

ANALIZA WPLÝWU WYBRANYCH PARAMETRÓW PNEUMOKULOWANIA NA NOŚNOŚĆ JEDNOZAKŁADKOWYCH POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH STOPU TYTANU Ti6Al4V

Analysis of the impact of shot peening parameters on the capacity of single lap adhesive joints of titanium alloy Ti6Al4V

Władysław ZIELECKI, Katarzyna KORZYŃSKA

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu umacniania metodą pneumatycznego kulowania jednozakładkowych połączeń klejowych ze stopu tytanu Ti6Al4V. Obróbka umacniająca zwiększyła nośność badanych połączeń klejowych o 24–52%. Analiza statystyczna uzyskanych wyników badań wykazała, że w przyjętym obszarze zmienności parametrów technologicznych procesu pneumatycznego kulowania na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, ciśnienie p , średnica stalowych kulek d oraz czas obróbki t nie wpływają w istotny sposób na właściwości wytrzymałościowe zakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V.

Słowa kluczowe: połączenia klejowe, pneumatyczne kulowanie, wytrzymałość na ścinanie

Abstract: The paper presents the results of research on the impact of strengthening of lap adhesive joints of titanium alloy Ti6Al4V with the use of shot peening method. Treatment of appreciating increased load capacity of tested adhesive joints from 24 to 52%. The statistical analysis of the results showed that in the adopted area variability of technological parameters of shot peening: pressure p , the diameter of the steel balls d and the processing time t does not significantly affect the properties of the strength of adhesive lap joints of titanium alloy Ti6Al4V.

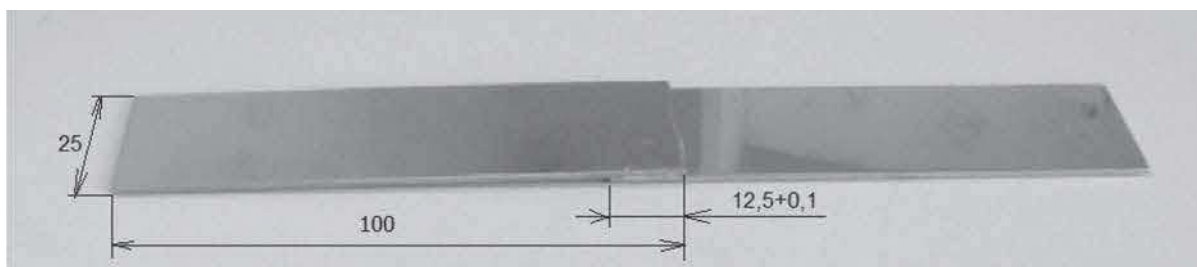
Key words: adhesive joints, shot peening, shear strength

Nagniatanie strumieniowe dynamiczne (pneumatyczne kulowanie) jest procesem obróbki, podczas którego powierzchnia obrabianego przedmiotu jest uderzana małymi twardymi drobinami (kulki szklane, śrut, kulki łożyskowe) rozpędzonym strumieniem sprężonego powietrza. Ten rodzaj obróbki powoduje wzrost twardości warstwy wierzchniej materiału i ukonstytuowanie w niej naprężeń ściskających własnych, pochodzących od powierzchniowego odkształcenia plastycznego. Stan warstwy wierzchniej korzystnie wpływa na właściwości użytkowe części maszyn, w szczególności na ich wytrzymałość zmęczeniową [1, 2]. Ściskające naprężenia własne ukonstytuowane podczas nagniatania połączenia klejowego powodują odkształcenie powierzchni zakładki i dociśnięcie krawędzi zakładki klejonych części, co z kolei wpływa na wzrost wytrzymałości zakładkowego połączenia klejowego [4, 5].

