

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ODDZIERANIE POŁĄCZENIA ADHEZYJNEGO KOMPOZYTU POLIMEROWO-WŁÓKNISTEGO Z BLACHĄ ZE STOPU ALUMINIUM 2024-T3

Peel strength of adhesive joint of fibreglass composite with aluminium alloy 2024-T3 sheet

Andrzej KUBIT, Magdalena BUCIOR, Władysław ZIELECKI

S t r e s z c z e n i e: W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, określających wytrzymałość połączenia adhezyjnego pomiędzy kompozytem polimerowo-włóknistym (zastosowano włókna szklane) a blachą ze stopu aluminium 2024-T3. Połączenie wykonano z zastosowaniem technologii autoklawowej. Artykuł porusza istotne zagadnienie wytrzymałości statycznej połączenia międzywarstwowego obciążonego w kierunku normalnym, co w zastosowanym modelu wywołuje stan oddzierania. Jako spoiwo łączące adhezyjnie rozpatrywane materiały zastosowano klej błonkowy zbrojony siatką, zapewniającą równomierny rozkład grubości kleju. Po przeprowadzonych badaniach wytrzymałościowych analizie poddano powierzchnie klejone na podstawie obrazów wykonanych przy użyciu mikroskopii SEM. Przeprowadzono także trójwymiarową analizę struktury powierzchni. Badania wykazały wysoką jakość uzyskanego połączenia adhezyjnego i mogą stanowić odniesienie dla próbek wykonanych według innych technologii.

S ł o w a k l u c z o w e: kompozyty polimerowo-włókniste, wytrzymałość na oddzieranie, połączenia adhezyjne kompozyt-metal

A b s t r a c t: The paper presents the results of experimental studies determining the strength of adhesive joint between fibreglass composite and aluminium alloy 2024-T3 sheet. The specimens were made using autoclave technology. This article considers the important issue of the static strength of the inter-layer joint subjected to the normal direction, which causes a peel stress in the model used. The adhesive bond between the materials was made using an adhesive film with a mesh to ensure a uniform distribution of adhesive thickness. After the strength tests, the surfaces of adherends were analyzed on the basis of images made using SEM microscopy. A three-dimensional surface structure analysis was also performed. Studies have shown the high quality of the adhesive joint obtained and may be a reference to specimens made using other technologies.

K e y w o r d s: fibreglass composites, peel strength, composite-aluminium adhesive joints

Wprowadzenie

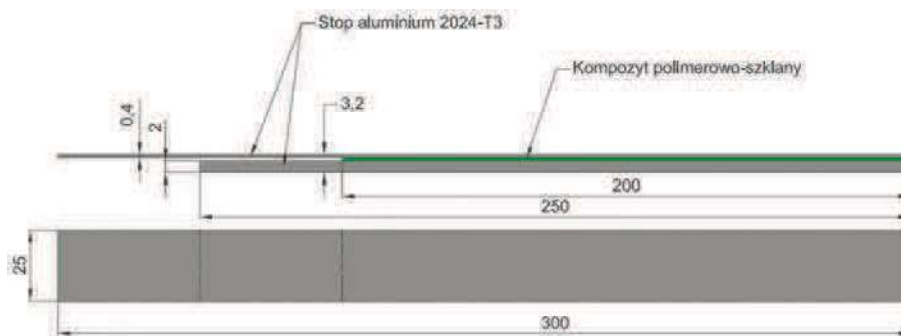
Materiały kompozytowe, mające coraz szersze zastosowanie szczególnie w konstrukcjach lotniczych, mimo wielu oczywistych zalet, mają pewne ograniczenia, które sprawiają, że nie mogą występować w całej konstrukcji statku powietrznego. Ograniczenie to dotyczy szczególnie miejsc w konstrukcji, gdzie występuje wysoka temperatura. W związku z powyższym istnieje częsta konieczność łączenia kompozytów polimerowo-włóknistych z innymi materiałami, głównie metalami takimi jak stopy aluminium i tytanu [13]. Połączenia adhezyjne mają tę przewagę nad techniką nitowania, popularnie występującą w budowie statków powietrznych, że nie wymagają wykonania otworów, będących często przyczyną koncentratorów naprężeń, a także nie wpływają w tak istotny sposób na wzrost masy konstrukcji jak nity [13].

