

POŁĄCZENIA KLEJONE W STRUKTURACH KOMPOZYTOWYCH – METODYKA BADAŃ

MACIEJ KARNY

Centrum Technologii Kompozytowych, Instytut Lotnictwa, Al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa
maciej.karny@ilot.edu.pl

Streszczenie

Artykuł opisuje najpopularniejsze metody badań wytrzymałości kleju na odrywanie, wytrzymałości na ścinanie i modułu ścinania kleju, a także podstawowe badania połączeń stosowanych w kompozytach przekładkowych. Niektórych z przedstawionych metod użyto do przeprowadzenia badań klejów błonkowych: wytrzymałości na oddzieranie połączenia metal – kompozyt przekładkowy z wykorzystaniem kleju Scotch-Weld AF 163-2K Film oraz prób rozciągania kompozytu przekładkowego w różnych temperaturach, wykorzystującego połączenie rdzeń – okładka za pomocą kleju AF 134-2K. W przypadku badania wytrzymałości połączenia na oddzieranie, stwierdzono, że miejsce wstępnego utwardzenia kleju błonkowego podczas tworzenia spoiny nie ma znaczącego wpływu na jej wytrzymałość. Próby rozciągania kleju AF 134-2K wykazały, że jego właściwości nie ulegają zmianom wraz z obniżeniem temperatury badania do -55°C . W przypadku badań próbek wilgotnych w podwyższonej temperaturze, odnotowano spadek wytrzymałości spoiny o 33%, połączony ze wzrostem jej elastyczności i utratą adhezji połączenia kleju błonkowego z rdzeniem kompozytu przekładkowego.

Słowa kluczowe: połączenia klejone, kompozyty, klej błonkowy, wytrzymałość na rozciąganie

1. KLEJENIE STRUKTUR KOMPOZYTOWYCH

Następujący w ostatnich latach intensywny rozwój konstrukcji lotniczych wiąże się nierozdzielnie z upowszechnieniem (zwłaszcza w przypadku lotnictwa cywilnego) stosowania kompozytów jako podstawowych materiałów konstrukcyjnych. Dzięki swojej bardzo wysokiej wytrzymałości, połączonej z bardzo niską masą i możliwością precyzyjnego kształtowania właściwości, kompozyty wykonane z użyciem włókna węglowego (CFRP, *Carbon Fiber Reinforced Plastics*), coraz częściej wypierają dotychczas stosowane materiały, takie jak stopy aluminium. Te zalety w dużym stopniu rekompensują wysoki koszt wytwarzania kompozytów węglowych. Stosowanie kompozytów CFRP wiąże się jednak z trudnością z ich łączeniem z innymi materiałami, głównie metalami, jak i też innymi kompozytami.

Technologie stosowane do łączenia metali, takie jak spawanie czy zgrzewanie, nie mogą być zastosowane w przypadku kompozytów. Spośród metod łączenia materiałów, możliwe tutaj do zastosowania są jedynie dwa rodzaje połączeń: połączenia mechaniczne, np. nitowe lub sworzniowe oraz połączenia adhezyjne, zwane popularnie klejonymi. Połączenia mechaniczne są znacznie prostsze technologicznie, mogą być łatwo zastosowane w konstrukcjach o zmiennym kształcie, oraz

(oprócz połączeń nitowych), możliwy jest ich łatwy demontaż w celu napraw lub inspekcji konstrukcji. Z drugiej strony połączenia za pomocą, np. sworzni zwiększają masę konstrukcji, a przede wszystkim powodują utratę ciągłości kompozytu (wiercenie otworów pod sworznie powoduje zmniejszenie liczby ciągłych włókien, mogących efektywnie przenosić obciążenia), a także prowadzą do powstania lokalnych koncentracji naprężenia w kompozycie. Takie koncentracje zmniejszają doraźną wytrzymałość materiału (nawet o ponad 50% względem materiału litego) i są bardzo niebezpieczne w przypadku konstrukcji obciążanych cyklicznie, często są też zalążkami pęknięć zmęczeniowych materiału kompozytowego [1, 2].

Alternatywą dla połączeń mechanicznych są metody łączenia kompozytów za pomocą klejów. Połączenia adhezyjne również mają wady: są nierozdzielne (niemożliwe do rozmontowania bez niszczenia konstrukcji), wymagają bardzo dobrego pasowania elementów oraz przygotowania ich powierzchni (szlifowania lub aktywacji chemicznej), a ich właściwości ulegają zmianie wraz z temperaturą i wilgotnością środowiska. Pomimo tych wad, dzięki połączeniu niskiej masy, braku koncentracji naprężenia i ograniczeniu ingerencji w strukturę laminatu, połączenia adhezyjne stale powiększają obszary swoich zastosowań w konstrukcjach lotniczych. Innymi zaletami połączeń klejonych, szczególnie przydatnymi dla branży lotniczej, a biorącymi się z relatywnie dużej (w porównaniu z połączeniami mechanicznymi) elastyczności jest wysoka wytrzymałość zmęczeniowa oraz odporność takich połączeń na uderzenia [2, 3].

