

UMACNIANIE ZAKŁADKOWYCH POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH STOPU TYTANU Ti6Al4V METODĄ PNEUMOKULOWANIA

Strengthening of adhesive joints of Ti6Al4V alloy by pneumatic ball peening method

Władysław ZIELECKI, Katarzyna KORZYŃSKA

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu umacniania metodą pneumokulowania zakładkowych połączeń klejowych ze stopu tytanu Ti6Al4V. Pneumokulowanie przeprowadzono kulkami stalowymi o średnicy 1,5 mm, a intensywność umocnienia regulowano czasem obróbki, który zmieniano w zakresie 10–30 s. Przeprowadzone badania wykazały wzrost wytrzymałości na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych wykonanych ze stopu Ti6Al4V o 42–63% w następstwie umacniania metodą pneumokulowania.

Słowa kluczowe: umacnianie, połączenia klejowe, stop Ti6Al4V, kulowanie

Abstract: The article discusses the results of researches concerning the strengthening of single lap adhesive joints of Ti6Al4V titanium alloy with the use of pneumatic ball peening method. In the process steel shots with the diameter of 1.5 mm have been applied. Intensity of strengthening was controlled by a treatment time, which was 10, 20 and 30 seconds. The study showed an increase in lap shear strength of adhesive joints made of alloy Ti6Al4V by 42-63% as a result of strengthening by pneumatic ball peening method.

Keywords: strengthening, adhesive joints, Ti6Al4V alloy, shot peening

Wprowadzenie

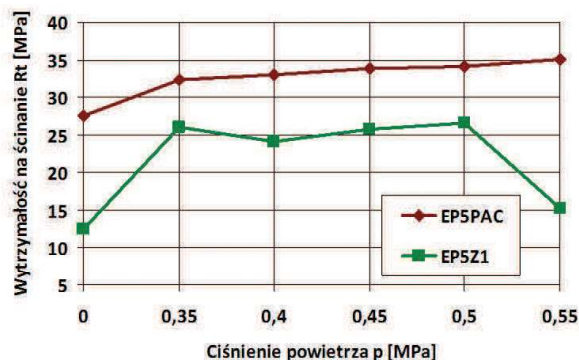
Podstawowe właściwości wytrzymałościowe połączeń klejowych (nośność P oraz wytrzymałość na ścinanie R_t) uzależnione są od wielu czynników do których zaliczamy:

- konstrukcję złącza lub jego strefy przykrawędziowej [1, 4],
- sposób przygotowania powierzchni klejonych części [2, 3],
- skład kompozycji klejowej [1],
- warunki procesu sieciowania (temperatura, czas, ciśnienie).

Wymienione czynniki związane są z fazą formowania złącza klejowego. Przedstawione w pracach [4-6] wyniki badań wskazują na możliwość umacniania zakładkowych połączeń klejowych metodą pneumokulowania. Wytrzymałość na ścinanie zakładkowych połączeń ze stali S235JR sklejonych kompozycją Epidian 5 z utwardzaczem PAC (dającą spoinę elastyczną) $R_t = 27,5$ MPa w następstwie umacniania metodą pneumokulowania wzrosła do wartości $R_t = 32,4 - 35,1$ MPa, tj. o 17–27% (rys. 1). Wzrost ciśnienia sprężonego powietrza rozprężającego nagniatające kulki powodował proporcjonalny wzrost wytrzymałości na ścinanie badanych połączeń.

Nagniatanie dynamiczne okazało się o wiele bardziej efektywne w odniesieniu do próbek sklejonych kompozycją Epidian 5 z utwardzaczem Z1 (dającą spoinę sztywną). Wytrzymałość na ścinanie zwiększyła się z $R_t = 12,5$ MPa do $R_t = 24,2 - 26,6$ MPa, tj. wzrosła o 93–112% (rys. 1). W przypadku tej kompozycji klejowej

