

ANALIZA NOŚNOŚCI POŁĄCZEŃ HYBRYDOWYCH, STOSOWANYCH W BUDOWIE STATKÓW POWIETRZNYCH

Analysis of load capacity of hybrid joints used in the construction of aircraft

Marek ROŚKOWICZ, Piotr LESZCZYŃSKI, Justyna CHUDOWOLSKA

Streszczenie: W pracy zaprezentowano rezultaty badań własnych, których celem było porównanie nośności połączeń nakładkowych, stosowanych w budowie płatowców statków powietrznych, wykonywanych z polimerowych materiałów kompozytowych. Elementy były łączone metodą klejenia (połączenia adhezyjne), metodą mechaniczną i hybrydową (adhezyjno-mechaniczną). W badaniach wykorzystano elementy przygotowane na bazie prepregów węglowych techniką autoklawową oraz elementy przygotowane z tkanin węglowych i syciwa MGS L285. Stwierdzono, że nośność połączeń hybrydowych w sposób istotny zależy od geometrii montażu elementów mechanicznych w połączeniu nakładkowym oraz że zastosowanie połączeń mechanicznych z jednej strony obniża nośność połączenia, ale z drugiej strony zabezpiecza konstrukcję przed jej gwałtownym zniszczeniem w przypadku dekohezji połączenia adhezyjnego.

Słowa kluczowe: połączenia klejowe, połączenia hybrydowe, nośność połączeń

Abstract: The paper presents the results of its own studies, which aim was to compare the load capacity of the overlay joints used in the construction of aircraft airframe made of polymer composite materials. The elements were connected by adhesive joints and mechanical and hybrid (adhesive – mechanical) joints. The study used items prepared on the basis of prepreg carbon technology autoclaves and elements prepared from carbon fabric and saturant MGS L285. It has been found that the load capacity of the hybrid connection greatly depends on the mounting geometry of the mechanical elements in cover joint, and that the use of mechanical fasteners with one hand reduces the load capacity of the joints, but on the other hand protects the structure against rapid destruction in the case of the decohesion of the adhesive joints.

Keywords: adhesive joints, hybrid joints, load capacity

Wstęp

Połączenia hybrydowe powstają w wyniku zastosowania kombinacji połączeń mechanicznych (nity, śruby) oraz połączeń adhezyjnych. Tworzenie połączenia hybrydowego przez zastosowanie kombinacji dwóch rodzajów połączeń: adhezyjnego i mechanicznego powoduje, że mogą być eliminowane ograniczenia poszczególnych połączeń składowych oraz wzmacniane ich pozytywne cechy [1, 3, 5]. Sumaryczne właściwości połączeń hybrydowych są nie tylko funkcją właściwości połączeń adhezyjnych, ale istotnie zależą od rodzaju stosowanego połączenia mechanicznego, jego konstrukcji czy warunków realizacji połączenia hybrydowego [2, 4, 6].

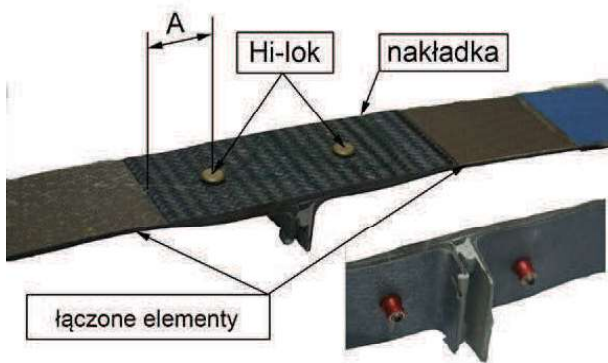
Połączenia hybrydowe mogą być z powodzeniem stosowane w budowie maszyn, które wykonane są z polimerowych materiałów kompozytowych. Ponieważ w ostatnich latach udział materiałów kompozytowych w budowie statków powietrznych jest coraz większy, to również połączenia hybrydowe stanowią interesującą alternatywę dla połączeń adhezyjnych i mechanicznych, stosowanych w przemyśle lotniczym.

