

WPLYW WYBRANYCH CZYNNIKÓW TECHNOLOGICZNYCH I EKSPLOATACYJNYCH NA WYTRZYMAŁOŚĆ POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH BLACH TYTANOWYCH

The influence of chosen technological and operational factors on the bonded joints strength of titanium sheets

Anna RUDAWSKA, Anna WOLIŃSKA, Tomasz WARDA, Izabela MITURSKA

Streszczenie: Przedstawione w pracy badania doświadczalne dotyczyły wpływu wybranych czynników technologicznych oraz eksploatacyjnych na wytrzymałość połączeń klejowych blachy tytanowej. Przedmiotem badań były połączenia klejowe jendozakładkowe blachy tytanowej CP2 o grubości 0,64 mm, obciążone na ścinanie. Rozważanym czynnikiem technologicznym był rodzaj kleju, natomiast czynnikiem eksploatacyjnym – czas sezonowania połączeń klejowych w warunkach otoczenia. Zastosowano dwa rodzaje klejów epoksydowych dwuskładnikowych: Epidian 57/PAC/100:100 oraz Epidian 57/Z1/100:10. Przyjęto trzy warianty czasu sezonowania: 14, 21 i 28 dni oraz przygotowano próbki referencyjne, dla których czas utwardzania wynosił 7 dni. Utwardzanie przeprowadzono w temperaturze otoczenia $25 \pm 2^\circ\text{C}$. Analizowane połączenia klejowe poddano badaniom niszczącym – wytrzymałościowym, w których określono wytrzymałość na ścinanie, zgodnie z normą DIN EN 1465, na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z150. Na podstawie wyników badań zauważono, że największą wytrzymałość na ścinanie charakteryzowały się połączenia blachy tytanowej CP2 wykonane za pomocą Epidianu 57/PAC/1:1. Ponadto w obu przypadkach wykonanych połączeń klejowych blachy tytanowej CP2 z wykorzystaniem klejów epoksydowych Epidian 57/PAC/100:100 oraz Epidian 57/Z1/100:10, najwyższą wartość wytrzymałości tych połączeń osiągnięto po 7 dniach utwardzania.

Słowa kluczowe: połączenia klejowe, wytrzymałość, blachy tytanowe, klej, czas sezonowania

Abstract: The paper presents the experimental research focused on the impact of selected technological and operational factors on the strength of adhesive joints of titanium sheet. The single-lap joints of titanium sheet of 0.64 mm thickness were tested, which were subjected to shear. The type of adhesive as technological factor and seasoning time in ambient conditions as operational factor were considered. Two types of two-component epoxy adhesives: Epidian 57/PAC/100:100 and Epidian 57/Z1/100:10 were used. Three variants of the seasoning time: 14, 21 and 28 days and prepared reference samples, for which the curing time was 7 days, were tested. Curing is carried out at an ambient temperature of $25 \pm 2^\circ\text{C}$. The adhesive joints were destructive tested. The shear strength, in accordance with DIN EN 1465, were tested in Zwick/Roell Z150 strength machine. On the basis of the results of research it has been noted that the largest shear strength of CP2 titanium sheet adhesive joints preparing by Epidianu 57/PAC/1:1 was obtained. In addition, in both cases of tested CP2 titanium sheet adhesive joints making by epoxy adhesives Epidian 57/PAC/100:100 and Epidian 57/Z1/100:10, the highest values of the strength of these joints were achieved after 7 days of curing.

Keywords: adhesive joints, strength, epoxy adhesives, seasoning time

Wprowadzenie

Kleje odgrywają coraz większą rolę w nowoczesnym przemyśle i stają się niezbędne podczas wykonywania połączeń montażowych w wielu gałęziach przemysłu: maszynowego, motoryzacyjnego, lotniczego oraz budowlanego [1-4].

Istotną zaletą połączeń klejowych jest możliwość uzyskania połączenia o konstrukcji lekkiej, sztywnej, wytrzymałej oraz bezpiecznej. Dodatkowo, połączenia klejowe mają właściwości pozwalające na tłumienie drgań oraz zapewniające dobrą szczelność (co nie zapobiega powstawaniu korozji). Ponadto warstwa kleju jest dobrym izolatorem elektrycznym, a także pozwala na wykluczenie dostępu wilgoci do wnętrza połączenia. Kolejną zaletą jest możliwość łączenia różnego rodzaju materiałów – za pomocą klejów można połączyć niemal wszystkie materiały (tworzywa, metale, szkło, drewno,

kamień, gumę i inne) i praktycznie w dowolnych układach [4].

