

# ANALIZA WPŁYWU PARAMETRÓW PNEUMOKULOWANIA NA WYTRZYMAŁOŚĆ ZAKŁADKOWYCH POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH STOPU TYTANU Ti6Al4V

## *Analysis of the impact of pneumatic shot peening parameters on the strength of single lap adhesives joints of titanium alloy Ti6Al4V*

Władysław ZIELECKI, Katarzyna KORZYŃSKA

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wpływu parametrów pneumatycznego kulowania na wytrzymałość zakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V. Badania przeprowadzono wg planu statycznego, zdeterminowanego, trójpoziomowego Hartley'a PS/DS-P:Ha<sub>3</sub>. Parametry pneumatycznego kulowania zmieniały się w zakresie: czas obróbki  $t = 1-3$  min, ciśnienie sprężonego powietrza  $p = 0,2-0,4$  MPa i średnica kulek  $d = 1,5-2,5$  mm. Przyjęty plan badań pozwolił przedstawić wyniki badań w postaci wielomianu drugiego stopnia, umożliwiając wyznaczenie optymalnych parametrów procesu umacniania badanych złączy klejowych.

**Słowa kluczowe:** połączenia klejowe, pneumatyczne kulowanie, plan Hartley'a

**Abstract:** The paper presents the results of experimental research on the influence of pneumatic shot peening parameters on the strength of single lap adhesives joint of titanium alloy Ti6Al4V. The experiments were conducted according to statistical Hartley's plan PS/DS-P:Ha<sub>3</sub>. Technological parameters were changed in the range; 1-3 min shot peening time  $t$ , 0,2-0,4 MPa pressure  $p$  and 1,5-2,5 mm diameter of the balls  $d$ . The accepted research plan allowed to present the results of the study in the form of a second degree polynomial, allowing to determine the optimal parameters of the process of strengthening the examined joints.

**Keywords:** butt-welded joint, pneumatic shot peening, head

### Wprowadzenie

Ze względu na swoje doskonałe właściwości, takie jak: wysoki współczynnik wytrzymałości w stosunku do ciężaru właściwego, odporność na korozję i wysoką temperaturę topnienia, stopy tytanu (głównie z aluminium i wanadem – ok. 75% stopów) wykorzystywane są do produkcji elementów głowic wirników śmigłowcowych, części silników lotniczych i na pokrycia samolotów. Stop Ti6Al4V stanowi blisko połowę wszystkich zastosowań związanych z przemysłem lotniczym. Przemysł ten poszukuje nowych technologii, zapewniających zwiększenie wytrzymałości części oraz ich połączeń.

Często stosowaną metodą łączenia blach stanowi klejenie na zakładkę. Zmiana wymiarów (karb geometryczny) w strefie brzegowej połączenia oraz różne właściwości kleju i materiału łączonego powodują koncentrację naprężeń w strefie przy krawędzi zakładki i tym samym jej osłabienie [1, 2].

Dla poprawy wytrzymałości zakładkowych połączeń klejowych stosowane są różne sposoby ukosowania i nawiercania albo nacinania brzegów klein, zmniejszające naprężenia i częściowo niwelujące oddziaływanie karbu. Pozwalają na poprawę wytrzymałości klein od kilku do ok. 23% [1, 10]. Jednak metody te wymagają dokonywania zmian konstrukcji lub technologii wykonywania połączeń, co w warunkach rzeczywistych (w praktyce) dość często jest utrudnione lub wręcz niemożliwe.

Bardzo prostą metodą poprawy wytrzymałości złączy klejowych jest pneumatyczne kulowanie. Jest to rodzaj obróbki strumieniowo-ścierniej, wykonywanej za pomocą małych, twardych stalowych kulek. Taka obróbka (w odróżnieniu od śrutowania) nie powoduje uszkodzeń powierzchni obrabianej. Pneumatyczne kulowanie to łatwy, cechujący się dobrą sterowalnością i niskimi kosztami proces obróbkowy, który może być wykonywany na prawie każdym wyrobie (każdej konstrukcji), za pomocą prostych urządzeń. Szczegóły technologii pneumatycznego kulowania zostały opisane w [4, 5, 6]. W pracach [7, 8] wykazano korzystny wpływ pneumatycznego kulowania na wytrzymałość zakładkowych połączeń klejowych wykonywanych ze stali niskowęglowej. Ponieważ głównym efektem pneumatycznego kulowania jest wprowadzenie do warstwy wierzchniej obrabianych części ściskających naprężeń własnych, to właśnie one wpływają na poprawę wytrzymałości zakładkowych połączeń klejowych [11].

