbki P2 dla zastosowanej obróbki cieplnej w temperaturze 880°C
4. Odpowiedni dobór temperatury procesu obróbki cieplnej po procesie spawania ferrytycznych stali nierdzewnych pozwala w znacznym stopniu przyczynić się do rozdrobnienia struktury, co ma istotne wpływa na zwiększenia własności wytrzymałościowych spoin.

LITERATURA

1. E. Tasak. Metalurgia spawania. Wydawnictwo JAK, Kraków, 2008.
2. J. Łabanowski. Stale odporne na korozję i ich spawalność, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2020.
3. M.O.H. Amuda, S. Mridha. Grain refinement and hardness distribution in cryogenically cooled ferritic stainless steel welds. *Materials and Design* 47, 2013.
4. G. Walczyk, W. Pakieła, M. Roszak, Effect of titanium powder addition and heat treatment on the grain size in the weld of ferritic stainless steel of the X2CrTiNb18 grade, *METALURGIJA* 62 (2023) 3-4, 16th SYMPOSIUM „MATERIALS AND METALLURGY“, supplement „Book of Abstracts“, pp: 489-498.
5. PN-EN ISO 643. Stal. Mikrograficzne określenie wielkości ziarna.
6. Świadectwo jakości materiału X2CrTiNb18, Aperam Stainless Service&Solutions Poland Sp. Z o.o., Nr cert. 110680989.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Warstwy samonaprawialne na bazie biopolimeru do zastosowań implantologicznych

W. Wiśniewska^a, M. Rzepiela^a, M. Gawlas^a, S. Sacha^a, W. Cieślak^a, K. Cesarz-Andraczke^b, A. Kania^b

^a Studenci kierunku Inżynieria Produkcji i Zarządzanie na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej

email: ww303362@student.polsl.pl

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email: aneta.kania@polsl.pl

Streszczenie: W artykule omówiono mechanizm samonaprawy powłok biopolimerowych. Przedstawiono wyniki badań samoregeneracji powłoki kazeinowej o różnym stężeniu, naniesionej na stopy na bazie magnezu.

Abstract: The article discusses the mechanism of self-healing of biopolymer coatings. The results of the study of self-repair of casein coating, with different concentrations, applied to magnesium-based alloys are presented.

Słowa kluczowe: mechanizm samonaprawy, kazeina, stopy Mg, korozja zanurzeniowa

1. WSTĘP

Korozja metali w środowisku fizjologicznym organizmu może wywoływać reakcje toksyczne, alergiczne oraz stany zapalne. Stąd konieczne jest, aby na implanty biomedyczne wybierać materiały charakteryzujące się biogodnością i odpowiednią odpornością korozyjną. Magnez, cynk i wapń są pierwiastkami, które wykazują dużą biogodność z organizmem człowieka. Są niezbędne do jego prawidłowego funkcjonowania i pełnią w nim wiele istotnych funkcji. W odpowiednich warunkach mogą ulegać korozji, jednak powinna to być korozja kontrolowana, nie wywołująca negatywnych skutków dla organizmu [1].

Wśród biomateriałów znajdujących szerokie zastosowanie w implantologii wyróżnia się materiały: metalowe, ceramiczne, polimerowe, węglowe oraz kompozytowe [2].

Polimery resorbowalne są to biomateriały, które pod wpływem czynników biologicznych ulegają rozkładowi (degradacji) w kontrolowany sposób, nie wpływając negatywnie na funkcjonowanie organizmu człowieka. Oznacza to, że po wprowadzeniu do organizmu są one stopniowo rozkładane na nieszkodliwe związki chemiczne i usuwane z niego przez układ odpornościowy lub wydalone naturalnie. Polimery te można otrzymać na trzy różne sposoby, poprzez: polikondensację, poliaddycję i polimeryzację pierścieniową.

Jednym z biopolimerów jest kazeina. Jest to produkt wyodrębniony w procesie trawienia, dzięki działaniu podpuszczki. Wykazuje ona silne właściwości antykataboliczne i jest chętnie stosowana przez sportowców. Posiada również cechy samoregeneracji. Oprócz kazeiny, także inne materiały polimerowe ulegają samonaprawie, m.in. polimery na bazie kauczuku [3].

Wyróżnia się dwa rodzaje mechanizmu samonaprawy: zewnętrzny i wewnętrzny. Pierwszy z nich polega na regeneracji uszkodzonej powierzchni, dzięki m.in. zawartym w strukturze materiału mikrokapsułkom. Środek leczniczy wypływający z uszkodzonej kapsułki odpowiada za naprawę zdefektowanej powierzchni. Drugi sposób regeneracji – wewnętrzny – uruchamiany jest samoistnie pod wpływem, np. promieniowania UV czy odpowiednich związków znajdujących się w środowisku materiału. Pozwala na przywrócenie występujących między uszkodzonymi obszarami wiązań chemicznych lub oddziaływań fizycznych, jak dwustronne wiązania kowalencyjne, wiązania odwracalne o charakterze niekowalencyjnym, itp. [4].

2. METODOLOGIA BADAŃ

Do badań wykorzystano dwa stopy na bazie magnezu: $MgCa_2Zn_1Gd_3$ oraz $Mg_{5,25}Zn_{0,5}Ca$. Prace rozpoczęto od wycięcia dwóch rodzajów próbek, z wcześniej przygotowanych prętów, o następujących wymiarach (średnica x wysokość): 13 mm x 7 mm oraz 25 mm x 5 mm. Kolejno, próbki zostały poddane procesowi szlifowania (na papierach o gradacji 800 i 1200) i piaskowania za pomocą Al_2O_3 o średnicy ziarna równej 50 μm . W dalszej kolejności powierzchnię próbek odłuszczonego za pomocą acetonu.

Następnie, w zlewkach przygotowano trzy roztwory o różnych stężeniach kazeiny z wodorotlenkiem sodu (NaOH) na bazie wody destylowanej:

- 2 g kazeiny, 4 g NaOH, 50 ml wody destylowanej,
- 4 g kazeiny, 4 g NaOH, 50 ml wody destylowanej,
- 8 g kazeiny, 4 g NaOH, 50 ml wody destylowanej.

W celu dokładnego wymieszania składników roztworu, zlewki umieszczono w kąpeli wodnej o temperaturze około 40°C. Następnie, w tak przygotowanych roztworach kazeiny zanurzone próbki stopów na bazie magnezu. Po upływie 1 godziny, próbki zostały wyjęte i osuszone. Kolejno, na powierzchni każdej próbki z naniesioną powłoką kazeiny, za pomocą noża o szerokości ostrza 0,5 mm, wykonano rysy. Następnie próbki zostały zanurzone w roztworze Ringera (skład roztworu: 8,6 $g \cdot dm^{-3}$ NaCl, 0,3 $g \cdot dm^{-3}$ KCl, 0,48 $g \cdot dm^{-3}$ $CaCl_2 \cdot 6H_2O$), w temperaturze 37 °C przez 1 godzinę.

Zmiany zachodzące w powstałych powłokach przed i po korozji zanurzeniowej obserwowano w mikroskopie świetlnym firmy Leica (model DVM6A). Mikroskop ten pozwala obserwować powierzchnię próbek w skali makro i mikro, dzięki trzem wymiennym obiektywom. Ze względu na zdolność powiększenia wyróżnia się obiektywy:

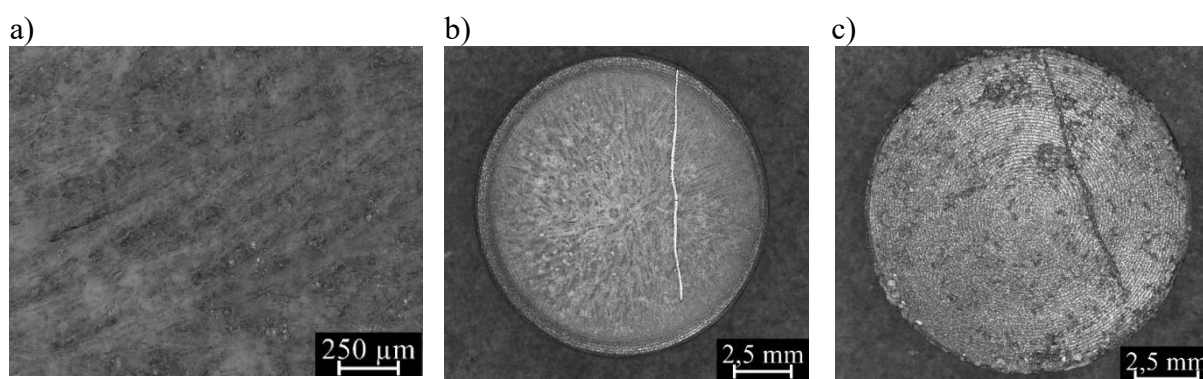
- o niskim powiększeniu – stosowany do obserwacji powierzchni próbki i poszukiwania charakterystycznych obszarów. Maksymalne powiększenie wynosi 190x, natomiast pole widzenia równe jest 43,75 mm,
- o średnim powiększeniu – umożliwia obserwację niewielkich obiektów w obrębie próbki. Zakres powiększenia wynosi od 46x do 675x, a pole widzenia równe jest 12,55 mm,
- o dużym powiększeniu – pozwala na obserwację bardzo małych szczegółów próbki, aż do 425 nm. Maksymalne powiększenie to 2350x, przy polu widzenia – 3,6 mm.

Dzięki funkcji przechylania, próbki można obserwować pod kątem $\pm 60^\circ$. Funkcja ta pozwoliła na zbadanie trudno dostępnych miejsc i wykonanie odpowiednich zdjęć, które

umożliwiły obserwacje zmian na powierzchni biopolimeru oraz stopów metali pod wpływem środowiska korozyjnego.

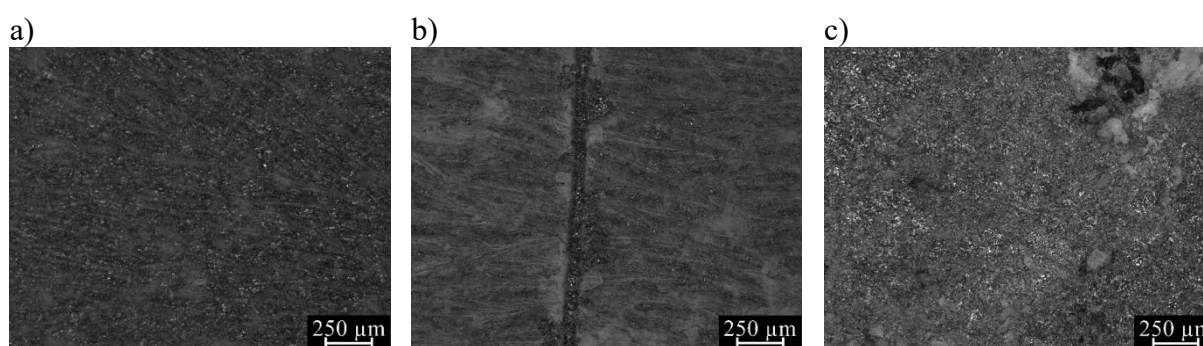
3. WYNIKI I DYSKUSJA BADAŃ

Obserwacje mikroskopowe powierzchni powłok kazeinowych naniesionych na dwa stopy magnezu: $MgCa_2Zn_1Gd_3$ oraz $Mg_{5,25}Zn_{0,5}Ca$ wykonano przed i po korozji zanurzeniowej w roztworze Ringera, w temperaturze $37\text{ }^\circ\text{C}$ (Rys. 1-4). Obserwowano zarówno morfologię powierzchni powłoki przed korozją, jak i potencjalny mechanizm samonaprawy. Rysy, od krawędzi próbki do jej środka, wykonano nożykiem o szerokości ostrza $0,5\text{ mm}$. Zniszczenie obejmuje całą grubość powłoki, dotykając materiału podłoża (stopu na bazie Mg).



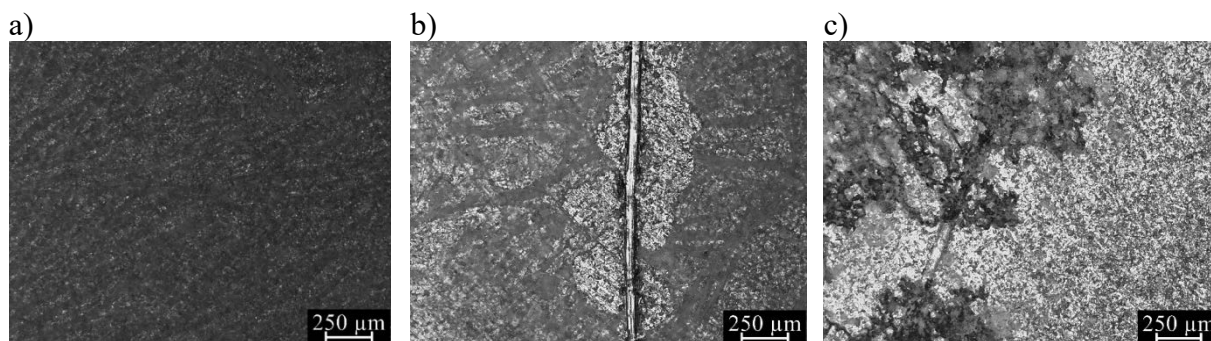
Rysunek 1. Powłoka kazeiny (o stężeniu 4 g) naniesiona na stop $MgCa_2Zn_1Gd_3$: a) morfologia powierzchni powłoki przed korozją, b) widok zniszczenia na powierzchni powłoki przed korozją, c) widok rysy na powierzchni powłoki po korozji zanurzeniowej

Figure 1. Casein coating (with a concentration of 4 g) applied to $MgCa_2Zn_1Gd_3$ alloy: a) morphology of the coating surface before corrosion, b) view of a scratch on the coating surface before corrosion, c) view of a scratch on the coating surface after immersion corrosion



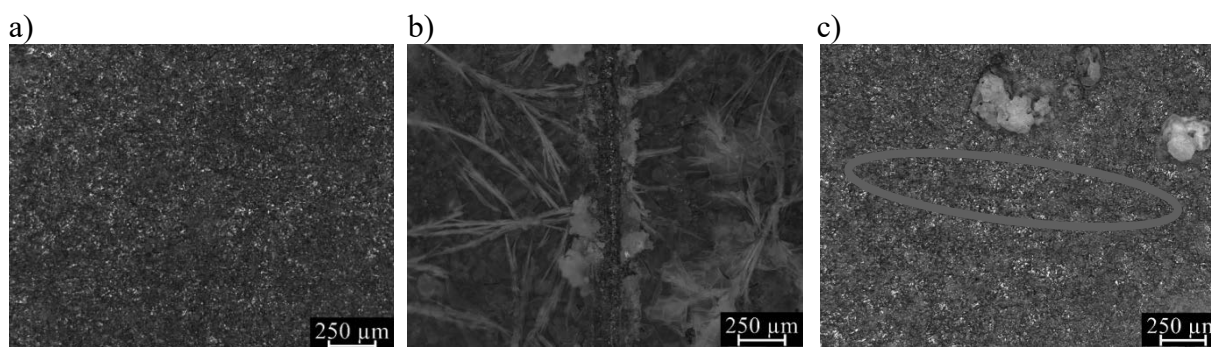
Rysunek 2. Powłoka kazeiny (o stężeniu 4 g) naniesiona na stop $Mg_{5,25}Zn_{0,5}Ca$: a) morfologia powierzchni powłoki przed korozją, b) widok zniszczenia na powierzchni powłoki przed korozją, c) widok rysy na powierzchni powłoki po korozji zanurzeniowej

Figure 2. Casein coating (with a concentration of 4 g) applied to $Mg_{5,25}Zn_{0,5}Ca$ alloy: a) morphology of the coating surface before corrosion, b) view of a scratch on the coating surface before corrosion, c) view of a scratch on the coating surface after immersion corrosion



Rysunek 3. Powłoka kazeiny (o stężeniu 8 g) naniesiona na stop $MgCa_2Zn_1Gd_3$: a) morfologia powierzchni powłoki przed korozją, b) widok zniszczenia na powierzchni powłoki przed korozją, c) widok rysy na powierzchni powłoki po korozji zanurzeniowej

Figure 3. Casein coating (with a concentration of 8 g) applied to $MgCa_2Zn_1Gd_3$ alloy: a) morphology of the coating surface before corrosion, b) view of a scratch on the coating surface before corrosion, c) view of a scratch on the coating surface after immersion corrosion



Rysunek 4. Powłoka kazeiny (o stężeniu 8 g) naniesiona na stop $Mg_{5,25}Zn_{0,5}Ca$: a) morfologia powierzchni powłoki przed korozją, b) widok zniszczenia na powierzchni powłoki przed korozją, c) widok rysy na powierzchni powłoki po korozji zanurzeniowej

Figure 4. Casein coating (with a concentration of 8 g) applied to $Mg_{5,25}Zn_{0,5}Ca$ alloy: a) morphology of the coating surface before corrosion, b) view of a scratch on the coating surface before corrosion, c) view of a scratch on the coating surface after immersion corrosion

Wyniki obserwacji mikroskopowych wykazały, że struktura naniesionej powłoki jest heterogeniczna (Rys. 1a, 2a, 3a i 4a). Stwierdzono również, że nie wszystkie stężenia kazeiny są odpowiednie dla uzyskania efektu samoregeneracji. W przypadku powłoki o stężeniu 2 g kazeiny, naniesionej na obydwa stopy magnezu, nie zaszły żadne zauważalne procesy naprawcze, a w wyniku korozji zanurzeniowej powstały wyraźne produkty korozji, widoczne w postaci białego nalotu na powierzchni próbek. Ponadto, powłoki kazeiny (o stężeniach 4 i 8 g) naniesione na stop z dodatkiem gadolinu, również nie wykazują efektu samonaprawy (Rys. 1c i 3c). Na powierzchni próbek zaobserwować można wiele produktów korozji, a powstałe zniszczenie jest nadal widoczne. Znacznie lepsze wyniki uzyskano dla powłok kazeinowych (o stężeniach 4 i 8 g) naniesionych na stop $Mg_{5,25}Zn_{0,5}Ca$ (Rys. 2c i 4c). W przypadku stężenia kazeiny równego 8 g zauważyć można wyraźny efekt samoregeneracji. Zniszczona powłoka zaczęła się odbudowywać (zamykać) i jest prawie niewidoczna na powierzchni próbki (Rys. 4c).

4. PODSUMOWANIE

Przetawione w artykule wyniki badań pozwalają sądzić, że powłoki kazeiny o stężeniach 4 i 8 g naniesione na stop Mg_{5,25}Zn_{0,5}Ca wykazują własności samoregenerujące. Najlepszy efekt samonaprawy uzyskano dla powłoki kazeiny o stężeniu 8 g. W tym przypadku, po procesie korozji widać znaczącą odbudowę zniszczenia. Jest to obiecujący wynik, który wymaga jeszcze dalszych badań, w celu potwierdzenia założonej tezy.

LITERATURA

- [1] J. Mystkowska, Procesy korozji i zużycia tribologicznego wybranych materiałów metalowych w środowisku śliny i jej substytutów, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok, 2018.
- [2] B. Świczko-Żurek, Biomateriały, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2009.
- [3] B.J. Blaiszik, S.L.B. Kramer, S.C. Olugebefola, J.S. Moore, N.R. Sottos, S.R. White, Self-Healing Polymers and Composites, *Annual Review of Materials Research* 40 (2010) 179-211.
- [4] A. Adamus-Włodarczyk, E. Irzmańska, B. Brycki, Aktualny stan wiedzy o polimerach zdolnych do samonaprawy w aspekcie aplikacji do całogumowych rękawic ochronnych, *Polimery* 63/7-8 (2018) 495-502.

Praca powstała w wyniku realizacji projektu Project Based Learning (PBL) pt. Opracowanie niezniszczalnych powłok, które same będą się naprawiać.

Zapewnienie jakości procesów specjalnych

A. Wójtowicz ^a, M. Konieczny ^a, K. Królikowska ^a, M. Laskowski ^a, N. Peters ^a, M. Bonek ^b

^a Student/ka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: andrwoj101@student.polsl.pl

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, email: miroslaw.bonek@polsl.pl

Streszczenie: Artykuł przedstawia wieloaspektowe narzędzia kontroli jakości, tj. badania nieniszczące i niszczące. Poruszony został wariant optymalizacji procesów spawalniczych za pomocą symulacji komputerowej oraz występujące w procesach niezgodności i wady spawalnicze. Opisano poszczególne metody badań ze względu na obowiązujące standardy jakościowe oraz standardy przeprowadzania badań.

Abstract: The article presents universal quality control tools, i.e., non-destructive and destructive testing. The option of welding optimization using computer simulation and welding defects were discussed. The individual research methods are described in terms of the effective quality standards and conducted tests.

Keywords: badania nieniszczące, badania niszczące, jakość, procesy specjalnie, spawanie, symulacje komputerowe, niezgodności spawalnicze

1. WSTĘP

Norma PN EN ISO 9000 określiła proces spawania, lutowania i zgrzewania mianem procesu specjalnego co oznacza, że nie jest możliwa pełna weryfikacja poprawności wykonania pomimo stosowania licznych kontroli i badań wyrobu, a konsekwencje powstałych wad mogą ujawnić się dopiero podczas eksploatacji elementów. Konsekwencją powyższej normy mówiącej o systemach zarządzania jakością jest szereg działań i dokumentów towarzyszących procesom spawania, zgrzewania i lutowania. Jednym ze sposobów kontrolowania powstałych złączy są badania nieniszczące, które jak nazwa wskazuje umożliwiają kontrole detali bez konieczności ich niszczenia. W celu zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa tego rodzaju działania może wykonywać tylko i wyłącznie personel przeszkolony i certyfikowany zgodnie z wymaganiami normy PN EN ISO 9712, a uprawnienia muszą być regularnie odnawiane.

Personel, który ma wykonywać jeden z powyżej wspomnianych sposobów połączeń nierozłącznych również powinien być certyfikowany zgodnie z odpowiadającymi danemu procesowi normami. W przypadku spawaczy wymagane jest spełnienie wymagań normy PN EN ISO 9606 oraz wykonanie próbki egzaminacyjnej i potwierdzenie jej poprawności technologicznej przez niezależną jednostkę notyfikowaną.

Każdy proces technologiczny także powinien być kwalifikowany zgodnie z wymaganiami, które obejmują zakres badań jakim należy poddać złącza próbne. W wytycznych znajdziemy informacje, ile próbek należy wykonać jakie badania niszczące oraz nieniszczące należy przeprowadzić oraz czy wymagana jest analiza metalograficzna uzyskanego połączenia.

Złożoność powyżej wspomnianych procesów stawia przed współczesnymi inżynierami wiele technologicznych wyzwań począwszy od procesu projektowania i konstruowania, poprzez kontrolę i kwalifikowanie, a kończąc na prawidłowym wykonaniu i eksploataowaniu wykonanych konstrukcji.

2. BADANIA NIENISZCZĄCE

Badania nieniszczące możemy podzielić na badania powierzchniowe oraz badania objętościowe. Do badań powierzchniowych zaliczamy metodę badań wizualnych, penetracyjnych oraz magnetyczno-proszkowych. Natomiast do badań objętościowych należy metoda radiograficzna oraz ultradźwiękowa. Niezgodności i wady powstające w procesach spawania i grzewania zostały pogrupowane w normie PN EN ISO 6520.