Połączenia klejowe oprócz zalet mają również wady, do których należy zaliczyć m.in. brak kleju uniwersalnego, który w równie dobry sposób łączyłby wszystkie materiały [5-6]. Inną niekorzystną cechą jest skomplikowana technologia klejenia, która wpływa na wytrzymałość połączeń klejowych. Ponadto należy zauważyć, że połączenie powinno być tak skonstruowane, aby naprężenia występujące w spoinie klejowej przyczyniły się do uzyskania jak największej wytrzymałości. Podczas przedstawiania wad nie należy zapominać również o okresie użytkowania elementów klejonych, który jest związany z procesem starzenia spoin klejowych [6-8]. Na wymienione czynniki wpływa m.in. proces utwardzania i sezonowania spoiny klejowej, a różnorodne zagadnienia związane z tą problematyką zaprezentowano m.in. w pracach [9-13], podkreślając konieczność prowadzenia dalszych prac

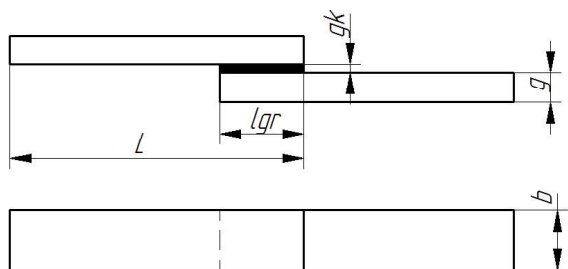
badawczych ze względu na specyfikę połączeń klejowych różnych materiałów konstrukcyjnych utwardzanych i sezonowanych w różnych warunkach.

W artykule dokonano porównania wytrzymałości połączeń klejowych blachy tytanowej CP2, wykonanych przy użyciu dwóch rodzajów klejów epoksydowych, złożonych z żywicy Epidian 57 oraz dwóch różnych utwardzaczy: Z1 i PAC, sezonowanych w czasie 14, 21 i 28 dni.

Metodyka badań

Łączony materiał i połączenie klejowe

W badaniach wykorzystano próbki wykonane z blachy tytanowej o oznaczeniu CP2 (Grade 2 – wg ASTM B265 [14]) i grubości $g = 0,64$ mm oraz pozostałych wymiarach: $b=25$ mm oraz $L=100$ mm. Analizie wytrzymałościowej poddano połączenia klejowe jednozakładkowe blachy tytanowej CP2 obciążone na ścinanie (rys. 1).



Rys. 1. Połączenie klejowe blachy tytanowej CP2
Fig. 1. The bonded joint of CP2 titanium sheet

Długość zakładki obliczono ze wzoru na graniczną długość połączenia zakładkowego przedstawionego w pracy [1]. Przyjęto długość zakładki połączenia klejowego o wymiarze 12 mm.

Przygotowanie powierzchni blach tytanowych do klejenia

Jako sposób przygotowania powierzchni próbek blach tytanowych do klejenia zastosowano odtłuszczenie, do którego wykorzystano środek odtłuszczający Loctite 7063 [6]. Proces odtłuszczenia polegał na 3-krotnym nałożeniu odtłuszczacza metodą spryskiwania na łączone powierzchnie i przetarcia ich ręcznikiem papierowym. Po ostatnim etapie nałożenia środka, odtłuszczacz pozostawiono do samoistnego wyschnięcia i odparowania. Czas od momentu odtłuszczenia do momentu nałożenia kleju wyniósł 10 min. Odtłuszczenie przeprowadzono w temperaturze $25\pm 2^\circ\text{C}$, przy wilgotności powietrza wynoszącej 21–23%.

Kleje, warunki utwardzania oraz warianty sezonowania

Do wykonania połączeń klejowych wykorzystano dwa rodzaje klejów epoksydowych, których skład

zamieszczono w tab. 1. Kompozycję klejową żywicy epoksydowej Epidian 57 oraz utwardzacza PAC połączono w stosunku stechiometrycznym 1:1, natomiast z utwardzaczem Z1 w stosunku 10:1 [8].