Wstępne badania wykazały możliwość zwiększania nośności jednozakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V o 23,97 do 51,93% dzięki zastosowaniu obróbki umacniającej strefy złącza strumieniem kulek stalowych, rozprężonych sprężonym powietrzem [9]. Wykazały one również, że efektywność umacniania uzależniona jest od parametrów technologicznych procesu pneumatycznego kulowania.

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu parametrów pneumatycznego kulowania na wytrzymałość

zakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V. Badania przeprowadzono wg planu statycznego, zdeteminowanego, sekwencyjnego, poliselekcyjnego (Hartleya *PS/DS – P:Ha3*), a matematycznego opracowania wyników tych badań dokonano zgodnie z metodyką podaną w [3].

### Metodyka przeprowadzania doświadczeń

Przedmiotem badań były złącza z płytek o wymiarach: 100 mm długości, 25 mm szerokości i grubości 2 mm wykonane ze stopu tytanu Ti6Al4V o składzie chemicznym i właściwościach przedstawionych w tab. I i II. Płytki sklemano na zakładkę o długości 12,5 mm klejem Araldite 2014-1. Powierzchnie łączonych elementów obrobiono strumieniowo-ściernie elektrokorundem (w ośrodku sprężonego powietrza) w następujących warunkach: rozmiar ziarna  $wz = 0,27$  mm, ciśnienie powietrza  $p = 0,7$  MPa, czas  $t = 30$  s oraz odtłuszczono myjąc w acetonie przez 2 min.

Po naniesieniu warstwy kleju, próbki mocowano w przyrządzie mechanicznym z dociskiem 0,05 MPa i poddane sieciowaniu w temperaturze  $24 \pm 2^\circ\text{C}$  przez 7 dni. Następnie, w warunkach podanych w tab. III, dwustronnie kulkowano zakładki strefie skleiny, a potem umocnione próbki poddano badaniom naprężeń własnych i badaniom wytrzymałościowym.

Tabela I. Skład chemiczny stopu Ti6AL4V  
Table I. Chemical composition of Ti6AL4V alloy

V	Fe	O	N	C	H	Al	Ti
3,5-4	≤0,3	≤0,2	≤0,05	≤0,08	≤0,01	5,5–6,75	reszta

Tabela II. Właściwości wytrzymałościowe stopu Ti6AL4V  
Table II. Strength properties of Ti6AL4V alloy

Moduł sprężystości E [Gpa]	Wytrzymałość na rozciąganie Rm [Mpa]	Granica plastyczności Rp0,2 [Mpa]	Wytrzymałość zmęczeniowa Rz [MPa] dla 10 <sup>7</sup> cykli
110–114	960–970	850–900	620–725

Tabela III. Poziomy zmienności, wartości centralne, przedziały zmienności i sposób kodowania czynników do badań modelowych  
Table III. Variance levels, central values, volatility ranges, and coding for model tests

Nazwa czynnika	Wartość na poziomie górnym/dolnym		Wartości centralne czynników wejściowych	Przedział zmienności	Sposób kodowania czynnika
Ciśnienie zasilania $p$ [MPa]	+	0,4	$x_{10} = \frac{0,4 + 0,2}{2} = 0,3$	$\Delta x_1 = \frac{0,4 - 0,2}{2} = 0,1$	$x_1 = \frac{x_p - 0,3}{0,1}$
	-	0,2			
Średnica kulek $d$ [mm]	+	2,5	$x_{20} = \frac{2,5 + 1,5}{2} = 2,0$	$\Delta x_2 = \frac{2,5 - 1,5}{2} = 0,5$	$x_2 = \frac{x_d - 2}{0,5}$
	-	1,5			
Czas obróbki $t$ [s]	+	180	$x_{30} = \frac{180 + 60}{2} = 120$	$\Delta x_3 = \frac{180 - 60}{2} = 60$	$x_3 = \frac{x_t - 120}{60}$
	-	60			

Testy rozciągania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej INSTRON ElectroPlus™ E10000, obciążając próbki siłą osiową z prędkością 5 mm/min.

