



Spis treści – Contents

Katarzyna Balcer

Klasyfikacja bezzałogowych statków powietrznych w odniesieniu
do specyfikacji oraz przepisów prawa polskiego i międzynarodowego5

Maciej Kotyk, Radosław Stachowiak, Wojciech Ziółkowski, Piotr Swacha

Wpływ warunków kriogenicznych na krytyczną wartość rozwarcia
wierzchołka pęknięcia stopu tytanu Ti6Al4V17

Maciej Kotyk, Wojciech Ziółkowski, Radosław Stachowiak, Piotr Swacha

Wpływ warunków kriogenicznych na krytyczne rozwarcia wierzchołka
szczeliny stopu aluminium AA251933

Piotr Swacha, Maciej Kotyk, Radosław Stachowiak, Wojciech Ziółkowski

Analizy numeryczne procesów spawania i obróbki cieplnej
z wykorzystaniem oprogramowania *SYSWELD*47

Grzegorz Szala, Piotr Szewczykowski, Paweł Bukowski

Zastosowanie fotografii elektronooptycznej do analizy jakości krawędzi
cięcia kompozytu węglowo-epoksydowego61

Piotr Swacha, Maciej Kotyk, Wojciech Ziółkowski, Radosław Stachowiak

Stanowisko do badania trwałości zmęczeniowej sprężyn naciskowych.....73

Bartosz Walentyn

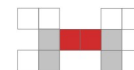
Analiza modeli rozdrabniania87

Mikołaj Szyca

Aspekty transformacji eksploatacyjnej warstwy wierzchniej bieżni łożysk
tocznych – przegląd.....103

Jan Gutsche, Łukasz Muślewski

Ocena emisyjności zasilania pojazdu elektrycznego w aspekcie
odnawialnych źródeł energii111



Klasyfikacja bezzałogowych statków powietrznych w odniesieniu do specyfikacji oraz przepisów prawa polskiego i międzynarodowego

Katarzyna Balcer

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska;
e-mail: katbal002@utp.edu.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono zagadnienie typizacji bezzałogowych statków powietrznych. Opracowanie zawiera klasyfikację dronów opartą na ich specyfikacji oraz regulacjach prawnych. Aby móc dokonać kategoryzacji dronów w oparciu o obowiązujące przepisy, należało zapoznać się z operacjami, jakie mogą wykonywać drony. W artykule sprecyzowano także kwestie prawne użytkowania BSP zarówno w Polsce, w krajach europejskich, jak i na całym świecie.

Słowa kluczowe: dron, bezzałogowy statek powietrzny, bezzałogowy aparat latający

Classification of unmanned aerial vehicles in relation to the specifications and provisions of Polish and international law

Katarzyna Balcer

UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland;
e-mail: katbal002@utp.edu.pl

Summary: The article presents the difficulty in making a homogeneous typification of unmanned aerial vehicles. The study presents the classification of drones based on their specification and legal regulations. In addition, to be able to categorize drones based on applicable regulations, it is necessary to familiarize yourself with the operations that drones can perform. The legal side was outlined, referring to the use of UAVs both in Poland and in European countries, but also around the world.

Key words: drone, unmanned aerial vehicle

1. Wstęp

Bezzałogowe statki powietrzne – BSP (ang. *Unmanned Aerial Vehicle, UAV*), zwane również dronami (ang. *drones*), w ostatnich latach bardzo zyskały na popularności. Bezzałogowe aparaty latające to powszechnie stosowane narzędzia w takich obszarach tematycznych, jak: medycyna, geodezja i kartografia, marketing, rolnictwo, monitoring, fotografia, transport i dystrybucja. Z powodu różnej ich specyfikacji niemożliwe jest dokonanie jednorodnej klasyfikacji. Ponadto ze względu na ich wzrastającą popularność, a także z uwagi na związane z ich użytkowaniem ratyfikowane regulacje prawne, które nie są jednolite w każdym kraju na świecie, kategoryzacji dronów można dokonywać na podstawie wymagań stawianych w odniesieniu do tych aparatów i operacji wykonywanych z ich użyciem [3, 5, 8, 15]. W pracy podjęto próbę zestawienia i zgromadzenia różnych kryteriów podziału dronów na podstawie dostępnej literatury.

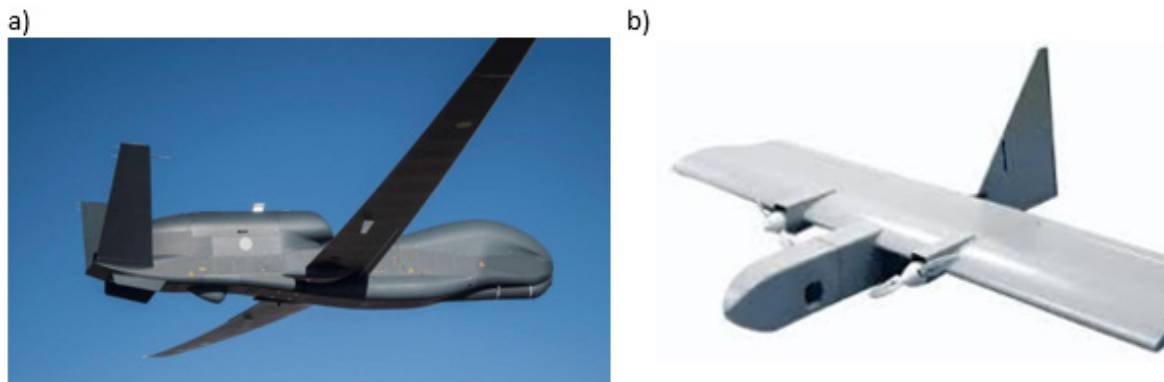
2. Klasyfikacja BSP ze względu na specyfikację

W klasyfikacji dronów uwzględnia się przede wszystkim ich masę, zasięg i długotrwałość lotu, pułap lotu, obciążenie powierzchni nośnych, sposób ich zasilania, typ silnika oraz wyposażenie drona w urządzenie rejestrujące. Należy ponadto zwrócić uwagę na przeznaczenie bezzałogowych statków powietrznych oraz rodzaj wykonywanych przez nie misji i ich możliwości.

2.1. Masa

Pierwszym kryterium podziału BSP jest ich masa, która znacząco oddziałuje na osiągi dronów. W przypadku dronów płatowców wraz ze wzrostem ich masy następuje wolniejsze nabieranie prędkości. Na podstawie dostępnej literatury można wyróżnić:

- bardzo ciężkie BSP (ang. *super heavy UAV*), których masa przekracza 2000 kg,
- ciężkie BSP (ang. *heavy UAV*), których masa jest określona przedziałem 200–2000 kg,
- średnie BSP (ang. *medium UAV*), które cechują się masą od 50 do 200 kg,
- lekkie BSP (ang. *light UAV*), których masa wynosi od 5 do 50 kg,
- mikro BSP (ang. *micro UAV*), których masa nie przekracza 5 kg [1] (rys. 1).



Rys. 1. Zestawienie BSP: a) bardzo ciężkiego – Global Hawk, b) mikro – Dragon Eye [18, 22]

Fig. 1. List of UAVs: a) very heavy – Global Hawk, b) micro – Dragon Eye [18, 22]

2.2. Zasięg i długotrwałość lotu

Istotnymi i powiązаныmi ze sobą czynnikami są zasięg i długotrwałość lotu. Zasięg to parametr określający odległość, jaką może pokonać statek powietrzny bez lądowania, na określonym zapasie energii, zatem długotrwałość lotu wykazuje silną korelację z zasięgiem. Ze względu na omówione parametry wyróżnia się:

- BSP charakteryzujące się wysoką długotrwałością lotu, które osiągają zasięg wyższy niż 1500 km, a czas ich lotu przekracza 24 h. Przykładem takiego drona jest wojskowy aparat Predator B,
- BSP charakteryzujące się średnią długotrwałością lotu, których zasięg lotu stanowi od 100 do 400 km, zaś długotrwałość lotu wynosi od 4 do 24 h,
- BSP charakteryzujące się niską długotrwałością lotu, których zasięg lotu nie przekracza 100 km, a długotrwałość lotu to maksymalnie 5 h.

2.3. Pułap lotu

Odrębna kategoria dronów została wyróżniona na podstawie pułapu lotu, który jest miarą maksymalnej wysokości, jaka jest możliwa do osiągnięcia przez statek powietrzny. Wyodrębnia się:

- BSP o niskim pułapie lotu, które osiągają maksymalnie 1000 m, np. Pointer,
- BSP o średnim pułapie lotu, które mogą być eksploatowane na wysokościach między 1000 a 10000 m,
- BSP o wysokim pułapie lotu, które potrafią wznosić się na wysokość wyższą niż 10000 m, np. Darkstar [1].

2.4. Obciążenie powierzchni nośnych

Bezzałogowe maszyny latające klasyfikowane są również ze względu na obciążenie powierzchni nośnych, które określane jest ilorazem masy statku powietrznego do pola powierzchni jego powierzchni nośnej. Wyodrębnia się następujące klasy BSP:

- BSP o niskim obciążeniu powierzchni nośnych, tj. obciążenie nie przekracza 50 kg/m²,
- BSP o średnim obciążeniu powierzchni nośnych, których wartość obciążenia plasuje się w przedziale od 50 do 100 kg/m²,
- BSP o wysokim obciążeniu powierzchni nośnych, których wartość obciążenia przekracza 100 kg/m² [1].

2.5. Sposób zasilania

Sposób zasilania dronów wpływa na czas lotu, odległość i zasięg. Uwzględniając sposób zasilania BSP, wyróżnia się:

- BSP zasilane akumulatorami,
- BSP zasilane energią słoneczną, BSP zasilane wodorem,
- BSP zasilane benzyną,
- BSP zasilane naziemnymi źródłami,
- BSP z brakiem zasilania [4].

2.6. Typ silnika

Ze względu na różnorodność zastosowań dronów wykorzystuje się różne zespoły napędowe, a zatem i odmienne silniki. Z doбором silnika wiąże się odpowiednio zasięg i czas lotu. Ze względu na typy silników wyróżnia się:

- BSP z silnikiem rotacyjnym UEL,
- BSP z silnikiem turbowentylatorowym,
- BSP z silnikiem dwusuwowym,
- BSP z silnikiem tłokowym,
- BSP z silnikiem turbośmigłowym,
- BSP z silnikiem elektrycznym (rys. 2),
- BSP z silnikiem o konstrukcji "push and pull",
- BSP z silnikiem turbinowym [1].



Rys. 2. Dron YUNEEC Mantis G zasilany silnikami elektrycznymi [11]

Fig. 2. Drone YUNEEC Mantis G powered by electric motors [11]

2.7. Wyposażenie (kamera)

Wyróżnia się dwa rodzaje operacji z użyciem dronów: VLOS (ang. *Visual Line of Sight*), czyli operacje wykonywane w zasięgu wzroku pilota oraz BVLOS (ang. *Beyond Visual Line of Sight*), co oznacza operacje wykonywane poza zasięgiem wzroku pilota. W konsekwencji tego podziału typizacji BSP można dokonać w następujący sposób:

- BSP z wyposażeniem w urządzenia rejestrujące obraz w pamięć cyfrową (kamery pokładowe),
- BSP bez wyposażenia w urządzenia rejestrujące obraz.

2.8. Sposób startu i lądowania

Drony sklasyfikowano również, uwzględniając sposób ich startu i lądowania. Ze względu na sposób startu wyszczególniono:

- drony startujące pionowo,
- drony startujące z rozbiegu,
- drony startujące z wyrzutni.

Z kolei biorąc pod uwagę metodę lądowania BSP, wyszczególniono:

- BSP lądujące pionowo,
- BSP lądujące na linii,
- BSP lądujące na kołach,
- BSP lądujące ślizgowo,
- BSP lądujące z wykorzystaniem spadochronów (rys. 3),
- BSP lądujące w sposób hybrydowy [1].



Rys. 3. Dron lądujący ze spadochronem [17]

Fig. 3. Drone landing with a parachute [17]

2.9. Przeznaczenie

Możliwości wykorzystania BSP są nieograniczone. Drony użytkowane są na polu cywilnym w takich gałęziach gospodarki, jak: geodezja i kartografia, rolnictwo, transport, budownictwo, leśnictwo czy ratownictwo. BSP o znaczeniu militarnym służą rozpoznawaniu strategicznemu i operacyjnemu oraz w celu obserwacji i ingerencji bezpośredniej lub pośredniej w pole bitwy. Uwzględniając zatem przeznaczenie dronów, można dokonać ich podziału na:

- BSP cywilne,
- BSP wojskowe [2].

2.10. Rodzaj wykonywanych misji i możliwości

Biorąc pod uwagę różne potrzeby misji wojskowych, które przyczyniły się do projektowania i wytwarzania różnych typów BSP, warto wyróżnić kategorie BSP ze względu na rodzaj wykonywanych przez nie misji i ich możliwości:

- BSP z systemem ISTAR (ang. *Intelligence, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaissance*). Drony z systemem ISTAR są wykorzystywane do płynnego pozyskiwania danych rozpoznawczych i wywiadowczych, przetwarzania oraz przekazywania zdobytych informacji i informacji rozpoznawczych, dzięki którym możliwe jest organizowanie i prowadzenia działań bojowych (również rażenia celów), przykładami są Dragon Eye, Hummingbird Warrior (rys. 4) czy Global Hawk;



Rys. 4. Hummingbird Warrior [1]

Fig. 4. Hummingbird Warrior [1]

- bojowe BSP (ang. *Unmanned Combat Aerial Vehicle*, UCAV). Dotychczas wytwarzanie tego typu bezzałogowych maszyn latających było na etapie eksperymentowania i testowania. Obiekty te mają charakteryzować się wysoką zwrotnością, ich zadania to dostarczanie broni do celów nawodnych oraz uczestnictwo w walkach powietrzno-powietrznych;
- BSP różnego przeznaczenia, które zwykle są zmodyfikowanymi, uzbrojonymi, rozpoznawczymi, bezzałogowymi aparatami latającymi, zwykle eksploatowanymi w celu rewidowania, obserwacji i wykrywania obiektów, przechwytywania broni oraz ataku z wykorzystaniem broni samonaprowadzającej;
- BSP z radarowymi i komunikacyjnymi przekaźnikami, które mogą być użytkowane nawet w bliskiej przestrzeni kosmicznej. Tego typu drony mają również możliwość dostarczania niewielkich ładunków (np. amunicja i zapasy żywności) do sił specjalnych. Przykładami tego typu BSP są Tethered Aerostat Radar System (rys. 5) czy Near Space Maneuvering Vehicle (NSMV)/Ascender/V-Airship [1].



Rys. 5. Tethered Aerostat Radar System [21]

Fig. 5. Tethered Aerostat Radar System [21]

3. Klasyfikacja BSP w Polsce ze względu na obowiązujące przepisy

Z uwagi na coraz większe ukierunkowanie gospodarki na użytkowanie bezzałogowych statków powietrznych niezbędne stało się wprowadzenie regulacji prawnych dotyczących ich wykorzystywania, a jednocześnie uregulowanie wymagań w odniesieniu do samych BSP.

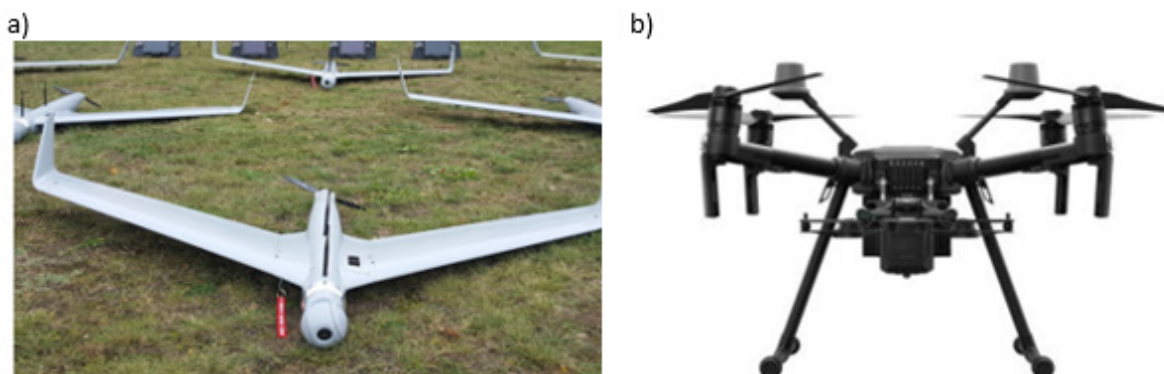
Przepisy obowiązujące w Polsce jako państwie europejskim skoordynowane są z regulacjami wydawanymi przez Europejską Agencję Bezpieczeństwa Lotniczego i przyjmowane przez Komisję Europejską, która dąży do ujednolicenia rozporządzeń. Polskie przepisy ruchu lotniczego regulowane są poprzez narodowe oraz międzynarodowe administracje lotnicze, którymi są:

- Organizacja Traktatu Północnoatlantyckiego (ang. *North Atlantic Treaty Organization*, NATO), której jednym z podstawowych zadań jest zapewnienie bezpieczeństwa ruchu lotniczego krajom członkowskim,
- Europejska Agencja Bezpieczeństwa Lotniczego (ang. *European Aviation Safety Agency*, EASA), która jest odpowiedzialna za ustanowienie i utrzymanie ujednoliconego poziomu bezpieczeństwa cywilnego ruchu lotniczego w Europie,
- Urząd Lotnictwa Cywilnego (ULC) jest instytucją rządową, która odpowiada za nadzór i kontrolę lotnictwa cywilnego oraz certyfikację,
- Polska Agencja Żeglugi Powietrznej (PAŻP), której celem jest zarządzanie ruchem lotniczym [6].

W Polsce dzięki funkcjonowaniu ww. instytucji możliwe jest również wyodrębnienie kilku klasyfikacji dronów.

Odnosząc się do typu konstrukcji i wydawanych świadectw kwalifikacji, Urząd Lotnictwa Cywilnego dokonał następującego podziału:

- samolot bezzałogowy (A), który jest statkiem powietrznym wyposażonym w skrzydła (płatewiec – rys. 6a). Wyróżnikiem tych maszyn latających jest to, że w stosunku do pozostałych bezzałogowych aparatów osiągają najwyższe wartości zasięgu oraz prędkości lotu,
- śmigłowiec bezzałogowy (H),
- sterowiec bezzałogowy (AS),
- wielowirnikowiec bezzałogowy (MR), w którego konstrukcji można wyróżnić ramiona, śmigła i silniki (rys. 6b),
- inny bezzałogowy statek powietrzny (O) [8].



Rys. 6. Drony: a) płatewiec, b) wielowirnikowiec [10, 20]

Fig. 6. Drones: a) airframe b) multi-rotor [10, 20]

Organizacja Traktatu Północnoatlantyckiego (NATO) w 2009 roku dokonała podziału dronów na klasy:

- klasę I – zaliczane do niej BSP nie przekraczają masy 150 kg,
- klasę II – w skład której wchodzi BSP o masie zawierającej się w przedziale 150 do 600 kg,
- klasę III – do której zalicza się BSP o masie większej niż 600 kg.

11 czerwca 2019 r. w Dzienniku Urzędowym Unii Europejskiej zostały podane do wiadomości publicznej dwa rozporządzenia unijne, w których przedstawiono nowe zasady użytkowania BSP (a także podział dronów) w obrębie Unii Europejskiej. W Polsce nowe prawo zaczęło obowiązywać 31 grudnia 2020 r.

W związku z nowelizacją przepisów wyodrębniono trzy główne kategorie operacji z użyciem BSP, które mają związek z zagrożeniami wynikającymi wprost z użytkowania dronów w ruchu lotniczym dla ludności na ziemi oraz innych eks-ploatatorów przestrzeni powietrznej. Podział ten jest ściśle związany z klasyfikacją bezzałogowych aparatów latających, uwzględniająca ich dopuszczalne wielkości oraz wymogi, które muszą spełniać. Omawiane kategorie to:

- kategoria otwarta obejmuje operacje w zasięgu wzroku pilota. Wykonywanie tych operacji nie wymaga uzyskania zezwoleń od odpowiednich organów. W operacjach zaliczanych do kategorii otwartej wykorzystuje się BSP o masie do 25 kg, które nie wznoszą się na wysokość wyższą niż 120 m nad terenem (bądź nad przeszkodą występującą na terenie wyższą niż 120 m). Ryzyko dla osób trzecich w tej kategorii jest bliskie zeru. W kategorii tej wyszczególniono dodatkowe trzy podkategorie lotów (A1, A2 i A3), ponadto każda podkategoria wyróżnia możliwą klasę BSP. Wyodrębniono 5 klas BSP – C0, C1, C2, C3 i C4. Wyżej wymienione podkategorie lotów można scharakteryzować następująco:
 - A1 – loty nad ludźmi – możliwe jest wykorzystanie BSP, które zostały prywatnie zbudowane oraz BSP z klas C0 i C1,
 - A2 – loty blisko ludzi – zezwala się na wykorzystywanie dronów z klas C2,
 - A3 – loty z dala od ludzi – dopuszcza się do ruchu BSP, które zostały zbudowane prywatnie oraz BSP z klas C3 i C4.
- kategoria szczególna,
- kategoria certyfikowana [7, 8].

Jak już wcześniej zaznaczono, w ramach kategorii otwartej Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2019/945 wyróżnia 5 klas, których charakterystyki zestawiono w tabeli 1. Na ich podstawie dokonano systematyzacji bezzałogowych statków powietrznych, uwzględniając wymogi, które muszą spełniać, oraz dopuszczalne wielkości [8].

Klasyfikacja bezzałogowych statków powietrznych w odniesieniu do specyfikacji
oraz przepisów prawa polskiego i międzynarodowego

Tabela 1. Systematyzacja klas BSP z uwzględnieniem ich wymagań i dozwolonych wielkości [8]
Table 1. Systematization of UAV classes, taking into account their requirements and allowed sizes [8]

	<i>Klasy BSP</i>				
Wymogi dla BSP	C0	C1	C2	C3	C4
Instrukcja użytkownika i nota dla użytkownika, opis rodzajów ryzyka	x	x	x	x	x
Bezpieczna kontrola i manewrowanie	x	x	x	x	x
Kontrola stabilności, zwrotności i transmisji danych	x	x	x	x	x
Możliwość lotów automatycznych	x	x	x	x	~
Wytrzymałość mechaniczna na uszkodzenia i deformacje	~	x	x	x	~
Zarządzanie utratą łączności	~	x	x	x	~
System jednoznacznej zdalnej identyfikacji	~	x	x	x	~
System świadomości przestrzennej	~	x	x	x	~
Niepowtarzalny numer seryjny	~	x	x	x	~
Ostrzeganie o rozładowaniu akumulatora	~	x	x	x	~
Oświetlenie	~	x	x	x	~
Gwarantowany poziom mocy akustycznej	~	x	x	x	~
Ograniczenie możliwych obrażeń	x	x	x	~	~
Tryb ograniczenia prędkości	~	~	x	~	~
	Dopuszczalne wielkości				
Maksymalna masa startowa [kg]	≤ 0,25	**, ≤ 0,9	≤ 4	≤ 25	≤ 25
Prędkość maksymalna [m/s]	≤ 19	≤ 19	***	***	***
Zasilanie maksymalnym napięciem [V (DC)]	≤ 24	≤ 24	≤ 48	≤ 48	~
Wysokość maksymalna [m]	≤ 120	≤ 120	≤ 120	≤ 120	≤ 120
Podążanie za stacją bazową [m]	≤ 50	≤ 50	~	~	~
Wielkość BSP [m]	~	~	≤ 3	~	~

W tabeli zastosowano następujące oznaczenia: x – wymóg musi zostać spełniony, ~ – przepis nie określa, * zakaz lotów automatycznych, ** w przypadku zderzenia z ludzką głową z prędkością końcową – energia, która będzie przenoszona na głowę nie będzie przekraczać 80 J lub jego maksymalna masa startowa z obciążeniem nie przekracza 900 g, *** nie określono limitu.

4. Loty międzynarodowe z użyciem BSP

Regulacje prawne dotyczące wymagań względem BSP oraz operacji z ich wykorzystaniem są odrębne dla każdego państwa i często ulegają zmianom, jednak muszą być odpowiednio zsynchronizowane z pewnymi instytucjami. Omawiane regulacje prawne w państwach Unii Europejskiej od 2021 r. muszą być skorelowane z przepisami Europejskiej Agencji Bezpieczeństwa Lotniczego [8, 12, 14].

W Stanach Zjednoczonych Ameryki przepisy dotyczące wymagań i działań BSP regulowane są według krajowego urzędu lotniczego USA – Federalnego Urzędu Lotnictwa USA (ang. *Federal Aviation Administration, FAA*) [14].

Loty dronów realizowane poza granicami kraju można sklasyfikować z uwzględnieniem typu pozwolenia:

- loty dozwolone, które cechują się tym, że pomiędzy różnymi krajami zróżnicowane są jedynie szczegółowe przepisy dotyczące np. wysokości lotów, występowania stref zakazanych czy obligatoryjnego ubezpieczenia odpowiedzialności cywilnej (OC) na drona,
- loty możliwe po wcześniejszym zarejestrowaniu drona w instytucji odpowiedzialnej polskiemu ULC,
- loty możliwe jedynie po otrzymaniu odpowiedniego pozwolenia od określonego organu państwowego,
- loty całkowicie zabronione (zdarza się również zakaz wwiezienia drona na teren danego kraju) [7, 12].

Warto zaznaczyć, że w europejskich państwach, takich jak: Hiszpania, Bośnia i Hercegowina, Szwecja, Wielka Brytania, Szkocja, Walia i Irlandia Północna, wykonywanie lotów BVLOS jest możliwe jedynie po zdobyciu odpowiednich zezwoleń w ograniczonych przypadkach. Aby wykonywać ww. operacje w Finlandii, niezbędna jest obecność operatora wizualnego, odpowiedzialnego za asystowanie podczas lotu. W Holandii, Bośni i Hercegowinie, Hiszpanii, Luksemburgu, Macedonii, Norwegii, na Słowacji przepisy prawne regulują całkowity zakaz wykonywania lotów poza zasięgiem wzroku pilota.

Wykonywanie operacji z użyciem dronów jedynie w ciągu dnia obowiązuje w Holandii, Grecji, Andorze i Rosji (przy odpowiednich warunkach pogodowych), na Ukrainie, Łotwie, Słowacji, w Słowenii i we Włoszech. Albania, Białoruś, Kazachstan, Mołdawia, San Marino nie unifikują w żaden sposób działań z użyciem BSP [3, 16].

W krajach takich jak: Algieria, Maroko, Barbados, Kuba, Bahamy, Brunei, Iran, Irak, Kuwejt, Kirgistan, Madagaskar, Nikaragua, Senegal, Syria, Uzbekistan i na Wybrzeżu Kości Słoniowej obowiązuje całkowity zakaz eksploatacji dronów. Ciekawostką jest również to, że taki zakaz również dotyczy przestrzeni powietrznej nad terenem Paryża, Kremla moskiewskiego, Placu Czerwonego w Moskwie [9, 13, 16, 19].

5. Podsumowanie

Na podstawie informacji zamieszczonych w artykule można stwierdzić, że nie jest możliwe absolutne ujednolicenie klasyfikacji dronów i operacji wykonywanych z ich użyciem. Przede wszystkim wynika to z ich zróżnicowanej specyfikacji oraz cech konstrukcyjnych, takich jak masa, która istotnie wpływa na osiągany pułap i zasięg. Specyfikacja i cechy konstrukcyjne bezzałogowych obiektów latających są z kolei zależne od rodzaju zadań, które mają wykonywać. Kolejną trudnością w dokonaniu jednorodnej typizacji dronów jest brak tożsamyh, międzynarodowych sformułowań ustaw i regulacji prawnych odnoszących się do eksploatacji dronów (w jednostkowych państwach brak jakichkolwiek uregulowań). Należy dostrzec, że podejmowane są próby klasyfikacji dronów uwzględniające ich różne aspekty, jednak z pewnością ich ciągły rozwój oraz obecność w życiu codziennym spowodują wymuszenie standaryzacji i znormalizowania przepisów.

Bibliografia

- [1] Agostino, S., Mammone, M., Nelson, M., Zhou, T., "Classification of Unmanned Aerial Vehicles Aeronautical Engineering", *Mechanical Engineering* 3016(2007), The University of Adelaide.
- [2] Borkowski, R., Łach, A., Zwierzyna, J., „Wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych w ratownictwie wodnym”, *Bezpieczeństwo Teoria i Praktyka* 2(2018).
- [3] Bukowski, P., Szala, G., „Bezzałogowe statki powietrzne – geneza, teraźniejszość i przyszłość”, *Postępy w Inżynierii Mechanicznej* 11(6),(2018), Wydawnictwa Uczelniane UTP w Bydgoszczy, 5–19.
- [4] Kochańczyk, R., Stechnij, T., Wilisowski, A., Sitko, P., Fellner, R., „Aspekty prawne oraz certyfikacyjne bezzałogowych statków powietrznych w świetle wybranych regulacji międzynarodowych”, Szkoła Policji, Katowice 2019.
- [5] Kreps, S.E. „Drony. Wprowadzenie technologii zastosowania”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2019.
- [6] Materiały szkoleniowe, Air Dron Polska 2020.
- [7] Ostrihansky, M. „Projekt rozporządzeń Komisji Europejskiej w sprawie bezzałogowych statków powietrznych”, Departament Spraw Międzynarodowych Urząd Lotnictwa Cywilnego, Warszawa 2018.
- [8] Wyszywacz, W. „Drony”, Wydawnictwo Poligraf, Brzezia Łąka 2020.
- [9] <http://latam-dronem.pl/latanie-dronem-za-granica-co-trzeba-wiedziec/> (dostęp: 07.05.2021).
- [10] <http://www.swiatdronow.pl/polskie-drony> (dostęp: 08.05.2021).
- [11] <https://allegro.pl/oferta/dron-yuneec-mantis-g-gps-4k-wifi-8712411903> (dostęp: 08.05.2021).
- [12] <https://megadron.pl/pl/blog/latanie-za-granica-co-powinienes-wiedziec-przed-wakacjami-z-dronem-1549983913.html> (dostęp: 07.05.2021).
- [13] <https://timesofindia.indiatimes.com/travel/web-stories/countries-where-drones-are-banned/photostory/81389964.cms> (dostęp: 07.05.2021).
- [14] <https://uavcoach.com/drone-bans/> (dostęp: 07.05.2021).
- [15] <https://uavcoach.com/drone-laws/> (dostęp: 07.05.2021).
- [16] <https://uavcoach.com/drone-laws-in-united-states-of-america/> (dostęp: 07.05.2021).
- [17] <https://uavcoach.com/drone-parachute-system/> (dostęp: 07.05.2021).
- [18] <http://www.designation-systems.net/dusrm/app2/q-14.html> (dostęp: 07.05.2021).
- [19] <https://www.dronegenuity.com/international-drone-laws-requirements/> (dostęp: 07.05.2021).
- [20] <https://www.drony.net/matrice-210-rtk-v2-dji.html> (dostęp: 07.05.2021).
- [21] <https://www.everythingrf.com/News/details/9702-Peraton-to-Deploy-its-Tethered-Aerostat-Radar-System-Across-the-US> (dostęp: 07.05.2021).
- [22] <https://www.komputerswiat.pl/aktualnosci/militaria/pierwszy-lot-ogromnego-japonskiego-drona-rq-4b-global-hawk/86ddg3w> (dostęp: 07.05.2021).



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Wpływ warunków kriogenicznych na krytyczną wartość rozwarcia wierzchołka pęknięcia stopu tytanu Ti6Al4V

Maciej Kotyk¹, Radosław Stachowiak^{2*}, Wojciech Ziółkowski³, Piotr Swacha⁴

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: maciej.koty@utp.edu.pl

² Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: radsta005@utp.edu.pl

³ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: wojzio002@utp.edu.pl

⁴ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: pioswa002@utp.edu.pl

* Autor korespondencyjny; e-mail: radsta005@utp.edu.pl

Streszczenie: Cel badania to wyznaczenie krytycznej wartości rozwarcia wierzchołka pęknięcia *CTOD* na podstawie przeprowadzonego badania laboratoryjnego dla stopu tytanu Ti6Al4V w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych oraz określenie wpływu temperatury na własności badanego stopu. W celu wyznaczenia *CTOD* dla stopu tytanu wykonano znormalizowane próbki CT. Badanie składało się z dwóch etapów. Pierwszy z nich polegał na wygenerowaniu pęknięcia zmęczeniowego poprzecznie do linii działania siły. Drugi, główny etap badań, polegał na poddaniu próbek monotonicznej próbie rozciągania w dwóch różnych warunkach temperaturowych. W pracy zaprezentowano wyniki przeprowadzonych badań oraz dokonano analizy wybranych wielkości mechanicznych związanych z eksperymentem. Na podstawie przeprowadzonej analizy zauważono, że temperatura wpływa na wartość *CTOD* wyznaczonego dla danego stopu. W warunkach kriogenicznych stop Ti6Al4V charakteryzuje się znacznie niższą wartością *CTOD*. Przeprowadzone badania stanowią bazę wyników i informacji, która jest punktem wyjścia do przeprowadzenia analizy wybranych charakterystyk mechanicznych materiału warstwowego AA2519-AA1050-Ti6Al4V, w tym jego wartości *CTOD* w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych.

Słowa kluczowe: *CTOD*, *RWP*, pękanie zmęczeniowe, wpływ warunków otoczenia, tytan, stopy tytanu

Influence of cryogenic conditions on the critical crack tip opening displacement of Ti6Al4V titanium alloy

Maciej Kotyk¹, Radosław Stachowiak^{2*}, Wojciech Ziółkowski³, Piotr Swacha⁴

¹ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

² UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: radsta005@utp.edu.pl

³ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: wojzio002@utp.edu.pl

⁴ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: pioswa002@utp.edu.pl

* Correspondent author; e-mail: radsta005@utp.edu.pl

Summary: The aim of the study was to determine the critical value of the crack tip *CTOD*, based on the laboratory test, for the Ti6Al4V titanium alloy under ambient and cryogenic conditions, and to determine the influence of temperature on the properties of the tested alloy. In order to determine the *CTOD* for the titanium alloy, standardized CT samples were made. The study consisted of two stages. The first consisted in generating a fatigue crack transversely to the line of action of the force. The second, main stage of the tests was to subject the samples to a monotonic tensile test under two different temperature conditions. The paper presents the results of the research carried out and the analysis of selected mechanical quantities related to the experiment. On the basis of the analysis, it was noticed that the temperature influences the *CTOD* value determined for a given alloy. Under cryogenic conditions, the Ti6Al4V alloy has a much lower *CTOD* value. The conducted tests constitute the basis of the results and information, which is the starting point for the analysis of selected mechanical characteristics of the AA2519-AA1050-Ti6Al4V layered material, including its *CTOD* values in ambient and cryogenic conditions.

Key words: *CTOD*, *RWP*, fatigue cracking, influence of environmental conditions, titanium, titanium alloys

1. Wstęp

Nieustanny rozwój inżynierii materiałowej prowadzi do powstawania nowych materiałów, których własności mechaniczne w wyniku udoskonalania składu chemicznego są coraz lepsze. Materiały te mają zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, m.in. w przemyśle lotniczym [9]. Z uwagi na szerokie zastosowanie nowych materiałów inżynierskich istnieje potrzeba prowadzenia badań w celu dostarczania aktualnych danych na temat ich własności mechanicznych. Na podstawie odpowiedniej analizy wyników badań można poznać mechanizm zniszczenia elementów konstrukcyjnych wykonanych z opisywanych materiałów. Na skutek pojawiania się i propagacji pęknięć zmęczeniowych dochodziło do zniszczeń m.in. konstrukcji mostów [23].

Opracowano różne metody badania odporności na pękanie materiałów, m. in. takie jak krytyczna wartość całki J (J_c), krytyczna wartość współczynnika intensywności naprężeń (K_c), lub krytyczna wartość współczynnika uwalniania energii (G_c). Inną miarą, która również charakteryzuje odporność materiału na pękanie jest krytyczna wartość rozwarcia wierzchołka pęknięcia – *CTOD* (*Crack Tip Opening Displacement*), dająca mniej informacji o materiale, jednak bardziej uniwersalna. Opisywana wielkość może być wykorzystywana do porównywania między sobą wybranych charakterystyk mechanicznych materiałów [18, 27].

Badania polegające na wyznaczeniu *CTOD* były już przeprowadzane dla zróżnicowanej grupy materiałów [11, 23, 32], lecz z uwagi na ciągły rozwój inżynierii materiałowej istnieje stała potrzeba ich realizacji – mają dostarczać nowych i aktualnych wyników. Dla materiału Ti6Al4V były przeprowadzane badania *CTOD* [13], lecz ze względu na istotną w kontekście techniki pomiarowej przestrzeń czasową dostrzeżono potrzebę powtórnego przeprowadzenia opisywanych badań. Dodatkowo w ogólnodostępnych źródłach nie odnaleziono informacji na temat badań tego materiału w warunkach kriogenicznych. W wyniku przeprowadzonej analizy literatury oraz z powodu braku aktualnych danych odnośnie badań *CTOD* dla stopu Ti6Al4V postanowiono je przeprowadzić. Założono również, że badania zostaną wykonane w warunkach otoczenia (293 K) i kriogenicznych (77 K). W celu przeprowadzenia badań posłużono się normą BS 7448 [8]. Istnieje także norma ASTM E1290, która jest pochodną normy BS 7448, jednak w tym opracowaniu postanowiono bazować na normie brytyjskiej [30].

2. Metodyka badań

2.1. Obiekt badań

Obiektem badań był szeroko stosowany zarówno w obiektach technicznych, jak i w implantologii stop tytanu Ti6Al4V (grade 5). Materiał ten charakteryzuje się dobrą plastycznością na gorąco oraz dobrą spawalnością. Jest on odporny na czynniki korozyjne. Wspomniana popularność tego materiału wynika również z mniejszego – w porównaniu ze stalą – stosunku gęstości do wytrzymałości. Przyczyną tak korzystnej własności mechanicznej jest struktura krystaliczna tego materiału składająca się z gruboziarnistej fazy α oraz występującej na granicach ziaren przesyconej

glinem i wanadem fazy β . Ma to jednak odzwierciedlenie w cenie grade 5. Stop Ti6Al4V charakteryzuje się wyższą ceną w porównaniu ze stałą o tej samej wytrzymałości na rozciąganie.

Bardzo korzystną cechą tego materiału jest wysoka biogodność, rozumiana jako odporność na korozję mogącą powstać wskutek oddziaływania substancji fizjologicznych [7, 15, 19]. Powoduje to, że omawiany materiał z powodzeniem jest stosowany również w stomatologii [16]. Wymaga on jednak odpowiedniego przygotowania ze względu na wanad, który wchodzi w skład chemiczny opisywanego stopu. Jego udział procentowy w Ti6Al4V wraz z udziałem innych pierwiastków przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny badanego materiału Ti6Al4V [33]

Table. 1. Chemical composition of the titanium alloy Ti6Al4V [33]

Al	V	Fe	Si	O	C	N	H
6,42	4,12	0,18	0,024	0,12	0,013	0,011	0,004

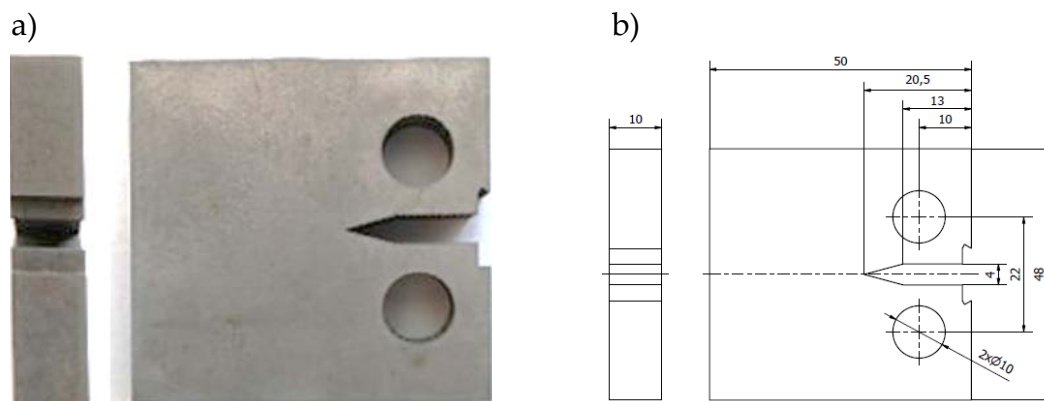
Materiał Ti6Al4V jest szeroko opisywany w literaturze [10]. Podczas analizy dostępnych źródeł można napotkać informacje o stosowaniu tego materiału w konstrukcjach lotniczych – np. do budowy elementów mocowania kół lub okien statków powietrznych. Wykorzystuje się go także w silnikach lotniczych, do budowy łopat turbin niskiego ciśnienia oraz rur układu wydechowego [14, 26, 34].

Bardzo szerokie stosowanie analizowanego materiału w konstrukcjach, których użytkowanie wiąże się z dużą odpowiedzialnością, wymaga identyfikacji własności tego materiału, w tym własności mechanicznych. W ogólnodostępnej literaturze można odnaleźć prace zawierające wyniki badań podstawowych własności statycznych Ti6Al4V [12, 17, 25] oraz wyniki bardziej czasochłonnych badań trwałości zmęczeniowej [6, 24, 31]. Zaobserwować można również wzrost zainteresowania tym materiałem w kontekście mechaniki eksperymentalnej ciała stałego. Efekt ten zaobserwowano po pojawieniu się eksperymentalnego materiału zgrzewanego wybuchowo, złożonego z warstw materiałów AA2519-AA1050-Ti6Al4V, spośród których AA2519 oraz Ti6Al4V stanowią materiały bazowe, a stop AA1050 jest – jak określają autorzy publikacji – warstwą buforową [1, 2, 5, 21, 28, 29]. W literaturze można odnaleźć również informacje na temat badań odporności na pękanie tego materiału [20], jednak w żadnej z przedstawionych publikacji nie znaleziono informacji na temat krytycznej wartości rozwarcia pęknięcia *CTOD* w kontekście charakterystyki mechanicznej, dającej informację o odporności na pękanie tego materiału.

2.2. Procedura badawcza

W celu wyznaczenia krytycznej wartości rozwarcia pęknięcia *CTOD* dla stopu tytanu Ti6Al4V postanowiono zastosować próbki płaskie kompaktowe typu CT. Zdecydowano się na takie próbki ze względu na perspektywę dalszych badań nad wspomnianym materiałem warstwowym Al-Ti, jednak nie omówiono ich szerzej w prezentowanej pracy. Ze względu na wyjściową grubość blachy wynoszącą 10 mm

konieczne okazało się zastosowanie stosunku wymiarów charakterystycznych próbki $W/B = 4$, gdzie W – szerokość efektywna próbki CT i B – grubość próbki CT. Widok próbki oraz pozostałe wymiary geometryczne próbki zaprezentowano na rysunku 1.



Rys. 1. Próbką zwartą (CT) wykorzystaną podczas badań: a) widok próbki,
b) wybrane wymiary próbki [opracowanie własne]

Fig. 1. Compact tension specimen: a) view of the specimen,
b) selected specimen dimensions [own study]

Kluczowym elementem podczas wyznaczania odporności na pękanie zarówno za pomocą krytycznej wartości rozwarcia pęknięcia, jak i innych miar odporności na pękanie – jak krytyczna wartość współczynnika intensywności naprężeń bądź krytyczna wartość całki J – jest karb mechaniczny. Aby pęknięcie propagowało w kierunku prostopadłym do linii działania siły obciążającej próbkę, należy wykonać je w taki sposób, żeby promień zaokrąglenia dna karbu był możliwie najmniejszy. Opisany karb w badanych próbkach (rys. 1) wykonano z wykorzystaniem metod elektroerozyjnych. Po dokonaniu pomiarów zaokrąglenia dna karbu, wykonanych za pomocą metod optycznych, okazało się, że jego promień nie przekracza 0,32 mm. Należy zaznaczyć, że w żadnej z badanych próbek kąt pomiędzy przewidywaną a rzeczywistą płaszczyzną pęknięcia nie przekroczył 5° .