2. METODY BADANIA POŁĄCZEŃ KLEJONYCH

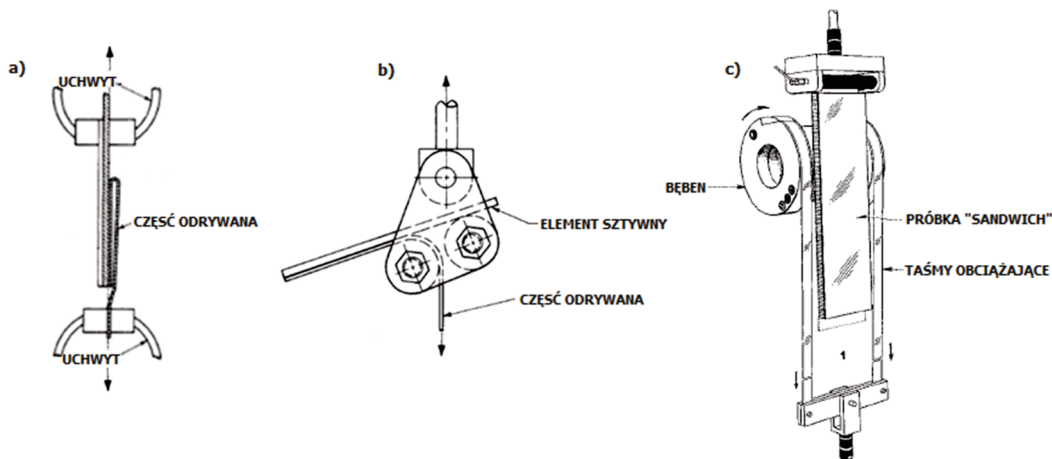
Zastosowanie połączeń adhezyjnych w konstrukcjach lotniczych było w pełni możliwe dzięki opracowaniu metodyki badań jakości tych połączeń, opartej głównie na badaniach wytrzymałościowych. Opracowano wiele metod, pozwalających na badanie połączeń klejonych w warunkach typowych dla ich pracy – obecności naprężenia ścinającego, rozciągającego i odrywającego, a także warunkach pęknięcia samego kleju. Rozwój technologii kompozytowych i opracowanie kompozytów przekładkowych, zwanych potocznie sandwich, wymagało opracowania oddzielnych testów, dedykowanych wyłącznie tym materiałom.

2.1. Metody badania wytrzymałości kleju na oddzieranie

Wszystkie metody badania wytrzymałości kleju na oddzieranie (*Peel tests*) polegają na wytworzeniu sytuacji, w której jeden ze sklejonych elementów będzie oddzierany od drugiego, co spowoduje powstanie naprężenia rozciągającego klej. Testy te obejmują zarówno odrywanie od siebie dwóch elementów sztywnych (przykładowo oddzieranie okładek od rdzenia w kompozycie przekładkowym w metodzie *Climbing Drum Test*, (Rys. 1c), jak i też (znacznie częściej) oddzieranie komponentu elastycznego (gumy, polimeru, blachy) od sztywnego podłoża, np. materiału kompozytowego.

Podstawowymi metodami badań wytrzymałości kleju na oddzieranie są testy jego bezpośredniego odrywania od podłoża pod kątem 90° (metoda ASTM D6862) lub 180° (metody ASTM D903 i D3330), przedstawiona na rysunku 1a. Zaletą tych metod jest ich prostota i wszechstronność, pozwalająca na testowanie wielu rodzajów klejów w różnych konfiguracjach materiał podłoża – materiał odrywany. Z drugiej strony jednak, wspomniana wszechstronność jest tutaj również wadą. Możliwe różnice w konfiguracji testu i materiałów oraz różnice w procesie klejenia (przygotowania powierzchni, aplikacji i utwardzania kleju, itd.) sprawiają, iż wyniki tych badań nie są wynikami „bezwzględnyymi” dla danego typu kleju i mogą być rozpatrywane głównie jako dane do porównań właściwości w obrębie jednej partii materiału lub konstrukcji, rodzaju procesu, etc. [4, 5]

Podobnymi badaniami są próby oddzierania kleju z użyciem wspinającego się bębna (*Climbing Drum Peel Test*, ASTM D1781) lub unoszących się wałeczków (*Floating Roller Peel Test*, ASTM D3167), przedstawione na rysunku 1. Obydwie te metody powodują oddzieranie kleju poprzez nawijanie/zaginanie jednego ze sklejonych ze sobą elementów. Mimo, iż podobne do metod odrywania kleju pod kątem $90^\circ/180^\circ$, metody te są bardziej użyteczne do odrywania elementów półsztywnych (blach, okładek kompozytów przekładkowych), które stawałyby za duży opór podczas prostego odrywania, zwłaszcza pod kątem 180° . Głównym ograniczeniem metod *Climbing Drum* i *Floating Roller Peel*, tak samo, jak w przypadku metod odrywania kleju pod kątem 90° i 180° , jest porównawczy charakter tych testów i duża wrażliwość na zmiany wielu czynników obecnych w procesie produkcji spoiny [6, 7].



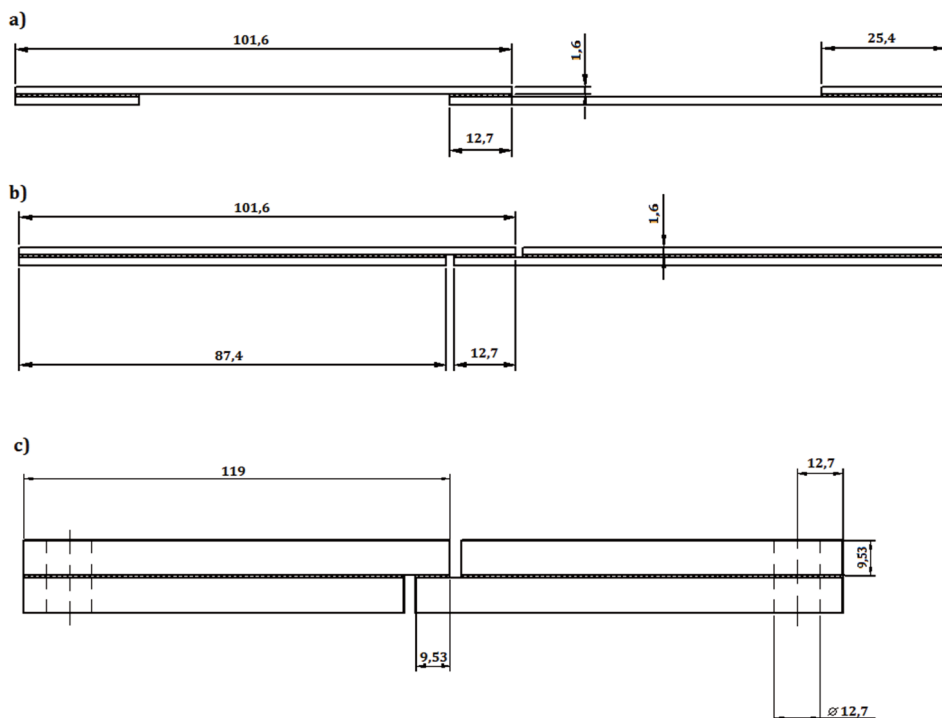
Rys. 1. Schematyczne przedstawienie metod odrywania kleju: a) odrywanie pod kątem 180° (ASTM D903); b) *floating roller peel test* (ASTM D3167); c) *climbing drum peel test* (ASTM D1781) [5, 6, 7]

