

WPLYW ŁĄCZNIKÓW MECHANICZNYCH NA NOŚNOŚĆ POŁĄCZEŃ HYBRYDOWYCH

Impact of mechanical fasteners on the carrying capacity of hybrids

Marek ROŚKOWICZ, Justyna CHUDOWOLSKA

Streszczenie: W pracy zaprezentowano rezultaty własnych badań, których celem było porównanie nośności połączeń dwuzakładowych, w których łączono element wykonany z polimerowych materiałów kompozytowych z dwoma elementami stalowymi. Elementy były łączone metodą klejenia (połączenia adhezyjne), metodą mechaniczną i hybrydową (adhezyjno – mechaniczną). W badaniach wykorzystano klej Epidian 57/Z1 oraz elementy przygotowane na bazie prepegów węglowych techniką autoklawową. Stwierdzono, że nośność połączeń hybrydowych w istotny sposób zależy od materiału, z którego wykonane są łączniki mechaniczne oraz od parametrów geometrycznych samych łączników. Stwierdzono również, że zastosowanie łączników mechanicznych w połączeniu hybrydowym zabezpiecza węzeł przed gwałtownym zniszczeniem w przypadku dekohezji połączenia adhezyjnego.

Słowa kluczowe: połączenia hybrydowe, połączenia śrubowe, nośność połączeń

Abstract: The paper presents the results of own research, the aim of which was to compare the load capacity of two-lap joints, in which the element made of polymer composite materials was connected with two steel elements. The elements were joined by adhesive bonding (adhesive joints), mechanical and hybrid (adhesive – mechanical). In the research involved using elements based on CFRP prepreg using the autoclave technique and Epidian 57/Z1 adhesive. It was found that the load capacity of hybrid joints depends significantly on the material from which the mechanical fasteners are made and on the geometrical parameters of fasteners. It has also been found that the use of mechanical fasteners in a hybrid connection protects the construction node against rapid destruction in the case of adhesive joint decohesion.

Keywords: hybrid connections, screw connections, load carrying capacity

Wstęp

Połączenia hybrydowe są kombinacją połączeń adhezyjnych i mechanicznych, które wspólnie tworzą węzeł konstrukcyjny. Bardzo często kombinację tego typu połączeń wykorzystywano w celu poprawy cech użytkowych węzła połączeniowego, w tym m.in. zapewnienia szczelności połączenia lub zabezpieczenia konstrukcji przed negatywnym wpływem warunków atmosferycznych – problematyka korozji elektrochemicznej. Coraz szersze zastosowanie polimerowych materiałów kompozytowych w konstrukcjach lotniczych czy samochodowych spowodowało, że oprócz właściwości użytkowych tego rodzaju połączeń istotne znaczenia mają również ich właściwości mechaniczne, w tym ich nośność [2, 3, 4].

Nośność połączeń hybrydowych zależy od wielu parametrów konstrukcyjnych, technologicznych i materiałowych, w tym m.in. rodzaju połączenia, rodzaju łączonych materiałów, rodzaju wykorzystywanych klejów i mechanicznych łączników [1, 5, 6].

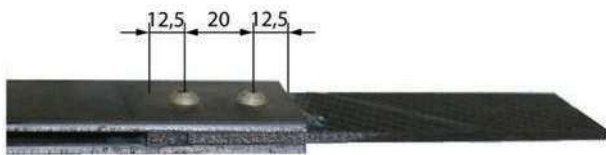
Celem przeprowadzonych testów eksperymentalnych było porównanie nośności połączeń adhezyjnych, mechanicznych i hybrydowych w kontekście możliwości łączenia kompozytowych elementów pierwszorzędowych struktury płatowca statku powietrznego połączeniami hybrydowymi. Nośność połączeń oceniano na podstawie niszczącej próby osiowego rozciągania próbek. W badaniach oceniono również możliwość

ograniczenia negatywnego wpływu łączników mechanicznych na materiał kompozytowy poddany naciskom powierzchniowym.