W celu przeprowadzenia zasadniczej części badań wykorzystano hydrauliczną maszynę wytrzymałościową marki Instron. Urządzenie zostało skonfigurowane w taki sposób, aby równolegle zapisywać dane z kanału pomiarowego siły, przemieszczenia tłoka roboczego maszyny oraz kanału odkształcenia (rozwarcia pęknięcia). Należy zaznaczyć, że w przypadku generowania pęknięcia zmęczeniowego maszyną wytrzymałościową sterowano z wykorzystaniem kanału siły, natomiast w przypadku monotonicznego obciążania próbki z pęknięciem zmęczeniowym sterowanie maszyną odbywało się za pomocą kanału przemieszczenia.

Ze względu na specyfikę badania próbki obciążane były w maszynie za pomocą układu trzpieniowo-sworzniowego w taki sposób, aby możliwy był obrót próbki wskutek stopniowego zwiększania się rozwarcia i długości pęknięcia.

Badania składały się z dwóch etapów. Pierwszy z nich polegał na wygenerowaniu pęknięcia zmęczeniowego poprzecznie do linii działania siły (obciążenia). Proces ten wiązał się z ryzykiem uszkodzenia próbki, więc należało wprowadzić procedury pole-

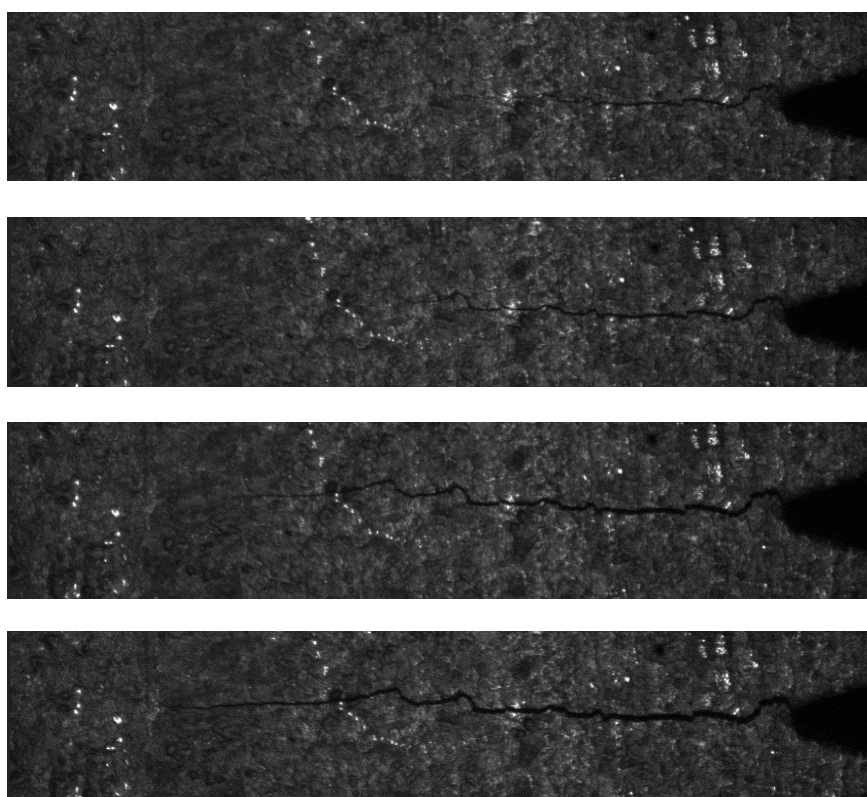
gające na odpowiednim jej zabezpieczeniu. Zdecydowano się na zastosowanie optomechatronicznego układu, który w sposób zautomatyzowany kontrolował przyrost pęknięcia, a w przypadku osiągnięcia pożądanej długości wspomnianego pęknięcia zatrzymywał pracę maszyny przy jednoczesnym odciążeniu próbki. Szczegóły dotyczące opisywanego układu można odnaleźć w artykułach [3, 4, 20–22]. Należy jednak zaznaczyć, że opisywana metoda polegała na analizie obrazu próbki za pomocą algorytmów bazujących na cyfrowej korelacji obrazu. Dodatkowe zabezpieczenie stanowiło również stałe monitorowanie rozwarcia pęknięcia mierzone w zamku próbki.

Wielkości opisujące sposób, w jaki obciążano próbki podczas generowania pęknięcia zmęczeniowego, zaprezentowano w tabeli 2. Należy zaznaczyć, że próbki były obciążane w sposób odzerowo tętniący. Wybrane fotografie przedstawiające przyrost pęknięcia zmęczeniowego zarejestrowane podczas pierwszego etapu badań zaprezentowano natomiast na rysunku 2.

Tabela 2. Wybrane cechy charakteryzujące sposób obciążania próbki podczas generowania pęknięcia zmęczeniowego [opracowanie własne]

Table. 2. Selected features characterizing the loading of the specimen during fatigue crack generation [own study]

Material	Częstotliwość Hz	Obciążenie kN
Ti6Al4V	5	5,8

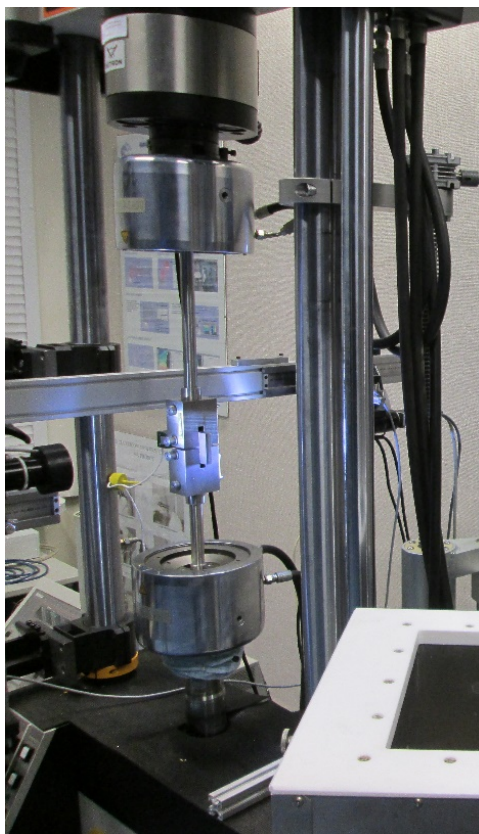


Rys. 2. Wybrane etapy wzrostu pęknięcia zmęczeniowego zarejestrowane podczas generowania pęknięcia zmęczeniowego w próbce CT z materiału Ti6Al4V [opracowanie własne]

Fig. 2. Selected fatigue crack growth phases recorded during fatigue crack generation in CT specimen made of Ti6Al4V [own study]

Należy zaznaczyć, że szybkość pękania poszczególnych próbek była zróżnicowana i trudno jednoznacznie określić liczbę cykli potrzebnych do uzyskania zakładanej długości pęknięcia. Różnice w liczbie cykli stwierdzono przy samym zapoczątkowaniu pęknięcia, natomiast po jego zainicjowaniu różnice pomiędzy wydłużeniem pęknięcia a liczbą cykli nie były aż tak duże.

Próbkę zamocowaną w maszynie pomiarowej podczas generowania pęknięcia zmęczeniowego zaprezentowano na rysunku 3.



Rys. 3. Próbkę zamocowaną na maszynie wytrzymałościowej podczas generowania pęknięcia zmęczeniowego [opracowanie własne]

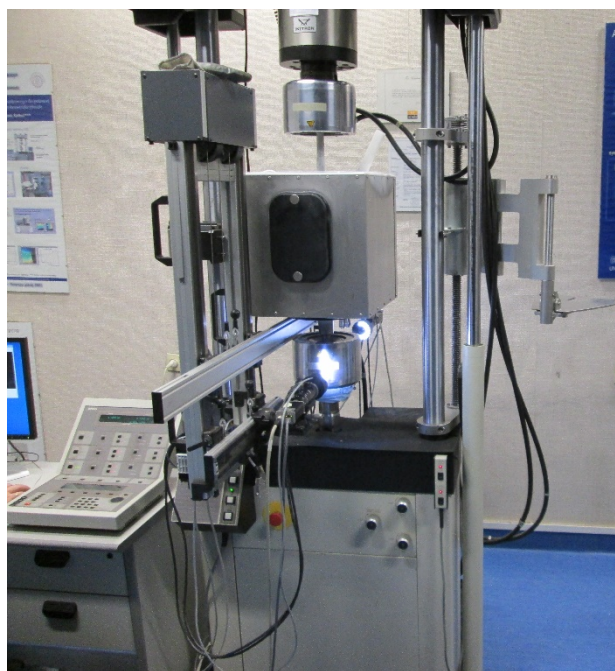
Fig. 3. Specimen mounted on a testing machine during fatigue crack generation [own study]

Drugi etap eksperymentu, który stanowił jego podstawową część, odbywał się w zależności od potrzeb w dwóch różnych warunkach temperaturowych, tj. w temperaturze otoczenia i w temperaturze kriogenicznej (77 K).

Próbki niezależnie od warunków obciążano w ten sam sposób, sterując przemieszczeniem tłoka maszyny pomiarowej (i tym samym całej komory) względem nieruchomego trawersu. Prędkość przesuwu była stała i wynosiła 0,05 mm/s. Podczas eksperymentu rejestrowano i zapisywano równolegle odczyty z trzech kanałów pomiarowych, tj. z kanału siły, przemieszczenia i rozwarcia pęknięcia. Zebrane w ten sposób dane pomiarowe pozwoliły na wyznaczenie przebiegów i ostatecznie na określenie krytycznego rozwarcia pęknięcia badanego materiału w obydwu warunkach temperaturowych.

Jak już wcześniej wspomniano, badania w obniżonej temperaturze wymagały zastosowania wcześniej przygotowanej komory środowiskowej wykonanej z materiału odpornego na utlenianie i korozję oraz z elementów termoizolacyjnych. Należy zaznaczyć, że przez cały czas trwania eksperymentu wewnątrz komory było wypełnione ciekłym azotem. Aby mieć pewność, że temperatura we wnętrzu komory jest jednokowa, we wszystkich badaniach po zalaniu komory oczekiwano, aż gwałtowne odparowywanie ciekłego azotu ustanie. Dopiero wówczas rozpoczynano pomiar.

Widok komory środowiskowej z zamocowaną w jej wnętrzu próbką zaprezentowano na rysunku 4.



Rys. 4. Stanowisko badawcze z zamocowaną komorą środowiskową [opracowanie własne]

Fig. 4. Test stand with environmental chamber mounted [own study]

Elementem procedury badawczej, na który zwrócono szczególną uwagę, było stałe uzupełnianie ciekłego azotu w komorze, bowiem ten gwałtownie odparowywał. Efekt odparowywania był szczególnie widoczny podczas wymiany próbki, gdy do wnętrza komory wprowadzano materiał o temperaturze znacznie wyższej w porównaniu z warunkami wnętrza komory.

3. Wyniki

Na podstawie przeprowadzonego badania określono wartość *CTOD* dla stopu Ti6Al4V w warunkach otoczenia i warunkach kriogenicznych. Aby dokonać pełniejszej analizy odporności na pękanie, postanowiono poddać ocenie również inne wielkości charakteryzujące tę cechę materiałową. Jedną z nich jest maksymalna siła zarejestrowana podczas badania (P_{max}). Kolejnymi wielkościami są: wartość rozwarcia pęknięcia przy odkształceniu plastycznym (V_p), wartość siły przy początku krucho pęknięcia (F_c) oraz spadek wartości siły przy stałym przemieszczeniu

(d1%F1). Określono również wpływu temperatury na przebieg charakterystyki CTOD.

Na podstawie uzyskanych wyników badań dokonano analizy wyników eksperymentu, posługując się normą BS 7448. Wykorzystano zawarte w niej zależności matematyczne, m.in. δ , utożsamianą z CTOD, którą opisano za pomocą poniższego wzoru:

$$\delta = \left[\frac{F}{B \cdot W^{0.5}} \times f\left(\frac{a_0}{W}\right) \right]^2 \cdot \frac{1-\nu^2}{2 \cdot R_{p0.2} \cdot E} + \frac{0,46 \cdot (W-a_0) \cdot V_P}{0,46 \cdot W + 0,54 \cdot a_0 + (C-W) + z} \quad (1)$$

gdzie:

- B – grubość próbki CT,
- C – szerokość całkowita próbki CT,
- W – szerokość efektywna próbki CT,
- ν – liczba Poissona (0,3 mm·mm⁻¹),
- $R_{p0.2}$ – umowna granica plastyczności (1344,2 MPa),
- E – moduł Younga (128600 MPa),
- a_0 – długość szczeliny początkowej,
- V_P – wartość rozwarcia pęknięcia przy odkształceniu plastycznym,
- F – siła,
- z – odległość między punktem zamocowania ekstensometru a powierzchnią próbki prostopadłą do płaszczyzny pęknięcia od strony karbu.

W tabeli 3 przedstawiono wybrane wyniki badań i obliczeń, uzyskane podczas przeprowadzonej próby badawczej.

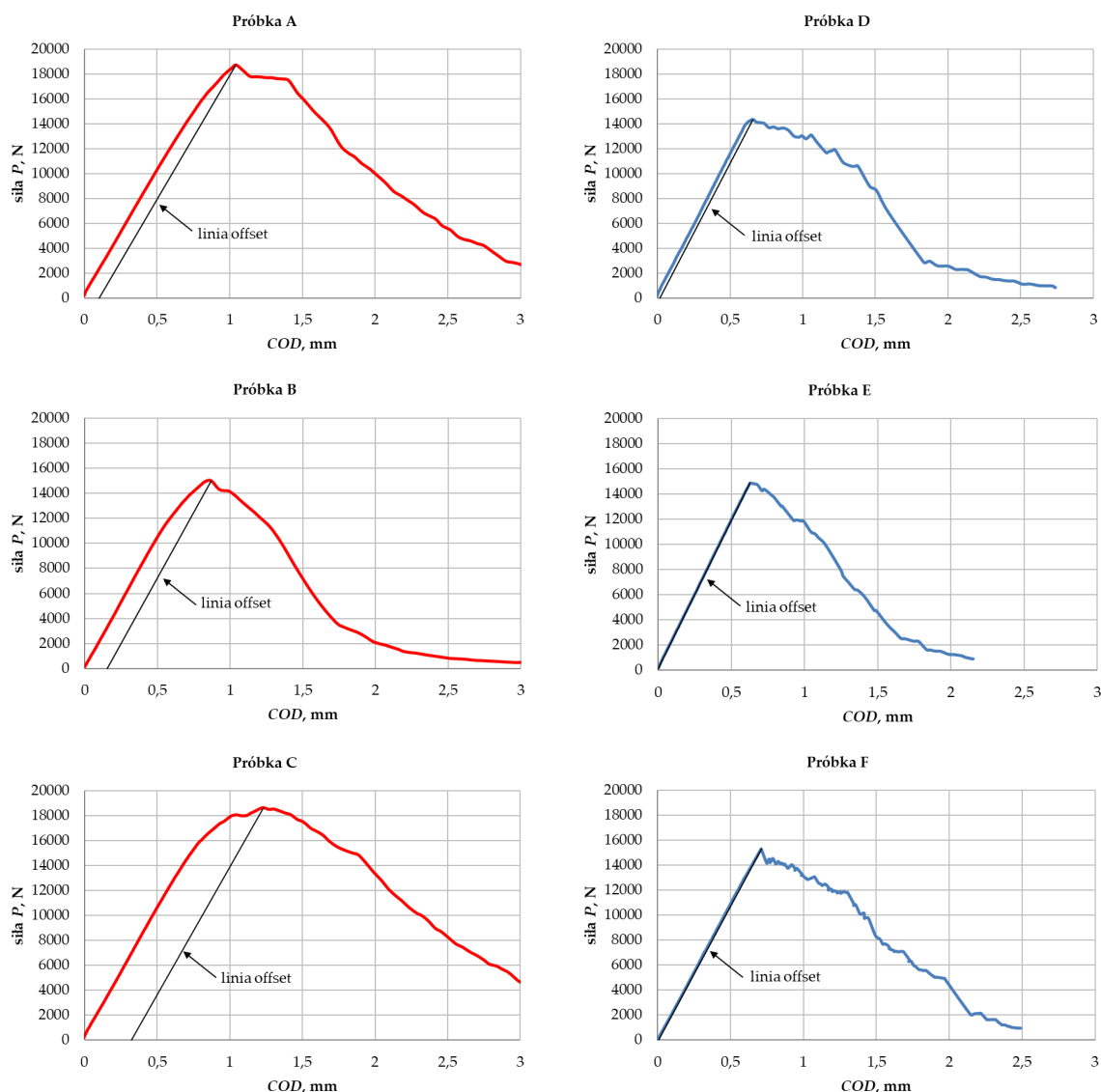
Tabela 3. Wybrane wyniki badań i obliczeń [opracowanie własne]

Table 3. Selected test results and calculations [own study]

Lp. temp.	P_{MAX} , N		V_P , mm		F_C , N		$d1\%F1$, %		δ , mm	
	293 K	77 K	293 K	77 K	293 K	77 K	293 K	77 K	293 K	77 K
1	18728	14344	0,104	0,018	18727	14344	29,783	18,521	0,425	0,137
2	14977	14887	0,151	-0,007	14976	14887	15,420	15,065	0,295	0,121
3	18663	15338	0,322	0,010	18663	15338	4,848	12,145	0,478	0,157
wartość średnia	17456	14856	0,192	0,007	17455	14856	16,684	15,244	0,399	0,138
odchylenie standar- dowe	2147	498	0,115	0,013	2147	498	12,516	3,192	0,094	0,018

Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi siła – COD wyznaczone dla wszystkich badanych próbek w obu warunkach temperaturowych podczas badań eksperymentalnych. Kolorem czerwonym oznaczono przebiegi dla próbek badanych w warunkach otoczenia, natomiast kolorem niebieskim – przebiegi dla próbek badanych w warunkach kriogenicznych. Na wykresach zaznaczono linię offset – równoległą

do liniowej części przebiegu siła – COD, co pozwoliło na wyznaczenie wartości siły F_c , której użyto w dalszych obliczeniach.

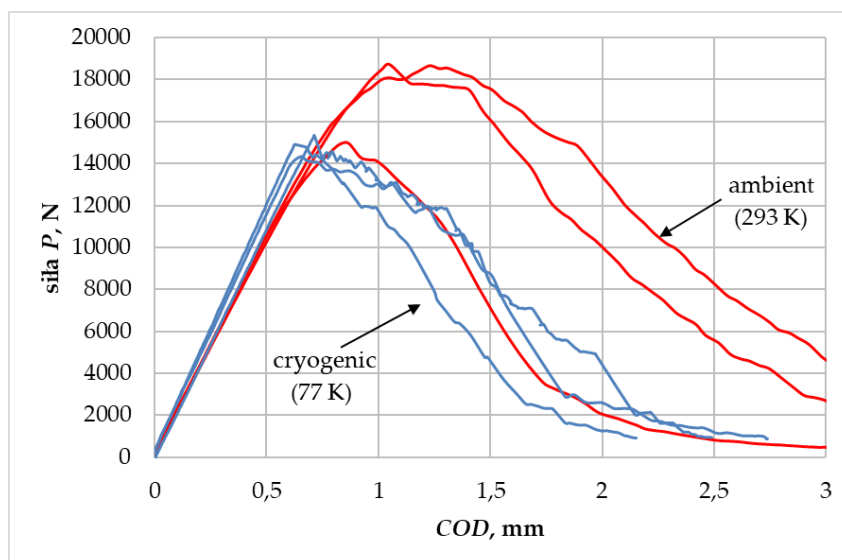


Rys. 5. Przebiegi COD w warunkach otoczenia (próbki A, B, C) i kriogenicznych w warunkach (próbki D, E, F) dla stopu Ti6Al4V [opracowanie własne]

Fig. 5. COD waveforms in ambient (specimens A, B, C) and cryogenic (specimens D, E, F) conditions for the alloy Ti6Al4V [own study]

Na rysunku 6 przedstawiono zestawienie wyników badań (przebiegów siła-COD) w formie graficznej – zaprezentowano 3 przebiegi dla próbek badanych w warunkach otoczenia (kolor czerwony) i 3 przebiegi dla próbek badanych w warunkach kriogenicznych (kolor niebieski). Każdy przebieg charakteryzuje jedną z badanych próbek. Na poniższym wykresie można zauważyć, jak warunki kriogeniczne wpłynęły na wartość siły P w porównaniu z warunkami otocznia.

Wpływ warunków kriogenicznych na krytyczną wartość rozwarcia wierzchołka pęknięcia stopu tytanu Ti6Al4V

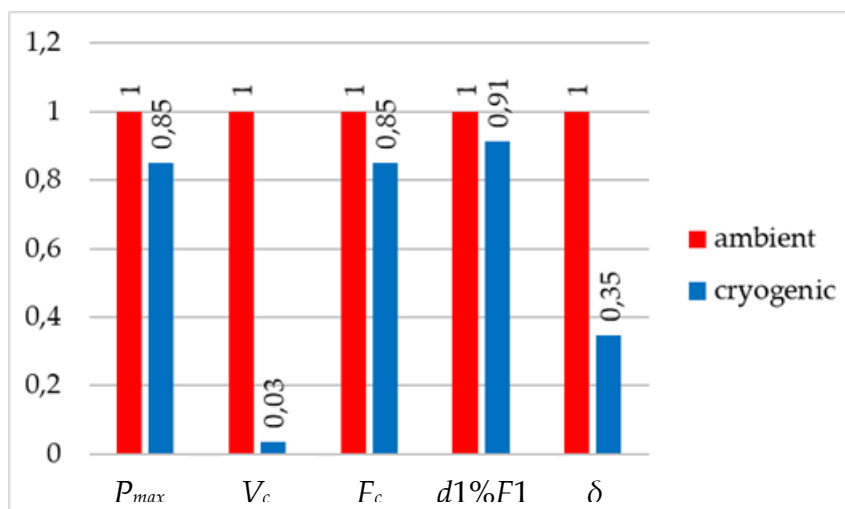


Rys. 6. Porównanie przebiegów siła-COD dla stopu Ti6Al4V w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych [opracowanie własne]

Fig. 6. Comparison of force-COD curves for the Ti6Al4V alloy in ambient and cryogenic conditions [own study]

4. Analiza wyników badań

Na rysunku 7 przedstawiono porównanie uśrednionych wartości charakterystyk mechanicznych uzyskanych podczas badania CTOD dla stopu tytanu Ti6Al4V w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych. Wybrane wartości parametrów zostały znormalizowane do 1. Na poniższej ilustracji wielkość P_{max} stanowi jedynie uzupełnienie wyników badań z uwagi na jej zależność od wstępnej długości pęknięcia zmęczeniowego.



Rys. 7. Porównanie wybranych wielkości charakteryzujących odporność na pękanie wyrażoną przez CTOD wyznaczonych dla stopu Ti6Al4V w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych [opracowanie własne]

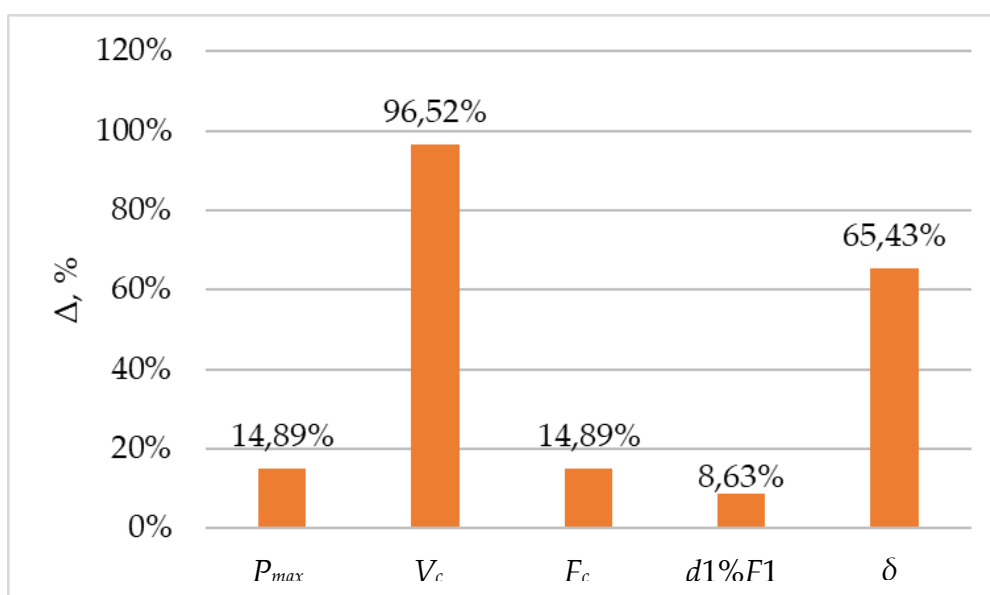
Fig. 7. Comparison of selected values characterizing the fracture toughness expressed by CTOD determined for the Ti6Al4V alloy in ambient and cryogenic conditions [own study]

Na rysunku 8 przedstawiono procentowy wpływ warunków kriogenicznych na własności materiałowe. Wartości wskazane na rysunku 8 obliczono według poniższego wzoru:

$$\Delta_{\%} = \frac{X_A - X_C}{X_A} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

- X_A – wartości parametrów dla stopu Ti6Al4V w warunkach otoczenia,
- X_C – wartości parametrów dla stopu Ti6Al4V w warunkach kriogenicznych.



Rys. 8. Wpływ warunków kriogenicznych na wybrane wielkości charakteryzujące odporność na pękanie stopu Ti6Al4V [opracowanie własne]

Fig. 8. The percentage effect of cryogenic conditions on the selected properties of the alloy Ti6Al4V [own study]

W konsekwencji przeprowadzonej analizy wyników badań stwierdzono, że warunki kriogeniczne wpłynęły na badane wielkości mechaniczne charakteryzujące odporność stopu Ti6Al4V na pękanie. Największą różnicę w badanych cechach wyznaczono dla plastycznej części rozwarcia pęknięcia V_p , która w warunkach otoczenia była niemal dwukrotnie większa. W przypadku gdy połączy się to z ponad 65% większą wartością krytycznego rozwarcia pęknięcia δ , można stwierdzić, że warunki kriogeniczne spowodowały spadek odporności na pękanie dla materiału Ti6Al4V i tym samym – wzrost jego kruchości. Pozostałe wyznaczone wielkości mechaniczne również zmieniły się w warunkach kriogenicznych, lecz w porównaniu z wyżej opisanymi parametrami zmiana ta była stosunkowo niska. Wartość siły dla której zarejestrowano początek kruchego pęknięcia w warunkach otoczenia, była niespełna 15% wyższa niż w warunkach kriogenicznych. O wspomnianej wcześniej kruchości może świadczyć również spadek wartości siły przy stałym przemieszczeniu, bowiem wartość średnia tej cechy w warunkach otoczenia była wyższa od tej samej wielkości wyznaczonej dla warunków kriogenicznych o około 10%.

5. Wnioski końcowe

- Warunki kriogeniczne powodują spadek odporności na pękanie stopu Ti6Al4V w odniesieniu do warunków otoczenia.
- Spadek odporności na pękanie jest jednakowo odnosi się do wszystkich wyznaczonych wielkości (wraz z P_{max}), jednak największą różnicę zaobserwowano w części plastycznej rozwarcia pęknięcia COD.
- W dalszych badaniach sugeruje się wyznaczenie tych samych wielkości charakteryzujących odporność na pękanie tytanu grade 5, ale dla podwyższonych temperatur.
- Propozycją do dalszych badań prowadzonych w tym zakresie jest wyznaczenie odporności na pękanie dla Ti6Al4V w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych za pomocą innych miar, takich jak K_{IC} oraz G_{IC} .
- Na podstawie przeprowadzonego badania oraz uzyskanych wyników można stwierdzić, że krytyczna wartość rozwarcia pęknięcia stopu Ti6Al4V w warunkach kriogenicznych jest o 65,43% niższa niż w warunkach otoczenia.

Bibliografia

- [1] Bazarnik, P., *et al.*, "Mechanical and microstructural characteristics of Ti6Al4V/AA2519 and Ti6Al4V/AA1050/AA2519 laminates manufactured by explosive welding", *Mater. Des.* 111, (2016), 146–157, doi: 10.1016/j.matdes.2016.08.088.
- [2] Boroński, D., Dzioba, I., Kotyk, M., Krampikowska, A., Pala, R., "Investigation of the fracture process of explosively welded AA2519-AA1050-Ti6Al4V layered material", *Materials (Basel)*. 13(10), (2020), 2226, doi: 10.3390/ma13102226.
- [3] Boroński, D., Kotyk, M., Maćkowiak, P., "Fracture Toughness of Explosively Welded Al/Ti Layered Material in Cryogenic Conditions", *Procedia Struct. Integr.* 2, (2016), 3764–3771, doi: 10.1016/j.prostr.2016.06.468.
- [4] Boroński, D., Kotyk, M., Maćkowiak, P., "Crack initiation and growth analysis in explosively welded AA2519-AA1050-Ti6Al4V layered material in ambient and cryogenic conditions", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 232(8), (2018), 1470–1480, doi: 10.1177/0954406217741516.
- [5] Boroński, D., Kotyk, M., Maćkowiak, P., Śniezek, L., "Mechanical properties of explosively welded AA2519-AA1050-Ti6Al4V layered material at ambient and cryogenic conditions", *Mater. Des.* 133, (2017), 390–403, doi: 10.1016/j.matdes.2017.08.008.
- [6] Boyce, B.L., Ritchie, R.O., "Effect of load ratio and maximum stress intensity on the fatigue threshold in Ti-6Al-4V", *Eng. Fract. Mech.* 68(2), (2001), 129–147, doi: 10.1016/S0013-7944(00)00099-0.
- [7] Brunette, P., Tengvall, D.M., Textor, P., Thomsen, M., "Titanium in Medicine, Material Science, Surface Science, Engineering, Biological Responses and Medical Applications", Springer, Heidelberg – Berlin 2000.
- [8] "BS 7448-4:1997 – Fracture mechanics toughness tests. Method for determination of fracture resistance curves and initiation values for stable crack extension in metallic materials".
- [9] Dobrzański, L.A., „Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe. Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.

- [10] Garbacz, H., Ossowski, M., Wiciński, P., Wierzchoń, T., Kurzudłowski, K.J., „Mikrostruktura i właściwości warstw międzymetalicznych na stopie Ti-6Al-4V”, *Probl. Eksploat.* 1, (2007), 45–56.
- [11] Han, K., Shuai, J., Deng, X., Kong, L., Zhao, X., Sutton, M., “The effect of constraint on CTOD fracture toughness of API X65 steel”, *Eng. Fract. Mech.* 124–125, (2014), 167–181, doi: 10.1016/j.engfracmech.2014.04.014.
- [12] Hollander, D.A., *et al.*, “Structural, mechanical and in vitro characterization of individually structured Ti-6Al-4V produced by direct laser forming”, *Biomaterials* 27(7), (2006), 955–963, doi: 10.1016/j.biomaterials.2005.07.041.
- [13] Horiya, T., Kishi, T., “Relationship between fracture toughness and crack extension resistance curves (R curves) for Ti-6Al-4V alloys”, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 29 A(3), (1998), 781–789, doi: 10.1007/s11661-998-0269-9.
- [14] Inagaki, I., Takechi, T., Shirai, Y., Ariyasu, N., “Application and features of titanium for the aerospace industry”, *Nippon Steel Sumitomo Met. Tech.* 106(106), (2014), 22–27, <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nssmc/pdf/106-05.pdf> (dostęp: 17.07.2017).
- [15] Jedynak, B., Mierzwińska-Nastalska, E., „Tytan – właściwości i zastosowanie w protetyce stomatologicznej”, *Dental Forum* 41(1), (2013), 75–78.
- [16] Karolewska, K., Ligaj, B., “Comparison analysis of titanium alloy Ti6Al4V produced by metallurgical and 3D printing method”, *AIP Conference Proceedings*, 2077, 2019, doi: 10.1063/1.5091886.
- [17] Kerr, W.R., “The effect of hydrogen as a temporary alloying element on the microstructure and tensile properties of Ti-6Al-4V”, *Metall. Trans. A* 16(6), (1985), 1077–1087, doi: 10.1007/BF02811677.
- [18] Kłysz, S., „Podstawy mechaniki pękania i wytrzymałości zmęczeniowej materiałów”, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa 2015.
- [19] Koike, M., Cai, Z., Fujii, H., Brezner, M., Okabe, T., “Corrosion behavior of cast titanium with reduced surface reaction layer made by a face-coating method”, *Biomaterials* 24(25), (2003), 4541–4549, doi: 10.1016/S0142-9612(03)00063-2.
- [20] Kotyk, M., „Analiza odporności na pękanie materiałów warstwowych”, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich, Bydgoszcz 2020.
- [21] Kotyk, M., “Analytic model of maximal experimental value of stress intensity factor K_q for AA2519–AA1050–Ti6Al4V layered material”, *Materials (Basel)*. 13(19), (2020), 1–17, doi: 10.3390/ma13194439.
- [22] Kotyk, M., Boroński, D., Maćkowiak, P., “The influence of cryogenic conditions on the process of AA2519 aluminum alloy cracking”, *Materials (Basel)*. 13(7), (2020), doi: 10.3390/ma13071555.
- [23] Kowalewski, Z.L., Szymczak, T., Kraskowski, J., Chojnacki, A., „Mechanika pękania na tropach awarii konstrukcji i defektów materiałowych”, XXIII Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, 2017, 39–74.
- [24] Nalla, R.K., Altenberger, I., Noster, U., Liu, G.Y., Scholtes, B., Ritchie, R.O., “On the influence of mechanical surface treatments-deep rolling and laser shock peening-on the fatigue behavior of Ti-6Al-4V at ambient and elevated temperatures”, *Mater. Sci. Eng. A* 355(1–2), (2003), 216–230, doi: 10.1016/S0921-5093(03)00069-8.

- [25] Niinomi, M., "Mechanical properties of biomedical titanium alloys", *Mater. Sci. Eng. A* 243(1–2), (1998), 231–236, doi: 10.1016/s0921-5093(97)00806-x.
- [26] Ochonogor, O.F., Akinlabi, E.T., Nyembwe, D., "A review on the effect of creep and microstructural change under elevated temperature of Ti6Al4V alloy for Turbine engine Application", *Mater. Today Proc.* 4(2), (2017), 250–256, doi: 10.1016/j.matpr.2017.01.019.
- [27] Rozumek, D., „Mieszane sposoby pęknięcia zmęczeniowego materiałów konstrukcyjnych”, Politechnika Opolska, Opole 2009.
- [28] Szachogluchowicz, I., Śniezek, L., Hutsaylyuk, V., "Low Cycle Fatigue Properties Laminate AA2519-Ti6Al4V", *Procedia Eng.* 114, (2015), 26–33, doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.022.
- [29] Szachogluchowicz, I., Śniezek, L., Torzewski, J., Grzelak, K., "Fatigue cracking of AA2519-Ti6Al4V laminate bonded by explosion welding", *Solid State Phenom.* 250, (2016), 182–190, doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.250.182.
- [30] Tagawa, T., *et al.*, "Difference between ASTM E1290 and BS 7448 CTOD estimation procedures", *Weld. World* 54(7–8), (2010), R182–R188, doi: 10.1007/BF03263504.
- [31] Vardiman, R.G., Kant, R.A., "The improvement of fatigue life in Ti-6Al-4V by ion implantation", *J. Appl. Phys.* 53(1), (1982), 690–694, doi: 10.1063/1.329977.
- [32] Wang, P., Hu, M., Dang, E., "Study on CTOD fracture toughness of welded joint of X80 marine drilling riser", *Adv. Mater. Res.* 228–229, (2011), 1163–1168, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.228-229.1163.
- [33] Zhang, W., Wang, M., Chen, W., Feng, Y., Yu, Y., "Preparation of TiBw/Ti-6Al-4V composite with an inhomogeneous reinforced structure by a canned hot extrusion process", *J. Alloys Compd.* 669, (2016), 79–90, doi: 10.1016/j.jallcom.2016.01.228.
- [34] Zhao, H., Liu, Q., Xie, Y., "The microstructure and texture analysis of Ti-6Al-4V alloy through linear friction welding", *International Conference on Materials, Environmental and Biological Engineering*, 2015, doi: 10.2991/mebe-15.2015.73.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Wpływ warunków kriogenicznych na krytyczne rozwarcia wierzchołka szczeliny stopu aluminium AA2519

Maciej Kotyk¹, Wojciech Ziółkowski^{2*}, Radosław Stachowiak³, Piotr Swacha⁴

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: maciej.koty@utp.edu.pl

² Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: wojzio002@utp.edu.pl

³ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: radsta005@utp.edu.pl

⁴ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: pioswa002@utp.edu.pl

* Autor korespondencyjny; e-mail: wojzio002@utp.edu.pl

Streszczenie: Zasadniczy cel badania to wyznaczenie wartości *CTOD* dla aluminium AA2519 w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych. Było to potrzebne, aby określić wpływ wspomnianych warunków temperaturowych na badany stop. Badanie pozwalające na podjęcie próby wyznaczenia wartości *CTOD* analizowanego stopu przeprowadzono w kilku etapach. Pierwszym etapem było przygotowanie próbek CT. Następnie przystąpiono do generowania pęknięcia zmęczeniowego. Ostatecznie każdą z próbek obciążano monotonicznie narastającym obciążeniem aż do utworzenia się zawiasu plastycznego lub całkowitego odseparowania poszczególnych części próbek. W pracy zaprezentowano podstawę teoretyczną oraz przyjętą metodykę badawczą. Przedstawiono uzyskane wyniki badań oraz dokonano analizy wybranych parametrów materiałowych. Dzięki przeprowadzonej analizie zaobserwowano wpływ warunków kriogenicznych na wartość parametru *CTOD*. Udało się ponadto zebrać wyniki umożliwiające w przyszłości analizę materiału Al-Ti, którego jednym z materiałów bazowych jest badany stop aluminium.

Słowa kluczowe: *CTOD*, *RWP*, wpływ warunków otoczenia, mechanika pękania, pękanie zmęczeniowe, aluminium

Influence of cryogenic conditions on the crack tip opening displacement of AA2519 aluminum alloy

Maciej Kotyk¹, Wojciech Ziółkowski^{2*}, Radosław Stachowiak³, Piotr Swacha⁴

¹ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: maciej.koty@utp.edu.pl

² UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: wojzio002@utp.edu.pl

³ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: radsta005@utp.edu.pl

⁴ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: pioswa002@utp.edu.pl

* Correspondent author; e-mail: wojzio002@utp.edu.pl

Summary: Basically, the aim of the study was to determine the value *CTOD* of AA2519 aluminum alloy under ambient and cryogenic conditions. The research of *CTOD* was carried out in several stages. The first step was to prepare the CT sample. Then, the generation of the fatigue crack was started. Finally, the sample was loaded to separate individual parts. The work presents practical research methods. The obtained test results were presented and the material parameters were analyzed. By carrying out an research in cryogenic conditions on the value of the *CTOD* parameter it will be possible to collect results for Al-Ti composite material, the starting material of which is an aluminum alloy being tested.

Key words: *CTOD*, *RWP*, influence of environmental conditions, fracture mechanics, fatigue cracking, aluminum

1. Wstęp

Z powodu nieustannego postępu technologicznego konstruktorzy są zmuszeni do projektowania maszyn i urządzeń o coraz większej niezawodności oraz o coraz dłuższym czasie eksploatacji. Dąży się jednocześnie do tego, aby masa tych urządzeń była jak najmniejsza. Takie wyzwanie konstrukcyjne jest możliwe do zrealizowania m.in. dzięki dostatecznej wiedzy na temat właściwości fizykochemicznych i mechanicznych stosowanych materiałów konstrukcyjnych. Generuje to potrzebę przeprowadzania szczegółowych badań laboratoryjnych w celu dokładnego poznania wyżej opisanych właściwości.

Podstawowymi badaniami materiałów są badania statyczne, m.in. próba rozciągania i ściskania, statyczne i dynamiczne badania twardości, badania udarności i próby zmęczeniowe. Elementy urządzeń podczas eksploatacji pracują najczęściej w warunkach zmiennego obciążenia, co powoduje, że częstą przyczyną uszkodzenia jest inicjacja, a następnie – propagacja pęknięcia zmęczeniowego. Wspomniane warunki pracy elementu są uzasadnieniem podjęcia badań propagacji pęknięcia.

Analiza propagacji pęknięcia przeprowadzana jest dla różnych materiałów, a jej wyniki przyczyniają się do wyznaczenia wartości, które pozwalają opisać stany graniczne dla konkretnych zjawisk zmęczeniowych. Wśród kryteriów, które pozwalają określić stany graniczne, wyróżnia się kryteria: naprężeniowe, energetyczne, lokalne i przemieszczeniowe.

Kryteria przemieszczeniowe bazują na wartości rozwarcia wierzchołka pęknięcia RWP (z ang. *CTOD*) [9]. Stosuje się je dla materiałów sprężysto-plastycznych i plastycznych. Parametr *CTOD* można powiązać z promieniem strefy odkształcenia plastycznego i długością pęknięcia. Parametr ten wykorzystuje się do analizy rzeczywistego obiektu poddanego eksploatacji.

Opisując kryteria stanów granicznych w mechanice pęknięcia, stosuje się co najmniej kilka wielkości. Należą do nich *CTOD*, *K_{IC}*, *J_{IC}*, *G_{IC}* i inne. Materiałami o interesujących – w kontekście omówionych we wstępie – charakterystykach mechanicznych i fizycznych są coraz częściej używane w odpowiedzialnych konstrukcjach, stopy aluminium. Jedną z grup tych stopów to durale, czyli stopy AA 2XXX, które są chętnie stosowane w konstrukcjach statków powietrznych czy też w pojazdach bojowych.

Badania aluminium AA2519 przedstawione w tej publikacji są wstępem do dalszych badań nad materiałem kompozytowym AA2519-AA1050-Ti6Al4V [4]. Mają na celu porównanie własności materiałów bazowych i nowo powstałego kompozytu. Ze względu na charakter porównawczy dalszych badań zasadne jest wykorzystanie wartości parametru *CTOD*, która w odpowiedniej interpretacji pozwala porównać ze sobą materiały o znacznie różniących się własnościach mechanicznych, jak w przypadku wspomnianego wcześniej materiału warstwowego Al-Ti. Takie wielkości, jak *K_{IC}* i *J_{IC}*, niekiedy takiej możliwości nie dają.

Badania z wykorzystaniem metody *CTOD* były już przeprowadzane i zostały opisane w literaturze [6, 8, 18]. Przebieg badań zrealizowano w oparciu o wytyczne

zawarte w normie brytyjskiej BS 7448-1 [5]. Przedstawione badania wskazują, że norma BS 7448 jest wciąż wykorzystywana podczas badań *CTOD*, równolegle z normą ASTM E1290 [17].