Tabela 1. Rodzaje klejów epoksydowych
Table 1. Type of epoxy adhesives

Żywica epoksydowa	Utwardzacz	Stosunek stechiometryczny składników	Oznaczenie
Epidian 57	PAC	100:100	Epidian 57/ PAC/1:1
Epidian 57	Z1	100:10	Epidian 57/ Z1/10:1

Do odmierzenia składników posłużono się wagą typu TP-2/1 (producent FAWAG S.A. Lubelskie Fabryki WAG) z certyfikatem ISO9001 o dokładności 0,1 g.

Połączenia klejowe były utwardzane jednostopniowo w temperaturze otoczenia $25\pm 2^\circ\text{C}$, przy wilgotności powietrza 21–23% w czasie 7 dni. Kompozycja klejowa użyta do połączenia blachy tytanowej CP2 sporządzana była tuż przed nakładaniem na jedną z łączonych powierzchni. Masę klejową nakładano jednym pociągnięciem pędzla, co pozwoliło znacząco uniknąć wprowadzenia pęcherzyków powietrza do spoiny klejowej. Starannie połączono obie płytki, ustalając stosowną długość zakładki (wykorzystując do tego celu przyrząd ustalający [15]) i obciążono próbki obciążnikiem o masie ok. 0,5 kg na 4 dni.

Zastosowane w badaniach warianty czasu sezonowania połączeń klejowych opisano w tab. 2. Połączenia klejowe utwardzane przez 7 dni stanowiły próbki referencyjne. W każdym wariantie sezonowania oraz w odniesieniu do próbek referencyjnych wykonano po 10 połączeń klejowych.

Tabela 2. Warianty sezonowania połączeń klejowych blachy tytanowej CP2
Table 2. Seasoning variants of CP2 titanium sheet bonded joints

Wariant sezonowania	Temperatura [°C]	Wilgotność powietrza [%]	Nacisk, Pa	Czas sezonowania, dni
Wariant I	25±2	22±1	637	14
Wariant II				21
Wariant III				28

Po utwardzeniu (próbki referencyjne) oraz sezonowaniu (uwzględniając 3 analizowane warianty) połączenia klejowe blachy tytanowej CP2 poddano próbie niszczącej na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z150, zgodnie z normą DIN EN 1465 [16], przy prędkości badania 5 mm/min. Wykonanie tych badań miało na celu określenie wytrzymałości połączeń klejowych na ścinanie.

Wyniki badań

Wytrzymałość połączeń klejowych wykonanych za pomocą kleju Epidian 57/PAC/1:1

Na rys. 2 przedstawiono wpływ czasu utwardzania oraz sezonowania na wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych blachy tytanowej CP2, wykonanych przy użyciu kleju Epidian 57/PAC/1:1. Średnie wartości wytrzymałości na ścinanie zostały wyliczone na podstawie od 8 do 10 wyników pomiarów.

Analizując wyniki badań zestawione na rys. 2 można zauważyć, że najwyższą maksymalną wytrzymałość osiągnięto po 7 dniach utwardzania – 13,8 MPa. Natomiast najmniejsza wytrzymałość połączeń klejowych blachy tytanowej CP2 na ścinanie połączeń klejowych została otrzymana po 28 dniach sezonowania, która stanowi 78% najwyższej wartości wytrzymałości osiągniętej po 7 dniach utwardzania. Nieco wyższą wartość wytrzymałości na ścinanie badanych połączeń z wynikiem 12,3 MPa osiągnięto po 14 dniach sezonowania, stanowiącą 89 % wartości najwyższej wytrzymałości na ścinanie. Natomiast po 21 dniach sezonowania osiągnięto średnią wartość wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych blachy tytanowej CP2 na poziomie 13,0 MPa, co stanowi 94% wytrzymałości połączeń klejowych utwardzanych przez 7 dni.

Wytrzymałość połączeń klejowych wykonanych klejem Epidian 57/Z1/10:1

Na rys. 3 zestawiono wyniki wytrzymałości połączeń klejowych blachy tytanowej CP2, wykonanych przy użyciu kleju Epidian 57/Z1/10:1.

