

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA
im. Jarosława Dąbrowskiego

WYDZIAŁ MECHATRONIKI, UZBROJENIA I LOTNICTWA



ROZPRAWA DOKTORSKA

plk mgr inż. Jarosław GAŚSIOR

***ANALIZA MOŻLIWOŚCI POPRAWY WŁAŚCIWOŚCI
WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH I UŻYTKOWYCH
POŁĄCZEŃ HYBRYDOWYCH STOSOWANYCH
W LOTNICTWIE***

Promotor

dr hab. inż. Marek ROŚKOWICZ, prof. WAT

Promotor pomocniczy

plk dr inż. Piotr WAŚLICKI

Warszawa 2022 r.

(strona celowo pozostawiona pusta)

**OŚWIADCZENIE AUTORA PRACY DOKTORSKIEJ O JEJ
ORYGINALNOŚCI, SAMODZIELNOŚCI JEJ PRZYGOTOWANIA
I O NIENARUSZENIU PRAW AUTORSKICH**

Ja, niżej podpisany oświadczam, że rozprawa doktorska pt.

***ANALIZA MOŻLIWOŚCI POPRAWY WŁAŚCIWOŚCI
WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH I UŻYTKOWYCH POŁĄCZEŃ HYBRYDOWYCH
STOSOWANYCH W LOTNICTWIE***

- a) jest wynikiem mojej działalności twórczej i powstała bez niedozwolonego udziału osób trzecich,
- b) wszystkie wykorzystane przeze mnie materiały źródłowe i opracowania zostały w niej wymienione, a napisana przeze mnie praca nie narusza praw autorskich osób trzecich,
- c) wszystkie elementy pracy, które zostały wykorzystane do jej realizacji (rysunki, tabele, wykresy itp.), a nie będące mojego autorstwa, zostały odpowiednio oznaczone oraz zostało podane źródło ich pochodzenia,
- d) załączona wersja elektroniczna pracy jest tożsama z wydrukiem rozprawy,
- e) praca nie była wcześniej podstawą nadania stopnia doktora innej osoby.

Mam świadomość, że złożenie nieprawdziwego oświadczenia skutkować będzie niedopuszczeniem do dalszych czynności postępowania w sprawie nadania stopnia doktora lub cofnięciem decyzji o nadaniu mi stopnia doktora oraz wszczęciem postępowania dyscyplinarnego/karnego.

.....
plk mgr inż. Jarosław Gąsior

PODZIĘKOWANIA

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I SYMBOLI	9
STRESZCZENIE	11
ABSTRACT	13
WSTĘP	15
I. RODZAJE I WŁAŚCIWOŚCI POŁĄCZEŃ STOSOWANYCH W KONSTRUKCJACH LOTNICZYCH – ANALIZA LITERATURY	17
1.1 Połączenia bezpośrednie – klejowe	18
1.1.1 Wytrzymałość połączeń klejowych – analizy zakresu liniowego (sprężyste)	21
1.1.2 Wytrzymałość połączeń klejowych – analizy zakresu nieliniowego (sprężysto-plastyczne)	35
1.1.3 Modele analityczne – porównanie	39
1.2 Połączenia pośrednie – mechaniczne	43
1.2.1 Połączenia nitowe	43
1.2.2 Połączenia śrubowe	48
1.3 Połączenia hybrydowe	54
1.3.1 Połączenia zgrzewano-klejowe	58
1.3.2 Połączenie nitowo-klejowe	60
1.3.3 Połączenie klinczowo-klejowe	62
1.3.4 Połączenie śrubowo-klejowe	64
1.4 Podsumowanie	73
II. ZAGADNIENIE BADAWCZE	74
2.1 Identyfikacja zadania badawczego	74
2.2 Cele badawcze	76
2.3 Hipoteza badawcza	76
2.4 Zakres badań i obliczeń	76
III. BADANIE POŁĄCZEŃ HYBRYDOWYCH – MODYFIKACJA GEOMETRII MONTAŻU ŁĄCZNIKÓW MECHANICZNYCH	78
3.1 Badania eksperymentalne	78
3.1.1 Metodyka badań	78
3.1.2 Badania nośności i trwałości zmęczeniowej połączeń – zakładka 25 mm (I etap)	83
3.1.3 Badania nośności i trwałości zmęczeniowej połączeń – zakładka 50 mm (II etap)	85
3.1.4 Badanie nośności i trwałości zmęczeniowej połączeń – modyfikacja montażu łączników mechanicznych	87

3.2 Obliczenia MES	93
3.2.1 Metodyka obliczeń	93
3.2.2 Ocena wpływu siatki obliczeniowej na jakość otrzymywanych wyników	99
3.2.3 Wpływ nacisków montażowych na rozkład naprężeń w połączeniu	101
3.2.4 Obliczenia numeryczne połączeń jednozakładkowych	103
3.3 Podsumowanie	107
IV. BADANIE POŁĄCZEŃ HYBRYDOWYCH – MODYFIKACJA WARSTWY ADHEZYJNEJ	111
4.1 Obliczenia MES	112
4.1.1 Metodyka obliczeń	112
4.1.2 Ocena wpływu zmiany właściwości warstwy adhezyjnej na rozkład naprężeń w połączeniu zakładkowym	116
4.1.3 Ocena wpływu zmiany właściwości warstwy adhezyjnej na rozkład naprężeń w połączeniu nakładkowym (model węzła naprawczego)	119
4.2 Badania eksperymentalne	123
4.2.1 Metodyka badań	123
4.2.2 Badanie trwałości zmęczeniowej połączenia mechanicznego	125
4.2.3 Badanie trwałości zmęczeniowej hybrydowych połączeń nakładkowych	126
4.3 Badanie węzła naprawczego z połączeniem hybrydowym przy wykorzystaniu belki śmigłowca Mi-8	131
4.3.1 Metodyka badań	131
4.3.2 Badania trwałościowe węzła naprawczego	134
4.4 Podsumowanie	140
V. POŁĄCZENIA HYBRYDOWE W MONTAŻU ELEMENTÓW KOMPOZYTOWYCH – PROPOZYCJE DALESZYCH BADAŃ	143
5.1 Badania eksperymentalne	144
5.1.1 Metodyka badań	145
5.1.2 Badanie statycznej nośności połączeń mechanicznych i hybrydowych	147
5.1.3 Badania zmęczeniowe połączeń mechanicznych i hybrydowych – analiza tomogramów	153
5.2 Podsumowanie	159
VI. PODSUMOWANIE	161
LITERATURA	165
SPIS RYSUNKÓW I TABEL	175

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I SYMBOLI

b – szerokość połączenia zakładkowego

D – sztywność klejonych elementów na zginanie

d – średnica łącznika mechanicznego

E – przedział ufności

E_1, E_2 – moduły sprężystości wzdłużnej klejonych elementów

F – siła

f – współczynnik tarcia

G_a – moduł sprężystości postaciowej spoiny

k – współczynnik momentu zginającego

k' – współczynnik siły poprzecznej

l – długość połączenia zakładkowego

M – moment zginający

S – odchylenie standardowe wartości średniej

t_a – grubość warstwy klejowej

t_1, t_2 – grubość klejonych elementów

V – siła poprzeczna

γ – odkształcenie postaciowe

ν – współczynnik Poissona

σ – naprężenia normalne

τ – naprężenia styczne

AISC – American Institute of Steel Construction

ASTM – International Society for Testing and Materials

CAD – Computer Aided Design

CAE – Computer Aided Engineering

CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer

FEA – Finite Element Analysis

FEM – Finite Element Method

KS – karb strukturalny

ŁE – łączony element

ŁM – łącznik mechaniczny

MES – Metoda elementów skończonych

PN – Polska Norma

WA – warstwa adhezyjna

STRESZCZENIE

Analiza możliwości poprawy właściwości wytrzymałościowych i użytkowych połączeń hybrydowych stosowanych w lotnictwie

Słowa kluczowe: połączenia hybrydowe, nośność połączeń, trwałość zmęczeniowa połączeń hybrydowych, rozkład naprężeń w połączeniu, montaż łączników mechanicznych, metoda elementów skończonych, Ansys Workbench, MES, CAE.

Zainteresowanie konstruktorów połączeniami hybrydowymi, czyli kombinacją co najmniej dwóch rodzajów połączeń wykorzystywanych w jednym węźle konstrukcyjnym, wynika z szeregu jego szczególnych zalet, umożliwiających wykorzystanie w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym. Ideą stosowania połączeń hybrydowych jest uzyskanie efektu synergii po zastosowaniu jednocześnie dwóch rodzajów połączeń w procesie montażu elementów, wykorzystanie zalet połączeń składowych oraz jednoczesne ograniczenie ich wad.

Rozprawa swoim zakresem obejmuje część teoretyczną i doświadczalną, poszerzoną o obliczenia numeryczne. Część teoretyczna oparta jest na przeglądzie literatury dotyczącej problematyki połączeń hybrydowych (klejowo-mechanicznych) w aspekcie poprawy ich właściwości wytrzymałościowych i użytkowych. Część doświadczalna opisuje prowadzone własne badania eksperymentalne i obliczenia numeryczne połączeń hybrydowych.

Aby rozwiązać problem badawczy, jakim jest odpowiedź na pytanie, czy jest możliwa efektywna modyfikacja połączeń hybrydowych (klejowo-mechanicznych) w celu poprawy ich parametrów wytrzymałościowych i użytkowych, osiągnąć założone cele i zweryfikować sformułowaną hipotezę, zrealizowano:

1. Badania eksperymentalne w zakresie statycznym i w zakresie trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych i mechanicznych oraz połączeń hybrydowych (klejowo-mechanicznych) przy wykorzystaniu maszyny wytrzymałościowej MTS-809. Badane próbki hybrydowe poddano modyfikacjom polegającym na zmianie schematu montażu łączników mechanicznych zalecanym dla połączeń mechanicznych. W badaniach eksperymentalnych wykorzystano również tworzywa adhezyjne o odmiennych właściwościach wytrzymałościowych, weryfikując wpływ ich parametrów na

dystrybucję obciążeń w połączeniu. Do przygotowania próbek połączeń wykorzystano zarówno elementy metalowe jak i elementy kompozytowe na bazie tzw. laminatów węglowych (CFRP¹).

2. Obliczenia numeryczne (w zakresie nieliniowym) przygotowanego modelu obliczeniowego połączenia hybrydowego na potrzeby wykonania analizy z wykorzystaniem metody elementów skończonych m.in. do przeprowadzenia efektywnej analizy pól naprężeń w spoinie połączenia adhezyjnego, łącznikach mechanicznych i łączonych elementach. W zakresie przygotowania modelu obliczeniowego przeprowadzono testy eksperymentalne w celu zidentyfikowania właściwości łączonych materiałów. Warunki brzegowe obliczeń numerycznych modelu były zgodne z warunkami realizacji badań eksperymentalnych. Do tego celu wykorzystano aplikację Ansys Workbench 19.
3. Analizę otrzymanych wyników, włączając porównanie rezultatów badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych. Oceniano, w jakim zakresie wprowadzane w połączeniu modyfikacje (miejsce montażu łączników mechanicznych, właściwości warstwy klejowej) wpływają na właściwości wytrzymałościowe połączeń hybrydowych.

W dostępnej literaturze zagadnienie poprawy właściwości wytrzymałościowych i użytkowych połączeń hybrydowych przedstawiane jest w znacząco ograniczonym zakresie. Brak jest również dostępnych analiz porównawczych dotyczących właściwości połączeń hybrydowych, w których zmianie poddaje się geometrię montażu łączników mechanicznych w celu osiągnięcia wyższej nośności i trwałości połączeń hybrydowych.

Prezentowane w pracy wyniki badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych modeli połączeń hybrydowych mają wypełnić tę lukę. Dodatkowo, ze względu na stale rosnącą popularność materiałów kompozytowych, w szczególności w lotnictwie (do budowy nowoczesnych statków powietrznych), przeprowadzono badania zmęczeniowe połączeń z wykorzystaniem materiałów kompozytowych. Uzyskane wyniki mogą stanowić punkt wyjścia do dalszych badań tego rodzaju połączeń.

¹ CFRP (carbon fiber reinforced polymer) – kopozyt wzmacniany włóknem węglowym

ABSTRACT

Analysis of possibilities of improvement of strength and maintenance properties of hybrid joints used in the aerospace industry

Keywords: hybrid joints, load capacity, fatigue life of hybrid joints, stress distribution, fasteners location, finite element method, Ansys Workbench, FEA, CAE.

The interest of constructors and manufacturers in the hybrid joints area, i.e. the combination of at least two types of joints used in one construction node, results from a number of its specific advantages allowing their wide usage in the aerospace and automotive industry. The main idea of using hybrid joints is to achieve synergies phenomenon when two types of different joints are applied in the assembly process simultaneously, benefits from the advantages of the component joints and limit their disadvantages at the same time.

The dissertation covers the theoretical and experimental part, extended with numerical calculations. The theoretical section is based on a review of the literature on hybrid (adhesive-mechanical) joints issues in terms of improving their strength and performance characteristics while the experimental section describes the own experimental research and numerical calculations of own-prepared samples of hybrid joints.

In order to solve the research problem formulated as a response to the question of whether it is possible to effectively modify hybrid (adhesive-mechanical) joints in order to improve their strength and maintenance properties, to achieve research goals and to verify the assumed hypothesis the following have been conducted:

1. Experimental tests on static and fatigue life of samples of adhesive, mechanical as well as hybrid joints (adhesive-mechanical) using the MTS-809 axial/torsional test system. Tested hybrid joint samples have been modified to change the geometry of assembling mechanical fasteners recommended for mechanical joints. During the experimental studies two other adhesives with different strength characteristics have also been used in order to verify the effect of their parameters on the load distribution in the hybrid joint. Both metal components and carbon-based composite structures (CFRP – carbon fiber reinforced polymer) have been utilised to prepare joint samples.

2. Numerical calculations (non-linear range) of the model of hybrid joint using the finite element method to perform an efficient analysis of stress fields in the adhesive layer, mechanical fasteners as well as samples of joints. Experimental tests have been conducted in the preparation of the calculation model to identify the properties of the components and materials of the hybrid joints. The boundary conditions for numerical calculations of the model were in accordance with the experimental conditions. Ansys Workbench 19 was used for this purpose as one of the best dedicated software.
3. Analysis of the obtained results, including comparison of experimental results and numerical calculations. This allowed the assessment of the extent to which modifications performed in the hybrid joint (assembly location of mechanical fasteners, different properties of adhesive layers) affect its strength characteristics.

The optimizing of the hybrid joints is presented in a very limited extent in contemporary resources and literature. Furthermore there are no comparative analyses available concerning the characteristics of hybrid joints in which the assembly geometry of mechanical fasteners is changed in order to achieve a higher load capacity and fatigue life of hybrid joints.

The results of experimental research of own-prepared samples and numerical calculations of developed hybrid joint models as well as the analysis carried out and presented hereby in the dissertation are intended to fill this gap. In addition, due to the constantly growing popularity of composite materials, in particular in aviation (building modern aircrafts), basic fatigue tests of composite joints samples have been carried out. The obtained results can be considered as a starting point and base for further research on this type of joints.

WSTĘP

Od pierwszego lotu braci Wright w 1903 r. do czasów współczesnych, w produkcji statków powietrznych wykorzystywano najróżniejsze materiały konstrukcyjne tj. drewno, płótno, stal, stopy metali lekkich i tworzywa sztuczne oraz polimerowe materiały kompozytowe. Stosując je w budowie płatowców poszukiwano najkorzystniejszych rozwiązań zarówno materiałowych jak i konstrukcyjnych oraz technologicznych, dających możliwość wytwarzania konstrukcji lekkich, wytrzymałych, będących jednocześnie rozwiązaniami podatnymi eksploatacyjnie. Niezależnie od stosowanych materiałów w budowie statków powietrznych, montaż ich poszczególnych elementów konstrukcyjnych zawsze wymagał stosowania efektywnego sposobu łączenia. Najczęściej w montażu płatowców stosowano rozłączne połączenia mechaniczne, w tym nity i śruby oraz popularne obecnie rozwiązania typu Hi-Lok® czy Jo-Bolt®. Wykorzystywano również połączenia nierozłączne, a wśród nich te powstałe na bazie spoin klejowych, lutowanych czy spawanych. Odpowiednie systemy połączeń rozłącznych i nierozłącznych stosowane są w zależności od rodzaju materiału wykorzystywanego w budowie płatowca. Dodatkowo w przypadku wyboru odpowiedniego sposobu łączenia elementów konstrukcji lotniczych należy uwzględniać kwestie eksploatacyjne, w tym bardzo istotną – podatność diagnostyczną połączeń. Stąd np. wykorzystanie w konstrukcjach półskorupowych połączeń klejowych jest z punktu widzenia wytrzymałościowego bardzo efektywnym rozwiązaniem, natomiast z punktu widzenia długotrwałej eksploatacji jest nieakceptowalne przez właściwe instytucje certyfikujące oraz nadzory lotnicze, ze względu na brak właściwego, bezinwazyjnego sposobu oceny stanu technicznego tego rodzaju połączeń. Nie zmienia to jednak faktu, iż połączenia klejowe są coraz częściej stosowane w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym. W ostatnich latach, w wielu branżach nastąpił znaczny wzrost udziału materiałów kompozytowych, dla których klejenie jest podstawowym sposobem ich łączenia. Dla przykładu w obecnie wprowadzanych do eksploatacji statkach powietrznych sumaryczna masa elementów wykonanych z laminatów kompozytowych może przekraczać nawet 50% ich masy całkowitej. Zastosowanie klejenia w miejsce mechanicznych elementów łączących (nity, śruby itp.) jest korzystniejsze poprzez zmniejszenie masy konstrukcji oraz ograniczenie kosztów jej wytwarzania. Nadal jednak istnieje wiele problematycznych aspektów, które muszą zostać rozwiązane, aby ten rodzaj

połączeń zyskał pełne zaufanie branży lotniczej. Są to m.in. niedoskonałości polimerycznej struktury kleju, ograniczona odporność spoiny adhezyjnej na trudne warunki atmosferyczne (temperatura i wilgotność) oraz jego stosunkowo niska wytrzymałość zmęczeniowa. Okazuje się jednak, że po zastosowaniu w rozważanym połączeniu klejowym dodatkowej mechanicznej metody łączenia elementów np. poprzez montaż śrub, nitów lub wytworzenie zgrzein, część niedoskonałości połączenia klejowego można zniwelować. Wykorzystanie co najmniej dwóch rodzajów połączeń w jednym węźle konstrukcyjnym powoduje powstanie połączenia hybrydowego, którego stosowanie w montażu elementów konstrukcji może przynieść wymierne korzyści.

Przykłady stosowania połączeń hybrydowych w konstrukcjach lotniczych sięgają poprzedniego wieku. Ich stosowanie zapoczątkowali w latach 50 ubiegłego stulecia, w Związku Radzieckim inżynierowie biura konstrukcyjnego Olega Antonowa [44] przy produkcji samolotów typu An-24. Rosjanie wykorzystali do tego celu połączenie zgrzewane (zgrzewanie punktowe łączonych elementów) i poprzez aplikację kleju udoskonaili ten rodzaj połączenia nazywanego „zgrzewaniem klejowym”. Po procesie zgrzewania łączonych elementów przestrzeń między nimi wypełniana była klejem o niskiej lepkości, zdolnym do wypełnienia zakładki, gdzie następował proces jego utwardzania, głównie w celu zabezpieczenia zgrzewanych blach przed korozją.

Popularność i stosowanie połączeń hybrydowych zwiększyło się po wprowadzeniu na większą skalę w budowie płatowców statków powietrznych polimerowych materiałów kompozytowych. Były to głównie połączenia mechaniczno-adhezyjne i kształtowo-mechaniczne [146].

Zaletami połączeń hybrydowych może być ich wyższa trwałość zmęczeniowa w porównaniu do połączeń składowych oraz ich wyższa sztywność. W konstrukcjach lotniczych nie bez znaczenia jest również dwuetapowy proces ich niszczenia [10, 134], co istotnie zwiększa prawdopodobieństwo wykrycia początku degradacji połączenia i ułatwia np. proces certyfikacji konstrukcji lotniczej. Wykorzystanie połączeń hybrydowych – adhezyjno-mechanicznych – rozwiązuje również problemy technologiczne związane z koniecznością spełnienia warunku jednoznacznego położenia łączonych elementów w trakcie utwardzania tworzywa adhezyjnego oraz zapewnienia niezbędnych nacisków w trakcie operacji klejenia. Dodatkowo wykorzystanie połączeń hybrydowych zamiast np. tylko połączeń klejowych może być mniej pracochłonne i korzystniejsze w aspekcie projektowania procesów zautomatyzowanego łączenia części.

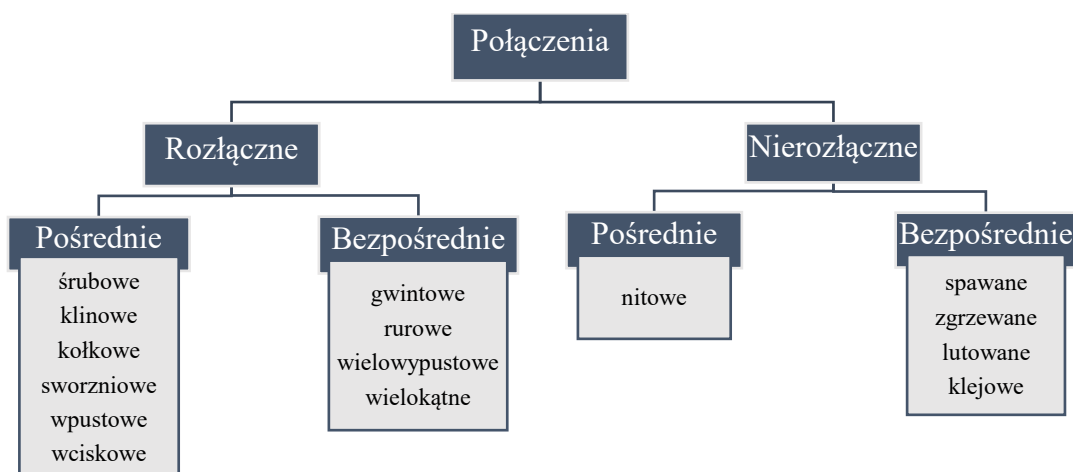
I. RODZAJE I WŁAŚCIWOŚCI POŁĄCZEŃ STOSOWANYCH W KONSTRUKCJACH LOTNICZYCH – ANALIZA LITERATURY

Rozwój inżynierii materiałowej i coraz wyższe wymagania techniczne stawiane konstrukcjom w różnych gałęziach współczesnej inżynierii (lotniczej, morskiej, motoryzacyjnej) powodują, że metalowe elementy poszczególnych konstrukcji zastępowane są przez elementy wytwarzane z innych materiałów o korzystniejszych właściwościach mechanicznych i użytkowych. Przykładem takich działań jest zastosowanie polimerowych materiałów kompozytowych w pierwszorzędowych strukturach lotniczych, co umożliwia projektowanie i wytwarzanie konstrukcji lżejszych, mających jednocześnie korzystniejsze parametry wytrzymałościowe i użytkowe, w tym wyższą trwałość zmęczeniową i lepszą odporność na korozję.

Na parametry wytrzymałościowe i użytkowe wytwarzanych konstrukcji, w tym płatowców statków powietrznych, oraz na ich niezawodność bezpośrednio wpływają m.in. rodzaje połączeń stosowanych w procesie ich montażu. Odpowiednio dobrana technologia łączenia elementów konstrukcji dopasowana do rodzaju materiałów wykorzystywanych w budowie statków powietrznych może istotnie poprawić trwałość i niezawodność konstrukcji oraz jej podatność diagnostyczno-eksploatacyjną.

Stosowane obecnie w budowie maszyn połączenia konstrukcyjne (rys. 1.1.) dzielą się na [142]:

- a) połączenia rozłączne – które umożliwiają wielokrotne łączenie i rozłączanie elementów konstrukcyjnych bez ich uszkodzenia,
- b) połączenia nierozłączne – które ulegają uszkodzeniu podczas ich rozłączania.



Rysunek 1.1. Połączenia konstrukcyjne [142]

Ze względu na sposób powiązania elementów, połączenia dzielimy natomiast na [142]:

- a) połączenia pośrednie – takie, w których wykorzystuje się dodatkowe łączniki np.: śruby, nity, kołki,
- b) połączenia bezpośrednie – takie, w których struktury są łączone bez elementów pomocniczych.

W kontekście zagadnień wytrzymałości i trwałości konstrukcji lotniczych problematyka połączeń konstrukcyjnych jest bardzo istotna, szczególnie w aspekcie liczebności łączonych elementów i wykorzystywanych do tego celu łączników mechanicznych w procesie montażu struktury lotniczej. Jako przykład posłużyć może skrzydło samolotu Airbus A380, które składa się z ponad 30 000 elementów połączonych za pomocą ok. 750 000 łączników mechanicznych. Wyzwaniem w obszarze problematyki połączeń jest również wykorzystanie, w coraz większym zakresie w budowie struktur lotniczych, polimerowych materiałów kompozytowych, które np. w zakresie przenoszenia obciążeń w postaci nacisków powierzchniowych mają widocznie gorsze właściwości niż stosowane do tej pory stopy aluminium serii 2000.

1.1 Połączenia bezpośrednie – klejowe

W połączeniach klejowych (adhezyjnych) wykorzystuje się tzw. kleje, czyli substancje umożliwiające trwałe połączenie powierzchni materiałów stałych, dodatkowo niewywołujące zmian w łączonych elementach. Spoinę klejową wypełniającą przestrzeń między łączonymi powierzchniami cechują siły przyczepności (adhezja) do klejonej powierzchni oraz siły wewnętrznej spójności (kohezja). Ze względu na wytrzymałość otrzymanego złącza klejowego, kleje można podzielić na [62]:

- a) przyklepcowe – których wytrzymałość pozwala jedynie na odwracalne połączenie elementów,
- b) montażowe – które umożliwiają uzyskanie trwałego połączenia, jednak niewystarczająco silnego, by traktować je jako element konstrukcyjny,
- c) konstrukcyjne – cechujące się wytrzymałością pozwalającą traktować złącza jako element konstrukcyjny [64].

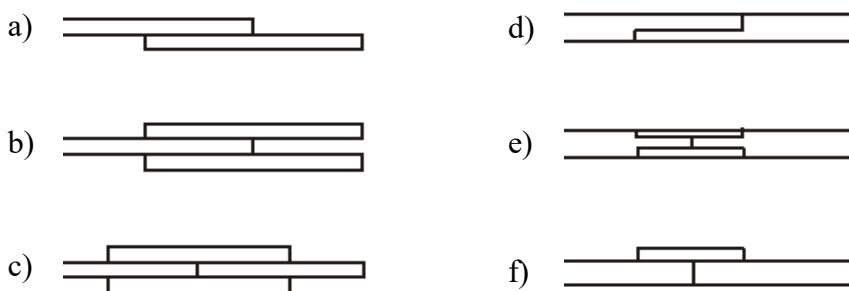
Na początku XX wieku kleje nie były brane pod uwagę jako tworzywa konstrukcyjne. Taka tendencja utrzymywała się aż do roku 1940, w którym to klejenie konstrukcyjne rozpoczęto wykorzystywać w przemyśle lotniczym przy montażu

pierwszych struktur lotniczych. W budowie płatowców najszerwsze zastosowanie znalazły epoksydowe i poliestrowe żywice konstrukcyjne. Obecnie przy produkcji statków powietrznych klejenie wykorzystywane jest przede wszystkim do wykonywania konstrukcji przekładkowych, do łączenia podłużnic z pokryciami oraz łączenia cienkich blach. Wprowadzenie do konstrukcji lotniczych pierwszorzędowych elementów wykonanych z polimerowych materiałów kompozytowych spowodowało, że klejenie jako metodę łączenia elementów płatowca zaczęto wykorzystywać w coraz szerszym zakresie. Ponieważ klejenie pozwala również łączyć części, które są wykonane z różniących się właściwościami fizycznymi materiałów, właściwość tą wykorzystano łącząc ze sobą elementy wykonane z różnych materiałów (np. metalowe i kompozytowe). Niewątpliwą zaletą połączeń klejowych w porównaniu z innymi rodzajami połączeń takimi jak spawanie czy nitowanie jest bardziej równomierny rozkład naprężeń w łączonych elementach [26].

Proces klejenia obejmuje trzy zasadnicze fazy:

- a) przygotowanie powierzchni,
- b) naniesienie warstwy klejowej,
- c) złączenie elementów do utwardzenia spoiny.

Połączenia klejowe umożliwiają łączenie elementów w różnych konfiguracjach. Zasadniczo dzielimy je na połączenia doczołowe i zakładkowe [17]. Typowe sposoby wykonywania połączeń klejowych w konstrukcjach lotniczych przedstawiono na rys. 1.2.



Rysunek 1.2. Schemat typowych sposobów połączeń klejonych w konstrukcjach lotniczych: a) jednozakładkowe, b) dwuzakładkowe, c) dwunakładkowe, d) jednozakładkowe wpuszczane, e) dwunakładkowe wpuszczane, f) jednonakładkowe [62]

Połączenia adhezyjne przenoszą obciążenia poprzez całą łączoną powierzchnię zapewniając m.in. bardziej równomierny rozkład naprężeń w łączonych elementach oraz szczelność połączenia. Dodatkowo nie naruszają ciągłości struktury łączonego elementu i niwelują spiętrzenia naprężeń w złączu. Klejone konstrukcje są lekkie, a przy tym

charakteryzuje je wysoka sztywność. Połączenia klejowe dają możliwość łączenia ze sobą elementów konstrukcyjnych nawet o dużych różnicach wymiarów geometrycznych, zapewniając przy tym właściwe tłumienie drgań. Ponadto stosowanie klejenia w konstrukcjach lotniczych zwiększa gładkość powierzchni opływanych przez powietrze poprzez wyeliminowanie dodatkowych elementów jak np. łączniki mechaniczne tworzących źródła zaburzające laminarność opływu [26].

Ograniczenia stosowania połączeń klejonych w konstrukcjach lotniczych wynikają głównie z ich umiarkowanej odporności na podwyższoną temperaturę, problemów efektywnego diagnozowania spoin klejowych oraz zagadnień starzeniowych klejów, będących tworzywami polimerowymi. Kleje odporne na wysoką temperaturę stają się zbyt kruche w zimnym środowisku, natomiast kleje odporne na niskie temperatury tracą swoje właściwości w podwyższonych temperaturach pracy [40]. Połączenia adhezyjne wymagają bardzo dobrego pasowania elementów, odpowiedniej obróbki klejonej powierzchni oraz szczególnej dbałości o zachowanie wysokich wymagań technologicznych [118, 121]. Ponadto właściwości połączeń klejowych ulegają zmianie wraz z wilgotnością środowiska. Dotyczy ich także problem zmian cech wytrzymałościowych w wyniku starzenia. Jednak jednym z podstawowych mankamentów połączenia klejowego, jest wspomniana powyżej utrudniona kontrola jego jakości. Niedoskonałości, które mogą wystąpić przy wykonywaniu spoiny klejowej mogą znacząco obniżyć parametry wytrzymałościowe połączenia. Niestety, skomplikowany proces technologiczny jego wykonania wymaga zaawansowanych metod kontroli i skutkuje niską powtarzalnością wyników oceny stanu technicznego połączenia w ramach prób nieniszczących. Ocena ich stanu technicznego często nie jest możliwa bez ingerencji w połączenie, co wiąże się z uszkodzeniami konstrukcji, a nawet całkowitym zniszczeniem połączenia. Zestawienie zasadniczych właściwości połączeń klejowych zamieszczono w tab. 1.1.

Tabela 1.1. Analiza właściwości połączeń klejowych [3]

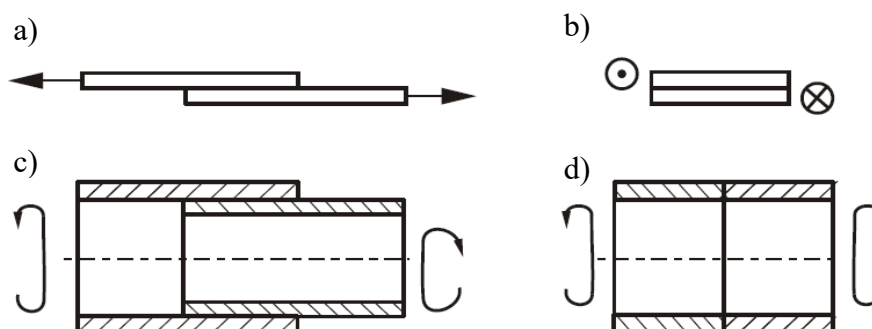
Zalety	Wady
a) brak koncentracji naprężeń b) zachowanie ciągłości struktury łączonych elementów	a) połączenia nierozłączne b) brak nieniszczących metod kontroli jakości połączenia

Tabela 1.1. c.d. Analiza właściwości połączeń klejowych [3]

c) brak naprężeń termicznych w trakcie wykonywania połączeń	c) niska odporność na naprężenia wywołujące oddzieranie
d) zabezpieczenie powierzchni łączonych przed korozją, uszczelnianie połączeń	d) niska wytrzymałość termiczna
e) brak wpływu na zmianę struktury łączonych elementów	e) żywotność uzależniona od warunków klimatycznych
f) możliwość łączenia w sposób bezpośredni różnych materiałów	f) specyficzne warunki przygotowania klejonych powierzchni, trudne do wykonania w niekorzystnych warunkach atmosferycznych
g) zwiększenie sztywności połączeń	g) brak efektywnych metod prognozowania trwałości połączeń
h) podwyższona odporność na wibracje i obciążenia zmienne	h) konieczność prowadzenia eksploatacji nadzorowanej
i) uzyskanie zadowalającego stosunku wytrzymałości połączenia do jego masy	

1.1.1 Wytrzymałość połączeń klejowych – analizy zakresu liniowego (sprężyste)

Połączenia klejowe mogą przenosić największe obciążenia, jeśli są tak zaprojektowane, że w ich spoinach dominują naprężenia normalne ujemne lub styczne [11]. Połączenia, w których obciążenia przenoszone są głównie przez naprężenia styczne, są nazywane połączeniami obciążonymi na ścinanie. Z przedstawionych na rys. 1.3. czterech podstawowych modeli połączeń obciążonych na ścinanie (a – d), tylko trzy pierwsze (a – c) znajdują szerokie zastosowanie (są typowymi połączeniami klejowymi zalecanymi do stosowania w technice), czwarty (d) natomiast jest połączeniem znajdującym zastosowanie najczęściej w badaniach wytrzymałościowych [38].

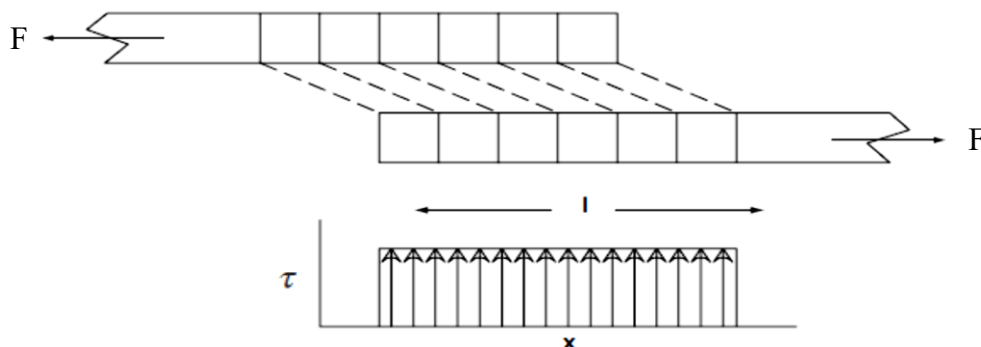


Rysunek 1.3. Modele połączeń klejowych obciążonych na ścinanie:
a) zakładkowe obciążone siłami, b) zakładkowe obciążone wydatkiem naprężeń stycznych, c) tulejowe obciążone momentem skręcającym, d) osiowosymetryczne, czołowe obciążone momentem skręcającym [62]

Najczęściej wykorzystywanymi na potrzeby rozważań teoretycznych w aspekcie właściwości wytrzymałościowych są modele połączenia klejowego nazywane

uproszczonym (rys. 1.4.) i Volkersena (1938) (rys. 1.5.). Kolejne, które pozyskały uznanie wśród naukowców to model Golanda i Reissnera (1944) (rys. 1.7.), w którym po raz pierwszy uwzględniono wtórne momenty gnące, Adamsa i Mallicka (1992) uwzględniający plastyczność kleju i zmiany naprężeń normalnych w spoinie w funkcji grubości warstwy adhezyjnej [1] oraz Hartha-Smitha (1973), które to rozwiązanie jako pierwsze uwzględniało plastyczność kleju w analizie rozkładu naprężeń stycznych, przyjmując założenie, że klej jest ciałem sprężysto-plastycznym (rys. 1.10.). W modelu uwzględniono również sztywność klejonych elementów oraz wpływ temperatury na rozkład naprężeń.

Istotą modelu uproszczonego jest założenie o nieodkształcalności klejonych elementów. Traktuje się je jako sztywne elementy obciążone osiowo. Warstwa kleju doznaje jedynie odkształceń postaciowych, które są stałe na całej długości zakładki l . Efektem tego założenia jest jednorodny rozkład naprężeń stycznych τ w warstwie adhezyjnej (rys. 1.4.).



Rysunek 1.4. Model uproszczony – deformacja połączenia klejowego oraz rozkład naprężeń stycznych w spoinie: F – siła, l – długość zakładki, τ – naprężenia styczne warstwy klejowej [88]

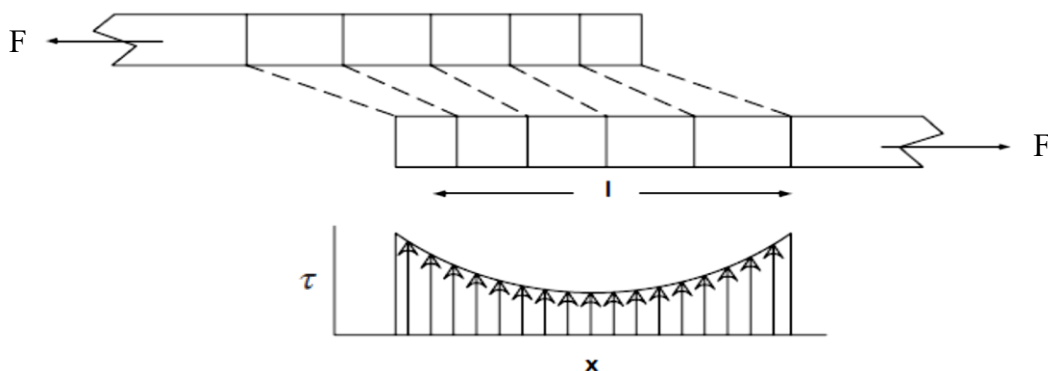
Ich wartość opisuje zależność (1), gdzie F to wartość przyłożonej siły, l i b to odpowiednio długość i szerokość połączenia zakładkowego.

$$\tau = \frac{F}{bl} \quad (1)$$

Naprężenia normalne w elementach poza zakładką są stałe, natomiast maleją liniowo do zera na długości zakładki. Opisane podejście jest stosunkowo proste, dlatego też znajduje zastosowanie przy wyznaczaniu nośności połączeń obciążonych na ścinanie, gdy nie jest wymagana duża precyzja wyników, np. na potrzeby norm zawierających

wymagania do oznaczania wytrzymałości kleju na ścinanie [106, 110]. Wadą modelu jest duże uproszczenie zjawisk zachodzących w obciążonej warstwie adhezyjnej, co wpływa na małą dokładność obliczeń. Niemniej jednak wykorzystanie do rozważań zależności opartych na tym modelu ma duże znaczenie praktyczne – służy do oceny wpływu różnych czynników na wytrzymałość zakładkowych połączeń klejowych.

Model Volkersena (1938) pozwala na wykonanie dokładniejszych analiz. Bazuje co prawda na modelu uproszczonym, jednak eliminuje założenie sztywności klejonych elementów, co skutkuje niejednorodnym rozkładem odkształceń postaciowych w warstwie adhezyjnej (rys. 1.5.).

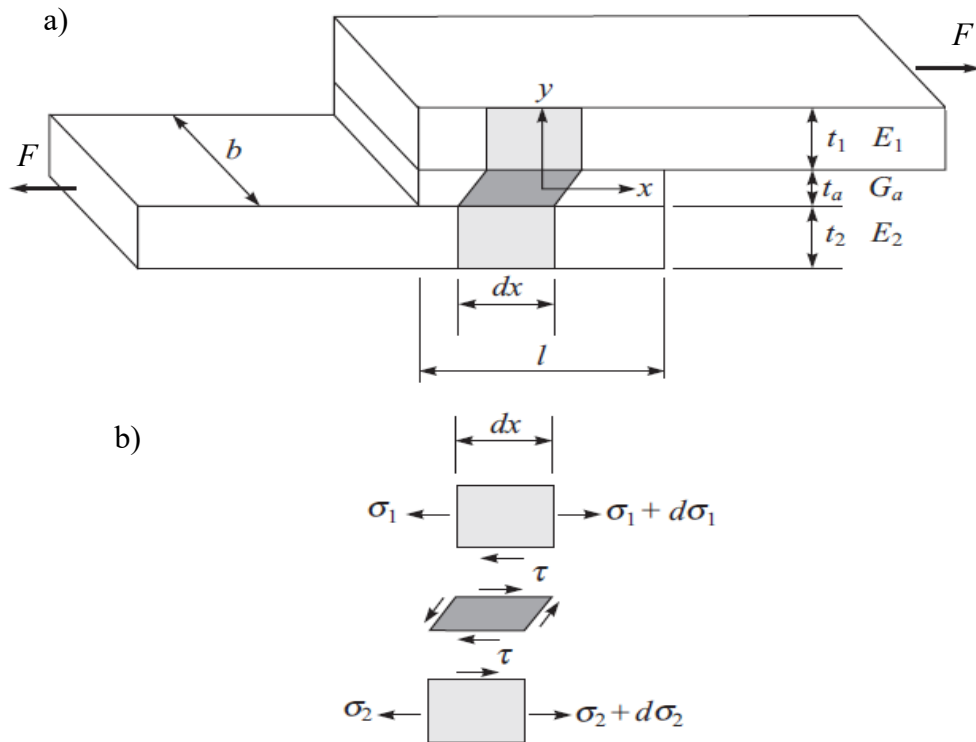


Rysunek 1.5. Model Volkersena – deformacja połączenia klejowego przy uwzględnieniu odkształcalności klejonych elementów [28]

W tym modelu rozkład naprężeń stycznych τ jest znacznie bliższy rzeczywistemu [28, 39, 62]. Volkersen wyznaczył rozkład naprężeń stycznych w spoinie połączenia zakładkowego (2), przyjmując następujące założenia:

- a) spoina klejowa i elementy klejone zachowują się jak ciała liniowo-sprężyste,
- b) elementy klejone we wszystkich przekrojach podlegają równomiernemu rozciąganiu,
- c) mimośrodowość działania obciążenia, powodująca zginanie elementów łączonych, nie ma wpływu na rozkład naprężeń stycznych w spoinie klejowej.

Dodatkowo przyjęto, że: σ_1 , σ_2 to naprężenia normalne występujące w klejonych elementach, t_1 , t_2 to ich grubości, E_1 , E_2 to moduły sprężystości wzdłużnej klejonych próbek, t_a jest wartością grubości spoiny klejowej, a G_a jej modułem sprężystości postaciowej spoiny (rys. 1.6).



Rysunek 1.6. Połączenie zakładkowe analizowane przez Volkersena:

a) geometria, b) diagram elementarny

σ_1, σ_2 to naprężenia normalne występujące w klejonych elementach, t_1, t_2 to ich grubości a E_1, E_2 to moduły sprężystości wzdłużnej klejonych próbek [28]

Wynika z tego, że rozkład naprężeń stycznych w spoinie rozważanego połączenia zakładkowego opisuje zależność:

$$\tau(x) = \frac{\sigma_1 t_1 m}{(1 + S) \sinh ml} [S \cosh mx + \cosh m(l - x)] \quad (2)$$

Wartość m i S są otrzymywane odpowiednio z równań:

$$m = \sqrt{\frac{G_a}{t_a} \frac{t_1 E_1 + t_2 E_2}{t_1 E_1 t_2 E_2}} \quad (3)$$

$$S = \frac{t_1 E_1}{t_2 E_2} \quad (4)$$

w którym t_a jest wartością grubości spoiny adhezyjnej, a G_a jej modułem sprężystości postaciowej. Z zależności (2) wynika, że w spoinach klejowych obciążonych na ścinanie występuje nierównomierny rozkład naprężeń stycznych, który charakteryzuje występowanie maksymalnych naprężeń na brzegach spoiny (rys. 1.7.). Jeżeli połączenie zakładkowe jest wykonane z dwóch elementów o jednakowej sztywności na rozciąganie, to:

$$t_1 E_1 = t_2 E_2 \text{ więc } S = 1 \quad (5)$$

i rozkład naprężeń stycznych w spoinie jest symetryczny to opisuje go zależność:

$$\tau(x) = \frac{\sigma_1 t_1 m}{2 \sinh ml} [\cosh mx + \cosh m(l - x)] \quad (6)$$

Gdy naprężenia maksymalne w spoinie przekroczą wartość naprężeń niszczących τ_n , spoina klejowa ulega zniszczeniu. Znając wartość naprężeń niszczących spoiny klejowej można określić wytrzymałość połączenia klejowego. Wytrzymałość połączenia zakładkowego obciążonego na ścinanie, które charakteryzuje jednakowa sztywność na rozciąganie elementów klejonych, opisuje siła niszcząca połączenie F wyprowadzona z zależności (6). Gdy weźmie się pod uwagę, że $F = \sigma_l b t$, wówczas:

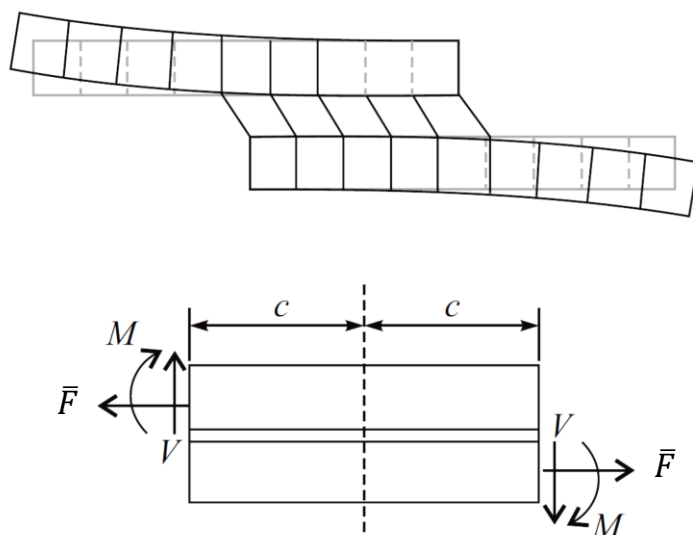
$$F = \tau_n b \sqrt{\frac{2 t_a t E}{G_a} \frac{\sinh ml}{\cosh ml + 1}} \quad (7)$$

gdzie t_a jest wartością grubości spoiny klejowej, b szerokością, a G_a jej modułem sprężystości postaciowej. Z powodu przyjętych założeń upraszczających wyprowadzone zależności są obarczone błędem i dlatego nie zaleca się wykorzystywać ich do obliczeń wytrzymałościowych, gdy ich celem są precyzyjne wyniki podobnie jak w przypadku modelu uproszczonego mają, one duże znaczenie praktyczne i mogą służyć do oceny wpływu różnych czynników na wytrzymałość zakładkowych połączeń klejowych. Zgodnie z podanymi zależnościami, wytrzymałość zakładkowego połączenia klejowego obciążonego na ścinanie zależy nie tylko od właściwości mechanicznych kleju (wartości

naprężeń niszczących i modułu sprężystości postaciowej), ale również od wymiarów połączenia: szerokości, długości i grubości spoiny klejowej, grubości elementów klejonych i ich modułu sprężystości wzdłużnej [13, 45, 62, 99].

Należy pamiętać, iż Volkersen wyznaczył rozkład naprężeń stycznych w spoinie połączenia zakładkowego, pomijając mimośrodowość działania obciążenia powodującą zginanie elementów łączonych. Pominięcie odkształceń wynikających ze zginania elementów klejonych i wywołanych nimi naprężeń normalnych (prostopadłych do powierzchni spoiny klejowej) jest główną niedoskonałością teorii Volkersena.

Mimośrodowy sposób obciążenia połączenia powoduje powstanie momentu zginającego M oraz siły poprzecznej V , którą uwzględnia się jako dodatkowe, oprócz siły F , obciążenie brzegów spoiny (rys. 1.7.). Efektem działania momentu zginającego będzie odkształcenie połączenia po trajektorii obrotu połączenia, wywołujące zmianę kierunku linii obciążenia, z tendencją do osiągnięcia przez kierunek działających sił linii zgodnej z osią symetrii połączenia. Gdy połączenie obracając się dodatkowo odkształca się, moment zginający maleje a na końcach klejonych elementów powstaje efekt dużych odkształceń. Aby uwzględnić wpływ momentu zginającego M oraz siły poprzecznej V , obliczenia połączenia należy wykonywać w zakresie nieliniowym. Pionierami, którzy uwzględnili opisane powyżej zjawiska w 1944 roku byli Goland i Reissner.



Rysunek 1.7. Model Golanda i Reissnera – uwzględnienie wtórnych momentów gnących [28]

W swoich rozważaniach zastosowali współczynnik momentu zginającego k i współczynnik siły poprzecznej k' , które na końcach zakładki pozostają w związku z F , M i V , zgodnie z następującymi zależnościami:

$$M = k \frac{Ft}{2} \quad i \quad V = k' \frac{Ft}{2} \quad (8)$$

gdzie t jest grubością klejonych elementów ($t_1 = t_2$) i c (por. rys. 1.7.) jest połową długości zakładki. Przy bardzo małych obciążeniach, kiedy połączenie nie odkształca się, współczynniki k i k' będą w przybliżeniu równe 1. Gdy połączenie odkształca się wraz ze wzrostem obciążenia, współczynniki k i k' będą się zmniejszać, co w konsekwencji spowoduje zmniejszenie momentu zginającego M i siły poprzecznej V . Goland i Reissner [65] uwzględnili efekt dużych odkształceń klejonych elementów, założyli przy tym jednak, że połączenie charakteryzuje nieskończenie cienka warstwa kleju. Uwzględniając powyższe, zależność opisująca współczynnik momentu zginającego ma postać:

$$k = \frac{\cosh(u_2 c)}{\cosh(u_2 c) + 2\sqrt{2} \sin(u_2 c)} \quad (9)$$

dla:

$$u_2 = \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{2}} \frac{1}{t} \sqrt{\frac{F}{tE}} \quad (10)$$

gdzie ν oznacza współczynnik Poissona klejonych elementów, a E ich moduł sprężystości wzdłużnej.

Harth-Smith (1973) również wziął pod uwagę zjawisko dużych odkształceń, ale deformację klejonych elementów rozważył indywidualnie dla dolnej i górnej części połączenia w obszarze zakładki, nie pomijając tym samym warstwy adhezyjnej. Przedstawił zależność opisującą współczynnik momentu zginającego, będącą alternatywą dla analizy Golanda i Reissnera:

$$k = \left(1 + \frac{t_a}{t}\right) \frac{1}{1 + \xi c + \frac{(\xi c)^2}{6}} \quad (11)$$

gdzie:

$$\xi = \sqrt{\frac{F}{D}} \quad (12)$$

a D to sztywność klejonych elementów na zginanie.

Oplinger (1994) przedstawił bardziej szczegółową analizę. Bazując na modelu Golanda i Reissnera wziął pod uwagę również efekt dużych odkształceń w obrębie zakładki i poza nią, uwzględniając również deformację klejonych elementów – indywidualnie dla dolnej i górnej części połączenia w obszarze zakładki. Analiza zależności prezentowanych przez Oplingera doprowadziła do uzyskania podobnych wyników jak u Golanda i Reissnera, jednak tylko dla warunków, gdy grubość klejonych elementów jest znacznie większa od grubości warstwy adhezyjnej. Rozbieżności pomiędzy analizami uwiadamiają się natomiast, gdy stosunek grubości klejonych elementów do grubości warstwy adhezyjnej nie jest znacząco wysoki [28].

Zasługującą na uwagę jest analiza przeprowadzona przez Zhao (2010), która wprowadza uproszczoną zależność współczynnika momentu zginającego. Pomimo tego, iż formuła sprawdza się w zasadzie tylko dla połączeń o krótkich zakładkach, wykonanych z cienkich i sztywnych elementów, jest znacznie uproszczona w stosunku do zależności opisujących współczynnik momentu zginającego prezentowanych przez Harta-Smitha oraz Golanda i Reissnera:

$$k = \frac{1}{1 + \xi c} \quad (13)$$

Po określeniu obciążeń na końcach zakładki połączenia, Goland i Reissner obliczyli naprężenia normalne σ i styczne τ warstwy adhezyjnej, rozważając problem jako zagadnienie płaskie. Pomimo występującej mimośrodowości i obecności wtórnych momentów zginających, autorzy analizy nie zdecydowali się na rozpatrzenie zjawisk zachodzących wewnątrz warstwy klejowej w zakresie nieliniowym. Uniknęli w ten sposób wprowadzenia do rozważań zjawisk znacząco komplikujących proces obliczeń, natomiast nieliniowy charakter problemu zachowano poprzez definiowanie obciążeń na

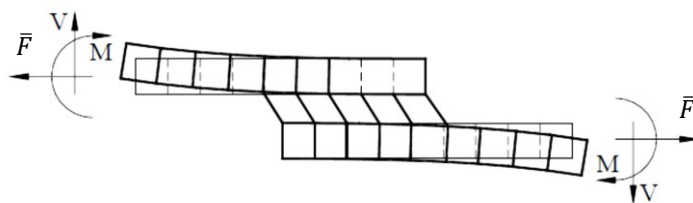
końcach zakładki. W celu wyznaczenia naprężeń występujących w warstwie adhezyjnej przyjęto następujące uproszczenia – w pierwszym przypadku:

- a) założono, że warstwa adhezyjna ma znikomą grubość, w związku z czym, jest relatywnie sztywna i można pominąć jej wpływ na podatność na odkształcenia całego połączenia,
- b) połączenie zakładkowe, w tym również spoinę klejową potraktowano jako ciało deformowalne o parametrach i właściwościach jak łączone elementy,

w drugim przypadku natomiast:

- a) przyjęto, że warstwa adhezyjna jest względnie elastyczna i to właśnie od jej właściwości zasadniczo zależą odkształcenia całego połączenia.

Pierwszy przypadek jest właściwy w szczególności przy rozpatrywaniu klejonych elementów wykonanych z drewna i tworzyw sztucznych o dużej grubości (w odniesieniu do grubości warstwy adhezyjnej), drugi natomiast jest odpowiedni dla połączeń elementów metalowych, w tym konstrukcji statków powietrznych. Opierając się na założeniach dla drugiego przypadku, klejone elementy traktowano jako odkształcalne, zginane płyty, których deformacja (rys. 1.8.) spowodowana jest tylko naprężeniami normalnymi σ_x wywołanymi działaniem sił.



Rysunek 1.8. Model Golanda i Reissnera – deformacja połączenia [43]

Efektem deformacji jest pojawienie się w warstwie adhezyjnej naprężeń normalnych prostopadłych do spoiny klejowej wywołujących oddzieranie spoiny na końcach zakładki. Zakładając, że grubość warstwy adhezyjnej jest znacznie mniejsza w porównaniu do grubości klejonych elementów przyjęto, iż naprężenia w warstwie kleju są równe wzdłuż grubości spoiny. Opisany model znajduje zastosowanie przy wyznaczaniu rozkładów naprężeń połączeń, w szczególności w łączeniu elementów metalowych i ich stopów, pod warunkiem spełnienia poniższej zależności (14):

$$\frac{tG_a}{t_aG} < 0,1 \quad i \quad \frac{tE_a}{t_aE} < 0,1 \quad (14)$$

gdzie G jest modułem sprężystości postaciowej klejonych elementów, G_a modułem sprężystości postaciowej kleju, a E_a modułem jego sprężystości wzdłużnej. Autorzy twierdzą, iż w przypadku połączeń klejowych, które spełniają zależność (14) odkształcenia łączonych elementów są na tyle małe w porównaniu do odkształceń warstwy adhezyjnej, że można je pominąć. Rozkłady naprężeń stycznych i normalnych (oddzierających) występujących w warstwie adhezyjnej podane przez Golanda i Reissnera opisują odpowiednio zależności (15) i (16):

$$\tau(x) = -\frac{F}{8c} \left[\frac{\beta c}{t} (1 + 3k) \frac{\cosh\left(\frac{\beta x}{t}\right)}{\sinh\left(\frac{\beta c}{t}\right)} + 3(1 - k) \right] \quad (15)$$

$$\sigma(x) = \frac{Ft}{\Delta c^2} \left[\left(R_2 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \cosh(\lambda) \cos(\lambda) \right) \cosh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \cos\left(\frac{\lambda x}{c}\right) + \left(R_1 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \sinh(\lambda) \sin(\lambda) \right) \sinh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \sin\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \right] \quad (16)$$

gdzie:

$$\beta = \sqrt{\frac{8G_a t}{Et_a}} \quad (17)$$

$$\lambda = \frac{\gamma c}{t} \quad (18)$$

$$k' = \frac{kc}{t} \sqrt{3(1 - \nu^2) \frac{F}{tE}} \quad (19)$$

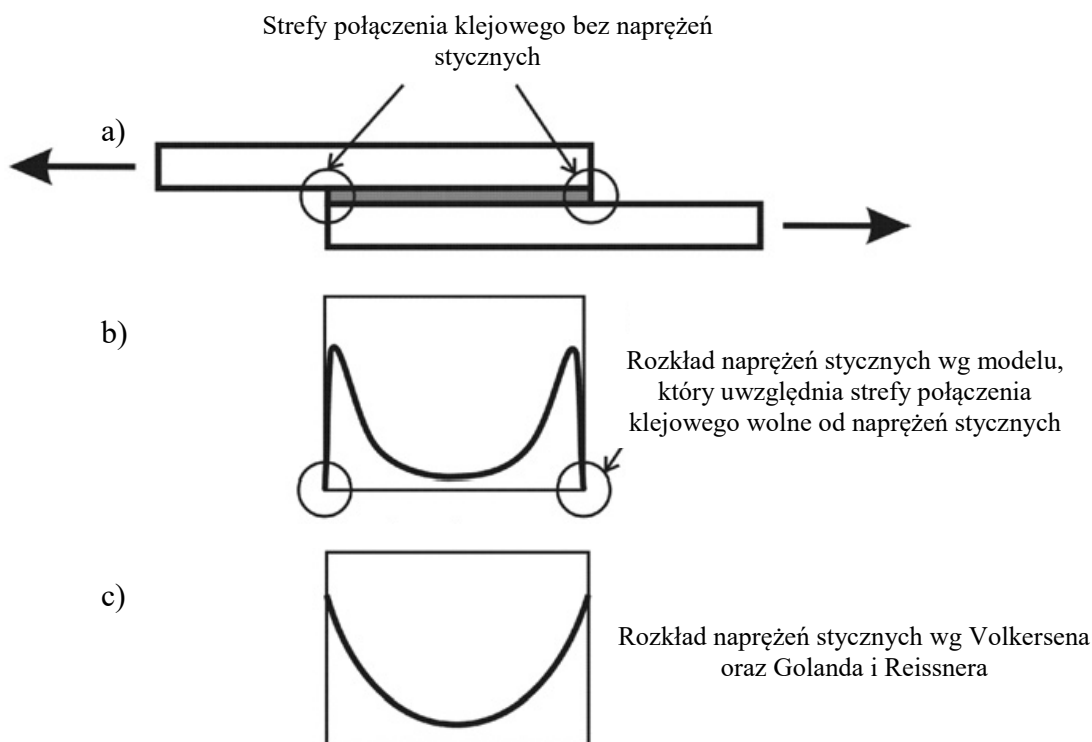
$$R_1 = \cosh(\lambda)\sin(\lambda) + \sinh(\lambda)\cos(\lambda) \quad (20)$$

$$R_2 = \sin(\lambda)\cos(\lambda) - \cosh(\lambda)\sin(\lambda) \quad (21)$$

$$\Delta = \frac{1}{2}(\sin(2\lambda) + \sinh(2\lambda)) \quad (22)$$

Nie ma wątpliwości, że prace wykonane przez Volkersena (1938) oraz Golanda i Reissnera (1944) były dużym krokiem naprzód w analizie naprężeń spoiny połączenia klejowego. Niemniej jednak ich modele charakteryzowały trzy zasadnicze ograniczenia:

- a) w modelach nie uwzględniono zmian naprężeń w warstwie adhezyjnej wzdłuż jej grubości, podczas gdy naprężenia na styku warstwa adhezyjna – łączony element są wyjątkowo istotne, szczególnie, gdy właśnie w tym miejscu inicjowany będzie proces destrukcji połączenia,
- b) największe naprężenia styczne τ występują na końcach zakładki, co pozostaje w sprzeczności z założeniem braku naprężeń na końcach zakładki (rys. 1.9.) – analizy, które nie uwzględniają stanu wolnego od naprężeń stycznych przewartościowują naprężenia na końcach zakładki i mogą doprowadzić do niewłaściwego określenia parametrów wytrzymałościowych połączenia,
- c) klejone elementy uznano za cienkie belki prostopadłościennne, pomijając w ten sposób ich deformację spowodowaną naprężeniami stycznymi i normalnymi – uwzględnienie deformacji pochodzącej od naprężeń stycznych jest szczególnie ważne przy analizie klejenia materiałów podatnych na odkształcenia, takich jak np. kompozyty [28].



Rysunek 1.9. Rozkłady naprężeń stycznych w połączeniu klejowym: a) i b) w modelu uwzględniającym strefy bez naprężeń stycznych na końcach zakładki, c) wg Volkersena oraz Golanda i Reissnera [41, 43]

Wskazane powyżej ograniczenia modeli Volkersena oraz Golanda i Reissnera poddawano wielu analizom i próbom oceny m.in. przez Ojalvo i Eidinoffa (1978) oraz Tsaia (1998) [41, 43].

Ojalvo i Eidinoff (1978) [95] w swojej analizie opartej na modelu Golanda i Reissnera dokładnie rozważyli zjawisko odkształcenia warstwy adhezyjnej wywołane naprężeniami stycznymi w celu oceny wpływu grubości spoiny klejowej na rozkład naprężeń. Przyjęli, iż naprężenia styczne w spoinie klejowej będą podlegały zmianom wzdłuż jej grubości bez względu na wartość grubości. Założono również, że wartość naprężeń normalnych jest stała wzdłuż grubości spoiny. Doprowadziło to do wniosków, że zasadnicza różnica między teoriami, w których uwzględnia się lub nie wpływ grubości warstwy adhezyjnej na rozkład naprężeń w połączeniu, dotyczy tylko rozkładu naprężeń na końcach zakładki połączenia. Zgodnie z ich teorią, uwzględniając wpływ grubości warstwy adhezyjnej na rozkład naprężeń w spoinie połączenia, przyjmuje się, że maksymalne naprężenia styczne wzrastają, natomiast naprężenia normalne maleją na końcach zakładki. Wpływ grubości warstwy adhezyjnej jest bardziej istotny dla krótkich zakładek, grubych warstw adhezyjnych i sztywnych klejów. W analizie Ojalvo

i Eidinoffa przewiduje się, że szczytowe naprężenia styczne występują na końcach zakładki, nie spełniając tym samym warunku występowania stref wolnych od naprężeń.

Hipotezą, w której założono, iż maksymalne wartości naprężeń występują w okolicy końców zakładek jest m.in. model Allmana (1977) [6]. Autor modelu dowiódł, iż miejsca, w których występują największe wartości naprężeń stycznych w spoinie klejowej zależą od podatności na odkształcenia warstwy adhezyjnej. Rozwijając teorię Allmana, Chen i Cheng (1983) dowodzili, że miejsca o największych (maksymalnych) wartościach naprężeń stycznych w warstwie adhezyjnej znajdują się w odległości równej około 20% grubości klejonych elementów od krawędzi zakładki, a nie na jej końcach jak dotychczas zakładano.

Tsai (1998) wykazał, że udoskonalenie modeli Volkersena i Golanda i Reissnera poprzez uwzględnienie w nich założeń o deformacji łączonych elementów pod wpływem działania naprężeń stycznych znacznie lepiej koresponduje z wynikami badań eksperymentalnych [151], szczególnie dla materiałów kompozytowych.

Analiza tzw. klasycznych modeli spoiny klejowej wskazywała na zasadność uwzględnienia w rozważaniach dotyczących rozkładu naprężeń w spoinie klejowej odkształceń występujących w łączonych elementach. Pierwszym modelem, w którym uwzględniono deformację klejonych elementów, w szczególności kompozytów, był model analityczny Rentona i Winstona (1975), w którym przyjęto, że naprężenia warstwy adhezyjnej są stałe wzdłuż jej grubości i pomija się naprężenia normalne występujące wzdłuż długości spoiny. Przeprowadzona analiza spełniała również warunek tzw. braku naprężeń stycznych na końcach zakładki połączenia. Co ciekawe, w modelu opracowanym przez Allmana (1977), w którym autor założył, iż naprężenia normalne prostopadłe do spoiny (oddzierające) są zmienne wzdłuż grubości warstwy klejowej, warunek braku naprężeń stycznych na końcach zakładki połączenia był również spełniony. Podobnie jak w analizie Rentona i Winstona, Allman przyjął, że naprężenia styczne są stałe wzdłuż grubości warstwy klejowej i pominął naprężenia normalne występujące wzdłuż długości zakładki. Teoria sprężystości Allmana obejmuje więc efekty zginania, rozciągania i ścinania klejonych elementów oraz występowanie w spoinie naprężeń stycznych i normalnych prostopadłych do spoiny połączenia. Allman obliczył wartości momentów zginających i sił wywołujących ścinanie połączenia na jego końcach w oparciu o teorię Golanda i Reissnera [65]. Rozkłady naprężeń w elementach

klejonych i w spoinie klejowej wyraził za pomocą funkcji rozkładu naprężeń spełniającej wszystkie równania równowagi i warunki brzegowe, w tym warunek braku naprężeń stycznych w warstwie adhezyjnej na końcach zakładki.

Dalszy rozwój modelu analitycznego Allmana kontynuowali m.in. Chen i Cheng [33] oraz Adams i Mallick [2]. Chen i Cheng (1983), podobnie jak Allman, rozważali nieliniowe charakterystyki geometryczne połączeń jednozakładowych, wykorzystując wartości obciążeń występujących na końcach zakładki połączenia, tak jak realizowali to Goland i Reissner. Jeśli klejone elementy są jednakowe (podobieństwo geometryczne i materiałowe), obciążenia na dwóch końcach zakładki łączonych elementów będą sobie równe. Jednak w przypadku gdy klejone elementy będą różnych wymiarów geometrycznych, rozkład naprężeń nie będzie symetryczny, a tym samym wartości naprężeń stycznych i normalnych prostopadłych do spoiny klejowej na dwóch końcach zakładki będą różne. Tak więc Chen i Cheng podjęli próbę zastosowania modelu Golanda i Reissnera dla przypadku połączenia jednozakładowego niesymetrycznego – łączone elementy różniły się wymiarami. Zamiast jednego współczynnika momentu zginającego k zastosowali dwa, k_1 i k_2 , dające różne obciążenia krawędzi na końcach połączenia.

Analiza Adamsa i Mallicka (1992) dotyczyła połączeń jedno- i dwuzakładowych. Autorzy poddali badaniom próbki wykonane z materiałów izotropowych i jednokierunkowych kompozytowych. Dodatkowo łączone elementy mogły różnić się wymiarami, w tym grubością, oraz właściwościami wytrzymałościowymi. Łączone elementy były definiowane jako elementy sprężyste, a warstwa klejowa jako materiał sprężysto-plastyczny. Określano rozkłady naprężeń normalnych wzdłuż długości spoiny, stycznych i normalnych prostopadłych do spoiny dla każdego z klejonych elementów i samego kleju. Porównanie analiz Adamsa i Mallicka oraz Chen i Cheng (1991) wskazuje, iż otrzymane rozkłady naprężeń w spoinie połączenia są podobne, pomimo iż opisane zostały dwiema niezależnymi metodami: poprzez uwzględnienie dwóch niezależnych funkcji naprężeń wzdłuż zakładki oraz z wykorzystaniem klasycznej teorii zginania układu belka-płyta. Jedną z głównych różnic między tymi dwiema analizami jest to, że Adams i Mallick założyli, że naprężenia w warstwie adhezyjnej ulegały zmianie w funkcji jej grubości. Naprężenia normalne wzdłuż długości zakładki dla łączonych elementów i kleju przyjęto jako zmienne liniowo dla całej grubości.

Jedną z najnowszych publikacji bazujących na dotychczasowych założeniach i osiągnięciach jest analiza Zhao i Lu (2009). Autorzy opracowali model, opierając analizę na dwuwymiarowej teorii sprężystości, która jednocześnie obejmuje zależności odkształcenie-przemieszczenie i naprężenie-odkształcenie. Metoda ta spełnia również warunek braku naprężeń stycznych na końcach zakładów połączenia. Badając swój model, Zhao i Lu porównywali go z innymi analizami, stwierdzając m.in. wzrost dokładności otrzymywanych wyników od 4% do 13% w porównaniu do modelu Golanda i Reissnera dla tych samych warunków i geometrii. Ponadto konfrontacja modelu Zhao i Lu z wynikami obliczeń numerycznych bazujących na metodzie elementów skończonych wskazała na ich oczekiwaną zgodność. Pomimo dowiedzionej dokładności uzyskiwanych wyników obliczeń wytrzymałościowych połączeń klejowych, stosowanie modelu Zhao i Lu jest ograniczone ze względu na złożoność wyprowadzonych równań.

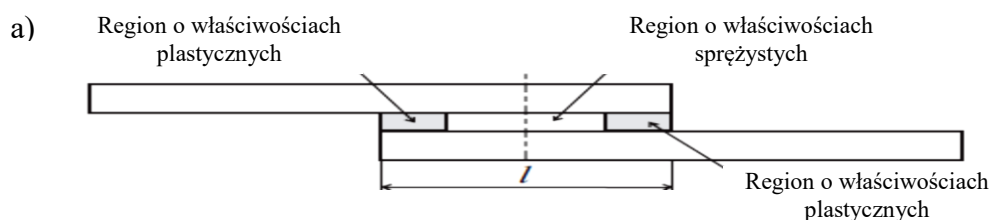
Opisane powyżej modele analityczne, pomimo swoich ograniczeń, stale znajdują zastosowanie w obliczeniach wytrzymałościowych i nadal są punktem odniesienia dla nowych rozwiązań dotyczących połączeń adhezyjnych. Ich atrakcyjność podnosi dodatkowo fakt, iż są relatywnie proste w użyciu i aby z nich korzystać nie jest koniecznym posiadanie stacji roboczych o dużych mocach obliczeniowych.

1.1.2 Wytrzymałość połączeń klejowych – analizy zakresu nieliniowego (sprężysto-plastyczne)

Analizy przedstawione w rozdziale 1.1.1 [2, 5, 28, 33, 43, 65, 95, 151] zakładały przede wszystkim sprężyste zachowanie zarówno warstwy klejącej, jak i klejonych elementów. Dokładność wykonania obliczeń z wykorzystaniem modeli prezentowanych w rozdziale 1.1.1 jest wystarczająca tylko do klejów sztywnych, które charakteryzują niewielkie lub pomijalne odkształcenia plastyczne. W przypadku stosowania klejów o dużym odkształceniu plastycznym, takich jak np. żywice epoksydowe modyfikowane gumą, uwzględnienie plastyczności kleju staje się konieczne, aby prawidłowo odwzorować rozkład naprężeń. Dotyczy to również elementów klejonych, których analiza w oparciu o model sprężysto-plastyczny pozwala na dokładniejsze zdefiniowanie wytrzymałości połączenia adhezyjnego, dając wyniki zbliżone do rzeczywistych wartości. Plastyczne właściwości elementów tworzących połączenie uwzględniane są w modelach budowanych w oparciu o metodę elementów skończonych. W rozważaniach

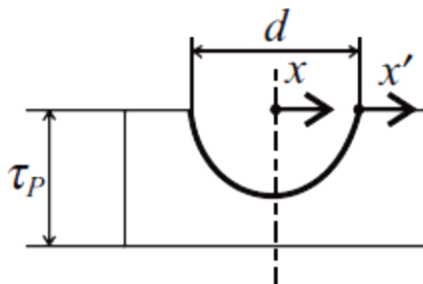
analitycznych, ze względu na złożoność sformułowania matematycznego, plastyczne właściwości materiałów połączenia są z reguły pomijane. Przedstawione w rozdziale analizy zakładają plastyczne zachowanie tylko w odniesieniu do warstwy adhezyjnej, co oczywiście jest uproszczeniem. Właściwości plastyczne elementów klejonych nadal pozostają kwestią wartą rozważenia, jednak uwzględniając stopień skomplikowania ich formuły matematycznej w odniesieniu do uzysku dokładności uzyskiwanych wyników możliwą do pominięcia.

Jedną z najważniejszych prac dotyczących analizy rozkładu naprężeń w warstwie adhezyjnej połączenia zakładkowego z uwzględnieniem plastycznych właściwości spoiny klejowej wykonał Hart-Smith (1973). Jego rozwiązanie uwzględniało plastyczne właściwości kleju włączając model sprężysto-plastyczny w rozkładzie naprężeń stycznych spoiny klejowej. Hart-Smith uwzględnił również w swoich rozważaniach różną sztywności klejonych elementów oraz wpływ temperatury na rozkład naprężeń. Badacz udowodnił, że uwzględniając plastyczność kleju, prognoza wytrzymałości połączenia jest dokładniejsza niż w przypadku analizy jedynie w zakresie sprężystym. Hart-Smith określił wytrzymałość połączenia zakładkowego przyjmując jako kryterium zniszczenia maksymalne odkształcenie postaciowe wywołane naprężeniami stycznymi. Założył również, że wszelkie różnice w sztywności klejonych elementów mają negatywny wpływ na wytrzymałości połączenia. Aby scharakteryzować zachowanie warstwy adhezyjnej, Hart-Smith wybrał model sprężysto-plastyczny (rys. 1.10.a). Co ważne, uwzględniając plastyczne właściwości warstwy adhezyjnej w zakresie naprężeń stycznych, nie pominął wpływu naprężeń normalnych prostopadłych do spoiny (w zakresie sprężystym). Naprężenia styczne warstwy adhezyjnej zamodelował jako dwuliniową zależność składającą się z części idealnie sprężystej oraz plastycznej w funkcji odkształcenia. Spoinę podzielił na trzy regiony (rys. 1.10.a): centralny o właściwościach sprężystych i długości d oraz dwa zewnętrzne o właściwościach plastycznych.

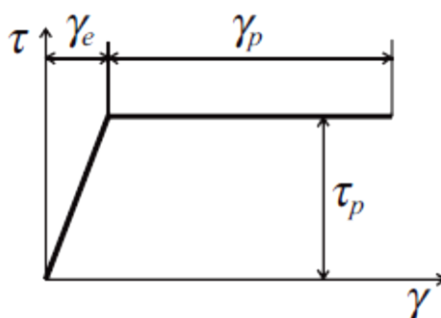


Rysunek 1.10. Model Harta-Smitha: a) spoina, b) i c) rozkład naprężeń stycznych w funkcji odkształcenia dla połączenia zakładkowego [28, 42]

b)



c)



Rysunek 1.10. c.d. Model Harta-Smitha: a) spoina, b) i c) rozkład naprężeń stycznych w funkcji odkształcenia dla połączenia zakładkowego [28, 42], gdzie: τ_p oznacza naprężenia styczne w regionie plastycznym warstwy adhezyjnej, γ_e i γ_p odkształcenie odpowiednio dla regionu sprężystego i plastycznego

Dla długości zakładki l , każdy z obszarów nieliniowych (plastycznych) będzie miał długość $(l-d)/2$. Współrzędne x i x' odnoszą się do obszarów wskazanych jak na rys. 1.10.b. Zagadnienie w obszarze sprężystym dla naprężeń stycznych (rys. 1.10.a) rozwiązywane jest w oparciu o zależność (23):

$$\tau = A_2 \cosh(2\lambda'x) + \tau_p(1 - K) \quad (23)$$

i równanie (24) wyrażające odkształcenie dla obszaru plastycznego (rys. 1.10.a):

$$\gamma = \gamma_e \{1 + 2K[(\lambda'x')^2 + \lambda'x' \tanh(\lambda'd)]\} \quad (24)$$

gdzie:

$$A_2 = \frac{K\tau_p}{\cosh(\lambda'd)} \quad (25)$$

$$\lambda' = \sqrt{\left[\frac{1 + 3(1 - \nu^2)}{4} \right] \frac{2G_a}{t_a E t}} \quad (26)$$

τ_p jest wartością naprężeń stycznych warstwy adhezyjnej w obszarze plastycznym, G_a modułem sprężystości wzdłużnej warstwy adhezyjnej, natomiast t_a grubością warstwy adhezyjnej. Wartości K i d obliczane są według zależności:

$$\frac{F}{l\tau_p} \lambda' l = 2\lambda' \frac{l-d}{2} + (1-K)\lambda' d + K \tanh(\lambda' d) \quad (27)$$

$$\frac{F}{\tau_p} \lambda'^2 \frac{l-d}{2} \left[1 + \frac{3k(1-\nu^2)}{k_b} \left(1 + \frac{t_a}{t} \right) \right] = 2 \frac{\gamma_p}{\gamma_e} + K \left(2\lambda' \frac{l-d}{2} \right)^2 \quad (28)$$

$$2 \frac{\gamma_p}{\gamma_e} = K \left[\left(2\lambda' \frac{l-d}{2} + \tanh(\lambda' d) \right)^2 - \tanh(\lambda' d) \right] \quad (29)$$

γ_e i γ_p są odpowiednio odkształceniem postaciowym obszaru sprężystego i plastycznego. Według Harta-Smitha, dobrze zaprojektowane połączenie to takie, które ulega zniszczeniu poza zakładką, czyli połączenie klejowe nigdy nie powinno być najsłabszą częścią połączenia. Dlatego jeśli istnieje ryzyko wystąpienia dużych naprężeń w warstwie adhezyjnej to należy je zminimalizować poprzez ukosowanie elementów łączonych na końcach zakładki lub miejscowe pogrubienie warstwy klejowej na końcach zakładki. Kilku autorów zaproponowało rozwiązania analityczne właściwe dla takich przypadków, m.in. Erdogan i Ratwani (1971), Reddy i Sinha (1975) oraz Thamm (1976).

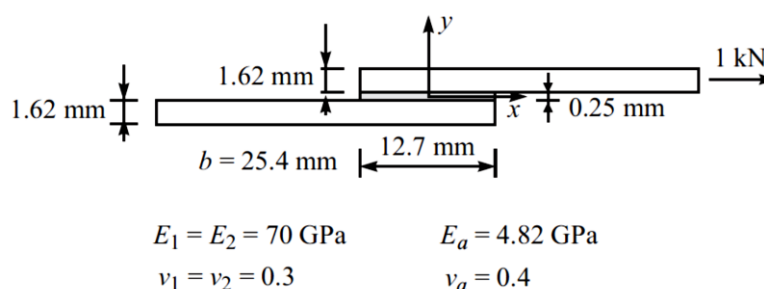
Bigwood i Crocombe (1990) również rozszerzyli opracowaną analizę połączeń adhezyjnych w zakresie sprężystym, wprowadzając nieliniowość materiałową w obliczeniach wytrzymałościowych spoiny. Nieliniowe właściwości kleju zostały zamodelowane z wykorzystaniem kryterium von Misesa. W tym celu opracowano sześć nieliniowych równań różniczkowych pierwszego rzędu. W 1992 roku dodatkowo

badacze uwzględnili w swojej analizie nieliniowe właściwości klejonych elementów, co w ówczesnych czasach było spektakularnym sukcesem.

W rozdziale 1.1.3 porównano najbardziej reprezentatywne modele analityczne, wskazując na ewolucję zagadnienia rozkładu naprężeń w spoinie połączenia zakładkowego.

1.1.3 Modele analityczne – porównanie

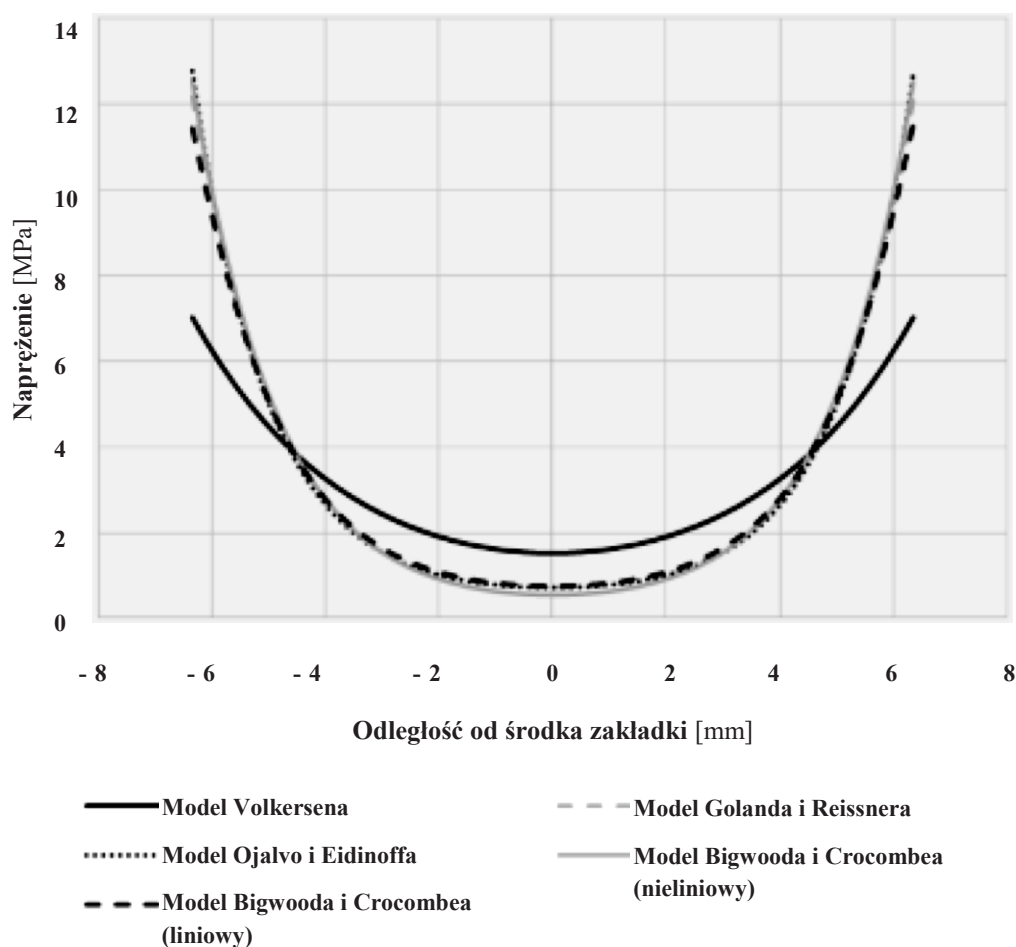
Do zaprezentowania zmian w rozkładzie naprężeń wykorzystano model połączenia jednozakładkowego (rys. 1.11.) obciążony siłą 1 kN [41].



Rysunek 1.11. Model połączenia zakładkowego wykorzystanego w analizie porównawczej modeli analitycznych [41]

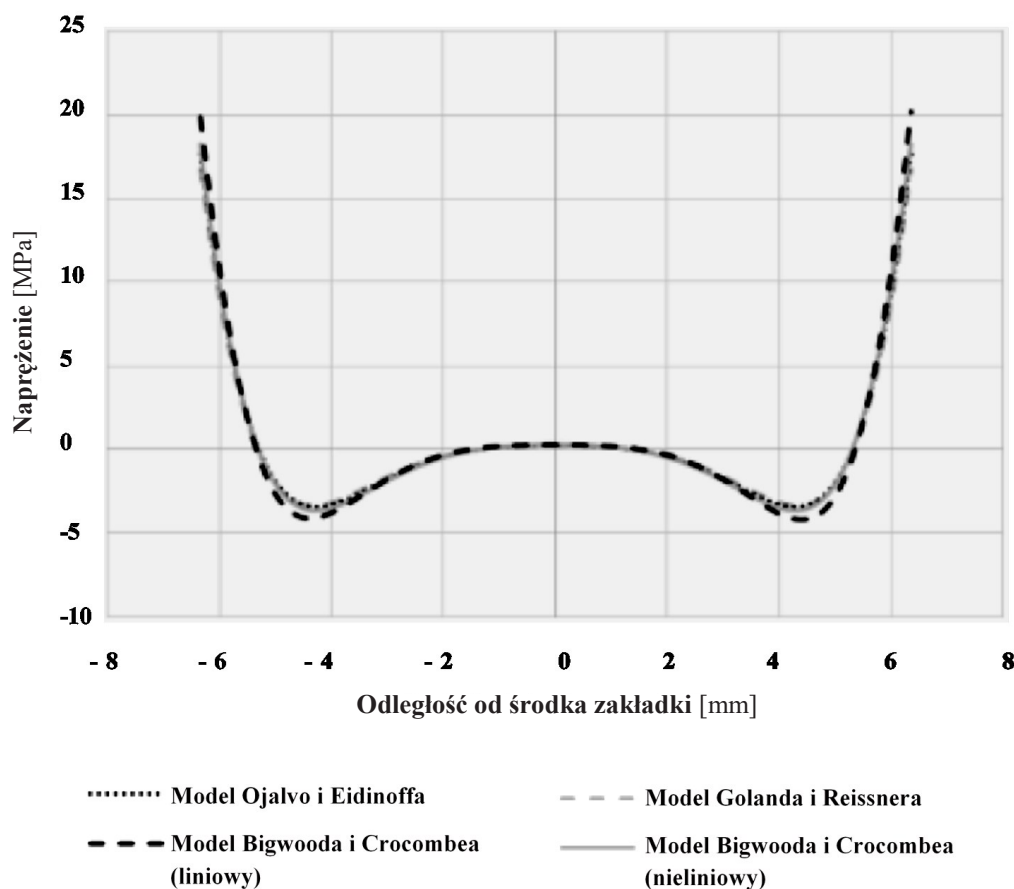
W rozważaniach wykorzystano następujące oznaczenia: E_1 , E_2 moduły sprężystości wzdłużnej klejonych elementów, E_a moduł sprężystości wzdłużnej warstwy adhezyjnej, ν_1 , ν_2 współczynnik Poissona klejonych elementów, ν_a współczynnik Poissona warstwy adhezyjnej.

W wyniku analizy porównano wyniki obliczeń wytrzymałościowych dla jednozakładkowego połączenia klejowego z wykorzystaniem modeli liniowych Volkersena (1938), Golanda i Reissnera (1944), Ojalvo i Eidinoffa (1978), liniowego Bigwooda i Crocombea (1989) oraz nieliniowego Bigwooda i Crocombea (1990). Na rys. 1.12. porównano rozkład naprężeń stycznych τ oraz normalnych σ w funkcji odległości od środka zakładki, gdzie umiejscowiono początek układu współrzędnych. W modelu Volkersena „przeszacowane” są wartości naprężeń τ w środku zakładki, natomiast niedoszacowane są naprężenia styczne na końcach zakładki, która to lokalizacja jest krytyczna w aspekcie wytrzymałości połączenia. Oczywiście jest to zrozumiałe, ponieważ był to pierwszy model, który kiedykolwiek został opracowany w zakresie rozkładu naprężeń w spoinie klejowej. Aby opracować model rozkładu naprężeń stycznych w spoinie, Volkersen musiał poczynić szereg założeń i uproszczeń.



Rysunek 1.12. Porównanie rozkładów naprężeń stycznych połączenia zakładkowego dla wybranych modeli analitycznych [28]

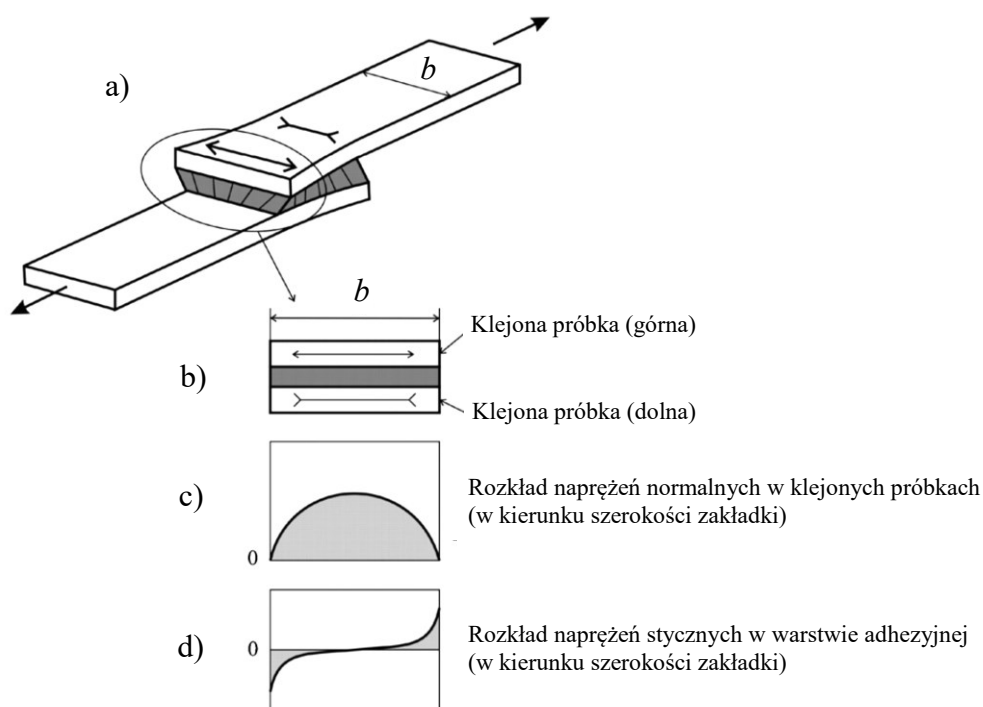
Warto również zauważyć, że z powodu braku uwzględnienia przez Volkarsena wtórnych momentów gnących oraz przyjęcia założenia, że warstwa adhezyjna ulega odkształceniu tylko pod wpływem naprężeń stycznych, analiza z wykorzystaniem tego modelu nie umożliwia oszacowania rozkładu naprężeń normalnych σ (rys. 1.13.). Wyniki obliczeń uzyskane za pomocą pozostałych modeli (z wyjątkiem Volkarsena) mają bardzo zbliżone wartości, co z punktu widzenia analizy inżynierskiej jest dowodem na to, jak wielkie znaczenie miała ewolucja modelu Volkarsena do postaci analizy opracowanej przez Golanda i Reissnera. Późniejsze i bardziej złożone modele analityczne, jak np. modele Ojalva i Eidinoffa czy Bigwooda i Crocombe (rys 1.12. i 1.13.), mają stosunkowo marginalny wpływ na podwyższenie dokładności obliczeń, przy jednoczesnym znacznym zwiększeniu czasu obliczeniowego.



Rysunek 1.13. Porównanie rozkładów naprężeń normalnych połączenia zakładkowego dla wybranych modeli analitycznych [28]

Większość modeli analitycznych definiujących rozkład naprężeń w warstwie adhezyjnej, które zostały opracowane od czasu, gdy Volkersen opublikował swoją teorię, rozpatruje zjawisko rozkładu naprężeń w połączeniu klejowym w dwóch wymiarach. Istnieją jednak pewne wyjątki zaprezentowane np. przez Adamsa i Peppiatta (1973) oraz Oterkusa (2004), którzy opracowali modele uwzględniające rozkład naprężeń w trzech wymiarach (rys. 1.14.). Wzięli pod uwagę rozkład naprężeń stycznych i normalnych w funkcji odległości od środka zakładki w kierunku jej szerokości. Autorzy ustalili, że naprężenie normalne σ klejonych próbek w kierunku szerokości jest maksymalne w środku połączenia i zerowe na krawędziach próbek (rys. 1.14.c). Naprężenie styczne τ warstwy adhezyjnej jest maksymalne na krawędziach i zerowe w jej środku (rys. 1.14.d). Adams i Peppiatt wykazali, że nawet gdy w analizie nie uwzględnia się wtórnych momentów gnących oddziałujących na połączenie, w warstwie adhezyjnej i klejonych próbkach istnieją naprężenia w kierunku szerokości zakładki, jednakże ich

wartości są znacznie mniejsze od naprężeń występujących na kierunku wzdłużnym (kierunek działania przyłożonego obciążenia) co sugeruje, iż analiza dwuwymiarowa jest wystarczająca dla większości rozpatrywanych przypadków [2]. Dodatkowo wprowadzenie nieliniowych właściwości łączonych elementów i warstwy adhezyjnej skutkuje koniecznością rozwiązywania zadań bardzo złożonych, często niemożliwych do rozwiązania sposobem analitycznym, dlatego też większość analiz opiera się na modelu liniowym sprężystym. Im bardziej kompleksowa i dokładna jest analiza, tym bardziej staje się ona złożona i tym trudniejsze jest uzyskanie prostego i skutecznego rozwiązania. Optymalnym rozwiązaniem analitycznym w aspekcie jakości analizy – czas obliczeniowy jest teoria Golanda i Reissnera.



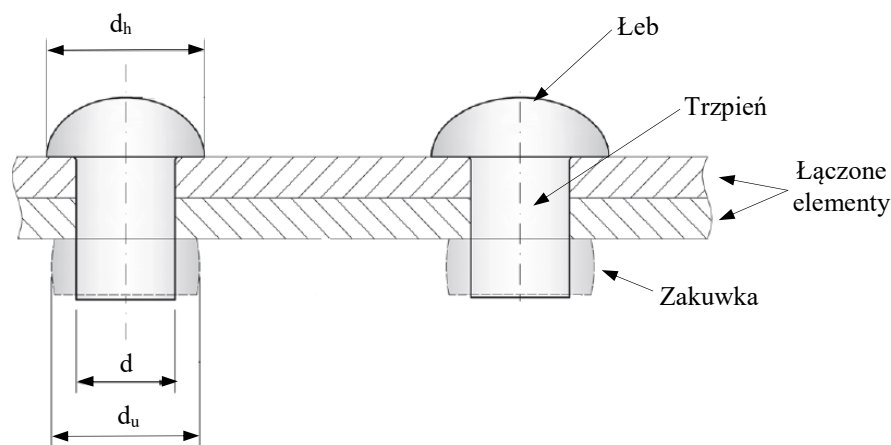
Rysunek 1.14. Rozkład naprężeń stycznych i normalnych połączenia zakładkowego rozpatrywanego w trzech wymiarach: a) widok ogólny, b), c) i d) rozkłady naprężeń włączone do analizy [41]

Inne rozwiązanie, które jest obecnie bardzo często stosowane, to wykorzystanie w analizach dotyczących połączeń klejowych nowoczesnych narzędzi obliczeniowych opartych na metodach numerycznych, w tym przede wszystkim metody elementów skończonych.

1.2 Połączenia pośrednie – mechaniczne

1.2.1 Połączenia nitowe

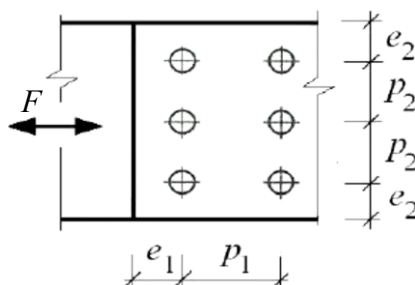
Nitowanie jest jedną z najstarszych metod łączenia elementów z powodzeniem stosowaną również obecnie w budowie maszyn. Tego rodzaju połączenia wykonywane są podczas montażu struktur statków, mostów czy zbiorników. Szerokie zastosowanie nitowania jako sposobu montażu części, znalazło również swoje miejsce w lotnictwie w budowie samolotów i śmigłowców. Nitowanie jest popularne dzięki prostocie technologii wykonania takiego połączenia. Efektem wykorzystania tej metody montażu części jest obniżenie kosztów produkcji, a dodatkowo zwiększenie podatność na automatyzację procesu montażu. Połączenie nitowe zapewnia również korzystny stan naprężeń własnych i stały docisk, a dodatkowo tłumi drgania konstrukcji. W najprostszym rozwiązaniu nit zbudowany jest z łba, trzpienia i zakuwki (rys.1.15.)



Rysunek 1.15. Schemat połączenia nitowego [82, 113]
 d_h , d_u i d to odpowiednio średnice łba, zakuwki i trzonu nitu

Standardowe praktyki doboru nitów do połączenia wymagają zdefiniowania stosunku wielkości geometrycznych łącznika d_h/d (stosunek średnicy łba nitu do średnicy trzpienia nitu) na poziomie 1,5 z dopuszczalnym zakresem tolerancji 1,3-1,8. Dobór długości i średnicy nitu zależy od kilku czynników i określany jest w zależności od wymiarów łączonych elementów, ich właściwości fizycznych, rodzaju stosowanych nitów itd. [80]. Stosunkowo często stosowaną praktyką mającą zastosowanie w nitowaniu tradycyjnym (tzn. na zimno nitami dwustronnymi) jest dobór długość nitu równej łącznej grubości łączonych elementów powiększonej o $1,5d$. Średnica nitu d powinna być również dobrana tak, aby była większa od trzech do czterech razy od grubości łączonego

elementu, a grubość zaciskowa nie powinna być z zasady większa niż $4,5d$ przy nitach zakuwanych i $6,5d$ przy nitach zaciskanych [112]. Istotną pozostaje kwestia rozmieszczenia łączników w połączeniu – należy tak dobrać ich liczbę, średnicę i sposób montażu, aby nie osłabić struktury łączonego elementu. Istnieje wiele publikacji traktujących o tym zagadnieniu [16, 88, 104, 112, 143], włączając krajowe (PN²) i międzynarodowe (AISC³, ASTM⁴) normy zawierające wymagania wykonywania połączeń w konstrukcjach i badań wytrzymałościowych węzłów nitowych. Analizując zalecane w publikacjach geometrie ułożenia nitów w węźle połączeniowym, można przyjąć, że wartość odległości osi otworu od krawędzi łączonego elementu e_1 , e_2 powinna być $\geq 1,2d$ [112], natomiast odległości między łącznikami w szwie p_2 powinny być $\geq 2,4d$ przy rozstawie między szwami $p_1 \geq 2,2d$ (rys. 1.16.). Graniczne wartości e_1 , e_2 i p_2 wskazane zostały w Polskiej Normie. Publikacje zagraniczne i starsze wydania PN wskazują na wartości e_1 , e_2 z przedziału $1,75d \div 2d$. Wymiary p_1 i p_2 określane zarówno we wcześniejszych publikacjach, jak i aktualnych są praktycznie identycznie.



Rysunek 1.16. Rekomendowane rozmieszczenie otworów na łączniki mechaniczne przy konstruowaniu połączeń zakładkowych [112]

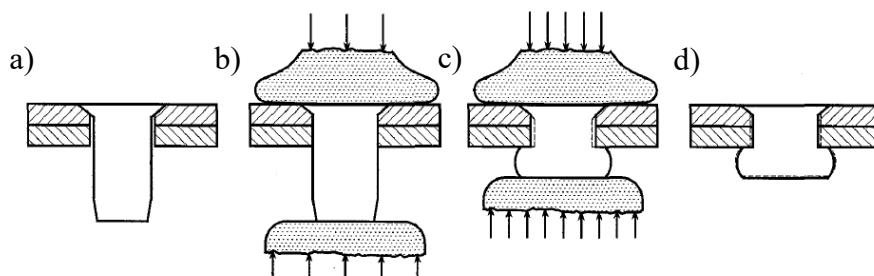
Proces technologiczny nitowania obejmuje szereg operacji (rys. 1.17.), w tym:

- złożenie i dopasowanie części,
- wyznaczenie rozmieszczenia otworów pod nity,
- wiercenie otworów nitowych,
- wytaczanie gniazd pod wpuszczane łby nitów,
- wstawienie nitów w otwory (rys. 1.17.a),
- zakuwanie (rys. 1.17.b i 1.17.c),
- kontrola połączenia po zakończeniu procesu (rys. 1.17.d) [63].

² PN – Polska Norma

³ AISC – American Institute of Steel Construction

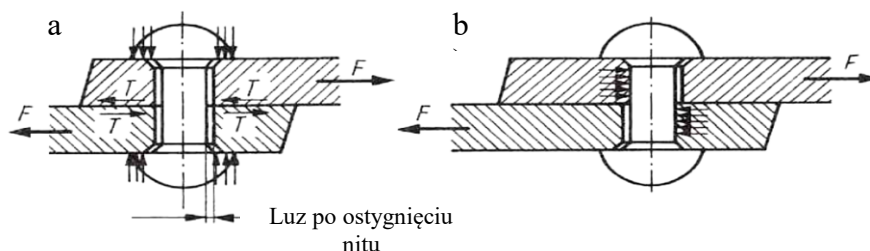
⁴ ASTM – International Society for Testing and Materials (American Society for Testing and Materials)



Rysunek 1.17. Etapy zakuwania nitu [5]

Nity mogą być zakuwane na zimno lub na gorąco, ręcznie lub mechanicznie. Przy nitowaniu na gorąco nit stalowy powinien być podgrzany do temperatury powyżej 700°C (nitowanie naciskowe) lub do 1000°C (nitowanie uderzeniowe). Proces nitowania powinien być zakończony przy temperaturze nie niższej niż 500°C . Na gorąco zakuwa się nity o średnicy trzonu $d \geq 10$ mm, natomiast na zimno nity stalowe o $d \leq 8$ mm. Nitowanie na gorąco powoduje powstanie dość znacznych naprężeń w trzonie nitu oraz w częściach łączonych. W przypadku łączenia na zimno naprężenia te są znacznie mniejsze, dlatego ten rodzaj nitowania może być stosowany do łączenia części wykonanych z różnych materiałów. Podczas wykonywania zakuwki łączone elementy są do siebie dociskane, przy czym wartość siły docisku zależy od sposobu nitowania. Przy zamykaniu nitów na gorąco, w wyniku skurczu wzdłużnego powodowanego obniżeniem temperatury nitu w jego trzonie powstają naprężenia rozciągające, wywołujące silny docisk łączonych elementów przez łeb i zakuwkę nitu. Jednocześnie skutek skurczu poprzecznego między otworami w blachach a nitem powstaje niewielki luz. Po obciążeniu połączenia siłą F (rys. 1.18.a), między łączonymi elementami powstają siły tarcia T , przenoszące całe obciążenie. Przy obciążeniu przekraczającym wartość siły tarcia wystąpi poślizg łączonych elementów w ramach luzu poprzecznego (rys. 1.18.b). W takim przypadku obciążenie w połączeniu jest częściowo przenoszone siłami tarcia, a częściowo przez nity, które narażone są na docisk powierzchniowy oraz ścinanie. Wartość naprężeń wywołujących docisk łączonych elementów oraz wartość siły tarcia jest w praktyce bardzo trudno określić, dlatego też, ze względu na konieczność uwzględnienia wpływu sił tarcia, przy obliczeniach wytrzymałościowych połączeń nitowanych na gorąco przyjmuje się umowne dopuszczalne naprężenia ścinające, oznaczone k_n . Przy stosowaniu nitów zamykanych na zimno wartości sił docisku i sił tarcia są znacznie mniejsze, dlatego też w tym przypadku w obliczeniach

wytrzymałościowych często pomija się wpływ sił tarcia, przyjmując do obliczeń dopuszczalne naprężenia ścinające k_t .



Rysunek 1.18. Rozkład sił w połączeniu zakładkowym-nitowym:
a) dla obciążenia przenoszonego przez siły tarcia, b) dla obciążenia przenoszonego przez nity wyłożone na ścinanie (jednocięte) [130]

W celu uproszczenia obliczeń wytrzymałościowych połączeń nitowych przyjmuje się następujące założenia:

- obciążenie rozkłada się równomiernie na wszystkie nity (w rzeczywistości najbardziej obciążone są łączniki skrajne),
- nity oblicza się na czyste ścinanie (jeżeli materiał nitu i łączonych części mają jednakową lub zbliżoną twardość, wystąpi bardziej złożony stan naprężeń),
- w połączeniach nitowanych na gorąco pomija się wpływ zmęczenia materiału, przyjmując jednakową wartość umownych dopuszczalnych naprężeń ścinających k_n przy obciążeniach statycznych i zmiennych (założenie to uwzględnia m.in. wpływ sił tarcia odciażających częściowo nity nawet przy obciążeniach zmiennych).

Uwzględniając powyższe założenia, do obliczeń nitów wykorzystuje się dwa warunki wytrzymałościowe [116]:

- na ścinanie – zależność (30):

$$\tau = \frac{F}{\frac{\pi d_0^2}{4} mn} \leq k_n (\text{lub } k_t) \quad (30)$$

gdzie F to siła zewnętrzna (obciążenie połączenia nitowego), m – liczba ścinanych przekrojów w jednym nicie, d_0 – średnica otworu pod nit, n – liczba nitów, k_n i k_t – dopuszczalne naprężenia ścinające⁵,

⁵ Wartości k_n , k_t i k_0 określa Polska Norma PN-EN ISO 898-1:2013-06 Własności mechaniczne części złącznych wykonanych ze stali węglowej oraz stopowej.

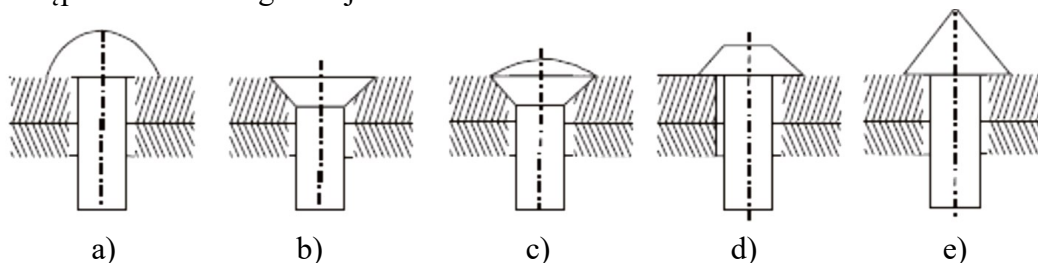
b) na naciski powierzchniowe – zależność (31):

$$p = \frac{F}{ngd_0} \leq k_0 \quad (31)$$

gdzie n to liczba nitów w połączeniu, g – grubość łączonych elementów (dla nitów jednociętych przy różnej grubości łączonych elementów – grubość blachy cieńszej), k_0 – dopuszczalny nacisk powierzchniowy (zgodnie z PN-EN ISO 898-1:2013-06). Iloczyn gd_0 przyjmuje się jako pole powierzchni nacisku na ściankę otworu.

W wyniku nadmiernych nacisków powierzchniowych zniszczeniu mogą ulec łączone elementy lub nity. Ponieważ ze względów ekonomicznych mniejsze straty wystąpią w przypadku zniszczenia nitów, należy porównać oba warunki, zakładając, że wytrzymałość nitów na ścinanie powinna być mniejsza od wytrzymałości łączonych elementów i nitów na naciski powierzchniowe.

W budowie statków powietrznych stosuje się m.in. nity zwykłe z różnymi rodzajami łbów (rys. 1.19.). Rodzaj stosowanych nitów zależy od charakteru połączenia i dostępu do nitowanego miejsca.



Rysunek 1.19. Rodzaje nitów zwykłych stosowanych w budowie płatowców:

a) nit z łbem kulistym, b) nit z łbem wpuszczanym płaskim, c) nit z łbem wpuszczanym kulistym, d) nit z łbem trapezowym, e) nit z łbem stożkowym

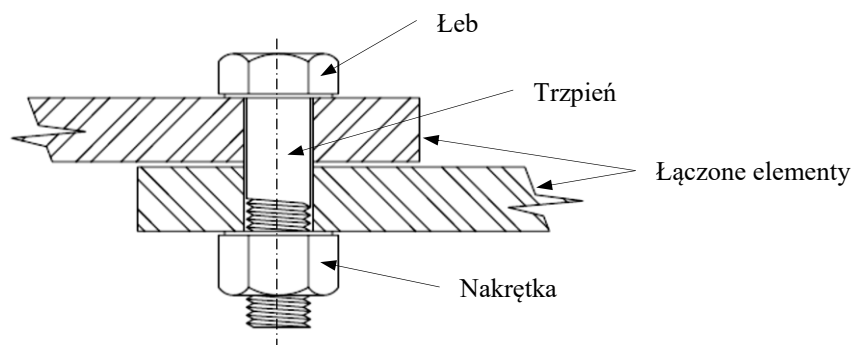
Nity z łbami wystającymi mogą być stosowane przy produkcji samolotów wolnych lub śmigłowców, w których ich wpływ na opór aerodynamiczny jest niewielki. W celu obniżenia oporów aerodynamicznych stosuje się nity stożkowe, wpuszczane w materiał, dzięki którym możliwe jest uzyskanie gładkich połączeń. Niestety są one mniej wytrzymałe na oderwanie łba, a ich montaż jest bardziej pracochłonny [63]. Połączenia nitowe stosowane w konstrukcjach płatowców statków powietrznych oprócz wielu zalet mają również szereg wad [144, 145]. Wykonanie takiego połączenia wymaga wywiercenia otworów pod nity, co osłabia strukturę materiału nawet o 25%. Wystające łby i zakuwki zaburzają aerodynamikę opływanych elementów, a ponadto

zwiększają masę statku powietrznego. Nitowanie wiąże się również z dużą liczbą operacji i czynności technologicznych potrzebnych do wykonania połączenia. Dodatkowo połączenie nitowe negatywnie wpływa na wytrzymałość zmęczeniową, a trące powierzchnie w otoczeniu otworów poddawane są procesom niszczącym i mogą korodować [67].

1.2.2 Połączenia śrubowe

Połączenia śrubowe (rys. 1.20.) należą do mechanicznych połączeń rozłącznych. Połączenia śrubowe mogą przenosić obciążenia osiowe i tnące oraz momenty zginające, ograniczając w różnym stopniu przemieszczenia łączonych części konstrukcji. Praktyka wskazuje, że stosowanie śrub w konstrukcjach jest korzystne ze względu na pewność połączenia oraz prostotę jego wykonania. Uwzględniając krótki czas potrzebny do zapewnienia pełnej nośności połączeń śrubowych, znajdują one zastosowanie przy montażu konstrukcji rozbieralnych [16, 71]. W konstrukcjach lotniczych połączenia śrubowe są najczęściej stosowane w łączeniu elementów wysoko obciążonych m.in. elementów zespołów napędowych oraz węzłów połączeniowych skrzydło-kałdub. Rzadziej wykorzystywane są w montażu elementów pokrycia statku powietrznego z kilku powodów, m.in:

- a) wystające łby śrub powodują zaburzenia opływu profilu lotniczego,
- b) masa łączników wpływa na zwiększenie masy całej konstrukcji,
- c) konieczność dostępu do obu stron łączzonego elementu [17].

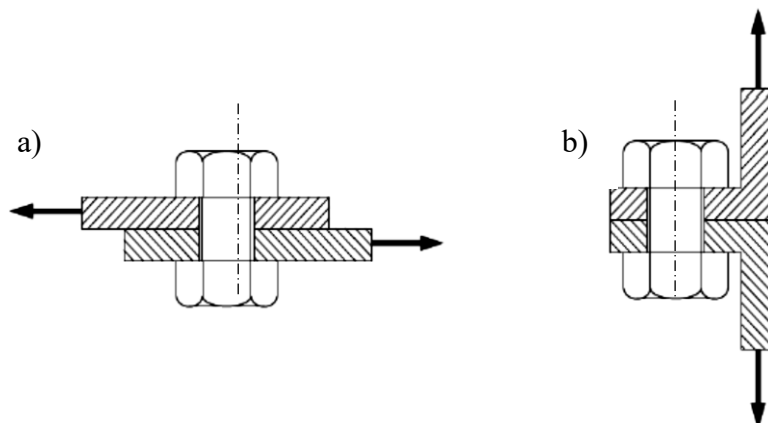


Rysunek 1.20. Schemat połączenia śrubowego [88]

Z uwagi na sposób wzajemnego usytuowania łączonych elementów oraz wyjęcie łączników, połączenia śrubowe dzielimy na:

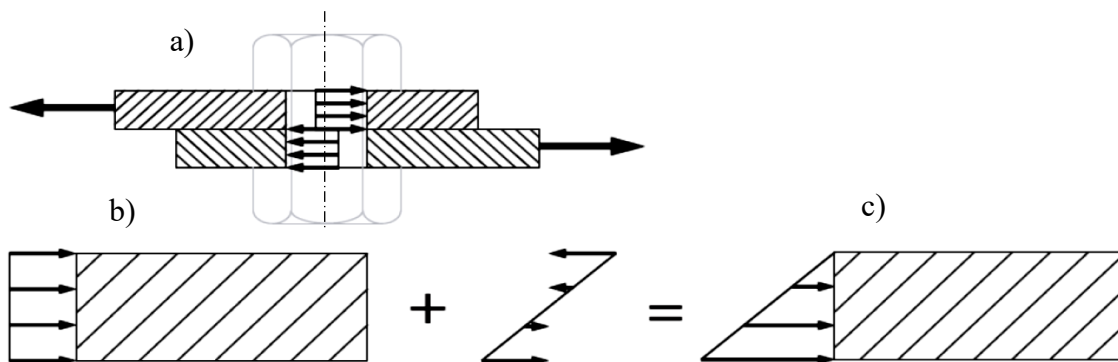
- a) zakładkowe (rys. 1.21.a), w których kierunek głównej składowej obciążenia jest prostopadły do osi łączników – śrub,

b) doczołowe (rys. 1.21.b), w których kierunek głównej składowej obciążenia złącza jest równoległy do osi łączników.



Rysunek 1.21. Rodzaje połączeń śrubowych: a) zakładkowe, b) doczołowe [5, 88]

Poglądowy rozkład naprężeń stycznych oddziałujących na elementy łącznik-powierzchnia łączonego elementu zamieszczono na rys. 1.22.a. Po uwzględnieniu zjawiska deformacji połączenia powodowanego wtórnymi momentami gnącymi (rys. 1.22.b), otrzymujemy niesymetryczny rozkład naprężeń (rys. 1.22.c), gdzie najbardziej wyężone części łącznika na ścinanie zlokalizowane będą w miejscu styku łączonych elementów.

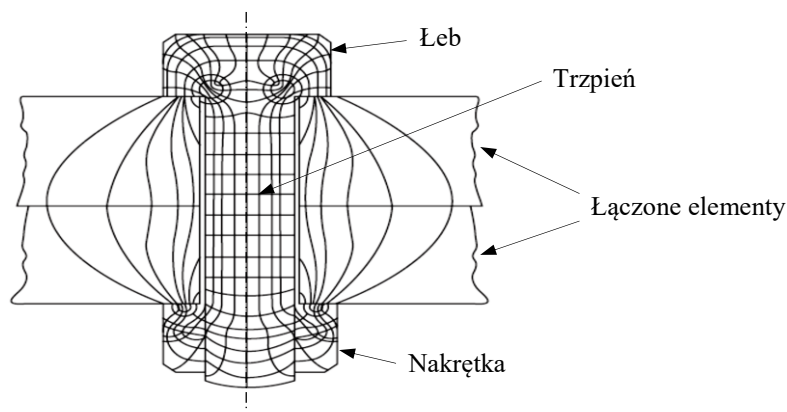


Rysunek 1.22. Rozkład naprężeń stycznych w połączeniu zakładkowym – śrubowym:
a) bez uwzględnienia wtórnych momentów gnących, b) naprężenia styczne wywołane obciążeniem i wtórnymi momentami gnącymi, c) wypadkowe naprężenia styczne [5]

W połączeniach zakładkowych kierunek głównej siły obciążającej złącze jest prostopadły do osi łączników powodując ścinanie i docisk trzpieni śrub. Połączenia zakładkowe mogą być zarówno niesprężone (zwykłe), jak i sprężone. W połączeniach sprężonych wywoływany jest wzajemny docisk łączonych powierzchni poprzez wstępny

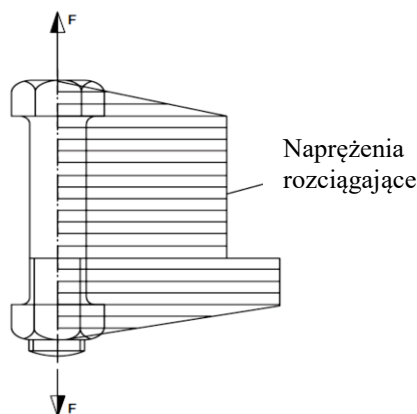
naciąg śrub. W takim połączeniu w przekazywaniu obciążenia bierze udział również tarcie między powierzchniami stykowymi [96].

W połączeniach doczołowych, odwrotnie niż w zakładkowych, kierunek głównej siły obciążającej złącze jest równoległy do osi łączników. W takiej konfiguracji nośność śruby jest ograniczona nośnością łącznika na rozciąganie. Klasyczny przypadek śruby podanej obciążeniu rozciągającemu [15, 76] zakłada idealną symetrię i prostopadłość powierzchni styku w połączeniu. Rozkład zlokalizowanych gradientów naprężeń dla takiego połączenia pokazano na rys. 1.23. Obszary o wysokich wartościach naprężeń (strefy spiętrzenia naprężeń) mogą wywoływać uszkodzenia łącznika [69], chyba że połączenie charakteryzuje równowaga po przekroczeniu granicy plastyczności. Wówczas nastąpi odciążenie łączników poprzez równomierne rozłożenie obciążenia w połączeniu.



Rysunek 1.23. Mapa naprężeń połączenia śrubowego w miejscu montażu łącznika mechanicznego [14, 15, 76]

Na rys. 1.24. przedstawiono uproszczony schemat rozkładu naprężeń w śrubie wzdłuż jej osi symetrii. Widoczne naprężenia rozciągające osiągają najwyższe wartości w miejscu, gdzie rozpoczyna się część gwintowana śruby.



Rysunek 1.24. Uproszczony model rozkładu naprężeń rozciągających połączenia śrubowego [15, 76]

Połączenia śrubowe, w których osadzone są we wcześniej przygotowanych otworach trzpienie walcowe wykazują podobieństwo do połączeń nitowych. Jednak ze względu na lepsze właściwości wytrzymałościowe materiału, z którego są wykonane, często wypierają metodę łączenia elementów nitami, szczególnie w połączeniach mocno wyteżonych [16, 139]. Zakładając, że większość połączeń śrubowych w lotnictwie to węzły pasowane, należy ich poziom wyteżenia szacować jak w połączeniach nitowych. W związku z powyższym śruby oblicza się na ścinanie wg. zależności (30), wykorzystywanej przy obliczaniu nitów oraz sprawdza się warunek na naciski powierzchniowe stosując zależność (31), przy założeniu iż $k_0 \approx 2k_t$ (k_0 – dopuszczalny nacisk powierzchniowy, k_t – dopuszczalne naprężenia ścinające) dla materiału o mniejszej wytrzymałości. Alternatywną zależność przywołuje PN [112]. Określone w niej procedury badań śrub na rozciąganie wykorzystują do tego celu równanie (32) wyrażające obliczeniową nośność śruby na rozciąganie:

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9f_{ub}A_S}{\gamma_{M2}} \quad (32)$$

gdzie f_u to wytrzymałość na rozciąganie materiału śruby, A_S – pole przekroju czynnego rdzenia śruby przy rozciąganiu, γ_{M2} – częściowy współczynnik nośności (dla śrub $\gamma_{M2} = 1.25$).

Do obliczenia śrub na ścinanie norma wskazuje zależność (33), która wyraża obliczeniową nośność śruby na ścinanie:

$$F_{v,Rd} \leq \frac{\alpha_v f_{ub} A_i}{\gamma_{M2}} \quad (33)$$

w której, gdy ścinana jest gwintowana część śruby $A_i = A_S$ oraz współczynnik $\alpha_v = 0,6$ dla stali klas 4.6, 5.6, 8.8 i $\alpha_v = 0,5$ dla klas 4.8, 5.8, 6.8 i 10.9, gdy zaś płaszczyzna ścinania nie przechodzi przez gwintowaną część śruby $A_i = A$ oraz $\alpha_v = 0,6$, gdzie A to pole przekroju trzpienia śruby.

Problematyka rozmieszczenia śrub w połączeniu podlega tym samym zasadom, jak w przypadku połączeń nitowych, co zostało szczegółowo opisane w rozdziale 1.2.1. Wartość odległości otworu od krawędzi łączonego materiału powinna spełniać warunek

$e_1, e_2 \geq 1,2d$, natomiast odległości między łącznikami $p_2 \geq 2,4d$ przy rozstawie między rzędami $p_1 \geq 2,2d$ (rys. 1.16.). Publikacje zagraniczne i starsze wydania PN [103, 105, 148] wskazują na wartości e_1 i e_2 z przedziału $1,5d \div 2d$, a nawet $\geq 2d$ [97]. Wymiary p_1 i p_2 wcześniej i obecnie definiowane są praktycznie identycznie.

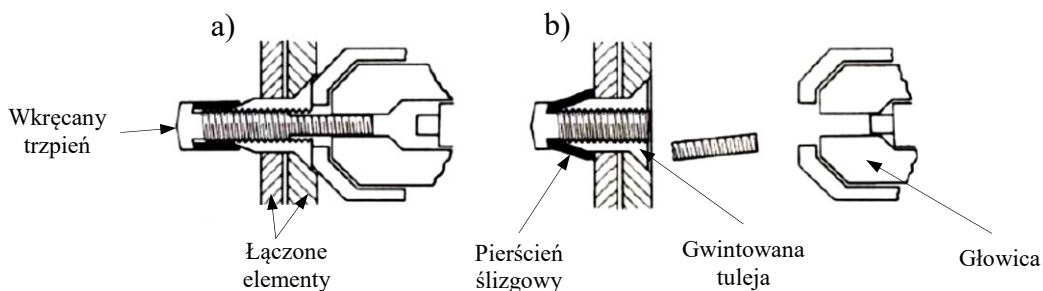
Obliczeniową nośność grupy łączników można przyjmować jako sumę nośności obliczeniowych pojedynczych łączników pod warunkiem, że nośność obliczeniowa na ścinanie każdego łącznika jest nie mniejsza od jego nośności obliczeniowej na naciski powierzchniowe. Jeżeli ten warunek nie jest spełniony, obliczeniową nośność łączników oblicza się jako iloczyn liczby łączników i najmniejszej nośności łącznika w grupie. W pojedynczym złączu zakładkowym z jednym szeregiem śrub należy stosować pod łbem i nakrętką podkładki [16, 88]. Ze względu na wtórne momenty gnące, śruba w takim połączeniu jest nie tylko ścinana i rozciągana, ale również zginany jest jej trzpień.

Obecnie stosuje się na szerszą skalę tzw. śruby sprężające, które są wykonane ze stali o wysokich wytrzymałościach lub stopów tytanu czy aluminium. Śruby te, np. Jo-Bolt® (rys. 1.25.) lub Hi-Lok® (rys. 1.26.), dokręca się (spręża) za pomocą specjalnego klucza (dynamometrycznego), który umożliwia kontrolę wstępnego obciążenia łączników. Zadaniem sprężenia śrub jest właściwe (określonym momentem siły) dociśnięcie do siebie łączonych elementów [50, 92], wskutek czego obciążenia w połączeniu zakładkowym są przenoszone również przez tarcie stykających się powierzchni łączonych elementów [136]. Do zalet tego typu połączeń należy zaliczyć:

- a) większą sztywność i odporność zmęczeniową złączy w stosunku do połączeń nitowych i śrubowych ze śrubami niesprężanymi,
- b) brak tendencji do relaksacji i pełzania (nośność połączenia nie zmienia się z upływem czasu),
- c) brak poślizgów w złączu.

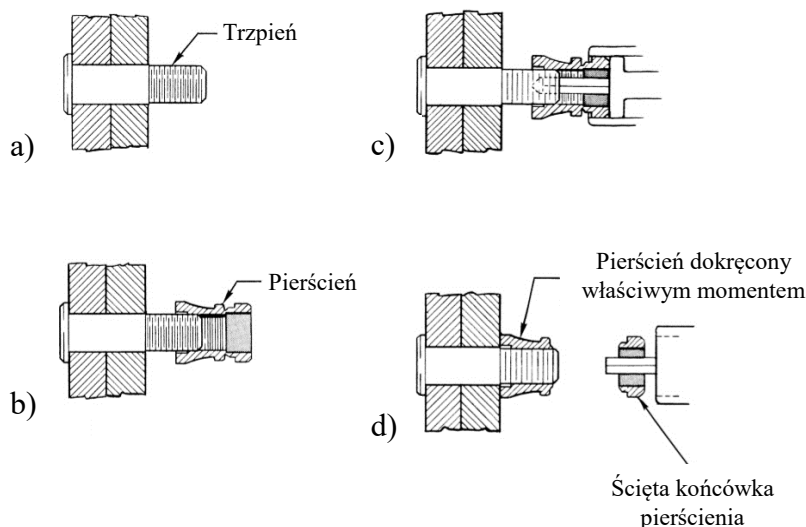
Stosowanie śrub sprężających wykonanych z materiałów o wysokich parametrach wytrzymałościowych w połączeniach zmniejsza liczbę niezbędnych łączników, czego konsekwencją jest mniejsza pracochłonność podczas ich montażu oraz zwiększenie wytrzymałości łączonych elementów poprzez ograniczenie liczby otworów. Ich walory użytkowe zadecydowały o popularności w technice lotniczej, gdzie obecnie znajdują bardzo szerokie zastosowanie.

Narzędzie wykorzystywane do montażu Jo-Bolt® wyposażone jest w głowicę, która umożliwia montaż łącznika poprzez unieruchomienie gwintowanej tulei z jednoczesnym obracaniem trzpienia (rys. 1.25.a). W ten sposób pierścień ślizgowy jest nasuwany na stożkowy koniec tulei i łączone elementy są do siebie dociskane (rys. 1.25.b). Obrót gwintowanego trzpienia jest możliwy dzięki spłaszczeniu jego końca, który wchodzi w otwór głowicy o odpowiednim kształcie. Po osiągnięciu odpowiedniej wartości momentu siły, trzpień jest ścinany równo z łbem (rys. 1.25.b).



Rysunek 1.25. Fazy montażu łącznika gwintowanego typu Jo-Bolt®:
a) montaż trzpienia i pierścienia ślizgowego(odkształcalnego) oraz skręcenie określonym momentem siły, b) docisk i ścięcie trzpienia prowadzącego tuleję zaciskową

Z kolei montaż łączników typu Hi-Lok® odbywa się podobnie jak w przypadku zwykłej śruby (rys. 1.26.a), natomiast rolę podkładki i nakrętki pełni pierścień ze zrywalną końcówką (rys. 1.26.b), która, nakręcając się na gwint trzpienia dociska łączone elementy (rys. 1.26.c) i zostaje ścięta przy osiągnięciu właściwego momentu siły dedykowanego dla połączenia (rys. 1.26.d).



Rysunek 1.26. Fazy montażu łącznika gwintowanego typu Hi-Lok®:
a) przygotowanie otworu i montaż trzpienia, b) montaż gwintowanego pierścienia, c) dokręcenie określonym momentem siły, d) docisk i ścięcie końcówki pierścienia, inspekcja wizualna

Powszechne stosowanie śrubowych połączeń montażowych wynika z łatwości i szybkości montażu śrub, stosunkowo niskiej pracochłonności tych czynności, a także uniezależnienia się od warunków atmosferycznych (np. w przypadku temperatury poniżej 0°C nie zaleca się wykonywać połączeń klejowych czy spawanych). Nie bez znaczenia jest również krótki czas potrzebny do uzyskania pełnej nośności połączeń śrubowych, a więc skrócenie czasu zaangażowania sprzętu montażowego. Ze względu na łatwość wykonania tych połączeń, łączenie śrubami stosuje się w różnych konstrukcjach, zwłaszcza w montażu elementów rozbieralnych. Śruby stosuje się również do połączeń tymczasowych, na czas montażu konstrukcji, do chwili zastąpienia ich innymi połączeniami. W tab. 1.2. scharakteryzowano właściwości połączeń mechanicznych.

Tabela 1.2. Analiza właściwości połączeń mechanicznych

Zalety	Wady
a) wytrzymałość i trwałość b) prostota wykonania c) możliwość łączenia w sposób bezpośredni różnych materiałów o różnych wymiarach geometrycznych d) możliwość łączenia elementów, których nie można spawać lub zgrzewać e) montaż z kontrolowanym dociskiem f) możliwość wykonania połączeń w niekorzystnych warunkach atmosferycznych g) zastosowanie w połączeniach ruchomych lub przegubowych h) niskie koszty wykonania i) prosta defektoskopia	a) konieczność odpowiedniego przygotowania łączonych powierzchni b) konieczność zabezpieczania powierzchni łączonych przed korozją c) koncentracja naprężeń d) brak szczelności e) osłabienie konstrukcji – otwory pod łączniki f) w lotnictwie – konieczność zabezpieczania przed zjawiskiem luzowania (samoodkręcenia)

1.3 Połączenia hybrydowe

Połączenie hybrydowe w ogólnym ujęciu oznacza wykonanie połączenia będącego kombinacją połączenia mechanicznego i połączenia adhezyjnego. Odpowiednia konfiguracja połączenia hybrydowego pozwala wyeliminować niedoskonałości poszczególnych technik łączenia, a w efekcie przygotować węzeł konstrukcyjny o lepszych właściwościach niż połączenia mechaniczne lub klejowe stosowane

indywidualnie. Szereg wykonanych badań eksperymentalnych i obliczeń [7, 29, 44, 53, 66, 78, 119, 127, 128, 133], w tym własnych [123, 124, 125, 126] wskazuje, że dzięki występującemu efektowi synergii można uzyskać lepsze właściwości wytrzymałościowe i użytkowe połączenia hybrydowego w porównaniu do np. samego połączenia klejowego czy mechanicznego.

Nieodłącznym zjawiskiem towarzyszącym zastosowaniu łączników mechanicznych jest wysoka koncentracja naprężeń (zjawisko spiętrzenia naprężeń) wokół ich otworów montażowych [32]. Tego rodzaju negatywne zjawisko można częściowo ograniczyć stosując w węźle konstrukcyjnym obok połączenia mechanicznego jednocześnie połączenia klejowe (adhezyjne). Połączenia klejowe są połączeniami powierzchniowymi bardziej wydajnymi strukturalnie, dzięki czemu efektywniej przenoszą obciążenia, redukując w ten sposób zjawisko koncentracji naprężeń.

Kombinację połączeń mechanicznych i klejenia zaczęto stosować z jednej strony – w celu odciążenia spoiny klejowej, z drugiej strony – w celu, jak już wcześniej wspomniano, ograniczenia negatywnego wpływu spiętrzenia naprężeń występującego w okolicach otworów montażowych. Dodatkowo w konstrukcjach lotniczych, hybrydowy (tzn. podwójny) system połączeń w węźle konstrukcyjnym jest rodzajem zabezpieczenia w sytuacji, kiedy jedno z połączeń – najczęściej połączenie klejowe [102] – ulegnie uszkodzeniu. W takim wypadku obciążenie może być dalej „przenoszone” przez łączniki mechaniczne [27]. Koncepcja takiego rozwiązania znacznie ułatwia m.in. proces certyfikacji konstrukcji lotniczych, w których w elementach pierwszorzędowych występują połączenia klejowe [4, 44, 98, 127].

Połączenia hybrydowe są również interesujące z technologicznego punktu widzenia – wykorzystanie łączników mechanicznych istotnie ułatwia montaż elementów i zastępuje kłopotliwy proces wytwarzania nacisków w trakcie utwardzania spoiny klejowej.

Właściwości mechaniczne i użytkowe połączeń hybrydowych zależą nie tylko od właściwości zastosowanego kleju, ale również od rodzaju łączników mechanicznych wykorzystywanych w połączeniu. Ponieważ w połączeniach hybrydowych zarówno ich parametry wytrzymałościowe, jak i użytkowe zależą w pierwszej kolejności od jakości wykonania połączenia adhezyjnego, problematyka technologii wykonania połączeń hybrydowych jest w dużym zakresie zbieżna z technologią wykonywania połączeń

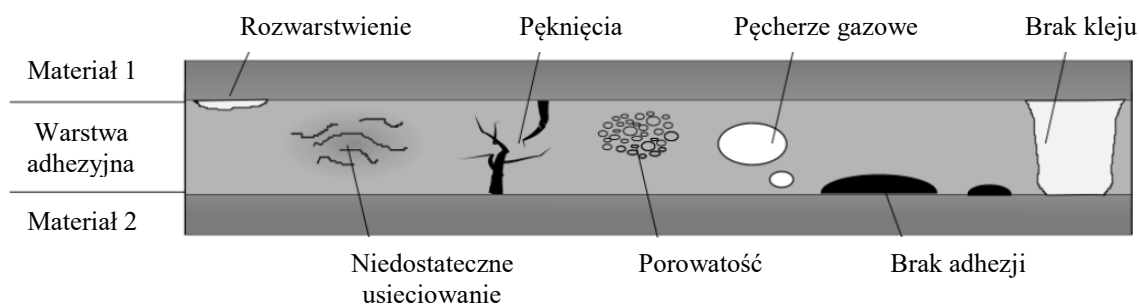
klejowych [131]. Do najistotniejszych parametrów wpływających na wytrzymałość połączenia adhezyjnego i w konsekwencji również połączenia hybrydowego należą:

- a) technologia łączenia,
- b) przygotowanie powierzchni
 - obróbka
 - oczyszczenie,
- c) parametry geometryczne
 - grubość spoiny klejowej
 - długość zakładki
 - konfiguracja połączenia,
- d) parametry środowiskowe
 - wilgotność
 - temperatura
 - nasycenie powietrza,
- e) właściwości materiału
 - kohezja materiału
 - właściwości adhezyjne.

Oprócz zagadnień dotyczących wpływu klejów i połączeń klejowych na wytrzymałość i trwałość połączeń hybrydowych w rozważaniach dotyczących tego rodzaju połączeń należy także uwzględnić problematykę związaną z połączeniami mechanicznymi. Oznacza to np., że liczba zastosowanych łączników mechanicznych, ich rozmieszczenie oraz rodzaj będą również decydowały o końcowych właściwościach połączenia hybrydowego. Eliminując wzajemnie ograniczenia poszczególnych połączeń składowych tworzących połączenie hybrydowe można uzyskać w końcowym efekcie połączenie, które w porównaniu z połączeniami tylko adhezyjnymi czy tylko mechanicznymi charakteryzuje [18, 91, 131]:

- a) większa sztywność (wpływ połączenia klejowego),
- b) większa wytrzymałość statyczna (wpływ łączników mechanicznych), wyższa trwałość zmęczeniowa (wpływ połączenia klejowego),
- c) wyższa niezawodność połączenia (redundancja występująca w węźle połączeniowym po zastosowaniu łączników mechanicznych),
- d) odporność na korozję (wpływ połączenia klejowego jako uszczelniacza).

Połączenia hybrydowe nie są jednak pozbawione wad. Jednymi z nich są utrudniona kontrola jakości ich wykonania oraz diagnostyka [156]. Błędy popełnione przy formowaniu spoiny klejowej mogą znacznie osłabić połączenie. Dodatkowo większość niedoskonałości spoin klejowych nie jest możliwa do wykrycia za pomocą prób nieniszczących. Ciągłe nie jest rozwiązana np. problematyka wad spoin określanych jako „kissing bond”, oznaczona na rys. 1.27. opisem „brak adhezji”.



Rysunek 1.27. Defekty połączeń klejowych. Brak adhezji – „kissing bond”

Jednym z najpopularniejszych sposobów diagnozowania stanu połączeń klejowych jest metoda ultradźwiękowa, jednak występujące w trakcie badania zjawisko szumów czyni metodę mało efektywną i bardzo często niewystarczająco wiarygodną. Alternatywą dla nieefektywnych metod ultradźwiękowych w diagnostyce połączeń adhezyjnych może być wykorzystanie tomografii komputerowej, przy czym obecnie eksploatowana aparatura pomiarowa jest aparaturą stacjonarną, której nie można wykorzystać w bezpośredniej eksploatacji statków powietrznych, np. w trakcie wykonywania obsług bieżących lub okresowych [21]. Wady warstwy adhezyjnej wpływają negatywnie nie tylko na wytrzymałość statyczną połączeń klejowych, ale również obniżają ich eksploatacyjną trwałość, szczególnie w warunkach zmiennego obciążenia i wilgotnego środowiska [32].

Aby w sposób właściwy przygotować połączenie hybrydowe należy wykonać szereg czynności wymagających dodatkowego czasu i wykwalifikowanego personelu w porównaniu np. z procesem przygotowania samych połączeń mechanicznych. W konsekwencji następuje wzrost kosztów ich montażu i produkcji elementów. Dodatkowo ograniczenia charakterystyczne dla połączeń klejowych dotyczą również połączeń hybrydowych, np. ograniczenia spoiny adhezyjnej będącej tworzywem polimerowym uniemożliwiają skuteczną eksploatację połączenia hybrydowego

w warunkach podwyższonej temperatury [16]. W tab. 1.3. zestawiono wady i zalety połączeń hybrydowych w odniesieniu do ich połączeń składowych.

Tabela 1.3. Analiza właściwości połączeń hybrydowych [44, 131, 132, 133]

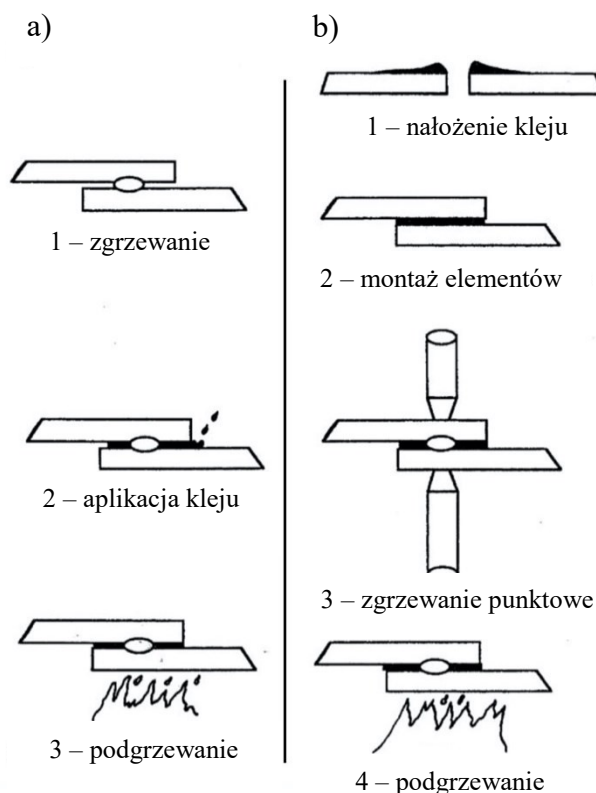
Zalety	Wady
a) wzrost wytrzymałości i nośności połączenia b) wzrost trwałości zmęczeniowej c) zwiększenie sztywności struktury d) podwyższona odporność na korozję e) wzrost niezawodności – wyższe bezpieczeństwo eksploatacji konstrukcji f) zmniejszenie masy połączenia przy zachowaniu parametrów wytrzymałościowych węzła połączeniowego g) dwuetapowy proces niszczenia, co ułatwia wykrycie uszkodzenia np. w warstwie klejowej przed całkowitym zniszczeniem połączenia	a) bardziej złożona technologia wykonania połączenia b) wzrost kosztów produkcji c) wyższa czasochłonność wykonywania połączenia d) ograniczona wytrzymałość termiczna

Pomimo wspomnianych mankamentów, w przemyśle lotniczym zastosowanie znalazło wiele konfiguracji połączeń hybrydowych, w tym połączenia zgrzewano-klejowe, nitowo-klejowe, klinczowo-klejowe oraz śrubowo-klejowe [98, 146].

1.3.1 Połączenia zgrzewano-klejowe

Połączenia zgrzewano-klejowe są rodzajem połączeń łączącym zalety zgrzewania punktowego i połączenia adhezyjnego [44, 131]. Tego rodzaju połączenie hybrydowe łączy zalety klejenia, co jest szczególnie zauważalne przy strukturach cienkościennych, z szybko, zautomatyzowaną techniką zgrzewania punktowego. Technologia wykonywania połączenia pozwala wyeliminować konieczność wytwarzania odpowiedniego docisku podczas utwardzania kleju. Spoiny adhezyjne cechuje niska wytrzymałość na oddzieranie [93, 107, 108], a obecność zgrzein niweluje ten problem, zabezpieczając połączenie przed negatywnym wpływem naprężeń normalnych prostopadłych do spoiny klejowej [22]. W przemyśle lotniczym takie połączenie po raz pierwszy wykorzystano w Związku Radzieckim w latach sześćdziesiątych XX wieku, m.in. przy produkcji samolotu An-24. Wykonanie takiego węzła polegało na punktowym

zgrzewaniu łączonych elementów, a następnie wypełnieniu przestrzeni między powierzchniami klejem. Technologię zaimplementowano i rozwijano na świecie pod nazwą „glue welding” (tzw. spawanie klejem). Zdefiniowano dwie techniki wykonywania takiego połączenia. Pierwsza metoda nazywana „flow-in” (tzw. napływowa – rys. 1.28.a) polega na wykonaniu w pierwszej kolejności połączenia zgrzewanego, a następnie w drugim etapie na wprowadzeniu kleju między nachodzące na siebie obszary. Aby połączenie spełniało stawiane wymagania, niezbędne jest wykorzystanie kleju o niskiej lepkości, który łatwo wniknie i szczelnie wypełni przestrzeń między łączonymi powierzchniami. Druga technika rozwijana w Stanach Zjednoczonych Ameryki zwana jest metodą „weld-through” (tzw. spawanie przez), gdzie w pierwszej kolejności na łączone elementy nakładane jest tworzywo adhezyjne, a następnie wykonywana jest zgrzeina (rys 1.28.b). Tak przygotowany węzeł zostaje następnie utwardzony w podwyższonej temperaturze [44].



Rysunek 1.28. Połączenie zgrzewano-klejowe: a) metoda „flow-in”, b) metoda „weld-through” [44]

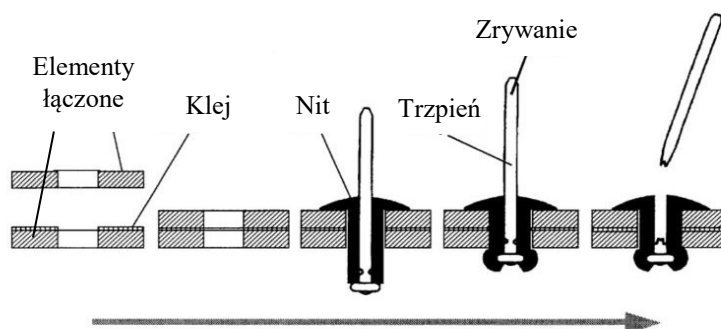
W literaturze naukowej połączeniom zgrzewano-klejowym nie poświęca się zbyt wiele uwagi. Dostępne dane literaturowe potwierdzają jednak zwiększoną wytrzymałość takiego

rodzaju połączenia hybrydowego w porównaniu z połączeniem zgrzewanym [29, 31]. W odniesieniu do łączenia elementów z wykorzystaniem łączników mechanicznych, połączenia zgrzewano-klejowe charakteryzują następujące zalety:

- a) obniżone koszty produkcji i podatność na automatyzację,
- b) wysoka wytrzymałość statyczna,
- c) podwyższona wytrzymałość zmęczeniowa,
- d) zwiększona odporność na korozję,
- e) szczelność połączenia,
- f) efektywniejsza amortyzacja drgań.

1.3.2 Połączenie nitowo-klejowe

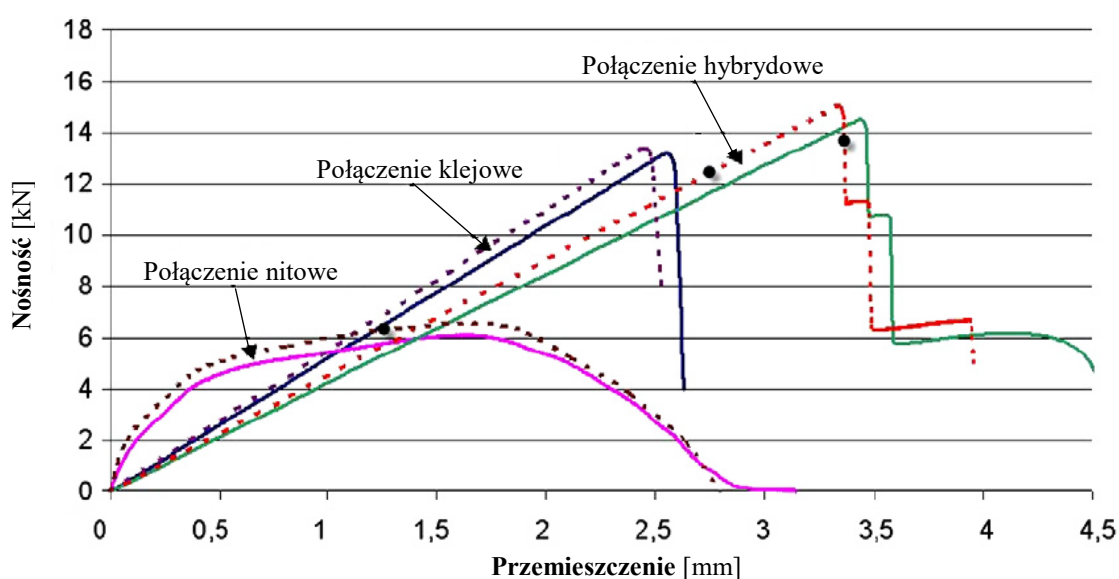
Połączenia nitowo-klejowe są coraz szerzej stosowane w procesie wytwarzania różnych maszyn i urządzeń, w tym w budowie statków powietrznych. Kombinacja klejenia i nitowania w jednym węźle konstrukcyjnym pozwala uzyskać połączenie o korzystniejszych parametrach wytrzymałościowych, wyższej trwałości zmęczeniowej w porównaniu z każdą z tych technologii stosowaną samodzielnie. Ograniczając liczbę łączników mechanicznych można również zredukować masę połączenia hybrydowego tego rodzaju w porównaniu z samym połączeniem mechanicznym. Ponadto dzięki wprowadzeniu nitów do połączenia, wyklucza się konieczność wykorzystywania dodatkowych narzędzi w procesie utwardzania spoiny. Proces przygotowania takiego połączenia obejmuje w pierwszej fazie wywiercenie odpowiednich otworów pod nity. Montaż takiego połączenia ogranicza się do spasowania elementów z uprzednio naniesioną warstwą tworzywa adhezyjnego i wprowadzenia nitów w otwory [44]. Proces wytwarzania połączenia nitowo-klejowego przedstawiono na rys. 1.29.



Rysunek 1.29. Schemat wytwarzania połączenia nitowo-klejowego [68]

W połączeniu nitowo-klejowym, podobnie jak w połączeniu zgrzewano-klejowym, poszczególne połączenia podstawowe wpływają pozytywnie na wybrane właściwości połączenia hybrydowego, eliminując niedoskonałości połączeń składowych. Nity pozwalają osiągnąć wysoką wytrzymałość mechaniczną połączenia, natomiast zastosowanie kleju podnosi odporność na zmęczenie i korozję węzła konstrukcyjnego [5, 35, 64, 76, 119].

W ostatnich latach, ze względu na popularność tego rodzaju połączenia, prowadzono szereg badań, których celem było określenie właściwości zarówno wytrzymałościowych, jak również użytkowych połączeń hybrydowych. Wykonane eksperymenty i badania [7, 17, 35, 119, 131, 132, 133], w tym własne [123, 124, 125, 126] potwierdziły ich zalety w odniesieniu do połączeń klejowych czy nitowanych zarówno w obszarze parametrów wytrzymałościowych, jak i użytkowych. Przykładowe wyniki badań nośności połączeń nitowo-klejowych dokumentujące ich przewagę w omawianym aspekcie zaprezentowano na rys. 1.30. Testy obciążenia połączeń, prezentowanych w funkcji przemieszczenia trawersy maszyny wytrzymałościowej, przeprowadzono na próbkach aluminiowych dwuzakładkowych łączonych trzema różnymi technikami: klejenia, nitowania oraz metodą hybrydową w konfiguracji klejowo-nitowej. Próbkę o wymiarach zakładki $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ były łączone pięcioma nitami oraz klejem poliuretanowym. Liczbę nitów określono na podstawie badań wstępnych. Oszacowano, iż zwiększenie liczby nitów powyżej pięciu prowadzić będzie do osłabienia materiału, a w efekcie szybszego zniszczenia połączenia.

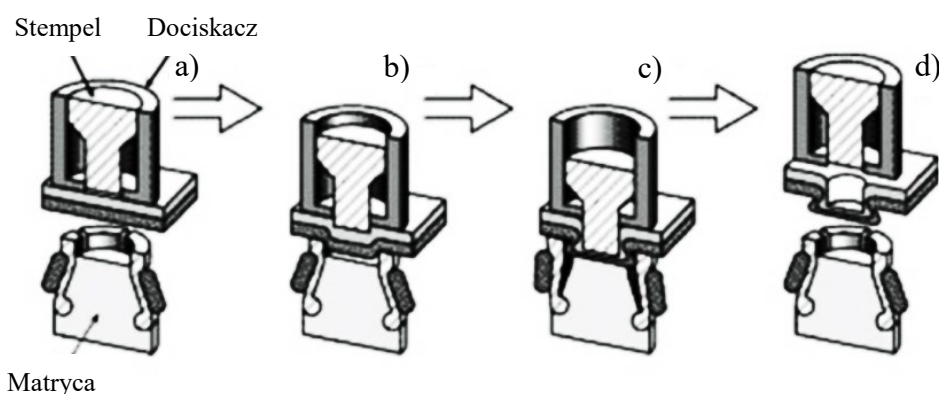


Rysunek 1.30. Nośność badanych połączeń: mechanicznego (nitowego), klejowego i hybrydowego w funkcji przemieszczenia trawersy maszyny wytrzymałościowej [132]

Analizując wyniki badań eksperymentalnych (wykresy linią ciągłą) dowiedziono, iż nośność złącza hybrydowego była o około 11% wyższa od podobnego geometrycznie połączenia klejowego. Zastosowanie kleju łącznie z nitami pozwoliło zwiększyć nośność połączenia o około 130% w porównaniu z połączeniem nitowym [132]. Dodatkowo rezultaty eksperymentu odniesiono do badań numerycznych opartych na metodzie elementów skończonych wykonanych przy wykorzystaniu oprogramowania Abaqus, których analizy przedstawiono na rys. 1.30. w formie wykresów punktowych.

1.3.3 Połączenie klinczowo-klejowe

Połączenie klinczowo-klejowe to kombinacja kilku procesów technologicznych w tym tłoczenia, prasowania i klejenia, w wyniku których uzyskuje się trwałe połączenie elementów konstrukcyjnych. Klinczowanie to technika łączenia blach bez użycia łączników, oparta jedynie na lokalnym przetłoczeniu materiału. Przetłaczanie punktowe jest atrakcyjną alternatywą dla łączenia blach w porównaniu z ich punktowym zgrzewaniem oporowym, szczególnie w warunkach występowania w otoczeniu montażowym gazów palnych np. w kopalniach, szybach wydobywczych itp. Proces przetłaczania punktowego, składający się z czterech zasadniczych faz, przedstawiono na rys. 1.31. Samo klinczowanie to kombinacja dwóch realizowanych kolejno procesów – tłoczenia i prasowania – skutkujących trwałym połączeniem wykonanym bez użycia dodatkowych elementów pośredniczących.

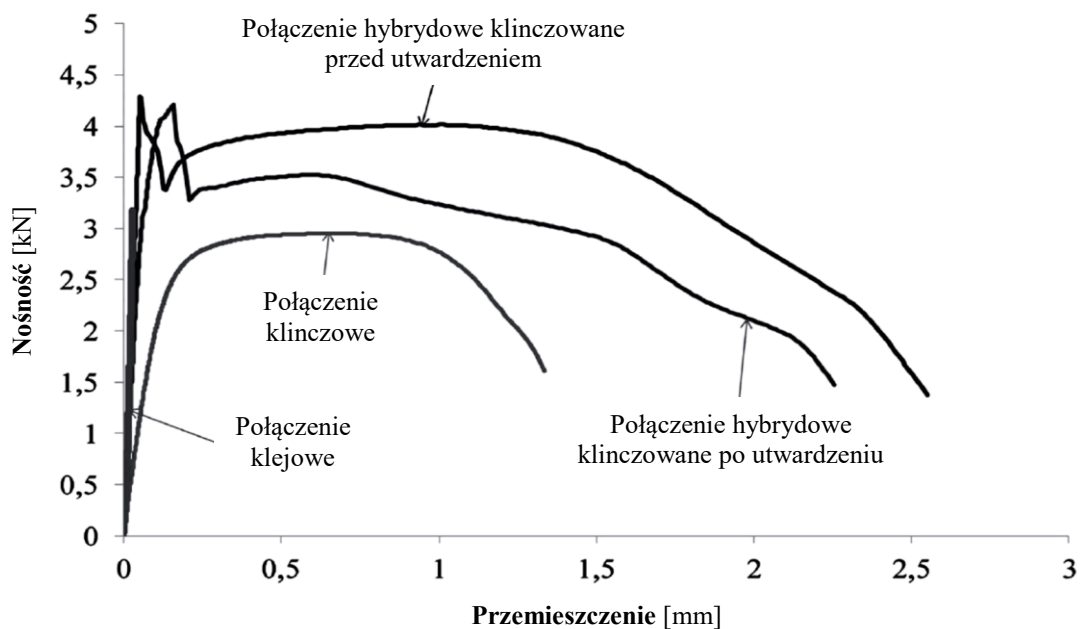


Rysunek 1.31. Proces przetłaczania punktowego [44]:
a) umieszczenie łączonych elementów między stemplem i matrycą, b) wstępny docisk, c) docisk właściwy i formowanie połączenia, d) zwolnienie nacisku stempla

Wytrzymałość takiego połączenia nie jest jednak wysoka na tle innych metod łączenia elementów metalowych. Wzbogacenie takiego węzła konstrukcyjnego o spoinę

adhezyjną znacząco podnosi nośność połączenia, tworząc nową metodę łączenia hybrydowego mogącą znaleźć szerokie zastosowanie w przemyśle [68, 100].

W dotychczasowych badaniach nie poświęcono zbyt wiele uwagi połączeniom klinczowo-klejowym. Dostępne dane potwierdzają jednak zwiększoną wytrzymałość takiego rodzaju połączenia hybrydowego w porównaniu z połączeniem klinczowym [8, 31, 44]. Przykładowe wyniki badań połączeń hybrydowych – klinczowo-klejowych zaprezentowano na rys. 1.32. W testach wykorzystano próbki wykonane z dwóch płytek ze stali niskowęglowej o wymiarach 132 mm × 35 mm × 1 mm połączonych „na zakładkę” o długości 35 mm. Połączenie hybrydowe przygotowano w dwóch wariantach, przy wykorzystaniu odmiennych metod. W pierwszej metodzie utwardzano klej, a następnie przetłaczano blachy, w drugiej natomiast utwardzano spoinę adhezyjną w już przetłoczonych blachach [131]. Choć nie zauważono znaczących różnic w geometrii połączeń klinczowego i klinczowo-klejowego, zaobserwowano znaczący wzrost parametrów wytrzymałościowych połączeń hybrydowych. Dodatkowo, w przypadku gdy łączone elementy klinczowano przed utwardzeniem kleju, połączenie wykazywało większą sztywność.



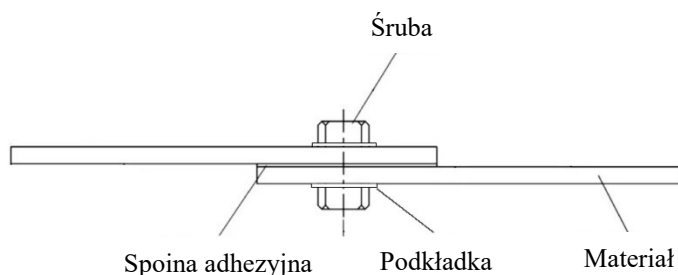
Rysunek 1.32. Nośność połączeń hybrydowych (klinczowo-klejowych) w funkcji przemieszczenia trawersy maszyny wytrzymałościowej [131]

Stwierdzono, iż wprowadzenie kleju do połączeń klinczowych zwiększa ich nośność o około 30%. Dodatkowo połączenie adhezyjne, które cechuje niska odporność

termiczna, poprzez przetłoczenie punktowe uzyskuje kompensację tej niedoskonałości, tworząc połączenie hybrydowe o lepszych właściwościach wytrzymałościowych w podwyższonej temperaturze. Stąd ograniczenia połączenia klejowego zostają złagodzone poprzez obecność przetłoczenia punktowego [31, 44, 131].

1.3.4 Połączenie śrubowo-klejowe

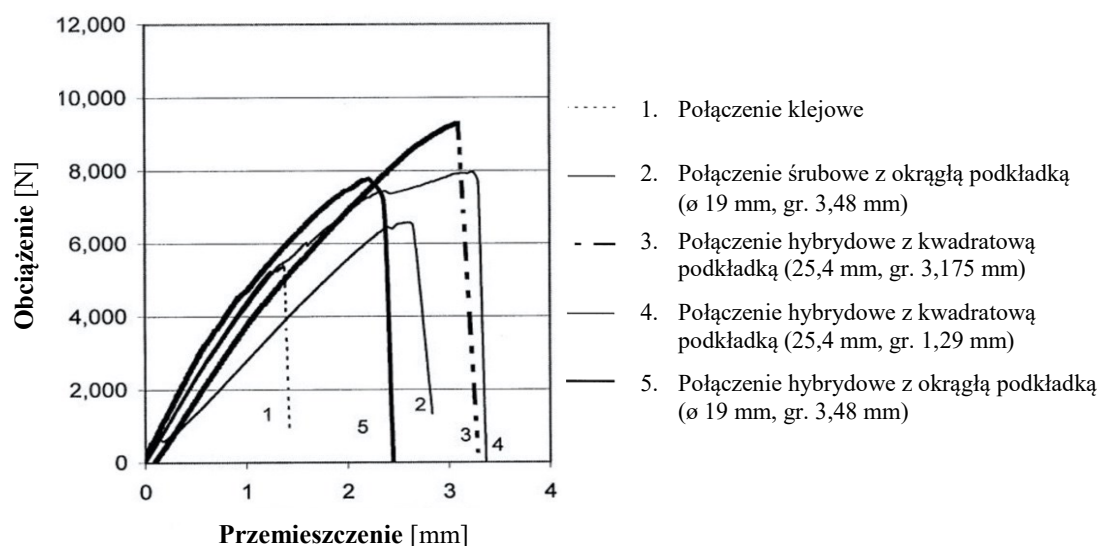
Połączenia śrubowo-klejowe (rys. 1.33.), podobnie jak połączenia nitowo-klejowe są powszechnie stosowane w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym, m.in. do łączenia elementów wykonanych z materiałów kompozytowych. Zasadniczą zaletą tego rodzaju połączeń jest ich relatywnie wysoka nośność oraz nieznaczna podatność na odkształcenia. Dodatkowo ten rodzaj połączeń zabezpiecza łączone elementy przed negatywnymi efektami nacisków powierzchniowych wywołanych przez łączniki mechaniczne działające na materiał w strefie otworów. Jest to zaleta szczególnie istotna, która została wykorzystana przez inżynierów przy łączeniu elementów z tworzyw sztucznych, w tym kompozytów polimerowych. Uwzględniając zalety połączeń klejowych, można przypuszczać, iż to właśnie ten rodzaj połączeń ma największy potencjał w zakresie łączenia elementów kompozytowych konstrukcji lotniczych. Biorąc jednak pod uwagę zjawisko starzenia tworzyw adhezyjnych w warunkach eksploatacji statków powietrznych oraz konieczność certyfikacji struktur lotniczych również w zakresie ich montażu, okazuje się, iż dużo łatwiej certyfikować konstrukcje z połączeniami hybrydowymi niż tylko z połączeniami klejowymi [30].



Rysunek 1.33. Schemat połączenia śrubowo-klejowego [19]

Prezentowane w literaturze wyniki badań eksperymentalnych [32, 44, 122, 123, 127] połączeń śrubowo-klejowych stosowanych w strukturach kompozytowych wskazują na ich lepsze właściwości wytrzymałościowe w porównaniu z połączeniami klejowymi czy połączeniami mechanicznymi. Przykładowe testy eksperymentalne prezentowane w literaturze [53] przeprowadzono na płytach o grubości 3 mm wykonanych

z kompozytów z włókien typu E-glass z zakładką $25,4 \text{ mm} \times 25,4 \text{ mm}$. Do wykonania połączeń użyto kleju epoksydowego, śrub o średnicy 6,35 mm z sześciokątnym łbem i kilka wariantów podkładek (połączenie jednozakładkowe, rys. 1.33.). W przypadku badań połączeń hybrydowych (śrubowo-klejowych) obserwowano zarówno ich lepszą nośność (rys. 1.34.), jak i trwałość zmęczeniową (rys. 1.35.). Niska wytrzymałość spoiny klejowej na jej oddzieranie została wyeliminowana przez obecność śruby w połączeniu. Dodatkowo w badaniach obserwowano pozytywny wpływ podkładek montowanych z łącznikami śrubowymi na wytrzymałość połączenia. Podkładka kwadratowa o boku 25,4 mm zapewniała lepsze parametry połączenia w porównaniu z podkładką okrągłą o średnicy 19 mm (mniejsze pole powierzchni). Podkładka kwadratowa pokrywała cały obszar łączonych powierzchni, gwarantując odpowiedni, równomierny docisk i lepsze zabezpieczenie przed zniszczeniem spoiny klejowej (wpływała na zmniejszenie wartości naprężeń oddzierających na końcach zakładki) w porównaniu z podkładką okrągłą, która oddziaływała tylko częściowo na pole powierzchni połączenia adhezyjnego. Zależności nośności połączenia od przemieszczenia prezentują się najkorzystniej dla połączeń hybrydowych nr 3 i 4 (rys. 1.34.).

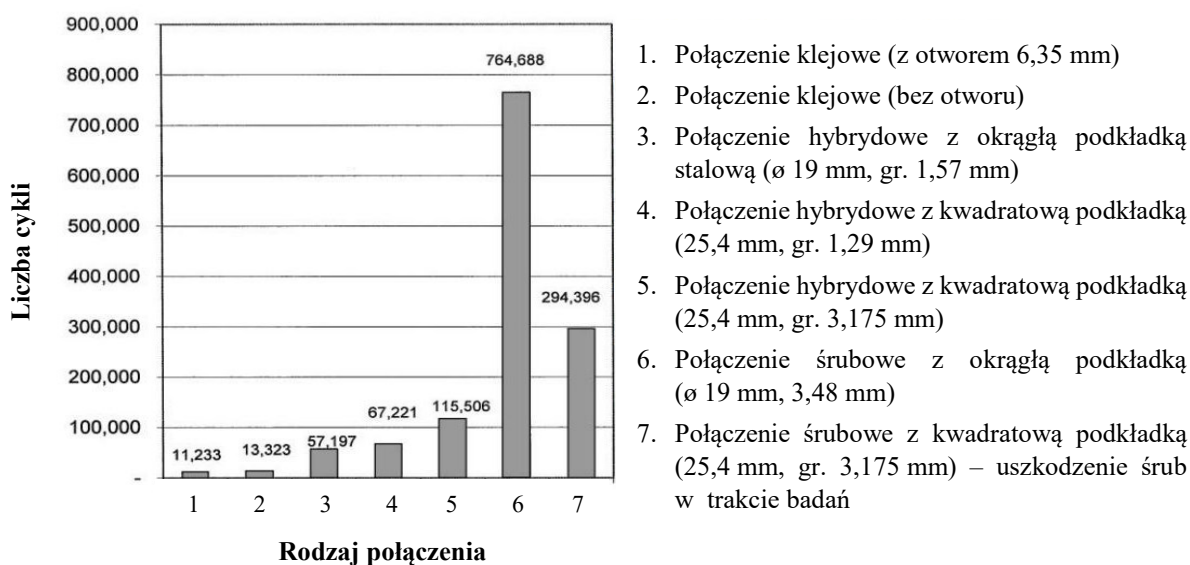


Rysunek 1.34. Wyniki badań eksperymentalnych nośności połączeń klejowych, śrubowych i hybrydowych (śrubowo-klejowych) [53]

Połączenie śrubowo-klejowe z podkładką okrągłą nr 5 osiągnęło nośność większą o około 20% w porównaniu z połączeniem śrubowym nr 2 i o około 40% w odniesieniu do połączenia klejowego nr 1. Porównując nośność połączenia hybrydowego z grubszą (3,175 mm), kwadratową podkładką nr 3 wykazano wzrost nośności o około 40% i 70%

w odniesieniu odpowiednio do połączenia hybrydowego z okrągłą podkładką nr 5 i połączenia klejowego nr 1. Uśredniając wyniki eksperymentu dla wszystkich prób, uzyskano nośność połączenia klejowego równą 4,8 kN, natomiast dla połączenia śrubowego 6,6 kN. Nośność połączenia hybrydowego z podkładką kwadratową (gr. 3,175 mm) wyniosła 8,75 kN, co daje wzrost w porównaniu z połączeniem klejowym i śrubowym o odpowiednio 80% i 30%.

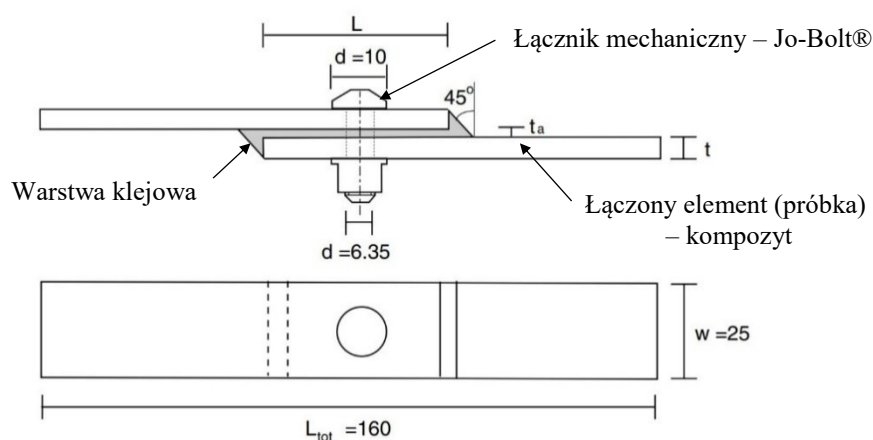
Dla tych samych wariantów połączeń przeprowadzono badania zmęczeniowe. Próbkę poddawano odpowiednio obciążeniom maksymalnym 2,63 kN, 3,11 kN i 3,55 kN co stanowi odpowiednio 55%, 65% i 74% nośności badanego połączenia klejowego. Otrzymane wyniki potwierdziły 4-krotny wzrost trwałości zmęczeniowej połączenia hybrydowego nr 3 (rys. 1.35.) z podkładką okrągłą w odniesieniu do połączenia klejowego oraz 5-krotny dla połączenia hybrydowego nr 4 z podkładką kwadratową o grubości 1,29 mm i 8-krotny dla połączenia hybrydowego nr 5 z podkładką kwadratową o grubości 3,175 mm.



Rysunek 1.35. Trwałość zmęczeniowa – wyniki badań eksperymentalnych dla połączeń klejowych, śrubowych i hybrydowych (śrubowo-klejowych) poddawanych obciążeniu 3,55 kN [53]

W kolejnym eksperymencie [79], w którym poddano analizie połączenia hybrydowe śrubowo-klejowe, wykorzystano materiał kompozytowy przygotowany na bazie włókna węglowego Toray T700 i żywicy epoksydowej Shell Epicote 828LV. Badania przeprowadzono na laminacie o grubości 1,6 mm oraz 3,2 mm. Geometrię połączenia przedstawiono na rys. 1.36. Płyty połączono w konfiguracji jednozakładkowej,

wykorzystując dwa różne kleje. Pierwszym był dwuskładnikowy strukturalny klej poliuretanowy Pliogrip 7400/7410⁶, który cechuje niski moduł sprężystości wzdłużnej oraz duża podatność na odkształcenia. Drugim klejem zastosowanym w eksperymencie był dwuskładnikowy klej epoksydowy Epibond 1590 A/B⁷. Klej ten ma znacznie wyższy moduł sprężystości wzdłużnej i jest mniej podatny na odkształcenia niż wcześniej wspomniany klej poliuretanowy [12, 81, 147]. Procedurę badawczą dotyczącą określenia nośności i trwałości zmęczeniowej klejów przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy ASTM D638-02a⁸.



Rysunek 1.36. Geometria połączenia hybrydowego zastosowana w badaniach [78]

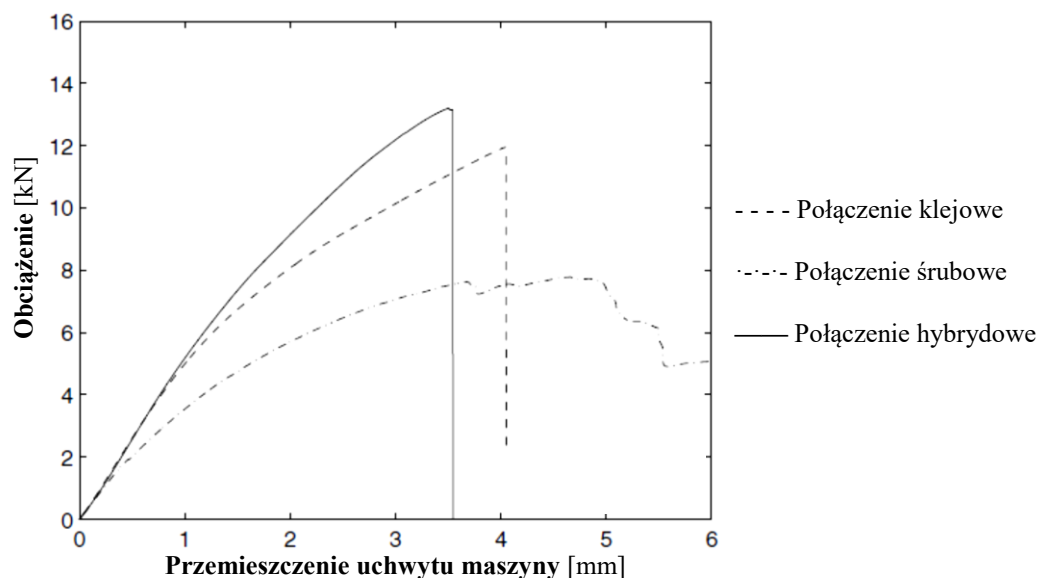
W pierwszym etapie badań oceniano nośność połączeń z próbkami o grubości 1,6 mm, gdzie w przypadku połączeń klejowego i hybrydowego stosowano klej poliuretanowy Pliogrip 7400/7410. Otrzymane wyniki eksperymentu wskazały na znacznie niższą nośność połączenia śrubowego w porównaniu z klejowym i hybrydowym (rys. 1.37.). Jest to efektem relatywnie małej powierzchni w połączeniu odpowiedzialnej za przenoszenie obciążeń. Dodatkowym czynnikiem redukującym nośność połączenia śrubowego jest nierównomierny rozkład naprężeń i ich koncentracja w okolicy otworu na śrubę. Połączenie klejowe okazało się sztywniejsze i przeniosło większe obciążenia – około 60% więcej niż połączenie śrubowe. Połączenie hybrydowe okazało się najwydajniejszym sposobem połączenia materiałów – było najszywniejsze i przeniosło największe obciążenia. Jest to spowodowane rozkładem i podziałem obciążeń pomiędzy łącznikami mechanicznymi i warstwą adhezyjną. Na etapie stosunkowo niskich obciążeń

⁶ Pliogrip 7400/7410 Ashland Speciality Chemicals GmbH

⁷ Epibond 1590 A/B Vantico

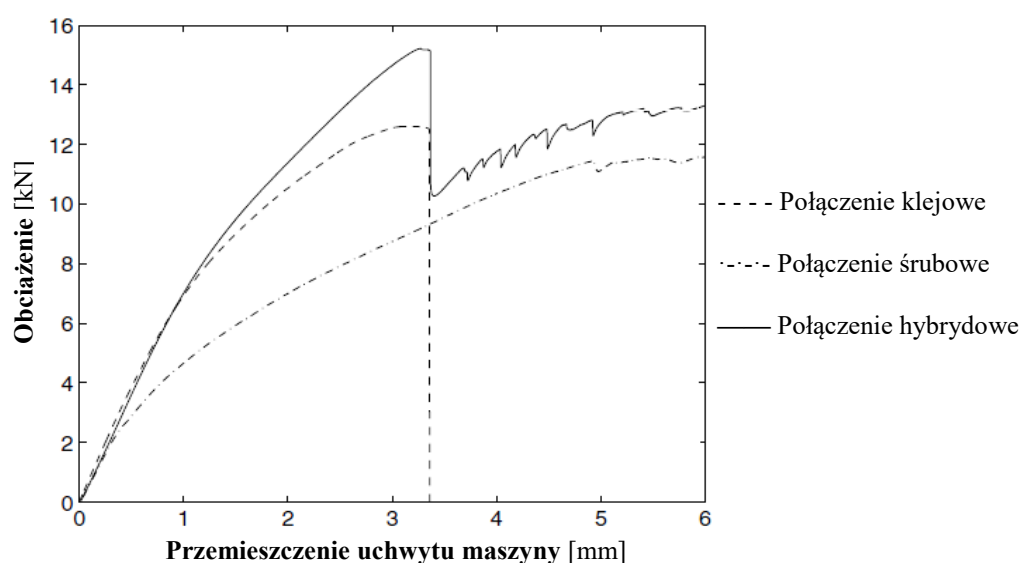
⁸ ASTM D638-02a *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*

badane połączenie hybrydowe zachowywało się jak połączenie klejowe, co sugeruje, że głównym komponentem przenoszącym obciążenia w tej fazie jest warstwa adhezyjna. Ostatecznie nośność połączenia hybrydowego wzrosła o około 11% w stosunku do połączenia klejowego.



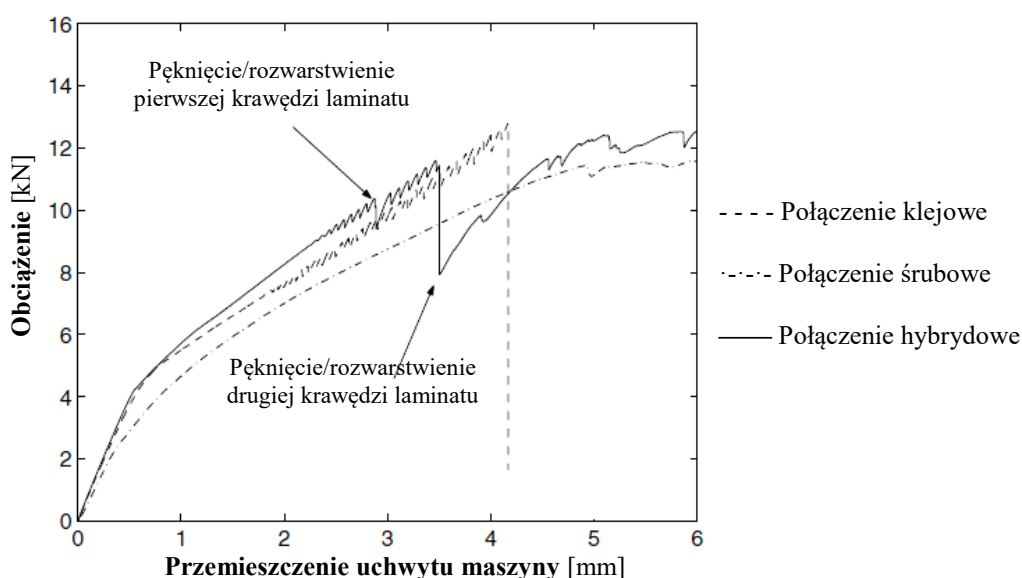
Rysunek 1.37. Nośność połączeń w wariantcie połączenia klejowego, śrubowego i hybrydowego (śrubowo-klejowego) dla próbek o grubości 1,6 mm z klejem poliuretanowym Pliogrip 7400/7410 [79]

Gdy badaniom poddano połączenia z wykorzystaniem próbek o grubości 3,2 mm połączonych klejem poliuretanowym (rys. 1.38.), nośność połączenia hybrydowego była większa o około 22% w porównaniu z połączeniem klejowym.



Rysunek 1.38. Nośność połączeń w wariantcie połączenia klejowego, śrubowego i hybrydowego (śrubowo-klejowego) dla próbek o grubości 3,2 mm z klejem poliuretanowym Pliogrip 7400/7410 [79]

Gdy zastosowano klej epoksydowy Epibond 1590 A/B (rys. 1.39.), połączenie hybrydowe wykazywało zachowanie podobne do klejowego nawet po pęknięciu i częściowemu rozwarstwieniu krawędzi kompozytu w jednym z końców zakładki. Widoczną zmianę w nośności połączenia zaobserwowano po rozwarstwieniu krawędzi drugiej próbki klejonego laminatu, gdy warstwa adhezyjna nie spełniała już swojej roli i obciążenie w połączeniu było przenoszone głównie przez łącznik mechaniczny.



Rysunek 1.39. Nośność połączeń w wariacie połączenia klejowego, śrubowego i hybrydowego (śrubowo-klejowego) dla próbek o grubości 3,2 mm z klejem epoksydowym Epibond 1590 A/B [79]

W pracy [78] nośność połączeń hybrydowych oceniano na podstawie obliczeń metodą elementów skończonych. Połączenie zamodelowano zgodnie z wymiarami próbki poddanej badaniom eksperymentalnym (rys. 1.36.). Grubość warstwy adhezyjnej t_a określono na 0,5 mm, a długość zakładki L na 20 mm. Elementom połączenia przypisano nieliniowe właściwości materiałów i w konsekwencji badania numeryczne prowadzono w zakresie nieliniowym. Procedurę badawczą dotyczącą określenia nośności i trwałości zmęczeniowej kleju przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy ASTM D638-02a. Dodatkowo modyfikowano geometrię połączenia, oceniając jej wpływ na parametry wytrzymałościowe węzła konstrukcyjnego.

Pierwszą modyfikacją było zwiększenie grubości łączonych elementów t , z 1,6 mm na 3,2 mm i 6,4 mm. Na rys. 1.40.a zaprezentowano zmianę wyężenia śruby powodowaną zmianą grubości łączonych elementów i tak dla próbek o grubości 1,6 mm śruby obciążone były na poziomie 32% obciążenia zadanego (10 kN). Wraz ze wzrostem

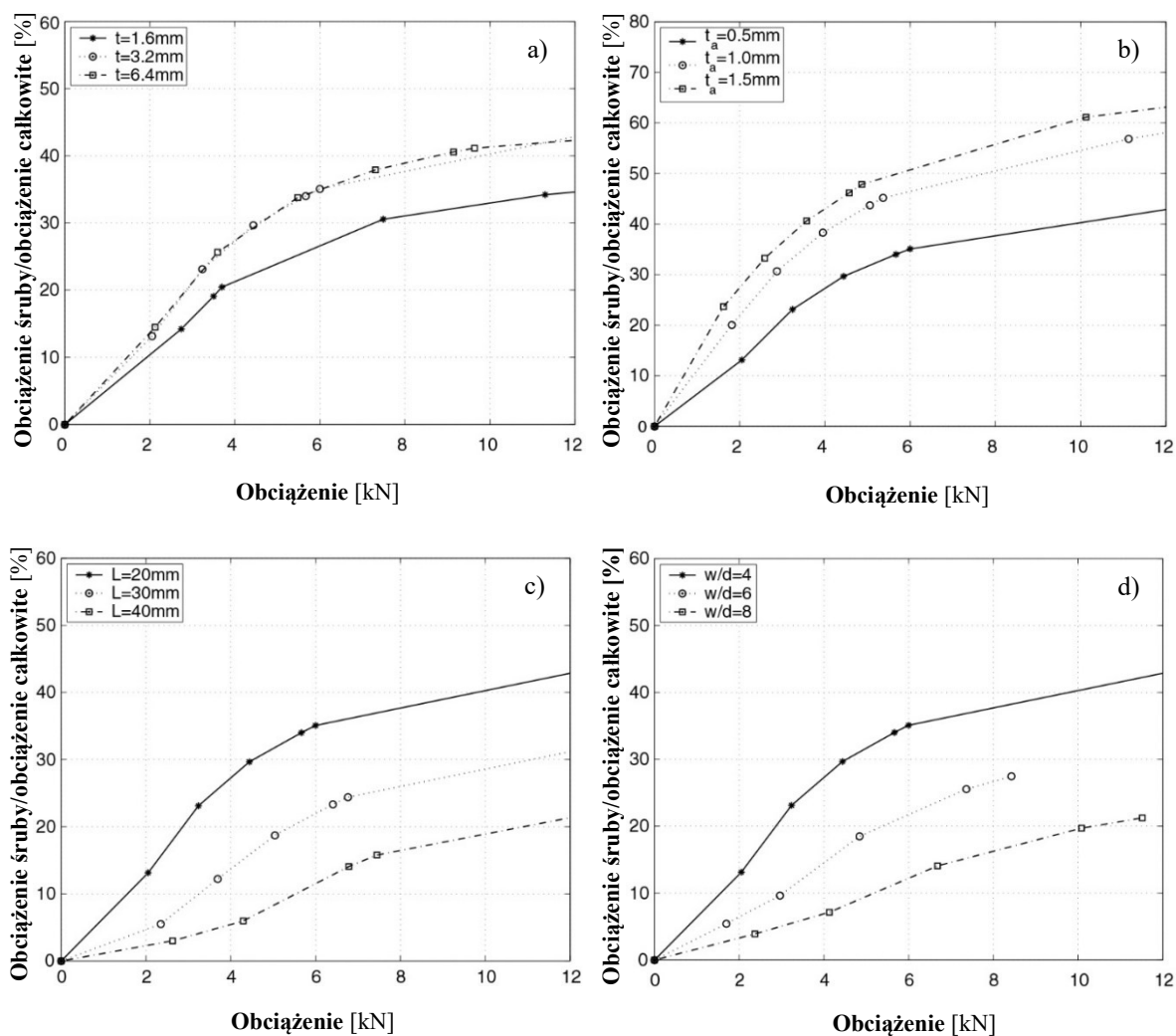
grubości łączonych próbek występowała tendencja do wzrostu wyężenia śruby. Dla grubości próbek wynoszącej 3,2 mm i 6,4 mm oraz dla obciążenia 10 kN wyężenie śruby zwiększyło się do 42%, co daje wzrost o 10% w porównaniu z połączeniem z próbkami o grubości 1,6 mm.

Modyfikacja grubości warstwy klejowej t_a , z 0,5 mm na 1 mm i 1,5 mm także skutkowała wzrostem obciążenia przenoszonego przez śrubę (rys. 1.40.b). Najbardziej widoczną zmianą powodowaną zwiększeniem grubości warstwy adhezyjnej był wzrost przemieszczenia łączonych elementów względem siebie, jako efekt zwiększenia elastyczności połączenia. Zjawisko to spowodowało, iż obciążona śruba została bardziej wyężona – przenosiła większe obciążenie (rys. 1.40.b). Dla zadanego 10 kN, obciążenie przenoszone przez śrubę przy grubości spoiny adhezyjnej 1,5 mm było o 50% wyższe niż dla spoiny o grubości 0,5 mm.

Wpływ zwiększenia długości zakładki na wartość obciążenia zilustrowano na rys. 1.40.c. Wzrost długości zakładki L z 20 mm na 30 mm i 40 mm skutkował zwiększeniem wartości obciążenia przenoszonego przez warstwę klejową, redukując tym samym obciążenia oddziałujące na śrubę. Zwiększenie długości zakładki powodowało również zmniejszenie wartości przemieszczenia między łączonymi elementami, czego następstwem była redukcja wyężenia łącznika mechanicznego w procesie dystrybucji obciążeń w połączeniu. W takiej konfiguracji obecność łącznika mechanicznego nie wpływała znacząco na nośność połączenia, natomiast zabezpieczała warstwę klejową, przeciwdziałając zjawisku oddzierania. Zastosowanie połączenia hybrydowego najlepiej sprawdziło się dla najkrótszej zakładki połączenia o wartości 20 mm. Dla tego przypadku śruba przenosiła o 20% większe obciążenia niż w połączeniu z zakładką o długości 40 mm i o 10% większe w porównaniu z połączeniem z zakładką o długości 30 mm.

Ważnym parametrem w projektowaniu połączeń śrubowych i hybrydowych jest rozmieszczenie łączników mechanicznych w tym m.in. odległość między śrubami w rzędzie. Schemat geometryczny ich rozmieszczenia wpływa na nośność połączenia i formę jego uszkodzenia. W przypadku małych odległości między łącznikami w rzędzie, połączenia ulegają zniszczeniu w wyniku uszkodzenia (pęknięcia) łączonego materiału między śrubami, najczęściej prostopadle do kierunku obciążenia (w przekroju krytycznym). Wraz ze wzrostem odległości między śrubami sposób destrukcji połączenia zmienia się na uszkodzenie deformujące otwory pod śruby w kierunku zgodnym

z przyłożonym obciążeniem (owalizacja otworów montażowych). Wpływ odległości między śrubami na przenoszone przez połączenie hybrydowe obciążenia przedstawiono na rys. 1.40.d. W obliczeniach założono, że iloraz szerokości połączenia do średnicy śruby (w/d) będzie odpowiednio równy 4, 6 i 8, przy założeniu, iż średnica śruby jest niezmienna. Jak dowiedziono zmiana odległości między śrubami w połączeniu wpływa na wartość przenoszonych przez nią obciążeń. W analizowanym przypadku najkorzystniejszy rezultat otrzymano dla współczynnika $w/d = 4$.



Rysunek 1.40. Wpływ geometrii połączenia na jego nośność [78]:

a) dla różnych grubości łączonych elementów t ($t_a = 0,5 \text{ mm}$, $L = 20 \text{ mm}$), b) dla różnych grubości warstwy adhezyjnej t_a , ($t = 3,2 \text{ mm}$, $L = 20 \text{ mm}$), c) dla różnych długości zakładki L ($t_a = 0,5 \text{ mm}$, $t = 3,2 \text{ mm}$), d) dla różnego rozstawu łączników mechanicznych w/d ($t_a = 0,5 \text{ mm}$, $t = 3,2 \text{ mm}$, $L = 20 \text{ mm}$)

Poprzez modyfikację rozmieszczenia łączników mechanicznych można więc wpływać na dystrybucję obciążeń pomiędzy warstwą adhezyjną i śrubami,

a w konsekwencji na rozkład przenoszonych w połączeniu hybrydowym obciążeń na jego połączenia składowe. Podsumowując poddane analizie badania, można stwierdzić, że:

- a) obciążenie składowe przenoszone przez śrubę zwiększa się wraz ze zwiększeniem grubości powierzchni współpracującej ze śrubą – odnosząc się do zależności (2), zwiększenie grubości klejonych próbek spowodowało przyrost naprężeń stycznych w warstwie klejowej, implikując wzrost przemieszczenia elementów, a to z kolei spowodowało większe obciążenie łącznika mechanicznego,
- b) obciążenie przenoszone przez śrubę zwiększa się wraz ze zwiększeniem grubości warstwy kleju – zwiększenie grubości warstwy adhezyjnej w połączeniu skutkuje redukcją naprężeń stycznych (ścinających) i normalnych (oddzierających), przez co rozkład naprężeń w zakładce staje się bardziej równomierny, bez znaczących wzrostów w okolicach jej końców,
- c) dzięki wzrostowi elastyczności warstwy adhezyjnej spowodowanej zwiększeniem jej grubości nastąpiło obniżenie wartości naprężeń oddzierających na końcach zakładki,
- d) obciążenie przenoszone przez śrubę zmniejsza się, jeżeli następuje zwiększenie odległości pomiędzy łącznikami w rzędzie połączenia mechanicznego,
- e) obciążenie przenoszone przez śrubę zmniejsza się wraz ze zwiększaniem długości zakładki – redukcja udziału wyężenia śruby w dystrybucji obciążenia jest związana ze wzrostem powierzchni adhezyjnej, co powoduje, że połączenie klejowe jest bardziej wyężone,
- f) wzrost długości zakładki i w efekcie redukcja obciążenia przenoszonego przez śruby powoduje, iż stosowanie śrub w długich zakładkach ma na celu wyłącznie zabezpieczenie połączenia przed rozklejeniem się lub rozerwaniem,
- g) obciążenie przenoszone przez śrubę zmniejsza się, jeżeli stosowany jest klej o większym module sprężystości wzdłużnej,
- h) zaobserwowano poprawę właściwości wytrzymałościowych połączenia w próbkach, w których stosowano klej o niższym module sprężystości wzdłużnej – zapewniał korzystniejszy (bardziej równomierny) podział obciążenia między łącznikiem mechanicznym a spoiną adhezyjną, co skutkowało lepszymi parametrami mechanicznymi węzła konstrukcyjnego.

1.4 Podsumowanie

Pomimo iż, zastosowanie klejenia w miejsce mechanicznych elementów łączących (nity, śruby itp.) jest korzystniejsze w aspekcie zmniejszenia masy konstrukcji oraz ograniczenie jej kosztów wytwarzania, nadal jednak istnieje wiele problematycznych kwestii, które muszą zostać rozwiązane, aby ten rodzaj połączeń zyskał pełne zaufanie producentów, szczególnie konstruktorów branży lotniczej. Niedoskonałości polimerycznej struktury kleju, ograniczona odporność spoiny adhezyjnej na trudne warunki atmosferyczne (temperatura i wilgotność) oraz jego stosunkowo niska wytrzymałość zmęczeniowa mogą być minimalizowane poprzez zastosowanie łączników mechanicznych. Zastosowanie w połączeniu klejowym dodatkowej mechanicznej metody łączenia elementów poprzez montaż śrub, nitów lub wytworzenie zgrzein, minimalizuje niedoskonałości połączenia klejowego. Tak więc, wykorzystanie co najmniej dwóch rodzajów połączeń w jednym węźle konstrukcyjnym może przynieść wymierne korzyści.

Na podstawie przeanalizowanej literatury można uznać, że połączenia hybrydowe będące kombinacją różnych metod łączenia materiałów wykazują właściwości pozwalające na efektywniejsze łączenie materiałów zarówno w aspekcie parametrów związanych z wytrzymałością, jak i niezawodnością.

Zasadniczą zaletą połączeń hybrydowych może być ich wyższa nośność oraz trwałość zmęczeniowa w porównaniu z połączeniami podstawowymi tworzącymi połączenia hybrydowe. Proces ich niszczenia przebiega dwuetapowo, co istotnie zwiększa prawdopodobieństwo wykrycia początku degradacji połączenia ulegającego uszkodzeniu w pierwszej kolejności (najczęściej połączenie adhezyjne) i jest wielce pożądane szczególnie w konstrukcjach lotniczych. Niezaprzecalną zaletą połączenia hybrydowego jest podwyższone bezpieczeństwo eksploatacji węzła konstrukcyjnego – pomimo zniszczenia warstwy adhezyjnej w połączeniu hybrydowym obciążenie będzie przenoszone przez łączniki mechaniczne. Wykorzystanie połączeń hybrydowych (adhezyjno-mechanicznych) rozwiązuje również problemy technologiczne związane z koniecznością spełnienia warunku jednoznacznego położenia łączonych elementów w trakcie utwardzania tworzywa adhezyjnego oraz zapewnienia niezbędnych nacisków w trakcie operacji klejenia.

Przeprowadzona analiza wykazała, iż jednoczesne zastosowanie połączenia mechanicznego i klejowego może być korzystne dla określonych warunków geometrycznych i materiałowych węzła hybrydowego pod warunkiem efektywnego wykorzystania jego połączeń składowych.

II. ZAGADNIENIE BADAWCZE

Uwzględniając aktualny stan wiedzy w zakresie problematyki połączeń hybrydowych wykonywanych w oparciu o dwie metody łączenia elementów – adhezyjną i za pomocą łączników mechanicznych, można zdefiniować zadanie badawcze i jego cel, formułując przy tym hipotezę i zakres badań, które zostaną wykonane, aby dokonać weryfikacji przyjętego założenia.

W niniejszym rozdziale zdefiniowano zadanie badawcze oraz zaprezentowano cel jego realizacji. Zawarto również zakres badań i obliczeń, których wyniki posłużą do weryfikacji hipotezy badawczej.

2.1 Identyfikacja zadania badawczego

Stale rosnąca popularność połączeń hybrydowych w konfiguracji połączeń adhezyjno-mechanicznych powoduje wzrost ich stosowalności, w szczególności przy rozwiązaniach, w których wprowadza się polimerowe materiały kompozytowe np. w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym. Zastosowanie klejenia wspólnie z łącznikami mechanicznymi (np. nitami, śrubami itp.) powoduje powstanie węzła montażowego o korzystniejszych właściwościach wytrzymałościowych i użytkowych. Wzrost nośności, trwałości zmęczeniowej, ale również sztywności oraz szczelności ma niebagatelne znaczenie w kontekście procesów eksploatacyjnych.

Wykonując połączenia hybrydowe wpływa się na poprawę nie tylko właściwości mechanicznych i użytkowych węzła montażowego, ale również na uproszczenie procesu jego wykonania, unikając tym samym konieczności konstruowania i użycia złożonego oprzyrządowania technologicznego do wytworzenia nacisków w trakcie utwardzania spoiny połączenia adhezyjnego (rolę oprzyrządowania technologicznego spełniają wprowadzone do węzła łączniki mechaniczne).

Analiza literatury wskazuje na dwustopniowy, sekwencyjny charakter niszczenia połączenia hybrydowego (klejowo-mechanicznego). W pierwszej kolejności uszkodzeniu ulega połączenie klejowe, a następnie połączenie mechaniczne. Stąd kwestie nośności i trwałości zmęczeniowej połączeń hybrydowych są bezpośrednio związane z problematyką połączeń klejowych. Polimeryczna budowa tworzyw adhezyjnych, ich ograniczona odporność na działanie warunków atmosferycznych (m.in. temperatury i wilgotności) oraz ich stosunkowo niska wytrzymałość i trwałość zmęczeniowa to

kwestie, które należy brać pod uwagę w procesie projektowania nie tylko połączeń klejowych, ale również hybrydowych. Nie bez znaczenia pozostaje także obszar właściwości połączeń mechanicznych (śrubowych, nitowych). Wykorzystując łączniki mechaniczne można skutecznie niwelować pewne ograniczenia połączeń adhezyjnych. Oczywiście od rodzaju zastosowanego łącznika mechanicznego i miejsca jego montażu zależy, w jakim zakresie ograniczenia te będą redukowane.

Prezentowane w literaturze liczne badania połączeń hybrydowych odnoszą się do konfiguracji węzła hybrydowego z łącznikami mechanicznymi montowanymi w środkowej części spoiny połączenia klejowego, czyli w miejscu, gdzie poziom wyężenia spoiny jest najmniejszy i efekt montażu łączników mechanicznych staje się mocno ograniczony. Bardziej właściwym miejscem do montażu łączników wydają się końce zakładki połączeń adhezyjnych, gdzie następuje zjawisko spiętrzenia naprężeń, w tym bardzo negatywnych naprężeń normalnych prostopadłych do spoiny klejowej powodujących efekt tzw. „oddzierania”. Właśnie takie konfiguracje uwzględniano w procesie badawczym.

W pracy przyjęto założenie, że zmieniając położenie łączników mechanicznych w połączeniu hybrydowym, odchodząc w ten sposób od rekomendacji dotyczących montażu łączników w połączeniu mechanicznym, można poprawić właściwości mechaniczne i użytkowe połączeń hybrydowych.

Według najlepszej wiedzy autora nie ma dostępnych analiz porównawczych dotyczących właściwości połączeń hybrydowych, w których zmianie poddaje się geometrię montażu łączników mechanicznych w celu osiągnięcia wyższej nośności i trwałości połączeń hybrydowych. W dostępnych materiałach zagadnienie poprawy właściwości wytrzymałościowych połączeń hybrydowych jest przedstawiane w ograniczonym zakresie.

Prezentowane w pracy wyniki dalszych badań oraz przeprowadzone analizy mają częściowo wypełnić tę lukę. Wykonanie kompleksowych badań połączeń hybrydowych i analiza otrzymanych wyników powinny być odpowiedzią na pytanie, jaki wpływ na zmianę parametrów wytrzymałościowych i użytkowych połączeń hybrydowych będzie miała m.in. modyfikacja montażu łączników mechanicznych.

2.2 Cele badawcze

Głównym celem rozprawy jest wykazanie metod i sposobów efektywnej modyfikacji połączeń hybrydowych (klejowo-mechanicznych) w celu poprawy ich parametrów wytrzymałościowych i użytkowych.

Cel badawczy planuje się osiągnąć poprzez realizację badań eksperymentalnych z wykorzystaniem połączeń hybrydowych oraz połączeń składowych (oddzielnie klejowych i mechanicznych) w zakresie ich nośności i trwałości zmęczeniowej oraz wykorzystując nowoczesne narzędzia obliczeniowe oparte na metodzie elementów skończonych. Analiza porównawcza otrzymanych wyników pozwoli na ocenę możliwości modyfikacji połączeń hybrydowych w aspekcie ich efektywności.

2.3 Hipoteza badawcza

Uwzględniając zdefiniowane zadanie badawcze i jego cel, hipoteza dysertacji doktorskiej została sformułowana w następującym brzmieniu:

Możliwa jest poprawa właściwości wytrzymałościowych i użytkowych połączeń hybrydowych (klejowo-mechanicznych) poprzez wykorzystanie nowoczesnych łączników mechanicznych i zmianę geometrii ich rozmieszczenia

2.4 Zakres badań i obliczeń

Aby osiągnąć założone cele badawcze pracy i zweryfikować sformułowaną hipotezę, planuje się wykonać następujące etapy badań, obliczeń i analiz:

1. Badania eksperymentalne w zakresie statycznym i w zakresie trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych, mechanicznych oraz połączeń hybrydowych (klejowo-mechanicznych). Próbkę hybrydową zostaną poddane modyfikacjom polegającym na zmianie schematu montażu łączników zalecanego dla połączeń mechanicznych. Założono wykonywanie otworów montażowych bliżej krawędzi zakładki połączeń. W badaniach eksperymentalnych zaplanowano również wykorzystanie tworzyw adhezyjnych o różnych właściwościach wytrzymałościowych. W eksperymentach, do przygotowania próbek połączeń zostaną wykorzystane zarówno elementy metalowe, jak i kompozytowe na bazie tzw. laminatów węglowych (CFRP).

2. Przygotowanie modelu obliczeniowego na potrzeby wykonania analizy z wykorzystaniem metody elementów skończonych m.in. do przeprowadzenia efektywnej analizy pól naprężeń w spoinie połączenia adhezyjnego, łącznikach mechanicznych i łączonych elementach. W zakresie przygotowania modelu obliczeniowego zostaną również wykonane testy eksperymentalne w celu zidentyfikowania właściwości łączonych materiałów. Warunki brzegowe modelu będą zgodne z warunkami realizacji badań eksperymentalnych. Na potrzeby opisanych działań zaplanowano wykorzystać aplikację Ansys Workbench 19.
3. Analizę otrzymanych wyników poprzez porównanie rezultatów badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych.

III. BADANIE POŁĄCZEŃ HYBRYDOWYCH – MODYFIKACJA GEOMETRII MONTAŻU ŁĄCZNIKÓW MECHANICZNYCH

W celu oceny wpływu rozmieszczenia łączników mechanicznych na właściwości wytrzymałościowe i użytkowe połączeń hybrydowych (klejowo-śrubowych) wykonano testy eksperymentalne, w których oceniano nośność i trwałość zmęczeniową połączeń hybrydowych oraz klejowych i mechanicznych. Wykonano również analizę porównawczą rozkładu naprężeń w spoinie połączeń klejowych i hybrydowych, zakładając, że proces niszczenia połączenia hybrydowego rozpoczyna się od skrajnych obszarów spoiny klejowej (zlokalizowanych na końcach zakładki połączenia) [51]. Do ewaluacji wykorzystano wyniki obliczeń połączeń hybrydowych przeprowadzonych metodą elementów skończonych, przy użyciu narzędzia obliczeniowego Ansys Workbench, ver. 19.

3.1 Badania eksperymentalne

3.1.1 Metodyka badań

Zaplanowano wykonanie badań eksperymentalnych, w których wyznaczano nośność i trwałość zmęczeniową połączeń jednozakładkowych. Wyniki z badań zostaną wykorzystane do wykonania analizy porównawczej połączeń, w których elementy wykonane ze stopu aluminium serii 2024-T3 – jednego z podstawowych materiałów konstrukcyjnych [60, 92] stosowanych w budowie płatowców obecnie eksploatowanych statków powietrznych – łączono w sposób adhezyjny, mechaniczny i hybrydowy. Rezultaty badań połączeń klejowych i mechanicznych będą stanowiły punkt referencyjny w ocenie właściwości połączeń hybrydowych.

Do przygotowania połączeń adhezyjnych i hybrydowych został wykorzystany klej Epidian 57/Z1, który jest dwuskładnikową kompozycją epoksydową modyfikowaną żywicą poliestrową. Po zastosowaniu utwardzacza Z1 (w proporcjach 1:10), w wyniku reakcji chemicznych, żywica uzyskuje przestrzenne usieciowanie nadające jej cechy kleju charakteryzującego się zwiększoną wytrzymałością na oddzieranie [129]. Liczne badania i eksperymenty [59, 60, 61] potwierdziły, iż Epidian 57 z utwardzaczem Z1 jest tworzywem adhezyjnym o właściwościach kleju konstrukcyjnego. Dedykowany jest w szczególności do łączenia struktur sztywnych, które w procesie eksploatacji nie podlegają dużym odkształceniom. Jest uniwersalnym klejem epoksydowym,

utwardzanym w warunkach otoczenia „na zimno” lub w podwyższonej temperaturze „na ciepło”. Jego parametry wytrzymałościowe określono eksperymentalnie m.in. w oparciu o wymagania Polskiej Normy [114].

W badaniach wstępnych połączeń mechanicznych i hybrydowych jako łączniki mechaniczne wykorzystano śruby stalowe, w których za pomocą klucza dynamometrycznego BAHCO IZO-DM-30 regulowano moment skręcający podczas ich montażu. W ten sposób zapewniano powtarzalność warunków montażu łączników mechanicznych. Do przygotowania połączeń zastosowano śruby stalowe serii 10.9 o średnicy 3 mm. Długości części gwintowanej śrub zostały tak dobrane, aby w otworach montażowych nie występowały nacięcia gwintu.

W celu rozpoznania zjawisk dystrybucji obciążeń połączenia hybrydowego w konfiguracji śrubowo-klejowej oraz efektów zmian wywołanych zmianą geometrii rozmieszczenia łączników mechanicznych zrealizowano szereg badań, w trakcie których oceniano nośność i trwałość zmęczeniową takiego rodzaju połączeń. Wyniki eksperymentu odniesiono do rezultatów obliczeń numerycznych. Obliczeniom poddano modele połączeń w różnych wariantach układu geometrycznego – zmiana rozmieszczenia łączników mechanicznych. Uwzględniono również warunki brzegowe związane z wstępnymi naciskami montażowymi łączników mechanicznych i obciążenia wywołane montażem połączeń w maszynie wytrzymałościowej. Na podstawie otrzymanych wyników przeprowadzono analizy porównawcze.

Dane materiałów wykorzystanych w badaniu połączeń zakładkowych w postaci ich modułów sprężystości wzdlużnej, współczynników Poissona oraz wymiarów geometrycznych przedstawiono w tab. 3.1.

Tabela 3.1. Parametry elementów składowych połączeń badanych w I i II etapie

Elementy składowe połączeń			
Element	Material	Parametr i wartość	
Łączone elementy	Stop aluminium AW 2024-T3	E [GPa]	72
		ν	0,3
		Wymiar [mm]	100 × 25 × 2

Tabela 3.1. c.d. Parametry elementów składowych połączeń badanych w I i II etapie

Klej	Tworzywo adhezyjne Epidian 57/Z1	E [GPa]	2,7
		ν	0,35
		Wymiar [mm]	25 × 25 × 0,1 (I etap) 25 × 50 × 0,1 (II etap)
Łączniki mechaniczne	Stal serii 10.9	E [GPa]	200
		ν	0,3
		Wymiar [mm]	Ø 3

Ze względu na to, iż liczba badanych połączeń w poszczególnych etapach nie przekraczała pięciu próbek reprezentatywnych, do oceny błędu pomiaru wykorzystano rozkład Gasseta (t-studenta). Odchylenie standardowe S wartości średniej otrzymanej w eksperymentach wyników wyznaczono na podstawie zależności (34):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (34)$$

gdzie n – liczba obserwacji (prób), x_i – wartość otrzymana w badaniu, $\bar{x}$ – średnia arytmetyczna otrzymanych wyników w n obserwacjach (próbach).

W dalszej części, przy wykorzystaniu zależności (35) określono przedział ufności E dla badań zmęczeniowych i trwałościowych poszczególnych rodzajów połączeń:

$$\pm E = tS \quad (35)$$

gdzie t to wielkość stała wyznaczona dla poziomu istotności 95% i $n - 1$ stopni swobody.

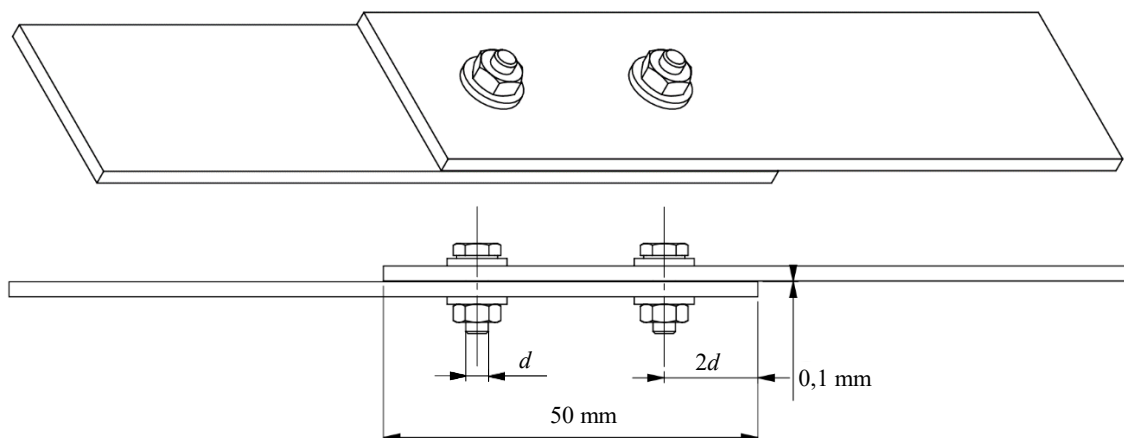
Przygotowanie próbek

Próbki do badań powstały poprzez łączenie elementów wycinanych z blachy, które miały postać prostokątów o długości 100 mm, szerokości 25 mm oraz grubości 2 mm. Wycięto je techniką laserową, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 1993-1-8 [111]. Łączniki mechaniczne umieszczano w otworach montażowych wykonanych w połowie szerokości łączonych elementów oraz w dwóch wariantach odległości od krawędzi zakładki. Odległość osi otworu montażowego od krawędzi zakładki wyrażono

poprzez wartość średnicy łącznika mechanicznego – stąd na potrzeby niniejszej pracy przyjęto oznaczenie $2d$ i $1d$ odpowiadające odpowiednio odległości równej dwóm i jednej średnicy łącznika mechanicznego. Powierzchnie elementów do klejenia zostały przygotowane w oparciu o wymagania normy PN-EN 13887 [109], poprzez odtłuszczenie acetonem, piaskowanie elektrokorundem o średnicy ziarna F40 przy ciśnieniu powietrza 0,8 MPa oraz ponowne przemywanie acetonem. Kiedy w trakcie badań trwałościowych okazało się, że piaskowanie powierzchni elementów do klejenia ma negatywny wpływ na trwałość zmęczeniową połączeń, piaskowanie w połączeniach hybrydowych zastąpiono szorstkowaniem przy użyciu papieru ściernego o granulacji ziarna P80 (tarcza o wymiarze ziarna ściernego od 180 μm do 212 μm).

W celu uzyskania powtarzalnej grubości spoiny adhezyjnej, w procesie klejenia zastosowano nitki dystansowe, które umieszczono w zakładce, równoległe do dłuższej krawędzi próbki. W próbkach przed ich montażem rozprowadzono tworzywo adhezyjne na obu powierzchniach łączonych elementów. Spoinę klejową w połączeniach klejowych i hybrydowych utwardzano dwuetapowo: 24 godziny w temperaturze 20°C, a następnie przez 8 godzin w temperaturze 80°C. Schemat połączenia hybrydowego o długości zakładki 50 mm wykorzystywanego w badaniach (II etap) zaprezentowano na rys. 3.1.

W połączeniach hybrydowych odpowiedni docisk powierzchni zapewniały łączniki mechaniczne, natomiast w połączeniach klejowych użyto dodatkowych ścisków mechanicznych, wytwarzając w trakcie utwardzania spoiny naciski równe 5 MPa, weryfikowane czujnikiem siły ZEPWN TYP CL 17x2. Śruby w połączeniach mechanicznych i hybrydowych były dokręcone momentem równym 2,2 Nm.



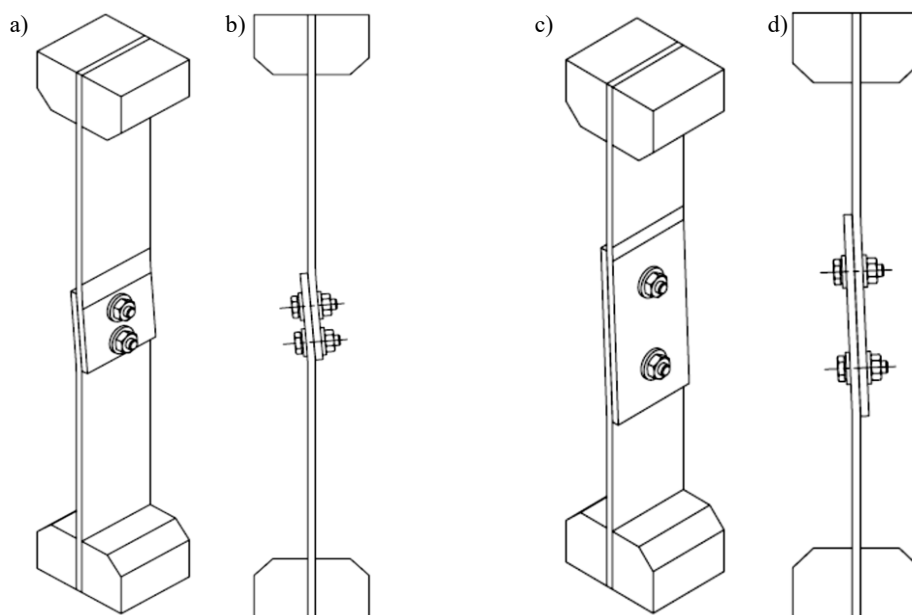
Rysunek 3.1. Schemat badanego połączenia hybrydowego z zakładką o długości 50 mm

Badaniom poddano próbki o dwóch długościach zakładki: 25 mm i 50 mm. W pierwszym etapie badań porównano nośność i trwałość zmęczeniową połączeń klejowych, mechanicznych i hybrydowych o długości zakładki równej 25 mm. W drugim etapie doświadczenia wykonano badania, a następnie analizę porównawczą zwiększając długość zakładki połączenia do wartości 50 mm. Dodatkowo w tym etapie wprowadzono kolejną modyfikację – zmieniano również odległość montażu łączników mechanicznych od krawędzi zakładki, oceniając jaki jest wpływ tego rodzaju przekonfigurowania na nośność i trwałość zmęczeniową połączeń.

Badania nośności połączeń wykonywano dla pięciu próbek, natomiast trwałość zmęczeniową, ze względu na długotrwałość testów, wyznaczano dla trzech lub czterech próbek.

Stanowisko pomiarowe

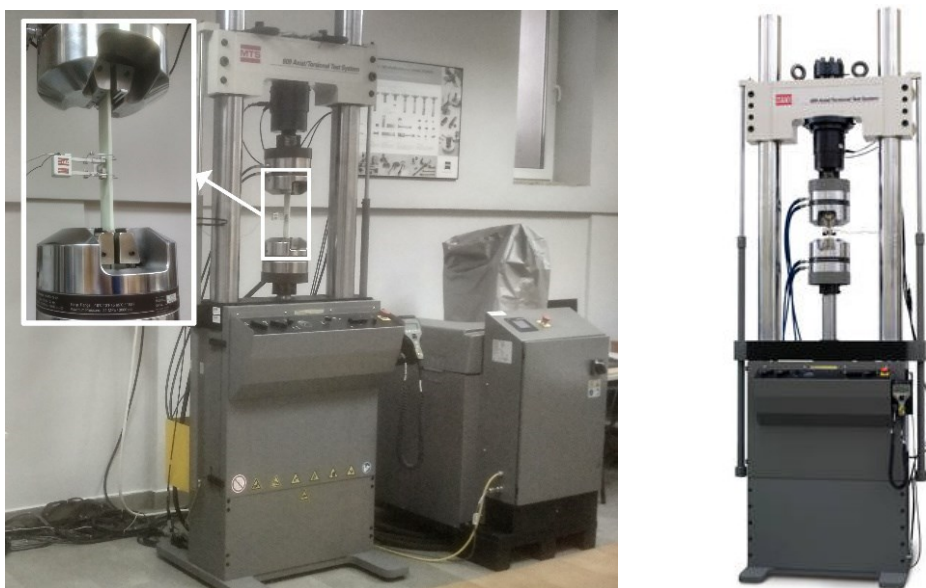
Sposób umieszczenia badanych próbek w maszynie wytrzymałościowej MTS 809 przedstawiono poglądowo na rys. 3.2.a i 3.2.c. Ponieważ uchwyty maszyny znajdują się w osi symetrii, po umieszczeniu w nich próbek połączeń następowało wstępne odkształcenie badanych elementów. Występującą zmianę kształtu badanych próbek w wariancie 1d i 2d odzwierciedlono odpowiednio na rys. 3.2.b i 3.2.d.



Rysunek 3.2. Schemat zamocowania próbek w maszynie wytrzymałościowej:

a) i c) widok ogólny odpowiednio dla długości zakładki 25 mm i 50 mm,
b) i d) z widocznym odkształceniem odpowiednio dla długości zakładki 25 mm i 50 mm (spowodowanym osiowym ułożeniem uchwytów maszyny)

Próbki obciążano statycznie (określanie nośności połączeń) i zmęczeniowo. Badania trwałości zmęczeniowej odbywało się w zakresie obciążeń cyklu: $F_{min} = 1500$ N do $F_{maks} = 4500$ N (obciążenie średnie cyklu 3000 N) z częstotliwością 8 Hz i współczynnika asymetrii cyklu $R = 0,33$. Wykorzystywana maszyna wytrzymałościowa (rys. 3.3) z napędem hydraulicznym pozwalała uzyskać bardzo dużą dokładność w sterowaniu siłą i przemieszczeniem. Ponadto cechowała się niską wrażliwością na uderzenia następujące przy pękaniu próbek.

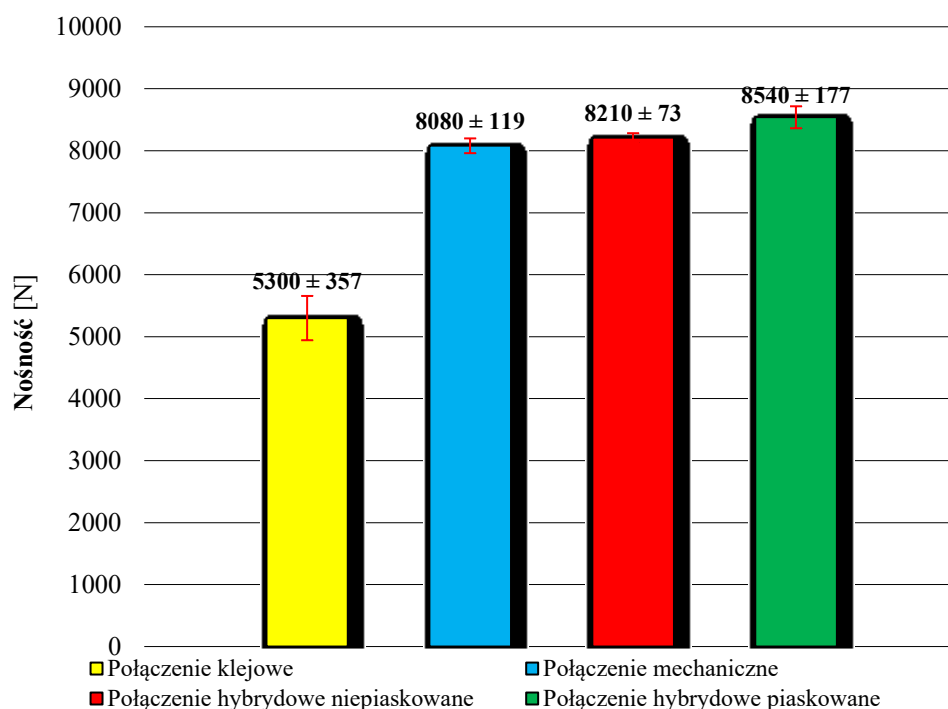


Rysunek 3.3. Uniwersalna maszyna wytrzymałościowa MTS 809

3.1.2 Badania nośności i trwałości zmęczeniowej połączeń – zakładka 25 mm (I etap)

Wyniki w zakresie nośności połączeń uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla pierwszego etapu (długość zakładki 25 mm, odległość łączników od krawędzi zakładki – $2d$) zaprezentowano na rys. 3.4. (wraz z przedziałami ufności) oraz w tab. 3.2. Elementy połączenia i ich właściwości były zgodne ze wskazanymi w tab. 3.1.

Średnia wartość nośności połączeń mechanicznych w porównaniu z połączeniami klejowymi była większa o około 35%. W połączeniach hybrydowych z elementami niepiaskowanymi (szorstkowanymi) praktycznie nie nastąpił wzrost nośności połączeń w porównaniu do połączeń mechanicznych, natomiast nieznacznie większe wartości nośności odnotowano w przypadku połączeń hybrydowych z elementami piaskowanymi, co związane jest z większą wytrzymałością adhezyjną połączenia klejowego w wyniku piaskowania powierzchni.



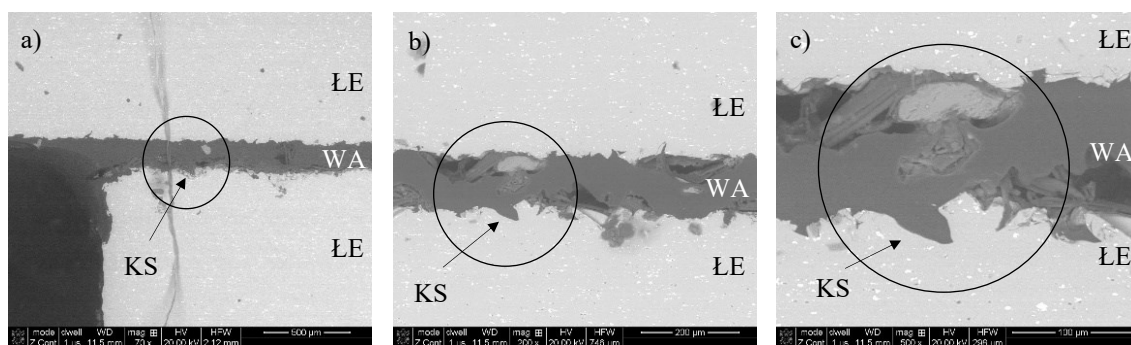
Rysunek 3.4. Porównanie nośności połączeń klejowych, mechanicznych i hybrydowych (dla dwóch wariantów przygotowania powierzchni)

W zakresie trwałości zmęczeniowej występowała duża różnica pomiędzy trwałością połączeń klejowych a trwałością pozostałych połączeń (tab. 3.2.). Niską trwałość zmęczeniową połączeń klejowych można tłumaczyć wysoką wartością maksymalnego obciążenia w cyklu – 4,5 kN – jest to wartość, która odpowiada około 85% średniej wartości nośności tego rodzaju połączeń. Największa trwałość charakteryzowała połączenia hybrydowe z elementami niepiaskowanymi, w przeciwieństwie do trwałości połączeń hybrydowych z elementami piaskowanymi.

Tabela 3.2. Trwałość zmęczeniowa połączeń o zakładce 25 mm [liczba cykli do zniszczenia połączenia], montaż łączników mechanicznych w odległości 2d od krawędzi zakładki

Trwałość zmęczeniowa [liczba cykli do zniszczenia połączenia]				
Rodzaj połączenia /nr próbki	Połączenia klejowe	Połączenia mechaniczne	Połączenia hybrydowe niepiaskowane (szorstkowane)	Połączenia hybrydowe piaskowane
1	120	80 100	135 200	86 500
2	300	155 900	145 000	97 400
3	50	143 200	165 550	114 200
Średnia	157	126 400	148 583	99 367

Połączenia hybrydowe, w których próbki przed sklejeniem poddano piaskowaniu, wykazywały trwałość zmęczeniową niższą nawet od trwałości połączeń mechanicznych – chociaż ich nośność była w tej serii największa ze wszystkich badanych połączeń. Zniszczenie polegało na pęknięciu łączonych blach. Spadek trwałości zmęczeniowej połączeń z elementami piaskowanymi należy tłumaczyć bardzo negatywnym wpływem niewielkich „karów strukturalnych” (rys. 3.5.), które powstają na piaskowanej powierzchni [123]. W tym przypadku nawet obecność połączenia adhezyjnego nie niwelowała tego negatywnego zjawiska.



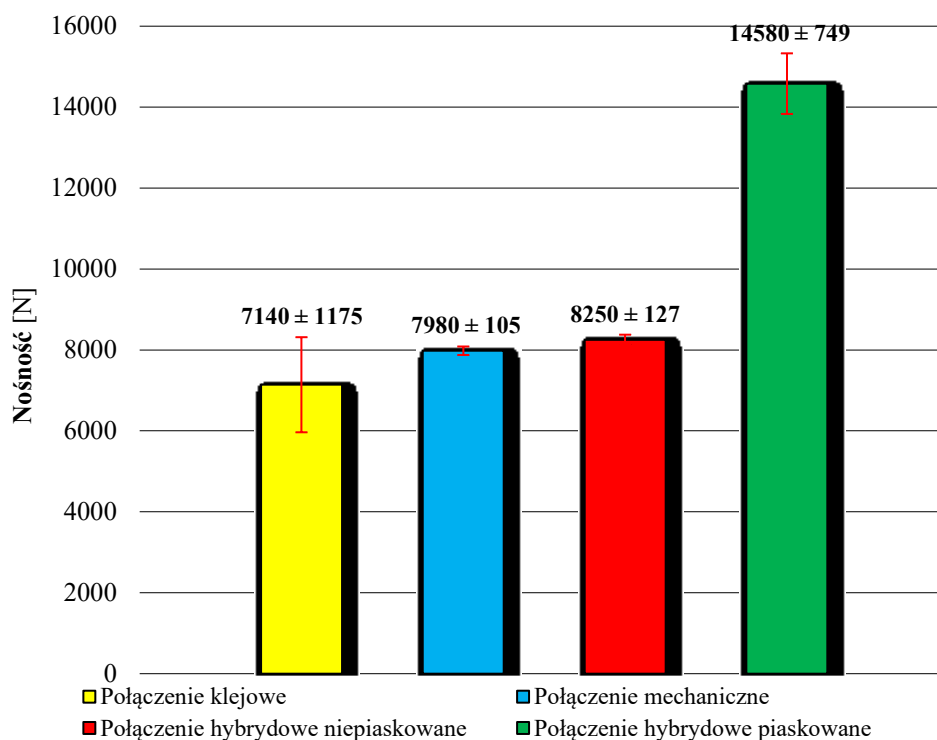
Rysunek 3.5. Widok warstwy adhezyjnej pomiędzy klejonymi powierzchniami elementów poddanych piaskowaniu (stop aluminium AW 2024-T3) przed procesem klejenia; widoczne liczne „karby strukturalne” w powiększeniu mikroskopu elektronowego a) 70, b) 200 i c) 500 razy; WA – warstwa adhezyjna, LE – łączone elementy, KS – karby strukturalne

3.1.3 Badania nośności i trwałości zmęczeniowej połączeń – zakładka 50 mm (II etap)

Ponieważ nośność, jak i trwałość zmęczeniowa w połączeniach mechanicznych i hybrydowych o zakładce 25 mm nie różniły się znacznie, zdecydowano o wykonaniu dodatkowych testów, podczas których zwiększano długość zakładki badanych połączeń. Wyniki wskazywały, że w połączeniach hybrydowych o zakładce 25 mm pozytywny efekt synergii jednoczesnego zastosowania łączników mechanicznych i połączeń adhezyjnych jest niewielki, dlatego też wykonano testy dla połączeń z zakładką o długości 50 mm, w której łączniki mechaniczne umieszczono w odległości $2d$ od krawędzi zakładki. Wyniki uzyskane dla drugiego etapu testów eksperymentalnych, przy identycznych warunkach obciążeniowych, jakie zastosowano w etapie I, zaprezentowano na rys. 3.6. oraz w tab. 3.3.

Dwukrotne zwiększenie powierzchni zakładki połączenia skutkowało wzrostem nośności połączeń klejowych o około 35%, natomiast nośność połączeń mechanicznych

praktycznie nie zmieniła się, co jest logicznym następstwem faktu braku zmiany liczby łączników w połączeniu. Przy okazji tej serii badań obserwowano istotny wpływ sposobu przygotowania powierzchni na nośność połączeń hybrydowych – połączenia z elementami piaskowanymi cechował wzrost nośności o ponad 80% w porównaniu z połączeniami mechanicznymi, podczas gdy dla połączeń z elementami niepiaskowanymi wzrost tego parametru był niezauważalny. Nośność połączeń klejowych w odniesieniu do połączeń mechanicznych różniła się nieznacznie – była niższa o około 12%. Jest to różnica znacznie mniejsza niż w przypadku połączeń o zakładce 25 mm, dla których nośność połączeń mechanicznych była wyższa o około 35% (rys. 3.4.) od połączeń klejowych.



Rysunek 3.6. Porównanie nośności połączeń klejowych, mechanicznych i hybrydowych (dla dwóch wariantów przygotowania powierzchni)

Zwiększenie długości zakładki pozytywnie wpłynęło na trwałość zmęczeniową wszystkich rodzajów połączeń, co również należy tłumaczyć większą sztywnością węzła połączeniowego, a przez to mniejszą podatnością łączonych elementów na działanie wtórnych momentów gnących. Interesujące wyniki otrzymano w przypadku połączeń hybrydowych z elementami niepiaskowanymi, w których wystąpił aż 7,5-krotny wzrost trwałości zmęczeniowej – pomimo że ich nośność była znacznie niższa od połączeń

hybrydowych z elementami piaskowanymi. Ponownie udowodniono małą przydatność piaskowania jako metody przygotowania powierzchni do klejenia w kontekście eksploatacji połączeń w warunkach zmiennych obciążeń. W przypadku połączeń hybrydowych piaskowanych, wraz ze zwiększeniem długości zakładki osiągnięto proporcjonalny wzrost trwałości zmęczeniowej (2-krotne zwiększenie pola klejonej powierzchni). Z powodu negatywnego wpływu piaskowania na trwałość zmęczeniową połączeń hybrydowych, w kolejnych etapach badań postanowiono zrezygnować z wykorzystania tej metody przygotowania próbek na potrzeby ich klejenia.

Tabela 3.3. Trwałość zmęczeniowa połączeń o zakładce 50 mm [liczba cykli do zniszczenia połączenia], montaż łączników mechanicznych w odległości 2d od krawędzi zakładki

Trwałość zmęczeniowa [liczba cykli do zniszczenia połączenia]				
Rodzaj połączenia /nr próbki	Połączenia klejowe	Połączenia mechaniczne	Połączenia hybrydowe niepiaskowane (szorstkowane)	Połączenia hybrydowe piaskowane
1	7 000	141 550	1 059 750	209 750
2	9 500	89 300	1 260 500	220 750
3	4 300	166 800	1 015 400	196 000
4	12 000	179 200	1 098 500	204 550
Średnia	8 200	144 213	1 108 538	208 833

3.1.4 Badanie nośności i trwałości zmęczeniowej połączeń – modyfikacja montażu łączników mechanicznych

W warstwie adhezyjnej złącza hybrydowego, podobnie jak w połączeniach klejowych, występują negatywne zjawiska związane z nierównomiernym rozkładem naprężeń. Zarówno w połączeniach klejowych, jak i hybrydowych często występuje złożony układ obciążeń, gdzie poza nierównomiernym polem naprężeń stycznych [53, 158], występuje również dysproporcjonalny rozkład naprężeń normalnych prostopadłych do powierzchni klejonych elementów. Jak wykazano na podstawie analizy literatury, to właśnie naprężenia normalne prostopadłe do powierzchni spoiny klejowej powodują występowanie tzw. zjawiska oddzierania. Najwyższe wartości naprężeń normalnych, zbliżonych do naprężeń stycznych, występują na krawędziach połączeń zakładkowych [41, 94]. Zjawisko oddzierania ma istotny wpływ na inicjację zniszczenia połączenia

adhezyjnego [34]. Dlatego też zastosowanie łączników mechanicznych, które znacznie ograniczają to negatywne zjawisko powinno skutkować wzrostem nośności i trwałości zmęczeniowej połączeń hybrydowych [51, 101, 157].

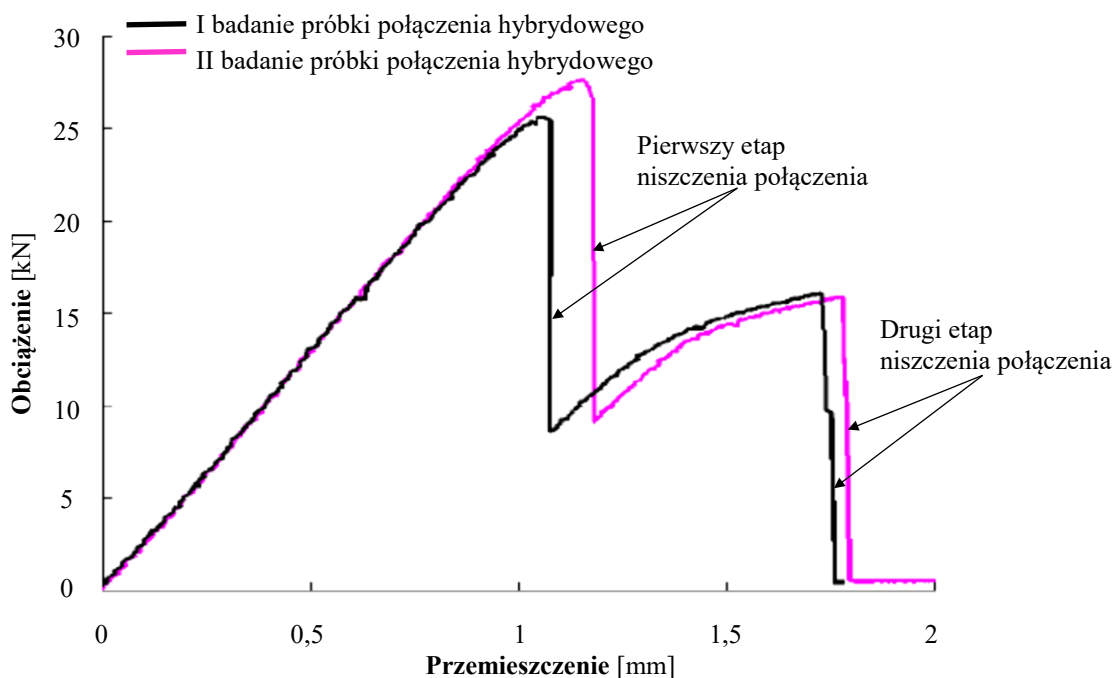
Obserwując zmianę wymagań dotyczących sposobu rozmieszczania łączników mechanicznych w połączeniach zakładkowych konstrukcji stalowych na przełomie ostatnich 30 lat, można zauważyć tendencję do stopniowego zmniejszania zalecanej odległości ich montażu od krawędzi zakładki na kierunku działania przyłożonego obciążenia. Dla przykładu Polska Norma [105] z 1980 roku zawierająca wymagania dotyczące obliczeń statycznych i projektowania konstrukcji stalowych rekomenduje montaż łączników mechanicznych w połączeniach z jedną zakładką, których otwory (oś) należy umiejscowić w odległości $\geq 2d$ od krawędzi łączonego elementu. W normie [103] z roku 1990 odległość tą określono na $\geq 1,5d$, natomiast w roku 2006 Polska Norma [112] wskazując już wartość odległości jako $\geq 1,2d$.

Chcąc ocenić zmianę geometrii rozmieszczenia łączników w połączeniach, przygotowano do badań kolejne próbki. W tej serii testów ponownie badano nośność połączeń klejowych, mechanicznych i hybrydowych, jednak próby statyczne i zmęczeniowe przeprowadzono na połączeniach ze zmodyfikowanym rozmieszczeniem łączników mechanicznych – śrub, zgodnie z przyjętym założeniem ich montażu w odległości $1d$ od krawędzi zakładki. Próbki do badań, analogicznie jak we wcześniejszych testach, powstały poprzez łączenie elementów opisanych w tab. 3.1. Metodyka badań oraz warunki początkowe były zgodne z zapisami rozdziału 3.1.1, za wyjątkiem sposobu przygotowania próbek do procesu klejenia. Jak zaznaczono w rozdziale 3.1.3, z powodu negatywnego wpływu piaskowania na trwałość zmęczeniową połączeń hybrydowych, postanowiono zrezygnować z piaskowania elementów na potrzeby przygotowania próbek do klejenia.

Badaniom poddano próbki o długości zakładki 50 mm (rys. 3.1.). Zarówno w połączeniach mechanicznych, jak i hybrydowych parametrem określającym położenie śrub była ich odległość od krawędzi zakładki wyrażona wartością średnicy łącznika. Otwory montażowe wykonywano w odległości równej jednej średnicy śruby – $1d$ – od krawędzi zakładki (odległość była mierzona od krawędzi zakładki do osi symetrii otworu). W celu konstruktywnej analizy otrzymanych wyników, ich zestawienie uzupełniono danymi z eksperymentu, którego przedmiotem były badania nośności

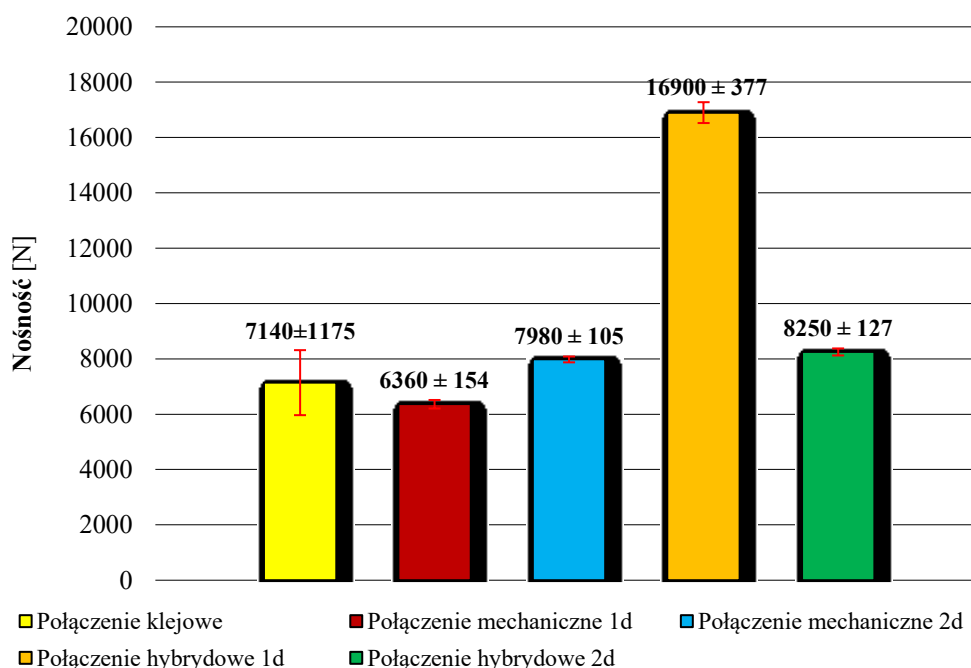
i trwałości zmęczeniowej identycznych próbek, ze śrubami umieszczonymi w odległości $2d$ od krawędzi zakładki – badanie opisane w rozdziale 3.1.3.

Podczas prób wytrzymałościowych połączeń hybrydowych zaobserwowano zjawisko dwuetapowego niszczenia próbek. Podobne prawidłowości związane z procesem niszczenia połączeń hybrydowych były opisywane w literaturze [127, 132, 141]. W pierwszej kolejności (I etap destrukcji połączenia) zniszczeniu ulegała spoina klejowa. Zjawisku temu towarzyszył charakterystyczny dźwięk – „trzask” – pękającej warstwy klejowej. Na rys. 3.7. zaprezentowano proces dwuetapowego niszczenia połączenia hybrydowego, który można przyjąć jako reprezentatywny dla połączeń klejowo-nitowych lub klejowo-śrubowych. I tak w pierwszej fazie niszczenia połączenia widoczny jest charakterystyczny uskok – zmniejszenie wartości przenoszonego obciążenia. W wyniku zniszczenia spoiny klejowej nie następowało natychmiastowe zniszczenie połączenia. Drugi etap niszczenia połączenia był bezpośrednio związany z nośnością połączenia mechanicznego i prawdopodobnie z nośnością spoiny adhezyjnej, która pozostała niezniszczona w środkowej części zakładki. Po przekroczeniu obciążenia zbliżonego do nośności tego typu połączeń mechanicznych następowało całkowite zniszczenie połączenia.



Rysunek 3.7. Dwuetapowy proces niszczenia połączenia hybrydowego w trakcie badania jego nośności [141]

Wyniki badań eksperymentalnych przedstawiono na rys. 3.8. Uzyskane rezultaty wskazały, iż nośność połączeń klejowych i mechanicznych była porównywalna. Porównując natomiast połączenia mechaniczne i hybrydowe zaobserwowano istnienie zależności pomiędzy wariantem rozmieszczenia łączników mechanicznych w połączeniu a ich nośnością. Połączenia mechaniczne w wariantcie $2d$ charakteryzowała o około 20% większa nośność w porównaniu do wariantu $1d$. Różnice wynikały z innego mechanizmu niszczenia połączenia. W wariantcie $2d$ zniszczenie węzła połączeniowego polegało na ścięciu śruby, natomiast w przypadku połączeń w wariantcie $1d$ połączenia ulegały zniszczeniu po przekroczeniu w łączonych elementach dopuszczalnych naprężeń na naciski powierzchniowe.



Rysunek 3.8. Porównanie nośności połączeń klejowych, mechanicznych i hybrydowych z zakładką 50 mm (dla dwóch wariantów rozmieszczenia łączników mechanicznych w odległości $1d$ i $2d$ od krawędzi zakładki)

Największe zmiany powodowane zmianą geometrii połączenia zaobserwowano w połączeniach hybrydowych – wariant $1d$. W połączeniu hybrydowym z łącznikami mechanicznymi umieszczonymi w odległości $1d$ od krawędzi zakładki nastąpił wzrost nośności w porównaniu do połączeń mechanicznych o ponad 160%. W połączeniu hybrydowym w wariantcie $2d$ nie obserwowano tego rodzaju efektu – nastąpił jedynie nieznaczny wzrost nośności na poziomie 3-4%.

Kolejnym etapem badań eksperymentalnych było przeprowadzenie testów trwałościowych połączeń. Oznaczano trwałość zmęczeniową połączeń klejowych, mechanicznych i hybrydowych. Na potrzeby eksperymentu przygotowano i wykorzystano próbki identyczne ze stosowanymi w badaniach statycznych opisanych w niniejszym rozdziale.

W tab. 3.4. zaprezentowano wyniki przeprowadzonych prób zmęczeniowych. Ponownie stwierdzono występowanie bardzo dużych różnic pomiędzy wartościami trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych a pozostałymi rodzajami połączeń – mechanicznymi i hybrydowymi. Różnice te sięgają aż trzech rzędów wielkości. Połączenia klejowe ulegały zniszczeniu średnio po 8200 cyklach. W przypadku połączeń mechanicznych zaobserwowano pozytywny wpływ zmniejszenia odległości montażu łącznika mechanicznego od krawędzi zakładki. Połączenia w wariancie 1d osiągnęły ponad 2-krotnie większą trwałość zmęczeniową w porównaniu z połączeniami przygotowanymi w wariancie 2d.

Tabela 3.4. Trwałość zmęczeniowa połączeń o zakładce 50 mm, montaż łączników mechanicznych w odległości 1d i 2d od krawędzi zakładki

Trwałość zmęczeniowa [liczba cykli do zniszczenia połączenia]					
Rodzaj połączenia /nr próbki	Połączenia klejowe	Połączenia mechaniczne 1d	Połączenia mechaniczne 2d	Połączenia hybrydowe 1d	Połączenia hybrydowe 2d
1	7 000	472 600	141 550	5 010 650*	1 059 750
2	9 500	281 600	89 300	2 247 800	1 260 500
3	4 300	450 000	166 800	3 945 100	1 015 400
4	12 000	—	179 200	5 087 500*	1 098 500
Średnia	8 200	401 400	144 213	4 072 763	1 108 538

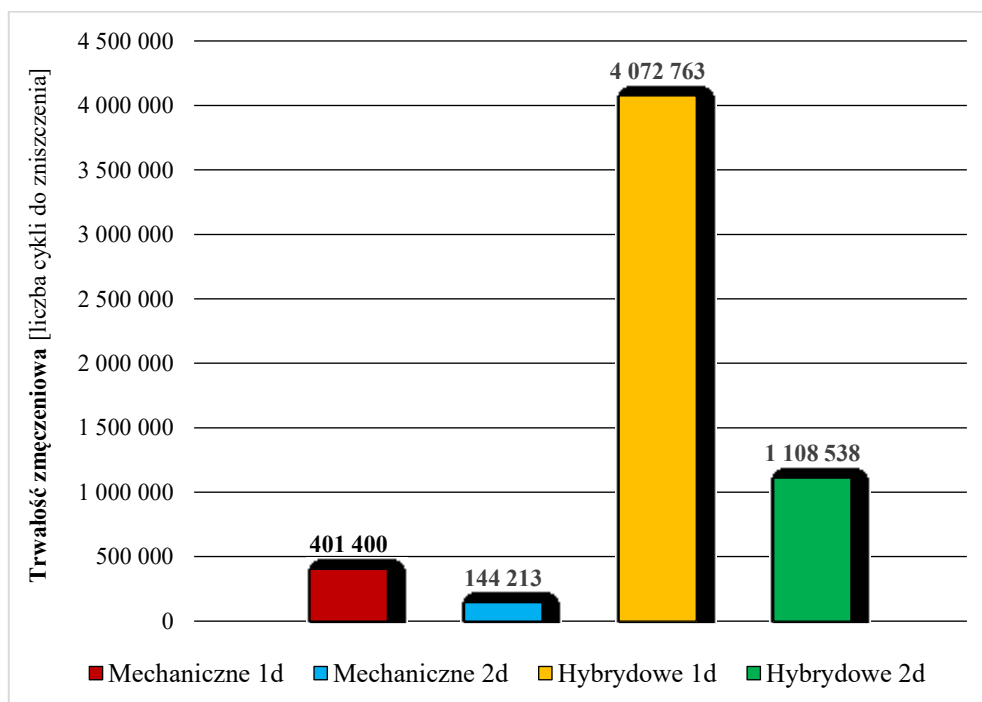
* brak widocznych oznak zniszczenia zmęczeniowego próbki

Dodatkowo zaobserwowano różne postacie niszczenia połączeń. Połączenia mechaniczne w wariancie 1d ulegały zniszczeniu zmęczeniowemu w wyniku pęknięć propagujących nie wzdłuż przekroju krytycznego (jak miało to miejsce w przypadku połączeń w wariancie 2d), ale np. wzdłuż krawędzi zakładki lub w inny, bardziej złożony sposób (rys. 3.9.).



Rysunek 3.9. Widok postaci zniszczenia połączenia mechanicznego w wariancie montażu łączników 1d

Ze względu na długotrwałość wykonywania badań trwałościowych do momentu zniszczenia próbki, zdecydowano o przerwaniu testów po 5 mln cykli, co przy założonych parametrach badań – częstotliwości zmian obciążenia równej 8 Hz – oznaczało nieprzerwane badania dla jednej próbki trwające ponad 170 godzin, dlatego też badania próbek hybrydowych nr 1 i nr 4 w wariancie 1d (tab. 3.4.) zostały przerwane po przekroczeniu założonej liczby cykli (próbki nie uległy zniszczeniu). Na rys. 3.10. zaprezentowano wyniki poszczególnych testów w postaci wykresu słupkowego. Nie uwzględniono w nich wyników połączeń klejowych. Jak przedstawiono w tab. 3.4., wartości trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych znacznie odbiegają od pozostałych próbek, w związku z powyższym ich zamieszczenie na wspólnym zestawieniu powodowałoby niewystarczającą czytelność.



Rysunek 3.10. Zestawienie wyników badań doświadczalnych trwałości zmęczeniowej próbek połączeń mechanicznych i hybrydowych z zakładką 50 mm (wartości średnie dla dwóch wariantów rozmieszczenia łączników mechanicznych w odległości 1d i 2d od krawędzi zakładki)

Zaproponowana modyfikacja miejsca montażu łączników mechanicznych w postaci przesunięcia otworów montażowych bliżej krawędzi zakładki okazała się korzystnym zabiegiem w aspekcie wzrostu trwałości zmęczeniowej zarówno połączeń mechanicznych jak i hybrydowych. W przypadku połączeń mechanicznych należy pamiętać o tym, że przesuwanie łączników bliżej krawędzi może „wywołać” dodatkowe problemy z przekraczaniem w węźle połączeniowym dopuszczalnych nacisków powierzchniowych w łączonych elementach. W badaniach własnych, ze względu na niewielką odległość ścianki otworu od krawędzi łączonych elementów, zjawisko to obserwowano w innej postaci uszkodzeń zmęczeniowych. W połączeniach mechanicznych przesunięcie miejsca montażu łączników bliżej krawędzi zakładki wpłynęło na ograniczenie negatywnego oddziaływania wtórnych momentów gnących, co skutkowało ponad 2-krotnym wzrostem trwałości zmęczeniowej połączenia.

W przypadku połączeń hybrydowych zmiana montażu łączników mechanicznych spowodowała bardziej widoczne zmiany właściwości wytrzymałościowych. Trwałość zmęczeniowa modyfikowanych połączeń hybrydowych (wariant 1*d*) była ponad 10-krotnie większa w stosunku do trwałości połączeń mechanicznych z takim samym schematem geometrycznym montażu łączników i 4-krotnie wyższa w porównaniu do połączeń hybrydowych z łącznikami montowanymi w wariancie 2*d*.

3.2 Obliczenia MES

3.2.1 Metodyka obliczeń

W celu lepszego rozpoznania zjawisk dystrybucji obciążeń w połączeniach hybrydowych w konfiguracji śrubowo-klejowej, mechanizmów jego niszczenia oraz efektów wywołanych zmianą geometrii montażu łączników mechanicznych zrealizowano serię obliczeń, wykorzystując do tego celu dedykowane narzędzia obliczeniowe. W rozdziale opisano obliczenia oparte na metodzie elementów skończonych, które obejmowały badania z wykorzystaniem modeli połączeń w różnych wariantach montażu łączników. Modyfikowano ich układ geometryczny – zmieniano rozmieszczenie łączników mechanicznych, odwzorowując przy tym warunki brzegowe z badań eksperymentalnych – uwzględniono m.in. wstępne naciski montażowe łączników mechanicznych i rodzaje obciążeń występujących w połączeniu w związku z montażem połączeń na potrzeby badań wytrzymałościowych np. osiowanie połączenia w trawersie

maszyny wytrzymałościowej. Oceniono także, jakie są różnice w wartościach naprężeń, jeżeli do obliczeń zostanie wykorzystana domyślna siatka tetragonalna i siatka bardziej regularna – heksagonalna. Na podstawie otrzymanych wyników przeprowadzono analizy porównawcze w celu rozpoznania zmian naprężeń występujących w elementach połączenia.

Metoda elementów skończonych – MES (ang. FEA – Finite Element Analysis) jest w dniu dzisiejszym jedną z podstawowych metod prowadzenia obliczeń inżynierskich wspomaganych komputerowo (ang. CAE – Computer Aided Engineering). Istotą metody elementów skończonych jest sposób aproksymacji równań różniczkowych cząstkowych polegający na podziale obszaru obliczeniowego na małe podobszary o prostych kształtach zwane elementami skończonymi. W procesie rozwiązywania problemu metodą elementów skończonych można wyróżnić trzy moduły:

- preprocesor – moduł umożliwiający opracowanie modelu geometrycznego, wprowadzenie parametrów symulacji, zdefiniowanie warunków brzegowych,
- solver – moduł umożliwiający wybór typu analizy, określenie warunków rozwiązania, określenie zakresu wyników do zapisania w pliku wynikowym,
- postprocesor – moduł umożliwiający prowadzenie obserwacji, analizy i opracowania rezultatów, przygotowanie raportu z analizy.

Nieodłączną zaletą MES jest możliwość przeprowadzenia symulacji bez konieczności budowania prototypu, co znacznie redukuje czasochłonność i koszty procesu projektowania. Wirtualna symulacja przedmiotowych zjawisk fizycznych umożliwia śledzenie procesu „w trakcie”, czego niestety nie zapewniają badania eksperymentalne. O ile w przypadku badań empirycznych, zadając właściwe warunki brzegowe możemy zaobserwować tylko efekt eksperymentu, o tyle w przypadku obliczeń z wykorzystaniem solvera MES istnieje możliwość śledzenia zjawisk zachodzących w każdym momencie trwania symulacji.

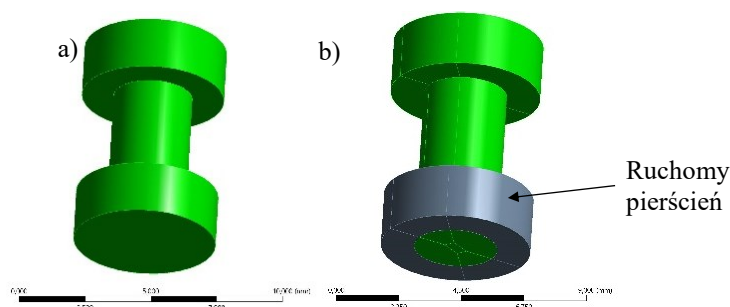
Na potrzeby realizacji zadania wykorzystywano oprogramowanie Ansys Workbench wydanie 19.0.

Modelowanie połączeń

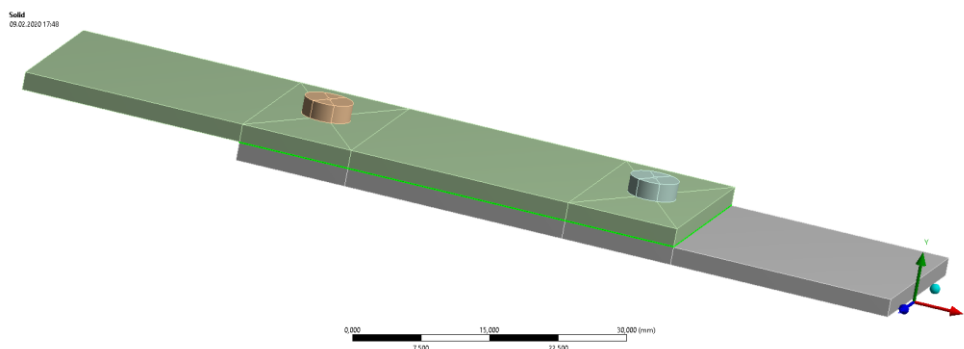
Proces przygotowania modelu i następnie realizację obliczeń można podzielić na kilka etapów, wykonywanych w poszczególnych modułach narzędzia obliczeniowego:

- a) przygotowanie modelu geometrycznego (moduł Design Modeler),
- b) wygenerowanie siatki elementów skończonych (moduł Mechanical),
- c) zdefiniowanie warunków brzegowych (moduł Mechanical),
- d) rozwiązywanie zadania (moduł Mechanical),
- e) analiza otrzymanych wyników (moduł Mechanical).

Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla modelu połączenia jednozakładowego hybrydowego, utworzonego z dwóch elementów o długości 100 mm, szerokości 25 mm oraz grubości 2 mm. Długość zakładki połączenia była równa 50 mm, natomiast grubość spoiny klejowej wynosiła 0,1 mm. Spoinę modelowano jedną warstwą [150], natomiast łączone elementy (próbki) pięcioma warstwami elementów. Średnica łączników mechanicznych była równa 3 mm. Zamodelowano dwa łączniki umieszczając je na odcinku mierzonym od krawędzi zakładki do osi otworu i równym jednej średnicy trzpienia łącznika (wariant 1d) lub dwóm średnicom (wariant 2d). Dla modelu łącznika przygotowano dwa rozwiązania. W pierwszym rozwiązaniu wykonano model jednoelementowy, składający się z trzonu o średnicy 3 mm i łbów o średnicy 5,4 mm i wysokości 2 mm (rys. 3.11.a), natomiast w drugim rozwiązaniu przygotowano model łącznika, który składał się z dwóch elementów: trzonu z łbem i pierścienia, przy czym pierścień miał możliwość przesuwania się względem osi trzonu (rys. 3.11.b). Takie rozwiązanie umożliwiało odzwierciedlenie warunków ciągłego obciążenia występującego w połączeniu mechanicznym (śrubowym) po jego montażu. Na rys. 3.12. zaprezentowano przykładowy model geometryczny połączenia hybrydowego utworzony w module Design Modeler programu Ansys Workbench z zakładką o długości 50 mm i łącznikami montowanymi w odległości $2d$ od krawędzi zakładki.

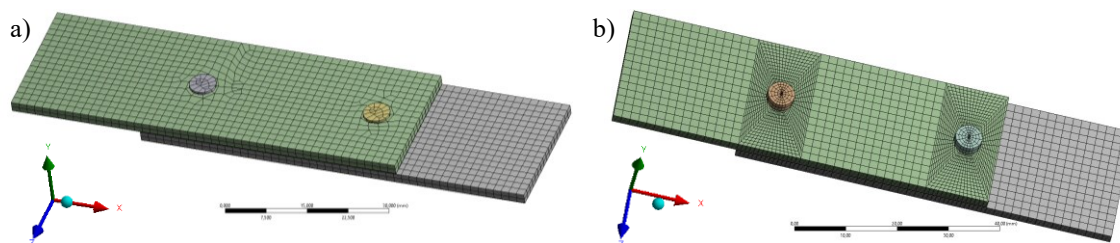


Rysunek 3.11. Modele geometryczne łączników mechanicznych
a) łącznik jednoelementowy, b) łącznik dwuelementowy z ruchomym pierścieniem



Rysunek 3.12. Model geometryczny połączenia hybrydowego opracowanego na potrzeby badań z zakładką o długości 50 mm i łącznikami mechanicznymi w konfiguracji 2d

Dodatkowo, aby ocenić wpływ rodzaju siatki elementów skończonych wykorzystywanej w modelowaniu połączenia na otrzymywane wyniki, obliczenia przeprowadzono dla siatki typu *tetra* (tetrahedral) oraz *heksa* (hexahedral). Na rys. 3.13. zaprezentowano modele połączeń przygotowanych do badań przy wykorzystaniu siatki *tetra* (a) i *heksa* (b). Siatka *tetra* jest domyślną siatką elementów skończonych oferowaną użytkownikowi przez moduł Ansys Meshing. Zasadniczą zaletą tego typu siatki jest stosunkowo mały nakład pracy przy budowie modelu oraz krótszy czas obliczeń. Stąd to rozwiązanie jest atrakcyjne dla użytkowników i jest przez nich często wykorzystywane [80, 123].



Rysunek 3.13. Modele połączeń opracowane przy zastosowaniu:
a) siatki typu *tetra* oraz b) siatki typu *heksa*

Opracowanie i zastosowanie drugiego rodzaju siatki – *heksa* – jest bardziej pracochłonne, jednak regularna budowa siatki wpływa pozytywnie na jakość otrzymywanych wyników. Dla zobrazowania wpływu rodzaju siatki na liczbę elementów i węzłów występujących w połączeniu, opartym na tym samym modelu geometrycznym, w tab. 3.5. zestawiono dane dotyczące opracowanego połączenia w wariancie 1d i 2d.

Tabela 3.5. Porównanie liczby elementów oraz węzłów obliczeniowych modelu połączenia dla siatek typu tetra i hekza

Elementy badanego modelu				
Model próbki (wariant)	Liczba elementów (komórek) – siatka tetra	Liczba elementów (komórek) – siatka hekza	Liczba węzłów – siatka tetra	Liczba węzłów – siatka hekza
1d	13 347	47 079	70 707	202 141
2d	13 233	27 884	70 057	137 498

W zakresie definiowania właściwości materiałowych elementów połączenia hybrydowego przyjęto następujące rozwiązania: łączonym elementom nadano nieliniowe właściwości stopu aluminium serii AW 2024-T3, tworzywu adhezyjnemu – nieliniowe właściwości kleju Epidian 57/Z1, natomiast łącznikom mechanicznym – nieliniowe właściwości stali. W tab. 3.6. zamieszczono parametry materiałowe odpowiednich grup elementów wykorzystanych w budowie połączenia.

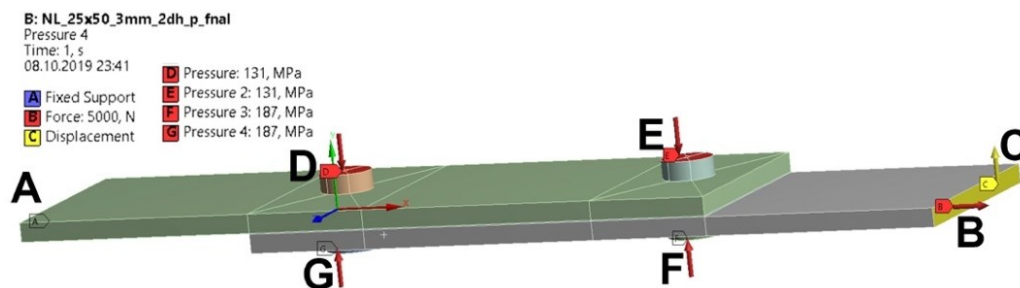
Tabela 3.6. Parametry przyjęte do definiowania właściwości materiałowych poszczególnych grup elementów badanych połączeń

Parametry elementów składowych połączeń										
Łączone elementy	σ [MPa]	0	330,0	348,5	366,0	411,0	469,0	507,0	540,0	540,0
	ε	0	0,005	0,010	0,020	0,040	0,080	0,120	0,160	0,192
Klej Epidian 57/Z1	σ [MPa]	0	20,830	40,344	58,282	69,913	72,951	74,690	75,453	-
	ε	0	0,010	0,020	0,030	0,040	0,050	0,060	0,065	-
Łączniki Stal	σ [MPa]	0	100,0	200,0	242,0	251,4	252,2	253,1	254,2	255,9
	ε	0	0,005	0,001	0,0012	0,002	0,0025	0,003	0,004	0,005

Warunki brzegowe w zakresie obciążenia modelu połączenia zostały przyjęte na bazie parametrów występujących w testach eksperymentalnych połączeń montowanych w maszynie wytrzymałościowej. Stąd w modelu połączenia zdefiniowano następujące warunki (rys. 3.14.):

- w jednym z końców połączenia odebrano łączonemu elementowi wszystkie stopnie swobody ($D_x, D_y, D_z, R_x, R_y, R_z = 0$), odtwarzając w ten sposób warunki mocowania połączenia w uchwycie maszyny wytrzymałościowej – rys. 3.14. lit. A,

- b) dla swobodnego końca połączenia zamodelowano obciążenie w postaci siły działającej na pole powierzchni przekroju łączonego elementu oraz odebrano stopnie swobody zgodnie ze schematem: $D_z = 0$, R_x , R_y , $R_z = 0$ – rys. 3.14. lit. B,
- c) swobodny koniec połączenia przemieszczono o wartość grubości łączonego elementu (2 mm) w kierunku prostopadłym do kierunku działającej siły, odtwarzając w ten sposób osiowe warunki mocowania połączenia w uchwycie maszyny wytrzymałościowej – rys. 3.14. lit. C,
- d) naciski wywołane oddziaływaniem łącznika mechanicznego po montażu odtworzono powierzchniowym obciążeniem łba i pierścienia łącznika mechanicznego – rys. 3.14. lit. D÷G:
- obciążenie łba i pierścienia ma przeciwne zwroty, więc wartość wypadkowa obciążenia się zeruje,
 - wartości obciążenia zostały dobrane na podstawie zmierzonego momentu skręcającego powstającego w czasie montażu łączników mechanicznych – około 2 Nm,
 - uwzględniając wartość momentu oraz zewnętrzną średnicę gwintu oszacowano, że siła występująca w trzonie łącznika jest równa 3,3 kN.



Rysunek 3.14. Warunki brzegowe zadane w procesie obliczeń numerycznych opracowanych modeli połączeń mechanicznych i hybrydowych (klejowo-śrubowych)

Ponieważ połączenie hybrydowe zbudowane jest z kilku elementów istniała konieczność zdefiniowania rodzajów kontaktu pomiędzy sąsiednimi płaszczyznami styku elementów próbki. Zastosowane rodzaje kontaktów w połączeniu przedstawiono w tab. 3.7. Obliczenia przeprowadzono w zakresie nieliniowym.

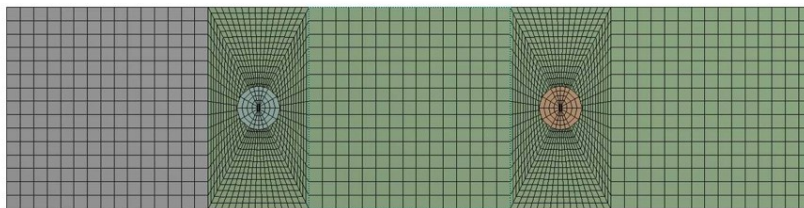
Tabela 3.7. Rodzaje kontaktów pomiędzy elementami połączenia zdefiniowanych w procesie modelowania próbek

Rodzaje i właściwości kontaktów					
Łączone elementy (ŁE)	Powierzchnia ŁE – warstwa adhezyjna	Łby łączników mechanicznych (ŁM) – ŁE	Trzpienie ŁM – wewnętrzne powierzchnie otworów	Pierścienie ŁM – powierzchnie łączonego elementu	Pierścienie ŁM – powierzchnie trzpieni
Rodzaj kontaktu	Sklejone (bonded)	Ruchome z tarcieniem, $f = 0,2$ (frictional)	Ruchome z tarcieniem, $f = 0,02$ (frictional)	Ruchome z tarcieniem, $f = 0,2$ (frictional)	Ruchome z tarcieniem, $f = 0,02$ (frictional)

3.2.2 Ocena wpływu siatki obliczeniowej na jakość otrzymywanych wyników

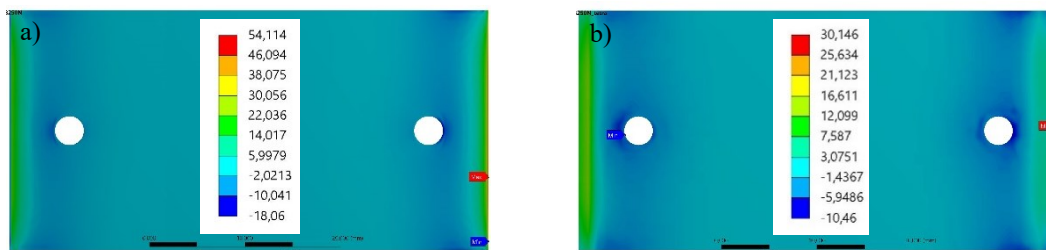
Chcąc osiągnąć wysoką jakość otrzymywanych wyników kierowano się zasadą przygotowania siatki elementów skończonych o właściwej regularności, eliminując tym samym komórki modelu o kształtach nieregularnych. Przy okazji starano się uzyskać symetryczne rozmieszczenie elementów skończonych w spoinie połączenia klejowego – szczególnie w okolicach otworów montażowych. Jak zaprezentowano na rys. 3.13., powyższy warunek został spełniony, gdy do przygotowania modelu wykorzystywano siatkę typu *heksa*.

W obliczeniach porównawczych do budowania modelu połączenia wykorzystano oba typy siatek, przy czym pierwszy opracowano w oparciu o domyślną siatkę typu *tetra*. Wybór i zastosowanie tego rodzaju siatki do obliczeń nie wymaga dużego nakładu pracy, ale jednocześnie w miejscach o złożonej geometrii może być przyczyną powstawania punktów osobliwych. Ponieważ w połączeniu hybrydowym, w elementach łączonych występują otwory, gdzie wykorzystanie elementów typu *tetra* powoduje powstanie miejscowych zaburzeń siatki (nieregularność), opracowano kolejny model badanego połączenia z wykorzystaniem siatki elementów typu *heksa*. Siatka *heksa* jest znacznie bardziej wymagająca w aspekcie czasochłonności jej przygotowania i kompetencji samego projektanta. Jak wskazują zalecenia prezentowane w literaturze [80, 123], jakość otrzymywanych wyników przy przyjęciu takiego rozwiązania, jest wyższa. Zastosowanie tego rodzaju siatki znacząco wydłuża proces przygotowania modelu obliczeniowego oraz sam czas obliczeń (w obliczeniach własnych ok. 5-krotnie). W rozważanym przypadku wykorzystanie siatki *heksa* z zagęszczoną strukturą elementów w okolicach otworów pod łączniki (rys. 3.15.) spowodowało m.in. zwiększenie liczby elementów i węzłów w badanym modelu.



Rysunek 3.15. Widok siatki obliczeniowej typu hekso, z charakterystyczną regularną formą w pobliżu otworów

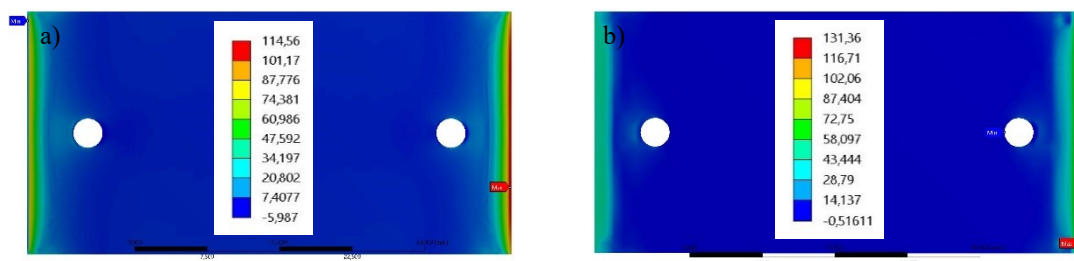
Wykorzystując modele połączenia z dwoma rodzajami siatki przeprowadzono obliczenia zgodnie z wyżej prezentowanymi warunkami. Wymiary geometryczne modelu określono w tab. 3.1., wariant rozmieszczenia łączników mechanicznych – $2d$. Badanym elementom przypisano właściwości zdefiniowane w tab. 3.6. Rodzaje kontaktów zdefiniowano zgodnie z danymi z tab. 3.7. Wartość obciążenia przyjętego do obliczeń była równa nośności połączeń hybrydowych, którą otrzymano w badaniach eksperymentalnych – średnia wartość nośności wyznaczona w testach eksperymentalnych była równa 8250 N [123]). Uwzględniono naciski wstępne (montażowe) śrub. Przykładowe rozkłady naprężeń normalnych prostopadłych do spoiny klejowej (będące miarą wielkości zjawiska oddzierania występującego w spoinach połączeń adhezyjnych) zaprezentowano na rys. 3.16. W przypadku modelu z siatką typu hekso (rys. 3.16.a), maksymalne wartości naprężeń są blisko 2-krotnie wyższe od wyliczonych przy wykorzystaniu siatki tetra (rys. 3.16.b) i mają wartość zbliżoną do wartości naprężeń występujących w połączeniach czołowych obciążonych na odrywanie, klejonych Epidianem 57/Z1 [62].



Rysunek 3.16. Porównanie rozkładu naprężeń normalnych prostopadłych do spoiny klejowej:
a) dla modelu z wykorzystaniem siatki obliczeniowej typu hekso, b) dla modelu z wykorzystaniem siatki obliczeniowej typu tetra

Na rys. 3.17. zaprezentowano mapy rozkładu maksymalnych naprężeń głównych występujących w spoinie klejowej dla modeli budowanych na bazie siatki typu tetra i hekso. Dla modelu z siatką typu hekso maksymalne naprężenia główne będące miarą

kohezji tworzywa adhezyjnego są mniejsze na końcach zakładki i mają wartości bardziej zbliżone do rzeczywistych wartości dekohezji kleju.



Rysunek 3.17. Rozkład maksymalnych naprężeń głównych występujący w spoinie klejowej:
a) dla modelu z wykorzystaniem siatki obliczeniowej typu hekso, b) dla modelu z wykorzystaniem siatki obliczeniowej typu tetra

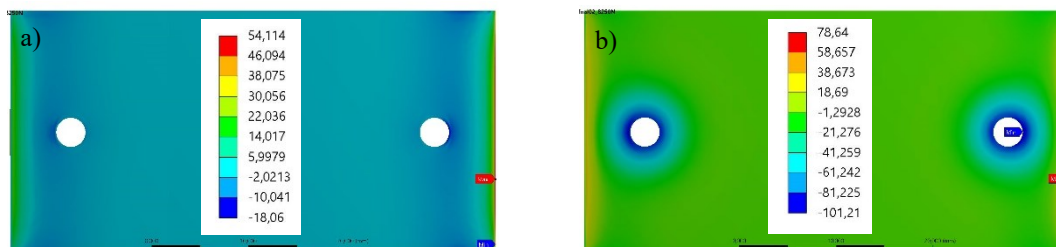
Uwzględniając powyższe fakty, do dalszych obliczeń zdecydowano się wykorzystywać modele przygotowane na bazie elementów opracowanych przy użyciu siatki typu *hekso*.

3.2.3 Wpływ nacisków montażowych na rozkład naprężeń w połączeniu

W obliczeniach numerycznych połączeń hybrydowych bardzo często pomija się dodatkowe oddziaływanie wyężonych momentem skręcającym łączników mechanicznych na warstwę tworzywa adhezyjnego [79, 98]. Modelowane są same łączniki, natomiast nie uwzględnia się naprężenia wstępnego występującego w łącznikach, wynikającego ze sposobu ich montażu – w przypadku śrub jest to moment skręcający wywołujący rozciąganie trzpienia śruby i ściskanie elementów łączonych na powierzchni równej powierzchni łbów łączników. W celu analizy wpływu dodatkowych obciążeń montażowych na spoinę połączenia przeprowadzono obliczenia porównawcze modelu zbudowanego z wykorzystaniem siatki *hekso* odtwarzając naciski, jakie powstają w wyniku oddziaływania nakrętki i łba na łączone elementy – warunek brzegowy d), rozdział 3.2.1, (str. 98). Wymiary geometryczne modelu określono w tab. 3.1., wariant rozmieszczenia łączników mechanicznych – 2d. Badanym elementom przypisano właściwości jak w tab. 3.6. Model połączenia obciążono siłą 8250 N. Rozkłady naprężeń normalnych, stycznych i maksymalnych głównych zaprezentowano na rys. 3.18., 3.19. i 3.20.

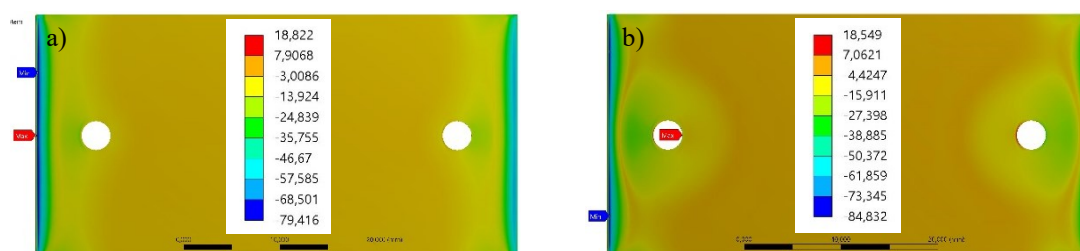
Analiza otrzymanych rozkładów wskazuje na istotny wpływ nacisków montażowych na zmiany nie tylko rozkładu naprężeń normalnych prostopadłych do

spoiny w okolicach otworów pod łączniki – ich wzrost (rys. 3.18.), ale również na podwyższenie wartości naprężeń normalnych na końcach zakładki.

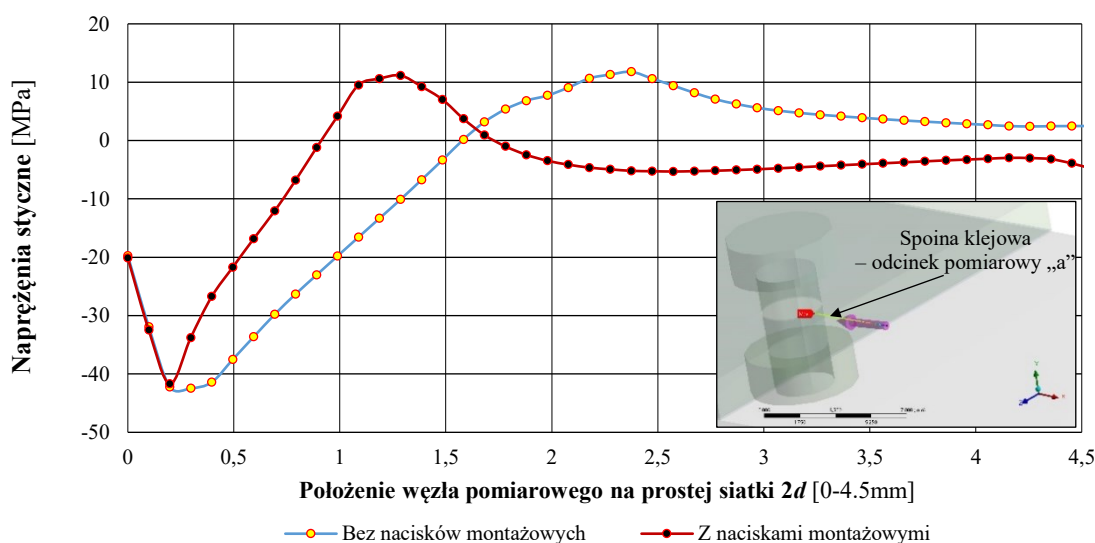


Rysunek 3.18. Porównanie rozkładu naprężeń normalnych prostopadłych do spoiny klejowej
a) bez nacisków montażowych od śrub, b) z uwzględnieniem nacisków montażowych od śrub

W zakresie naprężeń stycznych występuje wyraźna strefa ich zmian rozchodząca się promieniście wokół otworów – rys. 3.19. Dodatkowo wartości naprężeń stycznych na końcach zakładki są mniejsze i mniejsza jest również różnica pomiędzy naprężeniami na końcu zakładki i w okolicy otworu – rys. 3.20.

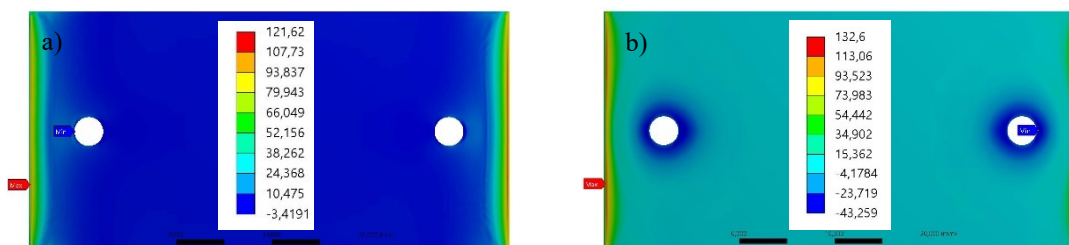


Rysunek 3.19. Porównanie rozkładu naprężeń stycznych w spoinie klejowej:
a) bez nacisków montażowych od śrub, b) z uwzględnieniem nacisków montażowych od śrub



Rysunek 3.20. Porównanie rozkładu naprężeń stycznych na odcinku „a” spoiny klejowej bez nacisków montażowych i z ich uwzględnieniem (w kierunku od krawędzi do łącznika)

Rozkład maksymalnych naprężeń głównych w spoinie również zmienia się pod wpływem nacisków montażowych – rys. 3.21. