

OKREŚLENIE NOŚNOŚCI WYBRANYCH POŁĄCZEŃ MONTAŻOWYCH BLACH ZE STOPU ALUMINIUM EN AW-5754

Determination of the load capacity of selected assembly joints of EN AW-5754 aluminum alloy sheet

Anna RUDAWSKA, Paweł PRUS, Izabela MITURSKA, Tomasz WARDA

S t r e s z c z e n i e: W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości wytrzymałościowych przeprowadzonych w próbie rozciągania dla połączeń klejowych, nitowych i klejowo-nitowych blach ze stopu aluminium EN AW-5754. Zastosowano dwie najbardziej rozpowszechnione metody wykonywania połączeń nierozłącznych, jakimi są klejenie i nitowanie oraz dodatkowo badaniom poddano połączenia powstałe z zastosowania obu metod. W procesie nitowania zastosowano pojedynczy nit zrywalny, wykonany ze stopu aluminium. W procesie klejenia wykorzystano klej epoksydowy dwuskładnikowy Epidian 57/PAC/1:1. Powierzchnię do procesu klejenia przygotowano poprzez ręczną obróbkę mechaniczną papierem ściernym P320 oraz odtłuszczenie środkiem Loctite 7063. Proces utwardzania połączeń klejowych przebiegał w temperaturze otoczenia. Analizowane połączenia poddano badaniom niszczącym, zgodnie z normą ISO 4587, na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z150. Na podstawie wyników badań zauważono, że lepszą nośnością charakteryzowały się połączenia klejowe, jednak wynik ten nie odbiegał znacząco od wartości wytrzymałości połączenia klejowo-nitowego. Najmniej korzystnymi wynikami charakteryzowały się połączenia nitowe, co mogło być skutkiem zastosowania pojedynczego nitu.

S ł o w a k l u c z o w e: połączenia klejowe, połączenia nitowe, połączenia klejowo-nitowe, nośność, blachy ze stopu aluminium

A b s t r a c t: The paper presents results of a tensile test for adhesive, rivets and adhesive-riveted aluminum sheet EN AW-5754 joints. Values of strength and destructive force were presented. Due to its characteristics of used in research material finds application in almost all industries, precisely because the focus was on correctness of the technology made joints and the mechanical properties which characterized the resulting joints. Two of the most popular methods for performing permanent joints was used – bonding and riveting and hybrid of these two method. In riveting a single rivet made of an aluminum alloy was used. The holes for the rivets were previously drilled. In bonding process of the adhesive used was a two-component adhesive consisting of epoxy resin Epidian 57 and hardener PAC prepared in a stoichiometric ratio of 1:1. The sandpaper P320 machining process and degreasing with Loctite 7063 was used to surface treatment of surfaces adherends. The curing process was performed at ambient temperature. Analysed joints were destructive tested, in accordance with ISO 4587, on testing machine Zwick / Roell Z150. Based on the results observed that a better load capacity characterized by adhesive joints, but this result was similar with the load capacity of the joint adhesive-riveted. The least positive results were characterized by riveted joints, which could be due to the use of a single rivet.

K e y w o r d s: adhesive joints, riveted joints, adhesive-riveted joints, load capacity, aluminum sheets

Wprowadzenie

W procesach montażu występują połączenia różnego rodzaju, które najczęściej klasyfikowane są ze względu na ich konstrukcję wykonania na rozłączne i nierozłączne [3]. Wybór określonego rodzaju połączenia uwarunkowany jest wieloma czynnikami, m.in.: cechami geometrycznymi połączenia, rodzajem łączonych materiałów, wymaganiami dotyczącymi rodzaju połączenia, warunkami eksploatacyjnymi i innymi [1, 7, 11, 12]. Przedmiotem analiz były połączenia klejowe, nitowe oraz klejowo-nitowe blach wykonanych ze stopu aluminium EN AW-5754.