2.2. Metody badania wytrzymałości kleju na ścinanie

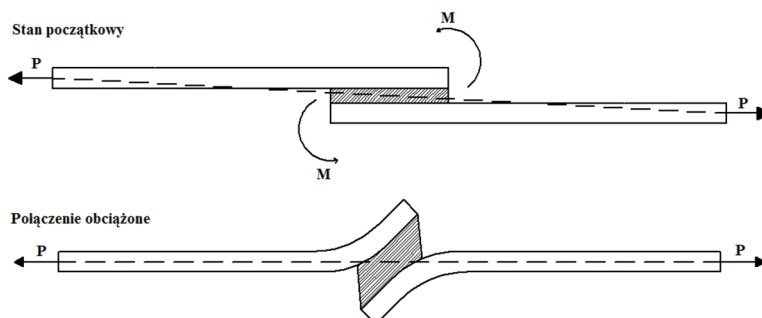
Wytrzymałość kleju na ścinanie i powiązany z nią moduł ścinania (zwany również modułem sprężystości postaciowej, G) są zazwyczaj traktowane jako główne właściwości wytrzymałościowe kleju. Związane jest to z tym, iż to właśnie ścinanie jest najczęściej występującym rodzajem obciążenia połączenia adhezyjnego. Badania tych właściwości sprowadzają się najczęściej do testów wytrzymałości połączeń zakładkowych, w których to dwa skleione ze sobą płaskie elementy są rozciągane w płaszczyźnie kleju. Połączenie proste zakładkowe *Single lap joint* (wszystkie próbki na rysunku 2) ma pewne wady. Przykładowo częstą obecność znaczącego naprężenia rozciągającego na kierunku prostopadłym do płaszczyzny spoiny podczas rozciągania, niemniej jednak, dzięki swojej prostocie i łatwości przygotowania, jest połączeniem najczęściej stosowanym w zastosowaniach technicznych [7]. Oprócz kształtu i typu połączenia, na jego pracę bardzo duży wpływ ma grubość warstwy kleju. Wytrzymałość kleju na ścinanie w większości przypadków maleje wraz ze wzrostem grubości jego warstwy. Spowodowane jest głównie zmianą stanu naprężenia w spoinie i zwiększeniu wielkości występujących tam koncentracji naprężenia oraz ekscentryczności obciążenia [8, 9].

Najpopularniejszą metodą badania wytrzymałości kleju na ścinanie jest metoda ASTM D1002 i jej pochodna D3165, przedstawione na rysunku 2a i 2b. Główną różnicą między tymi metodami jest obecność dłuższych okładek w próbce do metody D3165, których celem jest stabilizacja i usztywnienie próbki. Próbki są umieszczane w uchwytach maszyny wytrzymałościowej i rozciągane w płaszczyźnie spoiny. W idealnej sytuacji powoduje to powstanie w spoinie czystego naprężenia

ścinającego, w praktyce jednak ekscentryczność osi obciążenia (Rys. 3) prowadzi do powstania momentu zginającego na krańcach spoiny, powodującego naprężenia rozciągające na kierunku poprzecznym do płaszczyzny spoiny. Z tego powodu stan naprężenia w spoinie nie jest jednorodny i jest połączeniem ścinania w płaszczyźnie spoiny i oddzierania w płaszczyźnie do niej prostopadłej. Obecność zginania powoduje otrzymanie zaniżonych wartości wytrzymałości na ścinanie kleju. Z badań przeprowadzonych przez autorów raportu [10] wynika, iż wartości wytrzymałości klejów na ścinanie, testowanych metodą D3165 były niższe o ok. 30÷60%, niż wartości otrzymywane w badaniach metodą D5656. Takie różnice powodują, iż metody D1002 i D3165 używane są głównie jako badania porównawcze, np. podczas modyfikowania procesu tworzenia spoiny [11÷13].



Rys. 2. Porównanie kształtu próbek do badań wytrzymałości kleju na ścinanie metodami: a) D1002, b) D3165 i c) D5656 (TAST) [Opracowanie własne, na podstawie 11÷13]



Rys. 3. Zginanie połączenia typu *single lap joint* podczas jego rozciągania [opracowanie własne]