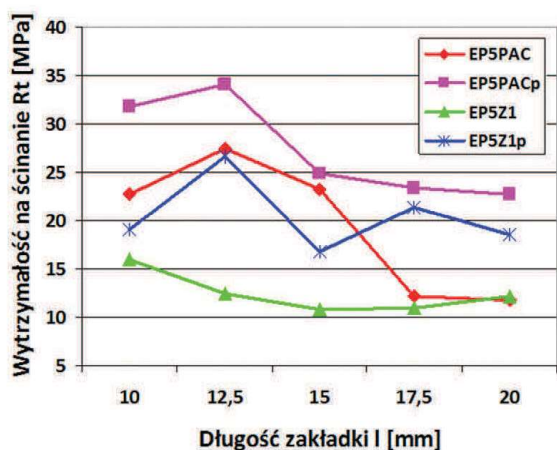
nie ujawniono istotnej zależności między wytrzymałością na ścinanie a ciśnieniem pneumokulowania. Stwierdzono jedynie, że pneumokulowanie z maksymalnym badanym ciśnieniem $p = 0,55$ MPa spowodowało gwałtowny spadek efektywności nagniatania, co może być spowodowane niszczeniem więzi kohezyjnych lub adhezyjnych w sztywnej spoinie klejowej przez odkształcenia zakładek, wywołane naprężeniami konstytuowanymi podczas pneumokulowania.



Rys. 1. Wpływ ciśnienia powietrza podczas pneumokulowania na wytrzymałość na ścinanie R_t zakładkowych połączeń ze stali S235JR sklejonych kompozycjami Epidian 5 + PAC (EP5PAC) oraz Epidian 5 + Z1 (EP5Z1) [5]

Fig. 1. The influence of air pressure during pneumatic ball peening in the adhesive joint shear strength (R_t) of S235JR steel bonded Epidian 5/PAC (EP5PAC) and Epidian 5/Z1 (EP5/Z1) compositions [5]

Badania eksperymentalne wpływu długości zakładki na wytrzymałość połączeń klejowych wskazują, że maksymalną wytrzymałość uzyskują połączenia o długości zakładki 12,5 mm. Zwiększanie długości zakładki powoduje zmniejszenie wytrzymałości o 6–57% w przypadku połączeń sklejonych kompozycją Epidian 5 + PAC oraz o 22–32% połączeń sklejonych kompozycją Epidian 5 + Z1 (rys. 2). Pogorszenie wytrzymałości spowodowane jest zmianą sztywności wywołaną zwiększeniem długości zakładki. Umocnienie metodą pneumokulowania połączeń sklejonych kompozycją Epidian 5 + PAC spowodowało zwiększenie wytrzymałości na ścinanie o 11–94%, przy czym największą efektywność 91–94% uzyskano dla najdłuższych zakładek ($l = 17,5\text{--}20,0$ mm). W przypadku połączeń sklejonych kompozycją Epidian 5 + Z1 pneumokulowanie spowodowało zwiększenie wytrzymałości na ścinanie o 18–112%.



Rys. 2. Wpływ długości zakładki i pneumokulowania na wytrzymałość na ścinanie R_t zakładkowych połączeń ze stali S235JR sklejonych kompozycjami Epidian 5 + PAC (EP5PAC) oraz Epidian 5 + Z1 (EP5Z1), litera p oznaczone są połączenia pneumokulowane [4]

Fig. 2. The influence of lap length and pneumatic ball peening in the adhesive joint shear strength (R_t) of S235JR steel bonded Epidian 5/PAC (EP5PAC) and Epidian 5/Z1 (EP5Z1) compositions, the adhesive joints after pneumatic ball peening are marked with p [4]

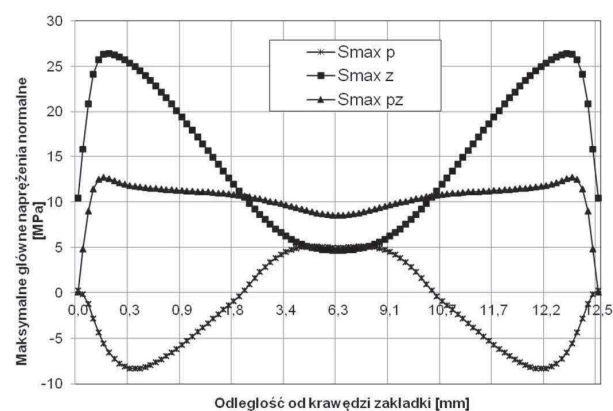
Przeprowadzona metodą elementów skończonych analiza stanu naprężeń w spoinie zakładkowego połączenia klejowego (rys. 3) [4, 6] wskazuje, że:

- przyłożenie obciążenia zewnętrznego konstituuje w strefie przykrawędziowej spoiny klejowej stan naprężeń, w którym maksymalne główne naprężenia normalne σ_1 osiągają wartość 27 MPa,
- pneumokulowanie, wywołujące w warstwie wierzchniej klejonych elementów ściskające naprężenia własne, konstituuje w strefie przykrawędziowej spoiny klejowej stan naprężeń, w którym maksymalne główne naprężenia normalne σ_1 osiągają wartość -8 MPa,
- przyłożenie obciążenia zewnętrznego do połączeń wspólnie pneumokulowanych konstituuje w spoinie

klejowej stan naprężeń wskazujący na sumowanie się naprężeń ukonstytuowanych podczas pneumokulowania z naprężeniami wywołanymi obciążeniem zewnętrznym, co powoduje zmniejszenie maksymalnych głównych naprężeń normalnych σ_1 do wartości 12 MPa.

Pneumokulowanie zakładkowego połączenia klejowego powoduje zmniejszenie maksymalnych głównych naprężeń normalnych σ_1 w spoinie klejowej, co bezpośrednio przekłada się na wzrost ich wytrzymałości na ścinanie.

Pozytywne rezultaty umacniania zakładkowych połączeń klejowych zdecydowały o podjęciu badań, których celem było sprawdzenie efektywności umacniania pneumokulowaniem zakładkowych połączeń klejowych ze stopu tytanu Ti6Al4V.



Rys. 3. Rozkład maksymalnych głównych naprężeń normalnych σ_1 (maximal principal stress) w warstwie środkowej spoiny klejowej złącza: p – pneumokulowanych, z – obciążonych siłą zewnętrzną, pz – pneumokulowanych i obciążonych siłą zewnętrzną [4]

Fig. 3. Maximum principal stress distribution in the center layer of adhesive joints: p – after pneumatic ball peening, z – at which the external force is applied, pz – after pneumatic ball peening and applying an external force [4]

Metodyka badań

Próbki do badań wykonano z blachy ze stopu tytanu Ti6Al4V (zawierającego oprócz tytanu 5,5–6,75% aluminium, 3,5–4% wanadu, do 0,3% żelaza, do 0,2% tlenu, do 0,05% azotu, do 0,08% węgla oraz do 0,01% wodoru). Zakładkowe połączenia klejowe wykonano z dwóch pasków blachy o długości $a = 100$ mm, szerokości $b = 25$ mm, grubości $g = 2$ mm, które złączono klejem Araldite 2014-1 na zakładkę o długości $d = 12,5$ mm.

Araldite 2014-1 to konstrukcyjny, dwuskładnikowy klej epoksydowy, stosowany do klejenia metali oraz kompozytów, kamienia i ceramiki, tworzący sztywną spoinę, mający wysoką odporność na temperaturę, chemikalia i trwałość w długim okresie użytkowania. Mieszany w stosunku wagowym 2:1 utwardza się równomiernie w całej masie już w temperaturze 10°C i pracuje w szerokim zakresie temperatur (-60°C do 140°C).

Tabela 1. Wyniki badań wytrzymałościowych zakładkowych połączeń klejowych ze stopu tytanu Ti6Al4V umocnionych metodą pneumokulowania

Table 1. The results of strength tests on single lap adhesive joints of Ti6Al4V titanium alloy strengthened by pneumatic ball peening method

Czas pneumokulowania [s]	P_{tsr} [N]	$P_{tmin}-P_{tmax}$ [N]	σP_t [N]	ΔP_t [%]	R_t [MPa]
0	5970	5740-6150	208,8	–	19,1
10	8480	7700-9410	831,5	42,1	27,1
20	9154	7520-10700	1190,3	53,4	29,3
30	9726	8290-10600	898,3	63,1	31,1

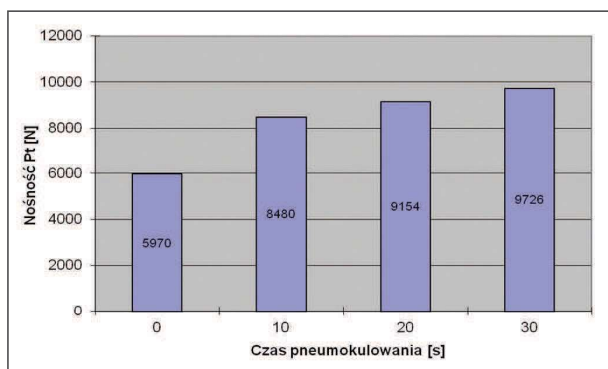
Powierzchnię łączonych pasków blachy obrobiono strumieniowo-ściernie elektrokorundem (w ośrodku sprężonego powietrza) w następujących warunkach: rozmiar ziarna $wz = 0,27$ mm, ciśnienie powietrza $p = 0,7$ MPa, czas $t = 30$ s oraz poddano ultradźwiękowemu myciu w acetonie przez 2 min.