Klejenie jest jedną z wielu metod wykonywania połączeń nierozłącznych części maszyn. Postęp w dziedzinie doskonalenia jakości klejów pozwala na coraz szersze stosowanie tych połączeń w wielu odpowiedzialnych konstrukcjach lotniczych, morskich i budowy maszyn [8]. Połączenia klejowe mają wiele zalet [10] (tłumienie drgań, możliwość łączenia różnego rodzaju materiałów,

uszczelnianie połączenia, itp.), obarczone są również wadami (np. małą odpornością na naprężenia normalne). Najkorzystniejszymi i najczęściej stosowanymi konstrukcjami wykonywania połączeń klejowych są połączenia zakładkowe, które uzyskują najwyższą wytrzymałość, kiedy pracują w warunkach ścinania [8]. Problemem, jaki często można napotkać podczas wykonywania takich połączeń, jest nieosiowe przyłożenie sił zewnętrznych, ale pomimo tego w takich konstrukcjach oprócz naprężeń stycznych występują dodatkowe naprężenia rozciągające, skierowane prostopadle do warstwy kleju. Rozwiązaniem wspomnianego problemu może być m.in. zastosowanie nitów jako elementów dociskających klejone elementy, dzięki czemu możliwe jest zmniejszenie negatywnego działania naprężeń odrywających. Jest to połączenie dwóch powszechnie stosowanych procesów łączenia: nitowania i klejenia. Dzięki temu wykorzystuje się zalety nitowania i klejenia, jednocześnie eliminując liczne wady towarzyszące każdemu z tych procesów

oddzielnie. Przeprowadzono badania eksperymentalne w celu sprawdzenia i porównania możliwości zamiennego stosowania klejenia i nitowania oraz połączenia obu tych metod, jak również porównana ich nośności.

Badania eksperymentalne

Łączony materiał

Do badań wykorzystano prostopadłościennie próbki wykonane z blachy ze stopu aluminium EN AW-5754 o grubości $g = 2$ mm, które mają średnią wytrzymałość na rozciąganie – 209 MPa [4-6], wysoką odporność na korozję w warunkach morskich, wodzie morskiej i atmosferze przemysłowej. Materiał ten odznacza się wysoką wytrzymałością zmęczeniową. Skład chemiczny blach ze stopu aluminium EN AW-5754 przedstawiono w tab. I.

Tabela I. Skład chemiczny blach ze stopu EN AW-5754 [9]
Table I. EN AW-5754 aluminum sheet chemical composition [9]

Gatunek materiału	Zawartość [%]								
	Mg	Cu	Mn	Zn	Si	Fe	Cr	Ti	Al
EN AW-5754	3,50	0,02	0,14	-	0,27	0,25	0,10	0,10	reszta

Blachy ze stopu aluminium AW-5754 wykorzystano do wykonania połączeń klejowych, nitowych oraz klejowo-nitowych jednozakładkowych. Wykonano po 10 połączeń dla każdego rodzaju połączeń.

Charakterystyka połączeń klejowych

Do badań wykorzystano połączenia klejowe jednozakładkowe, wykonane z opisanego wyżej materiału, obciążone na ścinanie, których schemat i wymiary zamieszczono na rys. 1.

Wymiary łączonych elementów były następujące:

- długość: $l = 100$ mm,
- szerokość: $d = 25$ mm,

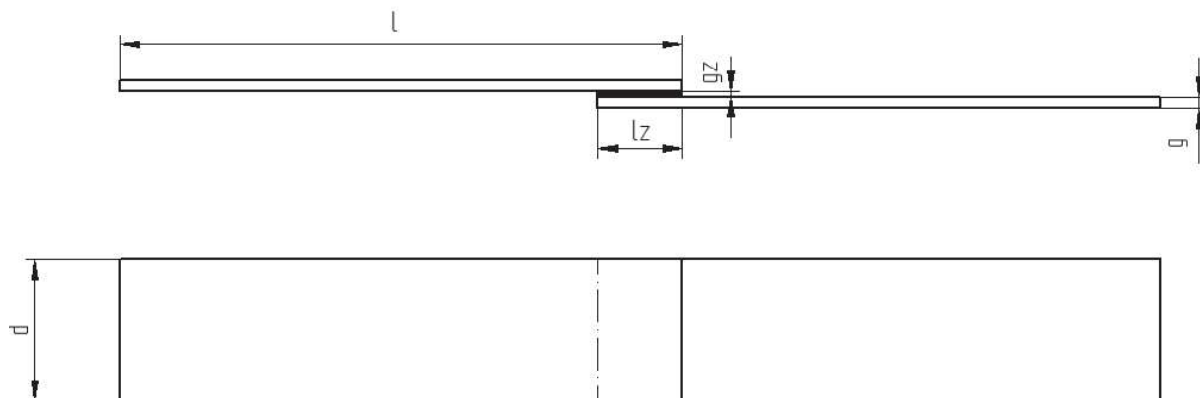
- grubość: $g = 2$ mm,
- długość zakładki: $l_z = 15$ mm,
- grubość spoiny klejowej $g_z \approx 0,05$ mm.