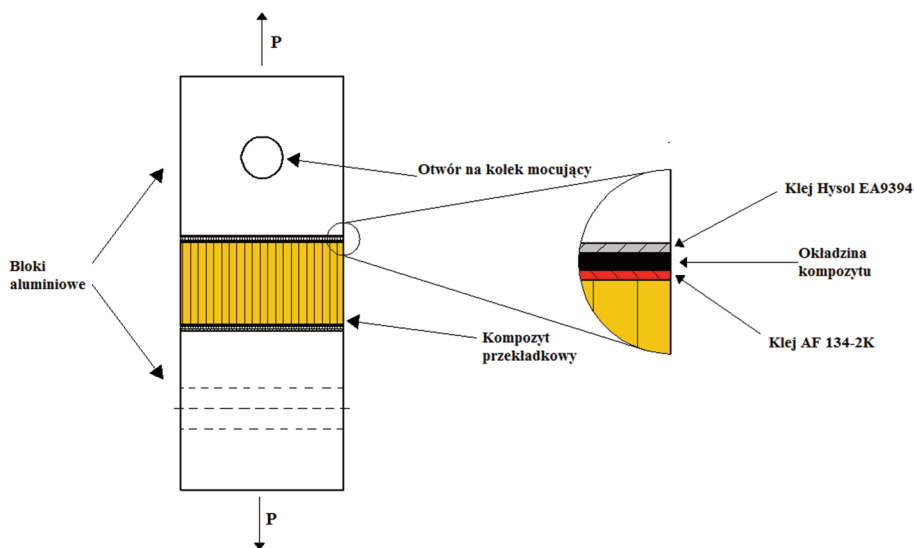
W celu otrzymania testu pozwalającego na porównywanie między sobą różnych klejów, opracowano próbę ścinania połączeń grubych elementów (*Thick Adherend Shear Test*, TAST, ASTM D5656). W tej metodzie używa się próbek podobnych to metody D3165, mających jednak znacznie większą grubość (Rys. 2c). Zwiększenie grubości płyt aluminiowych pozwoliło na znaczne usztywnienie próbki i zredukowanie zjawiska zginania połączenia podczas rozciągania. Analogicznie jak w metodach D1002 i D3165, próbka połączona klejem jest tutaj rozciągana w płaszczyźnie kleju. Ponieważ ekstensometry mierzące odkształcenie spoiny są umiejscowione stale (dzięki unieruchomieniu końcówek ich nóżek w wyfrezowanych w próbce otworach), pomiar odkształcenia jest niezależny od potencjalnego zginania środkowej jej części. Pozwala to na uzyskanie wartości czystego odkształcenia ścinającego, co umożliwi poprawne wyznaczenie modułu ścinania kleju. Głównymi wadami tej metody są przede wszystkim konieczność używania specjalnego ekstensometru, a także duża grubość blachy zużywanej do produkcji próbek, co podnosi koszt badania. Pomimo tego, metoda D5656 jest obecnie najważniejszą metodą pozwalającą na obliczanie modułu sztywności i wytrzymałości na ścinanie kleju. Jest też główną metodą używaną do porównywania między sobą właściwości klejów o różnej postaci, składzie chemicznym, procesie technologicznym, etc [10].

2.3. Badania klejonych kompozytów przekładkowych

Ponieważ wszystkie elementy kompozytu przekładkowego (*sandwich*) są ze sobą połączone za pomocą klejów, badanie ich właściwości odgrywa w tym przypadku kluczową rolę. Oprócz badań standardowo stosowanych do opisu klejów, w przypadku struktur przekładkowych stosuje się badania specjalnie do nich desygnowane. Przykładem takiego testu może być rozciąganie próbki *sandwich* w kierunku normalnym do płaszczyzny jego okładek, zwane w skrócie badaniem FWT (*Flatwise Tension Test*, ASTM C297), [14]. Schemat takiego badania przedstawia rysunek 4. Kompozyt przekładkowy jest tutaj rozciągany w kierunku prostopadłym do jego płaszczyzny. W tym celu, próbka jest szlifowana i przyklejana do aluminiowych bloków, które są umieszczane w uchwytach maszyny wytrzymałościowej. Skuteczne przeprowadzenie tego badania wymaga maksymalnej adhezji pomiędzy okładziną kompozytu i blokami, dlatego też przygotowanie obydwu powierzchni do klejenia jest decydujące. Wysoką adhezję osiąga się poprzez szlifowanie lub piaskowanie obydwu powierzchni, a w przypadku powierzchni aluminiowych bloków, często też przez podtrawianie chemiczne, np. kwasem fosforowym. Badanie *Flatwise Tension* ma na celu określenie wytrzymałości na rozciąganie struktury przekładkowej, jak i też ewentualnego sposobu jej zniszczenia i jakości połączenia klejonego okładek i rdzenia. Z punktu widzenia połączenia adhezyjnego, najbardziej pożądanym typem zniszczenia w badaniu FWT jest zniszczenie samego rdzenia próbki *sandwich* – świadczy ono o wysokiej wytrzymałości kleju i dobrej jakości procesu produkcji materiału. Analogicznie, najmniej pożądanym jest zniszczenie kleju, zarówno typu adhezyjnego (oderwanie całej warstwy kleju od podłoża), jak i kohezyjnego (wewnętrzna utrata ciągłości warstwy kleju) [15]. Badanie *Flatwise Tension* jest również wykorzystywane do badania wytrzymałości na rozciąganie i adhezji samego kleju. W takim przypadku, bloki aluminiowe są łączone za pomocą badanego kleju bezpośrednio ze sobą i rozciągane.

Innym z najważniejszych badań struktur przekładkowych jest próba ścinania połączenia okładka – rdzeń w płaszczyźnie tego połączenia. Próba ta przypomina próby ścinania samego kleju, opisane w punkcie 2.2. W tym badaniu, odpowiednikiem kleju jest rdzeń kompozytu przekładkowego, a odpowiednikami aluminiowych części próbki – okładziny tego kompozytu. Tak samo, jak w badaniach kleju, celem tej metody jest wytworzenie w rdzeniu kompozytu stanu jak najbliższego czystemu ścinaniu w płaszczyźnie tego kompozytu. Analogicznie, trudnością w tego typu testach jest ekscentryczność obciążenia (oś siły nie pokrywa się z płaszczyzną warstwy kleju). Aby temu

zapobiec, stosuje się często metalowe uchwyty, przymocowywane do kompozytu, jak i również uchwyty maszyny umieszczone na przegubach, zapewniające możliwość przechylania się próbki podczas testu. Pomimo tych problemów, określenie zachowanie się połączenia okładka – rdzeń podczas ścinania jest jednym z podstawowych badań dla tego typu materiałów [15]. Ścinanie jest głównym rodzajem obciążeń, jakiemu poddawane są połączenia klejone w kompozytach przekładkowych, zwłaszcza w warunkach zginania całego kompozytu typu *sandwich*. Procesy ścinania połączenia okładka-rdzeń obserwuje się również podczas prób zginania kompozytu przekładkowego.