Metodyka badań

W badaniach eksperymentalnych wykorzystano połączenia dwuzakładowe, w których kompozytowy element łączono z dwiema stalowymi nakładkami. Elementy kompozytowe zostały powycinane techniką WaterJet z 10 warstwowego laminatu węglowego w układzie quasi-izotropowym o grubości 3 mm. Do przygotowania próbek połączeń zostały wykorzystane elementy kompozytowe i stalowe o długości 140 mm, szerokości 40 mm oraz grubości 3 mm. Próbką została wykonana w układzie symetrycznym, gdzie rdzeń stanowił element kompozytowy, a zakładki zewnętrzne były wykonane z płyty stalowej 40H. Do przygotowania połączeń adhezyjnych i hybrydowych został wykorzystany klej Epidian 57/Z1. Do przygotowania połączeń mechanicznych i hybrydowych wykorzystano łączniki w postaci nitów lotniczych aluminiowych BN-70 1121-03 o średnicy \varnothing 5 mm oraz śrub stalowych o średnicy \varnothing 5 mm oraz \varnothing 3 mm BN-73/1112-03.

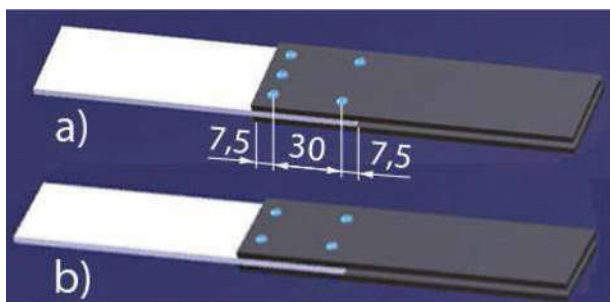
W pierwszym etapie badań porównano nośność połączeń: adhezyjnych, mechanicznych i hybrydowych. Jako połączenia hybrydowe zastosowano połączenia śrubowo-klejowe oraz nitowo-klejone, stosując w nich



Rys. 1. Widok próbki nitowo-klejowej przygotowanej do badań
Fig. 1. View of hybrid specimen prepared for testing

nity i śruby o średnicy $\varnothing 5$ mm. Łączniki zostały zamontowane w otworach wykonanych zgodnie ze schematem: pierwszy otwór w odległości $2,5 \times$ średnicy od krawędzi zakładki, drugi otwór $4 \times$ średnicy od pierwszego. Uwzględniając średnice zastosowanych łączników otwory wykonano w odległości 12,5 mm i 32,5 mm od krawędzi zakładki. Dodatkowo otwory wykonano w osi próbki, tzn. 20 mm od krawędzi bocznej próbki. Długość zakładek w połączeniu była równa 45 mm. Widok jednej z próbek przygotowanej do badań zaprezentowano na rys.1.

W drugim etapie badań porównywano nośność połączeń mechanicznych i hybrydowych, w których wykorzystano jako łączniki mechaniczne tylko śruby. Przyjmując kryterium jednakowego pola przekroju otworów wykonywanych pod łączniki, oprócz śrub o średnicy 5 mm, zastosowano śruby o mniejszej średnicy równej 3 mm, zwiększając jednocześnie liczbę łączników do 4 i 5 (przy liczbie 5-ciu łączników suma pól przekrojów otworów pod 2 śruby o średnicy 3 mm była równa sumie pól otworów pod 2 śruby o średnicy 5 mm). Do badań przygotowano również próbki dwuzakładkowe, wykonane z tych samych elementów (jeden element kompozytowy, dwa elementy stalowe). Otwory pod śruby o średnicy 3 mm wykonano kierując się zasadą wykonywania otworów w odległości $2,5 \times$ średnicy od wszystkich krawędzi (zarówno krawędzi zakładki i krawędzi bocznych połączenia). W przypadku zastosowania pięciu śrub w połączeniu łączniki mechaniczne miały układ dwurzędowy niesymetryczny – w jednym rzędzie zostały zamontowane 2 śruby, w drugim rzędzie 3 śruby. W rzędzie z trzema łącznikami – śruba środkowa została zamontowana w osi podłużnej próbki (tzn. 20 mm od krawędzi bocznej próbki). Schemat



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia łączników mechanicznych w połączeniu hybrydowym: a) liczba śrub – 5, b) liczba śrub – 4 (II etap testów eksperymentalnych)