Prowadzenie badań eksperymentalnych wg planu statycznego, determinowanego, sekwencyjnego, poliselekcyjnego (Hartleya *PS/DS – P:Ha3*) wymaga zakodowania parametrów zmiennych pneumokulkowania. Przedziały ich zmienności i sposób kodowania podano w tab. III. Wartości tych parametrów przyjęto na podstawie doświadczeń nabytych przy realizacji wcześniejszych własnych prac oraz zaleceń literaturowych [3, 4]. Zakodowana wartość (wartość średnią z trzech pomiarów) dla każdego  $i$ -tego czynnika wynikowego oznaczono jako  $\bar{y}_i$ , natomiast jako  $x_i$  zakodowano podstawowe parametry zmienne procesu pneumokulkowania. Opracowania wyników dokonano zgodnie z metodyką opisaną w [3] przy założonym poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

### Wyniki badań wytrzymałości na rozerwanie

Wyniki pomiarów wytrzymałości na ścinanie wraz z wynikami niektórych obliczeń pomocniczych zamieszczono w tab. IV.

Wyniki uzyskane w oparciu o powyższy plan poddano ocenie powtarzalności stosując kryterium Cochran. Obliczona wartość współczynnika  $G$  wynosiła 0,2641 i była mniejsza od wartości krytycznej ( $G_{(0,05;11;2)} = 0,4187$ ),

Tabela IV. Wyniki badań i obliczeń pomocniczych wytrzymałości na ścinanie złączy klejowych jednozakładowych stopu tytanu Ti6Al4V  
Table IV. Test results and auxiliary shear strength calculations of single lap joint of Ti6Al4V titanium alloy

Lp.	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$\bar{y}_i$	$S^2(y)_i$	$\hat{y}_i$	$(\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2$
1	+	+	+	7638	8241	8120	8000	101762	8712	507318
2	+	-	-	6423	5297	7402	6374	1109557	5816	310823
3	-	+	-	5954	7144	6915	6671	398677	5816	730196
4	-	-	+	8001	7813	7940	7918	9199	8712	630324
5	+	0	0	5901	5696	6836	6144	369308	6599	206632
6	-	0	0	6112	6389	5417	5973	250756	6599	392170
7	0	+	0	7882	7526	7032	7480	182212	7264	46567
8	0	-	0	6184	6859	7062	6702	211286	7264	316452
9	0	0	+	7751	7873	6723	7449	399028	7328	14531
10	0	0	-	5958	6288	5587	5944	122990	5869	5623
11	0	0	0	6075	7886	7805	7255	1046530	6599	430902
$\Sigma$	-	-	-	-	-	-	75910	4201307	-	3591538

zatem powtarzalność warunków realizacji doświadczeń uznano za wystarczającą.

Obliczeń wartości współczynników regresji dokonano wstępnie obliczając wartości wielkości pomocniczych:

$$\sum_{i=1}^N \bar{y}_i = 75910 \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^N \bar{y}_i x_{ji}^2 = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^{11} x_{ji}^2 \bar{y}_i = \sum_{i=1}^{11} [x_{1i}^2 \bar{y}_i + x_{2i}^2 \bar{y}_i + x_{3i}^2 \bar{y}_i] = 126580 \quad (2)$$

Następnie zgodnie z metodyką podaną w [3], przyjmując wartości odpowiednich współczynników pomocniczych, obliczono wartości poszczególnych współczynników regresji. Ich wartości zamieszczono w trzeciej kolumnie tab. V. Oceny istotności tych współczynników dokonano stosując test t-Studenta, przez porównanie

wartości obliczonych z wartościami krytycznymi zamieszczonymi w tab. V. Po odrzuceniu wyrazów nieistotnych otrzymano (zakodowane) równanie regresji

$$y = 6599 + 665,3x_2^2 + 729,6x_3 + 718,2x_1x_2 \quad (3)$$

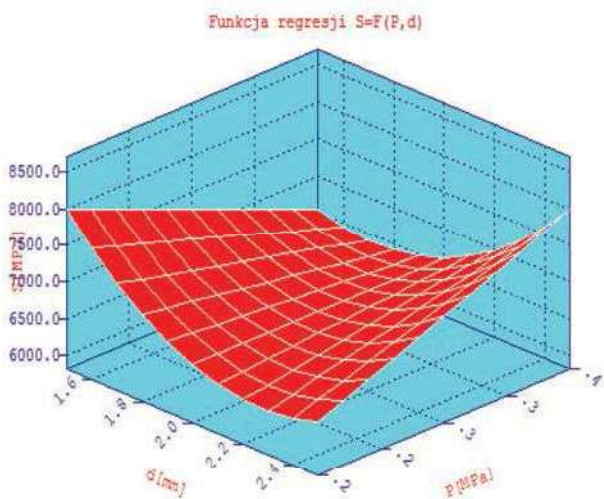
przedstawiające zależność siły zrywającej połączenie klejowe od parametrów pneumokulkowania.