Rys. 4. Schemat próbki i badania *Flatwise Tension*, oznaczenia klejów odpowiadają badaniom przeprowadzonym w ramach tej publikacji [opracowanie własne]

3. METODYKA BADAŃ

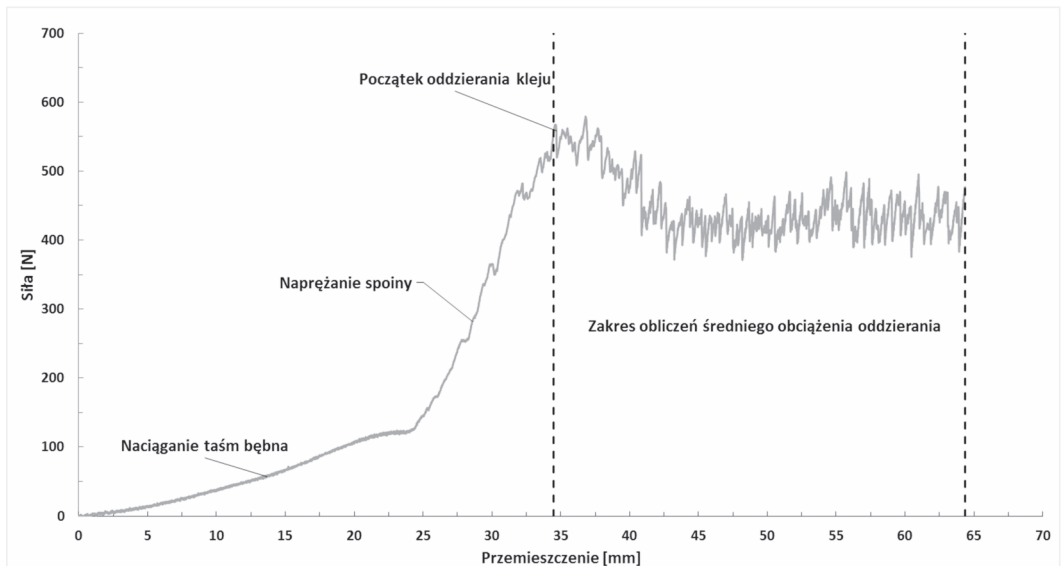
W ramach pracy przeprowadzono badania: wytrzymałości kleju na odrywanie metodą *Climbing Drum* oraz wytrzymałości kompozytu przekładkowego typu *sandwich* na rozciąganie metodą *Flatwise Tension Test*.

3.1. Badania metodą *Climbing Drum*

Badaniom poddano 6 połączeń typu blacha ze stali nierdzewnej o grubości 0,3 mm – kompozyt przekładkowy (*sandwich*). W skład struktury kompozytu przekładkowego wchodziły okładki z kompozytu węglowo-epoksydowego, zbrojonego tkaniną węglową o konfiguracji [0/90], przedzielone rdzeniem typu Herex o grubości 3 mm. Użyty klej to klej błonkowy Scotch-Weld AF 163-2K Film o grubości 0,24 mm. Wymiary spoiny to 25x150 mm. Próbkę użyte do badań różniły się między sobą procesem konsolidacji kleju. W tym przypadku konsolidacja oznacza ułożenie kleju na jednym z substratów i wstępne jego utwardzenie poprzez docisk i odparowanie części rozpuszczalnika. W próbkach L-PK.1-CD-RTA-01 do 03 klej został skonsolidowany na blasze, z kolei w próbkach L-PK.1-CD-RTA 04 do 06 konsolidacja kleju miała miejsce na powierzchni kompozytu. Prędkość oddzierania kleju wynosiła 150 mm/min. Moment oddzierania kleju został obliczony według wzoru:

$$\bar{T} = \left[(r_o - r_i)(F_p - F_o) \right] / (W \times 1000) \quad (1)$$

gdzie: \bar{T} – średni moment oddzierający klej na milimetr szerokości spoiny, [Nm/mm], r_o – promień kołnierza, zawierający połowę grubości taśmy prowadzącej [mm], r_i – promień bębna oraz połowa grubości nawiniętej próbki z klejem [mm], F_p – średnia siła potrzebna do nawinięcia próbki odrywanej z klejem wraz z siłą potrzebną do przewyciężenia oporu ruchu bębna [N], F_o – siła potrzebna do przewyciężenia oporu ruchu bębna [N], W – szerokość spoiny [mm]. Siłę przewyciężenia opory ruchu bębna wyznaczono w oddzielnej próbie rozciągania i wynosiła ona 93,33 N. Zasadę wyboru wartości obciążenia do obliczeń momentu oddzierającego klej przedstawia rysunek 5. Do obliczeń średniego obciążenia oddzierającego wykorzystywano wartości obciążenia następujące po pierwszym wyraźnym spadku siły rozciągającej próbkę.



Rys. 5. Wykres rozciągania próbki metodą *Climbing Drum* z zaznaczonym obszarem wartości, użytych w obliczeniach obciążenia [opracowanie własne]

3.2. Badania metodą *Flatwise Tension Test*

Badaniom poddano 3 serie próbek kompozytu sandwich, składającego się z okładek z kompozytu węglowo-epoksydowego (o oznaczeniu MTM-46 TWILL 2x2), przedzielonych rdzeniem typu Cormaster C1-3,2-48 o grubości 25,4 mm. Do połączenia okładek z rdzeniem użyto kleju błonkowego AF 134-2K. Próbki o wymiarach 50x50 mm zostały przyklejone do bloków ze stopu aluminium (używanych do montowania próbek w maszynie wytrzymałościowej) za pomocą kleju Hysol EA 9394. Poszczególne serie próbek różniły się między sobą warunkami przeprowadzenia badania: próbki oznaczone „CTD” były badane w -55°C , „RTA” w temperaturze pokojowej, a „ETW” w temperaturze 80°C po uprzednim klimatyzowaniu w środowisku o wilgotności 85% i temperaturze 71°C przez okres 102 dni. Prędkość rozciągania wynosiła 0,25 mm/min. Wytrzymałość kompozytu sandwich na rozciąganie została obliczona ze wzoru:

$$F_z^{ftu} = \frac{P_{\max}}{A} \quad (2)$$

gdzie: F_z^{ftu} – wytrzymałość kompozytu przekładkowego na rozciąganie, MPa; P_{\max} – maksymalne obciążenie podczas testu, N; A – pole przekroju próbki, mm².