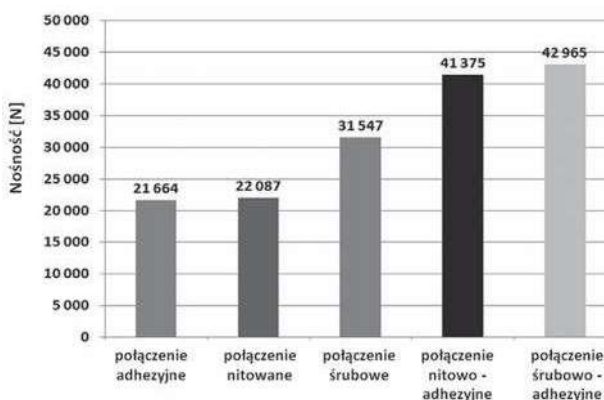
Fig. 2. Pattern of arrangement of mechanical fasteners in hybrid joint: a) number of screws – 5, b) number of screws – 4 (II stage of experimental tests)

rozmieszczenia śrub o średnicy 3 mm zaprezentowano na rys. 2.

Przygotowane do testów próbki połączeń poddano badaniom nośności w temperaturze pokojowej za pomocą uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej firmy Hung-ta, o numerze katalogowym HT-2402. Dla jednego punktu pomiarowego wykonano badania na trzech próbkach połączeń do analizy, przyjmując średnią arytmetyczną z trzech pomiarów.

Wyniki badań

Wyniki uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla pierwszego etapu zaprezentowano na rys. 3.



Rys. 3. Porównanie nośności połączeń adhezyjnych i hybrydowych (dla dwóch wariantów łączników mechanicznych śrub i nitów)

Fig. 3. Comparison of load capacity in adhesive and hybrid joints (for two variants of mechanical fasteners screws and rivets)

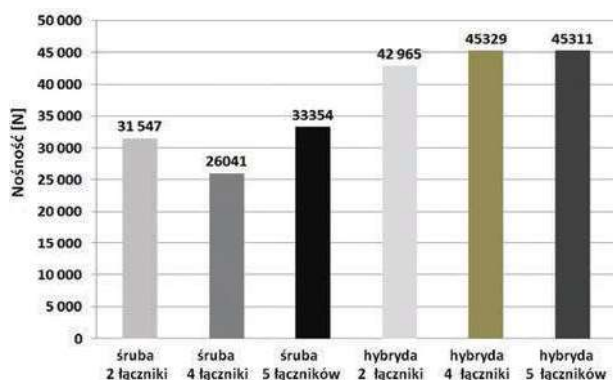
Otrzymane rezultaty wskazują, że zmodyfikowanie połączeń adhezyjnych za pomocą łączników mechanicznych (śrub lub nitów) powoduje istotny wzrost nośności połączenia (w przypadku zastosowania nitów nawet ponad dwukrotny). Z dwóch przebadanych wariantów połączeń hybrydowych: śrubowo-klejowego i nitowo-klejowego, nieznacznie większa nośność cechowała połączenia z łącznikami śrubowymi. Należy przypuszczać, że wynikało to z mniejszej podatności na odkształcenia łączników śrubowych wykonanych ze stali, w porównaniu do nitów wykonanych ze stopu aluminium. Zastosowanie mniej podatnych na odkształcenia łączników w połączeniu hybrydowym powodowało, że występujące na końcach zakładki niekorzystne zjawisko oddzierania spoiny klejowej miało mniejszy wpływ na nośność połączenia. Obserwacja odkształceń występujących w połączeniu nitowym w wyniku działania wtórnych momentów gnących potwierdza to przypuszczenie (rys. 4). Rodzaj materiału, z którego zostały wykonane łączniki mechaniczne miał wpływ nie tylko na nośność połączeń (większa po zastosowaniu śrub), ale również na formę niszczenia połączenia. W przypadku połączenia nitowego łączniki zostały ścięte, natomiast połączeniu śrubowemu zniszczony został element kompozytowy w przekroju krytycznym.