2.1. Badania nieniszczące

2.1.1. Badania wizualne

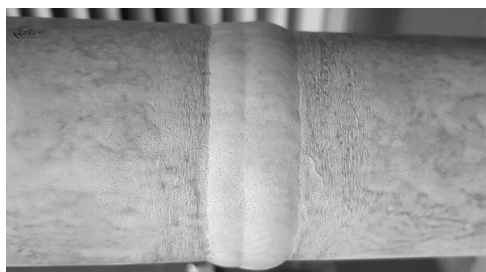
Metoda badań polegająca na oględzinach powstałego złącza za pomocą oka nieuzbrojonego lub za pomocą przyrządów takich jak lupy, endoskopy czy lusterka umożliwiające inspekcje w trudno dostępnych miejscach. Nośnikiem informacji w tych badaniach jest fala elektromagnetyczna o zakresie długości fali światła widzialnego. Norma PN EN ISO 13018 opisuje proces postępowania oraz zasady ogólne dotyczące badań wizualnych. Metoda badań wizualnych jest jedyną techniką badań nieniszczących pozwalającą na pomiar rzeczywistych rozmiarów niezgodności czy wad.

2.1.2. Badania penetracyjne

Metoda penetracyjna służy przede wszystkim do wykrywania powierzchniowych pęknięć niewidocznych dla ludzkiego nieuzbrojonego oka. Znajduje szerokie zastosowanie w badaniach materiałów, które nie są ferromagnetyczne. Możliwe są badania w technice barwnej i fluorescencyjnej (Rysunek 1 – badanie w technice barwnej). Wytyczne dotyczące prawidłowego postępowania podczas wykonywania badań przedstawiają normy PN EN ISO 3059 oraz PN EN ISO 3452. Sposób przeprowadzania badania można sprowadzić do 3 podstawowych etapów: naniesienia cieczy wnikażącej w nieciągłości, usunięcia nadmiaru penetrantu i naniesienie wywoływacza (Rysunek 1 i 2) oraz oględzin powstałych wskazań.



Rysunek 1. Próbką z naniesioną cieczą wnikającą – penetrant (po lewej)
Figure 1. Sample with penetrant liquid applied – penetrant (left)

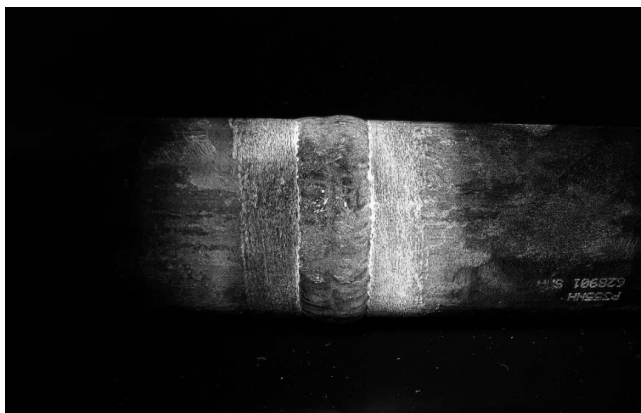


Rysunek 1. Próbką z naniesionym wywoływaczem (po prawej)

Figure 2. Sample with developer applied (right)

2.1.3. Badania magnetyczno-proszkowe

Metoda badań magnetyczno-proszkowych umożliwia wykrywanie bardzo wąskich nieciągłości powierzchniowych oraz podpowierzchniowych (do około 2mm pod powierzchnią) w materiałach ferromagnetycznych. Polega na naniesieniu detektora zaburzeń sił pola magnetycznego, najczęściej w formie zawiesiny z drobinami żelaza oraz namagnesowaniu elementu za pomocą defektoskopów lub za pośrednictwem bezpośredniego przepływu prądu przez element. Wyróżnia się dwie techniki badania: barwną i fluorescencyjną (Rysunek 3 – badanie w technice fluorescencyjnej). Wytyczne dotyczące prawidłowego postępowania podczas wykonywania badań przedstawiają normy PN EN ISO 3059 oraz PN EN ISO 17638.



Rysunek 3. Próbką poddana badaniu magnetyczno-proszkowemu techniką fluorescencyjną

Figure 3. Sample subjected to magnetic particle examination by fluorescence technique

2.2. Badania objętościowe

2.2.1. Badania radiograficzne

Metoda badań radiograficznych umożliwia wykrycie niezgodności wewnątrz powstałego złącza. Promieniowanie rentgenowskie lub gamma przenika przez materię i tworzy na detektorze promieniowania obraz prześwietlanego elementu. Jeżeli gęstość obiektu będzie jednorodna to na radiogramie nie zostaną zaobserwowane zmiany, jednak w momencie, kiedy wystąpi wewnątrz złącza różnica gęstości spowodowana jakąś pustką lub wtrąceniem czy zanieczyszczeniem to będzie ono widoczne na radiogramie. W metodzie RT wyróżnia się techniki analogowe oraz cyfrowe. Podczas badań tą techniką należy szczególnie zadbać o względy bezpieczeństwa, ponieważ promieniowanie rentgenowskie niekorzystnie wpływa na ludzki organizm.

2.2.2. Badania ultradźwiękowe

Metoda badań ultradźwiękowych polega na wprowadzeniu do obiektu fali mechanicznej o zadanej częstotliwości oraz odebranie sygnału zwrotnego za pomocą głowicy lub zestawu głowic, które za pomocą defektoskopu zostaną przetworzone i zobrazowane, aby następnie mogły zostać zinterpretowane. Metoda ta pozwala na natychmiastową ocenę bez potrzeby obróbki wyników badań tak jak jest to konieczne w metodzie RT. Jednak metoda ta posiada ograniczenia, ponieważ konwencjonalne techniki badania pozwalają na badanie elementów o grubości większej niż 8mm.

3. BADANIA NISZCZĄCE

3.1.1. Statyczna próba rozciągania

Statyczna próba rozciągania to metoda najbardziej rozpowszechniona wśród badań niszczących. Dla złączy spawanych metali przeprowadza się próbę rozciągania w kierunku poprzecznym do osi spoiny. Warunkuje to norma PN-EN ISO 4136:2022-12 - Badania niszczące złączy spawanych metali - Próba rozciągania próbek poprzecznych. Podczas tego badania wyznacza się jedynie wytrzymałość do rozciągania. Próbki do badania wzdłuż osi spoiny zostają przygotowane według wytycznych ujętych w normie PN-EN ISO 5178:2019-04 - Badania niszczące spoin materiałów metalowych -- Próba rozciągania wzdłużnego metalu spoiny w połączeniach spawanych. Podczas tej próby możemy uzyskać dodatkowo informacje na temat granicy plastyczności, wydłużenia po rozciągnięciu, czy przewężenie przekroju. Badania te wykonywane są podczas analizy poprawności technologii, wykonywania prób przedprodukcyjnych, czy na poczet ekspertyz [10,12]. Przykładowy wygląd próbki po rozciągnięciu został przedstawiony na Rysunku 5.

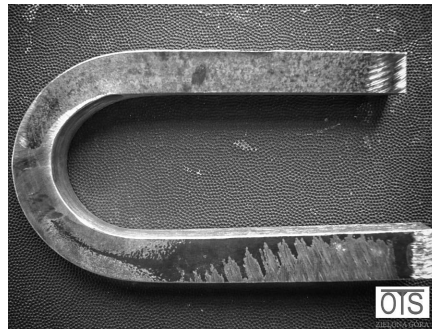


Rysunek 5. Próbki złączy spawanych po badaniu statycznej próby rozciągania [11]

Figure 5: Welded joint specimens after static tensile test [11]

3.1.2. Statyczna próba zginania

Statyczna próba zginania pozwala na sprawdzenie własności plastycznych złącza spawanego. Podczas statycznej próby zginania, próbka materiału jest poddana stałym siłom skierowanym przeciwnie do osi zginania. Próbkę zgina się aż do osiągnięcia punktu zerwania lub innego kryterium zniszczenia. Dane są zwykle rejestrowane za pomocą specjalnych czujników lub urządzeń pomiarowych. Próba ta ma na celu ustalenie granicy wytrzymałości materiału na zginanie oraz jego właściwości mechaniczne, takie jak sztywność, moduł sprężystości i plastyczność. Miarą własności plastycznych jest kąt, przy którym próbka zegnije się bez widocznych rys, czy pęknięć [10,12]. Na Rysunku 6 przedstawiono próbkę po badaniu statycznej próby zginania.

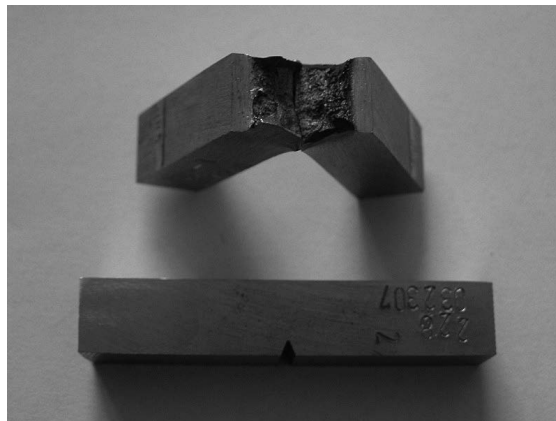


Rysunek 6. Próbkę złącza spawanego po badaniu statycznej próby zginania [13]

Figure 6: Welded joint specimen after static bend test [13]

3.1.3. Dynamiczna próba udarności

Udarność (znana również jako wytrzymałość udarowa) to właściwość materiału, która określa jego zdolność do absorbowania energii podczas obciążenia udarowego. Badanie polega na złamaniu próbki jednym uderzeniem młota wahadłowego i pomiarze jej energii złamania. Podczas próby udarności, energia kinetyczna jest przenoszona na próbkę materiału w bardzo krótkim czasie, co powoduje gwałtowny wzrost naprężeń. Udarność jest mierzona poprzez pomiar energii pochłoniętej przez próbkę w wyniku udaru. Badania te wykonuje się zgodnie z normą PN-EN ISO 148-1 Metale – Próba udarności sposobem Charpy’ego – Część 1: Metoda badania [10,12]. Na Rysunku 7 przedstawiono próbkę po dynamicznej próbie udarności.



Rysunek 7. Próbkę po dynamicznej próbie udarności [14]

Figure 7: Sample after dynamic impact test [14]

4. KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE MODELOWANIA I SYMULACJI

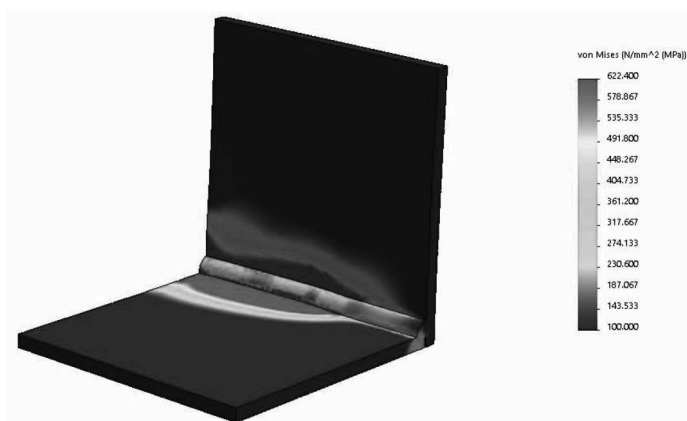
Symulacje komputerowe wspomagają proces spawania, dostarczając cennych informacji i prognoz. Dzięki którym można analizować i optymalizować różne aspekty spawania. Obszary, w których wykorzystuje się symulacje komputerowe do wspomaganie procesów spawania to:

- 1) Optymalizacja parametrów spawania: Symulacje umożliwiają przeprowadzenie procesu z wykorzystaniem różnymi parametrami spawania, takimi jak napięcie czy natężenie prądu w celu odnalezienie optymalnych ustawień oraz poprawy jakości spoiny.

- 2) Prognozowanie mikrostruktury: Symulacje mogą przewidywać mikrostrukturę materiału spawanego, co jest istotne dla oceny wytrzymałości, twardości i innych właściwości mechanicznych.
- 3) Analiza przepływu ciepła: Symulacje przeprowadzane za pomocą systemów CAE (Computer Aided Engineering) pozwalają zamodelować rozkład ciepła podczas spawania, pomagając określić profile temperatury, szybkości chłodzenia oraz potencjalne strefy wpływu ciepła (Rysunek 8).
- 4) Badanie naprężeń i odkształceń: Symulacje umożliwiają przewidywanie naprężeń i odkształceń, które mogą wystąpić podczas spawania. Pozwala to ocenić wpływ spoiny na wytrzymałość i trwałość elementu (Rysunek 9).



Rysunek 8. Symulacja przepływu ciepła w procesie spawania [15].
Figure 8. Simulation of heating in the welding process [15].



Rysunek 9. Symulacja naprężeń oraz odkształceń w procesie spawania [15].
Figure 9. Simulation of stresses and strains in the welding process [15].

Wykorzystanie symulacji komputerowych na etapie projektowania procesu pozwala na lepsze zrozumienie zjawisk zachodzących podczas spawania oraz poprawę jakości i efektywności tego procesu. W efekcie czego proces może zostać zoptymalizowany jeszcze przed przystąpieniem do spawania co znacząco ogranicza możliwe defekty oraz koszty.

5. PROBLEMY WYSTĘPUJĄCE PODCZAS TRWAŁEGO ŁĄCZENIA MATERIAŁÓW

Dobór parametrów procesu oraz przygotowanie elementów bezpośrednio wpływa na jakość i własności złącza. Nieodpowiednie ich dobranie powoduje wady, które dzielimy na

zewewnętrzne i wewnętrzne. Grupa wad wewnętrznych obejmuje przyklejenia, braki przetopu spoin obustronnych, pęknięcia, utlenienia, przegrzania, zażużlenia, wtrącenia oraz pęcherze. Natomiast wady zewnętrzne obejmują pęknięcia, nadmierny nadlew, brak przetopu, przestawienie blach, podtopienie lica i przetopu, wyciek stopiwa, pęcherze oraz nierównomierne lico.

Poprzez nieodpowiedni dobór parametrów procesu następuje powstawanie naprężeń spawalniczych, których wynikiem jest powstawanie odkształceń spawalniczych. Tworzą się w wyniku nierównomiernego rozkładu temperatury oraz utwardzenia łączonych elementów i późniejszego chłodzenia, które powoduje zmiany struktury materiału. Można wyróżnić naprężenia poprzeczne i podłużne względem osi spoiny. Defektem jaki jest bezpośrednio kojarzony z tym niekorzystnym zjawiskiem jest karb, którym nazywany jest czynnik wpływający na wytrzymałość zmęczeniową materiału [17].

W celu zapobiegania powstawania tych problemów możliwa jest analiza komputerowa złącz przed przystąpieniem do procesu oraz próby jednostkowe złącz elementów o zbliżonym lub takim samym składzie chemiczny.

6. PODSUMOWANIE

Współczesna inżynieria pozwala nam na pewniejszą weryfikację procesów pod kątem jakości i efektywności już na etapie planowania. Różne środki, na etapie projektowania minimalizują wady produkcyjne, zmniejszają potrzebny czas, co powoduje zmniejszenie kosztów, które są jednym z najważniejszych aspektów w przemyśle. Każda z wymienionych metod pozwala nam na udoskonalenie procesu. Niestety część z nich, dla wykonanych wyrobów jest destrukcyjna, dlatego w przemyśle zaleca się stosowanie metod mniej inwazyjnych, a zarazem efektywnych. Do zakwalifikowania wyrobu, gotowego produktu takie działania są wymagane, lecz w późniejszym czasie można zastosować metody nieniszczące, dzięki którym nasz wyrób będzie mógł być dalej eksploatowany. Obecnie przemysł także dąży do cyfryzacji, dlatego symulacje komputerowe są mile widziane przy obrazowaniu poszczególnych rozwiązań ze względu na możliwość przeprowadzania testów bez zbędnych zasobów w różnych ośrodkach, nie zważając na ograniczenia czasowe. Na tym etapie projektant już może spotkać niewidoczne w rzeczywistości ograniczenia, które może zaobserwować podczas wizualizacji w przejrzysty dla odbiorcy sposób. Niestety wiąże się to z wysokim kosztem odnośnie do potrzebnego oprogramowania, a co więcej w celu prawidłowego użytkowania z takiego asortymentu potrzebna jest osoba doświadczona, która będzie potrafiła odpowiednio odczytać wyniki i wyciągnąć z nich wnioski biorąc pod uwagę warunki technologiczne i parametry [18]. Badania nieniszczące na przykład wizualne i magnetyczno-proszkowe są jednymi z najszybszych metod kontroli, które pozwalają na powierzchniowe wykrycie niezgodności, często stosowane ze względu na łatwość przeprowadzania badania. Drugi typ badań – DT jak wspomniano może być przeprowadzony dla konkretnego wyrobu lub pod to przygotowanej próbki – powoduje zniszczenie elementu. Dzięki tym metodom możemy realnie scharakteryzować zachowanie próbek pod konkretnym obciążeniem itd. W przypadku złączy spawanych możemy diagnozować wady i doszukiwać się ich przyczyn oraz dociekać jak wady będą wpływać na całość konkretnej konstrukcji. Oprócz wad, istotna jest ogólna ocena wykonania złącza, doboru spoiwa, zachowania parametrów. Badane są złącza spawane różnych konstrukcji, od tych bardziej obciążonych – konstrukcji

stalowych, bardziej odpowiedzialne – złącza w rurociągach po złącza w odlewach naprawialnych jak i samych wyrobach hutniczych [19].

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Wiśniewski „Systemy zarządzania jakością w procesach spawania. kwalifikowanie personelu wykonującego i nadzoru zgodnie z EN 14730 - harmonizacja kwalifikowania spawaczy złączy termitowych szyn”, III Ogólnopolska Konferencja naukowo-techniczna, Warszawa 2007
- [2] Polski Komitet Normalizacyjny, PN EN ISO 9000, „Systemy zarządzania jakością -- Podstawy i terminologia”, Warszawa 2015
- [3] Polski Komitet Normalizacyjny, PN EN ISO 9712, „Badania nieniszczące -- Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących”, Warszawa 2022
- [4] Polski Komitet Normalizacyjny, PN EN ISO 9606, „Egzamin kwalifikacyjny spawaczy -- Spawanie -- Część 1: Stale”, Warszawa 2017
- [5] Polski Komitet Normalizacyjny, PN EN ISO 6520, „Spawanie i procesy pokrewne -- Klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach”, Warszawa 2009
- [6] Polski Komitet Normalizacyjny, PN EN ISO 13018:2016, Badania nieniszczące - Badania wizualne - Zasady ogólne, Warszawa 2016
- [7] Polski Komitet Normalizacyjny, PN EN ISO 3059:2013, Badania nieniszczące - Badania penetracyjne i badania magnetyczno-proszkowe -Warunki obserwacji, Warszawa 2013
- [8] Polski Komitet Normalizacyjny, PN EN ISO 3452-1:2021, Badania nieniszczące -Badania penetracyjne - Część 1: Zasady ogólne, Warszawa 2021
- [9] Polski Komitet Normalizacyjny, PN EN ISO 9934-1, Badania nieniszczące -- Badania magnetyczne proszkowe -- Część 1: Zasady ogólne, Warszawa 2017
- [10] P.Kossakowski „MATERIAŁY POMOCNICZE DO LABORATORIUM WYTRZYMAŁOŚCI MATERIAŁÓW”, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2008
- [11] https://spawalnicy.pl/images/probka_po_rozciaganiu.jpg (dostęp 28.05.2023r.)
- [12] Beluch W., Burczyński T., Fedeliński P., John A., Kokot G., Kuś W.: Laboratorium z wytrzymałości materiałów. Wyd. Politechniki Śląskiej, Skrypt nr 2285, Gliwice, 2002
- [13] <http://otspaw.com.pl/wp-content/uploads/2016/03/Zginanie-pr%C3%B3bek.jpg> (dostęp 28.05.2023r.)
- [14] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/5b/Proba_udarnosci_probki_02.jpg/800px-Proba_udarnosci_probki_02.jpg?20130212193547 (dostęp 28.05.2023r.)
- [15] https://depot.ceon.pl/bitstream/handle/123456789/9672/ZeszytyPW_Czesc2.pdf?sequence=1
Dostęp: 28.05.2023
- [16] <https://solidmania.com/sprawdzic-naprezenia-oraz-skurcz-spawalniczy-pomoca-olidworks-simulation/> Dostęp: 28.05.2023
- [17] B. Wichtowski, M. Wichtowski „Analiza wyników badań zmęczeniowych elementów stalowych w świetle wymogów norm europejskich”, Przegląd spawalnictwa vol. 90, nr 5, 2018.
- [18] <https://brasil.cel.agh.edu.pl/~08tstepien/index6bd1.html?page=simulation&ln=pl> (dostęp: 28.05.23)
- [19] <https://diagtest.pl/badania-niszczace-dt-spawalnictwo.php> (dostęp: 28.05.23)



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Znaczenie wdrożenia metody Total Productive Maintenance w działalności organizacji w obszarach produkcyjnym i pozaprodukcyjnym

M. Wolska^a, A. Folek^a, L. Gajda^b, M. Roszak^c

^a Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Metali Nieżelaznych
email: marta.wolska@imn.lukasiewicz.gov.pl

^b Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej, Katedra Technologii Materiałowych

^c Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

Streszczenie: Artykuł przedstawia ocenę znaczenia wdrożenia metody Total Productive Maintenance w obszarach produkcyjnym i pozaprodukcyjnym organizacji. Prawidłowe wdrożenie metody, dostosowane do profilu organizacji, pozwala w pełni wykorzystać potencjał urządzeń oraz ludzi. TPM, zarówno w obszarach produkcyjnym i pozaprodukcyjnym organizacji, może prowadzić do ustanowienia strategicznych, proaktywnych i progresywnych praktyk, stanowiąc tym samym istotny czynnik różnicujący osiągnięcie rynkowego sukcesu organizacji.

Abstract: The article presents a preliminary evaluation of the importance of implementing the Total Productive Maintenance method in production and non-production areas in organization. Correct implementation of the method, adapted to the company's profile, makes it possible to use the potential of equipment and people. TPM in production and non-production areas can result in the establishment of strategic, proactive and progressive practices, and thereby can be an important differentiating factor in achieving market success for the organization.

Słowa kluczowe: TPM, działalność produkcyjna, działalność pozaprodukcyjna, organizacja

1. WSTĘP

Otoczenie biznesowe przedsiębiorstw, cechujące się obecnie zmiennością, niepewnością, złożonością oraz niejednoznacznością, stwarza wiele wyzwań dla liderów organizacji. Przedsiębiorstwa na całym świecie, które znajdują się w obliczu zawirowań zostają zmuszone do analizy stosowanych modeli biznesowych. Niezbędne staje się wdrażanie odpowiednich modyfikacji i rozwój organizacji w sferze zarządzania umożliwiający sprostanie wymaganiom rynku. Na przełomie XX i XXI wieku można było zaobserwować globalną tendencję do zastępowania: produkcji masowej – indywidualizacją produktów, ekonomii skali – ekonomią pola, konkurencji ceną – konkurencją jakością, pracowników przeszkolonych specjalistycznie – pracownikami posiadającymi wszechstronne umiejętności [1]. Organizacje, w szczególności produkcyjne, chcąc efektywnie prowadzić swoją działalność, muszą

dysponować odpowiednim wyposażeniem oraz utrzymywać je w dobrym stanie technicznym. Właściciele i zarządy organizacji wykazują bardzo duże zainteresowanie wdrażaniem metod sterowania zgodnych z koncepcją Lean Manufacturing. Techniki i metody wchodzące w jej skład pozwalają na systematyczną identyfikację i eliminację strat poprzez ciągłe doskonalenie procesów. Poprawne wdrożenie narzędzi Lean daje możliwość zwiększenia skali produkcji, przy jednoczesnym zmniejszeniu wykorzystania urządzeń, czasu, miejsca i wysiłku ludzkiego. W miarę jak operacje produkcyjne stają się coraz bardziej złożone, metoda Total Productive Maintenance (TPM), związana z filozofią Lean, staje się podstawowym rozwiązaniem zapewniającym wydajną, opłacalną o wysokiej jakości produkcję [2].