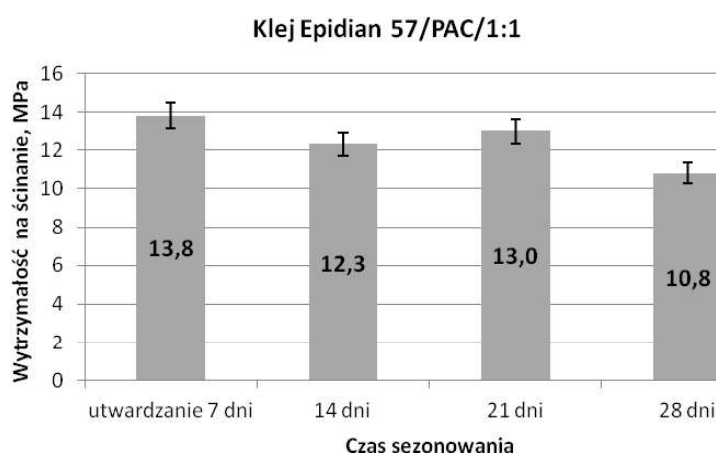
Na podstawie wyników badań wytrzymałości na ścinanie analizowanych połączeń uwzględniających czas utwardzania oraz sezonowania (rys. 3) zaobserwowano, że także w przypadku zastosowania kleju Epidian 57/Z1/10:1 najwyższą wytrzymałość osiągnięto po 7 dniach utwardzania i wynosi ona 12,4 MPa. Natomiast najmniejszą wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych blachy tytanowej CP2 osiągnięto po 14 dniach sezonowania, co stanowi 52% wartości najwyższej wartości wytrzymałości, osiągniętej po 7 dniach utwardzania.

Porównanie wyników badań

Na rys. 4 zaprezentowano porównanie wyników wpływu czasu utwardzania i sezonowania połączeń klejowych, uwzględniając wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych blachy tytanowej CP2, wykonanych za pomocą dwóch rodzajów klejów epoksydowych.

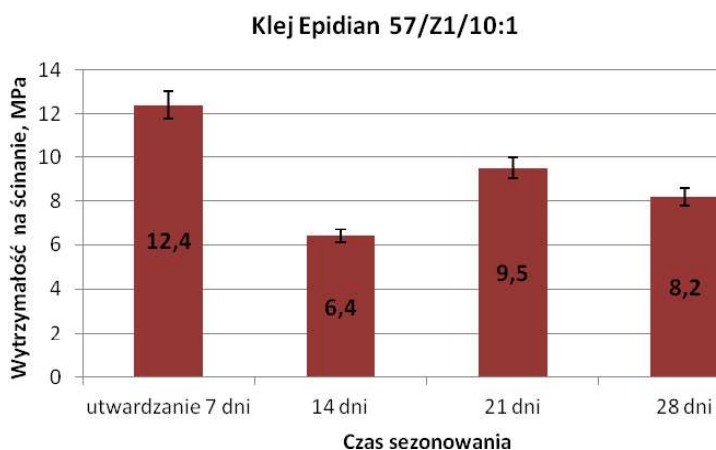
Porównując uzyskane wyniki przedstawione na wykresie (rys. 4) wytrzymałości połączeń klejowych, obciążonych na ścinanie blachy tytanowej CP2 za pomocą dwóch rodzajów klejów epoksydowych, można zauważyć (stosując wariant utwardzania jednostopniowego oraz różne czasy sezonowania), że:

- po 7 dniach utwardzania, wytrzymałość połączeń klejowych blachy tytanowej CP2, wykonanych klejem Epidian 57/Z1/10:1 stanowi 90% wytrzymałości połączeń klejowych przygotowanych z użyciem kleju Epidian 57/PAC/1:1,
- wytrzymałość połączeń klejowych blachy tytanowej CP2 wykonanych klejem Epidian 57/Z1/10:1,



Rys. 2. Wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych blachy tytanowej CP2, wykonanych przy użyciu kleju Epidian 57/PAC/1:1, uwzględniając czas utwardzania i sezonowania

Fig. 2. Shear strength of CP2 titanium sheet bonded joints preparing by Epidian 57/PAC/1:1 adhesive, hardening and seasoning time considering



Rys. 3. Wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych blachy tytanowej CP2 wykonanych przy użyciu kleju Epidian 57/Z1/10:1, uwzględniając czas utwardzania i sezonowania

Fig. 3. Shear strength of CP2 titanium sheet bonded joints preparing by Epidian 57/Z1/10:1 adhesive, hardening and seasoning time considering

określona po 14 dniach sezonowania, stanowi 52% wytrzymałości połączeń klejowych przygotowanych z użyciem kleju Epidian 57/PAC/1:1,

- wytrzymałość połączeń klejowych blachy tytanowej CP2 wykonanych klejem Epidian 57/Z1/10:1, sezonowanych w ciągu 21 dni, stanowi 73% wytrzymałości połączeń klejowych przygotowanych z użyciem kleju Epidian 57/PAC/1:1,
- po 28 dniach sezonowania, wytrzymałość połączeń klejowych blachy tytanowej CP2 wykonanych klejem Epidian 57/Z1/10:1 stanowi 76% wytrzymałości połączeń klejowych przygotowanych z użyciem kleju Epidian 57/PAC/1:1.