Połączenia klejowe wykonywano w warunkach laboratoryjnych, gdzie temperatura powietrza wynosiła 23°C przy wilgotności 23%. Proces przygotowania połączeń klejowych składał się z następujących operacji technologicznych:

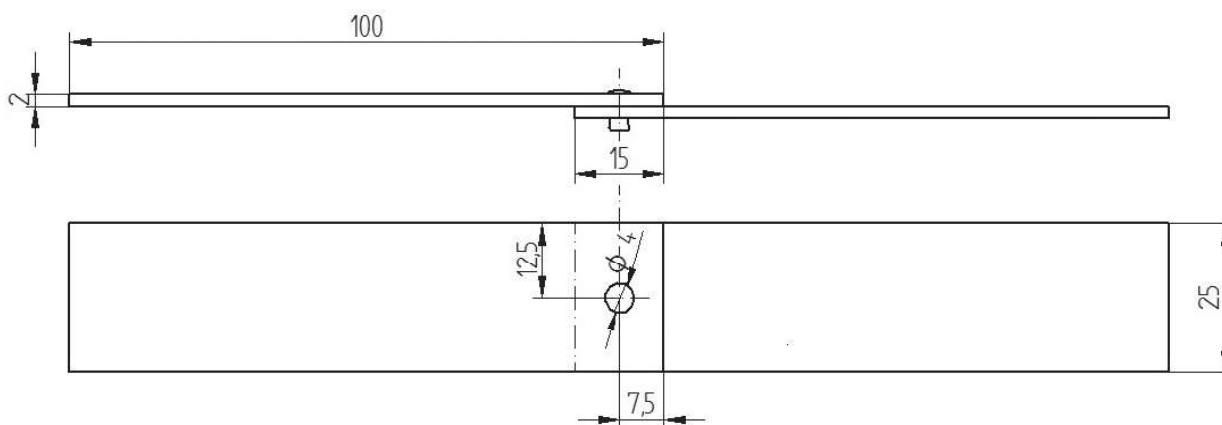
- 1) przygotowanie powierzchni przeznaczonej do klejenia:
 - chropowacenie powierzchni ściernym narzędziem nasypowym o gradacji P320,
 - oczyszczenie z pyłów i zanieczyszczeń środkiem Loctite 7063,
 - odłuszczenie preparatem Loctite 7063 i samoczynne osuszenie,
- 2) przygotowanie masy klejowej – w badaniach użyto dwuskładnikowego kleju epoksydowego, składającego się z żywicy epoksydowej Epidian 57 i utwardzacza PAC połączonych w stosunku stechiometrycznym 1:1 (Epidian 57/PAC/1:1). Po odmierzeniu odpowiednich proporcji składniki zostały wymieszane, dzięki czemu powstała jednorodna masa klejowa,
- 3) naniesienie kompozycji klejowej na jedną z łączonych powierzchni – klej był наносzony ręcznie z wykorzystaniem szpachelki z tworzywa polimerowego tak, że na całej powierzchni zakładki grubość nakładanego kleju była jednakowa,
- 4) łączenie klejonych blach – zgodnie z przyjętą długością zakładki oraz wywarcie nacisku ok. 0,2 MPa,
- 5) utwardzanie jednostopniowe w temperaturze 23°C i wilgotności 23% przez 240 godz.,
- 6) kontrola jakości wykonanych połączeń.

Charakterystyka połączeń nitowych

W ramach badań przygotowano również jednozakładkowe połączenia nitowe z jednym nitem, umieszczonym centralnie w powierzchni przekroju zakładki, której wymiar był jednakowy, tak jak w przypadku połączeń



Rys. 1. Kształt połączeń jednozakładkowych klejowych użytych w badaniach eksperymentalnych
Fig. 1. The single-lap adhesive joint geometry used in experimental research



Rys. 2. Kształt połączeń nitowych użytych w badaniach eksperymentalnych
Fig. 2. The riveted joint geometry used in experimental research

klejowych. Wymiary połączeń nitowych przedstawiono na rys. 2.