2. CHARAKTERYSTYKA METODY TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE

Total Productive Maintenance (TPM), czyli całościowe produktywne utrzymanie maszyn, jest metodą, która znajduje zastosowanie głównie w przedsiębiorstwach produkcyjnych oraz wykazuje potencjał do wykorzystania w obszarach pozaprodukcyjnych tych organizacji. Metoda ma swoje źródło w systematycznym podejściu do konserwacji profilaktycznej (Preventive Maintenance – PM), promowanej w przemyśle japońskim w latach sześćdziesiątych XX wieku. Literatura przedmiotu wskazuje na różne definicje TPM - określany jest on m.in. jako „obsługa konserwacyjna prowadzona przez wszystkich pracowników w małych zespołach” [1], czy „program zarządzania konserwacją skoncentrowany na eliminacji czasu bezczynności wyposażenia” [3]. Nadrzędnym celem TPM jest osiągnięcie poziomu trzech zer: zero awarii, zero braków oraz zero wypadków przy pracy. Metoda polega na zarządzaniu parkiem maszyn w sposób oparty na prognozowaniu i umożliwiający zminimalizowanie kosztów związanych z zatrzymaniem linii spowodowanym awariami urządzeń. W założeniu, implementacja metody w organizacji ma prowadzić do powstawania oszczędności poprzez podniesienia produktywności wyposażenia [4]. Dane literaturowe wskazują, iż istnieją trzy kategorie przyczyn powstawania start w trakcie eksploatacji urządzeń, które są źródłem niskiego wykorzystania posiadanego wyposażenia:

1. straty związane z wyłączeniem urządzeń (awarie sprzętu, przebrojenia i regulacje),
2. straty związane z obniżeniem pracy urządzeń (bezczynności, krótkie zatrzymania, praca przy obniżonej prędkości),
3. straty związane z jakością (wytworzony produkt nie odpowiada wymaganemu poziomowi jakości, konieczność wytworzenia próbnych serii np. po przebrojeniu maszyny).

Posiadanie pełnej świadomości istnienia wyżej wymienionych przyczyn ułatwia późniejszą identyfikację źródeł oraz skuteczne ich eliminowanie [2]. TPM opiera się na holistycznym podejściu do konserwacji, która w założeniu powinna być proaktywna, a nie reaktywna. Do celów TPM, które mają kluczowe znaczenie dla osiągnięcia wydajności i sukcesu w procesach produkcyjnych zaliczane są:

1. maksymalizacja efektywności urządzeń,
2. minimalizacja przestojów,
3. redukcja kosztów związanych z konserwacją i naprawami,
4. poprawa kontroli jakości i spójności produktów,
5. poprawa bezpieczeństwa i zmniejszenie ryzyka wypadków,
6. zaangażowanie wszystkich pracowników w działania na rzecz ciągłego doskonalenia.

TPM, w odróżnieniu od założeń dot. tradycyjnego utrzymania ruchu, zakłada nadrzędną rolę szeroko rozumianej prewencji nad planem produkcji – czas poświęcony na przeglądy, modyfikacje i konserwacje procentuje w późniejszym okresie, kiedy to maszyna pracuje bez nieprzewidywanych przerw, a jakość produktu jest powtarzalna i odpowiednia [5].

Istotną cechą TPM jest wprowadzenie autonomicznego utrzymania urządzeń i maszyn przez operatorów, czyli zintegrowanie wielu podstawowych czynności obsługowych z procesem produkcyjnym. Kluczowym elementem jest udział operatorów urządzeń w programie usprawnień oraz przewidywaniu i zapobieganiu awariom. Ścisła współpraca pracowników utrzymania ruchu i operatorów podczas prac konserwacyjnych i napraw urządzeń pozwala na wzrost kompetencji obu stron w zakresie znajomości wszelkich aspektów dotyczących utrzymania bezusterkowości urządzeń. Metoda TPM oparta jest na przewidywaniu i zapobieganiu powstawania usterek podczas pracy urządzeń, dzięki czemu możliwe staje się wydłużenie cykli remontowych, zmniejszenie liczby niesprawności i awarii oraz minimalizacja czasu ich usuwania, a także lepsza gospodarka częściami zamiennymi [6].

3. ANALIZA ZNACZENIA METODY TPM W OBSZARACH PRODUKCYJNYCH I POZAPRODUKCYJNYCH ORGANIZACJI

TPM jest obecnie szeroko stosowany w branży produkcyjnej. Dane literaturowe wskazują, iż systematyczna realizacja założeń każdego z ośmiu filarów TPM przynosi wymierne korzyści całemu przedsiębiorstwu, odgrywając tym samym istotną rolę w usprawnianiu działalności organizacji – zestawienie przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Korzyści organizacji z wdrożenia poszczególnych filarów metody TPM (opracowanie własne)

Table 1. Benefits of the organization from the implementation of each pillar of the TPM method (own elaboration)

Filar – główne założenia	Korzyści dla organizacji
<i>Autonomiczne utrzymanie ruchu – samodzielność pracowników w zakresie utrzymania ruchu</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ zwiększenie znajomości urządzeń, ▪ wzrost motywacji oraz kwalifikacji operatorów, ▪ zapewnienie prawidłowej konserwacji urządzeń, ▪ szybka i sprawna identyfikacja wszelkich niebezpiecznych symptomów w działaniu urządzenia, ▪ uwolnienie pracowników utrzymania ruchu do zadań wyższego poziomu,
<i>Planowe utrzymanie ruchu - planowanie działań konserwacyjnych w oparciu o przewidywane i/lub zmierzone wskaźniki awaryjności</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ znaczne zmniejszenie liczby nieplanowanych przestoju, ▪ planowanie czynności konserwacyjnych w czasie, gdy urządzenia nie są wykorzystywane w produkcji ▪ ciągłe monitorowanie zużycia zasobów, ▪ efektywne zarządzanie kosztami utrzymania ruchu
<i>Zapewnienie jakości - wykrywanie błędów i zapobieganie im w procesach produkcyjnych</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ukierunkowanie na kwestie jakościowe poprzez projekty doskonalące skoncentrowane na usuwaniu źródeł wad, ▪ zmniejszenie liczby defektów, ▪ zmniejszenie kosztów dzięki wczesnemu wychwytywaniu usterek,

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ zwiększenie zadowolenia klienta poprzez poprawę jakości i spójności produktów,
<i>Ukierunkowane doskonalenie</i> - osiągnięcie regularnych, stopniowych ulepszeń w działaniu urządzeń w wyniku stałej współpracy produkcji i utrzymania ruchu	<ul style="list-style-type: none"> ▪ eliminowanie marnotrawstwa, ▪ udoskonalenie codziennej pracy, ▪ identyfikacja przyczyn źródłowych awarii, ▪ łączenie zbiorowych talentów organizacji, w celu stworzenia siły napędowej do ciągłego doskonalenia,
<i>Wczesne planowanie konserwacji</i> - kierowanie się praktyczną wiedzą w celu planowania działań konserwacyjnych nowych urządzeń	<ul style="list-style-type: none"> ▪ każdorazowa weryfikacja opłacalności modernizacji, naprawy czy też zakupu nowego urządzenia, ▪ zaplanowane poziomy wydajności nowych urządzeń są osiągnięte znacznie szybciej, ▪ uproszczenie etapu konserwacji dzięki praktycznemu przeglądowi i zaangażowaniu pracowników przed instalacją, ▪ ułatwienie planowania finansowego w zakresie usług serwisowych
<i>Rozwój i szkolenie pracowników</i> - uzupełnienie braków wiedzy niezbędnej do osiągnięcia celów TPM	<ul style="list-style-type: none"> ▪ samodzielność operatorów w dokonywaniu drobnych napraw, ▪ rozwój umiejętności twardych i miękkich pracowników, ▪ zmiany działania organizacji z reaktywnego, poprzez prewencyjne, na predykcyjne, ▪ motywacja personalna,
<i>Bezpieczeństwo i środowisko</i> - utrzymanie bezpiecznego i zdrowego środowiska pracy	<ul style="list-style-type: none"> ▪ eliminacja potencjalnych zagrożeń dla zdrowia i bezpieczeństwa, ▪ minimalizacja ryzyka wpływów środowiskowych, w przypadku awarii
<i>Komunikacja międzydziałowa/ Office TPM</i> - zastosowanie TPM do obszarów administracyjnych	<ul style="list-style-type: none"> ▪ poprawa procedur związanych z przetwarzaniem zamówień, standardów dokumentacji, czy też harmonogramowania, ▪ doskonalenie komunikacji między poszczególnymi działami, ▪ eliminacja marnotrawstwa w obszarze administracyjnym.

TPM nie ogranicza się tylko do obszarów produkcyjnych - ma również na celu usprawnienie operacji pozaprodukcyjnych, w tym biurowych i administracyjnych. Krytycznym celem wdrażania TPM w działach nieprodukcyjnych organizacji jest poprawa ich efektywności w wypełnianiu podstawowych zadań, a także poprawa efektywności wsparcia świadczonego przez te działy. Zasady całkowitego produktywnego utrzymania ruchu przyjęte kompleksowo w całej strukturze organizacyjnej, ułatwiają eliminację odpadów i zwiększenie wydajności procesów zarządczych w zakresie zaopatrzenia, przetwarzania zamówień i planowania. Przedsiębiorstwa stosując zasady, takie jak autonomiczna konserwacja, planowana konserwacja i kontrola jakości w procesach biurowych, mogą skrócić przestoje, zwiększyć produktywność oraz poprawić zaangażowanie i zadowolenie pracowników. Jako główne korzyści z wdrożenia Office TPM można wskazać [7]:

1. poprawę produktywności i wydajności biura, poprzez eliminację odpadów i usprawnienie procesów,
2. zwiększone bezpieczeństwo i jakość pracy biurowej dzięki standaryzacji pracy, zabezpieczeniu przed błędami i kontroli jakości,
3. redukcję kosztów biurowych i marnotrawstwa poprzez eliminację działań nieprzynoszących wartości dodanej,
4. zwiększone zaangażowanie i satysfakcja pracowników, dzięki bezpośredniemu zaangażowaniu w działania usprawniające i zwiększoną odpowiedzialność za procesy,
5. rozwój kultury ciągłego doskonalenia poprzez pracę zespołową, w celu identyfikacji i eliminacji marnotrawstwa oraz poprawę procesów i komunikacji,
6. zwiększenie odporności na błędy poprzez projektowanie procesów i systemów biurowych w sposób zapobiegający występowaniu błędów i usterek.

Integrując Office TPM z innymi filarami TPM oraz wykorzystując dane i analizy do pomiaru efektywności procesów biurowych, organizacje mogą osiągać kolejne cele doskonalenia i trwały sukces. Dostępna literatura wskazuje również, iż metoda TPM wykazuje potencjał wdrożeniowy w organizacjach, które funkcjonują całkowicie w obszarach pozaprodukcyjnych, np. usługach, hotelarstwie, opiece zdrowotnej, edukacji, transporcie, budownictwie. Przykładem są badania T.H. Haddad i A.A. Jaaron, prowadzone nad wdrożeniem TPM w działalności szpitala, w celu zwiększenia dostępności urządzeń medycznych i zmniejszenia ich awaryjności [8]. Podobne badania opisał zespół R. Chompu-Inwai, S. Tipgunta, A. Sunawan, które dotyczyły efektów pilotażowego wdrożenia TPM dla oddziałów stomatologicznych, co pozwoliło na zwiększenie poziomu wykorzystania i dostępności urządzeń stomatologicznych a także zmniejszenia nieplanowanych przestoju sprzętu [9], czy badania A.Y. Ali nad stosowalnością TPM w drukarni gazet [10]. Wyniki, uzyskane w każdym z wymienionych powyżej artykułów, wskazują na wysoki potencjał wdrożenia standaryzacji szeregu działań kontrolnych w obszarze TPM.

Część z funkcjonujących na rynku przedsiębiorstw cechuje się jednoczesną wielokierunkową działalnością oraz zróżnicowaniem procesów głównych w strukturze organizacji. Przykładem może być Centrum Chemii Analitycznej, będące jednostką strukturalną Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytutu Metali Nieżelaznych. Profil działalności Centrum, obejmujący zarówno obszar produkcyjny, jak i pozaprodukcyjny, opiera się na trzech głównych filarach: usługowym – komercyjne badania laboratoryjne, badawczym – realizacja projektów naukowych oraz produkcyjnym – produkcja certyfikowanych materiałów odniesienia. Dodatkowym obszarem jest wewnętrzna administracja koordynująca pełną obsługę Centrum, zarówno na poziomie finansowym, jak i organizacyjnym. Część wyposażenia laboratoryjnego Centrum wykorzystywana jest wielokierunkowo, tj. w każdej z prowadzonych działalności. Potencjalne problemy z nieplanowanymi przestojami, awariami, usterkami takiego wyposażenia stanowią wysokie ryzyko, którego skutki mogą rzutować na pracę laboratorium - wyposażenie jest wyłączone czasowo z użytkowania, przez co możliwość realizacji każdego z procesów – usługowego, produkcyjnego, czy też badawczego, zostaje zatrzymana. Tym samym laboratorium może być zagrożone dużymi stratami finansowymi wynikającymi z niedopełnienia terminów realizacji poszczególnych zadań, a także w skrajnej sytuacji stracić wiarygodność rynkową. Wdrożenie TPM do każdego ze wskazanych obszarów, w tym obszarze zarządczego organizacji, może stanowić potencjał kształtujący nowe możliwości organizacji w zakresie racjonalnej gospodarki zasobami a w konsekwencji finansami. Niższe koszty operacyjne, dłuższa żywotność wyposażenia, niższe

ogólne koszty konserwacji, usprawnienie procesów, redukcja odpadów, zwiększona produktywność mogą przyczynić się do ogólnej doskonałości organizacyjnej i konkurencyjności. Wstępna analiza potrzeb wykazuje, iż wdrożenie TPM, zarówno w obszarze produkcyjnym, jak i pozaprodukcyjnym Centrum, może skutkować osiągnięciem efektu synergicznego, który stanie się przyczynkiem zwiększonej elastyczności w odniesieniu do zmieniających się wymagań rynku oraz potrzeb klienta [11].

4. PODSUMOWANIE

Dynamicznie zmieniające się potrzeby rynku oraz stale rosnąca globalna konkurencja daje impuls wielu organizacjom na całym świecie do przyjęcia skutecznych i wydajnych strategii utrzymania ruchu, w tym m.in. metody TPM. Prawidłowe wdrożenie strategicznych inicjatyw i metod, dostosowanych każdorazowo do realiów funkcjonowania danej organizacji, pozwala wykorzystać w bardziej optymalny sposób możliwości urządzeń oraz ludzi. Holistyczne wdrożenie TPM w organizacji powinno prowadzić do ustanowienia strategicznych, proaktywnych i progresywnych praktyk, umożliwiających uniknięcie start systemowych i start związanych z posiadanym wyposażeniem. Zarówno dla obszarów produkcyjnych, jak i pozaprodukcyjnych, znaczenie metody TPM jest zbliżone, jej wdrożenie, przy założeniu prawidłowego wykorzystania jej narzędziami umożliwia:

- osiągnięcie trwałego wzrostu organizacyjnego,
- reagowanie na zmiany przy zachowaniu konkurencyjności przedsiębiorstwa,
- synchronizację procesów,
- osiągnięcie większej elastyczności działania,
- poprawę kultury organizacji,
- poprawę produktywności i jakości,
- wykorzystanie możliwości redukcji kosztów,
- minimalizację inwestycji w nowe technologie i maksymalizację zwrotu inwestycji,
- optymalizację poziomu zapasów i czasu realizacji procesów w celu osiągnięcia optymalnego czasu dostępności/sprawności urządzeń,
- minimalizację wpływu czynników zewnętrznych takich jak silna konkurencja, globalizacja, wzrost kosztów surowców i energii,
- rozwiązanie problemów wewnętrznych organizacji, np. niska produktywność, duża liczba skarg klientów, wysoki wskaźnik defektów, nieprzestrzeganie terminów dostaw/realizacji usług,
- zapewnienie bardziej efektywnego wykorzystania zasobów ludzkich,
- uczynienie pracy prostszą i bezpieczniejszą.

Wdrożenie TPM może okazać się najlepszą proaktywną inicjatywą strategiczną organizacji, która może umożliwić organizacji osiągnięcie nowych korzyści w tym kształtować sukces organizacji w każdym obszarze jej działalności.

LITERATURA

1. M. Walczak, Program doskonalenia konserwacji wyposażenia produkcyjnego TPM, Zeszyty Naukowe Akademii Ekonomicznej w Krakowie, z. 670, 2005.

2. P. Kisiel, Koncepcja wdrożenia wybranych metod Lean Production w przedsiębiorstwie produkcyjnym, *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, 1410-1414 (6), 2017.
3. W.S. Chaneski, Total Productive Maintenance – An Effective Technique, *Modern Machine Shop*, 2002.
4. K. Al.-Hassan, J. Chan, A. Metcalfe, The Role of Total Productive Maintenance in Bussiness Excellence, *Total Quality Management*, vol. 11, 2000.
5. M. Walczak, System utrzymania ruchu czynnikiem przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstwa, *Historia i perspektywy nauk o zarządzaniu*, 2012.
6. E. Michlowicz, B. Karwat, Implenmentation of Total Productive Maintenance – TPM in enterprise, *ScientificJournals*, z.24, 2010.
7. N. Kanta Patra, J.K. Tripathy, B.K. Choudhary, Implementing the office total productive maintenance (“office TPM”) program: a library case study, *Library Review*, 415-424 (54), 2005.
8. T.H. Haddad, A.A. Jaaron, The applicability of total productive maintenance for healthcare facilities: an implementation methodology, *International Journal of Business, Humanities And Technology*, 148-155 (2), 2012.
9. R. Chompu-Inwai, S. Tipgunta, A. Sunawan, Implementation of total productive maintenance in healthcare: A pilot study, *International Conference on Service Systems and Service Management*, 2008.
10. A. Y. Ali, Application of Total Productive Maintenance in Service Organization, *International Journal of Research in Industrial Engineering*, 176-186 (8), 2019
11. M. Wolska, A. Folek, T. Gorewoda, L. Gajda, M. Roszak, Wstępna ocena potencjału Total Productive Maintenance w działalności laboratorium badawczego, *TalentDetector International Students Scientific Conference*, 547-553, 2023.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Application of Biomaterials Materials for Medicine

S. Worku ^a, M. Bonek ^b

^a Jimma University, Jimma Institute of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Erasmus+ Student

email: sichale.fita@gmail.com

^b Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials

email: mirosław.bonek@polsl.pl

Abstract: Biomaterials have revolutionized the field of medicine by enabling innovative approaches for diagnosis, treatment, and tissue regeneration. Biomaterials have become an increasingly important part of modern medicine, with applications ranging from drug delivery systems to tissue engineering. In this article review, we will explore the use of different biomaterials in various medical applications and the advantages of different biomaterials products for parts of the human body.

Keywords: Biomaterials, Medicine, Regeneration

1. INTRODUCTION

Biomaterials play a vital role in medicine, as they are used in various applications to improve healthcare and medical treatments. Regenerative medicine and tissue engineering are closely reliant on comprehending the development process of native bones over time.[1]. Regenerative medicine and tissue engineering attempt to repair diseased or damaged tissue by combining functioning cells, cell signals, and biodegradable scaffolds created by utilizing various engineered biomaterials [2]. To regenerate bone, composite biomaterials have been applied [3]. Bone tissue engineering evolved to a level where it is currently an interesting approach for treating congenital deformity correction, surgical resection, and trauma-induced bone defects [4]. Scaffolds utilized as the fundamental components of tissues be highly porous, exhibit the essential surface characteristics that promote cell adhesion, proliferation, and differentiation, and possess acceptable mechanical properties as well as non-cytotoxicity and osteoconductivity [4] [5], [6].

Biomaterials can be appropriately developed and utilized to meet the demand [3]. The goal of inert (passive) biomaterials is to guarantee that their implantation causes as little interruption as possible to the biomineralization process [1]. For bone tissue regeneration, bioactive biomaterials have been accepted as one of the most effective alternatives to autografts, allografts, and xenografts [7]. Recently, a wide range of biomaterials for bone tissue

engineering has been developed [3]. They include scaffolds created from metal, ceramics, polymers, and composite substances. The most widely used metallic scaffolds are composed of titanium, stainless steel, and metal matrix-based biomaterials. However, due to their low resorption and degradation, high rigidity, and stress-shielding properties, they prevent native tissue from being mechanically stimulated [8].

On the other hand, a variety of synthetic and natural clustering ceramics and polymers have been widely used [3], [4], [8]. Ceramics and polymers form an attempt to fill the gap left by those metallic scaffolds through their good degradability, biocompatibility, controlled resorption for subsequent neof ormation of the bone, and trouble-free tampering with the degradation through copolymerization and changes in hydrophobicity and crystalline structure [9]. Even so, the single-phase scaffold, which is made of either ceramic or polymer material, only allows for non-load-bearing applications and non-critical-sized errors. Bioceramic materials, such as ceramics, glass ceramics, and bioglasses, are known for their excellent biocompatibility and ability to integrate with living tissues. So, they are important materials for scaffold production. Even though they were initially created in the 1980s for the first time the clinical applications start on the total hip replacement joint in the early 2000s [10].

Due to their favourable characteristics of bone bioactivity and biocompatibility, calcium silicate-based bio ceramics (CaO and SiO₂) are being considered for use in orthopedic implants [11]. They are also bioactive and osteoconductive materials that have been used in orthopedics, dental and maxillofacial surgery, and traumatology, having promising results for repairing bone damage in the last decades [12]. Ca-Si-based bioceramics can encourage the osteogenic differentiation of stem cells like bone marrow stromal cells, adipose-derived stem cells, human dental pulp cells, and periodontal ligament cells [13]– [17]. However, these biomaterials' osteogenic potential, bio reabsorption rate, and strength must be improved.

In the biological environment, resorbable bioceramics such as calcium sulfate (CS), tricalcium phosphate (TCP), and hydroxyapatite (HA) are degradable. They release calcium ions after implantation which improve bioactivity by encouraging osteoblast improvement and microbial development in the vicinity of bone deficiency [18][19]–[21]. Also due to their great biocompatibility and osteoconductive, calcium phosphate bioceramics like hydroxyapatite (HA), tricalcium phosphate (TCP), and biphasic calcium phosphate (BCP) have become common substitutes for the repair and regeneration of bone defects [17], [22], [23].

2.D IFFERENT BIOMATERIALS HAVE BEEN USED FOR SCAFFOLD PREPARATION

Even though different materials have been used for scaffold preparation, the choice of scaffold material depends on factors such as the specific tissue being targeted, desired mechanical properties, degradation characteristics, and the interaction with cells. Due to the ability of bone defects to repair, in general, biomaterials have been extensively studied for this use [24]. Those materials are biometal[25], biopolymer[26], bio ceramic[27], and bio composites[28]. Biomimetic composite scaffold Bio Glass-Collagen-Phosphatidylserine (BG-COL-PS) was created using a freeze-drying technique. Having an effective interconnective pore structure in aiding cell seeding and spatial dispersion of transplanted cells, again according to the outcomes of in vitro experiments, rMSCs (Rat mesenchymal stem cells) grew on BG-COL-PS composite scaffolds displayed a better level of attachment, growth, and osteogenic differentiation than those grown on BG-COL scaffolds [4].