2. Metodyka badań

2.1. Obiekt badań

Obiektem badań był trudno spawalny stop aluminium AA2519 po obróbce cieplnej. Wspomniane ujednolicanie cieplne było typowe dla stopów duraluminium i polegało na wygrzewaniu arkusza blachy przez dwie godziny w temperaturze 530°C oraz przyspieszonym starzeniu w temperaturze 165°C przez 10 h. Obróbka cieplna miała na celu przesylenie aluminium cząsteczkami miedzi i tym samym – wytworzenie fazy θ . Dane o ilości wspomnianej miedzi zawartej w omawianym materiale oraz o pozostałych pierwiastkach wchodzących w skład chemiczny AA2519 zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny badanego materiały AA2519 [12]

Table 1. Chemical composition of the aluminum alloy AA2519 [12]

Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Ti	V	Zr
0,06	0,08	5,77	0,18	0,01	0,04	0,12	0,2

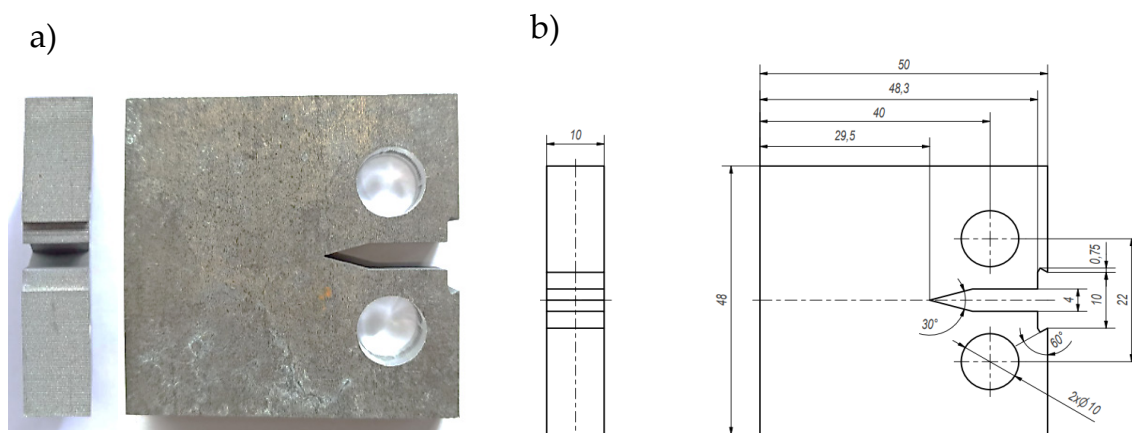
Materiał AA2519 nie jest szeroko opisywany w literaturze. Znane są jego wybrane własności technologiczne, użytkowe oraz zastosowanie [7]. W cytowanej literaturze można odnaleźć informacje o tym, że badany stop jest trudno spawalny, a w rozwiązaniach konstrukcyjnych stosuje się go do budowy pancerzy amfibii wojskowych. Przyczyniają się do tego niewielka (w odniesieniu do stali) gęstość blachy wykonanej z tego materiału, odporność korozyjna i balistyczna.

Podczas analizy literatury dotyczącej omawianego stopu napotkano publikacje, w których zaprezentowano informacje odnośnie charakterystyk mechanicznych materiału 2519 [15, 19], w tym także odporności na pękanie dla tego materiału [2, 3, 10, 12–14, 16]. Z przedstawionych pozycji literaturowych wynika, że wzrost zainteresowania opisywanym materiałem jest najprawdopodobniej spowodowany opracowaniem technologii wykonywania materiału warstwowego AA2519-AA1050-Ti6Al4V z wykorzystaniem technologii wysokoenergetycznych, takich jak zgrzewanie wybuchowe. Jednak w żadnej z prac odnalezionych w ogólnodostępnych źródłach literaturowych nie znaleziono informacji dotyczącej krytycznej wartości rozwarcia pęknięcia *CTOD*. W związku z tym postanowiono wyznaczyć tę wielkość charakteryzującą odporność materiału na pękanie.

2.2. Procedura badawcza

Do badań realizowanych w celu wyznaczenia krytycznej wartości rozwarcia pęknięcia wykorzystano próbki zwarte typu CT. Były one w całości wykonane z badanego materiału. Ich geometria została opracowana zgodnie z przytaczaną

wcześniej normą brytyjską. Widok próbki oraz jej główne wymiary geometryczne zaprezentowano na rysunku 1.



Rys. 1. Próbką zwarta (CT) wykorzystana podczas badań: a) widok próbki,
b) wybrane wymiary próbki [opracowanie własne]

Fig. 1. Compact tension specimen (CT) used in the tests: (a) specimen view,
(b) selected specimen dimensions [own study]

Ze względu na specyficzne wymagania dotyczące karbu mechanicznego, próbka poza otworami została wykonana z wykorzystaniem metod elektroerozyjnych. Pozwoliło to, na uzyskanie zaokrąglenia na dnie karbu mechanicznego o wartości około 0,32 mm. Należy zaznaczyć, że wszystkie próbki były wycinane z jednego arkusza blachy, na jednym zamocowaniu i w taki sposób, aby kierunek walcowania blachy był równoległy do płaszczyzny pęknięcia.

Wszelkie wymuszenia mechaniczne podczas badań były generowane przez maszynę wytrzymałościową typu Instron z hydraulicznym układem zasilania. Zdecydowano się na zastosowanie właśnie takiej maszyny ze względu na cykliczny charakter pierwszego etapu eksperymentu. Polegał on bowiem na wygenerowaniu pęknięcia zmęczeniowego (ang. *precrack*) w celu uzyskania możliwie ostrego karbu w materiale. Dodatkową korzyścią płynącą z wykonania wstępnego pęknięcia zmęczeniowego jest oddalenie czoła pęknięcia od powierzchni zewnętrznej karbu mechanicznego, którego własności powierzchniowe zostały zmienione przez obróbkę elektroiskrową.

Pierwszy etap, tj. generowanie pęknięcia, odbywał się wyłącznie w temperaturze otoczenia. Było to konieczne, bowiem przyrost pęknięcia zmęczeniowego był kontrolowany za pomocą metod optomechanicznych, bazujących na cyfrowej korelacji obrazu. Wspomniane metody byłyby nieskuteczne w temperaturze kriogenicznej, a zarejestrowanie obrazu próbki w kąpieli z wrzącego azotu było niemal niemożliwe. Metodę pomiaru przyrostu pęknięcia zmęczeniowego oraz sposób interpretacji rejestrowanego obrazu opisano w pracach [1–3, 11–13]. Należy zaznaczyć, że oprogramowanie było skonfigurowane w taki sposób, aby po osiągnięciu zadanej długości pęknięcia zmęczeniowego następowało zatrzymanie pracy maszyny przy jednoczesnym odciążeniu próbki. Aby zabezpieczyć próbkę przed nadmiernym rozwarciem, w jej zamku umieszczano ekstensometr COD, a na

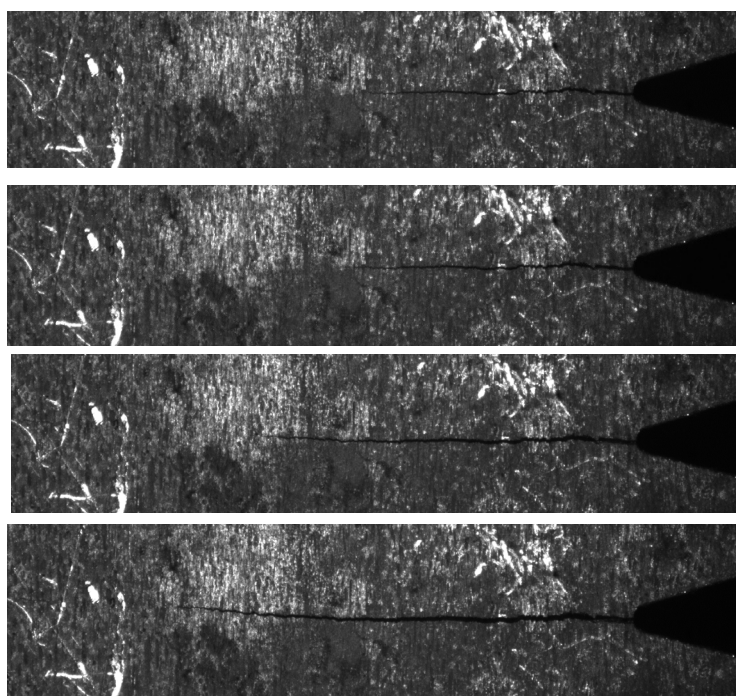
panelu maszyny wytrzymałościowej wprowadzano stosowne limity, określone drogą empiryczną.

Wielkości charakteryzujące sposób obciążania próbki podczas generowania pęknięcia zmęczeniowego zaprezentowano w tabeli 2, natomiast wybrane obrazy przedstawiające przyrost pęknięcia zmęczeniowego zarejestrowane podczas badania – rysunku 2.

Tabela 2. Wybrane cechy charakteryzujące sposób obciążania próbki podczas generowania pęknięcia zmęczeniowego [opracowanie własne]

Table 2. Selected characteristics that characterize how the specimen is loaded when generating a fatigue crack [own study]

material	częstotliwość Hz	obciążenie kN
AA2519	5	4,7

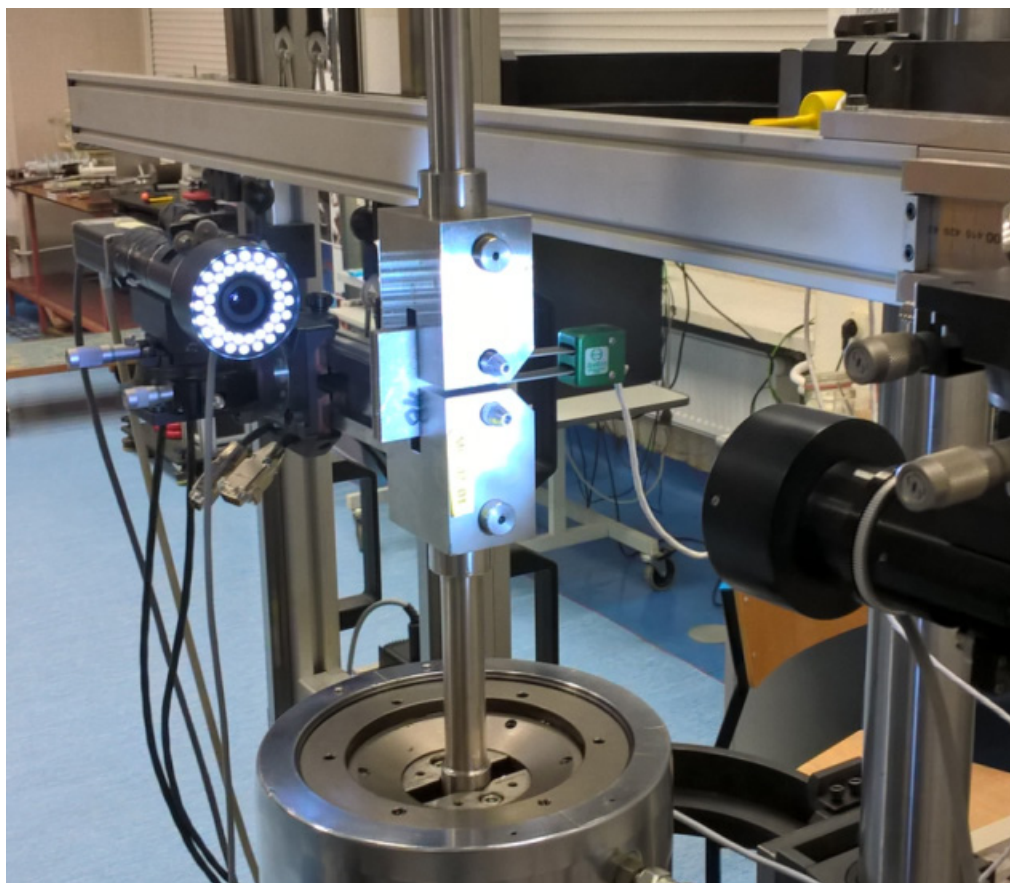


Rys. 2. Wybrane fazy wzrostu pęknięcia zmęczeniowego zarejestrowane podczas generowania pęknięcia zmęczeniowego w próbce CT z materiału AA2519 [opracowanie własne]

Fig. 2. Selected fatigue crack growth phases recorded during fatigue crack generation in CT specimen made of AA2519 [own study]

Trudno jednoznacznie określić liczbę cykli potrzebną do wygenerowania pęknięcia zmęczeniowego o właściwej dla dalszej części badań długości, jednak mieści się ona w przedziale od 10000 do 30000 cykli odzerowo tętniących.

Próbkę zamocowaną w maszynie wytrzymałościowej podczas generowania pęknięcia zmęczeniowego zaprezentowano na rysunku 3.

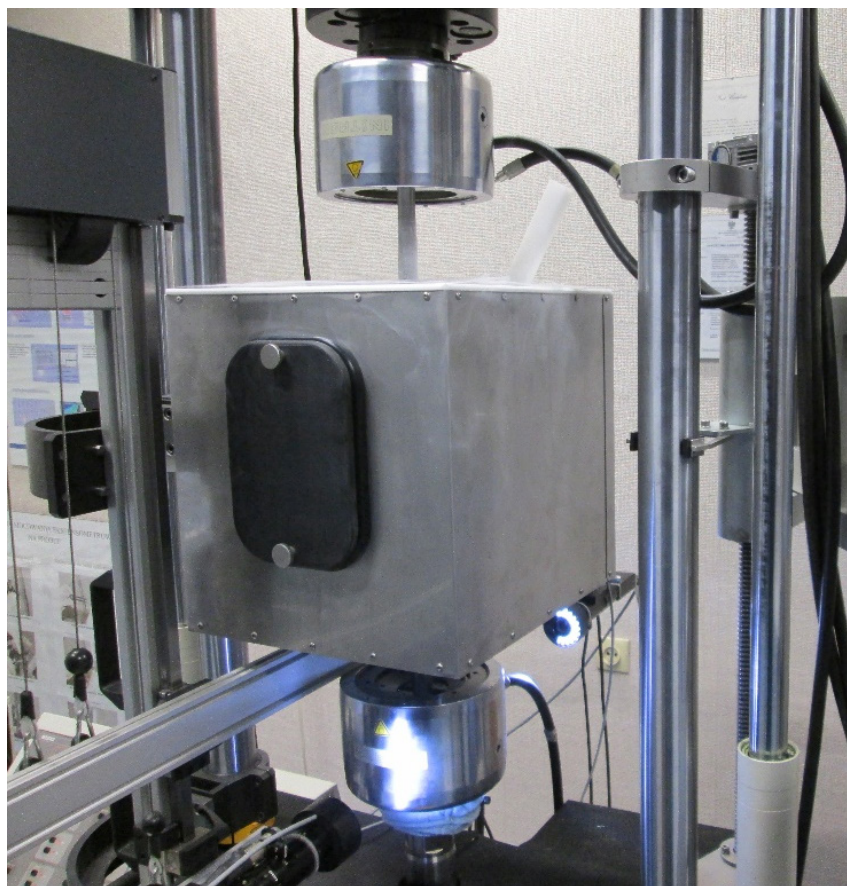


Rys. 3. Próbkę zamocowaną na maszynie wytrzymałościowej podczas generowania pęknięcia zmęczeniowego [opracowanie własne]

Fig. 3. Specimen mounted on a testing machine during fatigue crack generation [own study]

Drugi etap eksperymentu, który stanowił jego zasadniczą część, odbywał się w zależności od potrzeb w dwóch różnych warunkach temperaturowych, tj. w temperaturze otoczenia i w temperaturze kriogenicznej. Sposób obciążania próbki był taki sam niezależnie od warunków temperaturowych badania. Próbkę poprzez trzpienie i sworznie obciążano monotonicznie narastającym obciążeniem aż do utworzenia się zawiasu plastycznego lub całkowitego odseparowania poszczególnych części próbek, bowiem te pękały symetrycznie. Sterowanie maszyną realizowano poprzez kanał przemieszczenia, a prędkość przesuwu tłoka wynosiła $0,05 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Poza sygnałem sterującym rejestrowano również dane z kanału siły oraz odkształcenia (w rozpatrywanym przypadku *COD*).

Badania w warunkach kriogenicznych zasadniczo odbywały się w taki sam sposób. Różnica polegała na zastosowaniu komory środowiskowej. W jej wnętrzu umieszczano próbkę, która w trakcie trwania eksperymentu zanurzona była w ciekłym azocie. Widok komory środowiskowej z zamocowaną w jej wnętrzu próbką zaprezentowano na rysunku 4.



Rys. 4. Stanowisko badawcze z zamocowaną komorą środowiskową [opracowanie własne]

Fig. 4. Test stand with environmental chamber mounted [own study]

Szczególny nacisk podczas badania nałożono na zapewnienie odpowiedniej ilości ciekłego azotu podczas badania, bowiem ten gwałtownie odparowywał. Nie rozpoczynano również badań do momentu, aż ustabilizowała się temperatura we wnętrzu komory.

3. Wyniki

Zasadniczy cel badania to wyznaczenie wartości *CTOD* dla aluminium AA2519 w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych. Było to konieczne, aby określić wpływ wspomnianych warunków temperaturowych na badaną charakterystykę. Kolejny etap badań to porównanie tej samej cechy materiałowej, wyznaczonej dla materiału warstwowego Al-Ti, w skład którego wchodzi stop AA2519. Opisywane porównanie będzie jednak przedmiotem kolejnej publikacji.

Wyniki uzyskane podczas przeprowadzania badań poddano analizie zgodnie z zależnościami matematycznymi opisanymi w normie BS 7448. Ostatecznie wartość δ , którą można utożsamić z *CTOD*, wyznaczono z zależności:

$$\delta = \left[\frac{F}{B \cdot W^{0.5}} \times f\left(\frac{a_0}{W}\right) \right]^2 \cdot \frac{1 - \nu^2}{2 \cdot R_{p0.2} \cdot E} + \frac{0,46 \cdot (W - a_0) \cdot V_p}{0,46 \cdot W + 0,54 \cdot a_n + (C - W) + z} \quad (1)$$

gdzie:

- δ – CTOD,
- C, B, W – wymiary charakterystyczne próbki CT,
- ν – liczba Poissona,
- $R_{p0.2}$ – umowna granica plastyczności,
- E – moduł Younga,
- a_0 – długość szczeliny początkowej,
- V_p – wartość rozwarcia pęknięcia przy odkształceniu plastycznym,
- F – siła,
- z – odległość pomiędzy punktem zamocowania ekstensometru a powierzchnią próbki prostopadłą do płaszczyzny pęknięcia od strony karbu.

Wybrane wyniki uzyskane podczas badań oraz obliczeń zestawiono zbiorczo w tabeli 3. Przedstawione parametry to:

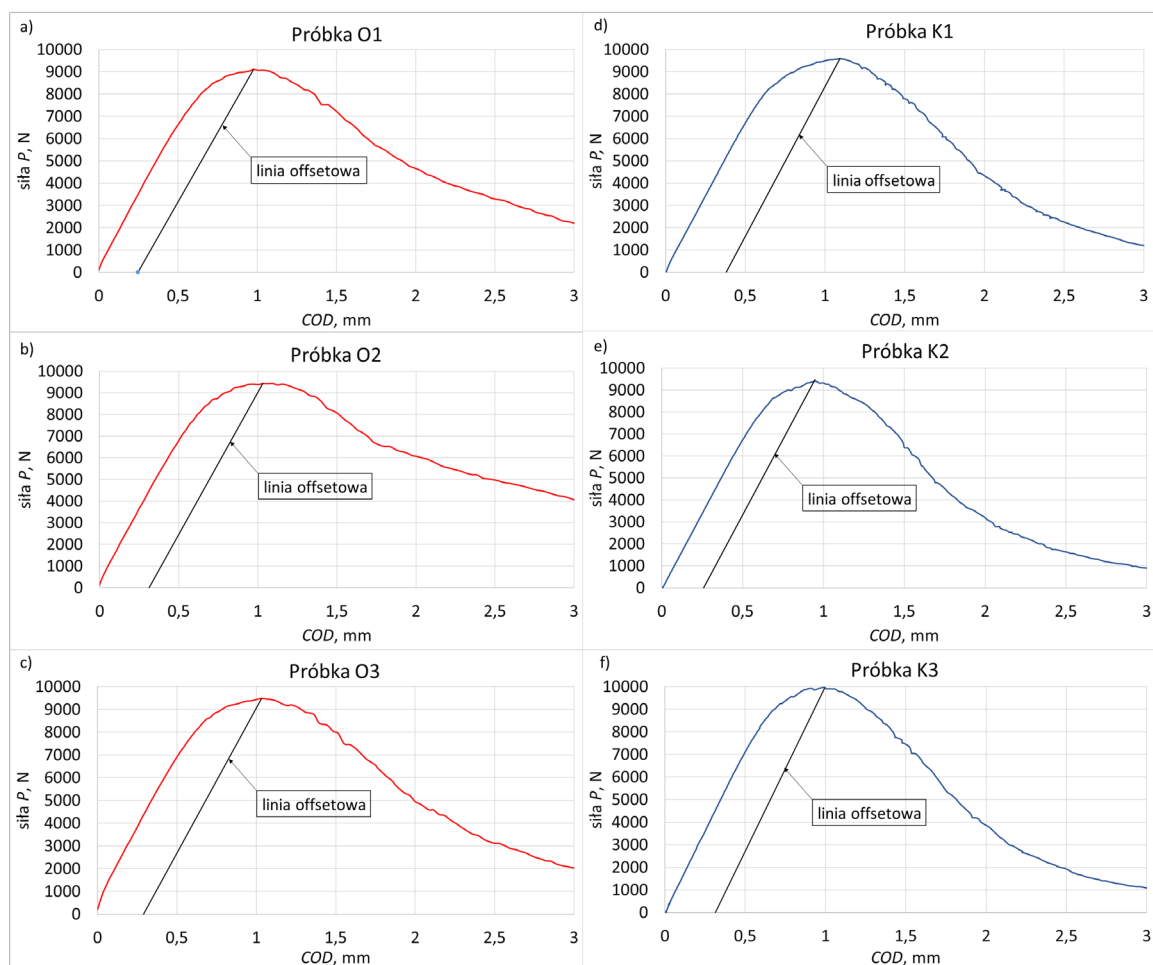
- P_{MAX} – siła maksymalna,
- V_p – wartość rozwarcia pęknięcia przy odkształceniu plastycznym,
- F_c – siła przyłożona na początku rozszerzania się kruchego pęknięcia,
- $d1\%F1$ – procentowy spadek siły przy stałym przemieszczeniu,
- δ – CTOD.

Tabela 3. Wybrane wartości parametrów [opracowanie własne]

Table 3. Selected parameter values [own study]

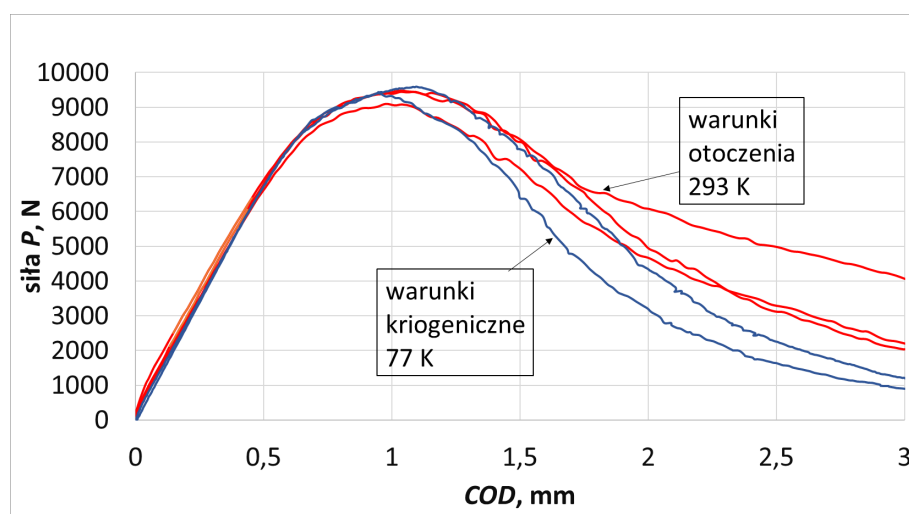
Lp. temp.	P_{MAX}, N		V_p, mm		F_c, N		$d1\%F1, \%$		δ, mm	
	293 K	77 K	293 K	77 K	293 K	77 K	293 K	77 K	293 K	77 K
1	9102	9599	0,246	0,715	9102	9598	4,99	2,25	0,449	0,379
2	9441	9405	0,311	0,258	9440	9479	3,95	4,70	0,496	0,258
3	9482	9956	0,288	0,314	9481	9955	4,16	2,52	0,288	0,400
Średnia	9342	9653	0,282	0,429	9341	9677	4,37	3,16	0,411	0,346
Odch. Standard.	209	279	0,033	0,249	208	248	0,55	1,34	0,109	0,077

Przebiegi siła – rozwarcie pęknięcia (COD) uzyskane podczas badań laboratoryjnych przedstawiono w postaci graficznej dla każdej z próbek na rysunku 5. Porównanie przebiegów dla wszystkich badanych próbek w obu warunkach temperaturowych zaprezentowano na rysunku 6.



Rys. 5. Poszczególne przebiegi siła – COD wyznaczone dla stopu AA2519 dla warunków otoczenia (a, b, c) i dla warunków kriogenicznych (d, e, f) [opracowanie własne]

Fig. 5. Individual waveform force – COD determined for alloy AA2519 for ambient conditions (a, b, c) and cryogenic conditions (d, e, f) [own study]

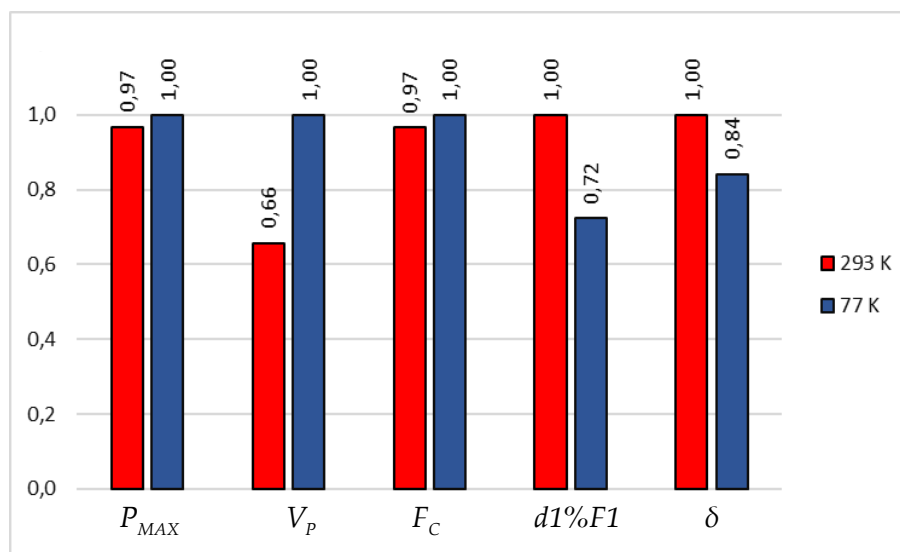


Rys. 6. Porównanie przebiegów siła – COD wyznaczone dla stopu AA2519 dla warunków otoczenia i dla warunków kriogenicznych [opracowanie własne]

Fig. 6. Strength Waveform Comparison – COD determined for alloy AA2519 under ambient and cryogenic conditions [own study]

4. Analiza wyników badań

Wartości średnie wybranych parametrów zestawiono w postaci graficznej w celu porównania własności materiałowych uzyskanych w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych. Porównanie uśrednionych wartości wybranych parametrów uzyskanych podczas wyznaczania $CTOD$ dla stopu AA2519 w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych normalizowane do 1 przedstawiono na rysunku 7. Należy jednak zaznaczyć, że wielkość P_{max} silnie zależy od długości wstępnego pęknięcia zmęczeniowego i w przedstawionym zestawieniu ma ona wyłącznie charakter uzupełniający.



Rys. 7. Znormalizowane do 1 porównanie wybranych wielkości, charakteryzujących odporność na pękanie wyrażoną poprzez $CTOD$, wyznaczonych dla stopu AA2519 w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych [opracowanie własne]

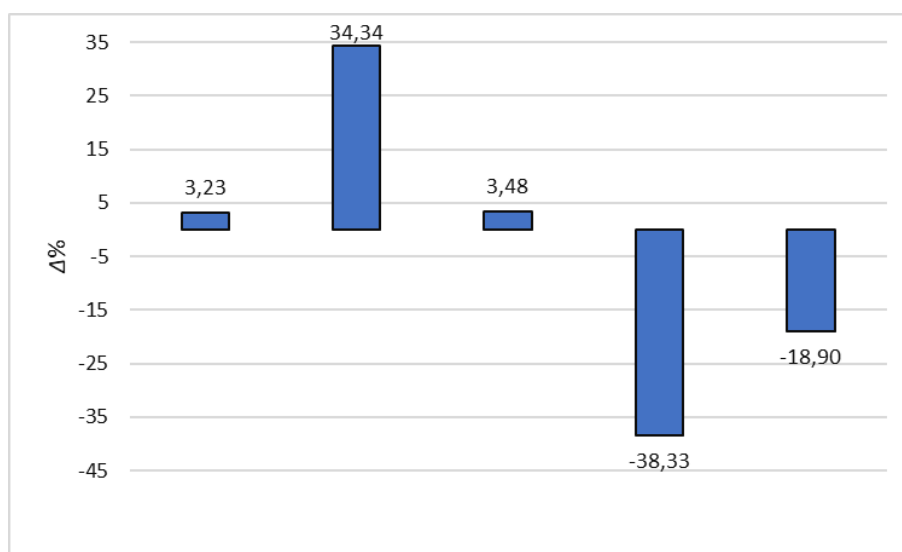
Fig. 7. Standardized to 1 comparison of selected values characterizing the fracture toughness expressed by $CTOD$, determined for the AA2519 alloy in ambient and cryogenic conditions [own study]

Obliczono także procentowy wpływ warunków kriogenicznych na własności materiałowe. Graficzne przedstawienie tych obliczeń zaprezentowano na rysunku 8. Wyniki te uzyskano na podstawie poniższego wzoru.

$$\Delta_{\%} = \frac{x_W - x_N}{x_W} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

$X - P_{MAX}, V_P, F_C, d1\%F1, \delta$



Rys. 8. Procentowy wpływ warunków kriogenicznych na wybrane własności stopu AA2519 [opracowanie własne]

Fig. 8. Percentage influence of cryogenic conditions on selected properties of AA2519 alloy [own study]

Analizując wyniki badań eksperymentalnych zaprezentowane na rysunku 8, można zauważyć, że warunki kriogeniczne wpłynęły znacząco na parametr V_P oraz $d1\%F1$ – różnica w tych wartościach między warunkami otoczenia a warunkami kriogenicznymi wynosi ponad 30%. Wartość δ – utożsamiana z $CTOD$ – również uległa zmianie pod wpływem spadku temperatury. Wartości wyznaczone dla P_{MAX} i F_c nie zareagowały drastycznie na obniżenie temperatury. Należy jednak pamiętać, że zarówno wartość maksymalnej zarejestrowanej siły jak i wartość siły, dla której zaobserwowano początek kruchego pęknięcia, silnie zależą od długości pęknięcia zmęczeniowego.

5. Wnioski końcowe

1. Badanie stopu aluminium AA2519 pozwoliło na poznanie jego własności materiałowych, co ułatwiło ich późniejsze porównanie z własnościami plateru Al-Ti.
2. Przebiegi siła – COD dla warunków otoczenia i warunków kriogenicznych są podobne do siebie. Świadczy to o ograniczonym wpływie warunków kriogenicznych na charakter przebiegu próby.
3. Wartość parametru V_P , zmierzonego w warunkach kriogenicznych, wzrosła o ponad 34% w stosunku do wartości V_P zmierzonej w warunkach otoczenia, natomiast wartość $d1\%F1$ spadła o 38%.
4. Warunki kriogeniczne zauważalnie wpływają na wartość parametru $CTOD$ dla stopu aluminium AA2519. Wartość tego parametru w temperaturze 77 K jest o 18,9% niższa niż w temperaturze 293 K. Świadczy to o niewielkim spadku odporności na pękanie.
5. Analizując wyniki badań, zauważono, iż warunki kriogeniczne nie wpływają znacząco na wartość siły P_{max} i F_c .

Bibliografia

- [1] Boroński, D., Kotyk, M., "Measurement method of crack length in compact tension type specimens made from the Al-Ti layered material", *Probl. Eksploat.* 3(3), (2016), 17–26.
- [2] Boroński, D., Kotyk, M., Maćkowiak, P., "Fracture Toughness of Explosively Welded Al/Ti Layered Material in Cryogenic Conditions", *Procedia Struct. Integr.* 2, (2016), 3764–3771, doi: 10.1016/j.prostr.2016.06.468.
- [3] Boroński, D., Kotyk, M., Maćkowiak, P., "Crack initiation and growth analysis in explosively welded AA2519-AA1050-Ti6Al4V layered material in ambient and cryogenic conditions", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 232(8), (2018), 1470–1480, doi: 10.1177/0954406217741516.
- [4] Boroński, D., Kotyk, M., Maćkowiak, P., Śnieżek, L., "Mechanical properties of explosively welded AA2519-AA1050-Ti6Al4V layered material at ambient and cryogenic conditions", *Mater. Des.* 133, (2017), 390–403, doi: 10.1016/j.matdes.2017.08.008.
- [5] "BS 7448-1:1991 – Fracture mechanics toughness tests. Method for determination of K_{Ic}, critical CTOD and critical J values of metallic materials".
- [6] Donato, G.H.B., Ruggieri, C., "Estimation procedure for J and CTOD fracture parameters using three-point bend specimens", *Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference, IPC, 3A*, 149–158, 2007, doi: 10.1115/ipc2006-10165.
- [7] Fisher, J.J., Kramer, L.S., Pickens, J.R., "Aluminum alloy 2519 in military vehicles", *Adv. Mater. Process.* 160(9), (2002), 43–46.
- [8] Han, K., Shuai, J., Deng, X., Kong, L., Zhao, X., Sutton, M., "The effect of constraint on CTOD fracture toughness of API X65 steel", *Eng. Fract. Mech.* 124–125, (2014), 167–181, doi: 10.1016/j.engfracmech.2014.04.014.
- [9] Kłysz, S., „Podstawy mechaniki pękania i wytrzymałości zmęczeniowej materiałów”, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa 2015.
- [10] Kotyk, M., „Badanie odporności na pękanie stopu aluminium AA2519 w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych”, XVI Kraj. Konf. Mech. Pękania Bydgoszcz-Fojutowo, 2017.
- [11] Kotyk, M., „Analiza odporności na pękanie materiału warstwowego Al-Ti”, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz 2018.
- [12] Kotyk, M., "Analytic model of maximal experimental value of stress intensity factor K_q for AA2519-AA1050-Ti6Al4V layered material", *Materials (Basel)*. 13(19), (2020), 1–17, doi: 10.3390/ma13194439.
- [13] Kotyk, M., Boroński, D., Maćkowiak, P., "The influence of cryogenic conditions on the process of AA2519 aluminum alloy cracking", *Materials (Basel)*. 13(7), (2020), doi: 10.3390/ma13071555.
- [14] Najwer, M., Niesłony, P., "Microhardness and strength properties of metallic joint AA2519-AA1050-Ti6Al4V after various heat treatments", *Procedia Eng.* 149, (2016), 346–351, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.677.
- [15] Płonka, B., *et al.*, "Studies of the aa2519 alloy hot rolling process and cladding with en aw-1050a alloy", *Arch. Metall. Mater.* 61(1), (2016), 381–388, doi: 10.1515/amm-2016-0070.

- [16] Szachogluchowicz, I., Śnieżek, L., Hutsaylyuk, V., "Low cycle fatigue properties of AA2519-Ti6Al4V laminate bonded by explosion welding", *Eng. Fail. Anal.* 69, (2016), 77–87, doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.01.001.
- [17] Tagawa, T., *et al.*, "Difference between ASTM E1290 and BS 7448 CTOD estimation procedures", *Weld. World* 54(7–8), (2010), R182–R188, doi: 10.1007/BF03263504.
- [18] Wang, P., Hu, M., Dang, E., "Study on CTOD fracture toughness of welded joint of X80 marine drilling riser", *Adv. Mater. Res.* 228–229, (2011), 1163–1168, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.228-229.1163.
- [19] Zuiko, I., Gazizov, M., Kaibyshev, R., "Superplasticity of an AA2519 aluminum alloy", *Mater. Sci. Forum*, 838–839, (2016), 278–284, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.838-839.278.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Analizy numeryczne procesów spawania i obróbki cieplnej z wykorzystaniem oprogramowania *SYSWELD*

Piotr Swacha¹, Maciej Kotyk^{2*}, Radosław Stachowiak³, Wojciech Ziółkowski⁴

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: pioswa002@utp.edu.pl

² Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

³ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: radsta005@utp.edu.pl

⁴ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: wojzio002@utp.edu.pl

* Autor korespondencyjny; e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

Streszczenie: Publikacja powstała w celu przedstawienia możliwości analiz numerycznych procesu spawania, a także obróbki cieplnej z wykorzystaniem oprogramowania numerycznego *SYSWELD*. W pracy opisano wybrane narzędzia wchodzące w skład pakietu oprogramowania *SYSWELD*. Przedstawiono przykłady możliwych do wykonania symulacji procesów technologicznych oraz rezultaty, które za ich pomocą można uzyskać. Określono podstawowe etapy symulacji oraz dane wejściowe jakie należy znać, aby móc ją przeprowadzić. Przedstawiono również dwa przykłady obejmujące symulację procesu spawania złącza teowego oraz procesu hartowania szczęki maszyny wytrzymałościowej. Zaprezentowano wyniki w postaci map barwnych oraz wykresów. Dokonano ponadto ich analizy. Na podstawie przeprowadzonych analiz wykazano, iż prezentowane narzędzie numeryczne może być cennym źródłem informacji o symulowanym procesie. Uzyskane dane mogą stanowić podstawy do optymalizacji poszczególnych procesów.

Słowa kluczowe: analizy numeryczne, *MES*, *SYSWELD*, spawalnictwo, obróbka cieplna

Numerical analyses of welding and heat treatment processes using *SYSWELD* software

Piotr Swacha¹, Maciej Kotyk^{2*}, Radosław Stachowiak³, Wojciech Ziółkowski⁴

¹ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: pioswa002@utp.edu.pl

² UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: maciej.koty@utp.edu.pl

³ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: radsta005@utp.edu.pl

⁴ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: wojzio002@utp.edu.pl

* Correspondent author; e-mail: maciej.koty@utp.edu.pl

Summary: The main purpose of the work was to present the possibility of numerical analysis of the welding process and heat treatment with the use of the *SYSWELD* numerical software. Selected tools included in the *SYSWELD* software package are described in the paper. Examples of possible simulations of technological processes and the results that can be obtained on their basis are presented. The basic stages of the simulation, and the input data required to perform it have been defined. Two examples are also presented including simulation of T-joint welding process and grip hardening process of a testing machine. Results were presented in the form of color maps and graphs. In addition, their analysis was done. The conducted analyzes showed that the presented numerical tool can be a valuable source of information about the simulated process. The data obtained can form the basis for the optimization of individual processes.

Key words: numerical analysis, *FEM*, *SYSWELD*, welding, heat treatment

1. Wstęp

W następstwie nieustannego rozwoju w budowie maszyn, w przemyśle samochodowym, stoczniowym, maszynowym, narzędziowym i w wielu innych produkcji są zmuszeni do wprowadzania nowoczesnych rozwiązań w celu zwiększenia wydajności oraz efektywności produkcji. Prowadzone prace zarówno badawcze, jak i rozwojowe skupiają się na wprowadzaniu nowych konstrukcji o zwiększonych właściwościach użytkowych. Coraz szerzej stosuje się nowoczesne oraz kosztowne w zakupie materiały, co zwiększa koszt prototypowania. Nowe konstrukcje charakteryzują się większym stopniem skomplikowania geometrii oraz niekiedy większymi rozmiarami, co niejednokrotnie utrudnia prowadzenie badań na rzeczywistych obiektach. Zdarza się też, że wyniki laboratoryjne po przeprowadzonych badaniach nie są skorelowane z rzeczywistymi obiektami, a stosowane procesy spawania czy też obróbki, z racji ich skomplikowania, przynoszą nieoczekiwane efekty. Z tych powodów coraz częściej stosuje się komputerowe symulacje numeryczne, które mają na celu w relatywnie tani oraz efektywny sposób pomóc inżynierowi w ocenie poprawności wykonania modelu przed wdrożeniem rzeczywistego rozwiązania. Na rynku CAE istnieje bardzo duża różnorodność oprogramowania służącego do obliczeń numerycznych z zakresu szeroko stosowanej Metody Elementów Skończonych (MES): od elementarnych implementacji stanowiących dodatkowe narzędzie, np. w pakiecie *Autodesk INVENTOR*, po rozbudowane uniwersalne środowiska, np. *ANSYS* lub *ABAQUS*. Ze względu na specyfikę niektórych zagadnień twórcy programów do symulacji MES są zmuszeni do opracowania specjalizowanego oprogramowania. Do tego typu problemów należą symulacje procesów spawania. Specjalizacja narzędzi numerycznych pozwala na znacznie bardziej efektywne wykorzystanie ich w gałęziach przemysłu, do których zostały przeznaczone [1, 2, 11, 12].

Symulacje numeryczne procesów spawania oraz obróbki cieplnej należą do bardzo złożonych zagadnień, są jednak coraz częściej przeprowadzane podczas projektowania elementów konstrukcyjnych. Modelowanie tych procesów wymaga dużej wiedzy, a także wyznaczenia wielu właściwości cieplno-metalurgicznych, jak i mechanicznych stosowanych materiałów. Wynika to z faktu, iż oddziałujący na materiał cykl cieplny towarzyszący spawaniu powoduje powstanie naprężeń oraz odkształceń, których rozkład uwarunkowany jest wpływem wielu czynników, takich jak: przemiany metalurgiczne, rodzaj i parametry technologii spawania, temperatura podgrzania, sposób mocowania łączonych elementów, rodzaj spoin i kolejność ich wykonywania, postać geometryczna konstrukcji i jej wymiary oraz właściwości mechaniczne materiału. Uzyskany niezerównoważony układ sił wewnętrznych w postaci naprężeń szczątkowych może być przyczyną zmniejszenia trwałości konstrukcji oraz może powodować zmianę jej właściwości w trakcie eksploatacji. Odkształcenia wywołane spawaniem mogą spowodować zmianę wymiarów konstrukcji do wielkości wykraczających ponad dopuszczalne normy [2, 4, 9, 13].

Zjawiska termiczno-metalurgiczne zachodzące podczas obróbki cieplnej są przyczyną zmian w strukturze materiałów. Zmiany te mogą skutkować niejednorodnością struktury. Dodatkowo podczas obróbki cieplnej, szczególnie hartowania, pojawiają się naprężenia własne w materiale. Naprężenia te są wynikiem nierównomiernych dylatacyjnych zmian wymiarów na skutek występowania gradientu temperatury oraz wywołane są przemianami fazowymi i zmianami w objętości właściwej faz. Na wartość powstałych naprężeń wpływają: wielkość oraz geometria przedmiotu, skład chemiczny, szybkości chłodzenia, gatunek stali, struktura, hartowność, temperatury obróbki cieplnej, intensywność chłodzenia, medium chłodzące itd. Niewłaściwie przeprowadzona obróbka cieplna może być przyczyną odkształceń oraz pęknięć. Aby przewidzieć rozkład faz metalurgicznych, podczas obróbki cieplnej konieczne jest odpowiednie zaplanowanie zabiegów nagrzewania, wygrzewania oraz chłodzenia. Do tego celu w coraz większym stopniu stosuje się symulacje numeryczne [3, 6].

W pracy przedstawiono możliwości oprogramowania numerycznego *SYSWELD* w zakresie symulacji procesu spawania oraz obróbki cieplnej. Aby to zrealizować, opracowano model złącza spawanego oraz model elementu, dla którego prowadzi się proces hartowania.

2. Narzędzie numeryczne

Na rynku występują zaawansowane i rozbudowane środowiska obliczeniowe MES pozwalające na przeprowadzenie analiz zjawisk zachodzących w trakcie spawania oraz obróbki cieplnej elementów konstrukcyjnych. Pakietem oprogramowania tego typu jest *SYSWELD* opracowany przez *ESI Group*. W skład pakietu wchodzi kilka narzędzi. W tej pracy wykorzystano następujące:

- *Visual-Mesh* – preprocesor umożliwiający tworzenie elementów 1D, 2D i 3D oraz generowanie siatki elementów skończonych,
- *Visual-Weld* – modelowanie procesów spawania,
- *Visual-Heat Treatment* – modelowanie procesów obróbki cieplnej,
- *SYSWELD Solvers* – moduł obliczeniowy,
- *Visual-Viewer* – postprocesor pozwalający na analizę wyników, generowanie wykresów, map barwnych oraz animacji.