Proces nitowania składał się z następujących operacji technologicznych:

- 1) trasowanie otworów zgodnie z założeniami konstrukcyjnymi oraz napunktowanie rozmieszczenia otworów pod nity,
- 2) wiercenie otworów na wiertarce stołowej wiertłem o średnicy $\varnothing 4,2$ mm,
- 3) ustalenie łączonych elementów z zachowaniem współosiowości z wykorzystaniem specjalnego uchwytu ustalającego,
- 4) nitowanie za pomocą nitownicy ręcznej z wykorzystaniem nitów zrywalnych o średnicy $\varnothing 4$ mm, wykonanych ze stopu aluminium,
- 5) kontrola jakości wykonanych połączeń.

Charakterystyka połączeń klejowo-nitowych

Do przeprowadzenia badań wykorzystano również zakładkowe połączenia klejowo-nitowe. Długość zakładki wynosiła, analogicznie jak w przypadku połączeń klejowych i nitowych, 15 mm. Wymiary połączeń klejowo-nitowych zostały zachowane, tak jak w przypadku połączeń nitowych, z uwzględnieniem grubości spoiny klejowej założonej w połączeniach klejowych. Proces wykonania połączeń klejowo-nitowych łączył obie metody i składał się z następujących czynności:

- 1) przygotowanie powierzchni przeznaczonej do łączenia:
 - chropowacenie powierzchni ściernym narzędziem nasypowym o gradacji P320,
 - oczyszczenie z pyłów i zanieczyszczeń oraz od tłuszczanie środkiem Loctite 7063,
- 2) trasowanie otworów zgodnie z założeniami konstrukcyjnymi, napunktowanie rozmieszczenia otworów pod nity,
- 3) wiercenie otworów na wiertarce stołowej, wiertłem o średnicy $\varnothing 4,2$ mm,

- 4) przygotowanie masy klejowej – użyto tą samą kompozycję klejową, co w przypadku wykonywania połączeń klejowych (Epidian 57/PAC/1:1), warunki przygotowania kleju pozostały niezmiennie,
- 5) naniesienie kompozycji klejowej na jedną z łączonych powierzchni,
- 6) łączenie klejonych blach – zgodnie z przyjętą długością zakładki i zachowaniem osiowości otworów przygotowanych pod nity, wstępne utwardzenie kleju (ok. 6 godz.),
- 7) nitowanie za pomocą nitownicy ręcznej, z wykorzystaniem nitów identycznych jak w procesie nitowania,
- 8) utwardzanie połączeń klejowo-nitowych przez 240 godz.,
- 9) kontrola jakości.

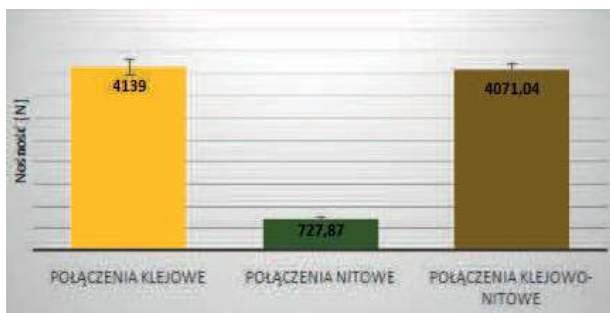
Wyniki badań eksperymentalnych

Po wykonaniu operacji kontroli jakości, wszystkie połączenia zostały poddane niszcącym badaniom wytrzymałościowym na maszynie Zwick/Roell Z150, zgodnie z normą ISO 4587 [2]. Przeprowadzono próbę rozciągania, dzięki czemu uzyskano wyniki na podstawie których możliwe było określenie siły nośnej analizowanych połączeń. Na podstawie uzyskanych rezultatów możliwa była ocena technologii wykonania i właściwości wytrzymałościowych rozpatrywanych połączeń przez określenie nośności połączenia.