Odnosząc się ogółem do przedstawionych na wykresie (rys. 4) wyników wytrzymałości na ścinanie analizowanych połączeń klejowych można stwierdzić, że:

- połączenia przygotowane za pomocą kleju epoksydowego Epidian 57/PAC/1:1 wykazują wyższą wytrzymałość,
- wytrzymałość połączeń klejowych maleje wraz ze wzrostem czasu sezonowania połączeń klejowych.

Na podstawie otrzymanych wyników badań (rys. 3 i rys. 4), związanych z wpływem czasu sezonowania na wytrzymałość połączeń zauważono, że w przypadku połączeń klejowych wykonanych z zastosowaniem obu rodzajów klejów, czas sezonowania 14 dni przyczynia się do uzyskania mniejszej wytrzymałości połączeń klejowych niż próbek referencyjnych (utwardzanych 7 dni) oraz połączeń klejowych sezonowanych 21 dni. Być może jest to związane z procesami chemicznymi zachodzącymi podczas procesu utwardzania i sezonowania. Otrzymane rezultaty stały się podstawą do zaplanowania dalszych badań związanych z czasem sezonowania,

zarówno w czasie do 21 dni po procesie utwardzania, jak i dłuższym.

Podsumowanie i wnioski

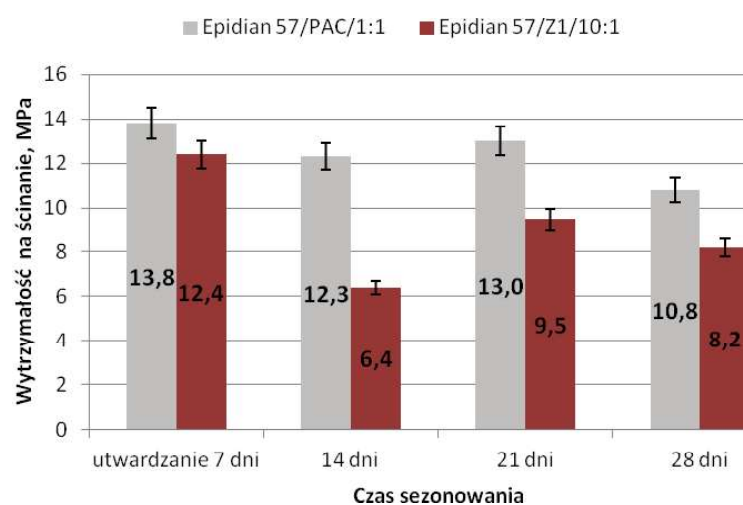
Przedmiotem przeprowadzonych badań były połączenia klejowe blachy tytanowej CP2, wykonane klejami epoksydowymi dwuskładnikowymi – Epidian 57/PAC/1:1 i Epidian 57/Z1/10:1. Przeprowadzone badania dotyczyły wytrzymałości połączeń klejowych, poddanych różnym czasom sezonowania w warunkach laboratoryjnych.

Czas sezonowania połączeń klejowych oraz rodzaj utwardzacza były czynnikami zmiennymi w badaniach, natomiast czynniki takie jak: rodzaj żywicy, przygotowanie powierzchni oraz inne warunki wykonywania połączeń pozostały niezmiennie.