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. Badania metodą *Climbing Drum*

Tab. 1. Wyniki badań metodą D1781 – odrywanie kleju konsolidowanego na blasze [opracowanie własne]

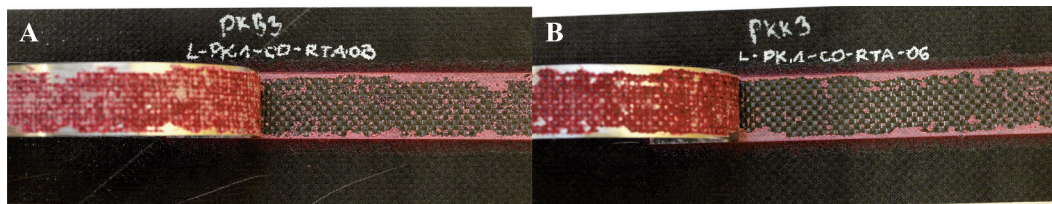
Oznaczenie próbki	Szerokość spoiny	Grubość blachy aluminiowej wraz z oderwanym klejem	Średnie obciążenie odrywania kleju	Maksymalne obciążenie odrywania	Minimalne obciążenie odrywania	Moment odrywania kleju na mm szerokości spoiny	Sposób zniszczenia
	W [mm]	t [mm]	F _a [N]	F _{max} [N]	F _{min} [N]	T [Nm/mm]	
L-PK.1-CD-RTA-01	24,97	0,70	454,64	579,39	371,22	0,177	Stabsza adhezja do kompozytu
L-PK.1-CD-RTA-02	24,90	0,71	439,76	520,79	357,78	0,169	Stabsza adhezja do kompozytu
L-PK.1-CD-RTA-03	24,92	0,68	486,58	576,10	359,39	0,193	Stabsza adhezja do kompozytu
Średnia	24,93	0,70	460,33	558,76	362,80	0,180	
Odch. Standardowe	0,04	0,02	23,92	32,93	7,34	0,012	
Współczynnik zmienności	0,14%	2,19%	5,20%	5,89%	2,02%	6,80%	

Tab. 2. Wyniki badań metodą D1781 – odrywanie kleju konsolidowanego na kompozycie [opracowanie własne]

Oznaczenie próbki	Szerokość spoiny	Grubość blachy aluminiowej wraz z oderwanym klejem	Średnie obciążenie odrywania kleju	Maksymalne obciążenie odrywania	Minimalne obciążenie odrywania	Moment odrywania kleju na mm szerokości spoiny	Sposób zniszczenia
	W [mm]	t [mm]	F _p [N]	F _{max} [N]	F _{min} [N]	T [Nm/mm]	
L-PK.1-CD-RTA-04	24,89	0,66	489,39	559,30	370,33	0,194	Stabsza adhezja do kompozytu
L-PK.1-CD-RTA-05	24,84	0,64	462,13	531,05	389,25	0,182	Stabsza adhezja do kompozytu
L-PK.1-CD-RTA-06	24,88	0,68	446,22	505,83	366,16	0,173	Stabsza adhezja do kompozytu
Średnia	24,87	0,66	465,91	532,06	375,25	0,183	
Odch. Standardowe	0,03	0,02	21,83	26,75	12,30	0,010	
Współczynnik zmienności	0,11%	3,03%	4,69%	5,03%	3,28%	5,73%	

Tabele 1 i 2 przedstawiają wyniki prób odrywania kleju błonkowego, wstępnie utwardzanego na 2 różne sposoby, za pomocą metody *Climbing Drum*. Jak wynika z tabel 1 i 2, metoda konsolidowania kleju AF 163-2K Film nie ma znaczącego wpływu na wytrzymałość połączenia blacha stalowa – okładka kompozytu sandwich. Średnie obciążenie odrywania kleju dla wszystkich próbek wynosiło 440÷490 N, przy średnim obciążeniu 460 N dla próbek z klejem utwardzanym na blasze i 466 N dla próbek z klejem utwardzanym na kompozycie. Analogicznie, średni moment odrywania kleju na milimetr szerokości spoiny był bardzo zbliżony dla obydwu serii i wyniósł 0,18 Nm/mm dla próbek z klejem utwardzanym na blasze i 0,183 Nm/mm dla próbek z klejem utwardzanym na kompozycie. Wszystkie próbki wykazały taki sam sposób zniszczenia, gdzie przy odrywaniu większość kleju