Proces sieciowania przebiegał w temperaturze otoczenia $22^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ przez 7 dni, z naciskiem 0,05 MPa w przyrządzie mechanicznym. Umocnianie złącza klejowego metodą pneumokulowania przeprowadzono w urządzeniu komorowym kulkami stalowymi o średnicy $dk = 1,5$ mm, które rozpędzono strumieniem sprężonego powietrza o ciśnieniu $p = 0,6$ MPa. Obydwie strony złącza pneumokulowano przez 10 do 30 s.

Badania wytrzymałości na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Zwick Z030. W trakcie próby wytrzymałościowej połączenia klejowe obciążano siłą osiową z prędkością 5 mm/min.

Wyniki badań

Wyniki badań wytrzymałościowych zakładkowych połączeń klejowych ze stopu tytanu Ti6Al4V umocnionych metodą pneumokulowania przedstawiono w tab. 1 oraz na rys. 4. Wyznaczona w próbie ścinania średnia nośność nieumocnionych połączeń klejowych wynosząca 5970 N (wytrzymałość na ścinanie 19,1 MPa) wzrosła



Rys. 4. Porównanie nośności połączeń klejowych ze stopu tytanu Ti6Al4V umocnionych metodą pneumokulowania

Fig. 4. Comparison capacity of adhesive joints of Ti6Al4V titanium alloy strengthened by pneumatic ball peening method

w następstwie pneumokulowania do 8480–9726 N (wytrzymałość na ścinanie 27,1–31,1 MPa). Nośność połączeń klejowych poddanych pneumokulowaniu wzrosła proporcjonalnie do czasu obróbki, co wskazuje na możliwość sterowania efektem umacniania za pomocą parametrów pneumokulowania.

Uzyskane wyniki badań wytrzymałościowych wskazują na konieczność przeprowadzenia rozszerzonych badań wpływu parametrów pneumokulowania (czasu obróbki t , ciśnienia powietrza p , średnicy kulek d_k) na wytrzymałość zakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wskazują na możliwość stosowania pneumokulowania (nagniatania strumieniowego rozproszonego) do umacniania zakładkowych połączeń klejowych ze stopu tytanu Ti6Al4V. Nośność połączeń klejowych ze stopu tytanu Ti6Al4V poddanych pneumokulowaniu zwiększyła się o 42–63%. Nośność badanych połączeń klejowych zwiększała się proporcjonalnie ze wzrostem czasu pneumokulowania, co wskazuje na możliwość sterowania procesem umacniania zakładkowych połączeń klejowych ze stopu tytanu Ti6Al4V za pomocą parametrów obróbki umacniającej.

LITERATURA

- [1] Godzimirski J., J. Kozakiewicz, J. Łunarski, W. Zielecki. 1997. „Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- [2] Zielecki W., P. Pawlus, R. Perłowski, A. Dzierwa. 2011. „Analiza wpływu struktury geometrycznej powierzchni w układzie 3D na wytrzymałość połączeń klejowych”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (1): 33–37.
- [3] Zielecki W., P. Pawlus, R. Perłowski, A. Dzierwa. 2013. „Surface topography effect on strength of lap adhesive joints after mechanical pre-treatment”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* (13): 175–185.
- [4] Zielecki W. 2009. „Determinanty určujúce pevnostné vlastnosti lepených spojov”. *Vedecké Spisy Strojníckej Fakulty, Zväzok 02, Edícia: Habilitačné a inauguračné spisy*. Košice

- [5] Zielecki W. 1998. „Wytrzymałość połączeń klejowych po nagniataniu dynamicznym”. *Technologia i Automatyza Montażu* (4): 25–28.
- [6] Zielecki W., R. Pełowski, T. Trzepieciński. 2007. „Analiza stanu naprężeń w spoinie zakładkowego połączenia klejowego umocnionego metodą pneumokulowania”. *Technologia i Automatyza Montażu* (1): 31–33.

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

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