

**Analiza wpływu szerokości zakładki na wytrzymałość połączenia klejonego techniką
warstwową kompozytów GFRP**

Wprowadzenie

Kompozyty zbrojone włóknem szklanym (GFRP – *Glass Fiber Reinforced Polymer*) stanowią jedną z najważniejszych grup materiałów inżynierskich wykorzystywanych w nowoczesnym przemyśle. Ich popularność wynika z unikalnego połączenia właściwości mechanicznych i fizykochemicznych: wysokiej wytrzymałości w stosunku do masy, odporności na korozję i wpływ środowiska, łatwości formowania oraz możliwości dopasowania struktury do wymagań projektowych. GFRP znajduje zastosowanie w lotnictwie, motoryzacji, transporcie morskim, energetyce wiatrowej czy budownictwie.

Współcześnie udział kompozytów w konstrukcjach stale rośnie. W samolotach pasażerskich nowej generacji nawet ponad połowa masy konstrukcyjnej wykonana jest z materiałów kompozytowych. W jednostkach pływających kadłuby laminatowe całkowicie wyparły konstrukcje drewniane czy stalowe w mniejszych klasach jachtów. W motoryzacji stosuje się elementy z GFRP w nadwoziach samochodów sportowych, w sprężynach zawieszenia czy obudowach systemów bezpieczeństwa.

Pomimo licznych zalet, kompozyty – jak wszystkie materiały – ulegają uszkodzeniom. Mogą one powstawać na etapie produkcji (np. pustki żywiczne, niedostateczne przesycenie włókien) albo w trakcie eksploatacji (pęknięcia, rozwarstwienia, zmęczenie, uderzenia ciał obcych). W takich przypadkach konieczne jest przywrócenie integralności konstrukcji. Wymiana całych elementów jest kosztowna i czasochłonna, dlatego rozwój technologii napraw stał się jednym z priorytetów inżynierii materiałowej.

Jedną z najczęściej stosowanych metod jest naprawa warstwowa (schodkowa), polegająca na usuwaniu uszkodzonego fragmentu i nakładaniu nowych warstw kompozytu, które zachodzą na materiał macierzysty. Krytycznym parametrem jest tu **szerokość zakładki** – czyli odcinek, w którym nowa warstwa pokrywa się z istniejącą strukturą. To właśnie zakładka decyduje o rozkładzie naprężeń, odporności na odwarstwienia i ogólnej trwałości naprawy.

Niniejsza praca inżynierska miała na celu szczegółowe zbadanie wpływu szerokości zakładki na wytrzymałość kompozytów GFRP naprawianych metodą warstwową.

Podstawy teoretyczne

Połączenia klejone w kompozytach

Połączenia klejone odgrywają w kompozytach znacznie większą rolę niż w klasycznych konstrukcjach metalowych. Wynika to z kilku powodów:

- wiercenie otworów osłabia strukturę włókien, dlatego łączenia śrubowe są niepożądane;

- kleje pozwalają równomiernie rozłożyć obciążenia na całej powierzchni styku;
- proces klejenia umożliwia zachowanie aerodynamicznej i hydrodynamicznej gładkości powierzchni.

Jednocześnie połączenia klejone niosą pewne problemy. Adhezja między klejem a materiałem zależy od czystości powierzchni, właściwego doboru kleju, a także warunków środowiskowych (wilgotności, temperatury). W praktyce największym wyzwaniem pozostaje jednak **geometria zakładki** – jej długość, szerokość i grubość warstw.

Czynniki wpływające na trwałość zakładki

1. **Rodzaj włókien i tkaniny** – inne właściwości mają włókna szklane, węglowe czy aramidowe.
2. **Typ żywicy** – epoksydowe charakteryzują się lepszą adhezją, poliestrowe są tańsze, ale bardziej kruche.
3. **Warunki środowiskowe** – wysoka wilgotność osłabia wiązania klejowe, a zmienne temperatury prowadzą do powstawania naprężeń szczątkowych.
4. **Geometria zakładki** – zbyt mała powierzchnia styku sprzyja koncentracji naprężeń i inicjacji pęknięć.

Z powyższych powodów szerokość zakładki jest jednym z najważniejszych parametrów technologicznych w naprawach kompozytów.

Metodologia badań

Materiały

Do przygotowania próbek wykorzystano tkaninę szklaną typu quadraxial (czterokierunkową) o gramaturze 625 g/m². Takie ułożenie włókien zapewnia wysoką wytrzymałość w wielu kierunkach i dobrze odwzorowuje właściwości typowych laminatów stosowanych w praktyce przemysłowej.

Jako osnowę użyto żywicy epoksydowo-winyloestrowej AME 6001. Charakteryzuje się ona wysoką odpornością chemiczną, dobrą przyczepnością do włókien szklanych i niskim skurczem objętościowym. Jest szeroko stosowana w przemyśle morskim i lotniczym.

Technologia wytwarzania

Płyty kompozytowe wykonano metodą infuzji próżniowej. Suchą tkaninę ułożono w formie, przykryto folią i podłączono układ podciśnieniowy. Żywica została zassana i równomiernie przesycała włókna. Proces prowadzono w temperaturze 17–25 °C, aż do pełnego utwardzenia.

Uzyskano 10-warstwowe płyty laminatu, które następnie roszlifowano, przygotowując miejsce do naprawy warstwowej. Do odtworzenia struktury użyto tej samej tkaniny i żywicy, aby zapewnić możliwie jednolite właściwości materiału.

Przygotowanie próbek

Przygotowano dwa zestawy próbek różniących się szerokością zakładki:

- zakładka 15 mm,
- zakładka 20 mm.

Każdy zestaw obejmował kilka próbek w celu uzyskania statystycznie wiarygodnych wyników.

Próby wytrzymałościowe

Badania przeprowadzono w Laboratorium Wytrzymałości Materiałów Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Wykorzystano maszynę wytrzymałościową Zwick Roell, która umożliwia precyzyjne zadawanie obciążenia rozciągającego i rejestrację danych.

Podczas prób mierzono:

- maksymalną siłę niszczącą,
- przebieg zależności siła–wydłużenie,
- odkształcenia próbki w różnych fazach obciążania.

Otrzymane wyniki zapisano i poddano analizie w programie TestXpert II.

Wyniki i ich interpretacja

Analiza danych wykazała, że próbki z zakładką 20 mm wytrzymały zdecydowanie wyższe obciążenia niż te z zakładką 15 mm. Oznacza to, że zwiększenie szerokości zakładki prowadzi do lepszego przenoszenia sił i zmniejszenia koncentracji naprężeń w rejonie styku.

W próbkach z zakładką 15 mm charakterystyczny był gwałtowny spadek nośności po osiągnięciu wartości granicznej. Zjawisko to można interpretować jako inicjację delaminacji, czyli odwarstwienia naprawy od materiału macierzystego. Mała powierzchnia styku nie pozwalała na efektywne rozłożenie naprężeń, co skutkowało szybkim oderwaniem fragmentu naprawy.

W próbkach z zakładką 20 mm proces niszczenia był bardziej rozłożony w czasie. Naprężenia wzrastały stopniowo, a maksymalne obciążenie było znacznie wyższe. Oględziny wykazały, że uszkodzenia rozwijały się w większej części materiału, co oznacza, że zakładka skuteczniej integrowała naprawę z laminatem.

W obu przypadkach widoczne było jednak, że naprawa nie tworzyła w pełni jednolitej struktury z materiałem rodzimym. Początkowo większość obciążenia przenosiła sama naprawa, a po jej odspojeniu – tylko materiał bazowy. Taki nierównomierny podział obciążeń jest typowym problemem w klejonych połączeniach kompozytowych.

Wnioski praktyczne

Badania dowiodły, że szerokość zakładki jest jednym z kluczowych parametrów technologicznych decydujących o skuteczności napraw warstwowych.

- **W lotnictwie** – większa szerokość zakładki zwiększa bezpieczeństwo struktur krytycznych (np. skrzydeł, kadłubów, stateczników). Dzięki temu możliwe jest zmniejszenie ryzyka awarii w locie i wydłużenie okresu użytkowania elementów.
- **W motoryzacji** – stosowanie optymalnej zakładki pozwala projektować lżejsze i tańsze w utrzymaniu elementy nadwozi i konstrukcji nośnych.
- **W przemyśle morskim** – poprawa trwałości napraw przekłada się na dłuższą eksploatację jednostek pływających, mniejsze koszty serwisowe i wyższą niezawodność.

Znaczenie naukowe i dalsze kierunki badań

Praca potwierdziła hipotezę, że zwiększenie szerokości zakładki prowadzi do poprawy wytrzymałości połączeń. Jednak jednocześnie wykazała ograniczenia: nawet szersze zakładki nie zapewniają pełnej jednorodności struktury.

Dalsze badania powinny uwzględniać:

- różne typy włókien (np. węglowe, aramidowe, bazaltowe),
- wpływ innych żywic i modyfikatorów,
- zachowanie napraw pod obciążeniami zmęczeniowymi,
- badania w warunkach środowiskowych (wilgoć, temperatura, promieniowanie UV),
- modelowanie numeryczne (MES) w celu przewidywania optymalnych parametrów zakładki.

Podsumowanie

Rozszerzone opracowanie potwierdza, że szerokość zakładki odgrywa kluczową rolę w naprawach kompozytów GFRP techniką warstwową. Zwiększenie zakładki z 15 mm do 20 mm znacząco poprawia wytrzymałość połączenia, jednak nie eliminuje całkowicie problemu nierównomiernego rozkładu naprężeń. Wyniki mają istotne znaczenie praktyczne dla przemysłu lotniczego, motoryzacyjnego i morskiego.

Praca stanowi solidny krok w kierunku opracowania wytycznych technologicznych dotyczących minimalnej szerokości załadek stosowanych w praktyce inżynierskiej.