Rys. 4. Widok próbki w połączeniu mechanicznym nitowanym podczas badań w takcie próby rozciągania – zauważalne zjawisko rozwarstwiania połączenia

Fig. 4. View of sample in mechanical coupling riveted during testing in the tensile test – noticeable delamination of the joint

Wyniki uzyskane dla drugiego etapu testów eksperymentalnych zaprezentowano na rys. 5. Podobnie jak w etapie pierwszym nośność połączeń hybrydowych była znacznie większa od połączeń mechanicznych. Dodatkowo wykorzystanie śrub o mniejszej średnicy, ale w większej liczbie (zachowując kryterium równości pól przekrojów poprzecznych łączników) okazało się efektywniejszym rozwiązaniem. Nośność, zarówno połączeń mechanicznych jak i hybrydowych, z takim rodzajem łączników, była o kilkanaście procent większa. Nie bez znaczenia jest również postać niszczenia połączenia. W przypadku zastosowania łączników o większej średnicy, przekroje krytyczne stosowanych elementów w połączeniu były mniejsze i zniszczeniu ulegał element kompozytowy. Wykonując otwory pod śruby o mniejszej średnicy łączone elementy były uszkodzane w mniejszym zakresie – pola przekrojów krytycznych były mniejsze i zniszczeniu ulegały śruby. Ponadto, w połączeniach hybrydowych zmniejszenie liczby łączników z pięciu do czterech nie spowodowało spadku nośności połączenia hybrydowego, a stopień



Rys. 5. Porównanie nośności połączeń mechanicznych (śrubowy) i hybrydowych (śrubowo-klejonych) (dla trzech wariantów ilości łączników)

Fig. 5. Comparison of load capacity in the adhesive, mechanical (screws) and hybrid joints (for three variants of the number of fasteners)

wstępnego uszkodzenia materiału przez otwory w łączonych elementach był mniejszy (co jest szczególnie istotne w przypadku wykorzystania materiałów kompozytowych).

Wnioski

Na podstawie wykonanych badań eksperymentalnych stwierdzono, że:

- połączenia hybrydowe charakteryzuje wyższa nośność w porównaniu do połączeń adhezyjnych i mechanicznych,
- nośność połączeń hybrydowych jest istotnie zależna od rodzaju materiału z którego wykonane są łączniki mechaniczne – materiały mniej podatne na odkształcenia są efektywniejsze ponieważ jak należy sądzić spoiny klejowe w połączeniu hybrydowym są mniej wyczerpane na krawędziach zakładki,
- wykorzystując w połączeniu hybrydowym materiały kompozytowe korzystniej jest stosować łączniki o mniejszych średnicach – mogą one być montowane bliżej krawędzi zakładek połączenia co pozytywnie wpływa na rozkład naprężeń w spoinie klejowej oraz bardziej efektywnie wykorzystuje się materiał łączonych elementów w strefie połączenia (np. większe pola przekrojów krytycznych).

LITERATURA

- [1] Ahn J., N. Duffala. 2010. "Metal-to-Metal and Metal-to-Composite Bonded and Bolted Structural Joints". Encyclopedia of Aerospace Engineering.
- [2] Baldan A. 2004. "Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: Adhesives, adhesion theories and surface pretreatment". *Journal of Materials Science* Vol. 39.
- [3] Camanho PP. et. al. 2005. "Increasing the efficiency of composites single – shear lap joint using bonded inserts". *Composites: Part B* 36.
- [4] Chowdhury N. et. al. 2015. "Static and fatigue testing thin riveted, bonded and hybrid carbon fiber double lap joints used in aircraft structures". *Composite Structures* 121.
- [5] Rośkowicz M., P. Leszczyński, J. Chudowolska. 2016. "Analysis of load capacity of hybrid joints used in the construction on aircraft. IV". Polish Conference POŁĄCZENIA MONTAŻOWE – konstrukcje i technologia. Rzeszów – Polańczyk.
- [6] Rośkowicz M. 2011. "Possibility of repair damaged riveted joint in the aircraft structures". *Biuletyn WAT*, Vol. LX (1).

dr hab. inż. Marek Rośkowicz – Instytut Techniki Lotniczej, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, ul. Witolda Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa, e-mail: marek.roskowicz@wat.edu.pl

mgr inż. Justyna Chudowolska – PZL Mielec, doktorantka ITL WAT, ul. Witolda Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa, e-mail: chudowolska.justyna@gmail.com