Odkodowania równania regresji (3) dokonano przez podstawienie odpowiednich zależności z tab. 1 do równania (3) otrzymując równanie o postaci:

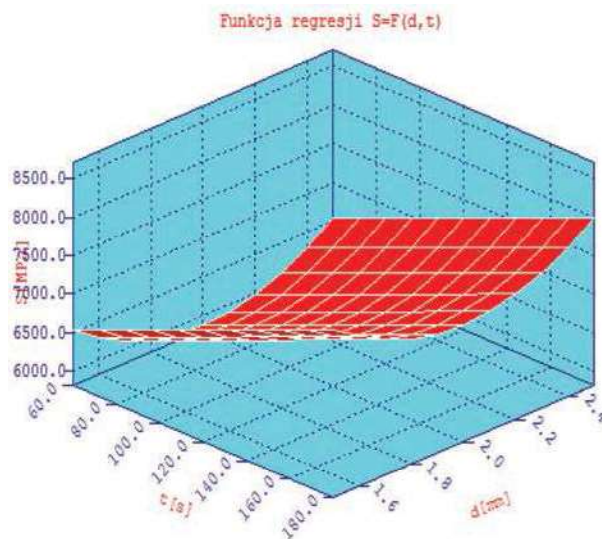
$$Y_{Rr} = 6599 + 665,3 \left( \frac{x_d - 2}{0,5} \right)^2 + 729,6 \left( \frac{x_t - 120}{60} \right) + 718,2 \left( \frac{x_p - 0,3}{0,1} \right) \left( \frac{x_d - 2}{0,5} \right) \quad (4)$$

Tabela V. Wartości obliczone, wartości krytyczne i istotność współczynników regresji modelu (3)  
Table V. Calculated values, critical values and significance of model regression coefficients (3)

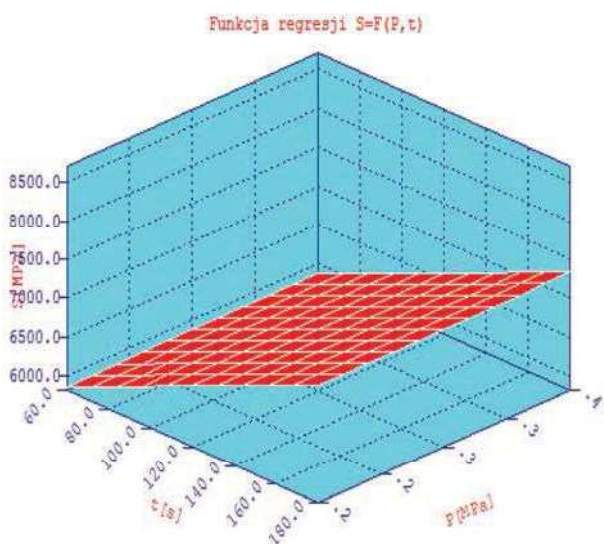
Współczynnik	Wartość krytyczna	Wartość obliczona	Stwierdzenie istotności współczynnika	
<b>b0</b>	408,3	6599	$ b_0  > b_{0kr}$	istotny
<b>b1</b>	302,1	-7,3	$ b_1  < b_{kr}$	nieistotny
<b>b2</b>		192,8	$ b_2  < b_{kr}$	nieistotny
<b>b3</b>		729,6	$ b_3  > b_{kr}$	istotny
<b>b11</b>	475,6	-367,1	$ b_{11}  > b_{kkr}$	nieistotny
<b>b22</b>		665,3	$ b_{22}  > b_{kkr}$	istotny
<b>b33</b>		271,1	$ b_{33}  < b_{kkr}$	nieistotny
<b>b12</b>	370,0	718,2	$ b_{12}  > b_{kjk}$	istotny
<b>b13</b>		94,7	$ b_{13}  < b_{kkr}$	nieistotny
<b>b23</b>		-53,8	$ b_{23}  < b_{kjk}$	nieistotny



Rys. 1. Wpływ średnicy kulek i ciśnienia zasilania na wytrzymałość klejowych złączy zakładkowych ze stopu Ti6Al4V przy czasie pneumokulkowania 120 s  
Fig. 1. Influence of ball diameter and feed pressure on strength of adhesive joints from Ti6Al4V alloy at 120 s pneumococcal time



