

ANALIZA STATYSTYCZNA WPŁYWU PARAMETRÓW PNEUMOKULOWANIA NA NOŚNOŚĆ ZAKŁADKOWYCH POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH STOPU ALUMINIUM 2024

Statistic analysis of the influence shot peening parameters on the capacity of single lap adhesive joints from aluminium alloy 2024

Władysław ZIELECKI, Łukasz BĄK, Ewelina GUŻLA, Magdalena BUCIOR

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulowania na nośność zakładkowych połączeń klejowych stopu aluminium 2024. Na skutek pneumokulowania nośność badanych połączeń zwiększyła się o 3,6-20,3%. Co więcej, na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej można stwierdzić, że w przyjętym obszarze zmienności parametrów technologicznych pneumokulowania, średnica kulek, ciśnienie sprężonego powietrza oraz czasu kulowania nie wywierają istotnego statystycznie wpływu na nośność połączeń klejowych stopu aluminium 2024.

Słowa kluczowe: połączenia klejowe, pneumokulowanie

Abstract: The thesis presents the results of investigations on the impact of shot peening parameters on the capacity of single lap adhesive joints from aluminium alloy 2024. Shot peening increased the capacity of joints by 3.6-20.3%. What is more, the statistical analysis showed that in the assumed area variability of shot peening parameters: ball diameter, pressure and time does not significantly affect the capacity of adhesive joints from aluminium 2024.

Keywords: adhesive joints, shot peening

Wprowadzenie

Połączenia klejowe są przykładem połączeń nierozłącznych. Charakteryzują się licznymi zaletami, do których zalicza się dużą wytrzymałość połączenia, możliwość stosowania dla różnorodnych materiałów i zmniejszenie ciężaru konstrukcji [1-4]. Połączenia klejowe znajdują szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, m.in. w: lotnictwie, przemyśle samochodowym i maszynowym. Z powodzeniem mogą zastępować połączenia spawane, lutowane, zgrzewane, nitowe i śrubowe [1]. Duża popularność połączeń klejowych sprawia, że poszukuje się różnych możliwości zwiększania ich wytrzymałości. Przykładem procesu mogącego zwiększyć wytrzymałość tego rodzaju połączeń jest pneumokulowanie [8].

Pneumokulowanie jest jedną z metod nagniatania umacniającego. Ma ono na celu wywołanie zgniotu warstwy wierzchniej wraz z towarzyszącymi temu skutkami. Realizowane jest przez elementy nagniatające w postaci kulek tożyskowych, wprowadzanych w ruch z wykorzystaniem strumienia sprężonego powietrza [5,6]. Efektywnością procesu pneumokulowania można sterować przez odpowiedni dobór parametrów kulowania, do których zalicza się m.in. średnicę kulek i wielkość wsadu, ciśnienie sprężonego powietrza oraz czas obróbki [7].

Metodyka badań

Celem prowadzonych badań było przeanalizowanie wpływu wybranych parametrów technologicznych procesu pneumokulowania na nośność zakładkowych

połączeń klejowych stopu aluminium 2024 oraz ocena istotności wpływu tych parametrów na nośność badanych połączeń. Przedmiot badań stanowiły próbki wykonane ze stopu aluminium 2024 o wymiarach 100×25×2 mm, sklejone na zakładkę klejem Loctite EA 3430. Loctite EA 3430 jest klejem epoksydowym, dwuskładnikowym, charakteryzującym się dużą szybkością utwardzania. Jego składniki mieszane są w proporcji 1:1 (wagowo lub objętościowo).

Proces klejenia rozpoczęto od przygotowania powierzchni próbek w miejscu ich łączenia. W tym celu próbki poddano obróbce strumieniowo-ściernej elektrokorundem. Przeprowadzono ją przy ciśnieniu 0,5 MPa, z wykorzystaniem dyszy o średnicy 6 mm. Obróbka ta umożliwiła uzyskanie optymalnego rozwinięcia powierzchni, skutkującego zwiększeniem siły wiązań adhezyjnych między metalem a klejem (rys. 1).



Rys. 1. Próbką po obróbce strumieniowo-ściernej
Fig. 1. A sample after abrasive blasting

Następnie każdą z próbek poddano odtłuszczeniu. W tym celu wykorzystano szybko odparowujący aceton.

Po odpowiednim przygotowaniu powierzchni do klejenia, przystąpiono do mieszania masy klejowej i tworzenia połączenia klejowego jednozakładkowego. Do mieszania i nanoszenia kleju wykorzystano

specjalną końcówkę mieszającą. Powstałe spoiny klejowe miały wymiary 25×12,5×2 mm. Próbki zostały umieszczone na 7 dni w przyrządzie do klejenia. W tym czasie złącza były obciążone siłą stałą, wywieraną przez obciążniki jednokilogramowe (rys. 2). Utwardzanie spoin przebiegało w temperaturze 23±2°C.