Celem przeprowadzonych badań eksperymentalnych było porównanie nośności połączeń adhezyjnych, mechanicznych i hybrydowych w kontekście możliwości łączenia elementów pierwszorzędowych struktury płatowca statku powietrzego, wykonanego z polimerowych materiałów kompozytowych. W połączeniach hybrydowych

dotąd zmieniano geometrię montażu łączników mechanicznych, tworząc w ten sposób dwa warianty połączeń hybrydowych.

Metodyka badań

W badaniach eksperymentalnych wykorzystano dwa rodzaje połączeń nakładkowych. Pierwszy rodzaj połączeń został przygotowany na bazie panelu wyciętego ze struktury płatowca statku powietrzego. Elementy klejone w postaci laminatu o grubości 2,2 mm były wytworzone metodą autoklawową z 7 warstw prepregu węglowego EHKF420C-C20-45, tworzącego rdzeń laminatu i dwóch skrajnych warstw prepregu szklanego EHG250-44-55. Po między skrajną warstwą prepregu szklanego a rdzeniem właminowana została siatka miedziana ABS 5083-01. Nakładka w połączeniu o długości 100 mm została przygotowana z 12 warstw prepregu naprawczego KGBX 2508. Każde kolejne dwie warstwy w nakładce były krótsze o 10 mm – w ten sposób nakładka była symetrycznie stopniowana i miała największą grubość w części środkowej, natomiast najmniejszą na krawędziach. W szczelinę utworzoną między łączonymi elementami został zaaplikowany klej Loctite EA 9394 AERO. Do badań zostały przygotowane próbki o szerokości 40 mm i długości 300 mm. Do przygotowania połączeń hybrydowych wykorzystano system połączeń mechanicznych typu Hi-lok (HL 1012), który jest dedykowany do łączenia

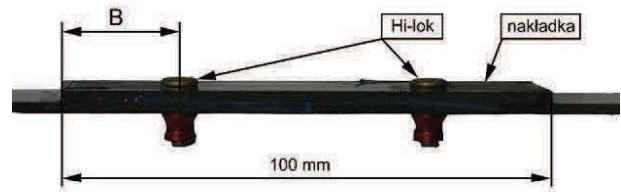


Rys. 1. Widok próbki pierwszej serii przygotowanej do badań, A – zmienna odległość montażu Hi-loców od krawędzi nakładki (A = 25 mm dla wariantu I oraz A = 10 mm dla wariantu II)
 Fig. 1. View first series of sample prepared for testing, A – variable mounting distance of Hi-loks from edge cover (A = 25 mm for I variant and A = 10 mm for II variant)

materiałów kompozytowych. Otwory wiercone pod Hi-loci miały średnicę 4,1 mm. Montaż Hi-loców został przeprowadzony po procesie klejenia. Otwory pod łączniki mechaniczne wykonano w dwóch różnych odległościach od krawędzi nakładki: 25 mm (wariant I) oraz 10 mm (wariant II).

Widok próbki przygotowanej do badań zaprezentowano na rys. 1.

Drugi rodzaj połączeń nakładkowych został przygotowany z laminatu wykonanego techniką „na mokro”. Jako materiał wzmacniający zastosowano tkaninę węglową firmy KDL o gramaturze 200 g/m², która była przesykana syciwem firmy MGS w postaci żywicy L 285 i utwardzaczem H 285. Laminat był wytwarzany pod naciskiem ok. 4 N/cm² w temperaturze pokojowej przez 24 godz. Po tym czasie laminat był dodatkowo wygrzewany w komorze pieca w temperaturze 80°C przez 15 godz. Ze względu na dobre właściwości adhezyjne w łączeniu materiałów kompozytowych do wykonania połączeń nakładkowych zastosowano klej epoksydowy Epidian 57/Z1 (10:1)



Rys. 2. Widok próbki drugiej serii przygotowanej do badań, B – zmienna odległość montażu Hi-loców od krawędzi nakładki (B = 25 mm dla wariantu I oraz B = 8 mm dla wariantu II)
 Fig. 2. View second series of sample prepared for testing, B – variable mounting distance of Hi-loks from edge cover (B = 25 mm for I variant and B = 8 mm for II variant)