Alumina (Al_2O_3) was the first ceramic oxide used in orthopedics; afterward, alumina-zirconia ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$) ceramic composite oxides were developed to achieve higher mechanical performance [10], [29]. Scaffolds comprised of 30% CaSiO_3 & 70% $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ were created using a solid-state reaction and were shown to be biocompatible with ah-MSCs (adult human mesenchymal stem cells) due to the cells' acceptable morphology and adequate proliferation rate in contact with the biphasic ceramics [12]. On another way, a Biomaterial scaffold of NSAg (nanosized silver), porous -TCP (β -tricalcium phosphate) doped with 5 or 10 wt% nanosized Ag (5wt%NSAgTCP or 10 wt% NSAgTCP, respectively) was synthesized to release Ag^+ in a controlled manner during the entire healing process to decrease the risk of long-term infections of the scaffold used in clinical [30]. Employing bacterial cellulose as a polymeric template, composite scaffolds based on calcium phosphates and barium titanate were generated. increasing their thermal treatment temperature from 1000 to 1200 °C. as both prepared and thermally treated samples showed biocompatibility [3].

Trough biomimetic mineralization, new bone-mimetic nanohydroxyapatite (nHA)/collagen (Col) porous scaffolds (nHA/Col) have been developed from surface silanized mesoporous nano bioglass (NBG)/Col hybrid scaffolds[31].PRF (platelet-rich fibrin) plus TCP (tricalcium phosphate) had excellent biosafety and helped trigger osteoblast cell attachment, gradual release of bioactive factors, cell proliferation, cell migration, and ECM creation that might have affected bone repair[32].

A combination of the digital light processing (DLP) printing technique and the in-situ growth crystal procedure was used for building hierarchical porous tricalcium phosphate (-TCP) scaffolds with three types of micro/nano surface topography. Both increased bone regeneration in vivo and in vitro are facilitated by the hierarchical porosity structure and proliferation of micro/nano surfaces [33]. Due to their excellent bioactivity, controlled degradation rate, and mechanical properties, bioactive calcium phosphates (Ca-P), calcium silicates (CaSiO_3), and CaMg-Si bioglass/glass-ceramics have attracted significant interest in recent years for applications in bone tissue regeneration, osteointegration, and hard-tissue repair [34]-[35]. Many medical procedures use bio-ceramic materials composed of biocompatible ceramic, containing both bioinert and bioactive elements [36][37]. Calcium (Ca) and silicon (Si) bioceramics have been showing character to promote osteogenesis and vascularization, while magnesium (Mg) and titanium (Ti) metals have excellent mechanical properties and biocompatibility [38]-[40].

As we see above Several studies have investigated the use of biomaterials, such as hydroxyapatite and tricalcium phosphate, Bio Glass-Collagen-Phosphatidylserine, alumina-zirconia, of NSAg (nanosized silver), calcium phosphates and barium titanate, as bone graft substitutes. However, these materials have limited mechanical strength and may not be suitable for load-bearing applications, such as spinal fusion [41], [42]. In contrast, the addition of metals to bio-ceramic materials like Mg and Ti metals has excellent mechanical properties but may not provide the necessary biological activity for bone regeneration. Therefore, combining bioceramics and strong metals could potentially provide a material with both mechanical and biological properties necessary for spinal fusion procedures [43], [44].

2. BIOMATERIALS FOR SCAFFOLD APPLICATION

The major components of human bone are organic type I collagen and inorganic hydroxyapatite (a natural ceramic). Additionally, there are small amounts of ground substances, such as

glycoproteins and proteoglycans, which play crucial roles in controlling bone regeneration and mineralization [4][45]. Here we will see two basic biomaterials use for bone and dental replacement.

3.1 Bone

Bone defects commonly impact the hips, knees, and spine and are usually brought on by trauma, tumors, and infections [46]. Due to fractured bone may not be able to recover by itself so additional material is necessary to fill the gap Bone grafting using autogenous materials is the gold standard for bone defect [8][12]. Osteogenic, osteoinductive, and osteoconductive are the three basic characteristics that autogenous bone grafts satisfy. Osteogenic denotes the presence of live cells capable of differentiating into osteoblasts. In addition to serving as scaffolds, bone transplants also could create new bone on their surface (osteoconductive)[8].

Metals, ceramics, polymers, and composite materials are the main materials used for bone scaffold. Bioactive porous biomaterial scaffolds are a promising component of bone tissue engineering methodologies for achieving effective bone tissue regeneration [7]. Osteoarthritis, osteoporosis, fractures, tumors of the bone, and other conditions affecting the joints are disorders related to the bones. A few variables that contribute to these injuries include an aging population, poor diet, physical inactivity, and an increase in life expectancy. More than 8.9 million fractures occur each year due to osteoporosis globally [47][48].

Degenerative spinal disorders, such as disc herniation, spinal stenosis, and spondylolisthesis, are common causes of lower back pain and disability [49], [50]. Thus why, bone grafts are the solution for this. But traditional bone grafts have limitations, including donor site morbidity, limited availability, and lack of mechanical strength, leading to an increased risk of fracture and pseudarthrosis [51], [52]

3.2 Dental

One of the major global causes of oral health morbidity is tooth decay. To reconstruct tooth morphology, restore function, reduce pain, and improve beauty products, a major number of dental treatments involve the use of various dental restorative materials [53]. Materials with the potential for remineralization are frequently referred to as bioactive materials for restorative dental work. In orthopedics, alumina-zirconia ceramic composites are widely used, and their importance in dentistry is rising. This is because the materials now being produced are biologically safe, stable, and have exceptional mechanical qualities [10].

Dr. Sami Sandhaus, a Swiss dentist, developed the Crystalline Bone Screw—CBS®, a dental implant that features a screw-like structure, and employed it in a substantial number of patients in 1962. This is the origin of alumina's use as a biomaterial [10]. Zirconia is used as a bioceramic material for single- and multi-unit fixed dental restorations as well as for implant-supported prostheses' abutments and infrastructures [54]

CONCLUSION

In conclusion, the application of biomaterials in medicine has transformed the discipline and significantly impacted the treatment of individuals and their quality of life. They have been used for Tissue Engineering and Regenerative Medicine, Implants, and Prosthetics. Ceramics

and polymers have been used due to their biocompatibility and biodegradability. Nowadays bio-ceramic materials become effective alternatives to autografts, allografts, and xenografts because they have the character of releasing ions after implantation. Materials made of biometal, biopolymer, bio ceramic, and biocomposites as generally used for bone and dental are analyzed in this review article.

BIBLIOGRAPHY

1. M. Shams, M. Karimi, M. Heydari, and A. Salimi, "Nanocomposite scaffolds composed of Apacite (apatite-calcite) nanostructures, poly (ϵ -caprolactone) and poly (2-hydroxyethylmethacrylate): The effect of nanostructures on physico-mechanical properties and osteogenic differentiation of human bone marrow mesenchymal stem cells in vitro," *Materials Science and Engineering C*, vol. 117, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.msec.2020.111271.
2. Q. ul A. Malik *et al.*, "Smart injectable self-setting bioceramics for dental applications," *Materials Science and Engineering C*, vol. 113, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.msec.2020.110956.
3. D. Draghici, C. Busuioc, A. Mocanu, A. I. Nicoara, F. Iordache, and S. I. Jinga, "Composite scaffolds based on calcium phosphates and barium titanate obtained through bacterial cellulose templated synthesis," *Materials Science and Engineering C*, vol. 110, May 2020, doi: 10.1016/j.msec.2020.110704.
4. Xu *et al.*, "Biocompatibility and osteogenesis of biomimetic Bioglass-Collagen-Phosphatidylserine composite scaffolds for bone tissue engineering," *Biomaterials*, vol. 32, no. 4, pp. 1051–1058, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.biomaterials.2010.09.068.
5. J. R. Porter, T. T. Ruckh, and K. C. Papat, "Bone tissue engineering: A review in bone biomimetics and drug delivery strategies," *Biotechnol Prog*, vol. 25, no. 6, pp. 1539–1560, Nov. 2009, doi: 10.1002/btpr.246.
6. J. Salgado, O. P. Coutinho, and R. L. Reis, "Bone tissue engineering: State of the art and future trends," *Macromolecular Bioscience*, vol. 4, no. 8, pp. 743–765, Aug. 09, 2004. doi: 10.1002/mabi.200400026.
7. M. Chen, F. Zhao, Y. Li, M. Wang, X. Chen, and B. Lei, "3D-printed photoluminescent bioactive scaffolds with biomimetic elastomeric surface for enhanced bone tissue engineering," *Materials Science and Engineering C*, vol. 106, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.msec.2019.110153.
8. P. Lichte, H. C. Pape, T. Pufe, P. Kobbe, and H. Fischer, "Scaffolds for bone healing: Concepts, materials and evidence," *Injury*, vol. 42, no. 6, pp. 569–573, 2011, doi: 10.1016/j.injury.2011.03.033.
9. N. Kamboj, J. Kazantseva, R. Rahmani, M. A. Rodríguez, and I. Hussainova, "Selective laser sintered bio-inspired silicon-wollastonite scaffolds for bone tissue engineering," *Materials Science and Engineering C*, vol. 116, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.msec.2020.111223.
10. C. Piconi and S. Sprio, "Oxide bioceramic composites in orthopedics and dentistry," *Journal of Composites Science*, vol. 5, no. 8. MDPI AG, Aug. 01, 2021. doi: 10.3390/jcs5080206.
11. D. Q. Pham *et al.*, "Baghdadite coating formed by hybrid water-stabilized plasma spray for bioceramic applications: Mechanical and biological evaluations," *Materials Science and Engineering C*, vol. 122, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.msec.2021.111873.

12. P. Ros-Tárraga, P. Mazón, B. Revilla-Nuín, R. Rabadán-Ros, P. N. de Aza, and L. Meseguer-Olmo, "High temperature CaSiO₃-Ca₃(PO₄)₂ ceramic promotes osteogenic differentiation in adult human mesenchymal stem cells," *Materials Science and Engineering C*, vol. 107, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.msec.2019.110355.
13. G. Wang *et al.*, "Effects of Sr-HT-Gahnite on osteogenesis and angiogenesis by adipose derived stem cells for critical-sized calvarial defect repair," *Sci Rep*, vol. 7, Jan. 2017, doi: 10.1038/srep41135.
14. H. Li, K. Xue, N. Kong, K. Liu, and J. Chang, "Silicate bioceramics enhanced vascularization and osteogenesis through stimulating interactions between endothelia cells and bone marrow stromal cells," *Biomaterials*, vol. 35, no. 12, pp. 3803–3818, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.biomaterials.2014.01.039.
15. C. Wu and J. Chang, "A review of bioactive silicate ceramics," *Biomedical Materials (Bristol)*, vol. 8, no. 3. Institute of Physics Publishing, 2013. doi: 10.1088/1748-6041/8/3/032001.
16. B. C. Wu *et al.*, "The effects of calcium silicate cement/fibroblast growth factor-2 composite on osteogenesis accelerator in human dental pulp cells," *J Dent Sci*, vol. 10, no. 2, pp. 145–153, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.jds.2013.12.003.
17. S. Xu, Q. Wu, Y. Guo, C. Ning, and K. Dai, "Copper containing silicocarnotite bioceramic with improved mechanical strength and antibacterial activity," *Materials Science and Engineering C*, vol. 118, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.msec.2020.111493.
18. H. Y. Chang, W. H. Tuan, and P. L. Lai, "Biphasic ceramic bone graft with biphasic degradation rates," *Materials Science and Engineering C*, vol. 118, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.msec.2020.111421.
19. G. Yang *et al.*, "Bioactive calcium sulfate/magnesium phosphate cement for bone substitute applications," *Materials Science and Engineering C*, vol. 35, no. 1, pp. 70–76, 2014, doi: 10.1016/j.msec.2013.10.016.
20. M. V. Thomas and D. A. Puleo, "Calcium sulfate: Properties and clinical applications," *Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials*, vol. 88, no. 2, pp. 597–610, Feb. 2009. doi: 10.1002/jbm.b.31269.
21. K. M. Woo, B. Yu, H. M. Jung, and Y. K. Lee, "Comparative evaluation of different crystal-structured calcium sulfates as bone-filling materials," *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, vol. 91, no. 2, pp. 545–554, Nov. 2009, doi: 10.1002/jbm.b.31428.
22. J. X. Lu *et al.*, "Role of interconnections in porous bioceramics on bone recolonization in vitro and in vivo," 1999.
23. Haider, S. Haider, S. S. Han, and I. K. Kang, "Recent advances in the synthesis, functionalization and biomedical applications of hydroxyapatite: a review," *RSC Advances*, vol. 7, no. 13. Royal Society of Chemistry, pp. 7442–7458, 2017. doi: 10.1039/c6ra26124h.
24. J. R. S. Silva, L. N. R. M. Santos, R. M. C. Farias, B. V. Sousa, G. A. Neves, and R. R. Menezes, "Alumina applied in bone regeneration: porous α -alumina and transition alumina," *Ceramica*, vol. 68, no. 387, pp. 355–363, 2022, doi: 10.1590/0366-69132022683873335.
25. Z. Zheng *et al.*, "The Impact of Non-uniform Metal Scaffolds on the Performance of 3D Structured Silicon Anodes," *J Energy Storage*, vol. 30, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101502.

26. Y. Luo, F. Xue, K. Liu, B. Li, C. Fu, and J. Ding, "Physical and biological engineering of polymer scaffolds to potentiate repair of spinal cord injury," *Materials and Design*, vol. 201. Elsevier Ltd, Mar. 01, 2021. doi: 10.1016/j.matdes.2021.109484.
27. C. Paredes, F. J. Martínez-Vázquez, H. Elsayed, P. Colombo, A. Pajares, and P. Miranda, "Evaluation of direct light processing for the fabrication of bioactive ceramic scaffolds: Effect of pore/strut size on manufacturability and mechanical performance," *J Eur Ceram Soc*, vol. 41, no. 1, pp. 892–900, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.09.002.
28. X. Li, Y. Z. Xiong, H. Zhang, and R. N. Gao, "Development of functionally graded porous titanium/silk fibroin composite scaffold for bone repair," *Mater Lett*, vol. 282, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.matlet.2020.128670.
29. "ALUMINA."
30. J. Yuan *et al.*, "Nanosized-Ag-doped porous β -tricalcium phosphate for biological applications," *Materials Science and Engineering C*, vol. 114, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.msec.2020.111037.
31. El-Fiqi, J. H. Kim, and H. W. Kim, "Novel bone-mimetic nanohydroxyapatite/collagen porous scaffolds biomimetically mineralized from surface silanized mesoporous nanobioglass/collagen hybrid scaffold: Physicochemical, mechanical and in vivo evaluations," *Materials Science and Engineering C*, vol. 110, May 2020, doi: 10.1016/j.msec.2020.110660.
32. C. Wong *et al.*, "Effectiveness of treating segmental bone defects with a synergistic co-delivery approach with platelet-rich fibrin and tricalcium phosphate," *Materials Science and Engineering C*, vol. 129, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.msec.2021.112364.
33. H. Zhang, H. Zhang, Y. Xiong, L. Dong, and X. Li, "Development of hierarchical porous bioceramic scaffolds with controlled micro/nano surface topography for accelerating bone regeneration," *Materials Science and Engineering C*, vol. 130, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.msec.2021.112437.
34. K. C. Feng *et al.*, "Enhanced mechanical and biological performances of CaO-MgO-SiO₂ glass-ceramics via the modulation of glass and ceramic phases," *Materials Science and Engineering C*, vol. 124, May 2021, doi: 10.1016/j.msec.2021.112060.
35. G. Turnbull *et al.*, "3D bioactive composite scaffolds for bone tissue engineering," *Bioactive Materials*, vol. 3, no. 3. KeAi Communications Co., pp. 278–314, Sep. 01, 2018. doi: 10.1016/j.bioactmat.2017.10.001.
36. H. W. Kido *et al.*, "Biocompatibility of a porous alumina ceramic scaffold coated with hydroxyapatite and bioglass," *J Biomed Mater Res A*, vol. 102, no. 7, pp. 2072–2078, 2014, doi: 10.1002/jbm.a.34877.
37. E. Cichoń *et al.*, "Novel bioresorbable tricalcium phosphate/polyhydroxyoctanoate (TCP/PHO) composites as scaffolds for bone tissue engineering applications," *J Mech Behav Biomed Mater*, vol. 98, pp. 235–245, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.jmbbm.2019.06.028.
38. H. Zhou, B. Liang, H. Jiang, Z. Deng, and K. Yu, "Magnesium-based biomaterials as emerging agents for bone repair and regeneration: from mechanism to application," *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. 9, no. 3. National Engg. Research Center for Magnesium Alloys, pp. 779–804, May 15, 2021. doi: 10.1016/j.jma.2021.03.004.
39. C. Gao, S. Peng, P. Feng, and C. Shuai, "Bone biomaterials and interactions with stem cells," *Bone Research*, vol. 5. Sichuan University, Dec. 21, 2017. doi: 10.1038/boneres.2017.59.
40. C. H. Tsai, C. H. Hung, C. N. Kuo, C. Y. Chen, Y. N. Peng, and M. Y. Shie, "Improved bioactivity of 3D printed porous titanium alloy scaffold with chitosan/magnesium-calcium

- silicate composite for orthopaedic applications,” *Materials*, vol. 12, no. 2, Jan. 2019, doi: 10.3390/ma12020203.
41. M. Bohner, B. L. G. Santoni, and N. Döbelin, “ β -tricalcium phosphate for bone substitution: Synthesis and properties,” *Acta Biomaterialia*, vol. 113. Acta Materialia Inc, pp. 23–41, Sep. 01, 2020. doi: 10.1016/j.actbio.2020.06.022.
 42. J. M. Bouler, P. Pilet, O. Gauthier, and E. Verron, “Biphasic calcium phosphate ceramics for bone reconstruction: A review of biological response,” *Acta Biomaterialia*, vol. 53. Acta Materialia Inc, pp. 1–12, Apr. 15, 2017. doi: 10.1016/j.actbio.2017.01.076.
 43. S. V. Dorozhkin, “Bioceramics of calcium orthophosphates,” *Biomaterials*, vol. 31, no. 7. pp. 1465–1485, Mar. 2010. doi: 10.1016/j.biomaterials.2009.11.050.
 44. H. Zhang *et al.*, “Biomaterials for Interbody Fusion in Bone Tissue Engineering,” *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 10. Frontiers Media S.A., May 17, 2022. doi: 10.3389/fbioe.2022.900992.
 45. G. He *et al.*, “Phosphorylation of phosphophoryn is crucial for its function as a mediator of biomineralization,” *Journal of Biological Chemistry*, vol. 280, no. 39, pp. 33109–33114, Sep. 2005, doi: 10.1074/jbc.M500159200.
 46. C. Tomasi, E. Regidor, A. Ortiz-Vigón, and J. Derks, “Efficacy of reconstructive surgical therapy at peri-implantitis-related bone defects. A systematic review and meta-analysis,” *J Clin Periodontol*, vol. 46, no. S21, pp. 340–356, Jun. 2019, doi: 10.1111/jcpe.13070.
 47. S. K. Venkatraman *et al.*, “Biomineralization, mechanical, antibacterial and biological investigation of larnite and rankinite bioceramics,” *Materials Science and Engineering C*, vol. 118, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.msec.2020.111466.
 48. O. Johnell and J. A. Kanis, “An estimate of the worldwide prevalence and disability associated with osteoporotic fractures,” *Osteoporosis International*, vol. 17, no. 12, pp. 1726–1733, Dec. 2006, doi: 10.1007/s00198-006-0172-4.
 49. Y. Wong, J. Karppinen, and D. Samartzis, “Low back pain in older adults: risk factors, management options and future directions,” *Scoliosis Spinal Disord*, vol. 12, no. 1, Dec. 2017, doi: 10.1186/s13013-017-0121-3.
 50. T. Deer, D. Sayed, J. Michels, Y. Josephson, S. Li, and A. K. Calodney, “A Review of Lumbar Spinal Stenosis with Intermittent Neurogenic Claudication: Disease and Diagnosis,” *Pain Medicine (United States)*, vol. 20. Oxford University Press, pp. S32–S44, Dec. 01, 2019. doi: 10.1093/pm/pnz161.
 51. W. Wang and K. W. K. Yeung, “Bone grafts and biomaterials substitutes for bone defect repair: A review,” *Bioactive Materials*, vol. 2, no. 4. KeAi Communications Co., pp. 224–247, Dec. 01, 2017. doi: 10.1016/j.bioactmat.2017.05.007.
 52. T. T. Roberts and A. J. Rosenbaum, “Bone grafts, bone substitutes and orthobiologics the bridge between basic science and clinical advancements in fracture healing,” *Organogenesis*, vol. 8, no. 4, pp. 114–124, Oct. 2012, doi: 10.4161/org.23306.
 53. H. O. Simila and A. R. Boccaccini, “Sol-gel bioactive glass containing biomaterials for restorative dentistry: A review,” *Dental Materials*, vol. 38, no. 5. Elsevier Inc., pp. 725–747, May 01, 2022. doi: 10.1016/j.dental.2022.02.011.
 54. P. Fischer *et al.*, “Bending fracture of different zirconia-based bioceramics for dental applications: A comparative study,” *Materials*, vol. 14, no. 22, Nov. 2021, doi: 10.3390/ma14226887



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Badania efektu samonaprawiania się wybranych materiałów polimerowych

K. Wróbel^a, K. Cesarz-Andraczke^b

^a Student kierunku Mechanika i Budowa Maszyn na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej

email: kamiwro162@student.polsl.pl

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email: katarzyna.cesarz-andraczke@polsl.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań efektu samonaprawiania się wybranych materiałów polimerowych. Efekt samonaprawiania się zaobserwowano tylko dla próbki złożonej z biopolimeru – kazeiny.

Abstract: The article presents the study's results on the self-healing effect of selected polymer materials. The self-healing effect was observed only for the sample composed of biopolymer - casein.

Słowa kluczowe: biopolimery, polimery syntetyczne, efekt samonaprawiania się, badania immersyjne, Roztwór Ringer'a

1. WSTĘP

Samonaprawiające się materiały polimerowe są uważane za nową klasę materiałów inteligentnych ze względu na ich zdolność do częściowej lub całkowitej naprawy wyrządzonych im wewnętrznych uszkodzeń, wydłużając w ten sposób żywotność materiału w wielu zastosowaniach bez konieczności ich wykrywania. Samonaprawiające się polimery syntetyczne przyciągnęły znaczną uwagę naukowców ze względu na ich doskonałą trwałość i wydłużony czas życia [a].