Rys. 2. Próbki umieszczone w przyrządzie do klejenia
Fig. 2. Samples placed in the gluing instrument

Sklejone próbki podzielono na siedem grup. Złącza klejowe sześciu grup zostały poddane pneumokulowaniu, natomiast siódmą grupę

pozostawiono w stanie niezmienionym. Nagniatanie obejmowało obydwie strony złącza. Parametry pneumokulowania przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1. Parametry pneumokulowania połączeń klejowych
Table 1. Shot peening parameters of adhesives joints

Nr grupy	Parametry kulowania	
	średnica kulek dk [mm]	ciśnienie p [MPa]
1.	2	0,25
2.	2	0,25
3.	2	0,25
4.	2	0,20
5.	2	0,30
6.	2,5	0,25

Po przeprowadzeniu procesu pneumokulowania próbki umocnione i nieumocnione przez zgniot poddano próbie jednoosiowego rozciągania. Próbę przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Zwick Roell Z030. Połączenia klejowe obciążono siłą osiową z prędkością 5 mm/min. Siła wstępna był równa 30 N.

Wyniki badań i ich analiza

Wyniki uzyskane w próbie jednoosiowego rozciągania przedstawiono w tab. 2 (dla próbek kulowanych) i tab. 3 (dla próbek niekulowanych).

Pneumokulowanie połączeń klejowych ze stopu aluminium 2024 spowodowało zwiększenie ich nośności

o 3-20%. Największą wytrzymałość na ścinanie, a tym samym największy wzrost nośności połączeń klejowych (o ponad 20%) odnotowano dla próbek kulowanych przez 2 min, kulkami o średnicy 2 mm napędzanych strumieniem powietrza o ciśnieniu 0,2 MPa.

Wyniki uzyskane w badaniach poddano analizie statystycznej. W tym celu wykorzystano program Minitab. Badania statystyczne obejmowały przeprowadzenie jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA, wykonanie testu t-Studenta, analizę regresji nośności połączeń, sporządzenie wykresów pudełkowych oraz wykresów trójwymiarowych.

Efekty jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA zostały przedstawione w tab. 4.

Tabela 2. Wyniki badań wytrzymałościowych dla próbek poddanych pneumokulowaniu
Table 2. Results of strength tests for samples after shot peening

Lp.	Średnica kulek	Ciśnienie	Czas	Nośność połączenia	Średnia nośność połączenia	Wytrzymałość na ścinanie	Wzrost nośności połączenia
	dk [mm]	p [MPa]	t [min]	Pt [kN]	Pśr [kN]	Rt [MPa]	ΔP [%]
1	2	0,25	1	7,420	6,787	21,718	3,6
2	2	0,25	1	7,260			
3	2	0,25	1	5,680			
4	2	0,25	2	7,680	7,387	23,638	12,7
5	2	0,25	2	7,890			
6	2	0,25	2	6,590			
7	2	0,25	3	8,110	7,383	23,626	12,7
8	2	0,25	3	7,010			
9	2	0,25	3	7,030			
10	2	0,2	2	7,660	7,883	25,226	20,3
11	2	0,2	2	7,330			
12	2	0,2	2	8,660			
13	2	0,3	2	8,180	7,520	24,064	14,8
14	2	0,3	2	6,110			
15	2	0,3	2	8,270			
16	2,5	0,25	2	6,710	6,747	21,590	3
17	2,5	0,25	2	6,650			
18	2,5	0,25	2	6,880			

Tabela 3. Wyniki badań wytrzymałościowych dla próbek niepoddawanych pneumokulowaniu
Table 3. Results of strength tests for samples not subjected to shot peening

Lp.	Nośność połączenia	Średnia nośność połączenia	Wytrzymałość na ścinanie
	Pt [kN]	Pśr [kN]	Rt [MPa]
19	6,990	6,552	20,966
20	6,960		
21	7,490		
22	5,760		
23	6,250		
25	5,860		

Tabela 4. Wyniki jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA
Table 4. Results of one-way analysis of ANOVA

Zmienna niezależna	DF	SS	MS	F	Pv
dk	1	1,041	1,041	1,76	0,203
Error	16	9,463	0,591		
Total	17	10,504			
p	2	1,765	0,882	1,51	0,252
Error	15	8,740	0,583		
Total	17	10,504			
t	2	0,892	0,446	0,70	0,514
Error	15	9,612	0,641		
Total	17	10,504			

DF – liczba stopni swobody; SS – suma kwadratów; MS – średnia suma kwadratów; F- wartość testu F; Pv – poziom prawdopodobieństwa

Wartości Pv wskazują na to, że w przyjętym obszarze zmienności parametry procesu kulowania takie jak: średnica kulek dk, ciśnienie sprężonego powietrza p i czas kulowania t, nie wykazują istotnego statystycznie wpływu na nośność połączeń klejowych. Na podstawie wartości Pv, kształtujących się na poziomie 0,252 (dla p) oraz 0,203 (dla dk), można wnioskować jednak,

że ciśnienie i średnica kulek mogą być uznawane za parametry sterujące procesem w kolejnych badaniach.