Pakiet *SYSWELD* pozwala na przeprowadzenie analiz nieliniowych obejmujących nieliniową geometrię dużych odkształceń, nieliniowe przewodzenie ciepła, izotropowe i kinematyczne umocnienie materiału czy przemiany fazowe. Narzędzie to dzięki uwzględnieniu wielu czynników pozwala na uzyskanie dużej zgodności wyników symulacji z rzeczywistą reakcją elementu lub konstrukcji. Symulacje zachodzące dzięki pakietowi *SYSWELD* mogą być prowadzone w szerokim zakresie, tj. zarówno ze spoiwem, jak i bez, dla źródeł ciepła wchodzących w bezpośredni fizyczny kontakt z elementem spawanym (zgrzewanie punktowe, zgrzewanie tarciove), a także dla źródeł w bezpośredni kontakt niewchodzących (łuk elektryczny, wiązka laserowa, wiązka elektronów). Zakres symulacji obróbki cieplnej jest równie

szeroki i obejmuje m.in. odpuszczanie (laserowe, indukcyjne, wiązką elektronów, plazmą, tarciami), hartowanie, karbonizację i azotowanie.

W celu przeprowadzenia poprawnej symulacji niezbędna jest znajomość podstawowych danych dotyczących procesu, tj. metody stosowanej w procesie spawania, wartości energii liniowej procesu spawania, geometrii spawanego elementu bądź konstrukcji, własności materiałowych, temperatury podgrzewania, liczby spoin/ściągów oraz ich lokalizacji i kolejności spawania, sposobu mocowania łączonych elementów, parametrów obróbki cieplnej itp. Oprogramowanie zostało wyposażone w stosunkowo bogatą bazę materiałową uwzględniającą własności materiałowe w funkcji temperatury oraz zawartości poszczególnych faz.

Symulacja procesu spawania oraz obróbki cieplnej składa się z dwóch głównych etapów: analizy termo-metalurgicznej oraz analizy mechanicznej. W analizie termo-metalurgicznej uwzględnia się zachodzące zjawiska termiczne oraz związane bezpośrednio z nimi przemiany faz metalurgicznych w funkcji czasu. Uzyskane dane są następnie wykorzystywane jako wejściowe do analizy mechanicznej. Taka kolejność wynika z przyjętej zasady mówiącej, że zmiany mechaniczne (naprężenia, odkształcenia) nie zmieniają temperatury procesu, natomiast zmiana temperatury ma wpływ na naprężenia oraz odkształcenia.

Efektym symulacji są wyniki w postaci rozkładów pól i gradientów temperatur, faz metalurgicznych (ferryt, bainit oraz martenzyt), przemieszczeń, odkształceń, naprężeń własnych oraz twardości [5, 7, 8, 10, 14, 15].

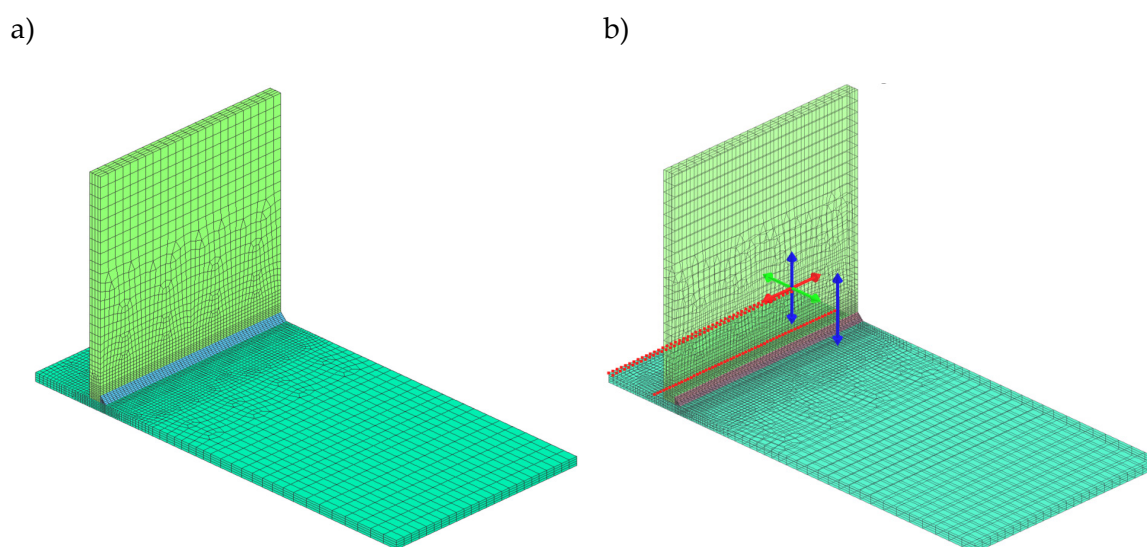
3. Przykłady obliczeniowe

Możliwości oprogramowania wchodzącego w skład pakietu SYSWELD zaprezentowano na dwóch przykładach: jednym uwzględniającym symulację połączenia spawanego oraz drugim – symulację procesu hartowania.

3.1. Połączenie spawane

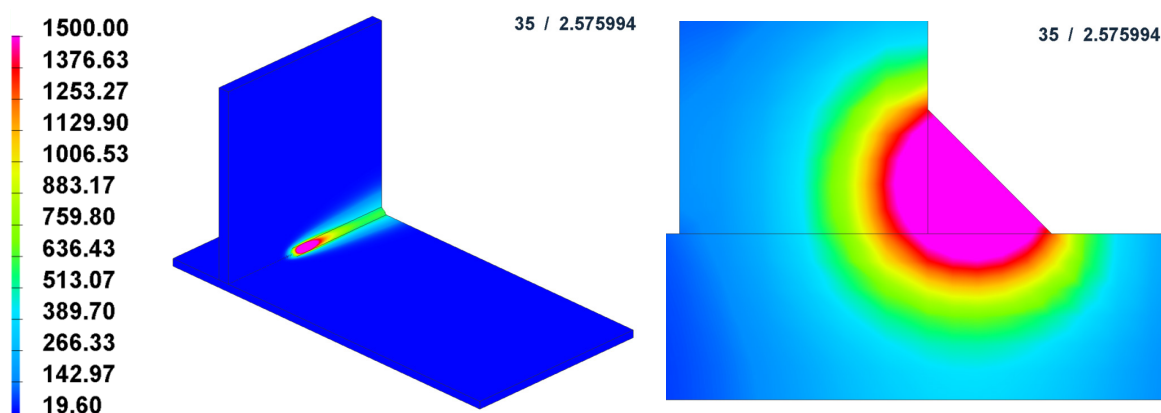
Pierwszy przykład dotyczy symulacji procesu spawania złącza teowego wykonanego ze stali S355J2G3. Charakterystyki materiałowe wybranej stali zawarte są w domyślnej bazie materiałowej programu. Zamodelowane złącze składało się z dwóch blach: dolnej o wymiarach 100 x 200 x 4 mm i górnej o wymiarach 100 x 100 x 6 mm. Model dyskretny MES przygotowany za pomocą narzędzia *Visual-Mesh* składał się z 27 404 trójwymiarowych elementów skończonych typu solid oraz z 33 184 węzłów (rys. 1). Na rysunku 1 przedstawiono również warunki brzegowe odpowiadające sposobowi zamocowania blachy dolnej (poziomej na rys. 1). Węzły ograniczone wiązaniami zostały oznaczone na czerwono. Węzły znajdujące się na krawędzi blachy zostały ograniczone we wszystkich kierunkach, natomiast węzły przy połączeniu – tylko w kierunku pionowym. Blacha górna (pionowa na rys. 1) nie miała żadnych wiązań. Siatkę zagęszczono w sąsiedztwie złącza oraz w obszarze do niego przyległym w celu zwiększenia dokładności analizy.

Parametry procesu spawania wprowadzono do modelu z wykorzystaniem narzędzia *Visual-Weld*. Założono, że złącze zostanie wykonane za pomocą metody MAG, która była symulowana z użyciem źródła ciepła w kształcie podwójnej elipsoidy (tzw. źródło Goldaka). Po wstępnej kalibracji w module *Heat Source Fitting* uzyskano źródła ciepła o długości 10 mm, szerokości 6 mm, głębokości wtopienia 3,5 mm, charakteryzujące się prędkością spawania wynoszącą 22 mm/s i energią liniową spawania 300 J/mm. Do symulacji powstawania połączenia wykorzystano metodę analizy ciągłej procesu spawania (*transient welding*). Metoda ta pozwoliła określić lokalne efekty wynikające z procesu spawania, takie jak rozkład temperatury w czasie (rys. 2), faz metalurgicznych (rys. 3), odkształceń (rys. 4) oraz naprężeń (rys. 5) [14]. Przedstawione mapy barwne uzyskano, korzystając z *Visual-Viewera*.



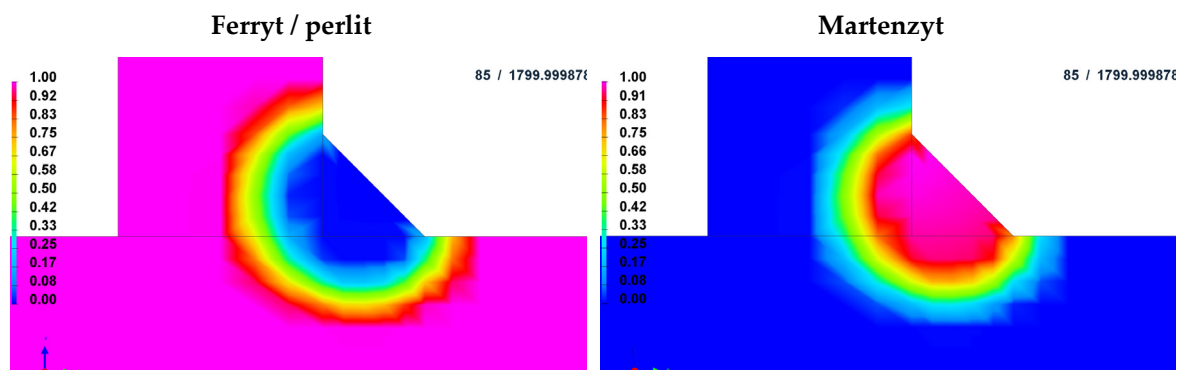
Rys. 1. Model dyskretny: a) widok, b) warunki brzegowe – sposób zamocowania [opracowanie własne]

Fig. 1. Discrete model: a) view, b) boundary conditions – fixing method [own study]



Rys. 2. Rozkład temperatur w trakcie spawania (°C) [opracowanie własne]

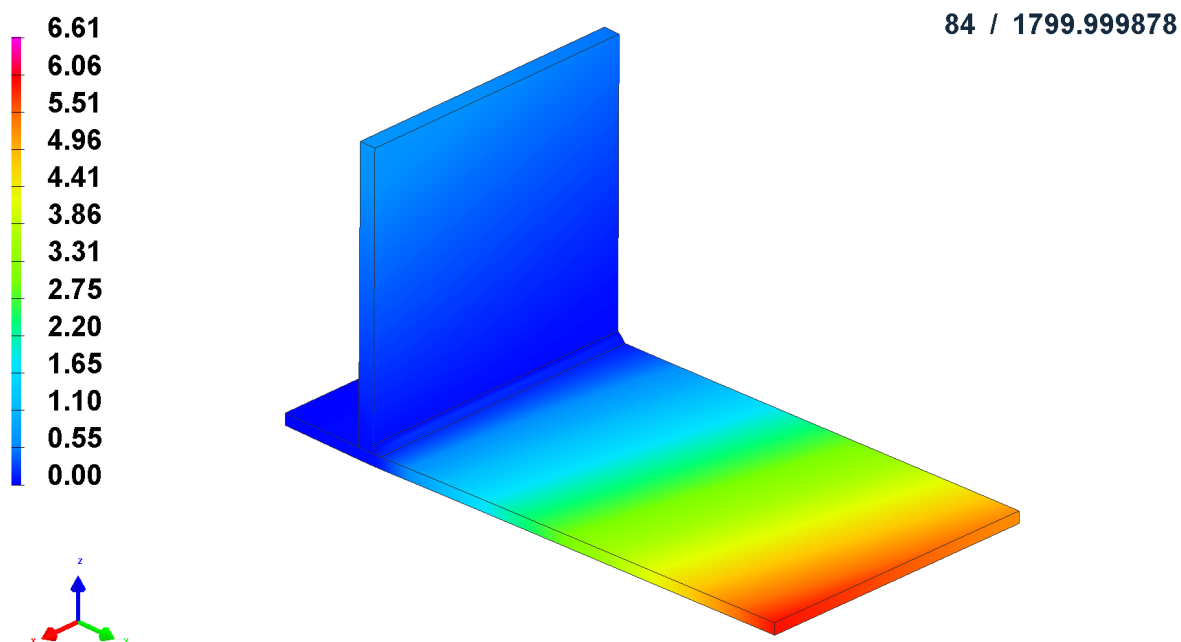
Fig. 2. Temperature distribution during welding (°C) [own study]



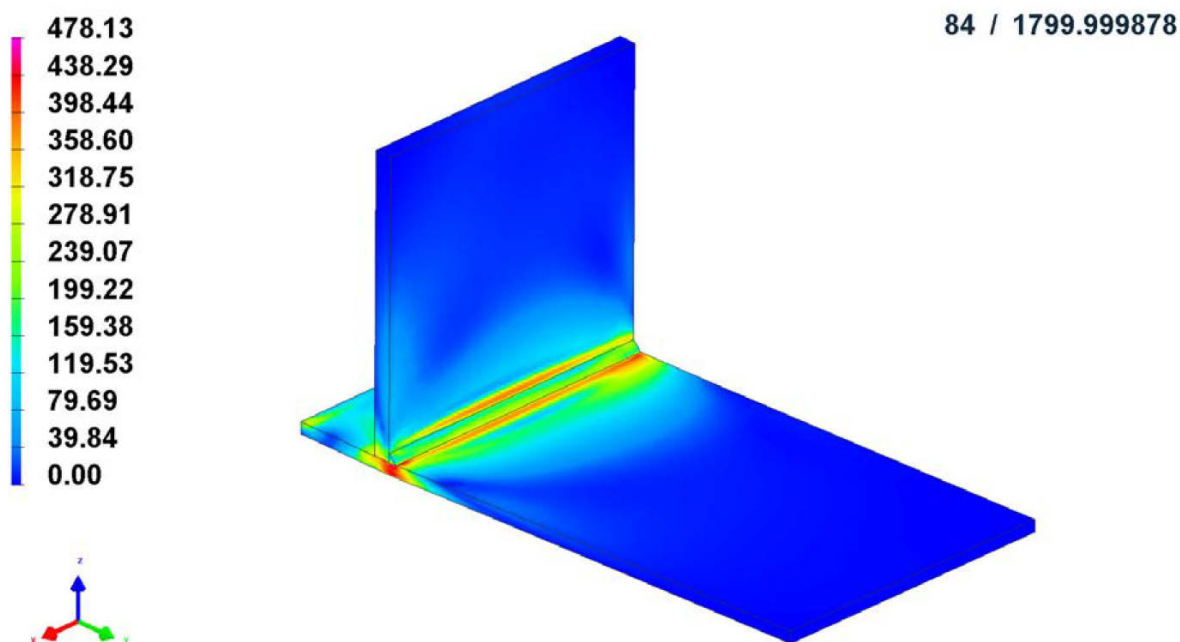
Rys. 3. Rozkład wybranych faz metalurgicznych po procesie spawania (%)
[opracowanie własne]

Fig. 3. Distribution of selected metallurgical phases after the welding process (%)
[own study]

Rozkład temperatur oraz wynikający z niego rozkład faz metalurgicznych pozwalają określić poprawność doboru parametrów spawania. Na podstawie wygenerowanych map rozkładu temperatury można określić głębokość wtopienia oraz sposób rozchodzenia się ciepła w połączeniu. Na podstawie przedstawionej struktury metalurgicznej można określić udział poszczególnych faz w złączu.



Rys. 4. Rozkład odkształceń całkowitych (mm) [opracowanie własne]
Fig. 4. Total strain distribution (mm) [own study]



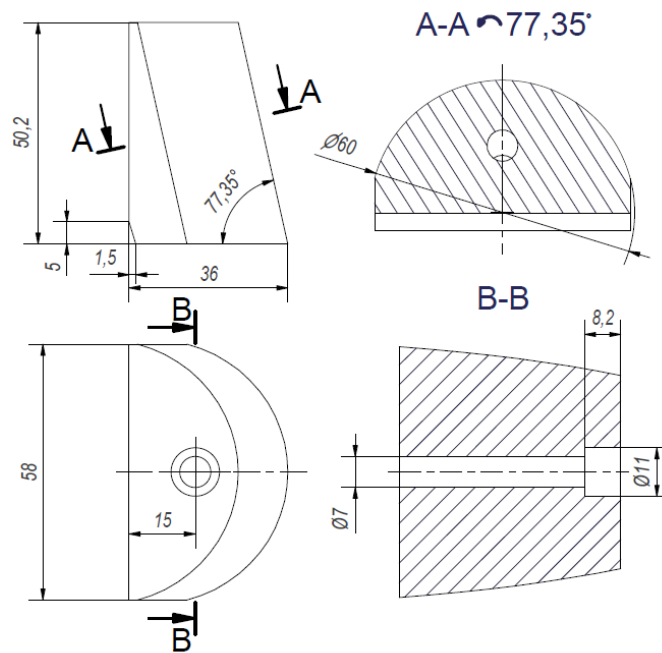
Rys. 5. Rozkład naprężeń zredukowanych wg hipotezy von Misesa (MPa)
[opracowanie własne]

Fig. 5. Distribution of equivalent von Mises stress (MPa)
[own study]

Rozkład odkształceń oraz ich wielkość zależne są od sposobu zamocowania elementu, również w tym przypadku widoczne jest znaczące odkształcenie na końcach łączonych blach, a szczególnie w skrajnym narożniku dolnej blachy od tej strony, w której proces spawania był kończony. Analiza odkształceń pozwala uzyskać cenne informacje, które posłużyć mogą do zmiany sposobu zamocowania elementów, kierunku spawania czy też parametrów procesu spawania. W analizowanym przypadku na mapie rozkładu naprężeń można zauważyć ich spiętrzenia w okolicy spoiny, szczególnie w dolnej, cieńszej blasze. Skupiska naprężeń pospawalniczych w tym złączy oraz możliwość wystąpienia obciążeń zmiennych zwiększają prawdopodobieństwo wystąpienia pęknięcia. Aby uniknąć takiej sytuacji, można zastosować co najmniej kilka rozwiązań. Jednym z nich jest zaplanowanie dodatkowego wygrzewania przed spawaniem, czyli wyżarzania odprężającego, lub – jak w przypadku odkształceń – można zmienić sposób mocowania bądź parametry procesu.

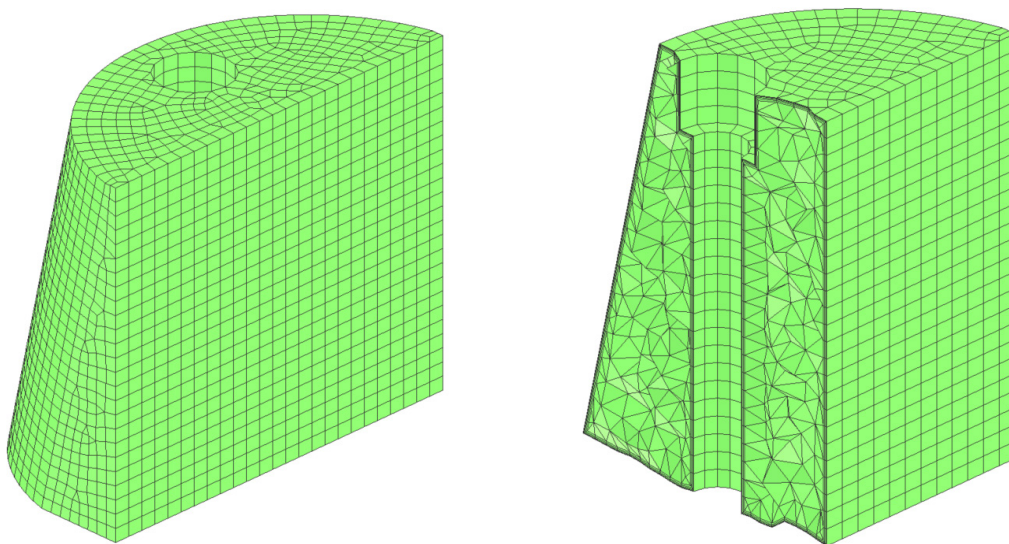
3.2. Obróbka cieplna

Proces obróbki cieplnej z wykorzystaniem pakietu *SYSWELD* został zaprezentowany na przykładzie hartowania szczęki maszyny wytrzymałościowej wykonanej ze stali 18CrNiMo7-6. Jej model materiałowy dostępny jest w bazie materiałowej programu. Wymiary omawianej szczęki przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Podstawowe wymiary analizowanej szczęki [opracowanie własne]
Fig. 6. Basic dimensions of the analyzed grip [own study]

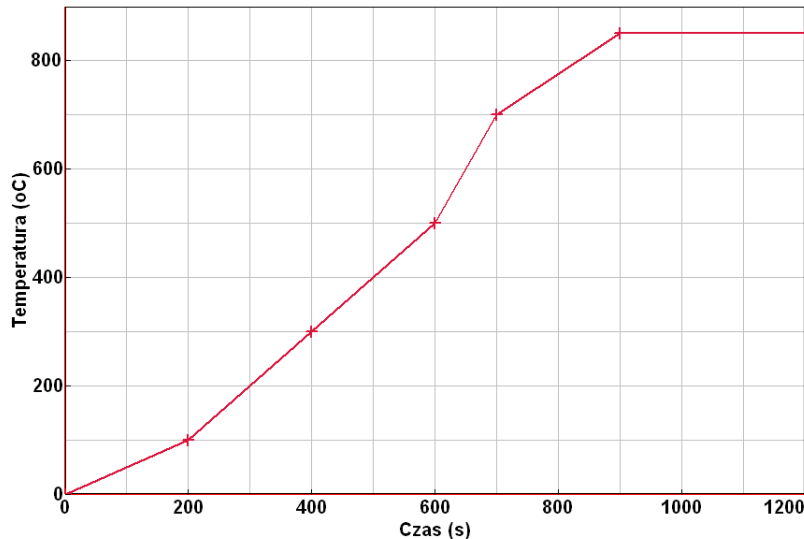
Bryłowy model szczęki przygotowano w oprogramowaniu *Autodesk INVENTOR*. Został on zaimportowany do programu *Visual-Mesh*, w którym wygenerowano siatkę elementów skończonych, składającą się z 47 850 trójwymiarowych elementów skończonych typu solid oraz z 20 165 węzłów (rys. 7). Siatka MES została zagęszczona w sąsiedztwie powierzchni zewnętrznych.



Rys. 7. Model dyskretny analizowanej szczęki [opracowanie własne]
Fig. 7. Discrete model of the analysed grip [own study]

Symulację procesu obróbki cieplnej przeprowadzono za pomocą narzędzia *Visual-Heat Treatment*, w odniesieniu do którego określono parametry nagrzewania, wygrzewania oraz rodzaj ośrodka chłodzącego. Zgodnie z kartą materiałową

dla wybranej stali temperatura austenityzowania powinna wynosić 850°C. Na rysunku 8 przedstawiono przebieg symulowanego procesu nagrzewania oraz wygrzewania elementu. Jako ośrodek chłodzący wybrano wodę. Proces hartowania przeprowadzono wraz z końcem wygrzewania.

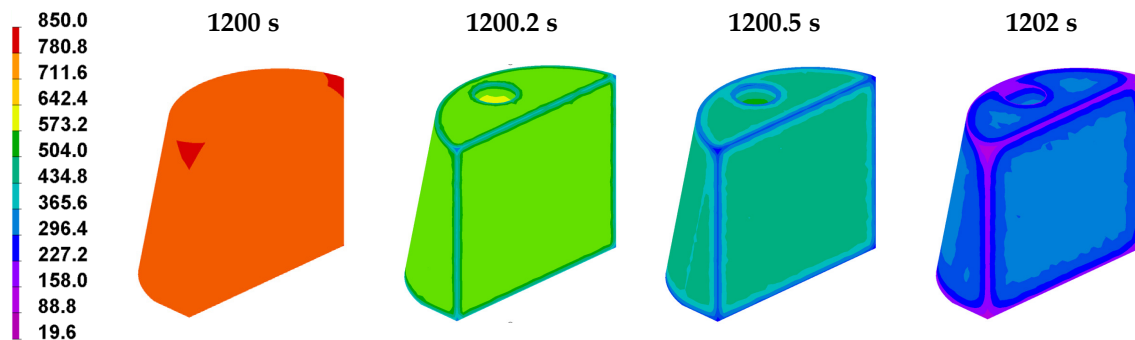


Rys. 8. Wykres przedstawiający planowany proces grzania szczęki
[opracowanie własne]

Fig. 8. Diagram showing the planned heating of the grip [own study]

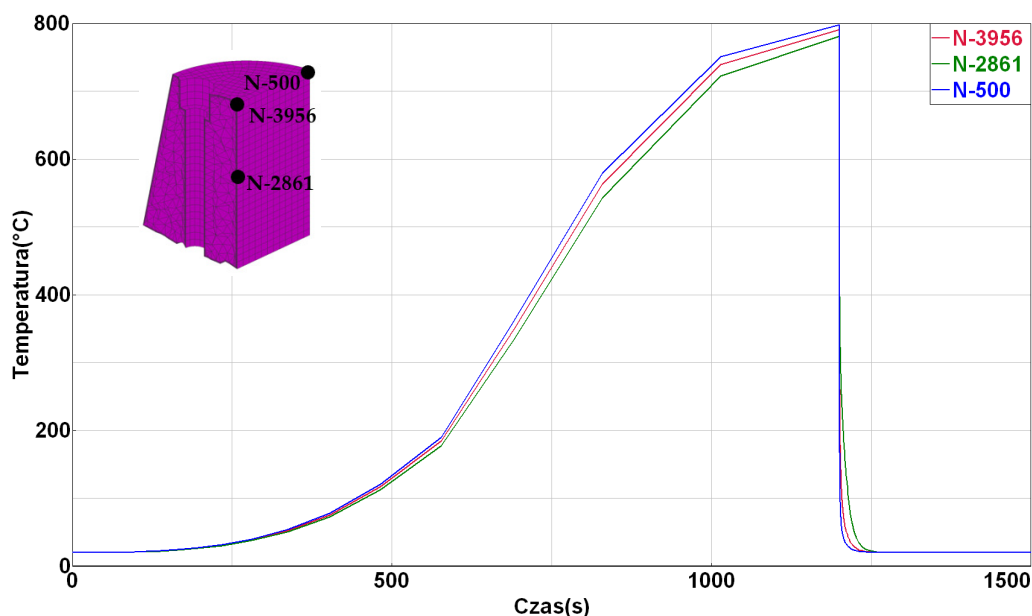
Zgodnie z [3] dla krawędzi zewnętrznych analizowanej szczęki zabieg wygrzewania powinien trwać znacznie dłużej. Czas ten skrócono w celu zaprezentowania faz powstałych podczas hartowania w chwili, w której nie nastąpiło austenityzowanie obejmujące całą objętość obrabianego cieplnie przedmiotu.

Wyniki symulacji obróbki cieplnej poddano analizie z wykorzystaniem narzędzia *Visual-Viewer*. Za jego pomocą określono mapy zmian rozkładu temperatury podczas procesu hartowania (rys. 9). Wyznaczono wykres przebiegu zmiany temperatury w czasie w wybranych węzłach modelu (rys. 10). Węzły te to miejsca, w których zaobserwowano występowanie uszkodzeń w trakcie eksploatacji szczęki. Program *Visual-Viewer* wykorzystano również do przedstawienia zmian rozkładu poszczególnych faz metalurgicznych w czasie obróbki cieplnej (tab. 1). Wygenerowano mapę obrazującą rozkład twardości na powierzchni szczęki (rys. 11).



Rys. 9. Rozkład temperatury w trakcie oraz zaraz po zainicjowaniu procesu hartowania (°C)
[opracowanie własne]

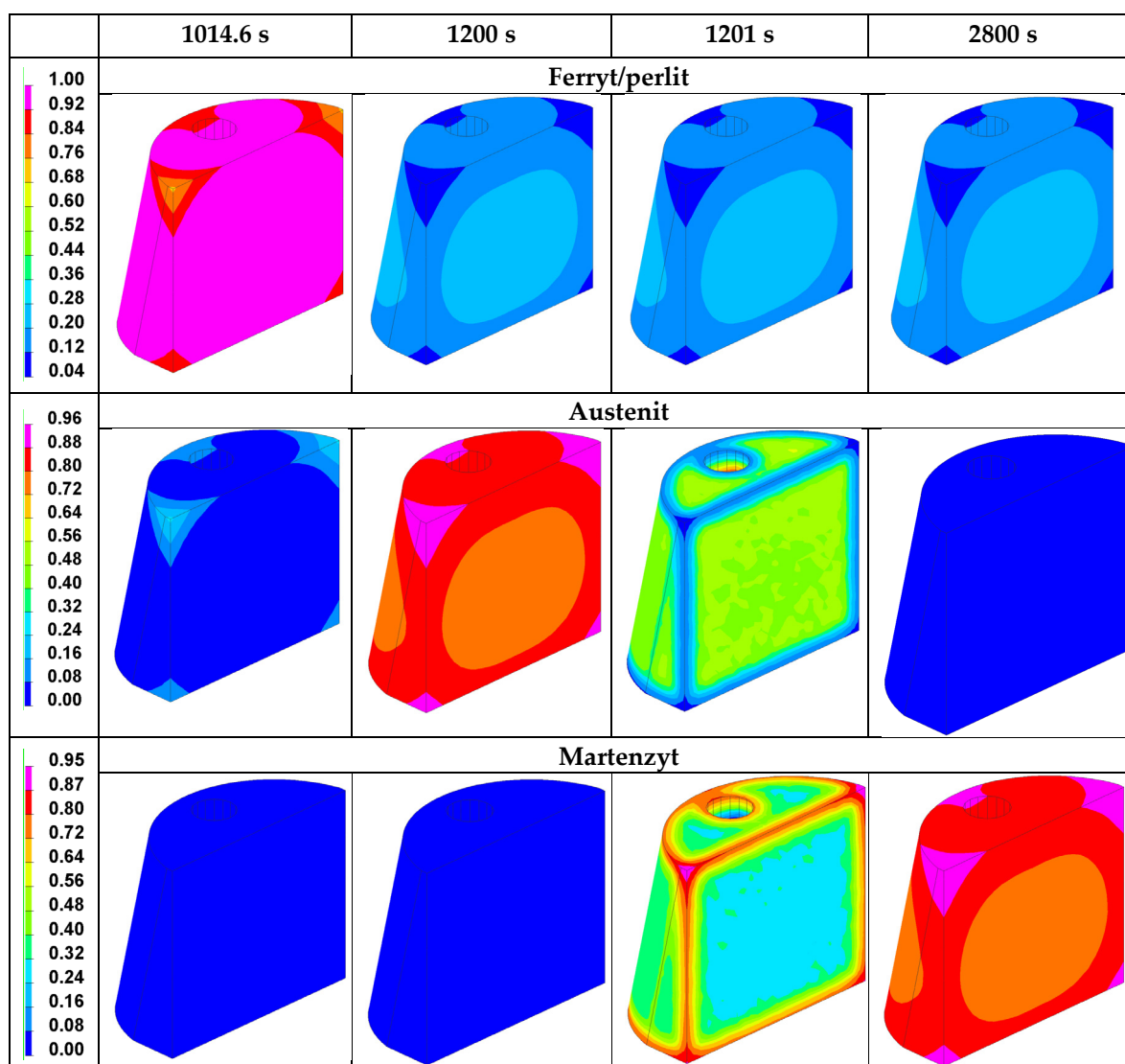
Fig. 9. Temperature distribution during and immediately after the initiation of the hardening process (°C) [own study]



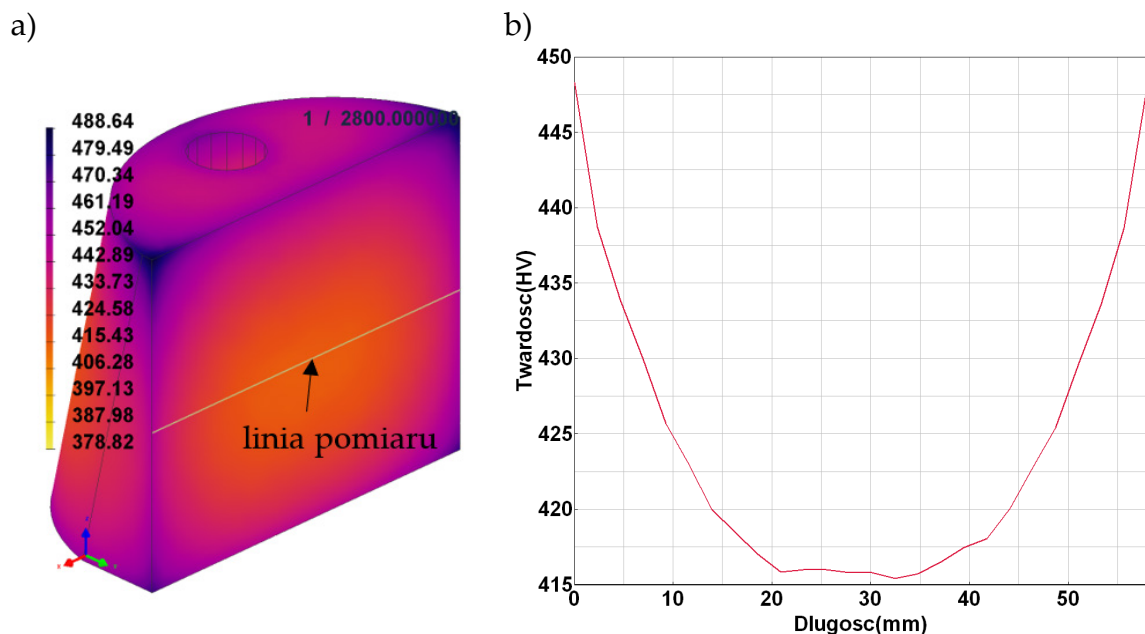
Rys. 10. Wykres zmiany temperatury w czasie w wybranych węzłach
[opracowanie własne]

Fig. 10. Graph of temperature change over time at selected nodes
[own study]

Rozkład temperatur w zakresie czasu, w którym następuje hartowanie elementu, obrazuje dynamikę procesu. Można zauważyć, że zgodnie z dostępną wiedzą temperatura spada najgwałtowniej w sąsiedztwie krawędzi elementu. Spadek temperatury dla punktu N-2861 znajdującego się w środkowej części zamodelowanych szczęk nie jest aż tak gwałtowny. Są to przesłanki do stwierdzenia, że proces odzwierciedla w pewnym stopniu warunki rzeczywiste. Przebieg temperatur dla węzłów, w obrębie których następują uszkodzenia struktury materiału w procesie eksploatacji, pozwala sprawdzić, czy proces nagrzewania oraz wygrzewania przebiega w tych punktach prawidłowo.

Tabela 1. Przebieg zmian rozkładu poszczególnych faz podczas obróbki cieplnej (%) [opracowanie własne]**Table 1.** Changes in the distribution of individual phases during heat treatment (%) [own study]

Na podstawie przedstawionej powyżej tabeli można stwierdzić zależność zmian procentowych poszczególnych faz w czasie. Wraz ze wzrostem temperatury elementu zachodził proces przemiany ferrytu/perlitu w austenit. Proces chłodzenia powodował gwałtowną przemianę austenitu w martenzyt. Na rozkładzie map barwnych zauważyć można, że szczeka nie uległa całkowitej przemianie ferrytu/perlitu w austenit, co spowodowane było zbyt krótkim czasem wygrzewania. Na skutek tego nie uzyskano znaczącego udziału fazy martenzytu w objętości szczęki, co ma odzwierciedlenie w rozkładzie twardości. Na wykresie można dostrzec zróżnicowanie w wartościach twardości na powierzchni szczęki czołowej, co podczas eksploatacji skutkować może przedwczesnym jej uszkodzeniem.



Rys. 11. Wyniki twardości (HV): a) mapa barwna, b) wykres rozkładu twardości na powierzchni szczęki (zgodnie z linią pomiaru) [opracowanie własne]

Fig. 11. Hardness (HV) results: a) color map, b) hardness distribution diagram on the grip surface (according to the measuring line) [own study]

4. Podsumowanie

W przypadku złącza teowego przedstawiona symulacja procesu spawania pozwoliła na wyznaczenie rozkładów temperatury oraz faz metalurgicznych powstałych w złączu, dzięki czemu możliwe jest określenie rozmiarów strefy wpływu ciepła (SWC). Mapy odkształceń całkowitych w uzyskanym złączu mogą być wskazówkami odnośnie do konieczności wprowadzenia zmian w sposobie zamocowania łączonych elementów, wielkości spoiny, kierunku spawania czy też parametrów spawania. Rozkłady naprężeń zredukowanych w zależności od zastosowania elementu wskazywać mogą na konieczność wprowadzenia dodatkowej obróbki odprężającej po spawaniu, zwiększenia temperatury elementów przed procesem spawania, a także, jak w przypadku odkształceń, sugerują zmianę sposobu zamocowania elementów czy też zmianę parametrów spawania.

Zastosowanie symulacji procesu obróbki cieplnej pozwoliło uzyskać zamierzony efekt zbyt krótkiego zabiegu wygrzewania, gdyż analizowany element nie nagrzał się do temperatury 850°C w całej objętości. Skutkiem tego proces austenitowania nie przebiegł w całej szczęcie, co przy przedwczesnym chłodzeniu poskutkowało niepełną przemianą struktury w martenzyt oraz znalazło swoje odzwierciedlenie w rozkładzie twardości.

Na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych spawania złącza teowego oraz hartowania szczęki można stwierdzić, że pakiet SYSWELD stanowi wartościowe narzędzie ułatwiające planowanie procesów spawania czy też obróbki cieplnej. Niewątpliwą jego zaletą jest fakt, że zmiany zachodzące podczas poszczególnych procesów można śledzić w sposób ciągły. Wykonanie oraz śledzenie poszczególnych etapów symulacji pozwala lepiej poznać dany proces, poddać go op-

tymalizacji i znaleźć odpowiednie wartości jego parametrów bez ponoszenia dodatkowych kosztów prototypowania, co ma szczególne znaczenie w przypadku planowania badań eksperymentalnych na obiektach rzeczywistych.

Bibliografia

- [1] Agaciak, S., Nowacki, J., Sajek, A., „Możliwości realizacji numerycznej symulacji spawania łukowego”, *Badania Nieniszcz. i Diagnostyka* 2(2), (2019), 3–11.
- [2] Deshpande, A.A., Tanner, D.W.J., Sun, W., Hyde, T.H., McCartney, G., “Combined butt joint welding and post weld heat treatment simulation using SYSWELD and ABAQUS”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.* 225(1), (2011), 1–10.
- [3] Dobrzański, L.A., „Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe. Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo”, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2006.
- [4] Ferenc, K.F.J., „Konstrukcje spawane”, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2003.
- [5] Giętka, T., Ciechacki, K., Kik, T., “Numerical Simulation of Duplex Steel Multipass Welding”, *Arch. Metall. Mater.*, 61(4), (2016), 1975–1984.
- [6] Jemioło, S., Gajewski, M., „Symulacja MES obróbki cieplnej wyrobów stalowych z uwzględnieniem zjawisk termometalurgicznych. Część 1. Nieustalony przepływ ciepła i przejścia fazowe”, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2005.
- [7] Jemioło, S., Gajewski, M., „Symulacja MES obróbki cieplnej wyrobów stalowych z uwzględnieniem zjawisk termometalurgicznych. Część 2. Przykłady numeryczne z zastosowaniem programu SYSWELD”, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2005.
- [8] Kik, T., “Numerical analysis of MIG welding of butt joints in aluminium alloy”, *Biul. Inst. Spaw.* 3, (2014), 37–45.
- [9] Kik, T., Górka, J., Kotarska, A., Poloczek, T., “Numerical verification of tests on the influence of the imposed thermal cycles on the structure and properties of the S700MC heat-affected zone”, *Metals (Basel)*. 10(7), (2020), 1–23.
- [10] Kik, T., Slováček, M., Wyględacz, B., „Analiza numeryczna procesu spawania wielościęgowego złącza teowego oraz obróbki cieplnej po spawaniu”, *Przegląd Spaw. – Weld. Technol. Rev.* 88, (2016), 38–45.
- [11] Rusiński, E., Czmochoński, J., Smolnicki, T., „Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- [12] Skibicki, A., „Wyznaczanie obszarów badań diagnostycznych spoin na podstawie numerycznej symulacji rozkładów temperatury i naprężeń”, *Stud. Mater. Pol. Stowarzyszenia Zarządzania Wiedzą* 69, (2014), 212–224.
- [13] Slováček, M., Kik, T., “Use of Welding Process Numerical Analyses as Technical Support in Industry. Part 3: Industrial Examples – Transport Industry”, *Biul. Inst. Spaw.* 6, (2015), 38–45.
- [14] M. Slováček, M. Vanek, i T. Kik, “Use of Welding Process Numerical Analyses as Technical Support in Industry. Part 2: Methodology and Validation”, *Biul. Inst. Spaw.* 5, (2015), 25–32.
- [15] “Welding simulation user guide”, Sysweld manual, ESI Group, 2016.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Zastosowanie fotografii elektronooptycznej do analizy jakości krawędzi cięcia kompozytu węglowo-epoksydowego

Grzegorz Szala¹, Piotr Szewczykowski², Paweł Bukowski^{3*}

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: gszala@utp.edu.pl

² Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: piotr.szewczykowski@utp.edu.pl

³ Wojskowe Zakłady Lotnicze nr 2 w Bydgoszczy, ul. Szubińska 107, 85-915 Bydgoszcz, Polska; e-mail: paw_buk@wp.pl

* Autor korespondencyjny: paw_buk@wp.pl

Streszczenie: Opisane w pracy badania przeprowadzono w celu określenia wpływu metod cięcia na jakość uzyskanych krawędzi dla kompozytu złożonego z tkaniny węglowej przesączonej żywicą epoksydową – materiału stosowanego w projektowaniu i budowie elementów oraz maszyn oraz wskazanie odpowiednich metod cięcia tegoż materiału kompozytowego wykorzystywanego na poszycia bezzałogowych obiektów latających, jednostek pływających, koczujących oraz podwodnych itp. Kompozyty węglowe znajdują zastosowanie we wcześniej wspomnianych maszynach przede wszystkim ze względu na większą wytrzymałość w porównaniu z metalami oraz mniejszą masę. Jakość krawędzi ma duże znaczenie w połączeniach elementów poszycia ww. obiektów, szczególnie w połączeniach czołowych. Wysoka jakość i dokładność krawędzi cięcia mają wpływ na jakość połączenia poszczególnych sekcji poszycia maszyn i urządzeń, co powoduje płynny i bez zaburzeń przepływ powietrza lub wody w zależności od warunków eksploatacji.

Słowa kluczowe: metody cięcia, kompozyt, CFRP, uszkodzenie krawędzi

Use of electronooptic photography for the analysis of the cutting edge of a carbon-epoxy composite

Grzegorz Szala¹, Piotr Szewczykowski², Paweł Bukowski^{3*}

¹ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: gszala@utp.edu.pl

² UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: piotr.szewczykowski@utp.edu.pl

³ Military Aviation Company no. 2 in Bydgoszcz, ul. Szubińska 107, 85-915 Bydgoszcz, Poland; e-mail: paw_buk@wp.pl

* Correspondent author: e-mail: paw_buk@wp.pl

Summary: The purpose of the study is to determine the impact of cutting methods on the quality of edges obtained for a composite composed of carbon fabric filtered

with epoxy resin – a material used in the design and construction of components and machines, and to indicate the appropriate cutting methods for the same composite material used for the sheathing of unmanned flying objects, vessels, rolling and underwater objects, etc.. Carbon composites are used in the aforementioned machines primarily because of their higher strength compared to metals and their lower weight. Edge quality is of paramount importance in the joints of the elements of the sheathing of the above-called objects, especially in front connections. The high quality and accuracy of the cutting edges affects the connection quality of the individual sections of the machine and equipment sheathing, resulting in smooth and smooth air or water flow depending on operating conditions.

Key words: cutting methods, composite, CFRP, edge damage

1. Wstęp

Kompozyty węglowe wykorzystuje się coraz częściej. Ich zastosowanie jest często związane z zaawansowaną technologią. Kompozyty te używane są w różnych sektorach gospodarki, w tym: wojskowych, w lotnictwie (balistyce, samolotach pasażerskich i wojskowych, rakietach, dronach), w sporcie, w sprzęcie rekreacyjnym (rowerach, rakietach tenisowych, łodziach rybackich i luksusowych jachtach), w elementach nadwozi samochodów [13].