Wstępna metoda przygotowania materiału polimerowego opiera się na koncepcji enkapsulacji zaproponowanej przez White'a i in. [b]. W matrycy polimerowej osadzili mikrokapsułki zawierające reaktywny środek leczniczy. Kiedy pęknięcie rozprzestrzenia się w materiale, powoduje uwolnienie środka leczniczego z kapsułki do płaszczyzny pęknięcia, gdzie została się i naprawia materiał. Wśród kategorii samoleczenia zewnętrznego i wewnętrznego, ostatnio koncentruje się na procesie wewnętrznym, ponieważ może on realizować szybkie i odwracalne zdolności samoleczenia oraz powtarzalność poprzez dynamiczne wiązania chemiczne. Wewnętrzne samoleczenie podzielono na dwa typy: odwracalne wiązania kowalencyjne i niekowalencyjne, które obejmują odwracalne reakcje cykloaddycji, reakcje wymiany, oddziaływania wodorowe i koordynacyjne oddziaływania metal-ligand. [a,3]

W literaturze przedmiotu istnieją wyniki badań poliuretanów jako materiałów samonaprawialnych [a]. Poliuretany (PU) otrzymuje się w wyniku reakcji poliaddycji między polioliem a poliizocyjanianami. PU są wykorzystywane w szerokim zakresie zastosowań, takich jak opakowania, tekstylia, budownictwo, samochody i elektronika. Jednak ważnym (ale nie wyłącznym) czynnikiem uzyskiwania polimerów zdolnych do leczenia jest wysoka mobilność łańcucha do wypełniania pęknięć i umożliwiania ponownego łączenia grup reaktywnych. W przypadku poliuretanu diizocyjanian, prepolimer dihydroksytelechelowy i przedłużacz łańcucha decydują o ostatecznych właściwościach poliuretanów i ich zdolności do samoleczenia lub nie. Inne parametry, takie jak reakcje uboczne podczas syntezy PU i obecność katalizatorów, również mogą odgrywać ważną rolę dla zdolności powstałego poliuretanu do samonaprawy. [2]

PETG ma zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu ze względu na odporność na ciepło, uderzenia i rozpuszczalniki. Jest szeroko stosowany do opakowań (zarówno detalicznych, jak i medycznych), wyświetlaczy reklamowych i izolatorów elektronicznych. Jako kopolimer PETG łączy w sobie właściwości PET i glikolu. Główne właściwości glikolu z politereftalanu etylenu to twardość, odporność chemiczna i udarowa, przezroczystość i plastyczność. Łatwy do wytłaczania materiał o dobrej stabilności termicznej, PETG jest szczególnie kompatybilny z zastosowaniami spożywczymi. PETG można bezpiecznie stosować do pojemników na żywność i butelek na napoje. Nadaje się również w pełni do recyklingu, co zmniejsza ilość odpadów i potencjalny negatywny wpływ na środowisko. Sztywna struktura PETG sprawia, że może on przetrwać ostre procesy sterylizacji, co czyni go idealną substancją do implantów medycznych, a także opakowań do wyrobów farmaceutycznych i medycznych. [1]

W pracy przedstawiono wyniki badań efektu samonaprawiania się wybranych materiałów polimerowych. Celem pracy było zbadanie czy efekt samonaprawiania wystąpi w środowisku symulującym płyny ustrojowe człowieka i czy badane materiały mogą służyć jako potencjalny biomateriał w implantologii medycznej.

2. METODOLOGIA BADAŃ

Materiałem do badań były polimery syntetyczne takie jak poliuretan (PU), poli(tereftalan etylenu) z dodatkiem glikolu (PETG) oraz biopolimer – kazeina. Filament polilaktydu (PLA) wykorzystano do wydrukowania form za pomocą techniki przyrostowej (rys.1).



Rysunek 1. Forma do próbek wytworzona za pomocą techniki przyrostowej wykonana z polilaktydu [opracowanie własne]

Figure 1. The polylactide mold produced by additive technology [own elaboration]

Do badań przygotowano 4 mieszaniny:

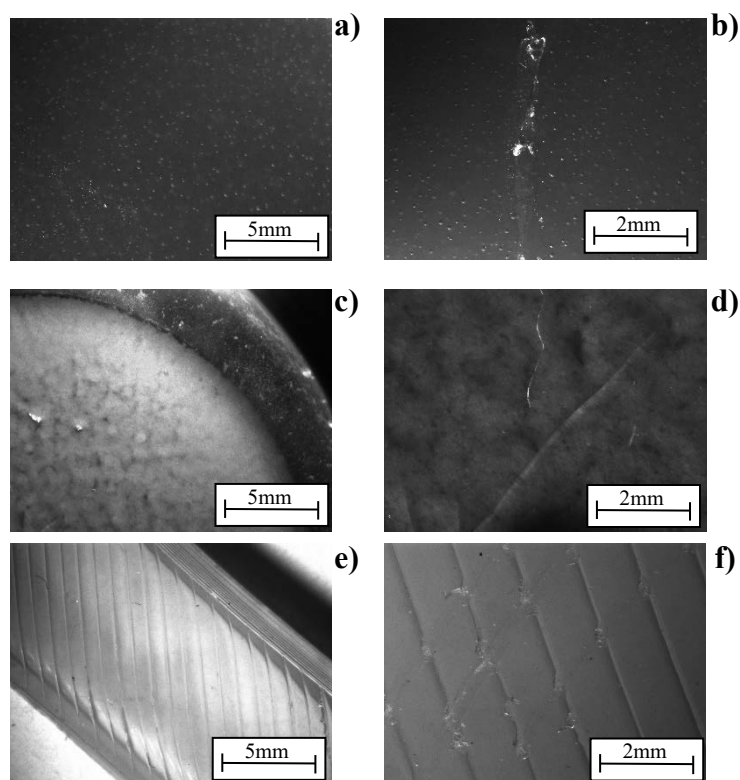
- Poliuretan przygotowano według zaleceń producenta.
- Filament PETG (5g) pocięto na mniejsze elementy i mieszano z dichlorometanem (150ml) aż do uzyskania jednorodnej mieszaniny.
- Kazeinę (8g) wymieszano z wodą destylowaną (50ml) w temperaturze 40°C, a następnie dodano NaOH (1g) i mieszano do uzyskania jednorodnej mieszaniny.
- Mieszaniny kazeiny(5ml) dodano do mieszaniny PETG(5ml) aż do uzyskania jednolitej konsystencji

Następnie próbki suszono przez 48h w temperaturze pokojowej. Obserwacje mikroskopowe wykonano przy użyciu mikroskopu stereoskopowego ZEISS przy powiększeniu 10x, 25x.

Próbki celowo uszkodzono i zanurzono na 1h w Roztworze Ringera (skład: $8,6 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$ NaCl, $0,3 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$ KCl, $0,48 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$ $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.) w temperaturze 37°C. Następnie próbki wysuszono i wykonano obserwacje mikroskopowe przy użyciu mikroskopu stereoskopowego.

3. WYNIKI I DYSKUSJA BADAŃ

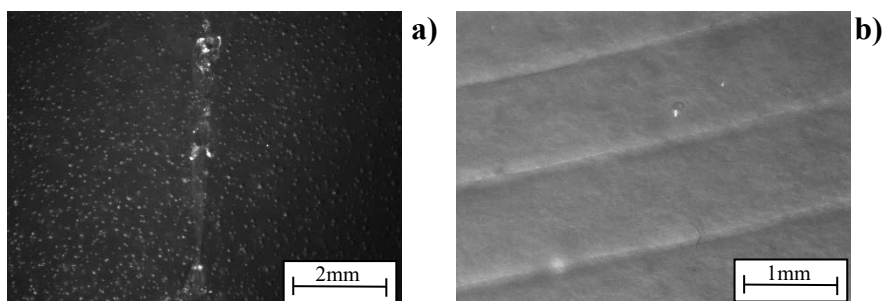
Na rysunku 2 przedstawiono wyniki obserwacji mikroskopowych wytworzonych próbek złożonych z polimerów syntetycznych i biopolimeru. Z lewej znajdują się zdjęcia powierzchni próbek po wysuszeniu (rys.2a,c,e). Po prawej znajdują się zdjęcia ceowego uszkodzenia wytworzonych próbek (rys.2b,d,f).



Rysunek 2. Powierzchnia próbki poliuretanu (a), PETG+kazeina (c), kazeina (e) oraz powierzchnia celowo uszkodzone odpowiednio: b,d,f

Figure 2. The surface of the polyurethane sample (a), PETG+casein (c), casein (e) and the surface intentionally damaged, respectively: b, d, f

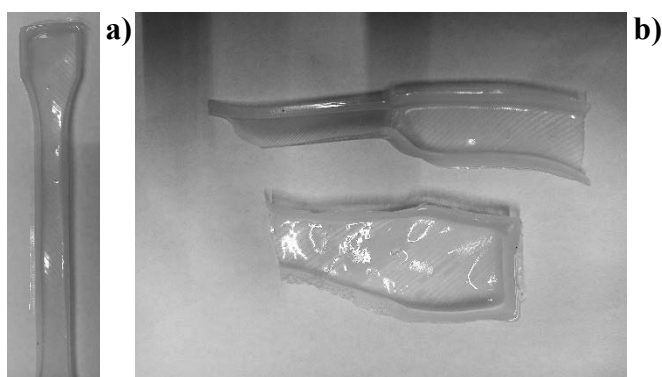
Na powierzchni poliuretanu widoczne są pęcherzyki powietrza powstałe na skutek mieszania poliolanu i poliizocyanu. Mieszanina PETG+kazeina stanowiła po wysuszeniu dość jednorodną membranę. Mieszanina kazeiny odtworzyła topografię formy, a po wysuszeniu stanowi dość kruchy materiał. Próbki zanurzone przez 1h w roztworze Ringer'a w temperaturze 37°C celem zasymulowania płynów ustrojowych człowieka. Po wysuszeniu badano postęp samonaprawiania się uszkodzeń (rys.3).



Rysunek 3. Powierzchnia próbki poliuretanu (a) oraz kazeiny (b) po godzinnym zanurzeniu w roztworze Ringer'a w temperaturze 37°C.

Figure 3. The sample surface of polyurethane (a) and casein (b) after 1 hour of immersion in Ringer's solution at 37°C.

Próbka poliuretanu (rys.3a) nie wykazała widocznych postępów samonaprawiania się. W literaturze przedmiotu ten efekt zaobserwowano przy działaniu światłem UV oraz wzbogaceniu składu chemicznego aktywatorami samonaprawiania się [c]. Próbka PETG+kazeina po godzinnym zanurzeniu w roztworze Ringer'a uległa całkowitej degradacji. Próbka kazeiny [rys3b) wykazała efekt samonaprawiania, ponieważ nie zaobserwowano uszkodzeń wykonanych przed zanurzeniem. Ponadto zaobserwowano zmianę wymiarów po godzinnym zanurzeniu w stosunku do wymiarów próbki przed zanurzeniem (rys.4)



Rysunek 4. Zdjęcie próbki kazeiny przed zanurzeniem (a) oraz po godzinnym zanurzeniu (b) w roztworze Ringer'a w temperaturze 37°C.

Figure 4. Photograph of a casein sample before (a) and after one-hour immersion (b) in Ringer's solution at 37°C.

4. PODSUMOWANIE

Symulowane środowisko płynów ustrojowych zastosowane w pracy powoduje samonaprawianie się tylko biopolimeru – kazeiny. Dalszym kierunkiem badań jest długoterminowe zanurzenie próbki kazeiny w roztworze Ringera w celu określenia szybkości degradacji. W ten sposób można ocenić czy badany biopolimer może stanowić materiałresorbowalny np. do zastosowań implantologii ortopedycznej. Ważnym aspektem dalszych badań jest również zbadanie składu chemicznego roztworu po degradacji kazeiny, celem określenia czy uwalniane związki lub substancje mogą być toksyczne dla organizmu człowieka. Zastosowane polimery syntetyczne t.j. poliuretan nie wykazują cech samonaprawiania się w tym środowisku. Z kolei polimer PETG w połączeniu z kazeiną ulega całkowitej degradacji. Tego typu połączenie polimeru syntetycznego oraz biopolimeru stanowi dobry materiał jako nośnik leku.

LITERATURA

- [1] Y. Yang, X. Lu, W. Wang, A tough polyurethane elastomer with self-healing ability, *Materials & Design* 127 (2017) 30-36
- [2] S.R. White, N.R. Sottos, P.H. Geubelle, J.S. Moore, M.R. Kessler, S.R. Sriram, E.N. Brown, S. Viswanathan, Autonomic healing of polymer composites, *Nature* 409 (2001) 794–797
- [3] W. Lee, H.G. Oh, S.H. Cha, A Brief Review of Self-Healing Polyurethane Based on Dynamic Chemistry, *Macromolecular Research* 29 (2021) 649–664
- [4] B. Willocq, J. Odent, P. Dubois, J.M. Raquez, Advances in intrinsic self-healing polyurethanes and related composites, *RSC Advances* 23 (2020), 13766–13782
- [5] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-petg>
- [6] J. Ling, M. Z. Rong, M. Q. Zhang, Photo-stimulated self-healing polyurethane containing dihydroxyl coumarin derivatives, *Polymer* 53 (2012) 2691-2698

Praca powstała w wyniku realizacji projektu Project Based Learning (PBL) pt. Opracowanie niezniszczalnych powłok, które same będą się naprawiać.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Electrospinning of 1D metal oxide nanostructures

M. Zaborowska^a, T. Tański^a

^a Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials
email: marta.zaborowska@polsl.pl

Abstract: Metal oxide nanofibers have gained significant attention in recent years due to their unique properties and versatile applications. The electrospinning process has emerged as a promising technique for the fabrication of metal oxide nanofibers with controlled morphology and composition. The electrospinning process involves the electrostatic stretching and solidification of a precursor solution or melt containing metal salts or metal-organic compounds. The choice of precursor materials and process parameters plays a crucial role in determining the final composition, crystallinity, and morphology of the metal oxide nanofibers. Metal oxide nanofibers exhibit unique properties such as high surface area, porosity, and tailored composition, enabling a wide range of applications.

Keywords: electrospinning, metal oxide, nanofibers, applications, properties

1. INTRODUCTION

Electrospinning is a versatile and widely used technique for fabricating nanofibers with controlled morphology and composition. The concept of electrospinning dates back to the 17th century when Sir Isaac Newton first observed the formation of liquid jets under the influence of an electric field. However, it was not until the 20th century that researchers began exploring the electrospinning process in detail. In the early 1930s, Formhals conducted pioneering work, establishing the fundamental principles of electrospinning. Since then, significant advancements have been made in understanding the electrospinning process and its potential applications [1]. The electrospinning process involves the application of a high voltage to a polymer solution or melt, causing the formation of a charged liquid jet. As the electric field overcomes the surface tension of the polymer solution, a thin fiber is drawn from the charged droplet. During flight, the solvent evaporates, leaving behind a solid nanofiber. The morphology and diameter of the resulting nanofibers are influenced by various parameters, including solution properties, electric field strength, flow rate, and collector setup. Modern electrospinning setups typically consist of a high-voltage power supply, a syringe pump for controlled polymer solution delivery, and a collector to collect the electrospun fibers. Various collector configurations, such as rotating drums, stationary plates, and parallel electrodes, can be employed to control the alignment and arrangement of the nanofibers. Advanced

electrospinning setups incorporate additional features, such as temperature control, multiple needle configurations, and coaxial or multi-jet electrospinning, to enable the fabrication of complex fiber structures [2, 3]. With its wide range of applications and ongoing advancements, electrospinning continues to play a pivotal role in various scientific and technological fields. As researchers continue to explore new materials, techniques, and applications, electrospinning holds the potential to revolutionize industries and address key challenges in diverse domains [4, 5].

2. PREPARATION OF METAL OXIDE 1D NANOSTRUCTURES

Metal oxide (MO) nanofibers have attracted significant attention due to their unique properties and diverse applications in various fields, including electronics, energy storage, catalysis, and sensors. The electrospinning process has emerged as a versatile technique for the fabrication of metal oxide nanofibers with controlled morphology and composition. The electrospinning process for metal oxide nanofiber synthesis involves the electrostatic stretching and solidification of a precursor solution or melt containing metal salts or metal-organic compounds. Subsequent heat treatment or chemical transformation of the electrospun fibers leads to the formation of metal oxide nanofibers. The choice of precursor materials, process parameters, and post-treatment conditions play a crucial role in determining the final composition, crystallinity, and morphology of the metal oxide nanofibers (Fig. 1).

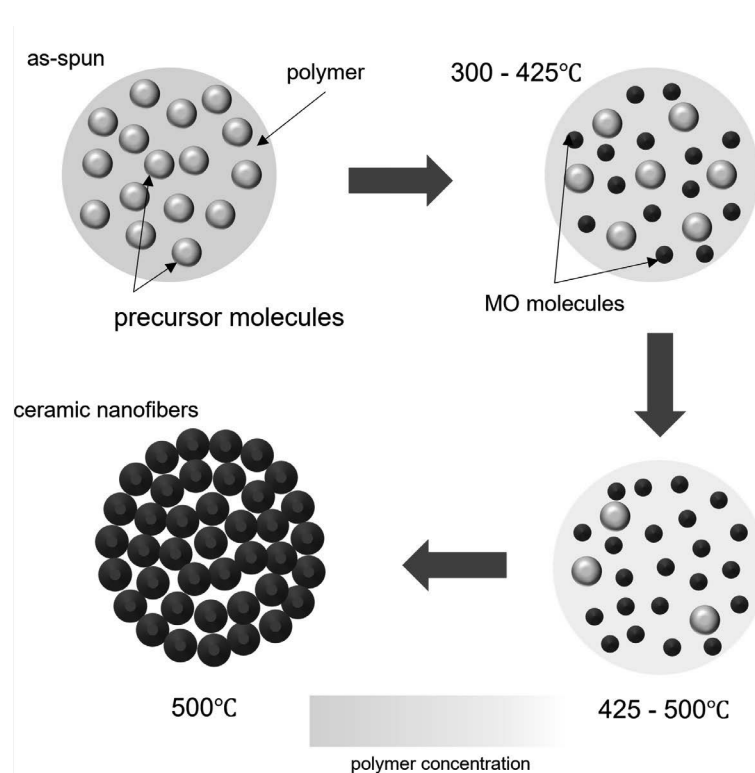


Figure 1. Formation of MO 1D nanostructures during calcination process of as-spun nanofibers.

Metal oxide nanofibers possess unique properties arising from their high surface area, porosity, and tailored composition. These properties make them suitable for a wide range of applications.

The specific surface area of metal oxide nanofibers enhances their reactivity and promotes efficient gas or liquid transport. Additionally, the nanofiber morphology allows for better electron transfer and diffusion, leading to improved catalytic activity, sensing performance, and energy storage capabilities.

3. APPLICATIONS OF ONE-DIMENSIONAL METAL OXIDE NANOSTRUCTURES

3.1. Energy Storage and Conversion

Metal oxide nanofibers find applications in energy storage devices, such as lithium-ion batteries, supercapacitors, and fuel cells. The high surface area and porosity of nanofibers enable faster ion diffusion, increased electrode-electrolyte contact, and enhanced electrochemical performance. Metal oxide nanofibers, such as titanium dioxide (TiO_2) and zinc oxide (ZnO), have demonstrated promising results as anodes, cathodes, and catalyst supports in energy storage systems [5].

3.2. Gas Sensors

MO nanofibers have shown excellent gas sensing properties due to their large surface-to-volume ratio and high sensitivity to target gases. By functionalizing the nanofibers with suitable metal catalysts or dopants, their gas sensing capabilities can be further enhanced. Metal oxide nanofibers, including tin oxide (SnO_2) and tungsten oxide (WO_3), have been employed for the detection of gases such as nitrogen dioxide (NO_2), carbon monoxide (CO), and volatile organic compounds (VOCs) [6].

3.3. Environmental Applications

Metal oxide nanofibers have emerged as promising materials for environmental remediation and pollution control. Their high surface area and reactivity make them effective in catalytic oxidation reactions and adsorption processes for the removal of contaminants from air and water. Metal oxide nanofibers, such as iron oxide (Fe_2O_3) and manganese oxide (MnO_2), have been investigated for the degradation of organic pollutants and heavy metal removal [7, 8]. Moreover, electrospun zirconium dioxide (ZrO_2), and niobium oxide (Nb_2O_5) nanofibers exhibit high photocatalytic activity under the influence of UV radiation [9, 10].

Wastewater treatment is a critical environmental challenge that requires efficient and sustainable solutions. Nanofibers produced through the electrospinning process have gained significant attention as promising materials for wastewater treatment applications [12]. Electrospun nanofibers possess several advantageous properties that make them suitable for efficient wastewater treatment. The high surface area-to-volume ratio allows for enhanced adsorption and catalytic activities. The interconnected porous structure facilitates rapid mass transfer and efficient pollutant capture. Moreover, the tunable surface chemistry of electrospun nanofibers enables the functionalization with various active agents, such as nanoparticles, enzymes, and photocatalysts, enhancing their pollutant removal capabilities [13].

Electrospun nanofibers have demonstrated excellent adsorption capacities for various pollutants, including heavy metals, dyes, pharmaceuticals, and organic compounds. Functionalized nanofibers, such as those coated with activated carbon or modified with specific

functional groups, exhibit enhanced adsorption properties. The high surface area and tailored surface functionalities of electrospun nanofibers enable efficient pollutant uptake, contributing to the removal of contaminants from wastewater [14]. Moreover, nanofibers can be fabricated into membranes for wastewater treatment through the development of composite or nanofiber-based membranes. These membranes exhibit excellent filtration efficiency, selectively removing contaminants while allowing the passage of clean water. The nanoscale fiber diameter and interconnected porous structure of electrospun membranes offer superior water permeability and fouling resistance, making them effective in the removal of suspended solids, bacteria, and particulate matter [15]. Polymer nanofibers can be functionalized with photocatalytic materials, such as titanium dioxide (ZnO, TiO₂), to harness solar energy for advanced wastewater treatment. The combination of high surface area nanofibers and photocatalysts enables efficient degradation of organic pollutants through photocatalytic reactions. The nanofiber morphology enhances light absorption and promotes efficient pollutant contact with the photocatalytic surface, leading to enhanced degradation rates and improved water quality [16]. While electrospun nanofibers show great potential for wastewater treatment, there are challenges that need to be addressed. These include scaling up the electrospinning process, ensuring long-term stability and durability of the nanofibers, and the development of cost-effective fabrication methods. Additionally, the integration of nanofiber-based materials into existing wastewater treatment systems requires further research and optimization.

4. CONCLUSIONS

Metal oxide nanofibers produced via the electrospinning process offer remarkable opportunities for various applications, including energy storage, gas sensing, environmental remediation, and optoelectronics. Their tailored properties, high surface area, and controlled morphology contribute to their superior performance in these applications. Further research and development in the synthesis methods and functionalization of metal oxide nanofibers will continue to expand their potential in advanced materials and device technologies.

ACKNOWLEDGEMENT

The scientific work was financed from the budget for science in the years 2020–2024, as a research project under the “Diamond Grant” program (No. DI2019 014949).

BIBLIOGRAPHY

1. Li, D., & Xia, Y. (2004). Electrospinning of nanofibers: reinventing the wheel? *Advanced Materials*, 16(14), 1151-1170.
2. Ramakrishna, S., et al. (2005). Electrospun nanofibers: solving global issues. *Materials Today*, 9(3), 40-50.
3. Matysiak, W., Tański, T., & Smok, W. (2019). Electrospinning as a versatile method of composite thin films fabrication for selected applications. In *Solid State Phenomena* (Vol. 293, pp. 35-49). Trans Tech Publications Ltd.

4. Zong, X., et al. (2002). Electrospun fine-textured scaffolds for heart tissue constructs. *Biomaterials*, 23(22), 759-769.
5. Ding, B., et al. (2013). Electrospun nanofibrous materials for catalytic and photocatalytic applications: a review. *Catalysis Science & Technology*, 3(7), 1419-1445.
6. Wu, J., et al. (2019). Metal oxide nanostructures and their gas sensing properties: A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 281, 126-158.
7. Li, D., et al. (2019). Metal oxide nanofibers: Synthesis, properties, and applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(30), 17894-17920.
8. Zhao, Y., et al. (2018). Recent advances in electrospun metal oxide nanofibers for environmental applications: A review. *Chemical Engineering Journal*, 338, 509-523.
9. Zaborowska, M., Smok, W., & Tański, T. (2023). Electrospinning synthesis and characterization of zirconia nanofibers annealed at different temperatures. *Applied Surface Science*, 156342.
10. Zaborowska, M., Smok, W., & Tański, T. (2023). Electrospun niobium oxide 1D nanostructures and their applications in textile industry wastewater treatment. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 71(2).
11. Zhu, G., et al. (2018). Metal oxide nanofibers for energy storage. *Advanced Energy Materials*, 8(30), 1801366.
12. Chen, D., et al. (2017). Electrospun nanofibrous materials for environmental protection. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(14), 6443-6461.
13. Fong, H., et al. (2002). Electrospinning of polymer nanofibers: effects on oriented morphology, structures and tensile properties. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 40(16), 2119-2129.
14. Liu, Y., et al. (2019). Electrospun nanofibers for water treatment: challenges and perspectives. *Frontiers in Chemistry*, 7, 366.
15. Pham, Q. P., et al. (2006). Electrospun poly (ϵ -caprolactone) microfiber and multilayer nanofiber/microfiber scaffolds: characterization of scaffolds and measurement of cellular infiltration. *Biomacromolecules*, 7(9), 2796-2805.
16. Zhang, X., et al. (2019). Electrospun nanofibers for environmental protection. *Nanomaterials*, 9(2), 223.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

Analiza numeryczna własności wytrzymałościowych czekana wspinaczkowego

Z. Zielińska ^a, R. Szymik ^a, E. Lewandowska ^b, J. Jabłoński ^b, P. Pawluk ^c, A. Dziwis ^d, M. Sroka ^d, W. Mikołajko ^d, A. Śliwa ^d, D. Śliwa ^e

^a Student Politechniki Śląskiej, Wydział Inżynierii Materiałowej,
e-mail: zz304779@student.polsl.pl, rs301942@student.polsl.pl

^b Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny
e-mail: emillew859@student.polsl.pl, jakujab147@student.polsl.pl

^c Student Politechniki Śląskiej, Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej
e-mail: pp302070@student.polsl.pl

^d Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych,
e-mail: amadeusz.dziwis@polsl.pl, marek.sroka@polsl.pl, agata.sliwa@polsl.pl

^e V Liceum Ogólnokształcące Mistrzostwa Sportowego im. Kamili Skolimowskiej w Bytomiu

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki analizy numerycznej naprężeń, odkształceń przemieszczeń dla sprzętu wspinaczkowego na przykładzie czekana stosowanego do wspinaczki górskiej. Model został wykonany za pomocą programu SolidWorks2022 a zastosowanym materiałem był stop aluminium 6061.

Abstract: The paper presents the results of numerical analysis of stresses, strains and displacements for climbing equipment on the example of an ice ax used for mountain climbing. The model was made using the SolidWorks2022 program and the material used was aluminum alloy 6061.

Słowa kluczowe: czekan, analiza MES, naprężenia Von Mises'a, przemieszczenia

1. WPROWADZENIE

Sprzęt sportowy dzięki popularyzacji aktywnego spędzania czasu stał się jednym z najczęściej sprzedawanych produktów związanych z inżynierią materiałową. Zaliczane do sprzętu sportowego wyposażenie wspinaczkowe jest projektowane z taką samą dokładnością i z tych samych materiałów co wykorzystywane w przemyśle automotive. Obowiązkowym elementem każdej wspinaczki są czekany umożliwiające zdobywanie najstromejszych szczytów górskich. W ich projektowaniu i produkcji skupia się na redukcji masy przy jednoczesnym uzyskaniu dobrych własności materiału takich jak wysoka twardość, udarność, antykorozyjność, wszystkie one muszą pozostać zachowane w warunkach obniżonej

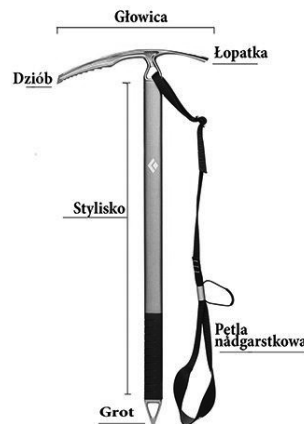
temperatury. Sam czekan najczęściej składa się z dwóch materiałów gdzie jeden przenosi naprężenia i wymaga się od niego wysokiej twardości i tworzy rękojeść a drugi będący twardszym służy do wbijania wykonanego z niego ostrza w skaliste lub lodowe zbocze[1].



Rysunek 1. Przykładowy czekan techniczny firmy Camp [2]
 Figure 1. An example of a company's technical ice ax [2]



Rysunek 2. Przykładowy czekan turystyczny firmy Climbing Technology [3]
 Figure 2. An example of a Climbing Technology tourist ice ax [3]



Rysunek 3. Budowa czekana [5]
 Figure 3. Ice ax construction[5]

Czekan to jedno z najbardziej niezbędnych narzędzi podczas wycieczek zimowych lub wspinaczek wysokogórskich. Niewłaściwe użycie czekana może być równie niebezpieczne, jak jego nieużywanie [4].

Czekany są wykorzystywane przez wspinaczy wysokogórskich w trakcie wspinaczki i służą do:

- Zapewniania oparcia jak i równowagi podczas chodzenia po śniegu lub lodzie,
- Wyrąbywania stopni w lodzie lub w twardym śniegu w trakcie podchodzenia łagodnym zboczem,
- Punktu zaczepienia podczas wspinania się po stromym zboczu,
- Asekuracji bądź zjazdu na linie,
- Pomocy w bezpiecznym trawersowaniu stromych stoków oraz wyhamowania pędu w razie poślizgnięcia [4].

Czekany najczęściej wykonywane są ze stopów aluminium lub innych ultralekkich stopów z dodatkami włókien węglowych. Przed laty można było spotkać również czekany drewniane. Charakteryzują się różnymi kształtami.

2. WYBRANY MATERIAŁ

W przeprowadzonej symulacji zdecydowano się na zastosowanie stopu aluminium 6061 i określenie czy jest to materiał właściwy na tego typu wyrób. Skład chemiczny oraz właściwości przedstawiono w tabelach 1 i 2. Najważniejszymi właściwościami jakie posiada stop aluminium 6061 jest [6] :

- Odporność na korozję
- Podatność na spawanie
- Łatwa obróbka
- Wysoka przewodność cieplna
- Plastyczność

Tabela 1. Skład chemiczny stopu aluminium 6061 [7]

Table 1. Chemical composition of aluminum alloy 6061 [7]

Stopień	Mg	Si	Cu	Cr	Fe	Zn	Mn i Ti
	0,80 – 1,20%	0,40 – 0,80%	0,15 – 0,40%	0,04 – 0,35%	≤ 0,70%	≤ 0,25%	≤ 0,15%

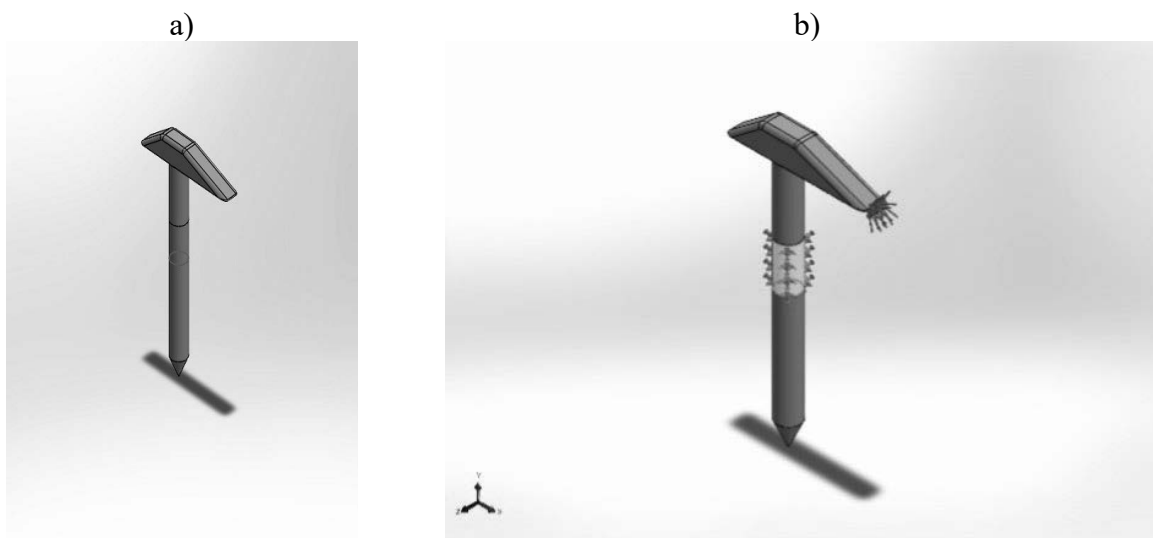
Tabela 2. Właściwości stopu aluminium 6061 [7]

Table 2. Properties of aluminum 6061 [7]

Właściwości	Wartość	Jednostka
Min. Wytrzymałość na rozciąganie Rm	280 – 300	MPa
Min. Granica plastyczności Rp0,2	230 – 250	MPa
Twardość	95	HB
Wydłużenie	7,5 – 11,0	%
Przewodność cieplna	167	W/mK
Gęstość	2,70	g/cm ³

3. MODEL GEOMETRYCZNY CAD

Analizie numerycznej poddano model czekana stosowanego we wspinaczce górskiej. Model geometryczny czekana został przedstawiony na rysunku 4 a. Model wykonano w oparciu o rzeczywisty czekan firmy Camp z zachowaniem jego wymiarów w programie SolidWorks2022.



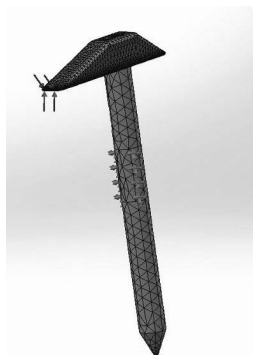
Rysunek 4. a) Model geometryczny czekana b) Model geometryczny czekana z nałożonymi warunkami brzegowymi

Figure 4. a) Geometric model of the ice ax b) Geometric model of the ice ax with imposed boundary conditions

Symulację komputerową czekana przeprowadzono w programie SolidWorks2022 z zastosowaniem następujących warunków brzegowych:

- Odebranie stopni swobody na powierzchniach przymocowywanych do ściany.
- Przyłożenie siły o wartości 400 N.

Zastosowana siła ma symulować obciążenie czekana w trakcie użytkowania i ma określić czy przyjęty materiał wytrzyma takie obciążenie. Granica plastyczności dla stopu aluminium 6061 wynosi 240 MPa. Model z nałożoną siatką elementów skończonych przedstawia rysunek 5.

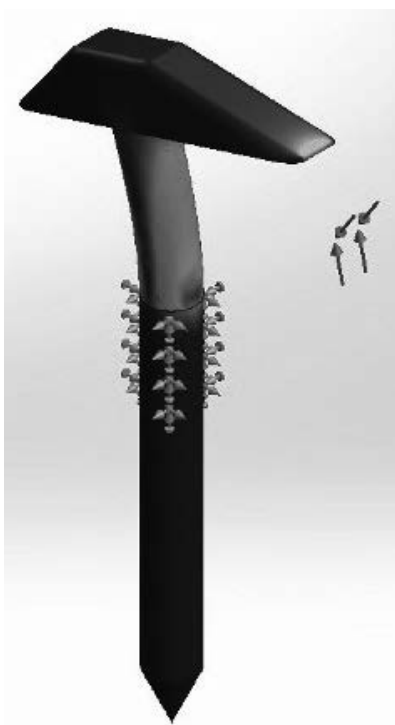


Rysunek 5. Model geometryczny czekana z siatką elementów skończonych i nałożonymi warunkami brzegowymi.

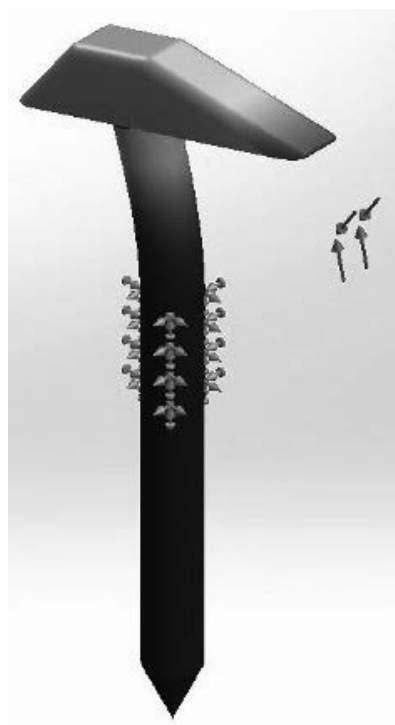
Figure 5. Geometric model of an ice ax with a mesh of finite elements

4. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

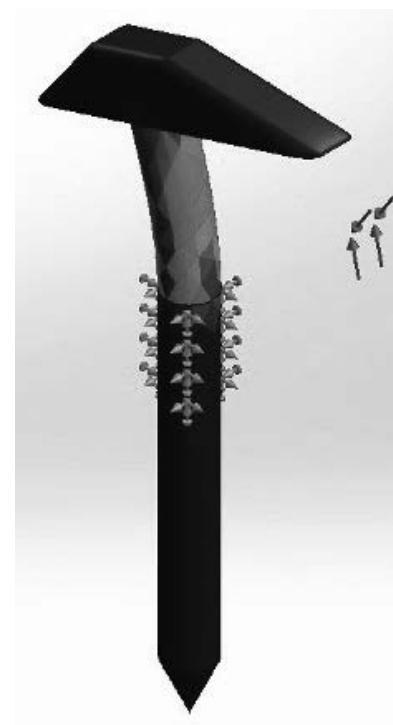
Otrzymane wykresy przedstawiające rozkłady naprężeń, przemieszczeń i odkształceń przedstawiono poniżej a zestawione maksymalne wartości zamieszczono w tabeli nr 3. Rysunek 6 przedstawia wynik analizy naprężeń, rysunek 7 przedstawia wynik przemieszczeń, a rysunek 8 wyniki odkształceń dla analizy statycznej.



Rysunek 6. Rozkład naprężeń dla siły 400N
Figure 6. Results of stress values for a force of 400N



Rysunek 7. Rozkład przemieszczeń dla siły 400N
Figure 7. Results of displacement values for a force of 400N



Rysunek 8. Rozkład odkształceń dla siły 400N
Figure 8. Results of deformation values for a force of 400N

Tabela 3. Zestawienie maksymalnych wartości dla symulacji
Table 3. List of maximum values for the simulation

Wartość przyłożonej siły [N]	Naprężenia [MPa]	Przemieszczenia [mm]	Odkształcenia
400	4,384	0,049	0,000

5. WNIOSKI

- Maksymalne otrzymane wartości naprężeń nie przekroczyły granicy plastyczności zastosowanego materiału.

- Największe wartości przemieszczeń koncentrowały się w miejscu przyłożenia siły symulującej uderzenie
- Rozmieszczenie naprężeń i odkształceń wskazuje miejsce najbardziej narażone na uszkodzenie
- Na podstawie przeprowadzonej symulacji komputerowej stwierdzono, że zastosowany materiał spełnia wymagania techniczne czekana.

LITERATURA

- [1] Krótka historia czekana - od klasycznego po dziabkę wspinaczkową, Damian Granowski, 18 styczeń 2016
- [2] 8a.pl
- [3] weld.pl
- [4] <https://www.tatry-przewodnik.com.pl/blog/?czekan-rodzaje-jak-uzywac>
- [5] [tatry-przewodnik.com.pl](https://www.tatry-przewodnik.com.pl)
- [6] <https://www.jfkgroup.pl/wyroby-hutnicze/aluminium/aluminium-6061/>
- [7] L.A. Dobrzański, Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, WNT, 2002.



26th June 2023
Gliwice, Poland

DEPARTMENT OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE

A facile route for preparing Hydroxyapatite powders from biogenic waste

Y.M. Tsekpo^a, P. Jarka^a and T. Tański^a

^a Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Materials and Biomaterials
email: yao.tsekpo@polsl.pl

Abstract: Hydroxyapatite (HAP), have been derived from clamshell (*Galatea paradox*) by precipitation method. The presence of characteristic FTIR peaks indicates the formation of HAP as well as the nature of the particle size distribution. Thus, HAP derived from clamshell (*Galatea paradox*) may be useful for biomedical and environmental applications.

Keywords: Clamshell, CaO, HAP, direct precipitation

1. INTRODUCTION

Hydroxyapatite (HAP) is an apatitic bioceramic having the chemical formula $C_{10}(PO_4)_6(OH)_2$. Because of its qualities (biocompatibility, osteoconductivity, and bioactivity), HAP is utilised in orthopaedics and odontology to cover metallic implants, heal bone defects, and enhance bone(1). In more recent research, its application has been expanded from biomedical applications to environmental and pollution remediation applications and heterogeneous catalysis(2,3). The ability of HAP's structure to produce solid solutions and accept a large variety of anionic and cationic substituents distinguishes it(4). Because of the material's variable qualities, it can be used in various applications. Also, HAP can be successfully acquired from biological sources such as mineral rocks, plants, and, more crucially, waste, primarily consisting of animal bones (fish bones, chicken bones, etc.) and biogenic products (eggshells, mussel shells, etc.)(5). HAp can be synthesised utilising various strategies, including dry, wet, and high-temperature processes. Each process produces distinct sizes, morphologies, and crystalline phases of calcium phosphate in addition to pure crystalline HAP(6). As a result, the properties of HAP have a considerable impact on bioactivity, mechanical qualities, and biological properties. These properties define HAP's biomedical applicability, making it interesting to design a synthesis process that can control the morphology, crystallinity, size, and chemical composition of HAP(7). Thus, each synthesis method is studied to determine the differences and difficulty of each approach in the synthesis of synthetic HAP. Among the several methods for producing HAP, such as pyrolysis, direct precipitation of aqueous solutions, electrochemical deposition, sol-gel, and others, the direct precipitation method is the simplest and most adaptable(8). Direct precipitation has sparked considerable interest since it enables the production of ceramic materials with high purity and homogeneity.

In this study, HAP was synthesised from clamshells using the direct precipitation technique and characterised using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) to ascertain the chemical composition. The particle size distribution of the powder obtained.

2. MATERIALS AND METHOD

2.1. Materials

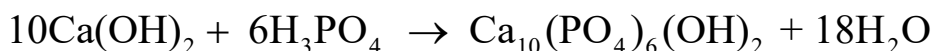
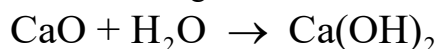
Analytic grade orthophosphoric acid ($M=98\text{g/mol}$) of purity 85% was obtained from Przedsiębiorstwo Wielobranżowe B&K, Poland, and was used in the preparation. Clamshells (*Galatea paradox*) were obtained within a radius of 100 m from the banks of the Volta River, Sogakope, Ghana (GPS coordinates: 5.999602, 0.585249). All other chemicals were of analytical grade. De-ionized water was used in the resining and preparation of solutions in this study.

2.2. Preparation of CaO from the Clamshells

The obtained clamshells were washed and cleaned with water and a brush to remove all debris. This was followed with sonication in ethanol (purity =96%) for 30 minutes, then de-ionized water for 30 minutes and drying in the oven at 60°C for two hours. The shells were crushed into pieces by hand using a mortar and pestle. The crushed pieces were then milled in a planetary mono mill, Fritsch Pulverisette 6 (Germany), for 10 minutes dry and 5 minutes wet. The ratio of material to milling media was 1:10, with zirconia balls as milling media. 80g of de-ionized water was added to the powder for the wet milling process. The slurry obtained from the wet milling process was frozen for 48 hours and freeze-dried for 48 hours. The powder obtained after the drying was calcined in a furnace at 700°C for one hour to transform the CaCO_3 to CaO.

2.3. Preparation of Hydroxyapatite.

1g of the calcined powder was suspended in de-ionized water and stirred at 300 rpm until the suspension was uniform. The volume of H_3PO_4 needed to set the stoichiometric molar ratio of $\text{Ca/P} = 1.67$ of HAP was determined, and then H_3PO_4 was added to the solution dropwise(9). The solution was stirred at 500 rpm at 80°C for 2 hours, finishing the reaction and precipitating the HAP powder according to the reaction.



The resulting slurry was frozen for 24 hours and freeze dry for 48 hours to obtain the powders.

2.4. Characterization.

Chemical analysis was investigated using a Fourier-transformed infrared FT-IR spectrometer (Nicolet 6700, Thermo Scientific). The measurements were taken at a maximum scanning resolution of 0.09 cm^{-1} and $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$. Particle size distribution was studied using a wet dispersion laser analyser (Analysette 22, Fritsch).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. FTIR

The peaks observed for the CaO are 707, 865 and 1409 cm^{-1} . The peaks at 707 cm^{-1} correspond to the Ca-O bond present in the material and indicate the material transformation due to calcination. The peak at 865 and 1409 cm^{-1} is evidence of a C-O bond, which point towards CaCO_3 present in the material and hence an incomplete transformation of clamshells to CaO. The clamshell peaks are noticed at 857 and 1458 cm^{-1} , which show the presence of a C-O bond pointing towards a carbonate functional group in the shells.

The peaks observed for the HAP powder prepared were 513, 850, 1052, 1132, 1641, 3153 and 3476 cm^{-1} . The peaks recorded between 3153 and 3476 cm^{-1} are evidence of the OH bond present in HAP(10). The peaks obtained at 513, 1052, and 1132 cm^{-1} correspond to the PO_4^{3-} (11). The peak at 850 cm^{-1} is evidence of the CO_3^{2-} whereas 1641 cm^{-1} is evidence of water(12).

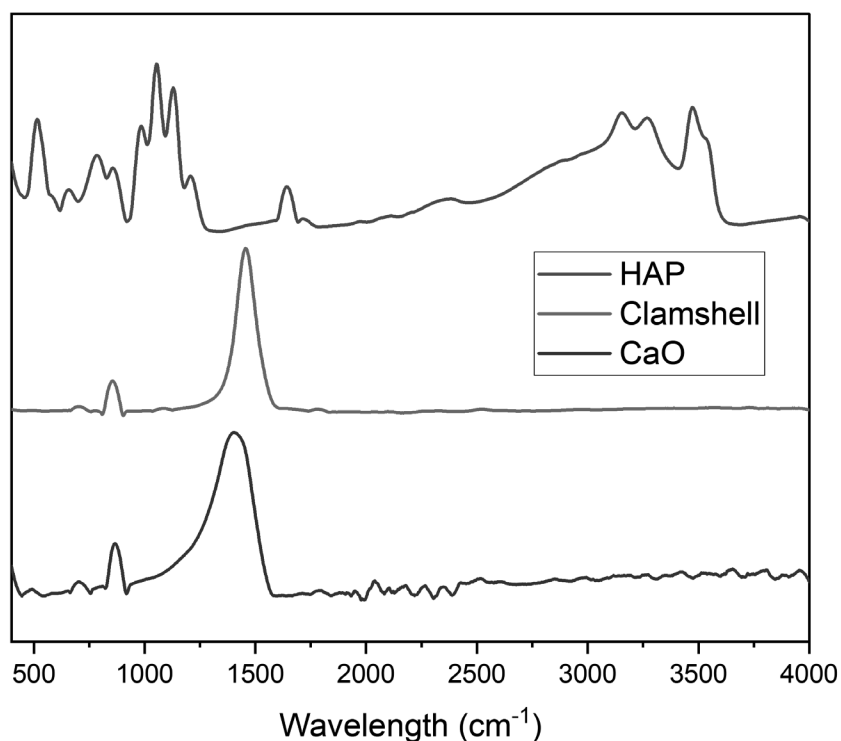


Figure 1. FTIR spectra of powders

3.2. Particle size distribution

Figure 2 shows the particle size distribution of the CaO and HAP powders. The plotted curve of CaO shows a bimodal particle size distribution, whereas that of HAP shows a unimodal particle size distribution with a maximum of 18 μm and a mean particle size of 20 μm . In contrast, CaO has a double maximum at 1.42 μm and 10.4 μm . The plot parameters are presented in Table 1; the unimodal distribution of HAP is consistent with recent works that achieved HAP using the precipitation technique(13,14).