Rys. 3. Wpływ czasu pneumokulkowania i średnicy kulek na wytrzymałość klejowych złączy zakładkowych ze stopu Ti6Al4V przy ciśnieniu 0,3 MPa  
Fig. 3. Influence of pneumo-pellet time and ball diameter on the strength of adhesive joints of Ti6Al4V alloys at a pressure of 0.3 MPa



Rys. 2. Wpływ czasu pneumokulkowania i ciśnienia zasilania na wytrzymałość klejowych złączy zakładkowych ze stopu Ti6Al4V przy kulkach o średnicy 2 mm  
Fig. 2. Effect of pneumococcal time and feed pressure on the strength of adhesive joints of Ti6Al4V alloy at 2 mm diameter balls

Po wykonaniu działań i uporządkowaniu równania (4) otrzymuje się zależność

$$Y_{Rt} = 24403 + 2661x_d^2 - 28728x_p - 14954x_d + 12t + 14360x_px_d \quad (5)$$

która wyraża wpływ dwóch podstawowych parametrów pneumokulkowania (średnicy kulek  $d$  oraz ciśnienia  $p$ ) na wytrzymałość klejowych złączy zakładkowych. Dla

zobrazowania wpływu tych parametrów na wytrzymałość badanych złączy opracowano wykresy przedstawione na rys. 1–3. Natomiast w przedostatniej kolumnie tab. IV zamieszczono obliczone z otrzymanego modelu (5) wartości wytrzymałości złączy. Te wyniki wykazują dość dobrą korelację z wynikami doświadczalnymi – współczynnik korelacji liniowej wynosi 0,82.

Otrzymany w wyniku doświadczenia model jest nieliniowy. Z przedstawionych zależności graficznych i rezultatów badań zamieszczonych w tab. IV wynika, że najwyższe wartości wytrzymałości złączy zakładkowych uzyskuje się odpowiednio przy najwyższym ciśnieniu i największej średnicy kulek albo przy najniższym ciśnieniu i kulkach o najmniejszej średnicy, w obydwu przypadkach przy najdłuższym czasie obróbki.

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że w badanym obszarze zmienności parametrów technologicznych procesu pneumokulkowania największy wpływ na wytrzymałość zakładkowych połączeń klejowych stopu Ti6Al4V wywierają średnica kulek  $d$  oraz w ciśnienie powietrza  $p$ .

W badanym obszarze zmienności parametrów technologicznych procesu pneumokulkowania największą wytrzymałość na ścinanie uzyskały połączenia umacniane kulkami o średnicy 1,5 mm rozpędzonymi strumieniem powietrza o ciśnieniu 0,2 MPa oraz połączenia obrobione kulkami o średnicy 2,5 mm rozpędzonymi strumieniem powietrza o ciśnieniu 0,4 MPa.

Otrzymany model matematyczny, opisujący wpływ parametrów pneumokulkowania na wytrzymałość na

ściananie zakładkowych połączeń klejowych stopu Ti6Al4V jest adekwatny, a współczynnik korelacji liniowej pomiędzy wytrzymałością uzyskaną w eksperymencie a wytrzymałością obliczoną z modelu wynosi 0,82.

## LITERATURA

- [1] Godzimirski J. 2002. „Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych”. Warszawa: WNT.
- [2] Habenicht G. 2009. „Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen”. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- [3] Korzyński M. 2017. „Metodyka eksperymentu. Planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych”. Warszawa: WNT.
- [4] 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.
- [5] Łunarski J., W. Zielecki. 1990. “Possibilities of improving fatigue properties of machine elements by pneumatic shot peening”. *Proceedings of the ICSP-4*: 263.
- [6] 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, 91–95.
- [7] Zielecki W. 2009. “Determinanty určujúce pevnostné vlastnosti lepených spojov”. *Vedecké Spisy Strojníckej Fakulty, Zväzok 02*, Edica: Habilitačné a inauguračné spisy. Košice.
- [8] Zielecki W. 1998. „Wytrzymałość połączeń klejowych po nagniataniu dynamicznym”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (4): 25–28.
- [9] Zielecki W., K. Korzyńska. 2016. „Umacnianie zakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V metodą pneumokulowania”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (1): 44–47.
- [10] Zielecki K., L. Witek. 2015. „Analysis of stress and ultimate strength of modified single adhesive lap joints”. *Logistyka* (4): 7015–7021.
- [11] Zielecki W., R. Perłowski, T. Trzepieciński. 2007. „Analiza stanu naprężeń w spoinie zakładkowego połączenia klejowego umocnionego metodą pneumokulowania”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (1): 31–33.

---

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

mgr Katarzyna Korzyńska – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: kk@prz.edu.pl