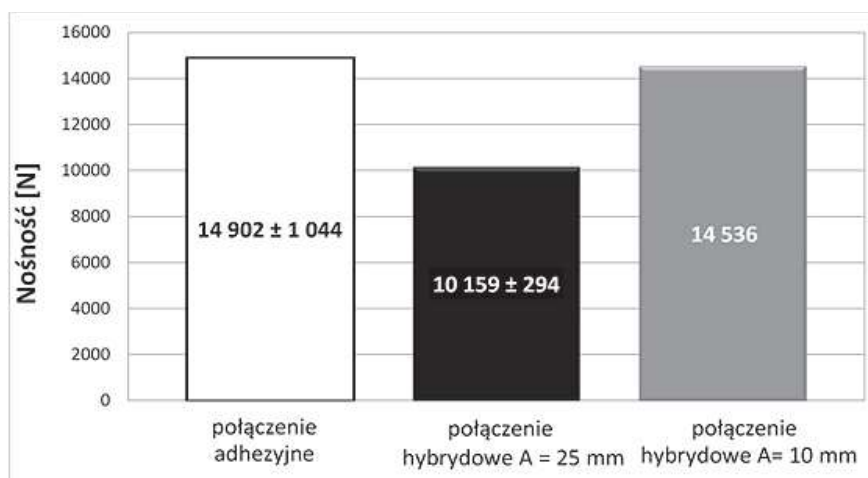
utwardzany przez 24 godz. w temperaturze 20°C, a następnie dotwardzany przez 6 godz. w temperaturze 80°C. Grubość spoiny klejowej wynosiła ok. 0,1 mm. Łączono elementy kompozytowe o wymiarach 135×25×2,35 mm z wykorzystaniem nakładki o długości 100 mm. Podobnie jak dla poprzedniego rodzaju próbek do wykonania połączeń mechanicznych wykorzystano system typu Hi-lok.

Elementy mocujące systemu Hi-lok zostały rozmieszczone również w dwóch wariantach geometrycznych, tzn. w odległości 25 mm od krawędzi nakładki (wariant I) oraz 8 mm od krawędzi (wariant II). Widok próbki drugiego rodzaju przygotowanej do badań zaprezentowano na rys. 2.

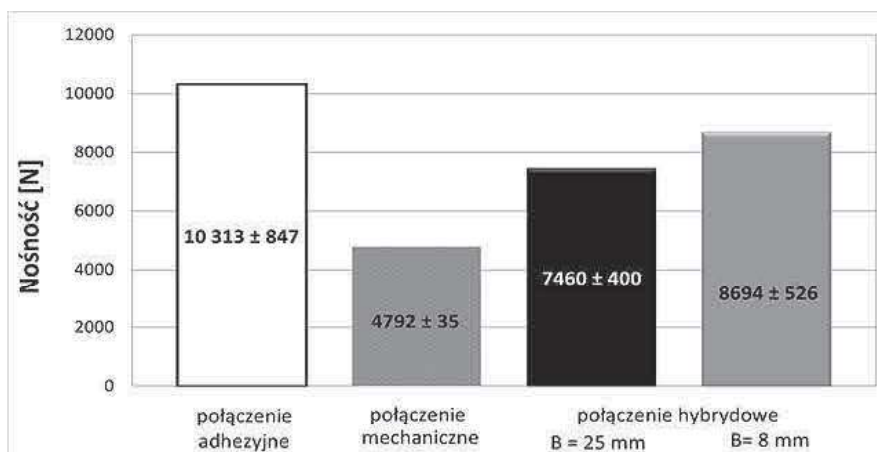
Przygotowane do badań próbki połączeń poddano badaniom nośności w temperaturze pokojowej za pomocą uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej firmy Hung-Ta, o numerze katalogowym HT-2402.