Większość dostępnych opracowań naukowych, poruszających tematykę wytrzymałości połączenia adhezyjnego pomiędzy blachą ze stopu aluminium a kompozytem polimerowo-włóknistym, skupia się jedynie na wytrzymałości na ścinanie lub na mechanizmie pęknięcia. Do analizy pęknięcia najczęściej stosuje się próbki w formie podwójnej belki wspornikowej, tzw. Double

Cantilever Beam. Celem takich badań jest określenie zachowania propagacji pęknięć oraz uzyskanie danych energetycznych do numerycznej analizy mechanizmu pęknięcia [6, 8]. Z kolei do wyznaczania wytrzymałości na ścinanie rozpatrywanych połączeń, badaniom poddaje się zwykle jedno- lub dwuzakładkowe połączenia metal-kompozyt [4, 7, 11, 12]. Wielu autorów podejmuje także zagadnienie analitycznej oraz numerycznej analizy, związanej z wytrzymałością na ścinanie połączenia klejonego różnych materiałów [1, 5, 9].

Rozpatrując zagadnienie łączenia adhezyjnego materiałów o znacząco różnych współczynnikach rozszerzalności cieplnej, należy mieć na uwadze naprężenia w płaszczyźnie połączenia tych materiałów, będących przyczyną zmiennej temperatury pracy, co może przyczynić się do obniżenia wytrzymałości połączenia. Stąd wiele opracowań skupia uwagę na możliwości minimalizacji negatywnych efektów, wynikłych z różnych właściwości materiałów łączonych przez właściwy dobór warstwy spajającej [2, 3].

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, określających wytrzymałość połączenia adhezyjnego pomiędzy kompozytem polimerowo-włóknistym a blachą ze stopu aluminium 2024-T3. Skupiono się na niepożądanym obciążeniu, którą jest oddzieranie,



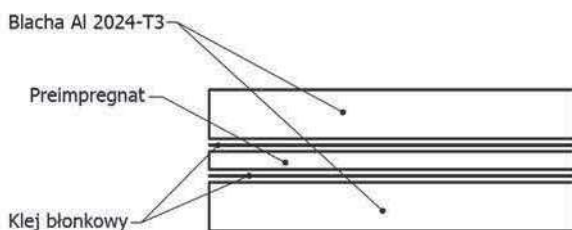
Rys. 1. Geometria oraz wymiary gotowej próbki do badań wytrzymałości statycznej połączenia adhezyjnego na oddzieranie
Fig. 1. Geometry and dimensions of the specimen for testing the static peel strength of the adhesive joint

cechujące się nierównomiernym rozkładem naprężeń w spoinie klejowej oraz charakterystycznym spiętrzeniem naprężeń przy czole działania obciążenia.

Metodyka badań

Jako metodykę wykonania badań statycznych wytrzymałości na oddzieranie przyjęto próbę wg normy DTD 5577. Badania wymagają przygotowania próbki złożonej z dwóch elementów – sztywnego (tu przyjęto blachę o grubości 2 mm) oraz elastycznego – przyjęto blachę o grubości 0,4 mm. W opisywanej metodyce, kompozyt polimerowo-włóknisty stanowił warstwę pośrednią pomiędzy wymienionymi elementami (rys. 1).

Połączenie adhezyjne pomiędzy elementami metalowymi a kompozytem wykonano na bazie kleju błonkowego AF-163-2K firmy 3M. Powierzchnie blach przed klejeniem anodowano w roztworze kwasu siarkowego, uzyskując średnią grubość warstwy tlenków równą 6 μm dla cieńszej z blach, natomiast 10 μm dla blachy grubszej. Warstwę kompozytową utworzono z termoutwardzalnego preimpregnatu szklanego firmy Hexcel o gramaturze 432 g/m². Próbkę w formie arkuszy o wymiarach 300×360 mm i w konfiguracji przedstawionej na rys. 2 utwardzono w autoklawie. Zastosowano następujące parametry utwardzania: szybkość ogrzewania 2°C/min, temperatura sieciowania równa 135°C, ciśnienie w komorze autoklawu podczas utwardzania 3 bar, podciśnienie w worku próżniowym o wartości -0,7 bar utrzymywano do momentu uzyskania temperatury sieciowania, czas utwardzania równy 90 min, szybkość chłodzenia po utwardzaniu 3°C/min.