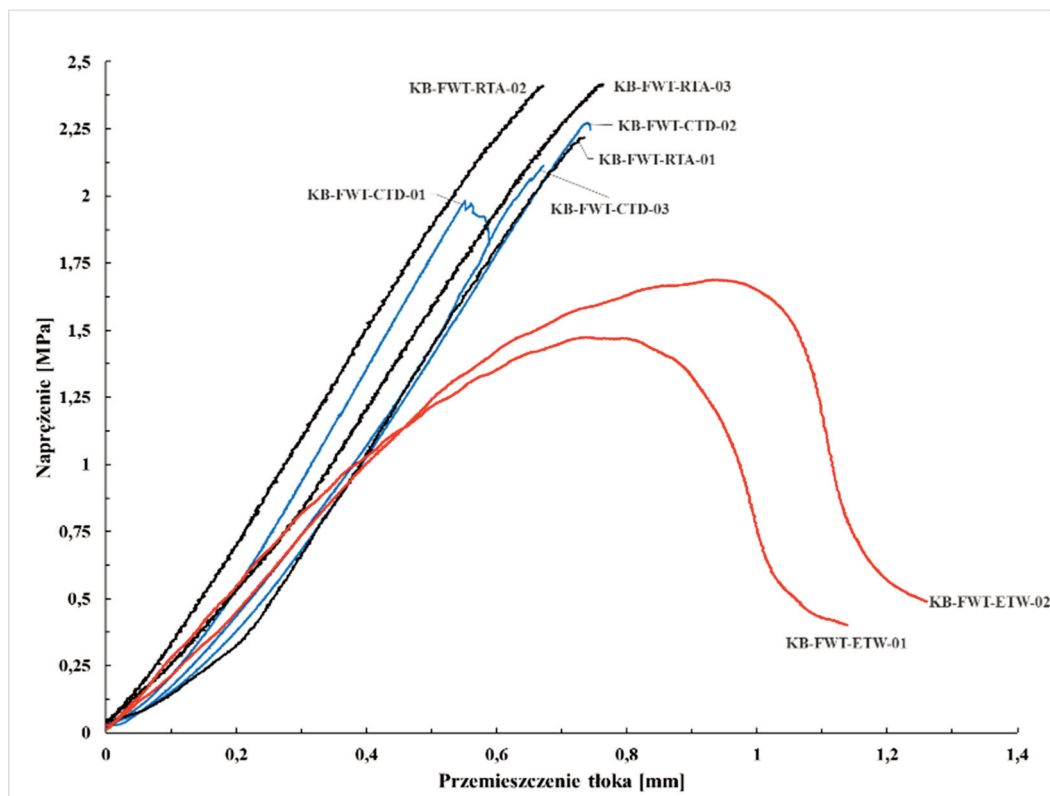
odrywała się od powierzchni kompozytu, czego przykład przedstawia rysunek 6. Taki sposób odrywania sugeruje konieczność lepszego przygotowywania powierzchni kompozytu przed procesem klejenia.



Rys. 6. Próbki po odrywaniu kleju metodą *Climbing Drum*: A – klej wstępnie utwardzony na blasze, B – klej wstępnie utwardzony na kompozycie [opracowanie własne]

4.2. Badania metodą *Flatwise Tension*

Rysunek 7 i tabela 3 przedstawiają wyniki badania rozciągania kompozytu przekładkowego metodą *Flatwise Tension Test* w różnych warunkach badania.

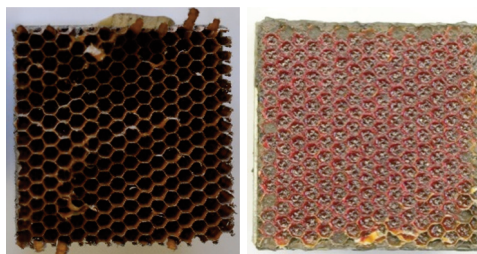


Rys. 7. Wykresy rozciągania próbek *Flatwise Tension*, badanych w różnych warunkach: -55°C (CTD), temperaturze pokojowej (RTA) i w 80°C po klimatyzowaniu (ETW) [opracowanie własne]

Tab. 3. Podsumowanie wyników badań kleju AF 134-2K metodą *Flatwise Tension* [opracowanie własne]

Oznaczenie serii	Warunki badania	Średnie obciążenie przy zniszczeniu	Średnia wytrzymałość na rozciąganie	Przeważający typ zniszczenia
		P_{max} [kN]	F_{tp} [MPa]	
KB-FWT-CTD	-55 °C , próbki suche	5,25	2,12	Pęknięcie rdzenia
KB-FWT-RTA	22 °C, próbki suche	5,86	2,35	Pęknięcie rdzenia
KB-FWT-ETW	80 °C, próbki wilgotne	4,17	1,59	Odklejenie rdzenia od kleju blonkowego

Jak wynika z rysunku 7 i tabeli 3, różnica pomiędzy wytrzymałością kleju AF 134-2K w temperaturze pokojowej i -55°C wynosi 0,23 MPa (10%), a krzywe rozciągania tych serii są do siebie zbliżone. Dominującym sposobem zniszczenia próbki w tych dwóch seriach było pęknięcie rdzenia kompozytu przekładkowego. Świadczy to o tym, iż wraz z obniżeniem temperatury użytkowania właściwości kleju blonkowego AF 134-2K nie ulegają znaczącym zmianom. Znacznie większą różnicę można zaobserwować porównując zachowanie próbek podczas rozciągania w temperaturze pokojowej oraz 80°C po klimatyzowaniu. Próbki „ETW” wykazują wytrzymałość na rozciąganie niższą o około 33% względem próbek „RTA”, jednak główna różnica jest tutaj widoczna w przebiegu krzywych rozciągania i typach zniszczenia próbek. Próbki po klimatyzowaniu nie wykazywały wyraźnego maksimum naprężenia oraz znacznie mniejszy przyrost obciążenia na jednostkę przemieszczenia tłoka, niż próbki „RTA” i „CTD”. W tej serii badań najczęściej występującym typem zniszczenia była utrata adhezji pomiędzy rdzeniem kompozytu przekładkowego a klejem blonkowym, co pokazane jest na rysunku 8.