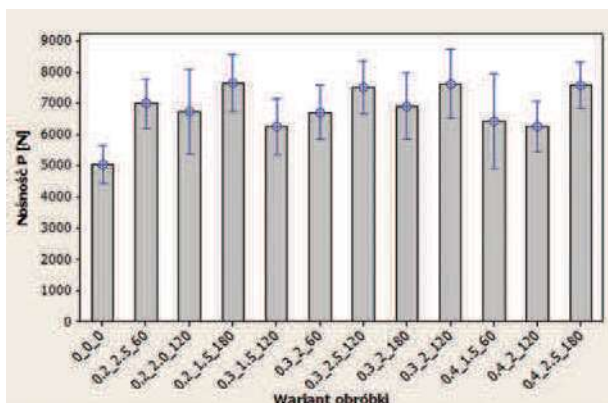
Pneumatyczne kulowanie jest procesem, o którego efektach decydują m.in. takie parametry jak: ciśnienie powietrza, liczba dysz, kąt padania kulek, odległość dyszy od obrabianego przedmiotu, czas obróbki i rodzaj drobiwa (średnica kulek, masa), przy czym parametrami sterowanymi urządzeń do pneumatycznego kulowania, które nie zależą od ich konstrukcji, są: ciśnienie powietrza, czas obróbki i średnica kulek [6-9].

Badania własne

Celem badań było przeprowadzenie analizy statystycznej wpływu wybranych parametrów pneumatycznego kulowania na nośność zakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V. Do badań wykorzystano próbki wykonane ze stopu tytanu Ti6Al4V (o zawartości procentowej:



Rys. 1. Jednozакładkowe połączenie klejowe stopu tytanu Ti6Al4V stosowanego w badaniach
Fig. 1. Single lap adhesive joints of titanium alloy Ti6Al4V used of the test



Rys. 2. Wpływ parametrów pneumatyzacji na nośność P jednozakładkowych połączeń klejowych ze stopu tytanu Ti6Al4V (ciśnienie: $p = 0,2-0,4$ MPa, średnica kulek: $d = 1,5-2,5$ mm, czas obróbki: $t = 60-180$ s)

Fig. 2. Effect of shot peening on the load-bearing capacity P single lap adhesives joints of titanium alloy Ti6Al4V (pressure: $p = 0,2-0,4$ MPa, the diameter of the balls: $d = 1,5-2,5$ mm, treatment time: $t = 60-180$ s)

wanad 3,5–4, żelazo $\leq 0,3$, tlen $\leq 0,2$, azot $\leq 0,05$, węgiel $\leq 0,08$, wodór $\leq 0,01$, aluminium 5,5–6,75, tytan – reszta) o wymiarach: 100 mm długości, 25 mm szerokości i grubości 2 mm, które sklejono na zakładkę o długości 12,5 mm klejem Araldite 2014-1 (rys. 1). Araldite 2014-1 jest klejem dwuskładnikowym, powstającym podczas mieszania w specjalnej końcówce żywicy epoksydowej z utwardzaczem w proporcji 2:1 w trakcie wyciskania składników kompozycji z tuby specjalnym pistoletem. Łączone płytki ustalano w specjalnym uchwycie, zapewniającym uzyskanie zakładki o długości $12,5 \pm 0,1$ mm. Utwardzanie spoin klejowych przebiegało w temperaturze pokojowej $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Następnie sklejone próbki poddano pneumatyzacji. Podczas obróbki dla kolejnych grup próbek zmieniano parametry obróbki w następujących zakresach: ciśnienie $p = 0,2-0,4$ MPa, średnica stalowych kulek: $d = 1,5-2,5$ mm, czas obróbki: $t = 60-180$ s. Dla każdego wariantu umocniono po 5 próbek. Liczebność próby 5 szt. przyjęto z nomogramu do wyznaczenia niezbędnej liczebności próby [3], uwzględniając wartość współczynnika zmienności wariantu podstawowego $V_p = 9,73\%$ oraz założonej dokładności $\varepsilon = 10\%$.

Umocnione próbki poddano badaniom wytrzymałości na ścinanie na maszynie wytrzymałościowej INSTRON ElectroPlus™ E10000 z prędkością 5 mm/min. Otrzymane wyniki przedstawiono na rys. 2 oraz w tab. I, w której zamieszczono średnie wartości nośności P_{sr} i wytrzymałości na ścinanie R_{tsr} , wyznaczone z 5 próbek, rozstęp nośności połączeń $P_{\text{min}}-P_{\text{max}}$, odchylenie standardowe nośności połączeń σ_P , współczynnik zmienności (Pearsona) V_p oraz względną zmianę procentową nośności próbek pneumatyzowanych do niepumatyzowanych ΔP .

Przeprowadzone badania wykazały, że w następstwie pneumatyzacji wzrosła nośność badanych połączeń o 23,97 do 51,93% w zależności od parametrów obróbki umacniającej, przy czym największy wzrost dotyczył grupy próbek pneumatyzowanych z ciśnieniem $p = 0,2$ MPa, kulkami o średnicy $d = 1,5$ mm przez czas $t = 180$ s.

W dalszej części badań przeprowadzono analizę statystyczną uzyskanych wyników przy użyciu programu MiniTab. W ramach badań statystycznych przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji ANOVA, test t-Studenta grup próbek przygotowanych do badań wytrzymałościowych zgodnie z przyjętymi wariantami obróbki, analizę regresji nośności połączeń P kolejno od

Tabela I. Wyniki badań wytrzymałościowych jednozakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V umocnionych metodą pneumatyzacji

Table I. Results of strength tests of single lap adhesive joints of titanium alloy Ti6Al4V after shot peening

Wariant obróbki			P_{sr} [N]	R_{tsr} [MPa]	$P_{\text{min}} - P_{\text{max}}$ [N]	σ_P [N]	V_p [%]	ΔP [%]
p [MPa]	d [mm]	t [s]						
0	0	0	5036,4	16,12	4638-5863	490,22	9,73	-
0,2	2,5	60	7003,6	22,40	5954-7628	643,92	9,19	39,06
0,2	2,0	120	6728,0	21,53	5417-7885	1093,35	16,25	33,59
0,2	1,5	180	7651,8	24,48	6341-8164	743,56	9,72	51,93
0,3	1,5	120	6243,8	19,98	5254-7062	737,99	11,82	23,97
0,3	2,0	60	6707,6	21,62	5587-7426	700,23	10,44	33,18
0,3	2,5	120	7520,4	24,06	6720-8442	681,78	9,07	49,32
0,3	2,0	180	6918,6	22,14	5958-7873	860,59	12,44	37,37
0,3	2,0	120	7627,8	24,34	6075-8272	887,15	11,63	51,45
0,4	1,5	60	6420,2	20,51	5093-7886	1238,50	19,29	27,48
0,4	2,0	120	6249,0	20,00	5696-7087	661,11	10,58	24,08
0,4	2,5	180	7592,2	24,28	6890-8241	605,25	7,97	50,70

Tabela II. Wyniki analizy One-way ANOVA
Table II. Results of the analysis One-way ANOVA

Zmienna niezależna	DF	SS	MS	S ²	F	P _v
p	2	1102918	551459	852852	0,65	0,528
Error	52	44349113	852868			
Total	54	45452031				
d	2	3396459	1698229	808740	2,1	0,133
Error	52	42055572	808761			
Total	54	45452031				
t	2	3856713	1928357	799951	2,41	0,100
Error	52	41595317	799910			
Total	54	45452031				

DF – liczba stopni swobody, SS – suma kwadratów, MS – średnia suma kwadratów, S² – wariancja, F – wartość testu F, P_v – poziom prawdopodobieństwa

zmiennych niezależnych: ciśnienia *p*, średnicy kulek *d*, czasu obróbki *t*, dodatkowo sporządzono wykresy Boxplot oraz wykresy warstwowe.

Wyniki jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA przedstawiono w tab. II. Wskazują one, że w badanym obszarze zmienności parametry technologiczne pneumatyzacji: ciśnienie *p*, średnica kulek *d*, czas obróbki *t*, na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ nie wywierają istotnego wpływu na nośność umocnianych połączeń klejowych.

W kolejnym kroku przeprowadzono test t-Studenta, który pozwolił określić grupy próbek (warianty obróbki), różniące się między sobą na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ ($\alpha = 5\%$). Wyniki testu t-Studenta

przedstawiono w tab. III. Wartości wskaźnika *P_v* mniejsze od 5% wskazują na istotne różnice nośności badanych grup połączeń klejowych. Istotne różnice występują pomiędzy próbkami nieumocnianymi a próbkami obrabionymi metodą pneumatyzacji. Można zatem stwierdzić, że proces pneumatyzacji w istotny sposób wpływa na nośność jednozakładowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V. Spośród próbek pneumatyzowanych, próbki obrabione wg wariantu 0.4_2.5_180 istotnie statystycznie różnią się od 7 innych grup próbek poddanych obróbce strumieniem kulek.

Zamieszczone w tab. 4 wyniki analizy regresji oraz wykresy Boxplot (rys. 4) wskazują, że wydłużając czas obróbki *t* oraz zwiększając średnicę kulek *d* uzyskuje

Tabela III. Wyniki testu t-Studenta
Table III. Results of t test

<i>P_v</i> [%]	0.2_2.5_60	0.2_2.0_120	0.2_1.5_180	0.3_1.5_120	0.3_2.0_60	0.3_2.5_120	0.3_2.0_180	0.3_2.0_120	0.4_1.5_60	0.4_2.0_120	0.4_2.5_180
0_0_0	0,039	1,093	0,016	0,940	0,155	0,013	0,237	0,054	3,279	0,613	0,005
0.2_2.5_60	x										
0.2_2.0_120	32,160	x									
0.2_1.5_180	8,979	8,095	x								
0.3_1.5_120	6,086	21,938	0,847	x							
0.3_2.0_60	25,321	48,649	3,634	16,896	x						
0.3_2.5_120	12,647	10,665	38,916	1,096	5,000	x					
0.3_2.0_180	43,219	38,381	9,409	11,035	34,116	12,847	x				
0.3_2.0_120	12,099	9,621	48,210	1,434	5,408	41,788	11,771	x			
0.4_1.5_60	19,300	34,404	5,057	39,643	33,329	6,537	24,177	5,907	x		
0.4_2.0_120	5,246	21,563	0,689	49,546	15,906	0,863	10,370	1,279	39,704	x	
0.4_2.5_180	8,743	8,555	44,651	0,940	0,155	0,013	0,237	0,054	3,279	0,613	x

Tabela IV. Wyniki analizy regresji nośności P jednozakładkowych połączeń klejowych od zmiennych parametrów pneumokulowania: ciśnienia p , średnicy kulek d , czasu obróbki t

Table IV. Results of the regression analysis the load P single lap adhesive joints of variables pneumokulowania parameters: pressure p , diameter of the balls d , the treatment time t

Zależność nośności P od zmiennej niezależnej:	Otrzymane równanie regresji	P_v
p	$y_P = 7530 - 1870 x_p$	0,268
d	$y_P = 5769 + 600 x_d$	0,073
t	$y_P = 6292 + 5,64 x_t$	0,042
p, d, t	$y_P = 5653 - 1870 x_p + 0,600 x_d + 5,64 x_t$	0,031

się wzrost nośności badanych połączeń klejowych, natomiast zwiększanie ciśnienia p powoduje zmniejszenie ich nośności. Wykresy Boxplot potwierdzają również brak istotnego statystycznie wpływu parametrów pneumokulowania na nośność połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V.

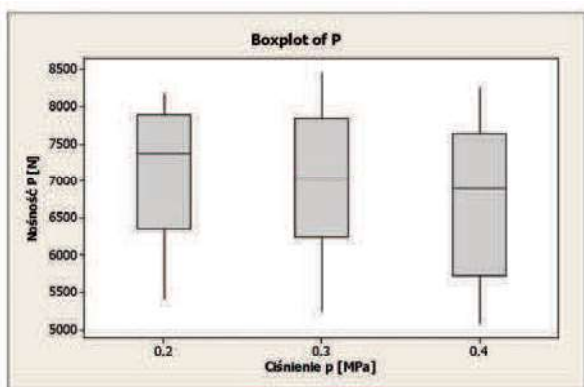
Analiza wykresów warstwicowych, obrazujących zmienność nośności P połączeń klejowych w zależności od parametrów pneumokulowania (rys. 4) wskazuje, że największą nośność uzyskiwały połączenia klejowe obrabione z maksymalnymi wartościami parametrów zmiennych $t = 180$ s, $d = 2,5$ mm, $p = 0,4$ MPa. Nie zostały zatem ustalone optymalne parametry pneumokulowania, zapewniające osiągnięcie maksymalnej nośności badanych połączeń klejowych. Należy zatem kontynuować badania i wyznaczyć optymalne parametry pneumokulowania, stosując np. metodę przejścia po gradientcie.