Wyniki badań

Wyniki uzyskane w badaniach eksperymentalnych wskazują, że zmodyfikowanie połączeń adhezyjnych za pomocą łączników mechanicznych (Hi-loców) powoduje spadek nośności połączenia (rys. 3). Poziom zmian nośności tak przygotowanych połączeń hybrydowych



Rys. 3. Porównanie nośności połączeń adhezyjnych i hybrydowych (dla dwóch wariantów wielkości A)
 Fig. 3. Comparison of load capacity in adhesive and hybrid joints (for two variants size A)



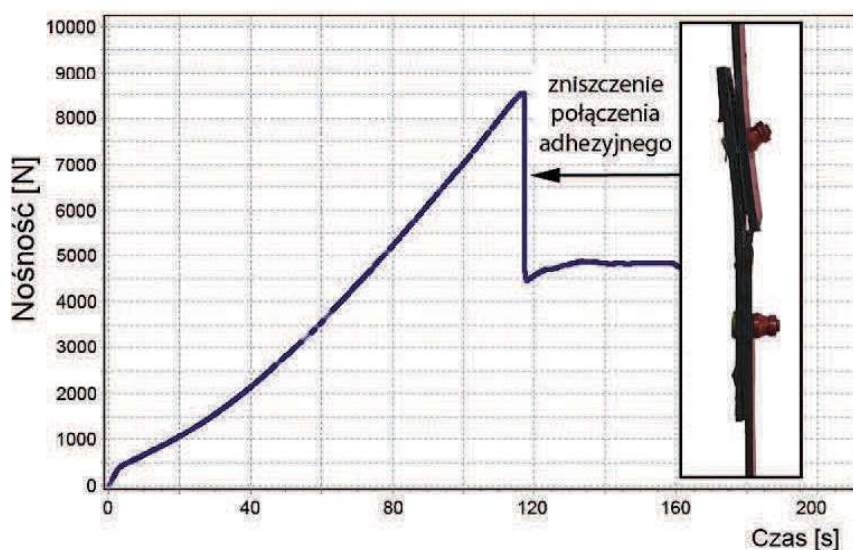
Rys. 4. Porównanie nośności połączeń adhezyjnych, mechanicznych i hybrydowych (dla dwóch wariantów wielkości B)
 Fig. 4. Comparison of load capacity in the adhesive, mechanical and hybrid joints (for two variants size B)

istotnie zależał od sposobu montażu Hi-loków. Z dwóch przebadanych wariantów połączeń hybrydowych większa nośność cechowała połączenia z łącznikami montowanymi bliżej krawędzi nakładki (wariant II). Wartość przenieszonego obciążenia przez próbki w wariacie I była mniejsza aż o ok. 32% w odniesieniu do połączeń adhezyjnych, natomiast w wariacie II była porównywalna do wartości siły niszczonej połączenia adhezyjne. Należy jednak zaznaczyć, że zniszczenie próbek w wariacie II polegało nie na zniszczeniu połączenia, lecz na zniszczeniu materiału elementu łączonego w przekroju krytycznym (tzn. osłabionym otworem wykonanym pod montaż Hi-loka).

Wydaje się, że większa nośność połączeń hybrydowych z elementami montowanymi bliżej krawędzi nakładki wynika z istotnego zredukowania występujących

w spoinie klejowej negatywnych naprężeń prostopadłych do powierzchni warstwy adhezyjnej, powodujących zjawisko oddzierania nakładki od spajanych elementów.

Podobną prawidłowość, związaną ze spadkiem nośności połączeń po montażu łączników mechanicznych, obserwowano również w badaniach drugiego rodzaju połączeń (rys. 4). Zmniejszenie nośności jest naturalną konsekwencją zmniejszenia powierzchni spoiny klejowej po wykonaniu otworów pod łączniki mechaniczne, a zakres zmian, podobnie jak w pierwszym przypadku, zależał od położenia Hi-loka w odniesieniu do końca nakładki. Połączenia hybrydowe z łącznikami bliżej krawędzi nakładki charakteryzowała większa nośność. Badając połączenia hybrydowe nie otrzymano wartości obciążeń zbliżonych do nośności połączeń adhezyjnych, jak miało to miejsce w badaniu pierwszej serii próbek. Prawdopodobnie



Rys. 5. Zmiana nośności połączenia hybrydowego w procesie jego niszczenia
 Fig. 5. Changing of the load capacity of the hybrid joints in its destruction

było to spowodowane brakiem schodkowania nakładek, a przez to większym poziomem naprężeń powodujących oddzieranie nakładki.

Najmniejsza nośność cechowała połączenia mechaniczne – nośność tych połączeń była ok. dwa razy mniejsza od nośności połączeń adhezyjnych. W przeciwieństwie do łączenia materiałów metalowych – zniszczenie połączeń mechanicznych, w których łączone są materiały kompozytowe nie polegało na ścinaniu łączników, ale na „wbijaniu się” ich w mniej twardy materiał kompozytowy. Dzięki temu proces degradacji połączenia był wydłużony w czasie, co jest istotne z punktu widzenia eksploatacji struktur lotniczych, w tym również diagnozowania ich połączeń.

W przypadku połączeń adhezyjno-mechanicznych, po zniszczeniu składowego połączenia adhezyjnego, nośność połączenia hybrydowego gwałtownie spadała do wartości charakteryzującej połączenia mechaniczne (rys. 5). Połączenie jednak nie ulegało całkowitemu zniszczeniu, a proces jego dalszej degradacji przebiegał podobnie jak w połączeniach mechanicznych.

Wnioski

Na podstawie wykonanych badań eksperymentalnych stwierdzono, że:

- połączenia hybrydowe stosowane do łączenia polimerowych materiałów kompozytowych cechuje niższa nośność w porównaniu do nośności połączeń adhezyjnych i wyższa w odniesieniu do połączeń mechanicznych,
- nośność nakładkowych połączeń hybrydowych jest istotnie zależna od geometrii montażu łączników mechanicznych – łączniki umieszczone bliżej krawędzi nakładki powodują wyższą nośność połączenia, co może być spowodowane istotnym ograniczeniem zjawiska oddzierania nakładki na jej końcach,
- wadą połączeń hybrydowych jest konieczność wykonywania w elementach otworów pod łączniki (co

osłabia węzeł konstrukcyjny), natomiast zaletą jest bardziej przewidywalna nośność połączenia w porównaniu do połączeń adhezyjnych (których właściwości wytrzymałościowe istotnie zmieniają się w wyniku procesów starzeniowych i reologicznych) oraz bardziej bezpieczny proces jego eksploatacji – połączenie nie „traci” całkowicie nośności po zniszczeniu składowego połączenia adhezyjnego.

LITERATURA

- [1] Adams R.D., W.C. Wake. 1986. “Structural adhesive joints in engineering”. London/New York: *Publishers*.
- [2] Darwish S.M., A. Al-Samhan. 2004. “Design rationale of weld-bonded joints”. *International Journal Adhesion Adhesives* (24): 367–77.
- [3] Irning B. 1994. “Applications widen for structural adhesives in metal to metal bonding”. *Welding Journal*.
- [4] Maofeng Fu., P.K. Mallick. 2001. “Fatigue of hybrid (adhesive/bolted) joints in SRIM composites”. *International Journal Adhesion Adhesives* (21): 145–159.
- [5] Pocius A.V. 1997. “Adhesion and adhesives technology”. New York: Hanser.
- [6] Rośkiewicz M., M. Rożek. 2012. “Fatigue life of hybrid joints”. X. International Conference New trends in aviation development, Košice, ISBN: 978-80-553-1083-1, Electronic proceeding.

Dr hab. inż. Marek Rośkiewicz – Instytut Techniki Lotniczej Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: marek.roskiewicz@wat.edu.pl

Dr inż. Piotr Leszczyński – Instytut Techniki Lotniczej Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: piotr.leszczyński@wat.edu.pl

Mgr inż. Justyna Chudowolska – PZL Mielec, doktorantka ITL WAT, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: chudowolska.justyna@gmail.com