Na podstawie otrzymanych wyników badań wytrzymałościowych oraz ich analizy można sformułować następujące wnioski:

- wytrzymałość połączeń klejowych zmniejsza się wraz z upływem czasu sezonowania połączeń w warunkach laboratoryjnych,
- największą wytrzymałością charakteryzowały się połączenia klejowe blachy tytanowej CP2, wykonane za pomocą Epidianu 57/PAC/1:1, utwardzanego w czasie 7 dni w temperaturze otoczenia,
- rozpatrując rodzaj zastosowanego kleju (a zwłaszcza rodzaj utwardzacza), połączenia klejowe blachy tytanowej CP2 wykonane za pomocą kleju Epidian 57/Z1/10:1, utwardzane w ciągu 7 dni, charakteryzują się mniejszą wytrzymałością na ścinanie w porównaniu do badanych połączeń klejowych wykonanych przy użyciu kleju Epidian 57/PAC/1:1, czyli w rozważanych przypadkach korzystnie jest zastosować klej epoksydowy zawierający utwardzacz PAC,
 - w przypadku połączeń blachy tytanowej CP2 wykonanych za pomocą dwóch rodzajów klejów epoksydowych – Epidian 57/PAC/1:1 oraz Epidian 57/Z1/10:1, najwyższą ich wytrzymałość osiągnięto po 7 dniach utwardzania.

Podsumowując, można stwierdzić, że na wytrzymałość połączenia klejowego istotny wpływ ma m.in. odpowiedni dobór kleju oraz czynniki związane z utwardzaniem i sezonowaniem połączeń klejowych. Znajomość czynników wpływających na wytrzymałość połączeń klejowych pozwala zaprojektować połączenia klejowe w taki sposób, aby charakteryzowały się jak najwyższą wytrzymałością. Przewiduje się uzupełnienie przedstawionych badań sezonowania połączeń klejowych, zarówno w warunkach otoczenia, jak i w warunkach podwyższonej temperatury, uwzględniając różne czasy sezonowania.



Rys. 4. Porównanie wytrzymałości na ścinanie połączeń blachy tytanowej CP2 wykonanych za pomocą dwóch rodzajów klejów epoksydowych, uwzględniając czas utwardzania i sezonowania

Fig. 4. Comparison of shear strength of CP2 titanium sheet bonded joints preparing by epoxy adhesives, hardening and seasoning time considering

LITERATURA

- [1] Czaplicki J. i in. 1987. „Klejowanie tworzyw konstrukcyjnych”. Warszawa: WKiŁ.
- [2] Godzimirski J. 1993. „Wpływ czynników konstrukcyjnych i technologicznych na wytrzymałość połączeń klejowych”. *Przegląd Mechaniczny* (13): 18–21.
- [3] „Kleje i klejenie. Poradnik inżyniera i technika” red. Charles V. Cagle. 1977. Warszawa: WNT.
- [4] Brockmann W. et. al. 2009. “Adhesive Bonding. Materials, Applications and Technology”. Weinheim: Wiley-VCH.
- [5] Kuczmaszewski J. 1995. „Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali”. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej.
- [6] Rudawska A. 2013. „Wybrane zagadnienia konstytuowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych”. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej.
- [7] Rudawska A. 2009. „Wytrzymałość połączeń klejowych blach tytanowych po różnych sposobach przygotowania powierzchni”. *Inżyniera Materiałowa* (5): 341–345.
- [8] Brojer Z., Z. Hertz, P. Pęczek. 1982. „Żywice epoksydowe”. Warszawa: WNT.
- [9] Ellis B. 1993. “Chemistry and Technology of Epoxy Resins”. Dordrecht: *Springer Science+Business Media*.
- [10] Tsuchida K., J.P. Bell. 2000. “A new epoxy/episulfide resin system for coating applications: curing mechanism and properties”. *International Journal of Adhesion and Adhesives* (20): 449–456.
- [11] Lapique F., K. Redford. 2002. “Curing effects on viscosity and mechanical properties of a commercial epoxy resin adhesive”. *International Journal of Adhesion and Adhesives* (22): 337–346.
- [12] Du S. et. al. 2004. “Cure kinetics of epoxy resin used for advanced composites”. *Polymer International* (53): 1343–1347.
- [13] Rudawska A., M. Czarnota. 2013. “Selected aspects of epoxy adhesive compositions curing process”. *Journal Adhesion Science and Technology* (27): 1933–1950.
- [14] ASTM B265-15 Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Strip, Sheet, and Plate.
- [15] Rudawska A., Ł. Dzwonkowski. „Przyrząd do ustalania próbek połączeń klejowych, zwłaszcza powierzchni płaskich”. Zgłoszenie patentowe P403112.
- [16] DIN EN 1465. Adhesives. Determination of tensile lap-shear strength of bonded joints.

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. Anna Wolińska – absolwentka Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej

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

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