Kompozyty to grupa materiałów składających się z co najmniej dwóch elementów o różnych właściwościach, z których jeden jest klejem odpowiedzialnym za spójność i elastyczność, podczas gdy drugi materiał jest tak zwanym elementem strukturalnym zapewniającym właściwości wytrzymałościowe [9].

Kompozyty można podzielić na następujące grupy: laminaty, kompozyty strukturalne, mikrokompozyty i nanokompozyty. Indywidualne właściwości każdej z tych grup określają wydajność ich obróbki [1, 17].

Bezzałogowe statki powietrzne (UAV), jednostki pływające, kroczące oraz podwodne, często określane jako drony, dynamicznie rozwijają się jako część przemysłu lotniczego czy zbrojeniowego. Obiekty latające są coraz częściej wykorzystywane do celów wojskowych, w medycynie, monitorowaniu i w innych dziedzinach. Niezależnie od obszaru zastosowania z im lepszych i sztywniejszych materiałów są one wykonane, tym większe obciążenia mogą przenosić, co oznacza, że mogą transportować więcej broni, towarów, czujników lub urządzeń pomiarowych. Dlatego w konstrukcji UAV – oprócz elementów drukowanych 3D – najczęściej stosuje się materiały kompozytowe, których bazę stanowią żywe polimerowe. Precyzja cięcia poszczególnych elementów i krawędzi ma bezpośredni wpływ na wytrzymałość połączeń, a następnie na strukturę platformy. Frezowanie, cięcie wiązką laserową i strumieniem wody ze ścierniwem to technologie stosowane do cięcia tego typu materiałów [1, 10, 17, 24].

W zależności od przyjętej technologii i rodzaju materiału można zaobserwować różne poziomy rozwarstwienia lub uszkodzenia powierzchni.

W pracy wskazano najlepsze metody cięcia, mające wpływ na jakość krawędzi elementów konstrukcyjnych, która znacząco oddziałuje na niezawodność eksploatacyjną i bezpieczeństwo użytkowe konstrukcji UAV. Testy te mają kluczowe znaczenie dla wytrzymałości konstrukcji, która zależy w znacznym stopniu od jakości spajanych krawędzi. W pracy przedstawiono porównanie trzech rodzajów cięcia maszynowego dla kompozytu węglowego stosowanego w budowie bezzałogowych statków powietrznych. Odnosnie do krawędzi materiałów użytych do budowy całych powłok obiektów latających muszą być spełnione liczne kryteria, takie jak właściwe dopasowanie, które wpływa na aerodynamikę [11].

Oprócz kryteriów konstrukcyjnych i wytrzymałościowych obowiązują także określone warunki obróbki materiałów powlekających, umożliwiające klejenie bez zmian siły i aerodynamiki. Dokładność i jakość krawędzi, niezależnie od materiału, muszą być zgodne z przyjętymi normami. Jednocześnie krawędzie muszą gwarantować wytrzymałość i sztywność konstrukcji przy zachowaniu optymalnej aerodynamiki [21].

Biorąc pod uwagę właściwości różnych kompozytów, które określają wybór technologii cięcia, trzeba zapoznać się z ogólnymi problemami związanymi z daną procedurą cięcia. Najczęściej stosowane technologie cięcia obejmują:

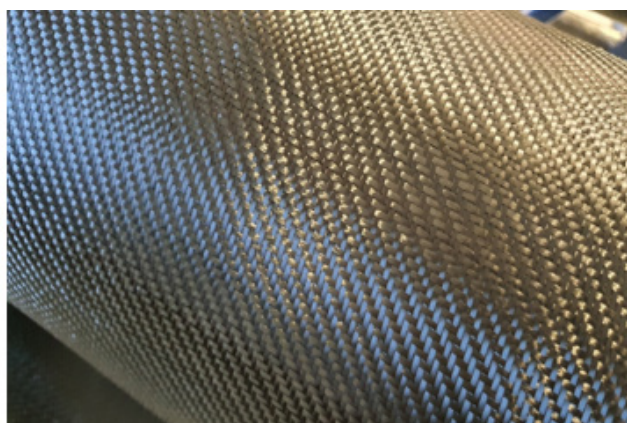
- cięcie mechaniczne,
- ściernie cięcie strumieniem wody,
- cięcie wiązką laserową.

Wybór odpowiednich technologii obróbki zależy nie tylko od grubości kompozytów i oczekiwanej szybkości obróbki, lecz także od struktury i właściwości fizycznych przetwarzanego materiału. Rozwarstwienie laminatu i zmniejszenie odporności na ob. ciążenie zmęczeniowe w obrobionych węzłach to typowe konsekwencje niewłaściwie wykonywanego cięcia. Wysoka jakość produktu końcowego ma szczególne znaczenie w takich branżach, jak lotnictwo i medycyna, w których jakość i precyzja krawędzi mogą mieć kluczowe znaczenie dla zdrowia, a nawet życia człowieka. Jakość krawędzi odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu produktowi końcowemu odpowiedniej wytrzymałości i niezawodności, które decydują o bezpieczeństwie całej konstrukcji. Ma to szczególne znaczenie dla materiałów kompozytowych stosowanych w komponentach statku lub statku powietrznego, takich jak: kadłuby, skrzydła, ogony i ramy [3].

Poniżej znajduje się krótki opis technologii obróbek stosowanych w celu zapewnienia kompozytom odpowiednich cech geometrycznych [4, 22].

2. Kompozyty testowe i instrumentarium badawcze

Materiałem użytym do testów była kompozycja wykonana z tkaniny z włókna węglowego (CFRP) (rys. 1) nasyczonego żywicą epoksydową MGS L285/H285 $g = 2,0$ mm grubości.



SGL SIGRATEx
CW80-PL1/1

gramature: 80 g/m²
wrap: 67 tex
weft: 67 tex
weave: straight 1/1

Rys. 1. Tkanina wykonana z włókna węglowego (CFRP) [opracowanie własne]

Fig. 1. Fabric made of carbon fiber (CFRP) [own study]

Narzędzia stosowane do obróbki kompozytów powinny mieć specjalną konstrukcję pod względem geometrii i rodzaju materiału i powłoki ostrza. Frezy do obróbki kompozytów mają przeciwstawne ostrza i są przeznaczone do obróbki włóknistych elementów kompozytowych.

Cięcie badanych kompozytów przeprowadzono za pomocą frezu EMUGE-FRANKEN 2748F.001, średnica frezu $\varnothing 1$ mm, głębokość frezowania wynosiła 1 mm, prędkość obrotowa $n = 2000$ obr/min, prędkość posuwu $v_F = 0,96$ m/min. W przypadku cięcia strumieniowo-ściernego zadano ciśnienie wody 3800 bar i prędkość posuwu $v_F = 0,64$ m/min. Z kolei do cięcia wiązką laserową przyjęto moc 60 W. Operacja cięcia laserowego została przerwana, gdy pojawiły się przypalenia.

3. Wyniki badań i analiza

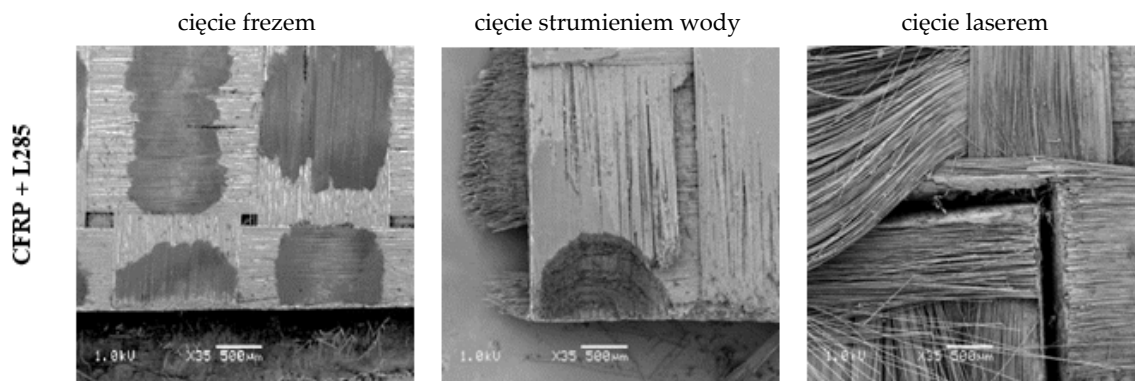
Obrazy krawędzi po obróbce frezem, cięciu strumieniem wody i cięciu laserowym przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Matryca wyników badań do cięcia płyt kompozytowych za pomocą następujących metod obróbki: frezowania, ściernego cięcia strumieniem wody, cięcia wiązką laserową; w skali makro [opracowanie własne]

Fig. 2. Test results matrix for cutting composite panels by processing methods: milling, abrasive water jet cutting, laser beam cutting; on a macro scale [own study]

Porównanie obrazów mikrofraktograficznych krawędzi cięcia kompozytu węglowego wykonanych z wykorzystaniem mikroskopu elektronowego (SEM) zaprezentowano na rysunku 3.

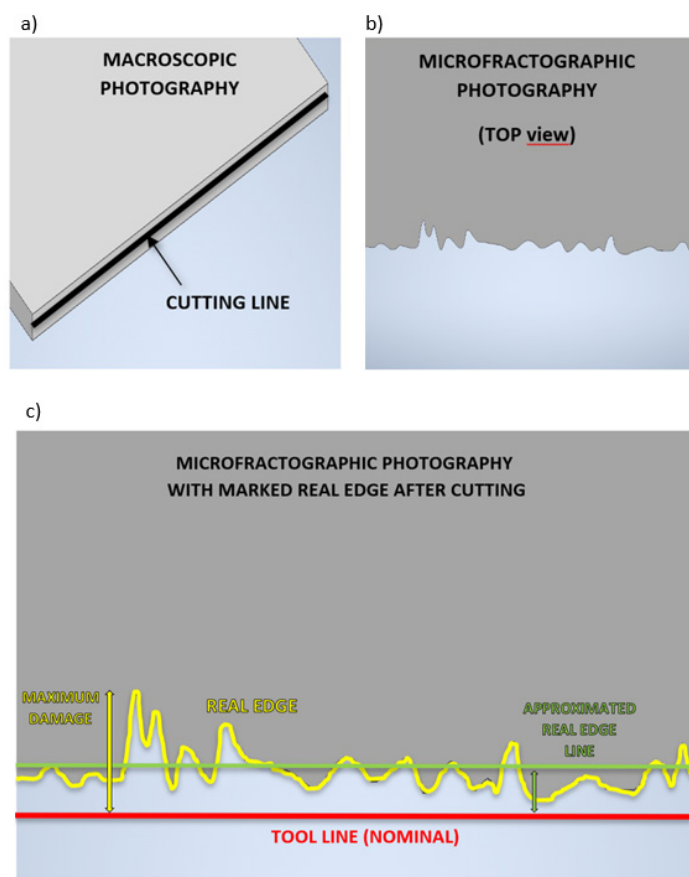


Rys. 3. Porównanie obrazów elektrooptycznych z testu cięcia płyt węglowych za pomocą następujących metod obróbki: frezowania, cięcia strumieniowo-ściernego, cięcia wiązką laserową; powiększenie 35 razy [opracowanie własne]

Fig. 3. Comparison of electronoptycal images from the test of cutting carbon plates by processing method: milling, abrasive blasting, laser beam cutting; magnification 35 times [own study]

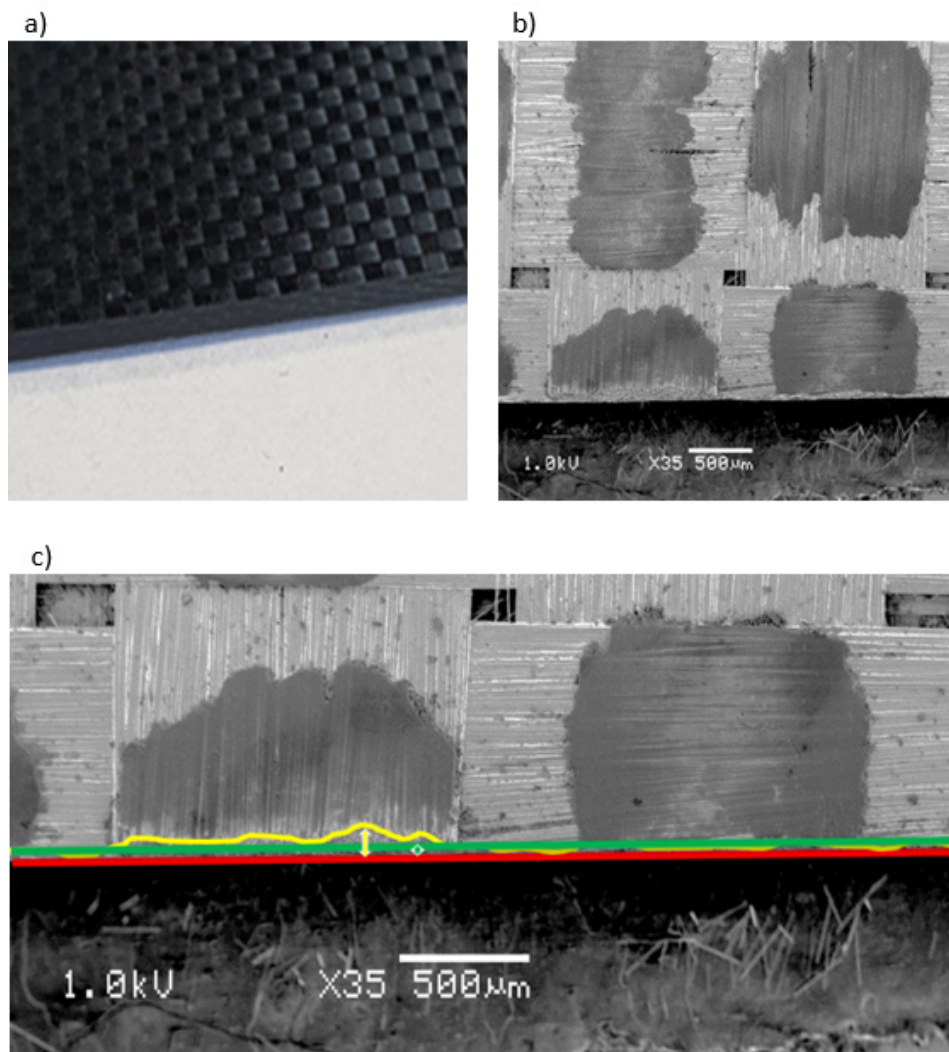
3.1. Analiza obrazów mikrofraktograficznych

Na rysunku 4 przedstawiono graficzny schemat przyjętej metodologii badań: pozycja a) – obraz makroskopowy wykonany klasycznym aparatem cyfrowym, pozycja b) – 35-krotnie powiększony obraz wykonany za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego JEOL 5600, pozycja c) – obraz taki sam jak w b) – powiększony, aby umożliwić rysowanie charakterystycznych linii i pomiary. Na rysunkach 5–7 zaprezentowano – odpowiednio do rysunku 4 – obrazy cięcia z przeprowadzonych eksperymentów. Czerwone linie reprezentują linie nominalne – ustawienie narzędzia skrawającego. Żółte linie reprezentują rzeczywiste krawędzie po cięciu; wykazują uszkodzenie krawędzi w wyniku oderwania, łuszczenie się itp. Zielone linie reprezentują przybliżenie żółtych linii, zredukowane do linii prostej (średnia linia dla rzeczywistego konturu). Długości pomiarowe – w związku z ograniczonym polem pomiarowym mikroskopu – są równe dla wszystkich przypadków. Po wstępnej analizie obrazów ustalono ten wymiar na 2000 μm .



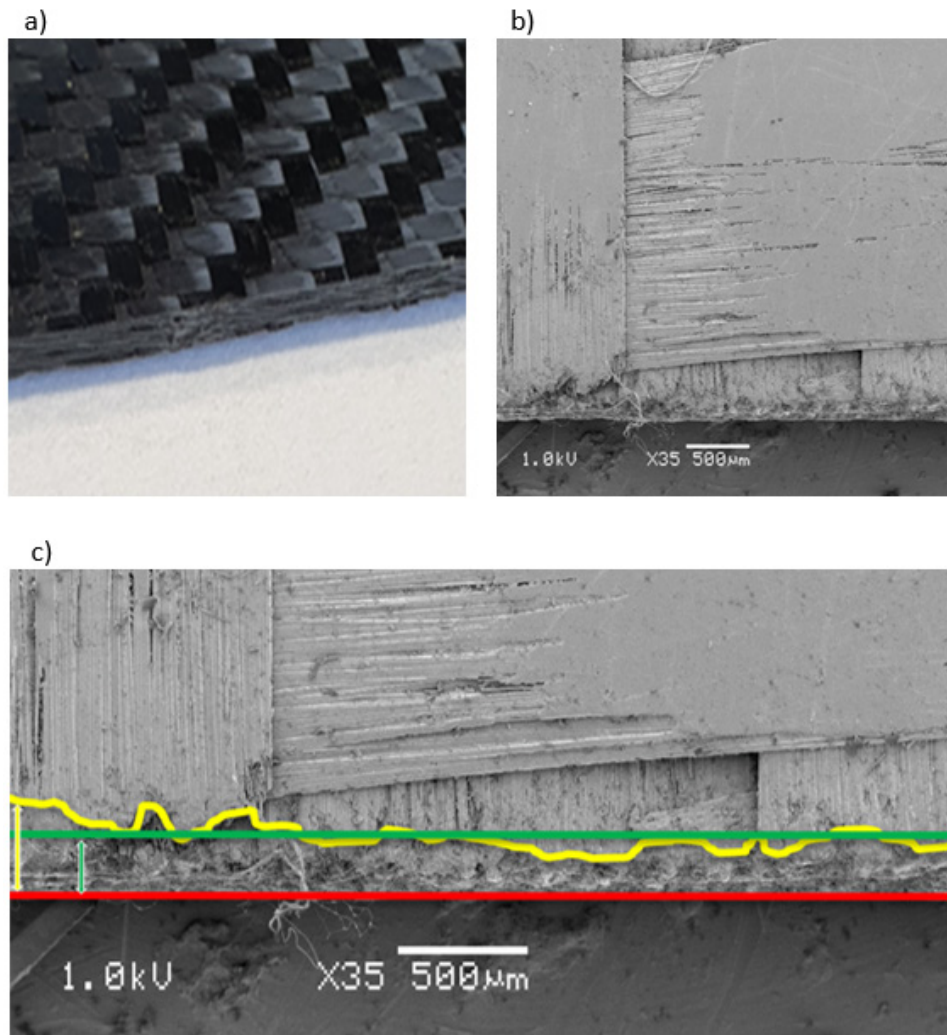
Rys. 4. Schemat metodologii badań: a) makroskopowa fotografia próbki;
b) fotografia mikrofraktograficzna; c) powiększona fotografia mikrofraktograficzna
z charakterystycznymi liniami oznaczonymi: * czerwona – linia nominalna reprezentująca
ustawienie narzędzia skrawającego; * żółta – rzeczywista krawędź po cięciu;
* zielona – linia średnia nierówności po zredukowaniu do linii prostej [opracowanie własne]

Fig. 4. Diagram of the research methodology: a) macroscopic photography of the sample;
b) microfractive photography; c) enlarged microfractographic photograph with characteristic lines
marked: * red – nominal line representing the setting of the cutting tool; * yellow – the actual edge
after cutting; * green – mean line of inequality reduced to a straight line [own study]



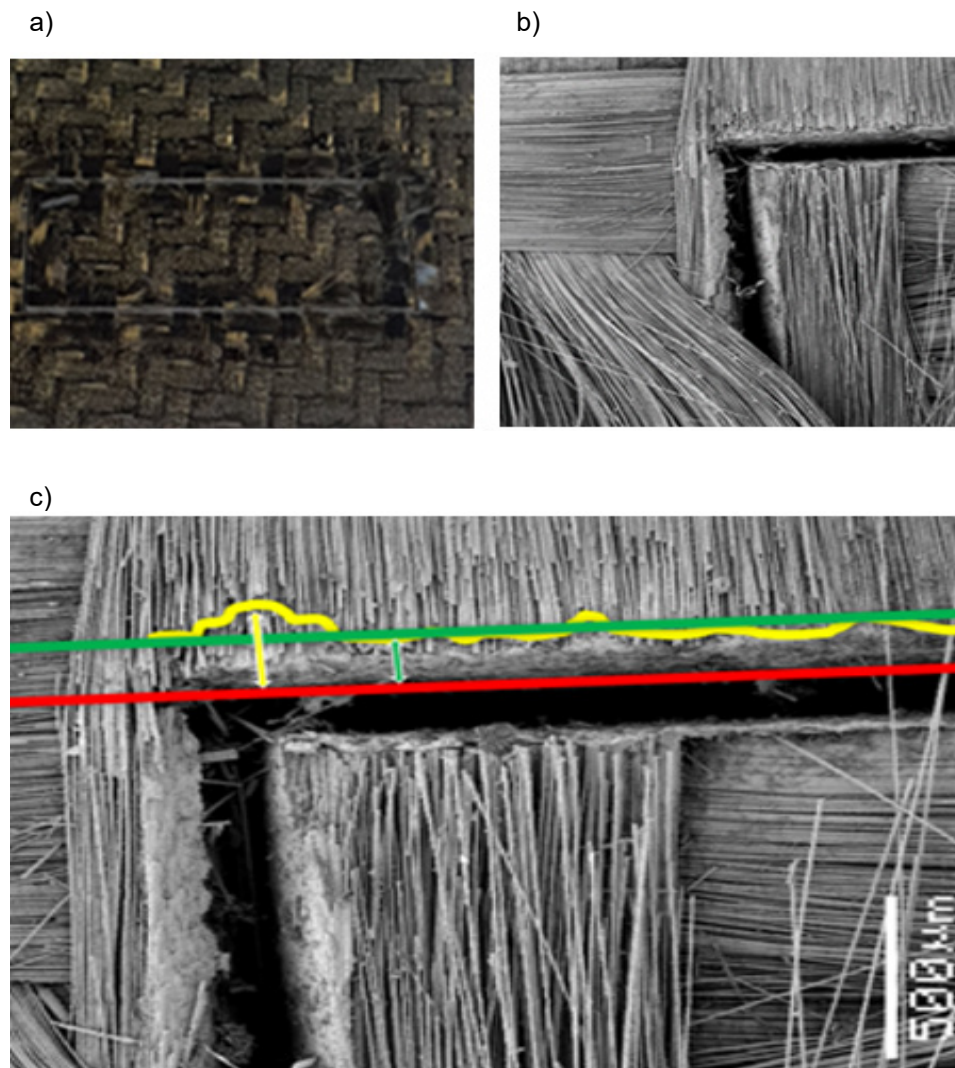
Rys. 5. Fotografia i pomiary dla cięcia kompozytu CFRP + L285 z zastosowaniem metody frezowania: a) makroskopowa fotografia próbki; b) fotografia mikrofraktograficzna; c) powiększona fotografia mikrofraktograficzna z charakterystycznymi liniami oznaczonymi:
* czerwona – linia nominalna reprezentująca ustawienie narzędzia skrawającego;
* żółta – rzeczywista krawędź po cięciu; * zielona – linia średnia nierówności po zredukowaniu do linii prostej [opracowanie własne]

Fig. 5. Photographs and measurements for cutting the CFRP + L285 composite using the milling method: a) macroscopic photography of the sample; b) microfractive photography; c) enlarged microfractographic photograph with characteristic lines marked:
* red – nominal line representing the setting of the cutting tool; * yellow – the actual edge after cutting; * green – mean line of inequality reduced to a straight line [own study]



Rys. 6. Fotografia i pomiary dla cięcia kompozytów CFRP + L285 ciętych strumieniem wody ze ścierniwem: a) makroskopowa fotografia próbki; b) fotografia mikrofraktograficzna; c) powiększona fotografia mikrofraktograficzna z charakterystycznymi liniami oznaczonymi:
 * czerwona – linia nominalna reprezentująca ustawienie narzędzia skrawającego;
 * żółta – rzeczywista krawędź po cięciu; * zielona – linia średnia nierówności po zredukowaniu do linii prostej [opracowanie własne]

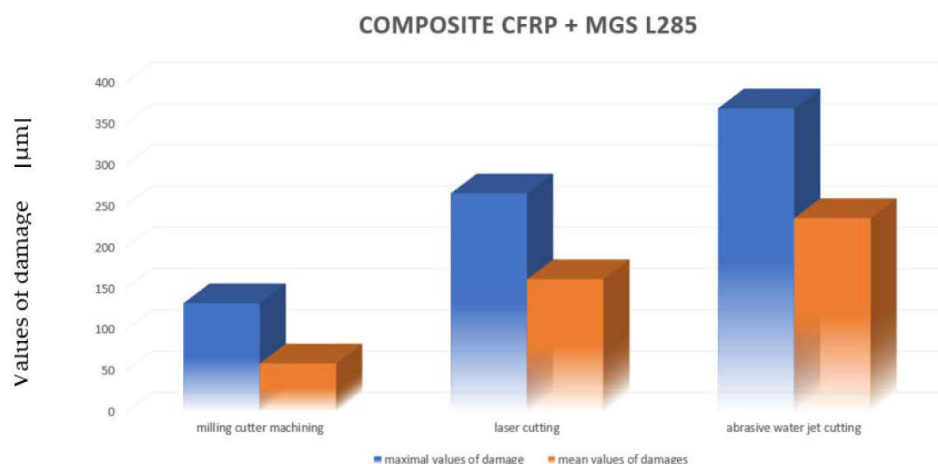
Fig. 6. Photography and measurements for cutting CFRP + L285 composites cut with abrasive water jet: a) macroscopic photography of the sample; b) microfractive photography; c) enlarged microfractographic photograph with characteristic lines marked:
 * red – nominal line representing the setting of the cutting tool; * yellow – the actual edge after cutting; * green – mean line of inequality reduced to a straight line [own study]



Rys. 7. Fotografia i pomiary kompozytowe CFRP + L285 kompozytowe cięte wiązką laserową:
 a) makroskopowa fotografia próbki; b) fotografia mikrofraktograficzna;
 c) powiększona fotografia mikrofraktograficzna z charakterystycznymi liniami oznaczonymi:
 * czerwona – linia nominalna reprezentująca ustawienie narzędzia skrawającego;
 * żółta – rzeczywista krawędź po cięciu; * zielona – linia średnia nierówności po zredukowaniu do linii prostej [opracowanie własne]

Fig. 7. Composite photography and measurements CFRP + L285 composite laser beam cut:
 a) macroscopic photography of the sample; b) microfractive photography;
 c) enlarged microfractographic photograph with characteristic lines marked:
 * red – nominal line representing the setting of the cutting tool; * yellow – the actual edge after cutting; * green – mean line of inequality reduced to a straight line [own study]

Na rysunku 8 przedstawiono wyznaczone w eksperymentach wartości uszkodzeń w postaci wykresu słupkowego (kolor niebieski) oraz średnie wartości uszkodzeń (pomarańczowy) dla kompozytu węglowego i metod jego cięcia.



Rys. 8. Porównanie wyników pomiarów dla maksymalnych uszkodzeń i średniej wartości uszkodzeń na odcinku pomiarowym dla kompozytu CFRP+L285 w zależności od metody cięcia [opracowanie własne]

Fig. 8. Comparison of the measurement results for the maximum damage and the average damage value on the measuring section for the CFRP + L285 composite depending on the cutting method [own study]

Na powyższym wykresie zestawiono wyniki pomiarów dla konkretnej metody cięcia stosowanej do frezowania kompozytów węglowych. Najniższą wartość maksymalnych uszkodzeń stwierdzono w przypadku obróbki frezem (132 μm), najwyższą – dla obróbki strumieniem wodno-ściernym (368 μm), podczas gdy pomiary średniej wartości uszkodzeń były również najniższe dla obróbki frezem (59 μm), prawie 3 razy bardziej korzystne niż w przypadku obróbki strumieniem wodno-ściernym (161 μm). Najwyższą średnią uszkodzeń odnotowano dla cięcia strumieniem wodno-ściernym (235 μm), była to zatem najmniej korzystna metoda cięcia.

4. Wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły ocenić wpływ danej metody cięcia na powierzchnię kompozytu po obróbce, która nie jest bez znaczenia dla produktu końcowego zarówno pod względem wyglądu, jak i wytrzymałości.

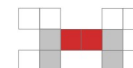
Na podstawie wyników badań i analizy wyżej omawianych przypadków można stwierdzić, że nie ma uniwersalnej metody do cięcia kompozytu. Wybór metody zależy od wielu zmiennych, takich jak typ kompozytu, jego zastosowanie, parametry obróbki itp. Frezowanie okazało się najlepszą z analizowanych metodą obróbki. Przy założeniu odpowiedniej jakości laminatu (wystarczające nasycenie żywicy – ręczne laminowanie i czynnik ludzki mają znaczący wpływ na jakość kompozytu), miało ono najmniejszy wpływ zarówno na krawędź skrawającą, jak i rozwarstwienie kompozytowe. Jednak strumień wody pod ciśnieniem spowodował lokalne rozwarstwienie kompozytu CFRP, zwłaszcza w miejscach przebicia.

Testy cięcia wiązką laserową zakończyły się zostały niepowodzeniem. Było to najprawdopodobniej spowodowane zbyt niską mocą lasera. Materiału nie udało się wyciąć, a powierzchnia preparatu została uszkodzona.

Bibliografia

- [1] Ashby, M.F., Jones, P.R., „Materiały inżynierskie. T. 2”, WNT, Warszawa 1996.
- [2] Azmi, I., Lin, R.J.T., Bhattacharyya, D., „Badanie obrabialności kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknem szklanym podczas frezowania końcowego”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 64(2013), 247–261, doi: 10.1007/s00170-012-4006-6.
- [3] Bayraktar, S., Turgut, Y., „Badanie sił cięcia i chropowatości powierzchni w frezowaniu polimerowego materiału kompozytowego wzmocnionego włóknem węglowym”, *Materiali in tehnologije/Materiały i technologie* 50(4),(2016), 591–600.
- [4] Burek, J., Lisowicz, J., Rydzak, T., Szajna, A., „Problemy kształtowania ubytkowego materiału kompozytowych”, *RUTMech XXXIV* 89(4/17),(2017), 435–447.
- [5] „Departament Obrony Podręcznik. Kompozytowe Materiały Podręcznik, MIL-HDBK 17-1F. Tom 1: Polimer Matrix Kompozyty. Wytyczne do charakterystyki materiałów konstrukcyjnych”, 2002.
- [6] „Departament Obrony Podręcznik. Kompozytowe Materiały Podręcznik, MIL-HDBK 2F. Tom 2: Polimer Matrix Kompozyty. Właściwości materiałowe”, 2002.
- [7] „Departament Obrony Podręcznik. Kompozytowe Materiały Podręcznik, MIL-HDBK-3F. Tom 3: Polimer Matrix Kompozyty. Wykorzystanie materiału, Projektowanie i analiza”, 2002.
- [8] Geier, N., „Wpływ orientacji włókien na siłę cięcia w frezowaniu w górę i w dół kompozytów UD-CFRP”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 111(2020), 881–893, doi: 10.1007/s00170-020-06163-3.
- [9] German, J., „Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych”, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2001.
- [10] Hyla, I., „Wybrane zagadnienia z inżynierii materiałów kompozytowych”, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1978.
- [11] Irving, P.E., Soutis, C. (red.), „Kompozyty polimerowe w przemyśle lotniczym” (“Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering”), Elsevier, 2020.
- [12] Józwik, J., Tofil, A., Banaszek, M., Kuric, I., „Wybrane aspekty obróbki skrawaniem polimerowych kompozytów i oceny chropowatości powierzchni”, *Postępy Nauki i Techniki* 15(2012), 205–220.
- [13] Królikowski, W., „Polimerowe kompozyty konstrukcyjne”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.
- [14] Lasri, L., Nouari, M., Mansori, M.E., „Odporność na zużycie i indukowane uszkodzenia skrawania elementów aeronautycznych FRP uzyskane w wyniku obróbki”, *Wear* 271(2011), 2542–2548.
- [15] Liu, X., Mu, C., Wang, J., Yuan, K., „Metoda monitorowania stanu obrabiarki obrabiać maszyny do cięcia maszynowego. Mechanika stosowana i materiały”, *Appl. Mech. Mater.* 411–414(2013), 1610–1615, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.411-414.1610.
- [16] Oczóś, K., „Obróbka strumieniem wodno-ściernym materiałów metalowych i niemetalowych. Cz. I i II”, *Mechanik* 11(1992), 349–396.
- [17] Oczóś, K., „Kompozyty włókniste – właściwości, zastosowanie, obróbka ubytkowa”, *Mechanik* 81(7),(2008), 579–592.
- [18] Ozkan, D., Gok, M.S., Oge, M., Karaoglanli, A.C., „Analiza zachowania frezowania kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknem węglowym (CFRP)”, *Materials Today: Proceedings* 11(2019), 526–533.
- [19] „Podręcznik materiałów kompozytowych” 17(2017), www.cmh17.org.
- [20] Priyanka, P., Dixit, A., Mali, H.S., „Hybrydowe kompozyty tekstylne o wysokiej wytrzymałości z włóknami węglowymi, kevlarowymi i e-szklanymi dla konstrukcji odpornych na uderzenia”, *Mech. Compos. Mater.* 53(2017), 685–704, doi: 10.1007/s11029-017-9696-2.
- [21] Sullivan, R.W., Hwang, Y., Rais-Rohani, M., Lacy, T., „Analiza strukturalna i testowanie ultralekkiego skrzydła bezzałogowo-powietrzno-powietrznego Carbon-Composite”, *J. Aircr.* 46(3),(2009), 814–820.

- [22] Trzepieciński, T., „Wybór metody materiałów kompozytowych”, *STAL Metale & Nowe Technologie* 11–12(2018), 10–14.
- [23] Uhlmann, E., Sammler, F., Richarz, S., „Obróbka kompozytów wzmocnionych węglem i włóknem szklanym”, *Procedia CIRP* 46(2016), 63–66.
- [24] <https://www.eckert.com.pl/pl/kompendium/815,ciecie-materialow-kompozytowych-za-po-moca-maszyn-do-ciecia-cnc.html> (dostęp: 19.09.2020).
- [25] www.magazynprzemyslowy.pl, „Laserowa obróbka materiałów kompozytowych” (dostęp: 19.09.2020).



Stanowisko do badania trwałości zmęczeniowej sprężyn naciskowych

Piotr Swacha¹, Maciej Kotyk^{2*}, Wojciech Ziółkowski³, Radosław Stachowiak⁴

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: pioswa002@utp.edu.pl

² Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

³ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: wojzio002@utp.edu.pl

⁴ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: radsta005@utp.edu.pl

* Autor korespondencyjny; e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

Streszczenie: W pracy omówiono wykonanie oraz realizację projektu stanowiska do badania trwałości zmęczeniowej sprężyn naciskowych stosowanych w układach zawieszenia pojazdów szynowych. Przedstawiono także warunki pracy badanych sprężyn. Wyznaczono ich charakterystyki oraz sztywności. Na podstawie uzyskanych danych oraz znajomości warunków eksploatacyjnych opracowano plan badawczy. Określono założenia konstrukcyjne stanowiska badawczego, które powinny być spełnione, aby w jak największym stopniu odzwierciedlać warunki eksploatacyjne. Przedstawiono najważniejsze cechy konstrukcyjne zaprojektowanego stanowiska. Zaprezentowano wykonane stanowisko oraz określono jego potencjał badawczy.

Słowa kluczowe: stanowisko badawcze, badania, sprężyna, element podatny, trwałość zmęczeniowa, pojazdy szynowe

Stand for testing the fatigue life of compression springs

Piotr Swacha¹, Maciej Kotyk^{2*}, Wojciech Ziółkowski³, Radosław Stachowiak⁴

¹ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: pioswa002@utp.edu.pl

² UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

³ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: wojzio002@utp.edu.pl

⁴ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: radsta005@utp.edu.pl

* Correspondent author; e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

Summary: The main purpose of the work was to prepare and implement the design of the stand for testing the fatigue life of compression springs used in the

suspension systems of rail vehicles. The work conditions of the tested springs are discussed. Their characteristics and stiffness were determined. Based on the data obtained and knowledge of the operating conditions, a research plan was developed. The constructional assumptions were determined that should be met by the test stand in order to reflect the operating conditions as much as possible. The most important structural features of the designed stand are presented. The performed stand was presented and its research potential determined.

Key words: test stand, tests, spring, flexible element, fatigue life, rail vehicles

1. Wstęp

Połączenia podatne to często bardzo istotne elementy wielu konstrukcji. Element podatny występujący w takim połączeniu umożliwia występowanie odkształceń sprężystych pod działaniem obciążenia zewnętrznego oraz ma zdolność do gromadzenia energii. Walory te są bardzo często pożądane w węzłach konstrukcyjnych, co skutkuje ich popularnością.

Najczęściej stosowanym rodzajem elementów podatnych są sprężyny. Znaczącą odkształcalność uzyskuje się w nich poprzez nadanie im odpowiedniego kształtu. Sprężyny wykorzystuje się w celu przejmowania sił zewnętrznych, kształtowania charakterystyki dynamicznej maszyny lub pojazdu, akumulowania energii, wykonywania określonej pracy mechanicznej, ustalenia i łączenia elementów oraz pomiarów obciążeń i ugięć.

Istnieje wiele kryteriów podziału sprężyn, do najważniejszych zaliczyć można rodzaj dominujących naprężeń w przekroju, stan obciążenia sprężyny oraz jej geometrię. Znamioną cechą sprężyn jest ich charakterystyka, czyli zależność pomiędzy obciążeniem a odkształceniem. Stosunek obciążenia do odkształcenia nazywa się sztywnością sprężyny.

Wybór odpowiedniego typu sprężyny o pożądanej charakterystyce i właściwym kształcie uzależniony jest od wymagań, jakie stawia konstruktor względem danego połączenia podatnego. W budowie maszyn najczęściej wykorzystuje się walcowe sprężyny śrubowe. Pośród tych sprężyn wyróżnia się sprężyny naciskowe [9] oraz naciągowe [10]. Sztywność walcowych sprężyn śrubowych R wyznaczyć można z zależności:

$$R = \frac{F}{x} \quad (1)$$

gdzie:

- F – siła obciążająca,
- x – ugięcie sprężyny.

W doborze sprężyny często bardzo ważnym kryterium jest określona trwałość. Trwałość zmęczeniową sprężyny określa liczba cykli zmiany obciążenia (najczęściej jednostronnie tętniącego) do wystąpienia pęknięcia zmęczeniowego lub do osiągnięcia granicznej wartości obciążenia wynikającego z relaksacji naprężeń w materiale. Zależna jest ona od wytrzymałości na rozciąganie oraz od granicy plastyczności materiału, z jakiego został wykonany pręt sprężyny.

Występowanie wtrąceń w strukturze materiału w postaci tlenków, siarczków i azotków znacząco zmniejsza trwałość sprężyn [1]. Wpływ na nią mają również sposób i parametry obróbki cieplnej oraz stan warstwy powierzchniowej, w której dąży się do uzyskania jak najmniejszej chropowatości.

Druty sprężyn naciskowych często są umacniane zgniotem powierzchniowym, np. poprzez kulowanie. Proces ten pozwala uzyskać korzystny stan naprężeń własnych ściskających w umocnionej warstwie, a także wprowadza poprawę w mikrogeometrii powierzchni. Wszystkie wymienione parametry wpływają na

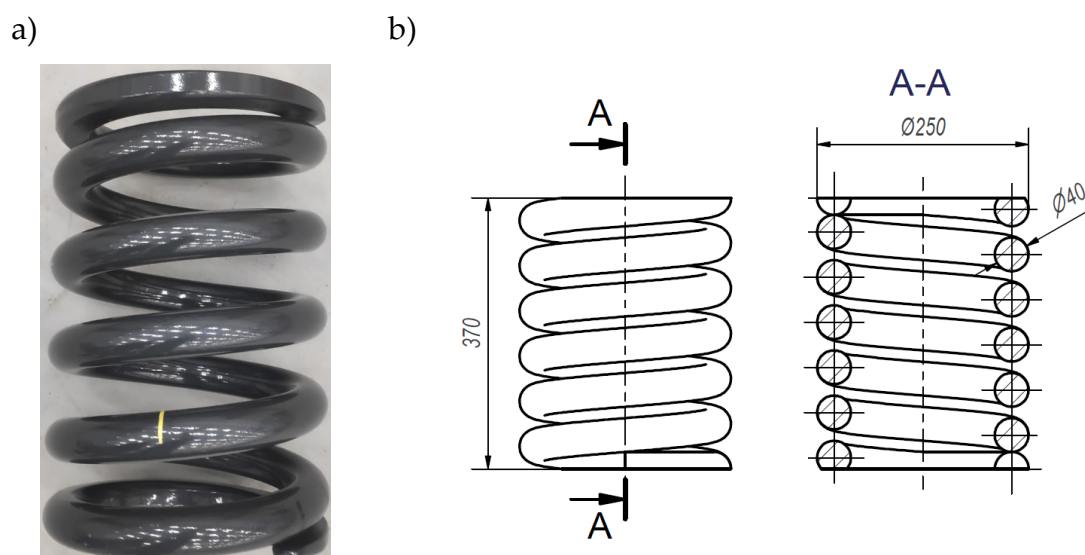
trwałość zmęczeniową, a tym samym – na warunki jej użytkowania. W konstrukcjach, których funkcjonowanie wiąże się z dużą odpowiedzialnością, a tym samym – znajomość trwałości sprężyny związana jest bezpośrednio z bezpieczeństwem osób i mienia, priorytetowe staje się przewidywanie czasu, po jakim sprężyna ulegnie uszkodzeniu, przejawiającym się najczęściej jako pęknięcie. Gdy zmienne są tak liczne, trudno jest prawidłowo analitycznie określić trwałość zmęczeniową sprężyny, dlatego najczęściej określa się ją w oparciu o badania przeprowadzone w laboratoriach. Próbkę poddawane są obciążeniom odpowiadającym warunkom eksploatacyjnym. Do tego celu projektowane są specjalistyczne stanowiska. Najczęściej pozwalają one na badanie sprężyn obciążonych zarówno osiowo, jak i poprzecznie [1–3, 5, 7, 8].

W pracy omówiono projekt i wykonanie stanowiska do badania trwałości zmęczeniowej sprężyn naciskowych, wykorzystywanych w układzie zawieszenia pojazdu szynowego, oraz procedury przygotowania procesu badawczego.

2. Stanowisko badawcze

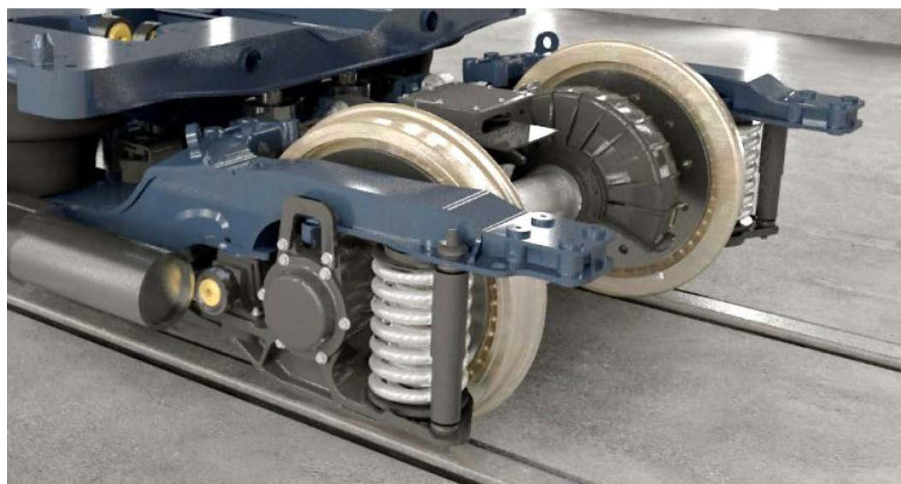
2.1. Obiekt badań

Elementem badanym, dla którego opracowano projekt stanowiska badawczego, jest walcowa naciskowa sprężyna śrubowa. Sprężyna ta przedstawiona na rysunku 1 stosowana jest w pierwszym stopniu usprężynowania zestawów kołowych o konstrukcji prowadzenia wahaczowego [11]. Przykład tego typu rozwiązania technicznego przedstawiono na rysunku 2, natomiast schemat zawierający poszczególne elementy układu – na rysunku 3.