Wnioski

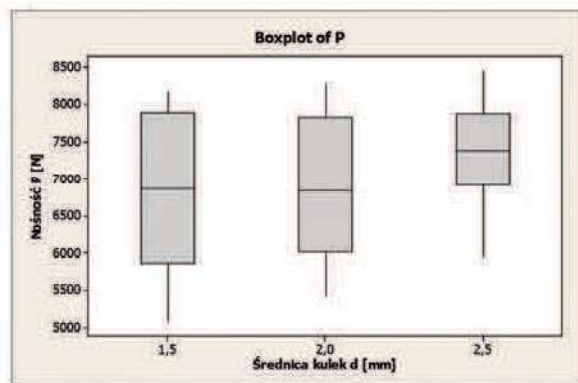
Przeprowadzone badania wykazały możliwość zwiększenia nośności jednozakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V dzięki zastosowaniu obróbki umacniającej strefy złącza strumieniem kulek stalowych rozprężonych sprężonym powietrzem. Pneumokulowanie pozwoliło zwiększyć nośność badanych złączy o 23,97 do 51,93%.

Test t-Studenta wykazał istotny wpływ pneumokulowania na nośność jednozakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V, natomiast analiza wariancji ANOVA ujawniła, że w badanym obszarze zmienności parametrów technologicznych procesu pneumokulowania, ciśnienie p , średnica kulek d , czas obróbki t nie wpływają w sposób istotny statystycznie na nośność badanych połączeń klejowych. Brak wpływu na nośność połączeń

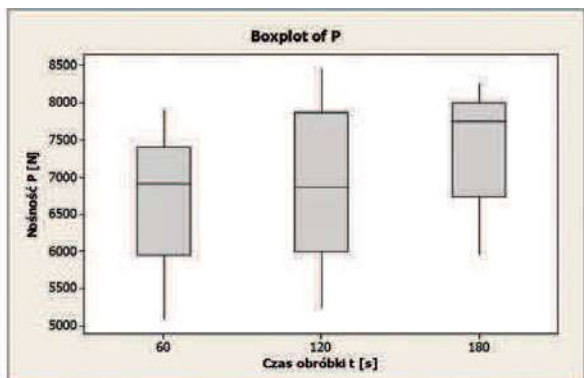
a)



b)



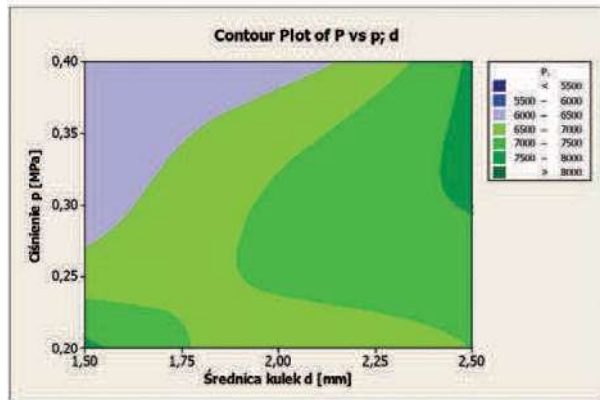
c)