Siła przenoszona przez połączenia

Wyniki wartości średniej arytmetycznej siły maksymalnej połączeń wykonanych z blach aluminiowych EN AW-5754 pokazano na rys. 3.

Na podstawie wyników badań otrzymano następujące wartości siły nośnej: dla połączeń klejowych 4139 N, dla połączeń nitowych 728 N, zaś dla połączeń klejowo-nitowych 4071 N.



Rys. 3. Siła przenoszona przez połączenia blach ze stopu aluminium EN AW-5754

Fig. 3. The force transferred by the joints of aluminum alloy sheets EN AW-5754

Omówienie wyników badań

Porównując wyniki badań wykonanych połączeń blach ze stopu aluminium EN AW-5754 zauważono, że istotny wpływ na nośność ma przede wszystkim rodzaj zastosowanego połączenia montażowego. Największą siłą nośną przenoszą połączenia klejowe i wynosi ona 4139 N. Wprowadzenie nitu do konstrukcji połączenia klejowego spowodowało nieznaczny spadek siły nośnej – do 4071,04 N, a choć nie jest to statystycznie istotna różnica to jednak proces ich wykonania był bardziej pracowity i czasochłonny. Spadek tej wartości może świadczyć o negatywnym wpływie operacji zamykania nitów na wstępnie utwardzoną spoinę klejową. Podczas wykonywania połączeń nitowych na wstępnie klejonych elementach można przypuszczać, że część siły potrzebnej do uformowania zamykającej główki nitu jest przenoszona na warstwę kleju. Może to powodować lokalne (wokół łba nitu) uszkodzenia utwardzonej warstwy kleju, co z kolei przekłada później się na obniżenie wytrzymałości spoiny. Najmniejszą nośność wykazały połączenia nitowe – 727,87 N, co stanowi 17,58% nośności połączeń klejowych.

W przypadku połączeń klejowych i klejowo-nitowych, wartość odchylenia standardowego otrzymanych wyników wytrzymałości na ścinanie mieściła się w podobnym zakresie, co stanowiło ok. 3–4%. Świadczy to zatem o wysokiej powtarzalności uzyskanych wyników i poprawności wykonania poszczególnych połączeń.

W połączeniach klejowych zniszczeniu uległa spoina klejowa, bez deformacji łączonych elementów. W przypadku połączeń nitowych deformacji uległy zarówno łączone materiały, jak i otwory pod nity. We wszystkich połączeniach nitowych nastąpiło ścięcie nitu, podobnie i w połączeniach klejowo-nitowych, gdzie dodatkowo zniszczeniu uległa również spoina klejowa, a zniszczenie miało charakter adhezyjno-kohezyjny.

Wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników badań eksperymentalnych sformułowano następujące uwagi:

- największa wartość siły nośnej została uzyskana w przypadku połączeń klejowych, a najmniejsza w połączeniach nitowych,
- wzmocnienie połączenia nitowego zakładkowego przez wprowadzenie spoiny klejowej do konstrukcji połączenia wpłynęło korzystnie na zwiększenie nośności, która wzrosła 5,5 raza,
- nośność połączeń nitowych zakładkowych przy zastosowaniu jednego nitu jest bardzo mała, zniszczenie połączeń zachodziło poprzez ścięcie nitu. Na podstawie dostępnej literatury można przypuszczać, że zmiana średnicy oraz zastosowanie większej ilości nitów znacznie zwiększyłyby wytrzymałość połączeń,
- połączenia klejowo-nitowe wykazują mniejszą nośność od połączeń klejowych, jednak znacznie wyższą od połączeń nitowych, świadczyć to może o obniżeniu wytrzymałości spoiny klejowej przez uszkodzenie utwardzonej warstwy kleju, wskutek wprowadzenia nitów do konstrukcji połączenia,
- połączenie nitowe jest najszybszym sposobem wykonania połączenia montażowego, nie wymaga czasu oczekiwania potrzebnego do utwardzenia kleju, jednak wymaga użycia odpowiedniego oprzyrządowania.