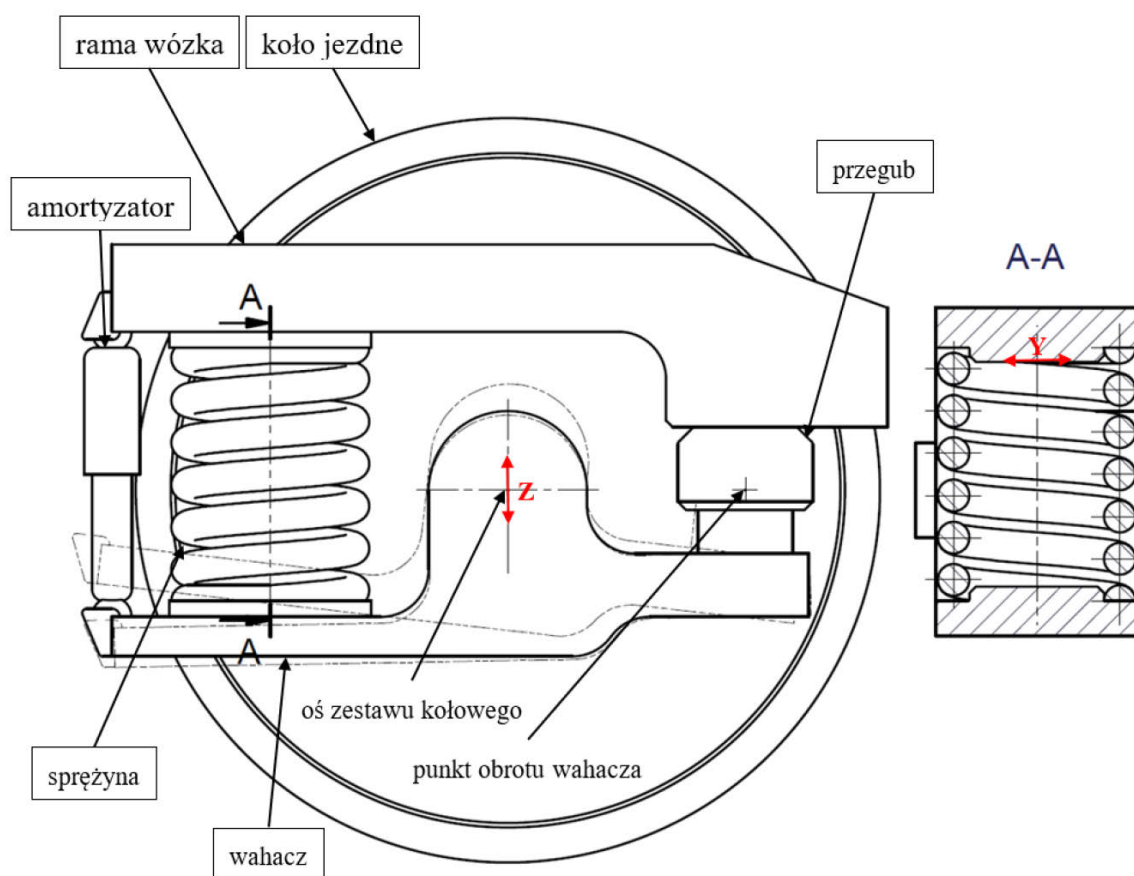
Rys. 1. Walcowa sprężyna śrubowa: a) widok rzeczywistego obiektu,
b) wymiary [opracowanie własne]

Fig. 1. Cylindrical coil spring: a) view of the real object, b) dimensions [own study]



Rys. 2. Przykład zawieszenia zestawu kołowego zastosowanego w wózkach Bombardier FLEXX Compact [4]

Fig. 2. An example of a wheel set suspension used in Bombardier FLEXX Compact rail bogies [4]



Rys. 3. Schematyczne przedstawienie omawianego układu zawieszenia [opracowanie własne]

Fig. 3. Schematic representation of the discussed suspension system [own study]

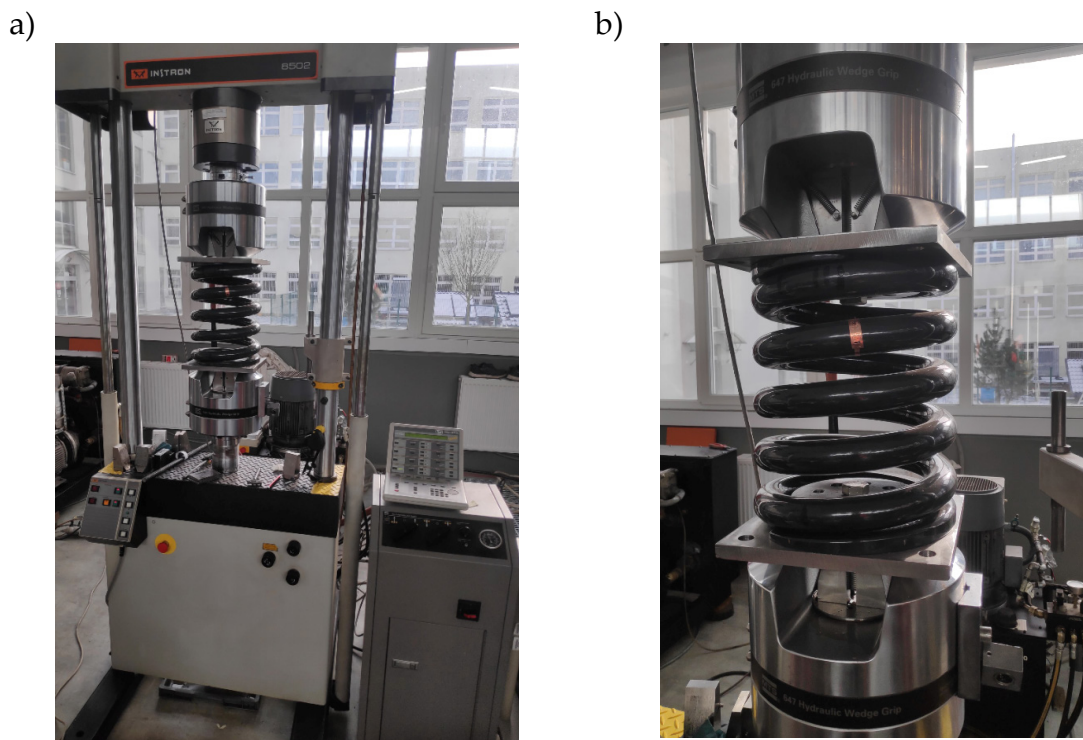
Prowadzenie typu wahaczowego jest bardzo często stosowane w konstrukcjach podwozi pojazdów szynowych. Umożliwia ono projektowanie krótszych, niższych i lżejszych ram wózków. Konstrukcja tego typu pozwala przenosić duże siły trakcyjne. Podatny przegub, do którego mocuje się wahacz, pozwala uzyskać skrętność

zestawu kołowego w płaszczyźnie poziomej. Poprawia to współpracę kół z szynami toru, szczególnie w momencie jazdy po łuku, gdy koło nabiega na szynę [6, 11].

Skłonność podatnego przegubu w płaszczyźnie poziomej oraz odległość punktu obrotu wahacza od punktu mocowania sprężyny powodują, iż poddawana jest ona obciążeniu złożonemu. Sprężyna nie tylko jest ściskana (oś Z na rys. 3), lecz także jest nieznacznie przemieszczana poprzecznie (oś Y na rys. 3). Przemieszczenie to jest zgodne z kierunkiem osi zestawu kołowego.

2.2. Wyznaczenie charakterystyki sprężyny

Opracowanie projektu poprzedzono wyznaczeniem charakterystyk 4 wybranych sprężyn. Pozwoliły one na określenie sztywności każdej z nich. Z uzyskanych sztywności sprężyn wyznaczono wartości: maksymalną, minimalną oraz średnią, która została przyjęta za punkt odniesienia podczas projektowania i ostatecznie budowy stanowiska. Wspomniane sztywności badanych elementów podatnych wyznaczono podczas próby ściskania. Do tego celu wykorzystano hydrauliczną maszynę wytrzymałościową Instron 8502 ze specjalnie zaprojektowanymi prowadzającymi, które umożliwiły ustalenie sprężyny w osi szczęk. Widok stanowiska podczas badania przedstawiono na rysunku 4.

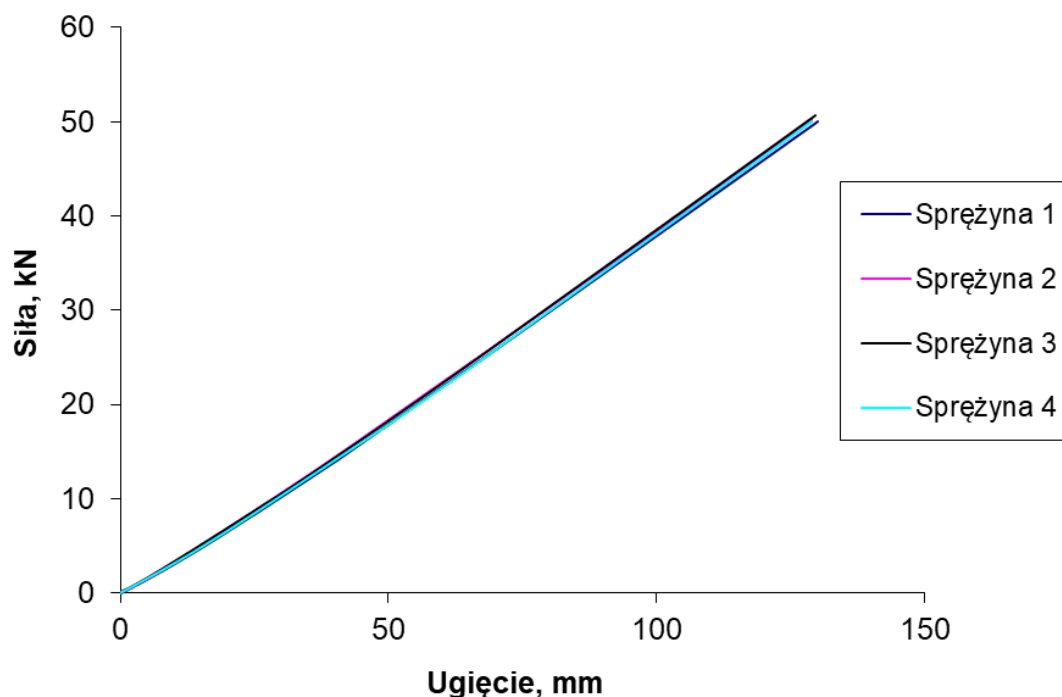


Rys. 4. Próba ściskania: a) widok maszyny, b) widok uchwytów [opracowanie własne]

Fig. 4. Compression test: a) view of the machine, b) view of the handles [own study]

Próbie ściskania prowadzono do osiągnięcia siły 50 kN. Wartość ta jest największym spodziewanym obciążeniem występującym podczas eksploatacji. Podczas próby rejestrowano chwilowe wartości siły obciążającej sprężynę oraz jej

ugięcia. Wynik badania przedstawiono na rysunku 5. W tabeli 1 zestawiono wyznaczone na podstawie wzoru 1 wartości sztywności dla poszczególnych sprężyn R_i oraz wartość maksymalną R_{max} , minimalną R_{min} oraz średnią $R_{\bar{s}}$.



Rys. 5. Przebiegi siła – ugięcie wyznaczone dla sprężyn układu trakcyjnego [opracowanie własne]

Fig. 5. Force-deflection curves for the traction system springs [own study]

Tabela 1. Wyniki sztywności poszczególnych sprężyn [opracowanie własne]

Table 1. Stiffness results of selected springs [own study]

R_1	R_2	R_3	R_4	R_{max}	R_{min}	$R_{\bar{s}}$
kN/mm						
0,380	0,385	0,386	0,382	0,386	0,380	0,383

Na podstawie wykresu można stwierdzić, że zgodnie z oczekiwaniami badane sprężyny w zakresie 10–50 kN mają charakterystykę liniową. Wyznaczone sztywności dla poszczególnych sprężyn są zgodne z założeniami konstrukcyjnymi i mieszczą się w zakresie wymaganej sztywności. Różnica między wartością maksymalną a minimalną jest niewielka w odniesieniu do wartości średniej, dlatego przy opracowywaniu planu badań posłużono się uśrednioną wartością wszystkich sztywności.

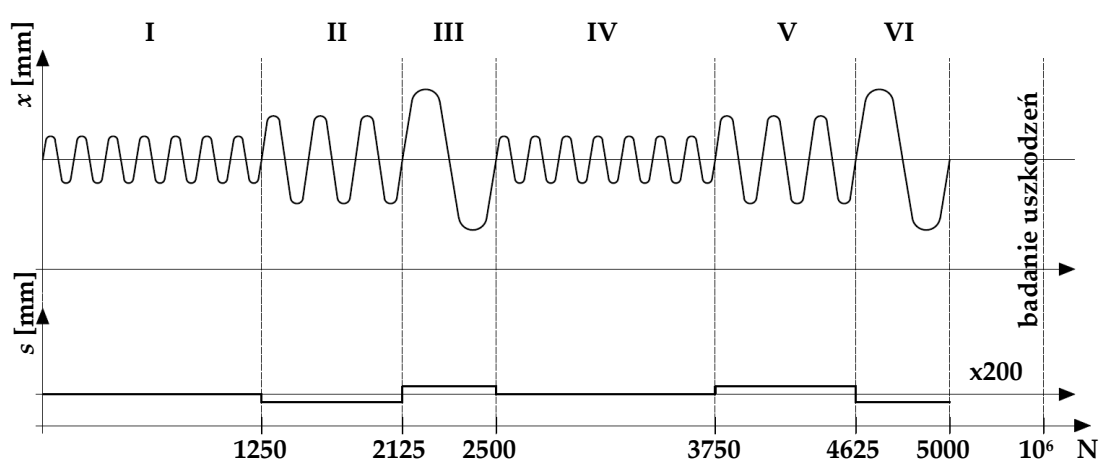
Ze względu na specyfikę stanowiska badawczego oraz ograniczenia dostępnej aparatury pomiarowej konieczne okazało się sterowanie siłownikami obciążającymi badane sprężyny za pomocą kanału przemieszczenia, pomimo że podczas eksperymentu chciano obciążyć próbki (sprężyny) ściśle określoną wartością siły. Było to możliwe, ponieważ w pierwszym etapie badania wyznaczono przebiegi siła – przemieszczenie oraz sztywność badanych sprężyn. W drugim etapie badań polegającym na określeniu trwałości zmęczeniowej sprężyn, po odpowiednim przeli-

czeniu wartości przemieszczenia (ugięcia sprężyny) układ pomiarowy rejestrował oczekiwaną wartość siły obciążającej sprężynę w funkcji liczby cykli.

Takie rozwiązanie pozwoliło na istotne skrócenie czasu badań ze względu na zwiększenie częstotliwości obciążania badanych sprężyn przez siłowniki hydrauliczne stanowiska badawczego.

2.3. Plan badań

Sprężyna podczas eksploatacji pojazdu jest obciążona zarówno od masy pojazdu, jak i od zjawisk dynamicznych zachodzących podczas jazdy. Ze względu na to, że masa pojazdu jest znana podobnie jak trasa, po której się on porusza, możliwe jest określenie przybliżonego widma obciążeń, jakie będzie oddziaływało na pojazd. Tak było w przypadku eksperymentalnej weryfikacji trwałości sprężyn, których wybrane wyniki prezentowane są w tej pracy. Podmiot użytkujący badane sprężyny określił wartości obciążeń, przemieszczeń poprzecznych s oraz cykliczność ich występowania w trakcie eksploatacji. Znając wartość sztywności średniej dla poszczególnych obciążeń, wyznaczono odpowiadające im wartości przemieszczenia x . Na podstawie otrzymanych parametrów przygotowano plan badań składający się z 6 etapów. Przedstawiono go schematycznie na rysunku 6. Wybrane parametry badania zestawiono w tabeli 2. Każdy z prezentowanych etapów zawiera w sobie określoną liczbę cykli. Wspomniane etapy badania różnią się od siebie amplitudą przemieszczeń oraz wartością przemieszczenia poprzecznego. Po każdym milionie cykli konieczne jest przeprowadzenie badań nieniszczących w celu wykrycia ewentualnych pęknięć oraz ponowne wyznaczenie charakterystyk sprężyny w celu porównania ich z tymi, które określono, zanim przystąpiono do eksperymentalnego wyznaczania trwałości sprężyn.



Rys. 6. Schematyczne przedstawienie sposobu obciążania sprężyny w każdym z VI etapów, x – przemieszczenie wzdlużne; s – przemieszczenie poprzeczne [opracowanie własne]

Fig. 6. Schematic representation of the method of loading the spring in each of the VI stages, x – longitudinal displacement; s – lateral displacement [own study]

Tabela 2. Plan badań sprężyn I stopnia usprężynowania [opracowanie własne]

Table 2. Test plan of primary suspension [own study]

Etap	Liczba cykli	Wartość średnia ugięcia, mm	Amplituda przemieszczenia, mm	Przemieszczenie poprzeczne s , mm
I	1250	90,88	12,77	0
II	875		21,34	-4
III	375		34,23	4
IV	1250		12,77	0
V	875		21,34	4
VI	375		34,23	-4

2.4. Założenia konstrukcyjne

Na prezentowanym stanowisku do odwzorowania obciążenia eksploatacyjnego niezbędne jest, aby zadać obciążenie równoległe do pionowej osi sprężyny. Skutkiem tego obciążenia jest znaczne przemieszczenie (ugięcie sprężyny), które zostało zrealizowane z wykorzystaniem siłownika hydraulicznego, wyposażonego w przegub kulisty zamontowany na końcu części roboczej tłoczyska. Ruch posuwisto-zwrotny siłownika zamieniony został na ruch kątowy wahacza, który odwzorowuje pracę rzeczywistego obiektu. Zakres przemieszczeń wahacza musi być co najmniej taki jak wartości maksymalnego ugięcia sprężyny podczas warunków rzeczywistych. Dodatkowo opisywany wahacz musi być skonstruowany w taki sposób, aby możliwe było osiągnięcie luzu montażowego oraz wychylenie pozwalające umieścić sprężynę na stanowisku.

Sprężyna poprzez podatność skrętną przegubu prowadzenia wahaczowego wychylana jest również w osi poprzecznej, która jest zgodna z osią zestawu kołowego. W celu realizacji przemieszczenia poprzecznego s również zastosowano siłownik hydrauliczny, którego ruch posuwisto-zwrotny zmienia położenie poziomej platformy przesuwnej, na której umieszczono badany obiekt.

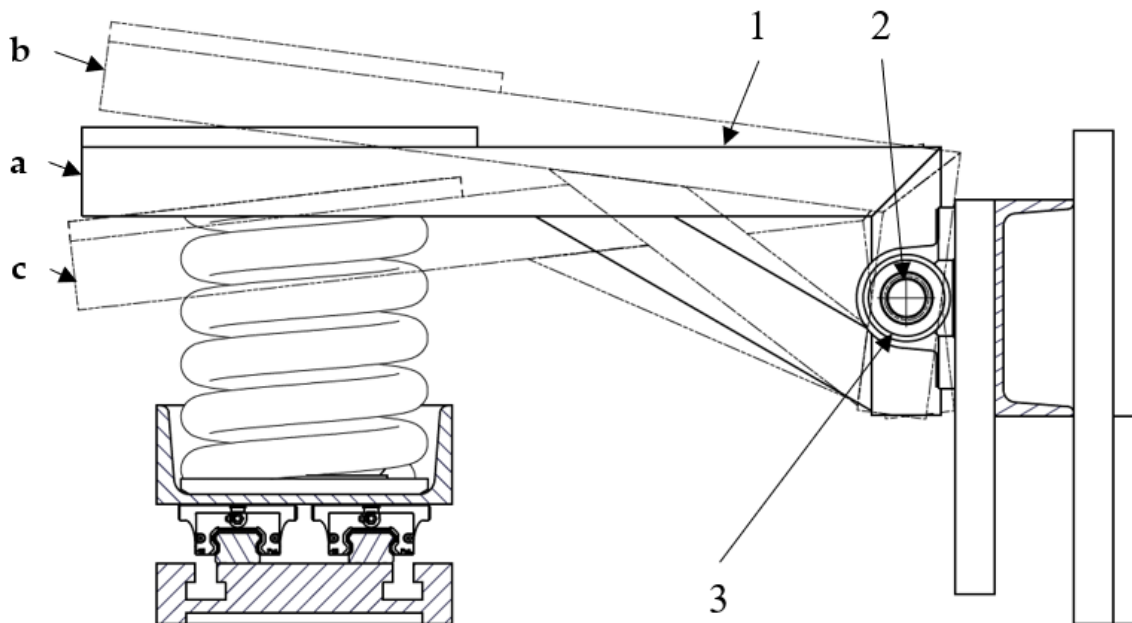
Miejsca mocowań elementów ruchomych powinny mieć możliwie jak największą sztywność w celu zwiększenia wydajności badania.

Sterowanie odbywało się z wykorzystaniem systemu badawczego do struktur wielkogabarytowych wyposażonego w kontroler IST Labtronic 8800.

2.5. Cechy konstrukcyjne stanowiska badawczego

Pierwszym postanowieniem podczas realizacji projektu stanowiska było obrócenie układu o 180° w taki sposób, aby siła nacisku na sprężynę była wywierana od góry. Zabieg ten pozwolił na łatwiejsze zamontowanie siłowników wymuszających obciążenie. W związku z tym, że przewidywano, iż możliwa do uzyskania częstotliwość obciążania pojedynczej sprężyny dla etapu o największej częstotliwości będzie mniejsza niż 5 Hz, postanowiono zaprojektować stanowisko umożliwiające badanie jednocześnie dwóch sprężyn.

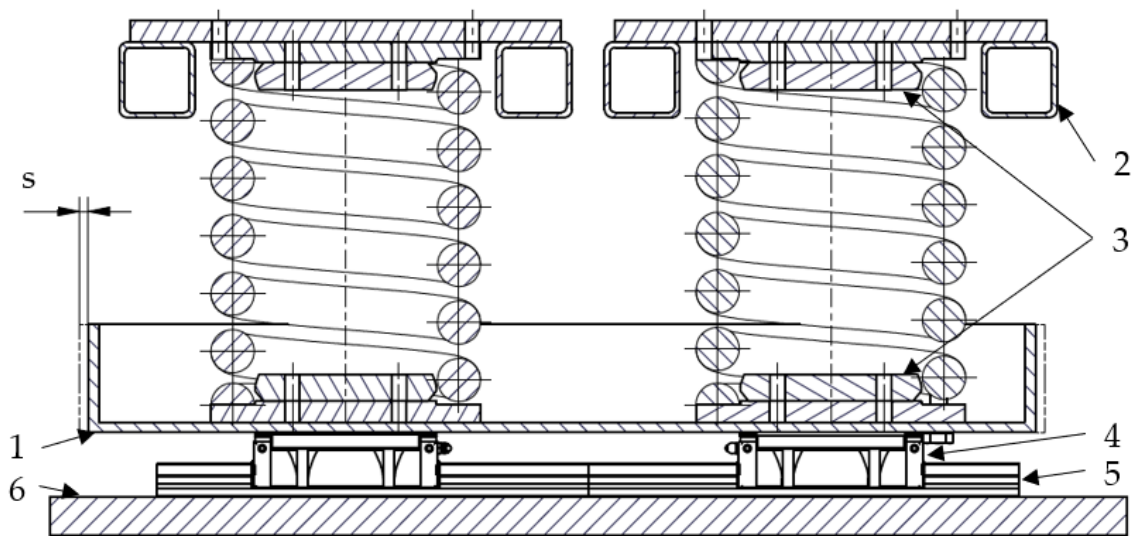
Jednym z ważniejszych założeń podczas realizacji projektu było odzwierciedlenie sposobu obciążania sprężyny. Na rysunku 7 przedstawiono zaprojektowany wahacz (1) w 3 pozycjach wychylenia. Położenie *a* odzwierciedla pozycję, w której element podatny obciążony jest wyłącznie masą pojazdu. Wychylenie oznaczone literą *b* to pozycja, która umożliwia montaż próbki na stanowisku. Maksymalne obciążenie, jakiemu poddawana jest sprężyna, odpowiada pozycji *c*. Wahacz wykonano ze znormalizowanych stalowych elementów konstrukcyjnych. Obrót zrealizowano za pomocą osi (2) osadzonej w łożyskach samonastawnych (3), łożyska te umiejscowiono w oprawach, które na sztywno zamocowano do reszty stanowiska.



Rys. 7. Wahacz stanowiska badawczego [opracowanie własne]

Fig. 7. Control arm of test stand [own study]

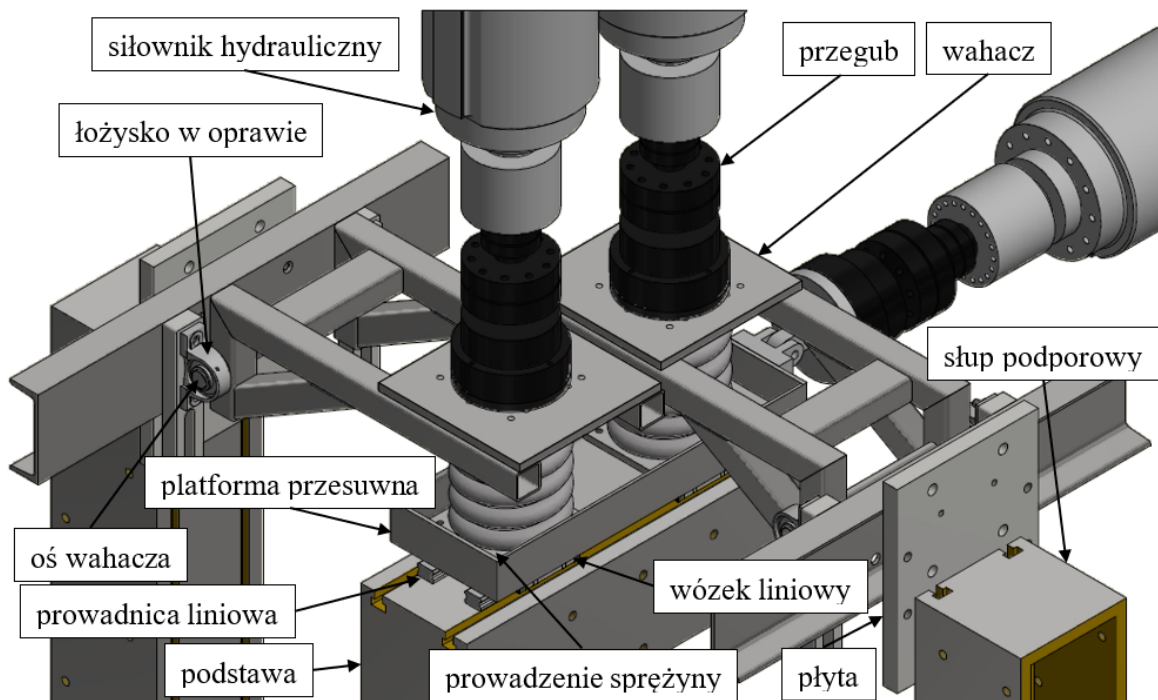
Aby odzwierciedlić przemieszczenie poprzeczne, zaprojektowano platformę przesuwą (1) przedstawioną na rysunku 8. Przesuw platformy możliwy jest o skok s . Zgodnie z planem badania przedstawionym w tabeli 1 wynosi on ± 4 mm, w przypadku zaprojektowanego układu możliwy jest skok o wartości ± 80 mm. Widoczne dwie sprężyny zostały ustalone względem pozycji wahacza (2) oraz platformy za pomocą prowadzeń (3), których geometria odzwierciedla rzeczywisty kształt prowadzeń znajdujących się na pojeździe. Ruch prostoliniowy umożliwiają wózki liniowe (4) poruszające się po prowadnicach liniowych (5). Prowadnice zamocowane zostały do sztywnej podstawy (6).



Rys. 8. Schemat ustawienia sprężyn na platformie przesuwnej [opracowanie własne]

Fig. 8. Diagram of spring setting on the sliding platform [own study]

Na rysunku 9 przedstawiono widok całego projektu stanowiska badawczego. Zaprezentowano na nim układ siłowników hydraulicznych, wymuszających obciążenie. Dwa siłowniki zostały przymocowane do każdego z wahaczy, natomiast jeden – bezpośrednio do platformy przesuwnej. Można zauważyć także orientację dwóch identycznych wahaczy względem platformy przesuwnej. Usytuowanie ich naprzeciw siebie pozwala zmniejszyć rozmiary platformy, gdyż badane próbki są w możliwie najmniejszej odległości.



Rys. 9. Schemat stanowiska badawczego [opracowanie własne]

Fig. 9. Diagram of the test stand [own study]

3. Wykonanie i doświadczalna weryfikacja poprawności funkcjonowania stanowiska badawczego

Na rysunku 10 przedstawiono fotografię wykonanego stanowiska podczas badania. Można dostrzec dodatkowe elementy, które zamontowano podczas budowy w celu zwiększenia sztywności stanowiska. Wykonanie tych elementów wymagało użycia specjalistycznego sprzętu, maszyn do obróbki oraz szeregu prac wykonawczych i montażowych. Działan tych nie omówiono jednak szerzej.

Dodatkową cechą stanowiska jest możliwość regulacji wysokości położenia wahacza poprzez zamocowanie go do płyty, której położenie można płynnie zmieniać względem słupa. Położenie słupów względem podstawy również może zostać zmienione, gdyż zamocowano je na stalowej podłodze, do której można je dowolnie przytwierdzić. Te cechy stanowiska wraz z dużym zakresem posuwu platformy przesuwnej dają możliwość prowadzenia badań innych układów zawieszenia pojazdów szynowych.



Rys. 10. Stanowisko badawcze podczas badania [opracowanie własne]

Fig. 10. Test stand during the test [own study]

4. Podsumowanie

Opisane stanowisko zbudowane zostało w Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji w Bydgoszczy. Pozwoliło ono na rozszerzenie zakresu możliwości badawczych o zagadnienia związane z wyznaczaniem trwałości zmęczeniowej sprężyn układów zawieszenia pojazdów trakcyjnych.

Wyznaczone charakterystyki badanych sprężyn umożliwiły zaplanowanie procesu badawczego, a także pozwoliły dokładniej określić potrzebny zakres roboczy projektowanego stanowiska.

Wykonane stanowisko charakteryzuje się prostą konstrukcją. Daje także możliwość dostosowania położenia niektórych elementów względem obiektu badawczego. Pozwala to odwzorować warunki eksploatacji pracy układów zawieszenia o różnej charakterystyce. Duża sztywność konstrukcji oraz możliwość jednoczesnego badania dwóch obiektów jednocześnie pozwalają na przyspieszenie badań trwałości sprężyn, a zastosowany układ przemieszczenia poprzecznego – na obciążanie jednocześnie w dwóch osiach, co lepiej odwzorowuje warunki rzeczywiste.

Możliwość szybkiego demontażu próbek pozwala monitorować stan uszkodzenia (pęknięcia) zmęczeniowego za pomocą metod nieniszczących. Badania prowadzone na tym stanowisku umożliwiają określenie trwałości badanych sprężyn w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych.

Bibliografia

- [1] Baranowski, B., „Sprężyny metalowe”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.
- [2] Berger, C., Kaiser, B., “Results of very high cycle fatigue tests on helical compression springs”, *Int. J. Fatigue* 28, (2006), 1658–1663.
- [3] Dietrich, M., „Podstawy konstrukcji maszyn. Tom 2”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2015.
- [4] “Equipment for mainline vehicles”,
<https://rail.bombardier.com/en/solutions-and-technologies/equipment/mainline-equipment.html>
- [5] Furuya, Y., Matsuoka, S., Abe, T., “Inclusion-Controlled Fatigue Properties of 1800 MPA-Class Spring Steels”, *Metall. Mater. Trans.* 35(12), (2004), 3737–3744.
- [6] Iwnicki, S., “Handbook of railway vehicle dynamics”, CRC Press, Boca Raton 2006.
- [7] Ji, S., Huang, H., Huang, G., Qin, X., Shui, G., “Experimental study on fatigue damage of train K6 spring”, *Przegląd Elektrotechniczny* 89(3), (2013), 131–133.
- [8] Mroziński, S., „Podstawy konstrukcji maszyn: laboratorium”, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz 2010.
- [9] „PN-EN 13906-1, Sprężyny śrubowe walcowe z drutu lub pręta okrągłego – Obliczanie i konstrukcja – Część 1: Sprężyny naciskowe”.
- [10] „PN-EN 13906-2, Sprężyny śrubowe walcowe z drutu lub pręta okrągłego – Obliczanie i konstrukcja – Część 2: Sprężyny naciągowe”.
- [11] „TRANSPORT SZYNOWY – niezależna strona informacyjna”,
<http://www.transportszynowy.pl/zestawykolowe1.php>





Analiza modeli rozdrabniania

Bartosz Walentyn

e-mail: bartosz@walentyn.pl

Streszczenie: Proces rozdrabniania polega na podziale materiału na poszczególne cząstki. W wyniku tego procesu następuje zmniejszenie wymiarów cząstek materiału przy równoczesnym wzroście powierzchni materiału. Wobec powyższego rozdrabnianie można rozpatrywać jako proces tworzenia nowych powierzchni. Proces rozdrabniania materiału poprzez uderzenia wykorzystywany jest w rozdrabniaczach bijakowych, które znalazły powszechne zastosowanie w przetwórstwie rolno-spożywczym czy też w przetwórstwie minerałów. Każda maszyna czy urządzenie na etapie projektowania wymagają jednak dogłębnej analizy uwzględniającej wiele aspektów pracy. Do najważniejszych z nich niewątpliwie należy zaliczyć m.in. właściwości materiałów eksploatacyjnych i urobku czy warunki pracy maszyny bądź urządzenia. W przypadku rozdrabniaczy bijakowych decydującym czynnikiem na etapie ich projektowania jest rodzaj materiału, jaki ma podlegać rozdrobnieniu. Od niego właśnie zależy, na której spośród dziewięciu najważniejszych teorii rozdrabniania materiałów powinien opierać się konstruktor rozdrabniacza. Wielu badaczy podejmowało się badań analitycznych w zakresie procesów rozdrabniania materiałów. Podstawowym problemem uniemożliwiającym jednolite ujęcie rozpatrywanego zagadnienia w modelu matematycznym jest wpływ rozmaitych czynników na proces rozdrabniania. W teoriach rozdrabniania materiałów rozpatrywane są modele uwzględniające zależności pomiędzy wydatkiem pracy na przyrost powierzchni rozdrabnianego materiału a charakterem zmienności wymiarów rozdrabnianych cząstek. Energia niezbędna do rozdrobnienia wyrażana jest jako energia potrzebna do pokonania sił spójności rozdrabnianego materiału. Zdecydowaną większość istniejących hipotez rozdrabniania sformułowano w postaci teorii wytrzymałościowych. Traktują one energię rozdrabniania jako funkcję właściwości fizycznych materiałów, a także ich cech geometrycznych. Najstarszym modelem rozdrabniania materiałów jest teoria Rittingera, sformułowana w 1867 roku. Potem powstały takie teorie, jak: Kicka, różniczkowa, Bonda, Bracha, Rebindera, Mielnikowa, Dmitreowskiego czy Flizikowskiego. Bijakowe maszyny rozdrabniające znalazły zastosowanie w różnych gałęziach gospodarki. Przykładem tego typu urządzeń mogą być młyny węglowe szybkobieżne (wykorzystywane w energetyce), rębaki bijakowe (służące do rozdrabniania biomasy), młyny laboratoryjne czy wreszcie rozdrabniacze bijakowe, służące do wytwarzania śruty (paszy dla zwierząt hodowlanych). Te ostatnie charakteryzują się stosunkowo prostą konstrukcją. Podziału ziaren zbóż dokonują zaś poprzez zderzanie ich z bijakami, znajdującymi się w komorze rozdrabniającej. W celu uzyskania rozdrobnienia w założonym stopniu wystarczy ustawić odpowiednią grubość szczelin w sicie. Rozdrabniacze bijakowe dzielą się na dwa rodzaje, tj. ssąco-tłoczące oraz zasypowe, przy czym te drugie charakteryzują się większą wydajnością.

Słowa kluczowe: rozdrabnianie, rozdrabniacz, model

Analysis of shredding models

Bartosz Walentyn

e-mail: bartosz@walentyn.pl

Summary: The essence of the shredding process consists in dividing the material into individual particles. As a result of this process, the size of the material particles is reduced with a simultaneous increase in the material surface. Accordingly, the comminution process can be viewed as a process for creating new surfaces. The process of breaking the material by impact is used in hammer shredders, which have found widespread use in agri-food or mineral processing. However, each machine or device at the design stage requires in-depth analysis in terms of many aspects of the work. The most important of them undoubtedly include, properties of consumables and excavated material and the operating conditions of the machine or device. In the case of hammer shredders, the decisive factor at the design stage is the type of material to be shredded. To design the shredder, its constructor should use one of nine most important theories of shredding materials, depending on above mentioned aspects. Many researchers have undertaken analytical research in the field of material shredding processes. The main problem that prevents a uniform approach to the issue in question in the mathematical model is the influence of various factors on the shredding process. In the theories of material shredding, models are considered that take into account the relationship between the work expenditure on the surface area of the shredded material and the nature of the size variability of the shredded particles. The energy required for grinding is expressed as the energy needed to overcome the cohesive forces of the material being ground. The vast majority of the existing shredding hypotheses have been formulated in the form of strength theories. It treat the grinding energy as a function of the physical properties of the materials as well as their geometrical properties. The oldest material shredding model is Rittinger's theory. It was formulated in 1867. Then, several next theories were created, such as: Kick's, differential, Bond's, Brach's, Rebinder's, Melnikov's, Dmitrevsky's and Flizikowski's. Hammer shredding machines are used in various branches of the economy. Examples of this type of equipment include high-speed coal mills (used in the power industry), hammer chippers (for biomass shredding), laboratory mills, and finally hammer mills for producing meal (feed for farm animals). The latter are characterized by a relatively simple design. They divide the grains of cereals by hitting them with beaters located in the crushing chamber. In order to obtain the assumed degree of shredding, it is enough to set the appropriate thickness of the slots in the sieve. Hammer shredders are divided into two types, i.e. suction-force and charging, with the second being more efficient.

Key words: shredding, shredder, model

1. Wstęp

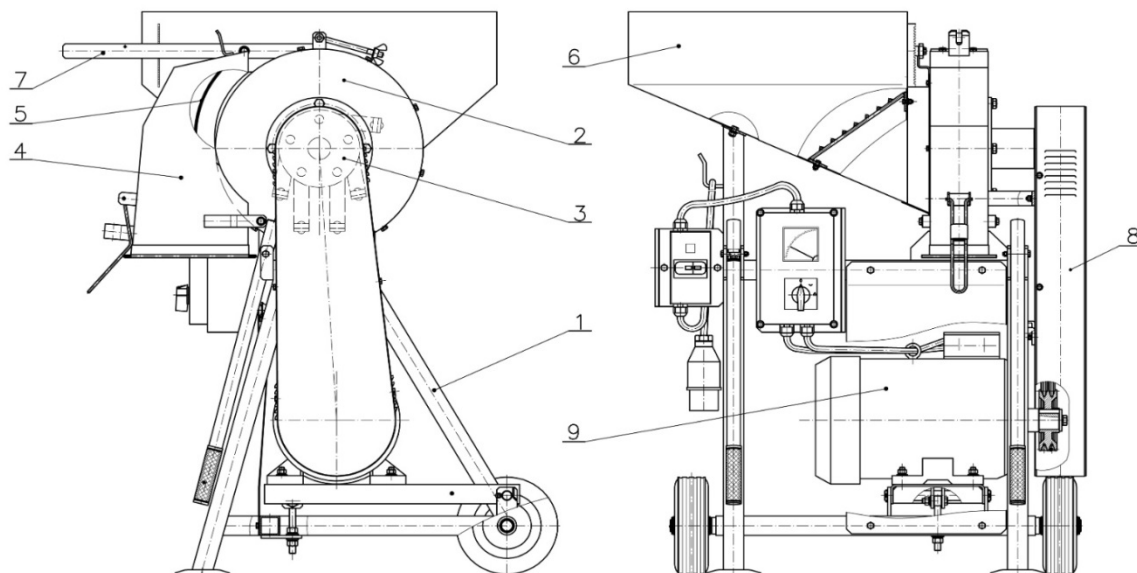
Proces rozdrabniania polega na podziale materiału na poszczególne cząstki, przy czym elementy robocze maszyny pokonują siły spójności cząstek materiału. W wyniku wspomnianego procesu następuje zmniejszenie wymiarów wyżej wymienionych cząstek materiału przy równoczesnym wzroście powierzchni materiału. Wobec powyższego rozdrabnianie można rozpatrywać jako proces tworzenia nowych powierzchni.

W maszynach rozdrabniających proces rozdrabniania materiału może zachodzić poprzez:

- rozłupywanie,
- zgniatanie,
- rozcieranie,
- rozciąganie,
- rozbijanie.

Proces rozbijania materiału poprzez uderzenia wykorzystywany jest w rozdrabniaczach bijakowych, które znalazły powszechne zastosowanie w przetwórstwie rolno-spożywczym czy też w przetwórstwie minerałów.

Przykładowy schemat konstrukcji rozdrabniacza bijakowego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat konstrukcji rozdrabniacza bijakowego [12]

1 – rama, 2 – bęben wirnika, 3 – wirnik, 4 – workownik, 5 – sito, 6 – kosz zasypowy wraz z kratką zabezpieczającą, 7 – zasuwą ręczną, 8 – przekładnia pasowa wraz z osłoną napędu, 9 – instalacja elektryczna

Fig. 1. Hammer shredder construction diagram [12]

1 – frame, 2 – rotor drum, 3 – rotor, 4 – bagger, 5 – strainer, 6 – charging hopper with safety grill, 7 – manual latch, 8 – belt transmission with drive guard, 9 – electrical installation

Każda maszyna czy urządzenie na etapie projektowania wymagają jednak dogłębnej analizy uwzględniającej wiele aspektów pracy. Do najważniejszych z nich niewątpliwie należy zaliczyć m.in. właściwości materiałów eksploatacyjnych i urobku czy warunki pracy maszyny bądź urządzenia. W przypadku rozdrabniaczy bijakowych decydującym czynnikiem na etapie ich projektowania jest rodzaj materiału, jaki ma podlegać rozdrobnieniu. Od niego właśnie zależy, na której spośród dziewięciu najważniejszych teorii rozdrabniania materiałów powinien opierać się konstruktor rozdrabniacza.

Publikację tę opracowano w celu przybliżenia problematyki rozdrabniania materiałów ziarnistych, które jest realizowane za pomocą rozdrabniaczy bijakowych. Dokonano klasyfikacji istniejących modeli rozdrabniania oraz opisano ich zastosowania na etapie projektowania i eksploatacji wyżej wymienionych rozdrabniaczy.

2. Przegląd modeli rozdrabniania

Wielu badaczy podejmowało się badań analitycznych w zakresie procesów rozdrabniania materiałów. Wśród nich przodowali: P. Rittinger, F. Kick, F.C. Bond, I. Rebinder, S. Melnikow, Walker, J. Dmitrewski, J. Flizikowski [1, 2, 4–7].

Podstawowym problemem uniemożliwiającym jednolite ujęcie rozpatrywanego zagadnienia w modelu matematycznym jest wpływ rozmaitych czynników na proces rozdrabniania [1, 2, 4–7].

W teoriach rozdrabniania materiałów rozpatrywane są modele uwzględniające zależności pomiędzy wydatkiem pracy na przyrost powierzchni rozdrabnianego materiału a charakterem zmienności wymiarów rozdrabnianych cząstek. Energia niezbędna do rozdrobnienia wyrażana jest jako energia potrzebna do pokonania sił spójności rozdrabnianego materiału [6, 9–11].