Table 1. Mean parameters of particle size for CaO and hydroxyapatite powders

Sample	First Peak			Second Peak		
	Range (μm)	Peak (μm)	Volume	Range (μm)	Peak (μm)	Volume
CaO	0.08-5.74	1.42	73%	5.74-28.16	10.4	27%
HAP	0.08-62.35	18	100%	-	-	-

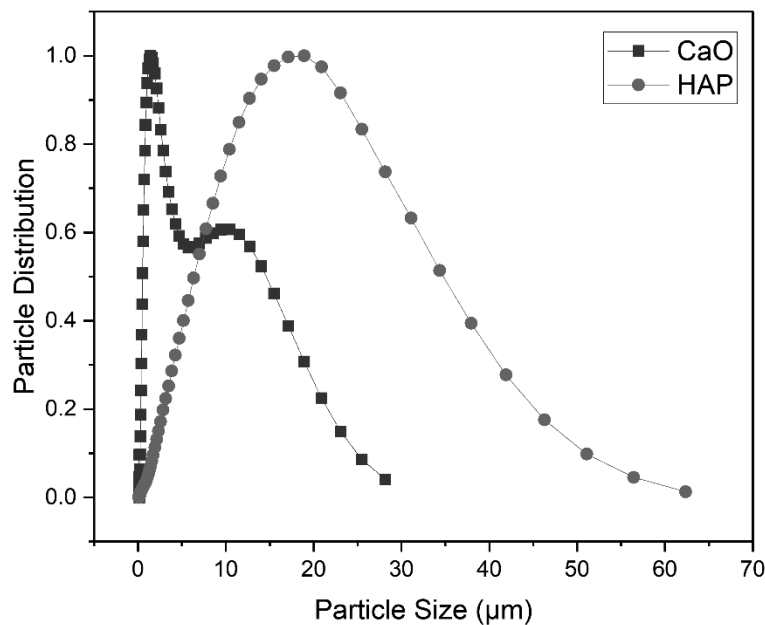


Figure 2. Particle size distribution of powders

4. CONCLUSION

This study shows a facile precipitation technique to achieve HAP from the *Galatea paradox* shells as a calcium source. The chemical composition from the FTIR analysis point to the evidence of functional groups associated with HAP. The particle size distribution of the HAP powder obtained followed a unimodal distribution and a mean particle of 20 μm . The study shows that *Galatea paradox* is a suitable biogenic waste material for preparing HAP and may be useful for biomedical and environmental applications.

REFERENCES

1. Lin K, Chang J. Structure and properties of hydroxyapatite for biomedical applications. Hydroxyapatite (Hap) for Biomedical Applications. 2015 Jan 1;3–19.

2. Ibrahim M, Labaki M, Giraudon JM, Lamonier JF. Hydroxyapatite, a multifunctional material for air, water and soil pollution control: A review. *J Hazard Mater.* 2020 Feb 5;383:121139.
3. Piccirillo C, L. Castro PM. Calcium hydroxyapatite-based photocatalysts for environment remediation: Characteristics, performances and future perspectives. *J Environ Manage.* 2017 May 15;193:79–91.
4. Fihri A, Len C, Varma RS, Solhy A. Hydroxyapatite: A review of syntheses, structure and applications in heterogeneous catalysis. *Coord Chem Rev.* 2017 Sep 15;347:48–76.
5. Arokiasamy P, Al Bakri Abdullah MM, Abd Rahim SZ, Luhar S, Sandu AV, Jamil NH, et al. Synthesis methods of hydroxyapatite from natural sources: A review. *Ceram Int.* 2022 Jun 1;48(11):14959–79.
6. DileepKumar VG, Sridhar MS, Aramwit P, Krut'ko VK, Musskaya ON, Glazov IE, et al. A review on the synthesis and properties of hydroxyapatite for biomedical applications. *J Biomater Sci Polym Ed [Internet].* 2022 Jan 22;33(2):229–61. Available from: <https://doi.org/10.1080/09205063.2021.1980985>
7. Seyhan SA, Alkaya DB, Cesur S, Oktar FN, Gunduz O. Preparation and characterization of pure natural hydroxyapatite derived from seashells for controlled drug delivery. *Journal of the Australian Ceramic Society [Internet].* 2022;58(4):1231–40. Available from: <https://doi.org/10.1007/s41779-022-00739-w>
8. Mohd Pu'ad NAS, Abdul Haq RH, Mohd Noh H, Abdullah HZ, Idris MI, Lee TC. Synthesis method of hydroxyapatite: A review. *Mater Today Proc.* 2020 Jan 1;29:233–9.
9. Suresh Kumar C, Dhanaraj K, Vimalathithan RM, Ilaiyaraja P, Suresh G. Hydroxyapatite for bone related applications derived from sea shell waste by simpleprecipitation method. *Journal of Asian Ceramic Societies [Internet].* 2020 Apr 2;8(2):416–29. Available from: <https://doi.org/10.1080/21870764.2020.1749373>
10. Xu J, Yang Y, Wan R, Shen Y, Zhang W. Hydrothermal Preparation and Characterization of Ultralong Strontium-Substituted Hydroxyapatite Whiskers Using Acetamide as Homogeneous Precipitation Reagent. Odermatt E, Li B, editors. *The Scientific World Journal [Internet].* 2014;2014:863137. Available from: <https://doi.org/10.1155/2014/863137>
11. Saisa-ard O, Somphon W, Dungkaew W, Haller KJ. Evidence of a Lead Metathesis Product from Calcium Hydroxyapatite Dissolution in Lead Nitrate Solution. El-Damrawi G, editor. *Advances in Materials Science and Engineering [Internet].* 2014;2014:273632. Available from: <https://doi.org/10.1155/2014/273632>
12. Miculescu F, Mocanu AC, Dascălu CA, Maidaniuc A, Batalu D, Berbecaru A, et al. Facile synthesis and characterization of hydroxyapatite particles for high value nanocomposites and biomaterials. *Vacuum.* 2017 Dec 1;146:614–22.
13. Bogdanova EA, Skachkov VM, Medyankina IS, Schröttner H, Sabirzyanov NA, Rempel AA. Formation of nanodimensional structures in precipitated hydroxyapatite by fluorine substitution. *SN Appl Sci [Internet].* 2020 Sep 1 [cited 2023 Jun 13];2(9):1–7. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-020-03388-5>
13. El-Habashy SE, Eltahir HM, Gaballah A, Zaki EI, Mehanna RA, El-Kamel AH. Hybrid bioactive hydroxyapatite/polycaprolactone nanoparticles for enhanced osteogenesis. *Materials Science and Engineering: C.* 2021 Feb 1;119:111599.

Projektowanie reaktorów mikrofluidycznych typu „lab-on-chip”

A. Wierzbicka^a, M. Skrzek^b, D. Grychtoł^{a,d}, W. Fizia^{a,d}, Ł. Mielańczyk^{b,c}, A. Mielańczyk^d,
M. Lemanowicz^a

^a Politechnika Śląska, Wydział Chemiczny, Katedra Inżynierii Chemicznej i Projektowania Procesowego,

^b Śląskie Laboratorium Nanomikroskopii Śląskiego Uniwersytetu Medycznego w Zabrzu

^c Katedra i Zakład Histologii i Patologii Komórki w Zabrzu-Rokitnicy, Śląski Uniwersytet Medyczny

^d Politechnika Śląska, Wydział Chemiczny, Katedra Fizykochemii i Technologii Polimerów
email: adriwie906@student.polsl.pl

Streszczenie: Artykuł opisuje badania nad zaprojektowaniem i optymalizacją reaktora mikrofluidycznego. Zaprojektowany reaktor wykorzystywany jest do badania wpływu kształtu kanałów komór na proces precypitacji polimerów hydrofobowych.

Abstract: The article describes the research on the design and optimization of a microfluidic micro-reactor. The designed reactor is used to study the influence of the shape of the chamber channels on the precipitation process of hydrophobic polymers.

Słowa kluczowe: reaktor mikrofluidyczny, „lab-on-chip”, druk 3D, precypitacja polimerów,

1. WSTĘP

Mikrofluidyka to jednocześnie nauka i technologia manipulowania w mikrokanalach objętościami rzędu nanolitów, która wpłynęła na wiele dziedzin nauki, takich jak bioanalitika, preparatyka chemiczna, analiza pojedynczych komórek i inżynieria tkankowa.[1] W ostatnich latach systemy mikroprzepływowe zostały przystosowane do kontroli mieszania pomiędzy rozpuszczalnikiem a fazą nierozpuszczalną i wyraźnie wykazały możliwość kontroli wielkości otrzymywanych nano- i mikrocząstek w porównaniu z klasycznymi procesami wykorzystywanymi do nano- i mikroprecypitacji.[2] Prace nad nanoprecypitacją poli(laktydu-ko-glikolidu) (PLGA) w reaktorze mikrofluidycznym wykonanym z silikonu zapoczątkowały rozwój badań nad potencjałem nowych platform mikroprzepływowych, mającymi na celu opracowanie kontrolowanej nanoprecypitacji polimerów i czystych leków. “Lab on chip” stosowane jest do otrzymywania wielu substancji, lecz napotyka on na problem, gdy przepływ jest ciągły. Chodzi tutaj o równomierny rozkład odczynników oraz wydajność mikroreaktora. Można tutaj zaproponować np. zwiększenie średnicy kanału wewnętrznej lub zwiększenie przepływu płynów. Dla uzyskania równomiernego rozkładu płynów spotyka się wiele rozwiązań np. zastosowanie przegród czy też zakrzywienie kanału. [3].

W mikroreaktorach stosowanych do syntezy nanomateriałów wykorzystuje się różne techniki przepływu (ciągłe oraz kropli/segmentów). Techniki te klasyfikowane są na podstawie natężenia przepływu, złożoności reakcji oraz stosowanych technik mieszania. Wadą metody przepływu ciągłego są niejednorodność czasu przebywania oraz nieregularność rozkładu wielkości nanocząstek, co może zwiększać ryzyko zablokowania kanałów mikroprzepływowych. Przy użyciu reaktorów mikroprzepływowych wytwarzane są nanomateriały typu: półprzewodnikowe kropki kwantowe, metale i tlenki metali, nanocząstki polimerowe, stopy i nanocząstki typu core-shell, nanokompozyty lub zaawansowane nanohybrydy. Technika mikroprzepływowa eliminuje potrzebę stosowania środków powierzchniowo czynnych lub innych środków kontrolujących rozmiar i kształt cząstek[4].

Dobór materiału do produkcji mikroreaktora zależy od jego zastosowania, tj. warunków pracy reakcji, która będzie miała miejsce. Dane materiały muszą mieć dobrą trwałość, tolerancję termiczną oraz elektryczną, muszą być obojętne chemicznie. Takie reaktory produkowane są m.in. z krzemu, kwarcu, metali, polimerów, szkła, ceramiki czy półprzewodników[5].

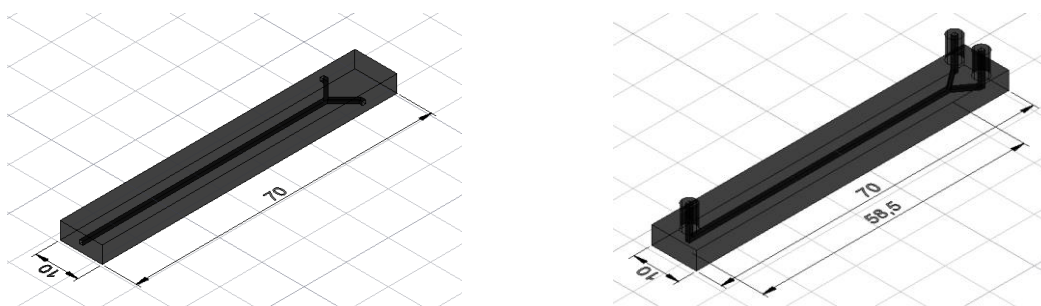
2. REAKTOR MIKROFLUIDYCZNY

2.1. Założenia

Celem badań było zaprojektowanie reaktora mikrofluidycznego do precypitacji polilaktydu. Urządzenie miało być niewielkich rozmiarów, o stosunkowo mało skomplikowanej strukturze, odporne chemicznie na stosowane odczynniki oraz możliwe do podłączenia do aparatury tj. pompa strzykawkowa, czujnik ciśnienia.

2.2. Budowa reaktora mikrofluidycznego

Zaprojektowany reaktor miał wymiary 70x10x4 mm (Rys.1). Długość prostego odcinka kanału wynosiła 58,5 mm, a kanał rozgałęział się w kształt litery Y pod kątem 135° na dodatkowe 4,8 mm [6]. Początkowo wyloty były w poziomie, jednak nie dawało to możliwości podłączenia węży doprowadzających substraty, dlatego zaprojektowano kanał prowadzący do góry z króćcami (Rys.2).



Rysunek 1. Pierwszy projekt reaktora. Rysunek 2. Projekt reaktora z króćcami.

Przekrój kanału wewnętrznego miał kształt kwadratu o długości boku wynoszącej 0,8 mm i nie był on w żadnym miejscu zaokrąglony w celu ułatwienia druku tak niewielkich wymiarów na drukarce 3D. Rozmiar króćca został dobrany do średnicy węży łączących strzykawkę.

2.3. Dobór materiału

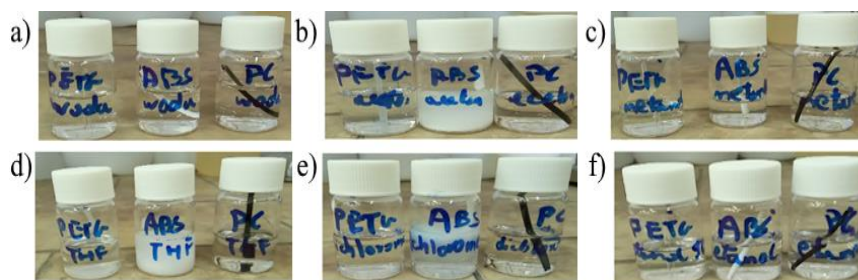
Zaprojektowany reaktor mikrofluidyczny wydrukowano na drukarce 3D firmy Prusa Research. Przed przystąpieniem do druku reaktora przeprowadzono przegląd dostępnych na rynku filamentów, które nie ulegną zniekształceniu pod wpływem używanych odczynników, tj. woda, aceton, THF, chlorek metylenu. Pod uwagę wzięto cztery filamenty firmy Prusa oraz jeden filament firmy Fiberlogy[7], ze względu na ich potencjalną odporność chemiczną:

- ABS - akrylonitrylo-butadieno-styren (Prusa)
- PET-G – poli(tereftalan etylu) z dodatkiem glikolu (Prusa)
- PC – poliwęglan (Prusa)
- PP – polipropylen (Fiberlogy)

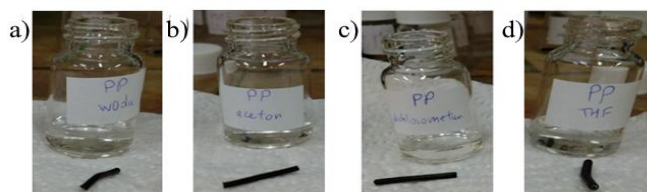
Wymienione filamenty sprawdzono pod kątem wytrzymałości na oddziaływanie odczynników chemicznych (Tab. 1). Testy były wykonywane przez pozostawienie próbki materiału w danym rozpuszczalniku na określony okres czasu (Rys. 3 i Rys. 4).

Tabela 1. Wyniki badań próbek wybranych filamentów

Rozpuszczalnik	Obserwacje			
	ABS	PET-G	PC	PP
Woda	Brak	Brak	Brak	Zniekształcenie próbki
Aceton	Pęcznienie, następnie częściowe rozpuszczenie filamentu	Zmiękczenie materiału	Brak	Brak
THF	Pęcznienie, następnie częściowe rozpuszczenie filamentu	Całkowite rozpuszczenie	Zmiękczenie materiału	Pęcznienie, następnie częściowe rozpuszczenie filamentu
Chlorek metylenu	Pęcznienie, następnie częściowe rozpuszczenie filamentu	Całkowite rozpuszczenie	Zmiękczenie materiału	Pęcznienie, następnie częściowe rozpuszczenie filamentu



Rysunek 3. Obraz próbek PET-G, ABS, PC poddanych działaniu: a) wody, b) acetonu, c) metanolu, d) THF, e) chlorku metylenu, f) etanolu



Rysunek 4. Obraz próbek PP poddanych działaniu: a) wody, b) acetonu, c) chlorku metylenu, d) THF

Korzystając z powyższych wyników zdecydowano się na kontynuowanie badań z wykorzystaniem filamentu poliwęglanowego.

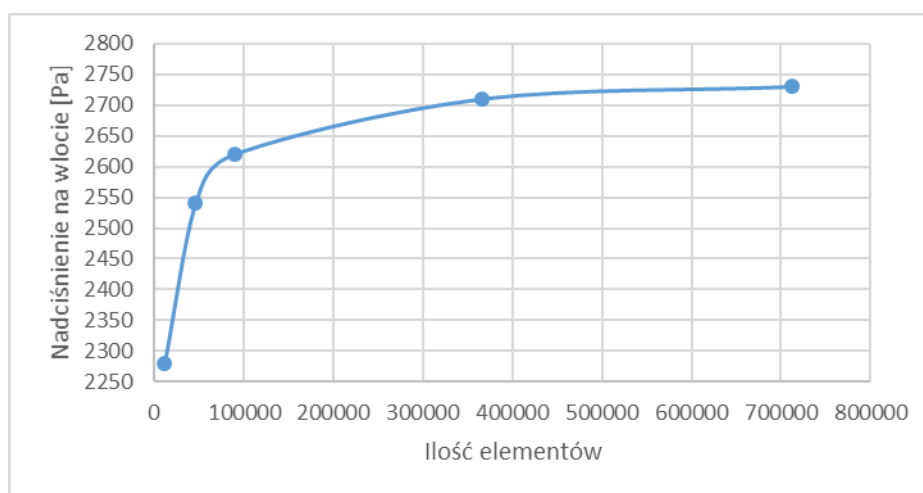
2.4. Symulacje i badania mikrostruktury powierzchni reaktora



Rysunek 5. Wydruk zaprojektowanego reaktora

2.4.1. Spadki ciśnienia w kanale reaktora

W celu doboru czujnika ciśnienia do reaktora przeprowadzono symulację CFD w oprogramowaniu ANSYS Fluent. Najpierw dobrano optymalną gęstość siatki do symulacji (mesh sensitivity analysis) (Rys. 6). W symulacji zastosowano siatkę strukturalną.



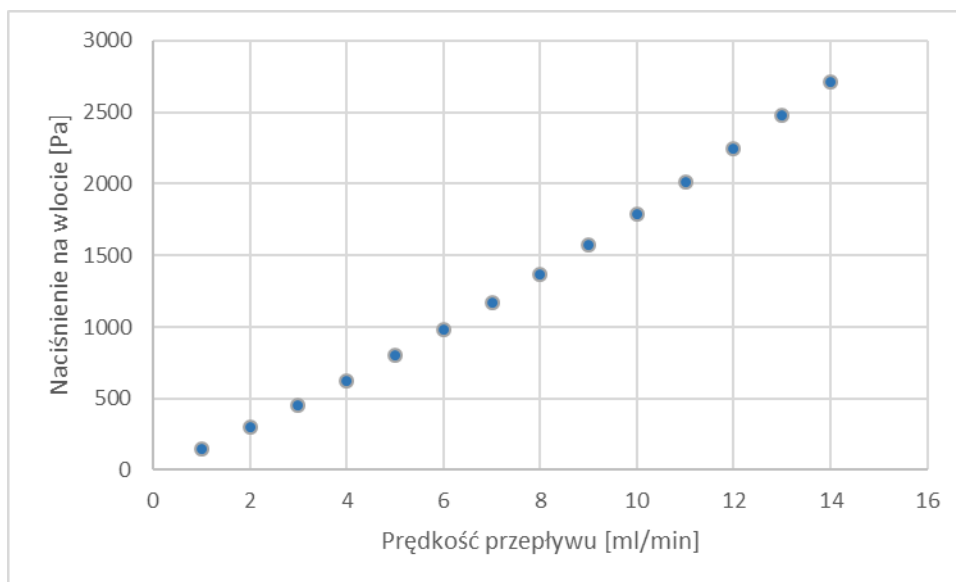
Rysunek 6. Wykres zależności nadciśnienia na wlocie reaktora od liczby elementów

Analizując wyniki, do dalszych symulacji wybrano siatkę, gdzie liczba elementów wynosiła ok. 360 tyś.

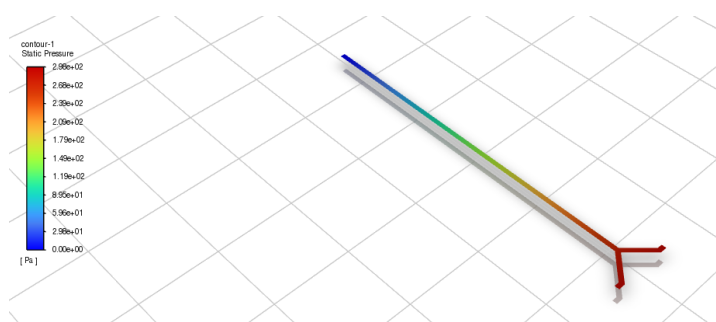
Następnym krokiem była symulacja mająca na celu wyznaczenie nadciśnienia na wlocie do reaktora w zależności od prędkości przepływu cieczy (w tym przypadku zasymulowano przepływającą przez kanał wodę). Symulacja została przeprowadzona z przepływie laminarnym na podstawie obliczonej wcześniej liczby Reynoldsa. Wyniki przeprowadzonej symulacji przedstawiono poniżej (Tab. 2.; Rys. 7 i 8.).

Tabela 2. Zależność nadciśnienia na wlocie reaktora od prędkości przepływu cieczy

Prędkość przepływu [ml/min]	Prędkość przepływu [m/s]	Liczba Reynoldsa [-]	Nadciśnienie na wlocie [Pa]
14	0,3646	289,99	2712
13	0,3403	270,67	2483
12	0,3141	249,83	2244
11	0,288	229,07	2015
10	0,2618	208,23	1792
9	0,2356	187,39	1576
8	0,2094	166,55	1369
7	0,1832	145,71	1170
6	0,1571	124,95	980
5	0,1309	104,12	798
4	0,1047	83,28	624
3	0,0785	62,44	457
2	0,0524	41,68	298
1	0,0262	20,84	146



Rysunek 7. Wykres zależności nadciśnienia na wlocie od prędkości przepływu wody.



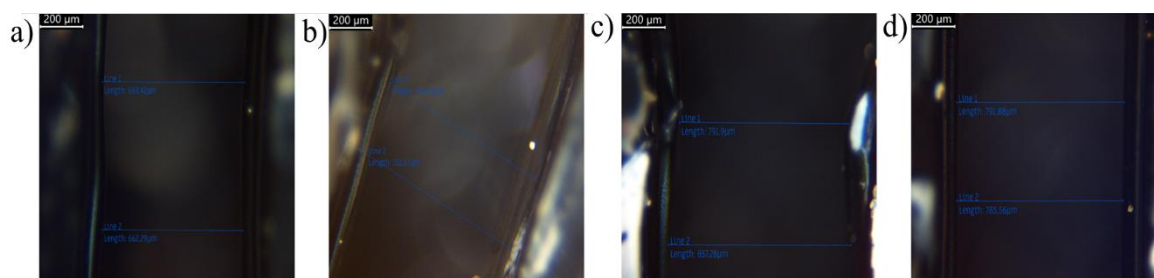
Rysunek 8. Profil ciśnienia statycznego w kanale reaktora.