Dalszym etapem analizy statystycznej było przeprowadzenie testu t-Studenta. Umożliwił on określenie tych wariantów obróbki, pomiędzy którymi występowała różnica kształtująca się na poziomie istotności $\alpha=0,05$ (tabela 5).

Tabela 5. Wyniki testu t-Studenta
Table 5. Student's t-test results

Pv [%]	2_0,25_1	2_0,25_2	2_0,25_3	2_0,2_2	2_0,3_2	2,5_0,25_2
0_0_0	36,539	8,215	6,881	2,586	15,121	26,627
2_0,25_1	x					
2_0,25_2	21,779	x				
2_0,25_3	21,346	49,770	x			
2_0,2_2	9,566	21,550	20,379	x		
2_0,3_2	23,112	43,976	43,713	34,151	x	
2,5_0,25_2	47,467	12,558	10,944	5,032	19,368	x

Wyniki testu t-Studenta są potwierdzeniem wniosków płynących z analizy ANOVA. Czynniki sterowalne, do których należą średnica kulek, ciśnienie powietrza i czas kulowania, nie wywierają istotnego statystycznie wpływu na nośność badanych połączeń. Pv tylko w jednym przypadku jest mniejsze od 5%. Oznacza to, że istotne różnice występują tylko pomiędzy próbkami

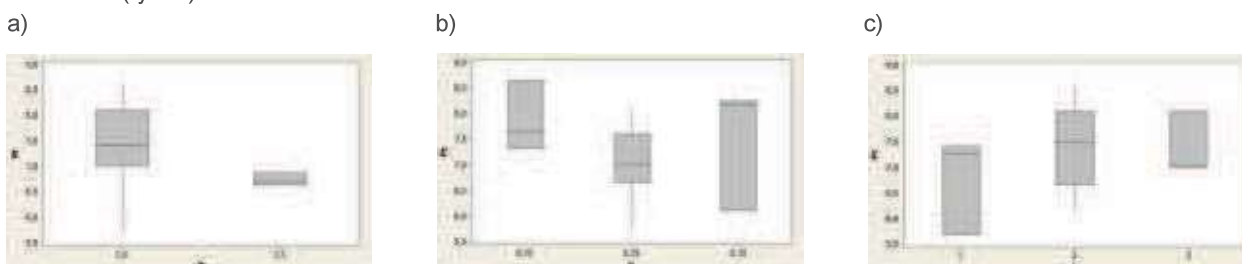
niekulowanymi, a próbkami kulowanymi kulkami o średnicy 2 mm, w czasie 2 min z ciśnieniem 0,2 MPa.

Na podstawie równań regresji zamieszczonych w tab. 6 można zauważyć, że wraz ze zwiększaniem ciśnienia sprężonego powietrza i średnicy kulek następuje zmniejszenie nośności badanych połączeń klejowych. Zwiększanie nośności połączeń następuje natomiast wraz ze zwiększaniem czasu kulowania.

Tabela 6. Wyniki analizy regresji nośności Pt połączeń klejowych od zmiennych niezależnych (średnicy kulek dk, ciśnienia p i czasu kulowania t)
Table 6. Results of regression analysis of load capacity Pt of glue joints from independent variables (ball diameter dk, pressure p and treatment time t)

Zależność nośności Pt od zmiennej niezależnej	Otrzymane równanie regresji	Pv
dk	$Pt = 9,97 - 1,29 dk$	0,203
p	$Pt = 8,19 - 3,63 p$	0,587
t	$Pt = 6,69 + 0,298 t$	0,368
dk, p, t	$Pt = 10,3 - 1,29 dk - 3,63 p + 0,298 t$	0,444

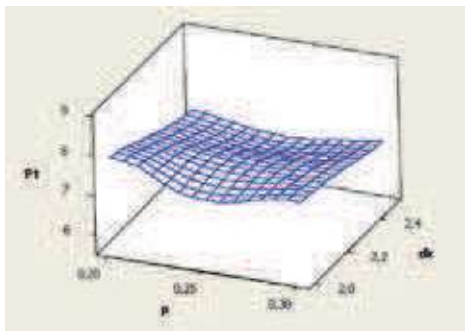
Na poniższych wykresach pudełkowych przedstawiono zależność nośności Pt od średnicy kulek, ciśnienia i czasu kulowania (rys. 3).