Według danych literaturowych [8], wykorzystanych podczas opracowania artykułu, połączenia klejowo-nitowe powinny charakteryzować się największą wartością siły nośnej, można jednak zauważyć na podstawie otrzymanych wyników badań, że wyższą nośność mają połączenia klejowe. Wpływ na taki wynik może mieć kilka czynników, m.in. rodzaj kleju, co warunkuje sztywność kleju oraz ilość i rozmieszczenie nitów oraz technologia wykonania połączeń nitowych. Ze względu na specyfikę połączeń klejowych stosowanie różnych rodzajów klejów ma istotny wpływ na wytrzymałość tych połączeń. W połączeniu klejowo-nitowym klej może pełnić dodatkową funkcję uszczelniacza, co jest pożądane w wielu konstrukcjach. Wszystkie połączenia zostały przygotowane w warunkach laboratoryjnych, być może zastosowanie specjalnego oprzyrządowania zapewniającego stały i równomierny docisk poprawiłoby wynik wytrzymałości dla połączeń klejowo-nitowych. Kolejnym rozwiązaniem może być zmiana sposobu nitowania, np. na nitowanie radialne.

Ponadto podczas oceny charakteru zniszczenia analizowanych połączeń zauważono, że zniszczeniu uległ nit oraz zaobserwowano zniszczenie adhezyjno-kohezyjne w połączeniach klejowych i klejowo-nitowych.

Podsumowując badania nad technologią i właściwościami połączeń klejowych, nitowych i klejowo-nitowych blach ze stopu aluminium EN AW-5754, można zauważyć, że nośność tych połączeń uwarunkowana jest konstrukcją i technologią ich wykonania. W celu dokładniejszej i bardziej wnikliwej analizy właściwości wytrzymałościowych połączeń klejowych, nitowych i hybrydowych: klejowo-nitowych planowane jest prowadzenie dalszych badań z uwzględnieniem zmiany wykonywania konstrukcji nitowych i stosowanego kleju.

LITERATURA

- [1] Godzimirski J. 2009. „Problemy klejenia konstrukcyjnego”. *Technologia i Automatyizacja Montażu* (1): 25–31.
- [2] ISO 4587:2003 – Adhesives. Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies.
- [3] Kula W. 2005. „Projektowanie połączeń rozłącznych i nierozłącznych”. Radom: Instytut Technologii i Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy.
- [4] Lachowicz M.M. i in. 2012. „Procesy zużycia tribologicznego, kawitacyjnego i korozyjnego wybranych stopów aluminium do przeróbki plastycznej”. *Tribologia: tarcie, zużycie, smarowanie* (5): 85–95.
- [5] Leśniak D. i in. 2016. „Wpływ zawartości Mg na własności mechaniczne kształtowników ze stopów aluminium serii 5xxx, wytwarzanych na drodze wyciskania zgrzewającego”. *Rudy i Metale Nieżelazne Recykling* (61): 248–253.
- [6] Maciołka P. 2010. „Wykorzystanie nośności powierzchni do uzyskania charakterystyki styku pomiędzy przedmiotem i ustalaczem położenia”. *Inżynieria Maszyn* (15): 53–66.
- [7] Mucha J., W. Witkowski. 2011. „Nośność wybranych rozwiązań połączeń nitowych podczas próby ściskania i rozciągania”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej* (4): 33–42.
- [8] Perłowski R. 2007. „Technologia i właściwości połączeń klejowo-nitowych”. *Technologia i Automatyizacja Montażu* (2): 124–127.
- [9] Rudawska A., M. Błaziak. 2011. „Analiza porównawcza siły niszczącej połączenia klejowe, klejowo-nitowe oraz nitowe stopu tytanu”. *Technologia i Automatyizacja Montażu* (4): 40–44.
- [10] Rudawska A., T. Warda, P. Miłosz. 2015. „Wytrzymałość połączeń klejowych i nitowych”. *Technologia i Automatyizacja Montażu* (2): 56–59.
- [11] Rudawska A. 2009. „Wytrzymałość połączeń klejowych blach aluminiowych w aspekcie montażu połączeń nierozłącznych”. *Technologia i Automatyizacja Montażu* (2): 35–38.

dr hab. inż. Anna Rudawska, prof. PL – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: a.rudawska@pollub.pl

inż. Paweł Prus – absolwent Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: pawprus81@gmail.com

mgr inż. Izabela Miturska – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: i.miturska@pollub.pl

mgr inż. Tomasz Warda – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: t.warda@pollub.pl