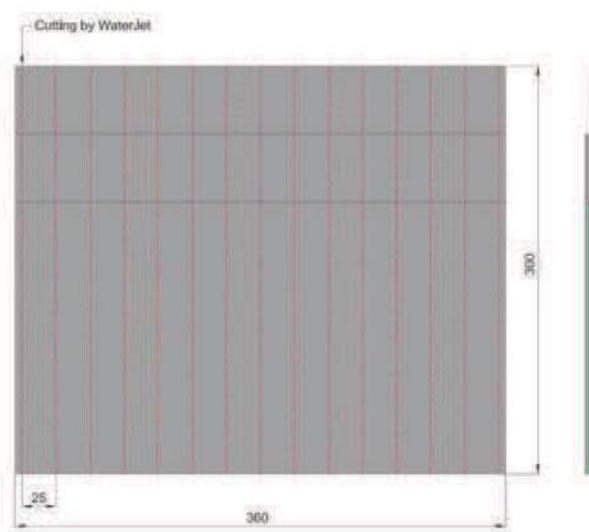


Rys. 2. Konfiguracja warstwowego układu próbek
Fig. 2. Layered configuration of the considered specimens

W rezultacie uzyskano arkusze (rys. 3), które rozcięto uzyskując właściwe próbki do badań wytrzymałościowych o szerokości 25 mm. Rozcinając arkusze odrzucono fragment przy krawędzi o szerokości 5 mm przewidując, że w tym obszarze połączenie może cechować się odmiennymi właściwościami. Próbkę wycinano z wykorzystaniem wysokociśnieniowego strumienia wodno-ściernego, wytwarzanego w sposób pośredni. Obróbkę prowadzono przy ciśnieniu $p=350$ MPa, wydatku dozowanego ścierniwa 300 g/min oraz prędkości głowicy tnącej $v_f=250$ mm/min.

Badania statycznej wytrzymałości na oddzieranie przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Tinius Olsen H25K-T. Prędkość posuwu szczęki wynosiła 100 mm/min. Badania przeprowadzono w temperaturze pokojowej. Do badań w założonym układzie obciążenia niezbędnym jest zastosowanie specjalnego przyrządu (rys. 4), wymuszającego stan oddzierania.

Bardzo istotnym zagadnieniem z punktu widzenia jakości połączenia adhezyjnego są właściwości powierzchni elementów klejonych, w tym chropowatość powierzchni. W związku z powyższym, dla obydwu stosowanych



Rys. 3. Arkusz klejonego pakietu z zaznaczonym kierunkiem rozcinania
Fig. 3. Sheet of the bonded package with marked cutting direction



Rys. 4. Widok badanej próbki oraz przyrządu wymuszającego stan oddzierania
Fig. 4. View of the specimen and the test stand for the peel test

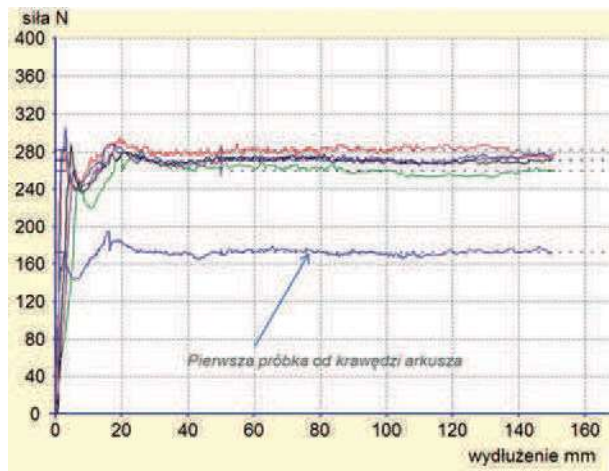
blach przeprowadzono pomiar struktury geometrycznej. Pomiary przeprowadzono przy użyciu trójwymiarowego profilometru optycznego Talysurf CCI Lite. Wyniki pomiarów opracowano zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie PN EN-ISO 25178-2:2012E [10].

Badania powierzchni klejonych po zniszczeniu dla wybranych próbek przeprowadzono przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego S-3400N firmy Hitachi. Zdjęcia przełomów wykonano przy następujących parametrach:

- zdjęcia wykonano w niskiej próżni (tryb Low Vacuum),
- stosowano detektor elektronów wstecznie rozproszonych (BSE),
- napięcie przyspieszające 15 kV,
- rozmiar plamki (Spot Size) < 10 nm,
- powiększenie od 30× do 3000×.

Wyniki badań

Na rys. 5 przedstawiono zestawienie krzywych, będących wynikiem badania wytrzymałości na oddzieranie. Zgodnie z przyjętą metodyką badań, na podstawie przebiegu zarejestrowanej wartości siły w funkcji przemieszczenia. Po ustabilizowaniu przebiegu siły oddzierającej (jako odcinek stabilizacji przyjęto 50 mm), na odcinku 100 mm obliczono średnią wartość siły, którą podzielono przez szerokość stosowanej próbki czyli 25 mm. Analizując wyniki badań zauważono, że poza jednym wyjątkiem, wyniki cechują się akceptowalną powtarzalnością (zastosowano sześć powtórzeń). Wynik badania, który znacząco odbiega od pozostałych, uzyskano dla próbki pierwszej od krawędzi arkusza (rys. 3). Wprawdzie przyjęto pewien margines spodziewając się, iż przy krawędzi klejonego pakietu właściwości połączenia będą odbiegały od pozostałych, jednakże przyjęty margines 5 mm okazał się zbyt mały. Odrzucając wspomniany wynik, średnia wytrzymałość na oddzieranie próbek wyniosła 11,02 N/mm.



Rys. 5. Wyniki badań na oddzieranie w formie krzywej siła-wydłużenie
Fig. 5. Force-displacement curves as a results of the peel tests

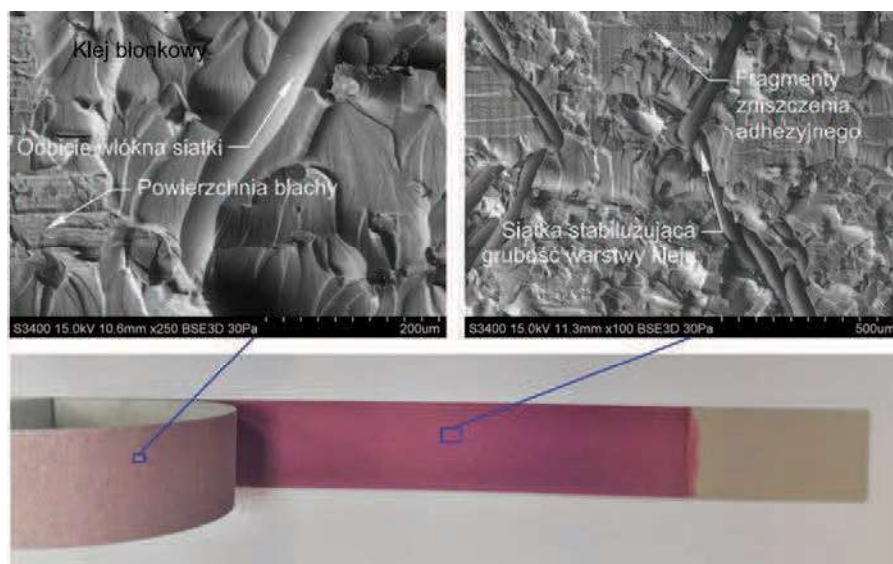
Analizując powierzchnie próbek po przeprowadzonych badaniach w skali makro można dostrzec, iż każda próbka cechowała się kohezyjnym typem zniszczenia (rys. 6), co jest pożądane i świadczy o wysokiej jakości adhezji zastosowanego kleju do obydwu powierzchni łączonych. Przechodząc do skali mikrometrycznej na podstawie zdjęć SEM zauważalne są fragmenty powierzchni o adhezyjnym typie zniszczenia. Powierzchnia przełomów ukazuje także odkryte fragmenty siatki stabilizującej grubość warstwy kleju.

Na rys. 7 przedstawiono trójwymiarową strukturę fragmentu powierzchni blach klejonych z kompozytem. Na rys. 7a przedstawiono strukturę dla blachy o grubości 2 mm, natomiast na rys. 7b zaprezentowano strukturę blachy o grubości 0,4 mm. Tabela I zawiera zestawienie parametrów chropowatości powierzchni blach dla analizy trójwymiarowej.

Powierzchnie obydwu stosowanych blach cechują się różną chropowatością, co wynika przede wszystkim z procesu anodowania. W procesie tym na powierzchni grubszej z blach wytworzono prawie dwukrotnie grubszą warstwę pokrycia tlenkowego. Powszechnie znanym jest fakt, że gładka powierzchnia nie sprzyja utworzeniu wysokowytrzymałego połączenia adhezyjnego. W zaprezentowanych analizach powtarzalnie uzyskane zniszczenie typu kohezyjnego świadczy jednoznacznie, iż rozpatrywane powierzchnie poprawnie przygotowano do procesu klejenia, zapewniając należyłą przyczepność kleju do obydwu z nich.

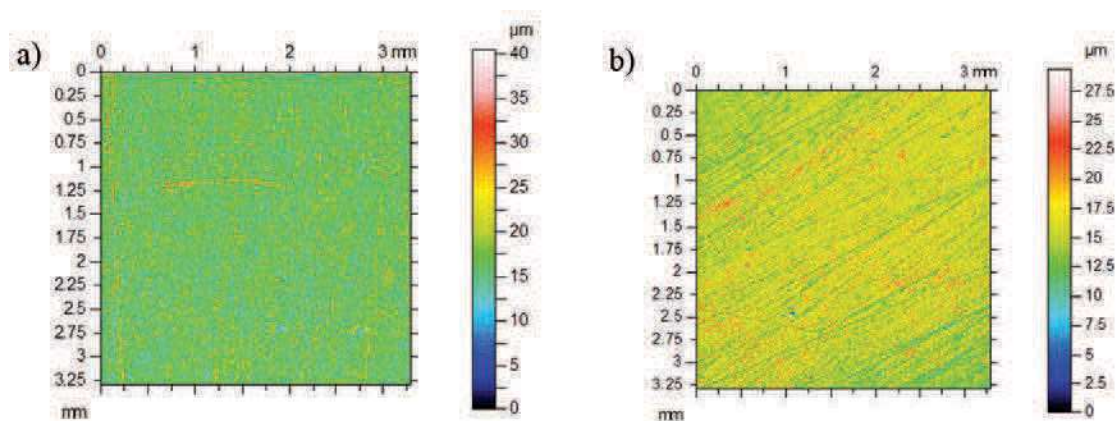
Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań stanowią jedną z propozycji metodyki określania wytrzymałości statycznej połączenia adhezyjnego coraz szerzej spotykanego w zaawansowanych konstrukcjach, wymagających pogodzenia cech jakimi są niska masa oraz wysoka wytrzymałość. W opracowaniu badaniom poddano jako przykład połączenie



Rys. 6. Obraz próbki po zniszczeniu z widocznym zniszczeniem kohezyjnym w skali makro oraz fragmenty obydwu powierzchni w skali mikro

Fig. 6. Image of the surface of specimen after peel test with visible cohesion damage on a macro scale and fragments of both surfaces on the micro scale



Rys. 7. Trójwymiarowa struktura powierzchni blach przed procesem klejenia: dla blachy o grubości 2 mm (a) oraz 0,4 mm (b)

Fig. 7. Three-dimensional structure of the sheet surface before the bonding process: for sheet thickness 2 mm (a) and 0.4 mm (b)

Tabela I. Parametry chropowatości powierzchni klejonych blach dla analizy trójwymiarowej

Table I. Surface roughness parameters for three-dimensional analysis

Parametr chropowatości	Blacha o grubości 0,4 mm	Blacha o grubości 2 mm
S_q [μm]	2,72	4,32
S_{sk}	1,18	1,39
S_{ku}	4,53	3,75
S_p [μm]	13,7	22,9
S_v [μm]	15,8	17,6
S_z [μm]	29,4	40,5
S_a [μm]	1,97	3,36
S_{al} [μm]	0,0089	0,00726
S_{tr}	0,315	0,756
S_{td} [$^\circ$]	34,8	84,5

wykonane według technologii stosowanej w przemyśle lotniczym, stosując klej błonkowy, powszechnie stosowany w kompozytach przekładkowych z wypełniaczem komórkowym typu „plaster miodu”. Teoretycznie zastosowana metodyka przygotowania próbek powinna zapewniać możliwie wysoką wytrzymałość połączenia, gdyż zastosowano tu proces autoklawowy. Naturalną kontynuacją badań będą próby porównawcze dla połączenia uzyskanego technologiami bez użycia autoklawu. Takie próby są pożądane, gdyż technologie autoklawowe są energo- i pracochłonne, co przekłada się na ich wysokie koszty. Zatem opracowanie alternatywnych technologii, które zapewniłyby porównywalną wytrzymałość połączenia stały się nieuchronne, a przedstawiona metodyka badań może z powodzeniem służyć jako jedna z prób weryfikujących jakość uzyskanego połączenia przy użyciu innych technologii. Z kolei zaprezentowane wyniki badań mogą stanowić punkt odniesienia w badaniach porównawczych.

LITERATURA

- [1] Adams R. D., V. Mallick. 1993. “The effect of temperature on the strength of adhesively-bonded composite-aluminium joints”. *International Journal of Adhesion and Adhesives* (43):
- [2] Da Silva L. F., R. D. Adams. 2006. “Stress-free temperature in a mixed-adhesive joint”. *Journal of Adhesion Science and Technology* (20): 1705–1726.
- [3] Da Silva L. F., R. D. Adams. 2007. “Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites”. *International Journal of Adhesion and Adhesives* (27): 216–226.
- [4] Giannis S., K. Hansen. 2010. “Investigation on the Joining of CFRP-to-CFRP and CFRP-to-Aluminium for a Small Aircraft Structural Application”. Dayton: 25th Technical Conference of the American Society for Composites and 14th US-Japan Conference on Composite Materials.
- [5] Hua Y., L. G., M. Trogdon M. 2012. “Three-dimensional modeling of carbon/epoxy to titanium single-lap joints with variable adhesive recess length”. *International Journal of Adhesion and Adhesives* (38): 25–30.
- [6] Ishii K., M. Imanaka, H. J. Nakayama. 2007. “Fatigue crack propagation behavior of adhesively-bonded CFRP/aluminum joints”. *Journal of Adhesion Science and Technology* (21): 153–167.
- [7] Kang S., M. Kim, C. Kim. 2007. “Evaluation of cryogenic performance of adhesives using composite-aluminum double-lap joints”. *Composite Structures* (78): 440–446.
- [8] Khoshravan M., F. A. Mehrabadi. 2012. “Fracture analysis in adhesive compositematerial/aluminum joints under mode-I loading, experimental and numerical approaches”. *International Journal of Adhesion and Adhesives* (39): 8–14.
- [9] Narasimhan S., R. A. Shenoi, H. K. Jeong. 2004. “Three-dimensional stresses in adhesively bonded lap joints with non-identical adherends”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L* (218): 283–298.
- [10] Norma PN EN-ISO 25178-2:2012E Specyfikacja geometrii wyrobów: Przestrzenna – Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [11] Owens J., P. Lee-Sullivan. 2000. “Stiffness behavior due to fracture in adhesively bonded composite-to-aluminum joints II”. In *International Journal of Adhesion and Adhesives* (20): 47–58.
- [12] Seong M. et. al. 2008. “A parametric study on the failure of bonded singlelap joints of carbon composite and aluminum”. *Composite Structures* (86): 135–145.
- [13] Teixeira de Freitas S., J. Sinke. 2014. “Adhesion Properties of Bonded Composite-to-Aluminium Joints Using Peel Tests”. *International Journal of Adhesion and Adhesives* (90): 511–525.

dr inż. Andrzej Kubit – Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: akubit@prz.edu.pl

mgr inż. Magdalena Bucior – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: magdabucior@prz.edu.pl

dr hab. inż. Władysław Zielecki, prof. PRZ – Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: wzktmiop@prz.edu.pl