Jak można zauważyć nadciśnienie na wlocie jest stosunkowo wysokie ze względu na niewielką średnicę wewnętrzną kanału w reaktorze.

2.4.2. Obrazy mikroreaktora pod mikroskopowe optycznym

Badanie przeprowadzono z użyciem mikroskopu optycznego Olympus CH30 Optical Microscope w powiększeniu 10-krotnym.

Jeden z wydrukowanych reaktorów lab-on-chip został przecięty w połowie wysokości kanału. Uzyskanie lepszej jakości ujęć z mikroskopu optycznego uniemożliwiało odbijające się światło na powierzchni reaktora, będące konsekwencją właściwości refleksujących filamentu. Pomiary wykonano na wlotach, wylocie, przy połączeniu wlotów – na początku kanału, środku długości, przy końcu kanału i wylocie z reaktora. Nominalna szerokość kanału reaktora na całej długości wynosiła 800 μm (Rys 9.). Wartość poniżej 700 μm uzyskano na wlocie nr 1. Na pozostałych obszarach reaktora otrzymano szerokości bliskie oraz przekraczające 800 μm . Różnice te mogą wynikać z specyfikacji pracy drukarki 3D w danej osi XYZ.

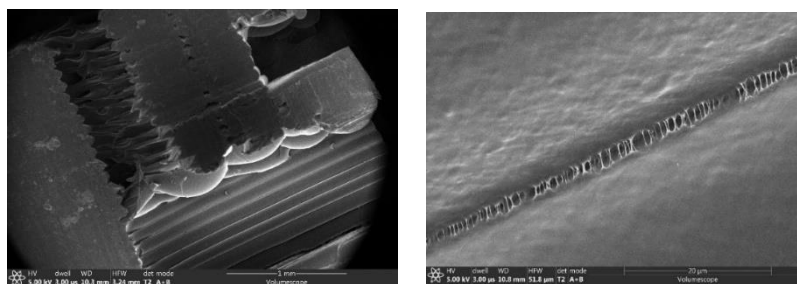


Rysunek 9. Obrazy z mikroskopu optycznego z wyznaczonymi szerokościami: a) wlotu 1, b) wlotu 2, c) początku kanału reaktora, d) środka długości kanału reaktora.

2.4.3. Analiza powierzchni reaktora skaningowym mikroskopem elektronowym

Badania przeprowadzono na mikroskopie Volumescape firmy Thermo Fisher Scientific.

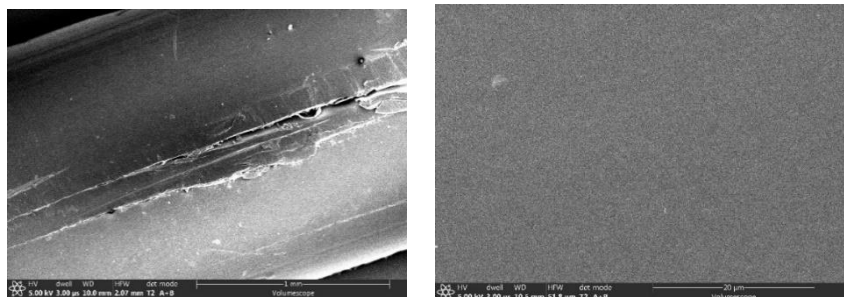
Wydrukowane reaktory poddano analizie mikroskopowej w celu uzyskania dokładnego obrazu powierzchni wydrukowanych reaktorów. Zdjęcia przedstawiają powierzchnię mikroreaktora na zgięciu kanału (Rys. 10.), gdzie można zauważyć pewne zniekształcenia powierzchni i nitki materiału między warstwami.



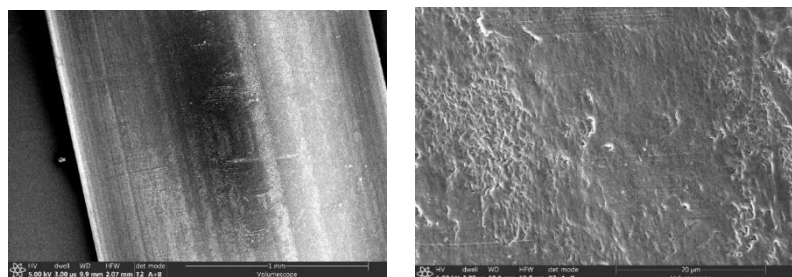
Rysunek 10. Obraz SEM powierzchni zgięcia kanału mikroreaktora

2.4.4. Badania wpływu rozpuszczalnika na filament i mikroreaktor

Po wydrukowaniu reaktorów z poliwęglanu i badaniach mikroskopowych przetestowano prędkość przepływu mieszaniny woda:aceton oraz woda:dichlorometan w stosunku objętościowym 1:1 przez mikroreaktor. W przypadku acetonu reaktor nie zmienił swoich właściwości, jednak zauważono prawdopodobne wmywanie się polimeru, z którego wykonany był reaktor. Obserwację tę potwierdzono przeprowadzając obrazowanie powierzchni filamentu PC po ekspozycji na wodę i aceton za pomocą SEM (Rys. 11 i Rys. 12). Jak widać powierzchnia potraktowana acetonem jest chropowata porównując do gładkiej powierzchni po użyciu wody, co świadczy o możliwym wmywaniu się polimeru do mieszaniny. Natomiast po przepłukaniu płytki jedną porcją mieszaniny woda:dichlorometan w stosunku objętościowym 1:1, zaobserwowano spadek drożności kanału w mikroreaktorze a natępnie jego zatkanie. Prawdopodobną przyczyną było rozszerzenie się kanału w środku reaktora pod wpływem dichlorometanu do stanu uniemożliwiającego dalszy przepływ cieczy.



Rysunek 11. Obraz SEM powierzchni filamentu PC po ekspozycji na wodę.



Rysunek 12. Obraz SEM powierzchni filamentu po ekspozycji na aceton.

3. PODSUMOWANIE

Reaktor wydrukowany z poliwęglanu według wstępnych badań może zostać wykorzystany do dalszych badań, tj. precypitacji polimeru rozpuszczonego w acetonie za pomocą wody. Przygotowany przez nas reaktor ma prostą konstrukcję, a wydruki pomimo niewielkiego wypełnienia modelu są bardzo wytrzymałe. Kolejnym krokiem naszych badań jest przeprowadzenie precypitacji polimeru w wydrukowanych reaktorach i przetestowanie w powyżej opisany sposób reaktora o innym kształcie kanału, aby porównać kształt i wielkość otrzymanych cząstek polimeru.

4. PODZIĘKOWANIA

Badania finansowane w ramach projektu PBL-IDUB pt. Badania precypitacji w reaktorach mikrofluidycznych typu "lab-on-chip".

LITERATURA

- [1]L. Kantiani and D. Barcelo, *Microfluidic Devices : Biosensors*. 2012. doi: 10.1016/B978-0-12-384862-8.00007-8.
- [2]G. Bovone, L. Cousin, F. Steiner, and M. W. Tibbitt, “Solvent Controls Nanoparticle Size during Nanoprecipitation by Limiting Block Copolymer Assembly,” *Macromolecules*, vol. 55, no. 18, pp. 8040–8048, Sep. 2022, doi: 10.1021/acs.macromol.2c00907.
- [3]S. Zhao *et al.*, “Microfluidic field strategy for enhancement and scale up of liquid–liquid homogeneous chemical processes by optimization of 3D spiral baffle structure,” *Chinese J. Chem. Eng.*, vol. 56, pp. 255–265, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.cjche.2022.07.016.
- [4]A. Saikia, R. Newar, S. Das, A. Singh, D. J. Deuri, and A. Baruah, “Scopes and challenges of microfluidic technology for nanoparticle synthesis, photocatalysis and sensor applications: A comprehensive review,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 193, pp. 516–539, May 2023, doi: 10.1016/j.cherd.2023.03.049.
- [5]M. I. Domínguez, M. A. Centeno, M. Martínez T., L. F. Bobadilla, Ó. H. Laguna, and J. A. Odriozola, “Current scenario and prospects in manufacture strategies for glass, quartz, polymers and metallic microreactors: A comprehensive review,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 171, pp. 13–35, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.cherd.2021.05.001.
- [6]L. Catalogue, “Lab-on-a-Chip Catalogue microfluidic ChipShop – The company,” 2013.
- [7]“Prusa Research.” <https://help.prusa3d.com/pl>

Projektowanie elementów ciśnieniowych z zastosowaniem analizy MES na przykładzie wzmocnionego okrągłego dna płaskiego

T. Puszczalo^{a,c}, A. Zieliński^b, K. Sówka^{a,c}, M. Sroka^c, H. Purzyńska^b

^a Zakłady Remontowe Energetyki Katowice S.A.,
email: tomasz.puszczalo@polsl.pl

^b Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnoląski Instytut Technologiczny,
email: adam.zielinski@imz.pl, hanna.purzynska@imz.pl

^c Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych,
email: marek.sroka@polsl.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki nieliniowej analizy MES okrągłego płaskiego dna wzmocnionego żebrami. Analiza wykonana została w celu optymalizacji geometrii dna płaskiego wstępnie zaprojektowanego z wykorzystaniem metody analitycznej. Model wykonany został z zastosowaniem preferowanych materiałów. Do budowy modelu jak i wykonania analizy zastosowano program SolidWorks z dodatkiem Simulation.

Abstract: This paper presents the results of a non-linear FEM analysis of a reinforced circular flat end. The analysis was performed to optimise the geometry of a flat bottom pre-designed using an analytical method. The model was made using the preferred materials. SolidWorks with the Simulation add-on was used to build the model and perform the analysis.

Słowa kluczowe: SolidWorks, dno płaskie, analiza MES

1. WSTĘP

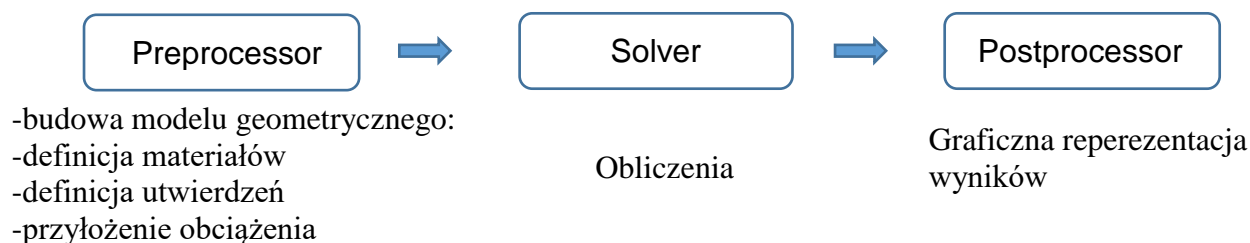
Analiza MES (Metoda Elementów Skończonych) w mechanice jest jednym z najważniejszych narzędzi inżynierskich stosowanych do badania i projektowania części mechanicznych. Ta metoda numeryczna umożliwia inżynierom przeprowadzanie wysoce zaawansowanych obliczeń i analiz strukturalnych, które pomagają w optymalizacji projektów i minimalizacji ryzyka awarii [1].

MES jest stosowany do modelowania i analizy różnych zjawisk mechanicznych, takich jak naprężenia, odkształcenia, naprężenia termiczne, zmęczenie materiałowe, analiza dynamiczna, a nawet interakcja struktura. Ta metoda ma bardzo szerokie zastosowanie w dziedzinie mechaniki i jest wykorzystywana w różnych branżach, takich jak lotnictwo, motoryzacja, budownictwo, przemysł wydobywczy, energetyka, przemysł chemiczny i wiele innych [2].

Podstawowym założeniem analizy MES jest podzielenie skomplikowanej struktury mechanicznej na skończoną liczbę elementów, które są ze sobą połączone w węzły. Każdy

element ma swoje własne charakterystyki materiałowe i geometrię, które są opisane za pomocą równań matematycznych. Badając zachowanie tych elementów, można uzyskać informacje o całej strukturze jako całości [3].

Typowa analiza MES z wykorzystaniem programu komputerowego ogranicza się do trzech głównych kroków:



Analiza MES jest niezwykle przydatna w projektowaniu konstrukcyjnym i konstrukcyjnym nowych systemów mechanicznych. Pomaga w identyfikacji problemów związanych z wytrzymałością materiału i zastąpieniem tradycyjnych metod prób i badań doświadczalnych. Dzięki analizie MES inżynierowie mogą testować różne scenariusze obciążeniowe, rozpatrywać różne materiały i optymalizować projekt w celu zmniejszenia kosztów i zwiększenia wydajności [4].

Niemniej jednak, analiza MES ma swoje ograniczenia i wymaga zaawansowanej wiedzy oraz umiejętności, aby skutecznie ją stosować. Wymaga również dostępu do odpowiedniego oprogramowania komputerowego i mocnych zasobów obliczeniowych. Ponadto, modele MES są optymalizowane i mogą zawierać pewne uproszczenia, które mogą wpływać na wyniki analizy [5].

Podsumowując, analiza MES jest niezastąpionym narzędziem w dziedzinie mechaniki, umożliwiającym dokładne i zaawansowane analizy strukturalne. Jest stosowana w różnych branżach w celu optymalizacji projektów, minimalizacji ryzyka awarii i zwiększenia wydajności konstrukcji mechanicznych. Jednocześnie jednak, wymaga umiejętności, odpowiedniego oprogramowania i dostępu do zasobów obliczeniowych, aby skutecznie ją wykorzystać [5].

2. METODYKA I CEL ANALIZY

Na potrzeby analizy wykonano obliczenia dna płaskiego uznana metodą analityczną [6, 8] a następnie przeprowadzono obliczenia MES z zastosowaniem program komputerowego SolidWorks z dodatkiem Symulation. W niniejszej pracy przedstawiono jedynie wyniki obliczeń MES, która stanowi część opracowywanego projektu. Program SolidWorks dzięki swojej integralności pozwala na wykonanie przestrzennego modelu geometrycznego (rysunek 1) a następnie po zdefiniowaniu warunków brzegowych umożliwia przeprowadzenia badania oraz umożliwia wykonanie graficznej interpretacji wyników obliczeń (rysunek 2) co ułatwia wyciągnięcie wniosków z przeprowadzonych badań. Dodatkowo model geometryczny posłużył do wykonania dokumentacji warsztatowej na potrzeby produkcyjne (rysunek 3).

W modelu obliczeniowym przejęto materiał P335GH o następującym składzie chemicznym (tabela 1) oraz własnościach mechanicznych (tabela 2).

Tabela 1. Skład chemiczny stali P335GH wg [7]

Table 1. Chemical composition of P335GH steel according [7]

Steel designation		% by mass														
Steel name	Steel number	C	Si	Mn	P	S	Al _{total}	N	Cr	Cu ^b	Mo	Nb	Ni	Ti	V	Others
P335GH	1.0473	0,10 to 0,22	≤ 0,60	1,10 to 1,70	max. 0,025	max. 0,010	≥ 0,020	≤ 0,012 ^d	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,08	≤ 0,040	≤ 0,30	0,03	≤ 0,02	

Tabela 2. Właściwości mechaniczne stali P335GH wg [7]

Table 2. Mechanical properties of P335GH steel according to [7]

Steel grade		Usual delivery condition ^{a,b}	Nominal thickness <i>t</i> mm	Tensile properties at room temperature			Impact energy KV ₂ J min. at a temperature in °C of		
Steel name	Steel number			Yield strength <i>R_{eH}</i> MPa min	Tensile strength <i>R_m</i> MPa	Elongation after fracture <i>A</i> % min.	-20 ^f	0 ^f	+20
P335GH	1.0473	+N ^c	≤ 16	355	510 to 650	20	27	34	40
			16 < <i>t</i> ≤ 40	345					
			40 < <i>t</i> ≤ 60	335					
			60 < <i>t</i> ≤ 100	315					
			100 < <i>t</i> ≤ 150	295					
150 < <i>t</i> ≤ 250	280	470 to 630							

Założenia przyjęte do obliczeń:

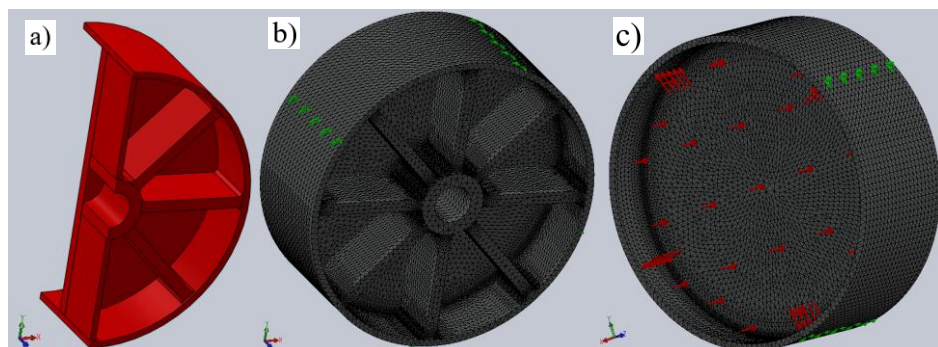
$T_c = 20^\circ\text{C}$

$P_c = 204\text{bar(g)}$

Grubość blachy $g = 40\text{mm}$

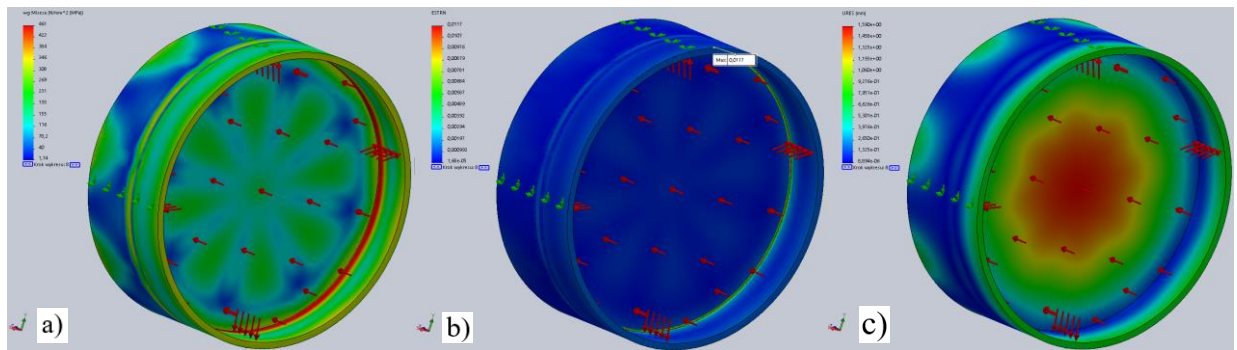
$R_{eH} = 345\text{MPa}$

Warunki brzegowe przyjęte do analizy MES przedstawiono na (fig. 1)



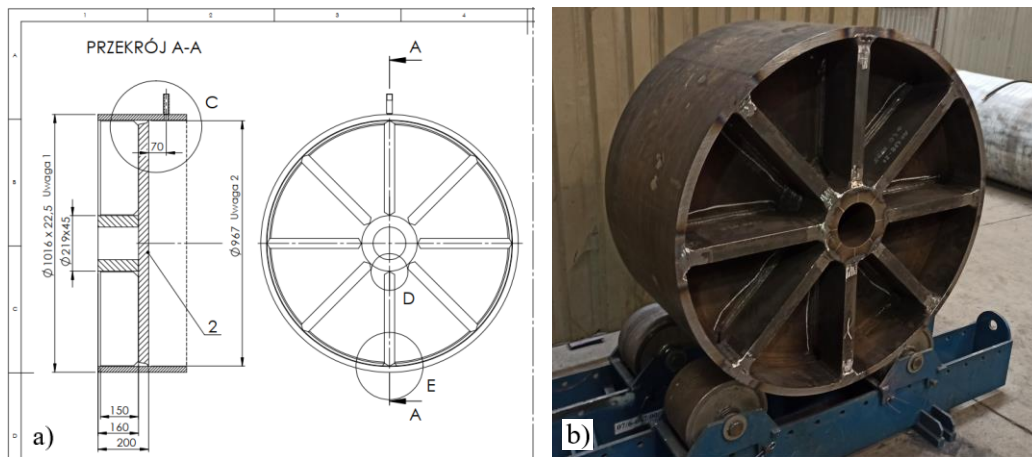
Rysunek 1. Model dna płaskiego. a) model geometryczny, b) siatka obliczeniowa, c) przyłożenie ciśnienia i utwierdzenia

Figure 1. Flat end model. a) geometric model, b) calculation grid, c) applied pressure and displacement constraints



Rysunek 2. Graficzne przedstawienie wyników. a) naprężenia (wg Misesa), b) przemieszczenie $\max = 1,6$ mm, c) względne odkształcenie plastyczne 1,17%.

Figure 2. Graphical representation of results. a) stresses (according to Mises), b) displacement $\max = 1.6$ mm, c) relative plastic strain 1.17%.



Rysunek 3. Wzmocnione okrągłe dno płaskie, a) fragment dokumentacji warsztatowej, b) zdjęcie po prefabrykacji.

Figure 3. Reinforced circular flat end, a) fragment of workshop documentation, b) photo after prefabrication.

3. WNIOSKI

Zastosowanie analizy MES pozwoliło na sprawdzenie poprawności przyjętej geometrii dna płaskiego ze zdefiniowanym materiałem sprężysto-plastycznym. Badanie nieliniowe wykazało uplastycznienie materiału na poziomie 1,17%. Wartość odkształcenia plastycznego mieści się w dopuszczalnym zakresie [9].

Obliczenia MES pozwoliły na większą elastyczność w stosowaniu materiałów oraz geometrii wzmocnienia i zmniejszenie ciężaru dna w stosunku do metody analitycznej [6].

LITERATURA

1. J. Józwik, M. Włodarczyk, D. Adamowicz, Analiza numeryczna mes wybranych rozwiązań konstrukcyjnych ścian bocznych kabin dźwigów osobowych, Postępy nauki i techniki nr 7, 2011, 227-235
2. G. Krzesiński, T. Zagrajek, P. Marek, P. Borkowski, Metoda elementów skończonych w mechanice materiałów i konstrukcji. Rozwiązywanie wybranych zagadnień za pomocą systemu ANSYS, Wyd. OWPW, 2015, ISBN: 978-83-7814-445-8
3. W. Śródka, Trzy lekcje metody elementów skończonych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004, ISBN 83-7085-829-5
4. R. Stocki, Analiza niezawodności i optymalizacja odpornościowa złożonych konstrukcji i procesów technologicznych, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Polskiej Akademii Nauk, Warszawa 2010, ISBN 978-83-89687-58-6
5. G. Rakowski, Z. Kacprzyk (2016), Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa.
6. PN-EN 13445-3:2021 Nieogrzewane płomieniem zbiorniki ciśnieniowe - Część 3: Projektowanie.
7. PN-EN 10028-2 Wyroby płaskie ze stali na urządzenia ciśnieniowe -- Część 2: Stale niestopowe i stopowe o określonych własnościach w podwyższonych temperaturach
8. J. Ickiewicz, Obliczanie nieźebrowanych den płaskich zbiorników ciśnieniowych, Acta Mechanica et Automatica, 3, 1 (2009) 45-48.
9. PN-EN 1993-1-5:2008 Eurokod 3 - Projektowanie konstrukcji stalowych - Część 1-5: Blachownice.

Industrial partner of the TalentDetector2023_Summer

Nowoczesny serwis stalowy, firma JT STAL SERWIS Sp.z o.o. zaprasza na praktyki przemysłowe dla studentów.

Studenci mają szansę poznać:

- cięcie laserowe
- gięcie blach
- dział projektowy
- nowoczesne zarządzanie firmą



Drodzy Studenci,
to jest Wasz czas
- czekamy na Was!

JT STAL SERWIS Sp. z o.o.
ul. Szyb Walenty 100
41-700 Ruda Śląska

www.jtstalservis.pl