Zdecydowaną większość istniejących hipotez rozdrabniania sformułowano w postaci teorii wytrzymałościowych. Zgodnie z nimi energia rozdrabniania jest ujmowana jako funkcja właściwości fizycznych materiałów, a także ich cech geometrycznych [6, 9, 11].

Najstarszym modelem rozdrabniania materiałów jest **teoria Rittingera**, sformułowana w 1867 roku w podręczniku pt. „Lehrbuch der Aufbereitungskunde”. Zawarto w nim teorię rozdrabniania minerałów, przedstawiono też budowę maszyn do tego służących. Zasadnicza teza tej teorii brzmi następująco: „Praca, potrzebna do rozdrobnienia, rośnie proporcjonalnie do stopnia rozdrobnienia” [5].

Rittinger przyjął bowiem, że cała energia zużywana jest na pokonanie sił spójności międzycząsteczkowej w trakcie rozdrabniania materiałów stałych [10].

$$E = K_{Ri} \cdot \Delta F \quad (1)$$

gdzie:

E – energia procesu rozdrabniania [J],

K_{Ri} – współczynnik zależny od kształtu ziarna i ciężaru właściwego materiału [J m⁻²],

ΔF – przyrost powstałej powierzchni w procesie rozdrabniania [m²].

Według kolejnego założenia Rittingera „praca potrzebna do rozdrobnienia rośnie proporcjonalnie do stopnia rozdrobnienia”. Stąd wniosek, że wraz ze wzrostem stopnia rozdrobnienia wzrasta również praca włożona w ten proces [5].

Drugim modelem jest **teoria Kicka** z 1885 roku zawarta w książce pt. „Das Gesetz der proportionalen Widerstände und seine Anwendungen” („Prawo proporcjonalnych oporów i jego zastosowania”) [5].

Kick założył, że cała energia zużyta na rozdrobnienie wykorzystywana jest na wytworzenie odkształcenia, które spowoduje przekroczenie naprężenia krytycznego. Ponadto naprężenie wzrasta liniowo wraz z odkształceniem aż do osiągnięcia wartości naprężenia krytycznego. Z przytoczonych założeń wynika, że praca rozdrabniania proporcjonalna jest do objętości rozdrabnianego materiału [10].

$$E_k = \frac{\sigma_c^2}{2E} \cdot V \quad (2)$$

gdzie:

- E_k – energia procesu rozdrabniania wg Kicka [MJ],
- σ_c – naprężenie niszczące [MPa],
- E – moduł sprężystości [MPa],
- V – objętość ciała [m³].

O wiele nowszym modelem, bo powstałym w 1952 roku, jest **teoria Bonda** [5]. Przyjął on, że proces rozdrabniania dzieli się na dwie fazy. W pierwszej z nich powstaje odkształcenie doprowadzające do wystąpienia naprężenia krytycznego. W drugiej zaś odpowiedni dodatek energii niszczy siły spójności międzycząsteczkowej. Taki model potwierdza słuszność teorii Rittingera w przypadku rozdrabniania drobnego. Ten rodzaj nie wymaga bowiem dużego udziału energii do wykonania deformacji w stosunku do energii zużytej na pokonanie sił spójności. Ponadto model ten tłumaczy również słuszność teorii Kicka w przypadku rozdrabniania grubego – występuje bowiem konieczność wytwarzania dużych odkształceń przy stosunkowo niewielkiej nowo utworzonej powierzchni [10].

$$E_{BO} = 10W_i \left(\frac{1}{\sqrt{d_{80}^p}} - \frac{1}{\sqrt{d_{80}^n}} \right) \quad (3)$$

gdzie:

- E_{BO} – energia procesu rozdrabniania wg Bonda [kWh Mg⁻¹],
- W_i – indeks Bonda, określa podatność materiału na mielenie, jest on określany empirycznie [kWh Mg⁻¹],
- d_{80}^p, d_{80}^n – 80% produktu rozdrabniania i nadawy (dla wymiarów oczek sit, przez które przechodzi 80% produktu rozdrabniania i nadawy) [m].

Jeszcze nowszym modelem jest **teoria Bracha**, zwana również „teorią wielokrotności pracy kruszenia”. Została ona sformułowana w 1962 roku, a jej istotą jest powtarzalność procesów rozdrabniania pojedynczego ziarna w celu osiągnięcia założonego stopnia rozdrobnienia [2]. Zgodnie z teorią tą za podstawę przyjęto, że

gdy ciało kruche poddane zostanie odpowiedniemu obciążeniu, odkształci się ono, a następnie rozpadnie się na części. Pierwszym założeniem autora jest powstanie nowego ziarna w wyniku pojedynczego kruszenia, drugim zaś – stwierdzenie zależności między jednostkową pracą rozdrabniania a wymiarem ziarna. Przy formułowaniu tej teorii rozpatrywano kolejne fazy kruszenia ziaren od wymiarów nadawy do wymiarów produktu [10].

$$E_{Br} = K_{Br} \left(\frac{1}{d_p^m} - \frac{1}{d_n^m} \right) \quad (4)$$

gdzie:

- E_{Br} – energia rozdrabniania według Bracha [J],
- K_{Br} – stała zależna od materiału [J m⁻²],
- d_n – wymiar ziarna nadawy [m],
- d_p – wymiar ziarna produktu [m],
- m – wykładnik potęgowy funkcji określającej zwiększenie energii jednorazowego rozdrabniania w miarę zmniejszania się wymiarów cząstek.

Kolejnym modelem rozdrabniania jest **teoria Rebintera**. Jest to połączenie teorii Rittingera i Kicka. To model teoretyczny, bowiem ze względu na brak szczegółowych wskaźników m_y oraz E_0 praktycznie nie stosuje się wzorów w nim zawartych. Niemniej jednak poprzez takie sformułowanie zbudowane zostały podwaliny pod nowy kierunek w analizie energochłonności rozdrabniania materiałów [10].

$$E_{RE} = E_1 + E_2 + E_3 = E_1 + m_y \cdot C_b + E_0 \cdot \Delta F \cdot a \quad (5)$$

gdzie:

- E_{RE} – energia rozdrabniania według Rebintera [J],
- E_1 – energia deformacji urządzenia rozdrabniającego i ciała przed jego skruszeniem [J],
- E_2 – energia deformacji ciała rozdrabnianego zgodnie z teorią Kicka [J],
- E_3 – energia potrzebna do wytworzenia nowej powierzchni zgodnie z teorią Rittingera [J],
- m_y – liczba cykli deformacji,
- C_b – energia odkształcenia niszczącego [J],
- E_0 – energia potrzebna do wytworzenia jednostki przyrostu powierzchni [J m⁻²],
- ΔF – przyrost powierzchni [m²],
- a – współczynnik Rebintera.

Wyżej wymieniona teoria Rebintera występuje również w formie rozszerzonej, znanej jako **teoria Mielnikowa**. Sformułowana została w 1967 roku [6]. Od teorii Rebintera różni się tym, że dodatkowo zostały w niej uwzględnione właściwości materiału rozdrabnianego oraz maszyny kruszącej. Określono ponadto warunki, w jakich można tę teorię stosować, choć mają one charakter czysto teoretyczny [10]. Teoria bazuje bowiem na równaniu wyznaczonym z bardzo dużym przybliżeniem. Dlatego nie znalazła żadnego zastosowania w praktyce inżynierskiej [6].

$$L_d = C_1 \ln \lambda^3 + C_2 (\lambda - 1) \quad (6)$$

gdzie:

- L_d – jednostkowa praca odkształcenia [J kg^{-1}],
- λ – stopień rozdrobnienia,
- C_1, C_2 – współczynniki ustalone doświadczalnie [J kg^{-1}].

Istotą **teorii Dmitreowskiego** jest natomiast założenie, że można obliczyć zapotrzebowanie energetyczne na realizację procesu rozdrabniania ziaren zbóż na podstawie doświadczalnych założeń odnośnie do skutecznej liczby uderzeń bijaka o ziarno – aż do powstania pęknięć powierzchniowych, które następnie rozprzestrzeniają się w całej masie ziarna. Na wartość tej wielkości decydujący wpływ wywiera prędkość obwodowa bijaków. W trakcie rozdrabniania na daną cząstkę materiału oddziałuje n uderzeń, choć tylko część z nich stanowią uderzenia użyteczne. Moc pobierana przez wirnik rozdrabniacza z bijakami wynosi [10]:

$$N = P v \quad (7)$$

gdzie:

- N – moc pobierana przez wirnik z bijakami [W],
- P – siła oporu rozdrabniania na obwodzie wirnika [N],
- v – prędkość obwodowa końców bijaków [ms^{-1}].

Siła oporu rozdrabniania została zdefiniowana jako funkcja wydajności oraz zmiany prędkości rozdrabnianych cząstek materiału, wynikająca z wielokrotnych uderzeń bijaków [10]:

$$P = W \Delta \omega n = W n B v \quad (8)$$

gdzie:

- P – siła oporu rozdrabniania na obwodzie wirnika [N],
- W – wydajność rozdrabniacza [kg s^{-1}],
- n – liczba skutecznych uderzeń bijaków,
- $\Delta \omega$ – zmiana prędkości uderzonej cząstki materiału w kierunku ruchu elementów rozdrabniających [rad s^{-1}],
- B – współczynnik proporcjonalności,
- v – prędkość obwodowa końców bijaków [ms^{-1}].

Jednostkowa praca rozdrabniania jest funkcją mocy rozdrabniania względem ilości rozdrobnionego materiału w czasie trwania tego procesu [10]:

$$L_j = \frac{N}{W} = n B v^2 \quad (9)$$

gdzie:

- L_j – jednostkowa praca rozdrabniania [J kg^{-1}],
- N – moc rozdrabniania [W],
- W – wydajność rozdrabniacza [kg s^{-1}].

Liczba niezbędnych uderzeń bijaków do rozdrobnienia materiału jest zdeterminowana prędkością kątową wirnika, liczbą bijaków oraz czasem rozdrabniania masy ziaren znajdujących się w komorze rozdrabniacza [10]:

$$n = z \frac{\omega}{2\pi} t \quad (10)$$

gdzie:

- n – liczba skutecznych uderzeń bijaków,
- z – liczba bijaków,
- ω – prędkość kątowna wirnika [rad s^{-1}],
- t – czas rozdrabniania [s].

Masę materiału krążącego w komorze rozdrabniacza bijakowego wyznaczono na podstawie wymiarów konstrukcyjnych komory [10]:

$$m = 2\pi R L h_m \varsigma \mu \quad (11)$$

gdzie:

- m – masa ziarna znajdująca się w komorze roboczej [kg],
- R – promień wirnika [m],
- L – szerokość wirnika [m],
- h_m – grubość warstwy krążącego materiału [m],
- ς – gęstość rozdrabnianego materiału [kg m^{-3}],
- μ – koncentracja materiału.

Po przekształceniach wzorów (7–11), równanie pracy rozdrabniania wg Dmitrowskiego przyjmuje postać [10]:

$$L_D = z \omega t R L h_m \varsigma \mu B v^2 \quad (12)$$

gdzie:

- L_D – praca rozdrabniania [J],
- z – liczba bijaków,
- ω – prędkość kątowna wirnika rozdrabniacza [rad s^{-1}],
- t – czas rozdrabniania [s],
- R – promień wirnika [m],
- L – szerokość wirnika [m],
- h_m – grubość warstwy krążącego materiału [m],
- ς – gęstość rozdrabnianego materiału [kg m^{-3}],
- μ – koncentracja materiału,
- B – współczynnik proporcjonalności,
- v – prędkość obwodowa końców bijaków [m s^{-1}].

Z kolei Walker jest twórcą uogólnionej różniczkowej hipotezy rozdrabniania, zwanej **teorią różniczkową**, w której uwzględniono zależność między energią rozdrabniania a uziarnieniem [10].

$$dE = -K \left(\frac{dx}{x^n} \right), \quad 1 \leq n \leq 2 \quad (13)$$

gdzie:

- dE – energia procesu rozdrabniania niezbędna do zmniejszenia wymiaru liniowego cząstki [J],
- K, n – stałe zależne od właściwości rozdrabnianego materiału,
- x – wymiar liniowy cząstki [m].

Po scałkowaniu zależności (13) w przedziale od d_n do d_p otrzymano wzór na energię rozdrabniania (14). Wykładnik potęgowy ($w = n - 1$) jest stałą materiałową i wywiera istotny wpływ na wartość energochłonności procesu rozdrabniania. Poprzez przyjęcie wartości wykładnika $n = 2$, uzyskano zależność wynikającą z teorii Rittingera. Tymczasem dla wartości $n = 1,5$ otrzymano zależność wynikającą z teorii Bonda [1]. Stała K oznacza miarę odporności materiału na rozdrabnianie. Wartość tego współczynnika zależy od jego krystalicznej struktury i liczby defektów sieci [10].

$$E = K \left(\frac{1}{d_p^w} - \frac{1}{d_n^w} \right) \quad (14)$$

gdzie:

- E – energia procesu rozdrabniania [J],
- K – stała zależna od właściwości rozdrabnianego materiału, miara podatności badanego materiału na rozdrabnianie,
- n – stała materiałowa,
- d_p, d_n – średnica produktu i nadawy [m].

Ostatnią teorią, którą omówiono w prezentowanej pracy, jest **teoria Flizikowskiego**. Jej istotą jest ogólny wskaźnik efektywności energetycznej procesu rozdrabniania ziaren zbóż, który wyznaczono zgodnie z definicją biologicznego wskaźnika efektywności [10].

$$e_R = \frac{(\eta_{bio} - \eta_z) E_{brutto} \eta_s \eta_p}{(k_j v_r + \sigma_{max} F_r + \varepsilon F_r' v_r^2) v_r t M_k} \quad (15)$$

gdzie:

- e_R – wskaźnik efektywności rozdrabniania,
- η_{bio} – wskaźnik wartości biologicznej dla produktu rozdrabniania, wyznaczony na podstawie analizy sitowej i strawności *in vitro*,
- η_s – sprawność mechaniczna silnika [%],
- η_p – sprawność mechaniczna przekładni [%],
- η_z – wskaźnik strawności ziarna przed rozdrobnieniem,
- E_{brutto} – średnia zawartość energii brutto w 1 kg suchej masy ziaren [MJ kg⁻¹],

- M_k – wskaźnik krotności próby masowej w przypadku, gdy składniki mianownika dotyczą danych różnych od 1 kg,
 k_j – współczynnik oporów ruchu jałowego [N s m⁻¹],
 v_r – prędkość rozdrabniania [m s⁻¹],
 σ_{max} – maksymalne naprężenie w miejscu oddziaływania elementu rozdrabniającego na materiał [N m⁻²],
 F_r, F_r' – pole powierzchni rozdrabnianego przekroju [m²],
 ε – współczynnik proporcjonalności [N s² m⁻⁴].

Dla określonego przedziału wartości biologicznej poszczególnych grup wymiarowych produktu rozdrabniania istnieje możliwość obliczenia wskaźnika energetycznego [10]:

$$\eta_{bio} = f_{<0,5} \cdot \eta_{bio<0,5} + f_{0,5-1,5} \cdot \eta_{bio0,5-1,5} + f_{>1,5} \cdot \eta_{bio>1,5} \quad (16)$$

gdzie:

- η_{bio} – wskaźnik wartości biologicznej dla produktu rozdrabniania, wyznaczony na podstawie analizy sitowej i strawności *in vitro*,
 $\eta_{bio<0,5}$ – wskaźnik wartości biologicznej frakcji produktu o podanych wymiarach,
 $\eta_{bio0,5-1,5}$ – wskaźnik wartości biologicznej frakcji produktu o podanych wymiarach,
 $\eta_{bio>1,5}$ – wskaźnik wartości biologicznej frakcji produktu o podanych wymiarach,
 $f_{<0,5}, f_{0,5-1,5}, f_{>1,5}$ – udziały frakcji o podanych wymiarach.

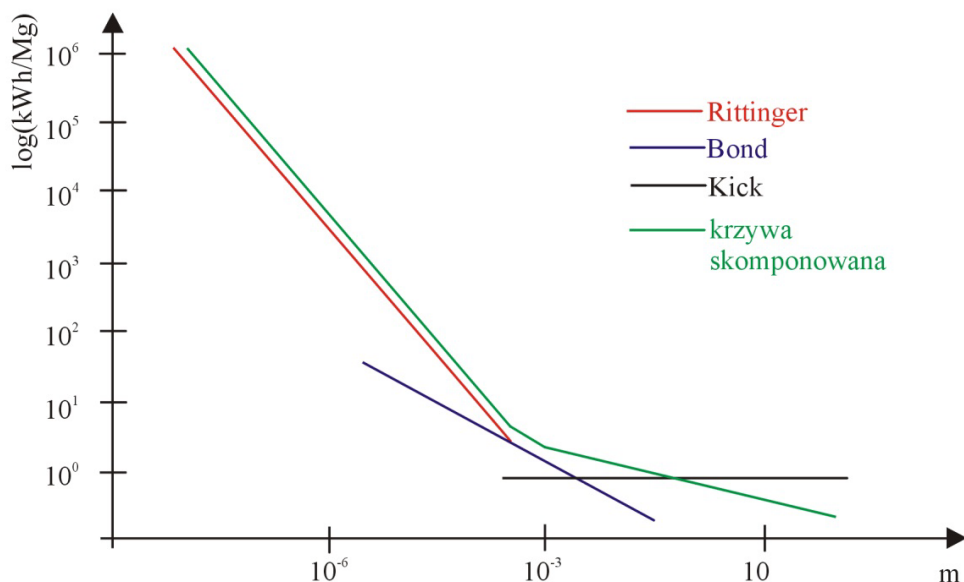
Obliczony wskaźnik wartości biologicznej produktu rozdrabniania to przedział liczbowy wyznaczony z odpowiednim prawdopodobieństwem. Znajomość wartości tej wielkości pozwala obliczyć stosunek przyrostu energii wyzwolonej dzięki rozdrabnianiu do nakładów poniesionych na jej uzyskanie [10].

3. Obszary zastosowań poszczególnych modeli rozdrabniania na etapach projektowania i eksploatacji rozdrabniaczy bijakowych

Jak już wspomniano powyżej, projektowanie rozdrabniaczy wymaga dogłębnej analizy wielu czynników oddziałujących w trakcie jego pracy. Pomocą dla projektantów są niewątpliwie opisane w tej pracy teorie rozdrabniania, mimo że autorzy tych teorii zastosowali w nich wiele założeń i uproszczeń badawczych.

Niemniej jednak modele matematyczne procesu rozdrabniania pozwalają na określenie niektórych parametrów, decydujących o energochłonności rozdrabniania, m.in. takich jak czas rozdrabniania czy stopień rozdrobnienia.

Przykładem może być zakres stosowalności hipotez Kicka, Rittingera i Bonda, ustalony na podstawie analizy istniejących modeli rozdrabniania. Dotyczy on zależności między energią rozdrabniania a wymiarami ziaren. Za pomocą danych zamieszczonych na wykresie (rys. 2) przedstawiono zakres zastosowania ww. teorii w zależności od wymiarów produktu rozdrabniania [10].



Rys. 2. Zależność pomiędzy jednostkową energią rozdrabniania a rozmiarem rozdrabnianych ziaren. Na rysunku pokazano zakres zastosowania równań Kicka, Bonda i Rittingera wg R.T. Hukkiego podany w pracach [3, 8]

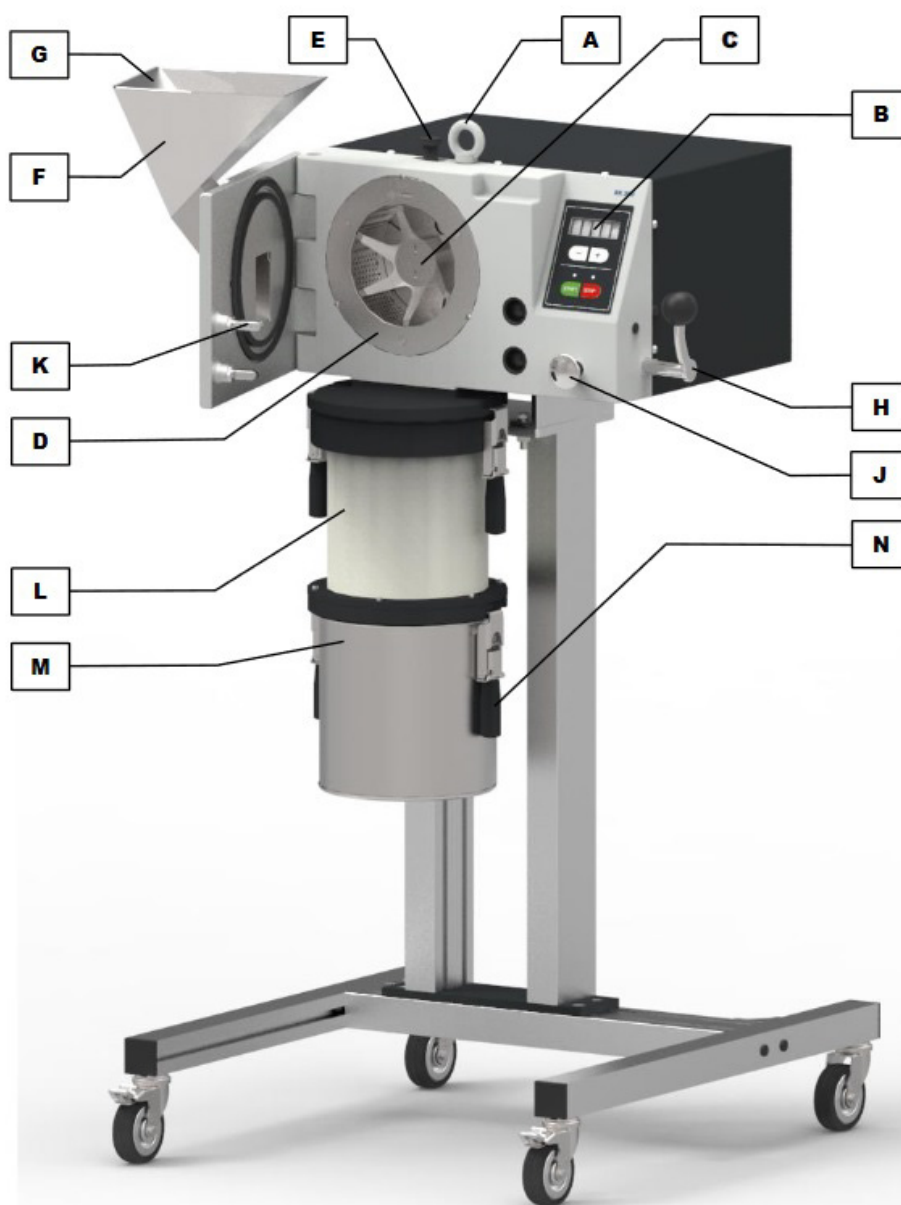
Fig. 2. Relationship between the unit shredding energy and the shredded grains size. The figure shows the range of application of Kick's, Bond's and Rittinger's equations according to R.T. Hukky included at works [3, 8]

Bijakowe maszyny rozdrabniające znalazły zastosowanie w różnych gałęziach gospodarki. Przykładem tego typu urządzeń mogą być młyny węglowe szybko-bieżne. Służą one w energetyce do rozdrabniania węgla, głównie brunatnego (o ziarnistości do 30 mm i wilgotności do 65%) bądź kamiennego. Zakres ich prędkości obrotowych wynosi od 400 do 1500 obr./min. Cechą odróżniającą młyny te od ich wentylatorowych odpowiedników jest zastosowanie bijaków w postaci młotków, przytwierdzonych przegubowo do tarczy. Wydajność młynów węglowych szybko-bieżnych wynosi do 150 t/h [18].

Rębaki bijakowe znalazły zaś zastosowanie przy rozdrabnianiu biomasy (słoma, liście, odpady sadownicze). Maszyny te wyposażone są w wałek, wytwarzający ruch ostrzy. Ich praca przebiega dwuetapowo. W pierwszym etapie podany materiał poddawany jest wstępnemu rozgnieceniu, a następnie zmiażdżeniu za pomocą młotków bijakowych miażdżących. Drugi etap to rozdrobnienie przygotowanego w ten sposób materiału przez młotki bijakowe tnące [17].

Innym urządzeniem, wykorzystującym bijaki, jest młyn laboratoryjny. Jak sama nazwa wskazuje, stanowi on część wyposażenia laboratoriów badawczych. Jego zadaniem jest rozdrabnianie kruchych materiałów twardych, m.in. takich jak: betonit, cukier, farby proszkowe, gips, gleby, grafit, koks, leki, materiały roślinne,

nawozy, przyprawy, ryż, sól, tworzywa sztuczne, węgiel, wyroby chemiczne, zioła, żywice czy żywność. Zasada działania takiego młyna polega na wykorzystaniu zjawisk rozbijania i ścinania. Materiał wejściowy podawany jest przez lej zasypowy. Następnie trafia do komory mielenia. Tam poddawany jest rozdrobnieniu. Następuje to pomiędzy wirnikiem a specjalnym sitem lub wkładem mielącym. Gdy cząstki materiału rozdrabnianego osiągną rozmiar mniejszy od otworu w sicie, spadają do pojemnika [15].



Rys. 3. Schemat konstrukcji młyna laboratoryjnego [16]

A – uchwyt transportowy, B – panel sterujący, C – wirnik, D – rama ustalająca wraz z wkładem sitowym, E – kołek blokujący, F – lej zasypowy, G – osłona przed rozpryskami, H – dźwignia blokady, J – mechanizm zaczepowy, K – mechanizm blokady, L – filtr, M – pojemnik zbiorczy, N – dźwignia zaciskowa

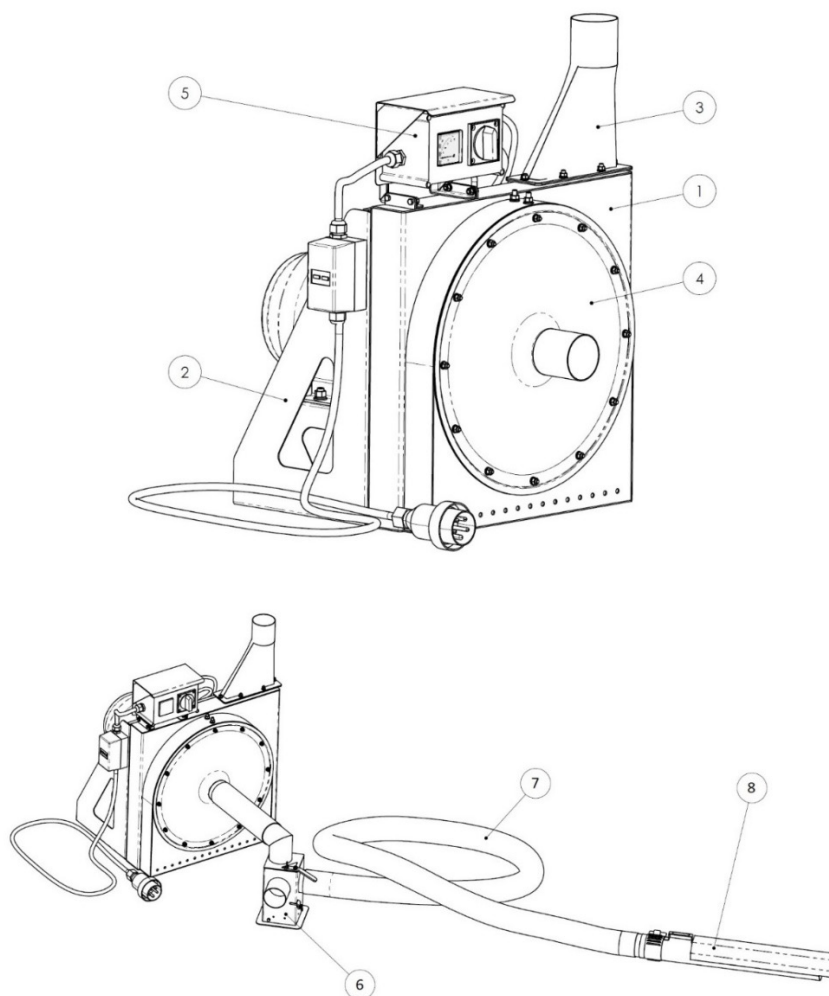
Fig. 3. Laboratory mill construction diagram [16]

A – transportation lug, B – control panel, C – rotor, D – retaining frame with sieve insert, E – locking pin, F – feed hopper, G – splash back protection, H – locking lever, J – catch mechanism, K – locking mechanism, L – filter hose, M – collecting receptacle, N – clamping lever

Kwestią zasadniczą prezentowanej pracy są jednak rozdrabniacze bijakowe. Jak już wspomniano we wstępie, służą one do przetwarzania masy organicznej na śrutę w celu ulepszenia jej właściwości trawiennych. Charakteryzują się stosunkowo prostą konstrukcją [14]. Podziału ziaren zbóż dokonują poprzez zderzanie ich z bijakami, znajdującymi się w komorze rozdrabniającej [19]. W celu uzyskania założonego stopnia rozdrobnienia wystarczy ustawić odpowiednią grubość szczelin w sicie [14].

Do podstawowych rodzajów rozdrabniaczy zalicza się:

- rozdrabniacze bijakowe ssąco-tłoczące (rys. 4) – urządzenia te dzięki zastosowaniu dodatkowego wentylatora, odpowiadającego za zaciąg zboża i wyrzutu śruty, nie potrzebują „asysty” człowieka podczas poboru zboża z przymy lub silosu. Powoduje to, że produkcja śruty staje się procesem niezwykle efektywnym i mało uciążliwym. Ich konstrukcja zaś umożliwia szybką wymianę sita w celu dobrania odpowiedniej granulacji dla danego gatunku. Ze względu na parametry techniczne i możliwości tych urządzeń ich wydajność wynosi od 1 do 3 t/h, a droga poboru zboża – nawet do 20 metrów [19];



Rys. 4. Schemat konstrukcji rozdrabniacza bijakowego ssąco-tłoczącego [13]

1 – obudowa, 2 – podstawa, 3 – końcówka wylotowa, 4 – wentylator,
5 – instalacja elektryczna, 6 – łapacz zanieczyszczeń, 7 – przewód ssący, 8 – ssawka rozdrabniacza

Fig. 4. Suction and pressure hammer shredder construction diagram [13]

1 – casing, 2 – holder, 3 – nozzle, 4 – vent, 5 – electrical installation, 6 – dirt trap,
7 – suction pipe, 8 – sucker

- rozdrabniacze bijakowe zasypowe (rys. 1) – w stosunku do rozdrabniaczy ssąco-tłoczących charakteryzują się większą wydajnością (przy zastosowaniu tych samych mocy silników ich wydajność wzrasta średnio o 1 t/h). W modelach o mocy 22 kW w ciągu godziny można uzyskać do 4 ton pszenicy o wilgotności względnej na poziomie 14% i średnicy przemiału 6 mm. Tego typu maszyny najlepiej sprawdzają się w dużych mieszalniach pasz [19].

4. Podsumowanie

Zaprezentowane w pracy modele rozdrabniania mają duże znaczenie dla nauki i praktyki inżynierskiej, pomimo że zostały opracowane przy pewnych założeniach i uproszczeniach badawczych. Analizowane modele w większości opierają się na bilansie energii rozdrabniania, lecz na ich podstawie nie można wyprowadzić jednoznacznych zależności do analizy efektywności zarówno danej metody, jak i maszyny realizującej ten proces.

Należy jednak stwierdzić, że zaprezentowane modele matematyczne procesu rozdrabniania dają możliwość określenia niektórych parametrów, decydujących o energochłonności rozdrabniania, takich jak:

- czas rozdrabniania,
- stopień rozdrobnienia,
- wydajność maszyny rozdrabniającej.

Bibliografia

- [1] Bochat, A., Wesołowski, L., „Próba modelowania rozdrabniania materiałów ziarnistych za pomocą rozdrabniacza bijakowego”, *Inż. Ap. Chem.* 5, (2010), 127–129.
- [2] Feliks, J., Filipowicz, A., „Zastosowanie teorii rozdrabniania do doboru mocy w kruszarce węgla”, *Inż. Ap. Chem.* 4, (2009), 42–43.
- [3] Flizikowski, J., „Rozdrabnianie tworzyw sztucznych”, Wydawnictwa Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1998.
- [4] Flizikowski, J., Bieliński, K., Bieliński, M., „Podwyższenie energetycznej efektywności wielotarczowego rozdrabniacza nasion zbóż na paszę”, Wydawnictwa Uczelniane ATR – OPO, Bydgoszcz 1994.
- [5] Gawenda, T., „Rozdrabnianie wczoraj, dziś i jutro”, https://www.kieruneksurowce.pl/Resources/art/6170/bmp_5266447eeec39.pdf (dostęp: 26.05.2021).
- [6] Molendowski, F., „Energochłonność rozdrabniania surowców roślinnych na przykładzie rdzeni kolb kukurydzy”, Rozprawy 229, Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Wrocław 2005.
- [7] Opielak, M., „Wybrane zagadnienia rozdrabniania materiałów w przemyśle rolno-spożywczym”, Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Lublinie, Lublin 2000.
- [8] Pahl, M., „Zerkleinerungstechnik”, Verlag TÜV, Rheinland 1994.
- [9] Sokołowski, E.M., „Uogólniona hipoteza rozdrabniania oraz metoda wyznaczania stałych materiałowych”, Materiały IX Gliwickiego Sympozjum Teorii i Praktyki Procesów Przemysłowych Podstawowe Problemy Procesów Rozdrabniania, Gliwice 1992.
- [10] Wesołowski, L., „Badanie wpływu cech konstrukcyjnych zespołu bijakowego na efektywność rozdrabniania ziaren zbóż”, rozprawa doktorska, UTP, Bydgoszcz 2012.
- [11] Zawada, J., „Wstęp do mechaniki procesów kruszenia”, Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich, Politechnika Warszawska, Warszawa 1998.

- [12] Agro-Stanek, rozdrabniacz bijakowy H 115,
http://agro-stanek.pl/allegro/rozdrabniacz_biakowy_H115.pdf (dostęp: 09.06.2021).
- [13] Invest-Rol, rozdrabniacz bijakowy H 116,
https://investrol.pl/wp-content/uploads/pdf/POM_Augustow_rozdrabniacz_H116.pdf (dostęp: 27.07.2021).
- [14] M-Rol, „Jak działają rozdrabniacze bijakowe w rolnictwie?”,
<https://mrol.com.pl/aktualnosci/jak-dzialaja-rozdrabniacze-biakowe-w-rolnictwie> (dostęp: 26.05.2021).
- [15] Retsch, młyn bijakowy SR 300,
<https://www.retsch.pl/pl/produkty/mlynki-laboratoryjne/mlyny-z-rotorem/sr-300/cechy-i-funkcje> (dostęp: 26.05.2021).
- [16] Retsch, Rotor Beater Mill SR 300,
https://www.retsch.pl/dltmp/www/55ce2081-3c88-4436-9ac2-37b6bc282b86-837b3a1307df/manual_sr300_20.752.xxxx_en.pdf (dostęp: 19.07.2021).
- [17] Vademecum dla uczniów technikum, „Mechaniczne przetwarzanie biomasy”,
<http://www.instsani.pl/429/mechaniczne-przetwarzanie-biomasy> (dostęp: 26.05.2021).
- [18] Wikipedia, młyn węglowy, https://pl.wikipedia.org/wiki/Młyn_węglowy (dostęp: 26.05.2021).
- [19] Zuptor, rodzaje rozdrabniaczy do zboża, <https://zuptor.pl/rodzaje-rozdrabniaczy-do-zboza> (dostęp: 26.05.2021).



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Aspekty transformacji eksploatacyjnej warstwy wierzchniej bieżni łożysk tocznych – przegląd

Mikołaj Szyca

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska;
e-mail: mikszy000@utp.edu.pl

Streszczenie: Zużywanie warstwy wierzchniej bieżni łożysk tocznych jest powszechnym problemem ich eksploatacji. Badania jej zużycia prowadzi się od ponad 50 lat, jednak z uwagi na zastosowanie łożysk tocznych w licznych maszynach przemysłowych oraz rozwój technologii konieczne jest stałe aktualizowanie wiedzy na ten temat. W pracy zaprezentowano przegląd publikacji dotyczących problemów zmęczeniowych i tribologicznych transformacji eksploatacyjnej łożysk tocznych w aspekcie bieżących kierunków rozwoju tej dziedziny.

Słowa kluczowe: łożysko, trybologia, para toczna, eksploatacja, zmęczenie materiału

Aspects of transformation of exploitation top layer of rolling bearing race-way – review

Mikołaj Szyca

UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland;
e-mail: mikszy000@utp.edu.pl

Summary: Wear of the top layer of the raceway of rolling bearings is a common problem in bearing operation. Its wear has been realized for over 50 years, but due to the use of rolling bearings in many industrial machines and technology development, it is necessary to constantly update the knowledge on this subject. The article reviews articles on the fatigue and tribological problems of the exploitation transformation of rolling bearings in terms of the current development trends in this field.

Key words: bearing, tribology, rolling couple, exploitation, material fatigue

1. Wstęp

Łożyska toczne stanowią powszechnie stosowany element konstrukcyjny w większości maszyn przemysłowych oraz pojazdów. Znaczenie sprawności łożysk zależy od struktury niezawodnościowej obiektu. W przypadku maszyny łożysko stanowi najczęściej element struktury szeregowej, zatem jego sprawność ma kluczowe znaczenie dla sprawności maszyny, jako obiektu. W przypadku obiektu stanowiącego zespół maszyn, realizującego proces, w którym maszyna jest jedynie elementem, niezdatność maszyny do pracy może zakłócać lub całkowicie uniemożliwiać wykonywanie procesu, czemu należy zapobiegać poprzez predykcyjne utrzymanie ruchu [2, 4, 18, 20].

W okresie eksploatacji łożyska przenoszą obciążenia, które powodują zmienne naprężenia na powierzchniach styku [18]. Długotrwała praca łożyska wynika z jego właściwego doboru przez konstruktorów, ale z także prawidłowego zamontowania i zapewnienia właściwego smarowania przez służby utrzymania ruchu. Na trwałość eksploatacyjną łożyska wpływ będzie mieć także zanieczyszczenie otoczenia łożyska, a także poziom drgań [15, 18].

Obciążenia przyłożone do łożyska tocznego przenoszone są przez elementy toczne z wału i pierścienia wewnętrznego na pierścień zewnętrzny [21]. W toku przenoszenia obciążenia w łożysku powstają defekty wywołane zmęczeniem powierzchniowym, takie jak odkształcenia i pęknięcia. Fizyczne uszkodzenie materiału to defekty rozproszone w postaci wakancji, mikropęknięć, mikropustek lub zniszczonych mikroobjętości, które zmniejszają efektywną lub nośną część materiału [3]. Analizą tego typu defektów zajmuje się trybologia [10], przy czym według Mathhewsa i in. [8] trybologia w obecnej dobie „nanorewolucji” czerpie znaczne korzyści z rozwoju nowych urządzeń, które umożliwiają badanie powierzchni w zakresie wielkości nanometrów, rozwijając tym samym poszczególne działy nano-, mikro-, makro-, decy- czy unitrybologii. Jednak jak podają Maruschak i in. [7], można zastosować także multidyscyplinarny dział fizycznej mezomechaniki materiałów. Zgodnie z tym paradygmatem w ciągu ostatnich 25 lat przyjęto nowe koncepcje dotyczące powstawania defektów w strukturach krystalicznych, roli warstwy wierzchniej oraz okresowego rozkładu naprężeń rozciągających, co było bezpośrednią konsekwencją wprowadzenia mezoskali. Umożliwiono tym samym wykonywanie wysokorozdzielczych pomiarów lokalnych deformacji w rozszerzonych obszarach ciał stałych poddanych obciążeniu. Założenie synergii mezomechaniki i trybologii to wielopoziomowe podejście – nowy sposób opisu procesów powodujących awarię maszyny wyposażonej w badane łożysko [12, 13].

Według mezomechaniki fizycznej analiza zużycia wymaga, aby jednocześnie uwzględniać odkształcenia plastyczne, pękanie oraz usuwanie cząstek ze strefy trybokontaktu. Konieczne pozostaje także – gdy pominie się problemy mechaniczne – wzięcie pod uwagę zmian własności materiału w miejscu styku, gdzie lokalne nagrzewanie może podnosić temperaturę nawet do kilkuset stopni. Uwzględnić należy także aspekty chemiczne, takie jak adhezja czy utlenianie [3, 7, 12, 16].

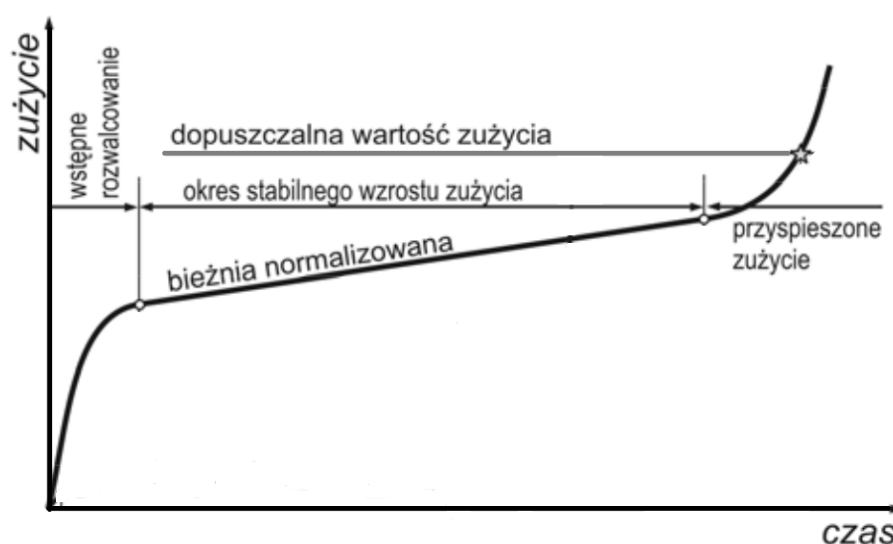
Powszechnie znanym faktem jest, iż warstwy wierzchnie materiału (WW) w stosunku do odkształcenia należy traktować jako osobny poziom konstrukcyjny. Propagacja defektów w ich obrębie może niekorzystnie wpłynąć na pozostałe elementy łożyska, co wynika z osłabionej odporności na ścieranie WW. Poza ścieraniem wpływ na deformację WW mają drgania czy też duże lokalne naprężenia. Zużycie to zatem efekt kilku czynników [7, 10].

Jako wymuszenia determinujące transformacje warstwy wierzchniej bieżni łożysk według Stypa-Rekowskiego i Musiała [19] proponuje się przyjąć: amplitudę nacisków, częstotliwość zmian oraz obecność czynnika smarującego. Musiał [10] dodał do tego także otoczenie jako wpływ temperatury i wilgotności.

W pracy omówiono problematykę trwałości łożysk tocznych w aspekcie zwiększenia ich niezawodności. Przedstawiono zagadnienia związane ze zużyciem zmęczeniowym i tribologicznym bieżni łożysk, które na równi z elementami tocznymi przejmują nadmierne obciążenia, tj. skutki niewłaściwej eksploatacji łożysk. Publikacja przeznaczona jest dla szerokiego grona odbiorców związanych zawodowo z utrzymaniem ruchu w zakładach przemysłowych, naukowców zainteresowanych eksploatacją maszyn, a także dla pozostałych osób zainteresowanych tematyką racjonalnej eksploatacji łożysk tocznych.

2. Zużycie zmęczeniowe warstwy wierzchniej bieżni

Zużycie warstwy wierzchniej bieżni łożysk tocznych następuje po przepracowaniu określonej liczby cykli, gdy ma miejsce inicjacja propagacji zmęczenia powierzchniowego. Zużycie bieżni łożyska w funkcji czasu zaprezentowano na rysunku 1.



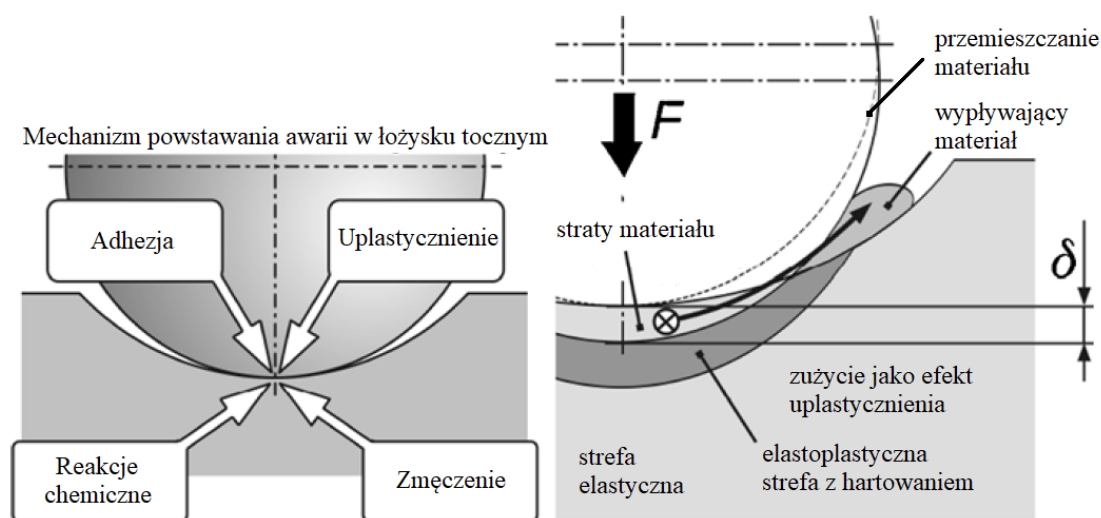
Rys. 1. Okresy zużycia bieżni łożyska tocznego – wykonanie własne na podstawie [17]

Fig. 1. Periods of wear of a rolling bearing race – own design based on [17]

Przyjmuje się określanie tego etapu eksploatacji łożyska „początkowym okresem niezawodnej pracy”. To etap trwałości, podczas którego bezawaryjnie powinny działać wszystkie eksploatowane łożyska spełniające warunki właściwego

doboru, montażu oraz warunków pracy [5]. Istotnym czynnikiem na etapie projektowania jest także zapewnienie równomiernego rozkładu sztywności elementów podpory oraz geometria strefy kontaktu [8, 16]. Aspekty sztywności i rozkładu obciążenia będą mieć szczególne znaczenie dla trwałości łożyska przy dużych prędkościach obrotowych – jak podają Zhang i in. [23] – zbyt duże obciążenie zewnętrzne i zbyt duża prędkość obrotowa mają negatywny wpływ na żywotność łożyska, czemu zapobiec można przy odpowiednim napięciu wstępnym łożyska, przy czym Musiał [10] wskazał, iż istotne dla procesu zużywania mogą być dynamiczne zmiany obciążenia w funkcji prędkości obrotowej. Piekoszewski [14] wykazał, iż twardość materiałów ma kluczowe znaczenie dla trwałości zmęczeniowej powierzchni – zwiększenie twardości wykładniczo zwiększa trwałość bieżni. W wielu łożyskach w początkowym okresie eksploatacji występuje jednak zużycie odkształceniowe bieżni, a zatem konieczne jest prognozowanie wzrostu odkształceń plastycznych i określenie maksymalnych obciążeń występujących do momentu odkształcenia [16]. Topografia powierzchni (stereometria) jest czynnikiem mającym zasadniczy wpływ na transformację warstwy wierzchniej bieżni łożysk tocznych przede wszystkim w pierwszej fazie eksploatacji łożyska (fazie docierania, wstępnego rozwałcowania, zaprezentowanej na rys. 1) [10]. Mechanizmy zużycia w elementach tocznych łożyska zaprezentowano na rysunku 2.

Według Lunberga i Palmgren'a [6] wielkość i rozkład obciążenia na łożysku odgrywają ważną rolę w trwałości łożyska. Napięcie wstępne może wpływać na wielkość i rozkład obciążenia na łożysku, które są wstępnie określane za pomocą obciążeń zewnętrznych i prędkości obrotowej. Aby zapewnić wyższą trwałość zmęczeniową łożyska tocznego, dla każdego typu i modelu obciążenia należy przeanalizować zależność między napięciem wstępnym a trwałością zmęczeniową łożyska w warunkach pracy, szczególnie w przypadku łożyska kulowego przy dużej prędkości, ponieważ rozkład obciążenia i kontakt wewnętrzny zmieniają się drastycznie ze względu na działanie obciążeń bezwładnościowych.



Rys. 2. Mechanizmy zużycia w elementach tocznych łożyska – wolne tłumaczenie na podstawie [16]

Fig. 2. Wear mechanisms in the rolling elements of the bearing [16]

Odkształcenia elementów tocznych pod wpływem obciążenia mają zmienione geometryczne warunki przylegania, a zarazem zmienia się przebieg poślizgów zależnych od kinematyki względnych ruchów elementów tocznych. Zmianę nacisków w łożysku może obrazować histereza odkształceń, gdy w czasie toczenia w przedniej części występują większe naciski, natomiast w tylnej – mniejsze. W czasie odciążania i dociążania poszczególnych punktów styku zaobserwować można inną relację, co w konsekwencji dowodzi, że nie następuje proces doskonale sprężysty i praca deformacji zwracana jest tylko częściowo [10].

3. Trybologiczna i trybochemiczna transformacja warstwy wierzchniej bieżni

Obszary warstwy wierzchniej, które bezpośrednio przylegają do strefy styku kontaktowego, narażone są na powstawanie specyficznego stanu naprężeń (styk koncentrowany), który charakteryzuje się występowaniem największego wyteżenia materiału na głębokości pod powierzchnią styku, opisywanej wzorami Hertza lub wzorami Stribecka [1, 4, 5, 10, 16, 23]. Strefa styku cechuje się niewielką szerokością względem promieni elementów tocznych, a zarazem przemieszczenia są tego samego rzędu co szerokość strefy styku, więc z uwagi na ich niewielkie wymiary nazywane są mikropoślizgami [7, 10].

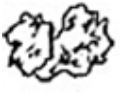
W procesie zużywania bieżni łożyska jednym z czynników mających wpływ na cały proces jest obecność smaru, który może zredukować makropoślizgi, aczkolwiek może jednocześnie wywoływać adhezję oraz reakcje trybochemiczne pochłaniające część energii i przyspieszające zużywanie [7, 10].

W przypadku niesprawnego smarowania łożysk najczęstszym zdarzeniem awaryjnym (konsekwencją) jest zmęczenie powierzchni styku. W pierwszej fazie na powierzchni styku tworzą się mikropęknięcia powstałe w wyniku lokalnego niedosmarowania, a będące zarazem miejscami koncentracji naprężeń, które wraz z współistniejącymi defektami WW przyspieszają inicjację pęknięć, a ponadto sprzyjają wytwarzaniu zanieczyszczeń. W konsekwencji ciągłej pracy łożyska może dochodzić do postępowania wżerania/zmęczenia oraz frettingu (zdzierania), powodujących łuszczenie – powstawanie cząstek zużycia i wżerów o nieregularnym kształcie [4, 7, 9, 16, 24]. Jak podają Koulocheris i in. [4], wielkość złuszczonych cząstek wpływa na zużycie bieżni zależnie od tego, czy cząstki są ciągłe czy kruche. Przykłady form złuszczonych cząstek materiału zaprezentowano w tabeli 1.

Siły oraz momenty tarcia działające na punkty styku między bieżnią a kulką pozwalają na dokładne przewidywanie ruchów elementów łożyska, natomiast chropowatość ma znaczący wpływ na naprężenia podpowierzchniowe i siłę tarcia [9, 22]. Jak wskazał Musiał [10], wyraźne zmiany parametru chropowatości następują w normalnych warunkach pracy po przekroczeniu pewnego czasu (w okresie normalizowanym przedstawionym na rys. 1).

Tabela 1. Kształty, przyjęte nazwy i możliwe pochodzenie cząstek znajdujących się w filmie olejowym – wolne tłumaczenie na podstawie [4, 11]

Table 1. Shapes, accepted names and possible origin of the particles in the oil film [4, 11]

Kształt cząstek	Przyjęte nazwy	Możliwe pochodzenie
	Kulki	Zużycie powierzchni metalowej
	Zniekształcone elipsoidy	Zanieczyszczenia smaru
	Okruchy	Zużycie powierzchni metalowej, łuszczenie
	Płaty	Docieranie, farba, miedź w smarze
	Spirale i odłamki	Resztki powstałe w czasie pracy w wysokiej temperaturze
	Walczki	Powstałe podobnie jak płaty, ale w formie zrolowanej
	Włókna	Polimery, bawełna, drzazgi, czasami metal

Powstawanie zniekształceń warstwy wierzchniej według Maruschaka i in. [7] uzależnione jest pośrednio od lokalnego niedosmarowania, które doprowadza do lokalnego zwiększania chropowatości, a w konsekwencji – do koncentracji naprężeń. Efekt ten pogłębia się wraz z cyklicznym zniekształcaniem bieżni i rozwojem lokalnych niedosmarowań. Aby zachować właściwe warunki pracy łożysk tocznych, należy zapewnić odpowiednie naprężenie wstępne w celu zapobiegania poślizgom kulek na bieżni, a tym samym – niedopuszczenia do naruszania struktury warstwy wierzchniej [22, 23].

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono publikacje poświęcone badaniom degradacji warstwy wierzchniej bieżni łożysk tocznych, w których podjęto takie problemy, jak:

- konieczność zachowania równomiernego rozkładu sztywności oraz geometrii strefy kontaktu na etapie projektowania łożysk w celu ich późniejszej właściwej eksploatacji;
- twardość materiałów ma kluczowe znaczenie dla trwałości zmęczeniowej bieżni;

- w okresie początkowej eksploatacji łożyska (docierania) może dochodzić do zużycia odkształceniowego bieżni;
- praca deformacji bieżni nie jest procesem doskonale sprężystym;
- konsekwencją niesprawnego smarowania może być zmęczenie powierzchni styku;
- jednym z warunków zachowania właściwych warunków pracy łożyska jest zapewnienie odpowiedniego naprężenia wstępnego.

Z uwagi na powszechność zastosowania łożysk tocznych w maszynach przemysłowych, pojazdach i maszynach specjalnego przeznaczenia konieczne jest stałe badanie oddziaływania na łożyska różnych warunków pracy, spośród których kluczowa jest obserwacja zjawisk w mikro- i nanoskali. Jest to precyzyjny kierunek rozwoju trybologii, co zostało potwierdzone w prezentowanej pracy. Przyszły rozwój dziedziny eksploatacji łożysk tocznych prawdopodobnie oparty będzie na tworzeniu coraz dokładniejszych numerycznych modeli obciążeń łożysk w trakcie eksploatacji, co może skutkować skuteczniejszym zapobieganiem powstawania defektów na etapie konstruowania układu, w których łożyska są montowane. Duże koszty wytwarzania łożysk tocznych wysokiej jakości naturalnie skutkują zapotrzebowaniem rynkowym na badania nad bardziej racjonalnym wykorzystaniem tańszych odpowiedników kosztownych łożysk, co otwiera potencjał do rozwoju badań w tym zakresie, a tym samym – tworzy zapotrzebowanie na synergię nauki i biznesu.

Bibliografia

- [1] Burcan, J., „Problemy tarcia wiertnego w styku skoncentrowanym”, *Trybologia* 4, (2010), 47–56.
- [2] Fidali, M., „Metody diagnostyki maszyn i urządzeń w predykcyjnym utrzymaniu ruchu”, Elamed Media Group, Katowice 2020.
- [3] Khoroshun, L., Shikula, E., “Mesomechanics of deformation and short-term damage of linear elastic homogeneous and composite materials”, *Int. Appl. Mech.* 43(6), (2007), 591–620.
- [4] Koulocheris, D., Stathis, A., Costopoulos, T., Tsantiotis, D., “Experimental study of the impact of grease particle contaminants on wear and fatigue life of ball bearings”, *Eng. Fail. Anal.* 39, (2014), 164–180, doi: 10.1016/j.engfailanal.2014.01.016.
- [5] Libera, M., „Wybrane aspekty prognozowania trwałości łożysk tocznych”, *Obróbka plastyczna metali* 29(1), (2018), 77–86.
- [6] Lundberg, G., Palmgren, A., “Dynamic capacity of rolling bearings”, *J. Appl. Mech. Trans. ASME* 71, (1949), 165–172.
- [7] Maruschak, P., Panin, S., Zakiev, I., Poltranin, M., Sotnikov, A., “Scale levels of damage to the raceway of a spherical roller bearing”, *Eng. Fail. Anal.* 59, (2016), 67–78, doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.11.019.
- [8] Matthews, A., Franklin, S., Holmberg, K., “Tribological coating: Contact mechanisms and selection”, *J. Phys. Appl. Phys.* 40, (2007), 54–63, doi: 10.1088/0022-3727/40/18/S07.
- [9] Mazanek, E., Krynke, M., „Uszkodzenia bieżni łożysk wieńcowych”, *Tribologia* 3, (2011), 67–80.
- [10] Musiał, J., „Znaczenie topografii powierzchni w transformacji warstwy wierzchniej walcowych par tocznych”, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz 2014.

- [11] Nikas, G., "A state-of-the-art review on the effects of particulate contamination and related topics in machine-element contacts", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J: J. Eng. Tribol.* 224(5), (2010), 453–479, doi: 10.1243/13506501JET752.
- [12] Panin, V., "Overview on mesomechanics of plastic deformation and fracture of solids", *Theor. Appl. Fract. Mech.* 73(1), (1998), 1–11, doi: 10.1016/S0167-8442(98)00038-X.
- [13] Panin, V., "Synergetic principles of physical mesomechanics", *Theor. Appl. Fract. Mech.* 37(1–3), (2001), 261–298, doi: 10.1016/S0167-8442(01)00085-4.
- [14] Piekoszewski, W., „Wpływ na powierzchniową trwałość zmęczeniową wybranych materiałów i technologii konstituowania warstw powierzchniowych elementów wężła tocznego”, *Tribologia* 3, (2009), 185–196.
- [15] „SKF Poradnik Obsługi Technicznej Łożysk” 2011.
- [16] Smolnicki, T., Pękalski, G., Jakubik, J., Harnatkiewicz, P., "Investigation into wear mechanisms of the bearing raceway used in bucket wheel excavators", *Arch. Civ. Mech. Eng.* 17, (2017), 1–8, doi: 10.1016/j.acme.2016.07.008.
- [17] Smolnicki, T., Stańco, M., „Prognozowanie zużycia odkształceniowego wielkogabarytowych łożysk tocznych o bieżniach miękkich”, *Acta Mech. Autom.* 3(1), (2009), 98–100.
- [18] Stanik, Z., Witaszek, M., „Zużycie i diagnostyka samochodowych łożysk tocznych w eksploatacji”, *Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej: Transport* 64(1803), (2008), 245–251.
- [19] Styp-Rekowski, M., Musiał, J., „Transformacja technologicznej warstwy wierzchniej w eksploatacyjną w parze kinematycznej z tarcie tocznym”, *Problemy Eksploatacji* 38(3), (2000), 241–248.
- [20] Szopa, T., „Niezawodność i bezpieczeństwo”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2018.
- [21] Wenzhong, W., Lang, H., Sheng-guang, Z., Zi-qiang, Z., Siyuan, A., "Modeling angular contact ball bearing without raceway control hypothesis", *Mech. Mach. Theory* 82, (2014), 154–172, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2014.08.006.
- [22] Yunlong, W., Wenzhong, W., Shengguang, Z., Ziqiang, Z., "Effects of raceway surface roughness in an angular contact ball bearing", *Mech. Mach. Theory* 121, (2014), 198–212.
- [23] Zhang, J., Fang, B., Hong, J., Zhu, Y., "Effect of preload on ball-raceway contact state and fatigue life of angular contact ball bearing", *Tribol. Int.* 114, (2017), 365–372, doi: 10.1016/j.triboint.2017.04.029.
- [24] Zhi-Qiang, Y., Zhen-Guo, Y., "Fatigue Failure Analysis of a Grease-Lubricated Roller Bearing from an Electric Motor", *J. Fail. Anal. Prev.* 11, (2011), 158–166, doi: 10.1007/s11668-010-9422-z.



Ocena emisyjności zasilania pojazdu elektrycznego w aspekcie odnawialnych źródeł energii

Jan Gutsche^{1*}, Łukasz Muślewski²

^{1*} Autor korespondencyjny; e-mail: jangutsche1@gmail.com

² Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: l.muslewski@wp.pl

Streszczenie: Celem pracy jest analiza struktury energetycznej z wyszczególnieniem odnawialnych źródeł energii w aspekcie ich eksploatacji. Zestawiono udział poszczególnych gałęzi energetyki produkujących „zieloną” energię w Polsce wraz z omówieniem niedogodności związanych z eksploataowaniem takich systemów. Omówiono również perspektywy budowy nowych obiektów elektrociepłowniczych zasilanych biomasą. Na tej podstawie została przeprowadzona analiza porównawcza w aspekcie emisji dwutlenku węgla dla auta elektrycznego zasilanego z elektrociepłowni spalającej słomę oraz pojazdów posiadających jednostkę spalinową. Badania jednoznacznie wykazały, iż pomimo występującego procesu spalania słomy wartość emisji dwutlenku węgla jest znacząco niższa niż w przypadku konwencjonalnego pojazdu, co w znaczącym stopniu pozytywnie oddziałuje na środowisko naturalne.

Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii, pojazdy elektryczne, eksploatacja, dwutlenek węgla

The assessment of the emissivity of an electric vehicle power supply in terms of renewable energy sources

Jan Gutsche^{1*}, Łukasz Muślewski²

^{1*} Correspondent author; e-mail: jangutsche1@gmail.com

² UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: l.muslewski@wp.pl

Summary: The aim of the work is to analyze the energy structure with the specification of renewable energy sources in terms of its exploitation. The share of all branches of the power industry producing "green" energy in Poland was summarized, along with a discussion of the inconveniences related to the use of such systems, which result from external factors. The prospects for the construction of new biomass-fired CHP plants were also discussed. On this basis, a comparative analysis was carried out in terms of carbon dioxide emissions for an electric car powered by a straw-fired CHP plant and vehicles with a combustion unit. The research clearly showed that despite the straw burning process, the value of carbon dioxide emissions is significantly lower than in the case of a conventional vehicle. Contributing significantly to the positive impact on the natural environment.

Key words: renewable energy sources, electric vehicles, operation, carbon dioxide

1. Wstęp

Antropogeniczne czynniki powstałe w wyniku eksploataowania złóż paliw kopalnych w bezpośredni sposób przyczyniają się do zmian termodynamicznych biosfery. Wcześniejsze działania wynikające z korzystania z dostępnych nośników energii dążyły do zmian środowiskowych, a nie zmian klimatu. Było to spowodowane przez konsumpcję drewna, które w dominujący sposób wykorzystywano na opał oraz jako materiał konstrukcyjny. Aktualnie działania na świecie ukierunkowane są na dynamiczne zmiany w eksploataowaniu alternatywnych paliw i źródeł, służących do wytwarzania „zielonej” energii. Zmiany te są uwydatnione od okresu rewolucji przemysłowej, ze względu na wzmożone zapotrzebowanie starano się zagwarantować stabilność energetyczną oraz niskie nakłady ekonomiczne. W XX w. można zaobserwować spadek udziału węgla z 60% do 25% oraz wzrost użytkowania ropy naftowej z 30% do 46%. Wszelkie paliwa kopalne z biegiem lat zaczynały być zastępowane przez energię atomową oraz odnawialne źródła energii. Ze względu na marginalne zastosowanie pozostałych obszarów energetycznych wykorzystanie paliw kopalnych pod koniec XX w. wynosiło 87% całkowitego pokrycia popytu na energię elektryczną, co przyczyniło się na przestrzeni ostatnich pięćdziesięciu lat do wzrostu zapotrzebowania do 350%.

Analizując równanie Ehrlicha i Holdrena [13] opisujące wzrost liczby ludności i jego wpływ na środowisko:

$$I = P \times A \times T \quad (1)$$

gdzie:

- I – presja ludności,
- P – wielkość populacji,
- A – konsumpcja zasobów per capita,
- T – miara wpływu działalności gospodarczej,

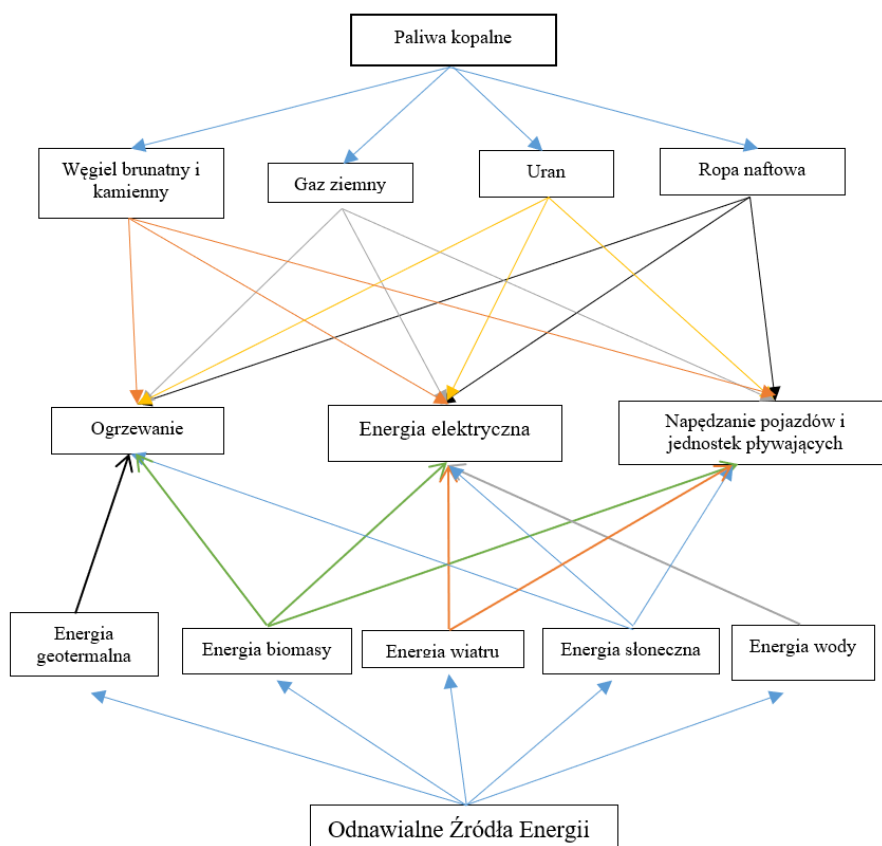
wyznaczono, że emisja dwutlenku węgla była znacznie zwiększona na przełomie XIX i początku XX w. na obszarach uprzemysłowionych [13].

Wraz z rozwojem nowych technologii pod koniec XX w. sytuacja uległa zmianie i kraje słabo rozwinięte stały się głównymi wytwórcami dwutlenku węgla [2].

2. Krajowy mix energetyczny

Źródła pozyskiwanej energii można podzielić na konwencjonalne i odnawialne. Należy zauważyć, że paliwa kopalne powstałe w naturalnych procesach biologicznych na przestrzeni milionów lat mają ograniczone zasoby. Można scharakteryzować je ze względu na bytność w trzech stanach skupienia: stałym, ciekłym, gazowym. Dzięki nim możliwe jest produkowanie energii elektrycznej, cieplnej, jak i mechanicznej. Proces urbanizacji oraz rozwój gospodarczy przyczyniły się w znaczącym stopniu do poszukiwania alternatywnych źródeł energii. W obawie o nieodwracalnie zmniejszające się zasoby paliw kopalnych zaczęto adaptować odnawialne źródła, do których zalicza się: energię słoneczną, energię wiatrową,

energię wodną uzyskiwaną z naturalnego przepływu oraz energię geotermalną i biomasę [4] (rys. 1).



Rys. 1. Możliwe konfiguracje wykorzystania paliw konwencjonalnych i OZE
[opracowanie własne na podstawie [4]]

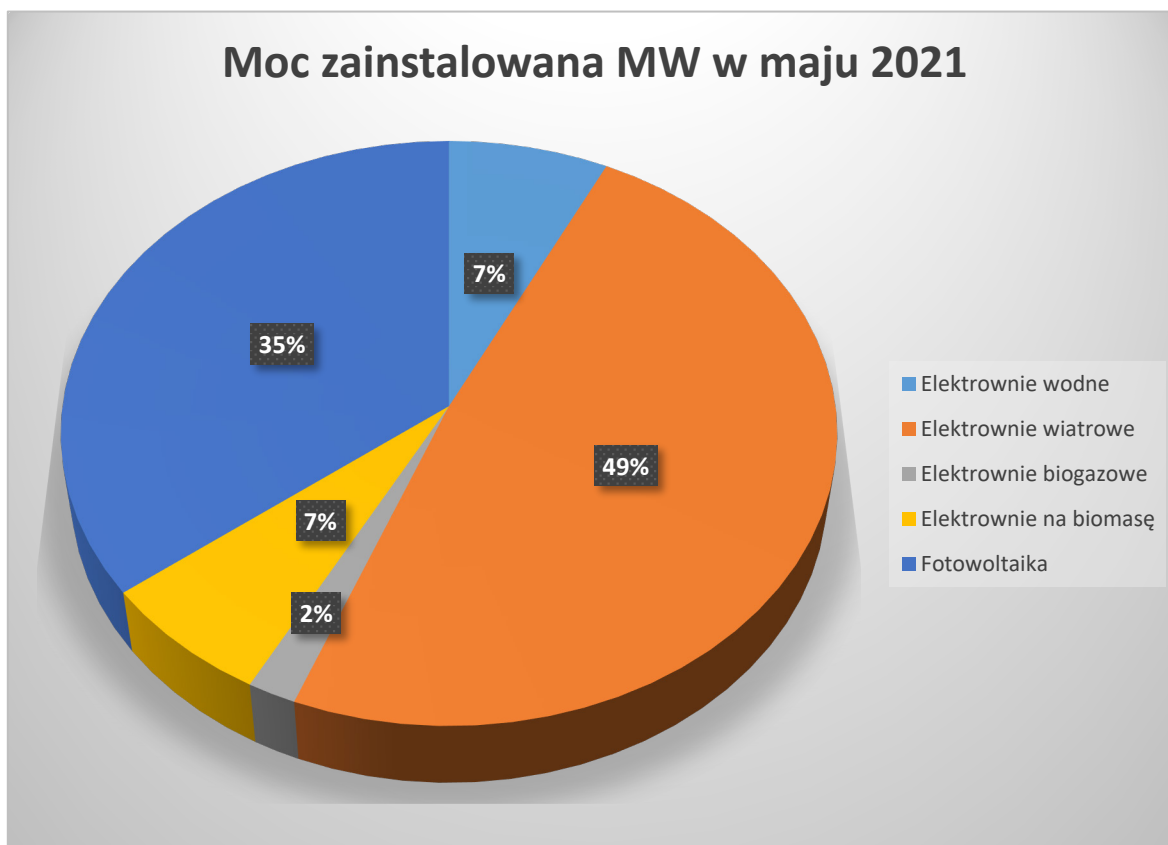
Fig. 1. Possible configuration for use of conventional fuels and RES [own study based on [4]]

Ze względu na marginalny udział ekologicznych źródeł energii w Polsce można dokonać podziału na małe i średnie elektrownie przydomowe, które zużywają energię na poczet prowadzenia gospodarstwa, oraz instalacje dużej mocy stanowiące istotne wsparcie dla sieci przesyłowej. Straty wynikłe z niesprzyjających warunków atmosferycznych, obniżających sprawność działania urządzeń, wpływają niekorzystnie na środowisko naturalne poprzez konieczność kompensowania ubytków mocy przez konwencjonalne elektrownie [1].

Uwzględniając definicję stworzoną przez Międzynarodową Agencję Energetyczną do odnawialnych źródeł energii nie zalicza się [7]:

- palnych odpadów przemysłowych,
- nieodnawialnych odpadów komunalnych i innych odpadów palnych,
- technologicznego ciepła odpadowego,
- ciepła grzewczego wyprodukowanego przez pompę ciepła,
- energię pozyskaną w elektrowni wodnej typu szczytowo-pompowa.

Na podstawie danych udostępnionych przez Agencję Rynku Energii moc zainstalowana odnawialnych źródeł energii na przestrzeni roku kalendarzowego od maja 2020 wzrosła o 32,2%, stanowiąc blisko 13,4 GW [15] (rys. 2).



Rys. 2. Procentowy udział mocy zainstalowanej OZE [15]
Fig. 2. Percentage share of the installed capacity of RES [15]

Całościowo w organizacji sieci odnawialnych źródeł energii dominują elektrownie wiatrowe z mocą ponad 6,5 GW oraz instalacje fotowoltaiczne wytwarzające ponad 4,7 GW, stanowiąc 84% produkowanej energii przez OZE [15].

3. Pojazdy zasilane energią elektryczną a degradacja środowiska

Badania prowadzone nad rozwojem napędów elektrycznych oraz hybrydowych w dużym stopniu są zależne od poziomu technologicznego samych ogniw zasilających. Dąży się do tego, by układ zasilający stanowił długookresowe źródło dostarczanego prądu. Ze względu na zróżnicowanie w dostępnych systemach przechowywania energii można charakteryzować ilość zgromadzonej energii jako gęstość masową oraz gęstość objętościową. Największe wartości zgromadzonej energii w jednostce objętości uzyskują akumulatory litowo-jonowe, zaś najmniejsze akumulatorów kwasowo-ołowiowych [8].

Zagraniczne instytuty badawcze, takie jak: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Society of Automotive Engineers (SAE) oraz International Electromechanical Commission (IEC) prowadzą badania nad standaryzacją wymagań funkcjonalnych dla systemów ładowania pojazdów [3]. Plan elektromobilności zakłada eksploatację pojazdów „bezemisyjnych”, jednakże w ujęciu polskiej infrastruktury energetycznej i dominacji elektrowni konwencjonalnych wszystkie eksploatowane pojazdy akumulatorowe pozostawiają po sobie ślad węglowy [5].

Pojazd elektryczny może być zasilany odnawialnymi źródłami energii, jednak ze względu na brak stabilności i przerywany charakter pracy sprawność takich układów szacowana jest na nieco ponad 39% [6]. Na podstawie dyrektywy wydanej przez International Energy Agency dotyczącej nośników energii i produktów palnych, takich jak biomasa, zakwalifikowanych jako odnawialne źródło energii, można dokonać analizy ekologiczno-ekonomicznej eksploatacji pojazdu elektrycznego [7] (tabela 1).

Tabela 1. Właściwości wybranych komponentów biomasowych [11]

Table 1. Properties of selected biomass components [11]

Rodzaj biomasy	Wilgotność [%]	Wartość opałowa [MJ/kg]	Wartość opałowa [kWh/kg]	Cena za 1 kg	Sprawność konwersji na energię elektryczną [%]
Drewno kawałkowe sezonowane	15	15	4,17	0,85	90
Zrębki	25	11	3,05	0,12	70
Pelet drzewny	8	17,5	4,73	0,75	90
Słoma luzem	15	15	4,17	0,14	80

Spalanie drewna emituje do atmosfery CO₂ oraz pyły. Substancje stałe są małocząsteczkowe na tle tych emitowanych przy spalaniu węgla, natomiast są groźniejsze, ponieważ z łatwością są wchłaniane przez ludzki organizm. W przypadku spalania drewna o wysokiej wilgotności oraz w kotłach o niskiej sprawności emisja wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych oraz dioksyn jest mniejsza niż w przypadku spalania węgla. Spalanie drewna sezonowanego nie ma więc ekologicznego oraz ekonomicznego uzasadnienia ze względu na dużo niższy koszt słomy [6].

Słoma jako produkt należący do biomasy powstaje w tysiącach ton dzięki rolnictwu. Istnieje możliwość zagospodarowania tego odpadu jako paliwa do produkcji energii. Słoma może zasilać paleniska w różny sposób i z tego względu wyróżnia się m.in.: kotły wsadowe, kotły do spalania rozdrobnionej słomy oraz kotły cygarowe (tabela 2). W Polsce planowana była budowa elektrociepłowni zasilanej słomą w Kowalach; jej docelowa moc miała sięgać 40 MWt i 20 MWe [12].

Tabela 2. Tabela średniej emisji substancji podczas spalania słomy [11]

Table 2. Table of the average emission of substances during the combustion of straw [11]

		SO ₂	NO _x	CO ₂	CO	Pył	[g/m ³]
Spalanie słomy	Kotły zmechanizowane na słomę rozdrobnioną	0,17	0,4	517,94	1	0,15	
	Kotły z załadunkiem wsadowym	0,17	0,4	517,94	2	0,2	

4. Badania własne

Zakładając, iż dysponuje się odpowiednią infrastrukturą do wytwarzania energii elektrycznej ze słomy, można dokonać analizy eksploatacyjnej pojazdu elektrycznego pod kątem emisji szkodliwych substancji wynikających ze spalania biomasy. Przyjęto, że obiektem badań jest pojazd elektryczny Audi E-Tron o nominalnej pojemności baterii wynoszącej 95 kWh. Zużycie energii oscyluje na poziomie $28,4 \frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}}$, co przekłada się na realny zasięg pojazdu ok. 350 km. W tabeli 3 do obliczenia ilości emitowanych gazów zastosowano współczynnik $\beta = 0,6$ odpowiadający za sumę strat przemian energii elektrycznej w ciepło oraz kaloryczności samego paliwa, jakim jest słoma. Przyjęto również średni ciężar słomy wynoszący 80 kg/m^3 [14]. Współczynnikami A i B oznaczono wartości emitowanych substancji przez dwa różne typy kotłów:

- A – kotły zmechanizowane na słomę rozdrobnioną,
- B – kotły z załadunkiem wsadowym.

Tabela 3. Tabela emisji szkodliwych substancji przez elektrociepłownie niezbędną do przebycia drogi przez pojazd elektryczny [opracowanie własne]

Table 3. The table of emissions of harmful substances by combined heat and power plants necessary to travel the road by an electric vehicle [own study]

Przebyta odległość [km]	SO ₂	Nox	Co ₂	CO	Pył	
100	0,09656	0,2272	294,1899	0,568	0,0852	A
	0,09656	0,2272	294,1899	1,136	0,1136	B
200	0,19312	0,4544	588,3798	1,136	0,1704	A
	0,19312	0,4544	588,3798	2,272	0,2272	B
500	0,4828	1,136	1470,95	2,84	0,426	A
	0,4828	1,136	1470,95	5,68	0,568	B
1000	0,9656	2,272	2941,899	5,68	0,852	A
	0,9656	2,272	2941,899	11,36	1,136	B
10000	9,656	22,72	29418,99	56,8	8,52	A
	9,656	22,72	29418,99	113,6	11,36	B
15000	14,484	34,08	44128,49	85,2	12,78	A
	14,484	34,08	44128,49	170,4	17,04	B

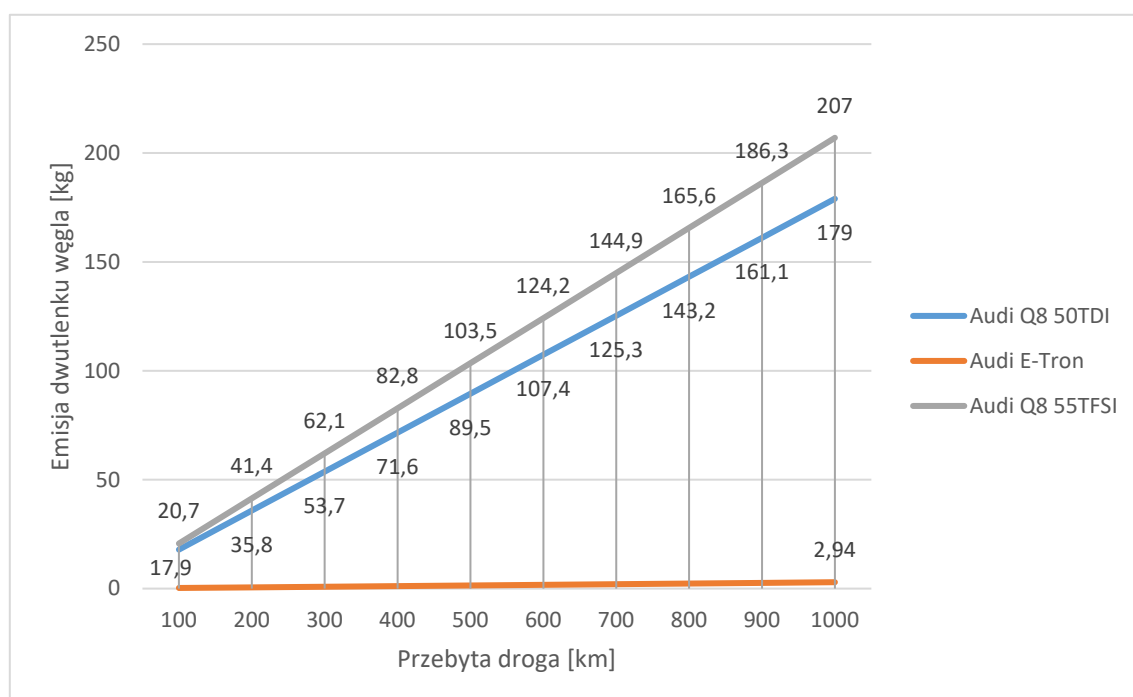
Do analizy porównawczej emisji szkodliwych substancji przez środki transportu zestawiono ze sobą trzy pojazdy pochodzące od jednego producenta, lecz każdy o innym zasilaniu (tabela 4).

Tabela 4. Tabela wybranych parametrów technicznych pojazdów poddanych analizie [17, 18]**Table 4.** Table of selected technical parameters of the analyzed vehicles [17, 18]

	Audi E-Tron	Audi Q8 50TDI	Audi Q8 55TFSI
Typ silnika	Elektryczny	Wysokoprężny	Benzynowy
Masa pojazdu [kg]	2695	2145	2095
Moc silnika [KM]	503	286	340
Moment obrotowy [Nm]	973	600	500
Długość [mm]	4902	4986	4986
Szerokość [mm]	1976	1995	1995
Wysokość [mm]	1629	1705	1705

Pojazdy mają zbliżone wymiary geometryczne. Ze względu na typ zasilania charakteryzują się różną masą własną. Pojazd elektryczny znacznie odbiega od pozostałych aut ze względu na umieszczone w podłodze ogniwa do magazynowania energii. Pojazdy spalinowe są wyposażone w sześciocylindrowe jednostki widlaste o pojemności trzech litrów.

Poniższy wykres liniowy (rys. 3) przedstawia ilość wyprodukowanego dwutlenku węgla przez pojazdy pokonujące ten sam odcinek drogi. Auto z silnikiem wysokoprężnym emituje ponad 61 razy większą ilość CO_2 niż pojazd elektryczny, zaś w pojeździe zasilanym benzyną ilość ta wzrasta aż 71-krotnie.

**Rys. 3.** Emisja dwutlenku węgla przez pojazdy w funkcji drogi [opracowanie własne]**Fig. 3.** Emission of dioxide by vehicles as a function of the road [own study]

5. Podsumowanie

Odnawialne źródła energii stanowią niszę w globalnej strukturze energetycznej. Jest to podyktowane koniecznością ponoszenia dużych nakładów finansowych z tytułu budowy specjalistycznej infrastruktury. Polityka Unii Europejskiej skłania państwa członkowskie do zwiększenia udziału ekologicznych źródeł energii, by ta stawała się konkurencyjna dla spalania paliw kopalnych. Biomasa kategorizowana jest jako produkt biologiczny podatny na rozkład, będąc tym samym odpadem organicznym powstałym podczas uprawy roli. Energię słoneczną gromadzoną w roślinności poprzez akumulację energii chemicznej dzięki procesowi fotosyntezy, można przetworzyć w elektrociepłowniach pozyskując ciepło oraz energię elektryczną. Pomimo iż wartość opałowa słomy jest o ok. 42% niższa niż w przypadku węgla, istnieje możliwość przetwórstwa tego surowca w celu zapewnienia pokrycia zapotrzebowania na energię.

Na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej pojazdu elektrycznego zasilanego z elektrowni na biomasę oraz pojazdów z silnikami spalinowymi o porównywalnych parametrach geometrycznych zaobserwowano nawet 71-krotnie większą emisję CO₂ w pojeździe z silnikiem o zapłonie iskrowym podczas przebycia tej samej odległości przez wszystkie pojazdy. Emisja dwutlenku węgla dla pojazdu elektrycznego została ujęta jako bezpośrednia emisja wynikająca ze spalania słomy bez uwzględniania dodatkowych czynności operacyjnych. Ślad węglowy, który jest mierzalnym wskaźnikiem wywodzącym się bezpośrednio z antropogenicznych czynników, wywołanym bezpośrednio przez emisję dwutlenku węgla, powstającym na skutek eksploatacji pojazdu, przyczynia się do powstania śladu węglowego. W Unii Europejskiej ponad 70% emisji szkodliwych substancji określanych jako gazy cieplarniane pochodzi z transportu. Pomimo procesu spalania słomy jako paliwa, będącego jednym z wariantów odnawialnych źródeł energii, sumaryczna ilość emitowanych gazów jest istotnie niższa niż w przypadku eksploatacji konwencjonalnego pojazdu spalinowego, i tym samym pozytywnie wpływa to na ekosystem.

Bibliografia

- [1] Bandzul, W., „Wpływ elektrowni wiatrowych na niezawodność pracy systemu elektroenergetycznego”, Polskie Sieci Elektroenergetyczne SA, *Elektroenergetyka* 3(54),(2005).
- [2] Cowie, J., „Climate Change. Biological and Human Aspects”, Cambridge University Press 2007.
- [3] Czyż, P., Cichowski, A., „Przegląd systemów ładowania elektrycznych osobowych pojazdów i koncepcja dwukierunkowej ładowarki pokładowej”, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* 57(2017).
- [4] Hodana, M., Holtzer, G., Kalandyk, K., Szymańska, A., Szymański, B., Żymankowska-Kumon, S., „Odnawialne źródła energii Poradnik”, Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, Kraków 2012.

- [5] Gutsche, J., Muślewski, Ł., Dzioba, A., Matyukh, S., "Identification and analysis of factors influencing climate change in terms of CO₂ emissions", MATEC Web Conferences 332, 01002, 2021.
- [6] Kasztylewicz, Z., Patyk, M., „Nowoczesne i sprawne elektrownie węglowe strategicznym wyzwaniem dla Polski”, *Polityka Energetyczna* 18(4),(2015).
- [7] Norwisz, J., Musielak, T., Boryczko, B., „Odnawialne źródła energii – polskie definicje i standardy”, *Rynek Energii* 1(2006).
- [8] Pielecha, I., Merksiz, J., „Problematyka ładowania akumulatorów pojazdów elektrycznych”, Konferencja Naukowo-Techniczna 6–8 kwietnia 2016, Pałac Mierzęcin Wellness & Wine Resort.
- [9] Tomaszewski, K., „Rola czynnika ludzkiego w kształtowaniu polityki energetycznej współczesnego państwa”, *Środkowoeuropejskie Studia Polityczne* 1(2020), 147–169.
- [10] Tomaszewski, K., Sekściński, A., „Odnawialne źródła energii w Polsce – perspektywa lokalna i regionalna”, *Rynek Energii* 4(149),(2020).
- [11] www.fluid.wme.pwr.wroc.pl/~spalanie/dydaktyka/spalanie_wyklad_mechanika/SPALANIE_I_PALNIKI/SPALANIE_BIOMASY.PDF (dostęp: 25.06.2021).
- [12] www.inzynieria.com/energetyka/wiadomosci/14705,elektrociepłownia-na-słome-w-kowalach (dostęp: 25.06.2021).
- [13] https://pl.wikipedia.org/wiki/Paul_R._Ehrlich (dostęp: 25.06.2021).
- [14] <https://rolniczy.wordpress.com/2011/01/08/57/> (dostęp 25.06.2021).
- [15] <https://www.rynekelektryczny.pl/moc-zainstalowana-oze-w-polsce/> (dostęp 25.06.2021).
- [16] <https://smoglab.pl/dym-ze-spalania-drewna-co-zawiera/> (dostęp: 25.06.2021).
- [17] <https://www.autocentrum.pl/dane-techniczne/audi/q8/suv/> (dostęp: 25.06.2021).
- [18] <https://www.autocentrum.pl/elektryczne/audi/e-tron/> (dostęp: 25.06.2021).