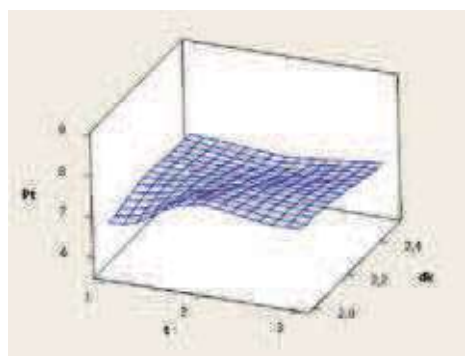
Rys. 3. Wykresy pudełkowe przedstawiające zmienność nośności Pt połączeń klejowych w zależności od: a) średnicy kulek dk, b) ciśnienia sprężonego powietrza p, c) czasu kulowania t
Fig. 3. Box plots showing variability of the load capacity Pt of glue joints depending on: a) ball diameter dk, b) compressed air pressure p, c) treatment time t

Pokrywanie się obszarów ukazanych na wykresach jest potwierdzeniem braku istotnego statystycznie wpływu poszczególnych parametrów (dk , p , t) na nośność badanych połączeń klejowych. Spostrzeżenia te potwierdzają również poniższe wykresy trójwymiarowe (rys. 4).

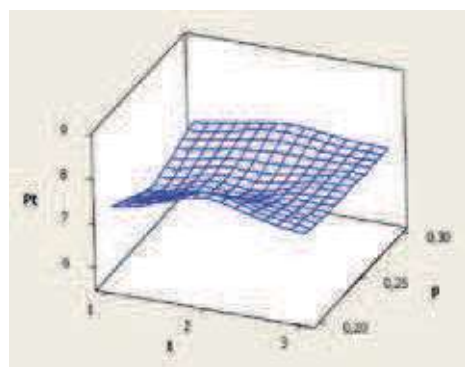
a)



b)



c)



Rys. 4. Wykres przedstawiający zmienność nośności P_t połączeń klejowych w zależności od: a) średnicy kulek dk i ciśnienia p , b) średnicy kulek dk i czasu kulowania t , c) ciśnienia p i czasu kulowania t

Fig. 4. A graph showing variability of the capacity of P_t glue joints depending on: a) ball diameter dk and pressure p , b) ball diameter dk and treatment time t , c) pressure p and treatment time t

Wnioski

1. Na podstawie analizy wpływu procesu pneumokulowania na nośność połączeń klejowych stopu aluminium 2024 można stwierdzić, że zastosowanie tego rodzaju obróbki umacniającej przyczynia się do zwiększenia nośności badanych połączeń. W wyniku pneumokulowania nośność połączeń wzrosła o 3,6 do 20,3%.
2. Przeprowadzona analiza statystyczna wykazała, że w przyjętym obszarze zmienności parametry procesu

kulowania, takie jak: średnica kulek dk , ciśnienie powietrza p oraz czas kulowania t nie wpływają w istotny statystycznie sposób na nośność badanych połączeń klejowych.

3. Analiza równań regresji wskazuje na to, że wraz ze zwiększaniem ciśnienia sprężonego powietrza i średnicy kulek następuje zmniejszenie nośności badanych połączeń klejowych. Natomiast zwiększanie nośności połączeń następuje wraz ze zwiększaniem czasu kulowania.

LITERATURA

- [1] Godzimirski J. i in. 1997. „Konstrukcyjne połączenie klejowe elementów metalowych w budowie maszyn”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- [2] Piekarczyk M. 2013. „Zastosowanie technologii klejenia w metalowych konstrukcjach budowlanych”. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
- [3] Porębska M., A. Skorupa. 2013. „Połączenia spójnościowe”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [4] Rudawska A., J. Kuczmaszewski. 2005. „Klejenie blach ocynkowanych”. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
- [5] „Technologie, urządzenia, metody”. 2007. Praca zbiorowa pod red. M. Korzyńskiego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- [6] „Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie. Tom 3”. 2013. Praca zbiorowa pod red. W. Przybylskiego. Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji. Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej.
- [7] Zaleski K. 2008. „Kształtowanie wybranych właściwości warstwy wierzchniej elementów metalowych w procesie dynamicznego nagniatania rozproszonego”. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
- [8] Zielecki W., K. Korzyńska. 2016. „Umocnienie zakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V metodą pneumokulowania”. Technologia i Automatykacja Montażu (1): 44–47.

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

mgr inż. Ewelina Guźła - studentka studiów doktoranckich na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, al. Powstańców Warszawa 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: e.guzla@prz.edu.pl

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

dr inż. Łukasz Bąk - Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, Katedra Przeróbki Plastycznej, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: lbak@prz.edu.pl