Rys. 8. Porównanie sposobów zniszczenia próbek badanych w warunkach CTD (po lewej) i ETW (po prawej) [opracowanie własne]

Takie rezultaty badania świadczą o wyraźnym osłabieniu połączenia w wyniku klimatyzowania próbek. Główną przyczyną jest tutaj absorpcja wilgoci, prowadząca do zmian właściwości kleju. W wyniku tej absorpcji, wytrzymałość kleju na rozciąganie uległa znacznemu osłabieniu, wzrosła za to jego elastyczność – próbki w warunkach „ETW” ulegały zniszczeniu przy przemieszczeniu tłoka maszyny większym o około 65%, niż próbki „CTD” i „ETW”. Spadek wytrzymałości kleju, połączony z osłabieniem adhezji na styku rdzenia kompozytu z warstwą kleju skutkowało całkowitym odrywaniem rdzenia od okładzin wzdłuż linii kleju.

5. WNIOSKI

Na podstawie przeglądu literatury oraz przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Żadna z opisanych metod prostego oddzierania kleju nie może być używana jako metoda badania bezwzględnej wytrzymałości kleju na oddzieranie. Wynika to przede wszystkim z dużej liczby czynników mających wpływ na właściwości spoiny – rodzaju kleju, jednorodności jego warstwy, procesu aplikacji, przygotowania podłoża, itd. Metody badań oddzierania kleju należy traktować jako metody porównawcze.
2. Spośród metod badania wytrzymałości kleju na ścinanie jedynie metoda D5656 pozwala uzyskać bezwzględne wartości wytrzymałości spoiny na ścinanie i modułu jej ścinania. Również jedynie

metoda D5656 pozwala na porównywanie między sobą właściwości różnych klejów. Pozostałe metody (D1002 i D3165) mogą być stosowane głównie w badaniach porównawczych.

3. Z badań za pomocą metody *Climbing Drum* wynika, iż miejsce wstępnego utwardzania kleju błonkowego AF 163-2K w połączeniu kompozyt przekładkowy – metal nie ma znaczącego wpływu na jego wytrzymałość na oddzieranie. Różnica w wytrzymałości na oddzieranie na milimetr szerokości spoiny między obiema seriami wynosiła 0,003 Nm/mm (1,7% wartości średniej).
4. Badania metodą *Flatwise Tension* wykazały, iż właściwości kleju AF 134-2K nie ulegają znaczącym zmianom wraz z obniżeniem temperatury badania do -55°C . Średnie wytrzymałości na rozciąganie próbek badanych w tej temperaturze i temperaturze pokojowej różniły się o 0,23 MPa (10%).
5. Podwyższenie temperatury badania do 80°C , a przede wszystkim absorpcja wilgoci w spoinie, mają negatywny wpływ na właściwości kleju AF-134-2K. Pomimo wzrostu elastyczności, średnia wytrzymałość spoiny spadła o 33%, wystąpiła również utrata adhezji pomiędzy rdzeniem kompozytu a warstwą kleju. Możliwość stosowania kleju AF 134-2K w warunkach długotrwałej ekspozycji na wilgoć jest ograniczona.

Pracę wykonano w ramach projektu „Studium wykonania śmigieł ogonowych i łopát wirników nośnych”, prowadzonego przez Centrum Technologii Kompozytowych w Instytucie Lotnictwa.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Tserpes K.I. et al., 2002, “Strength prediction of bolted joints in graphite/epoxy composite laminates, Composites: Part B, 33, pp. 521–529.
- [2] Banea M.D., da Silva L.F.M., 2008, “Adhesively bonded joints in composite materials: an overview”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L, 223, pp. 1-18.
- [3] Wiśniowski W., 2009, “Untypical cases and incorrect results of vibration tests”, Journal of KONES, Vol. 16, pp. 591-597.
- [4] Norma ASTM D6862: Standard Test Method for 90 Degree Peel Resistance of Adhesives.
- [5] Norma ASTM D903: Standard Test Method for Peel or Stripping Strength of Adhesive Bonds.
- [6] Norma ASTM D1781: Standard Test Method for Climbing Drum Peel for Adhesives.
- [7] Norma ASTM D3167: Standard Test Method for Floating Roller Peel Resistance of Adhesives.
- [8] Mazumdar S. K. and Mallick P. K., 1998, Static and Fatigue Behavior of Adhesive Joints in SMC-SMC Composites, Polymer composites, (19)2, pp. 139-146.
- [9] Davies P. et al., 2009, Influence of adhesive bond line thickness on joint strength, International Journal of Adhesion and Adhesives, 29(7), pp. 724 – 736.
- [10] Tomblin J.S., Yang C. and Harter P., 2001, Investigation Of Thick Bondline Adhesive Joints, FAA report no. DOT/FAA/AR-01/33.
- [11] Norma ASTM D1002: Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal).
- [12] Norma ASTM D3165: Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading of Single-Lap-Joint Laminated Assemblies.
- [13] Norma ASTM D5656: Standard Test Method for Thick-Adherend Metal Lap-Shear Joints for Determination of the Stress-Strain Behavior of Adhesives in Shear by Tension Loading.
- [14] Norma ASTM C297: Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions.
- [15] Bitzer T., 1997, Honeycomb and sandwich testing, Honeycomb technology, Chapman&Hall.

ADHESIVE JOINTS IN COMPOSITE STRUCTURES – A METHODOLOGY REVIEW

Abstract

In this article, some of the most popular methods of adhesive peel strength, shear strength and modulus testing, as well as sandwich type composite testing are described. Some of the methods presented were later used in characterisation of film adhesives: 180° peel test of metal – sandwich composite joint using Scotch-Weld AF 163- 2K adhesive and flatwise tension tests of sandwich composite using AF 134-2K as skin-to-honeycomb adhesive, performed in various test conditions. Peel test confirmed that peel strength of metal – laminate joint using AF 163- 2K is unaffected by place of adhesive consolidation. Flatwise tension tests showed that properties of AF 134-2K adhesive remain unaffected by decreasing test temperature to -55°C. However, increasing test temperature to 80°C, combined with moisture conditioning prior to test cause 33 % drop in joint strength, followed by increased joint plasticity and a loss of adhesion at film adhesive – honeycomb core interface.

Keywords: adhesive joints, composites, film adhesives, adhesive joint tensile strength.