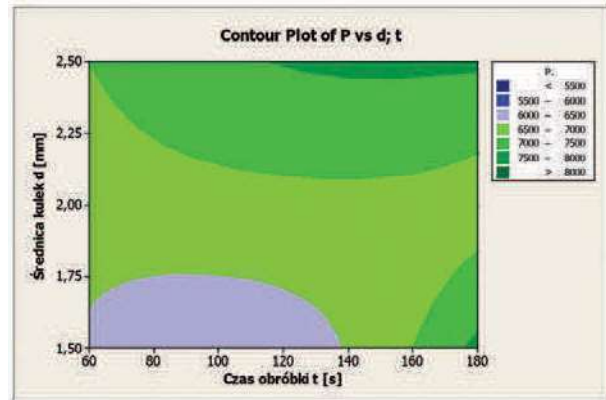
Rys. 3. Wykresy Boxplot, obrazujące zmienność nośności P połączeń klejowych w zależności od: a) ciśnienia p , b) średnicy kulek d , c) czasu obróbki t

Fig. 3. Boxplot graphs showing the variation of the load P of the adhesives joints on: a) a pressure p , b) the diameter of the balls d , c) the treatment time t

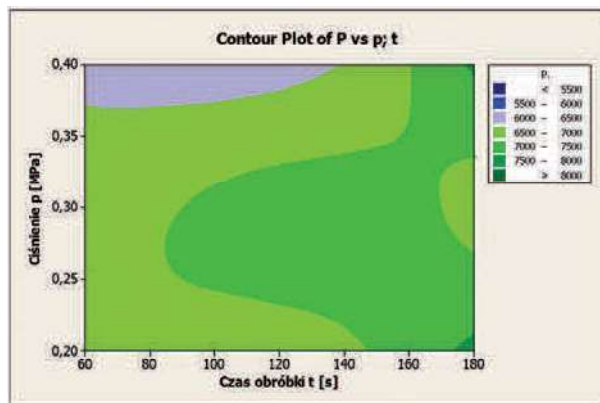
a)



b)



c)



Rys. 4. Wykresy warstwiczne, obrazujące zmienność nośności P połączeń klejowych w zależności od: a) ciśnienia p i średnicy kulek d , b) średnicy kulek d i czasu obróbki t , c) ciśnienia p i czasu obróbki t

Fig. 4. Contour graphs showing the variation of the load P of the adhesives joints on: a) the pressure p and the diameter of the balls d , b) the diameter of the balls d and the treatment time t , c) a pressure p and the treatment time t

klejowych stopu tytanu Ti6Al4V potwierdzają również wykresy Boxplot.

Przeprowadzona analiza regresji oraz sporządzone wykresy warstwiczne wskazują na konieczność kontynuowania badań w celu wyznaczenia optymalnych parametrów pneumatycznej metody przejścia po gradientcie.

LITERATURA

- [1] Korzyński M. et. al. 2009. "Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its improvement with ball peening". *Surface and Coatings Technology* (204): 615–620.
- [2] Korzyński M., T. Żarski, K. Korzyńska. 2011. "Surface layer condition and the fatigue strength of an AZ91 alloy after ball peening". *Journal of Materials Processing Technology* (211): 1982–1988.
- [3] Korzyński M. 2016. „Metodyka eksperymentu. Planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych”. Warszawa: WNT.
- [5] Śledź M., F. Stachowicz, W. Zielecki. 2015. "The effect of shot peening on the fatigue strength of steel sheets". *Kovove Materialy-Metallic materials*, t. 53, p. 91-95.

- [6] Zielecki W. 1998. „Wytrzymałość połączeń klejowych po nagniataniu dynamicznym”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (4): 25–28.
- [7] Zielecki W., K. Korzyńska. 2016. „Umacnianie zakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V metodą pneumatycznego kulowania”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (1): 44–47.
- [8] Zielecki W., R. Pełowski, T. Trzepieciński. 2007. „Analiza stanu naprężeń w spoinie zakładkowego połączenia klejowego umocnionego metodą pneumatycznego kulowania”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (1): 31–33.
- [9] Zielecki W. 2009. „Determinanty určujúce pevnostné vlastnosti lepených spojov”. *Vedecké Spisy Strojníckej Fakulty, Zväzok 02*, Edícia: Habilitačné a inauguračné spisy. Košice.

dr hab. inż. Władysław Zielecki – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: wzktmiop@prz.edu.pl

mgr Katarzyna Korzyńska – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: kk@prz.edu.pl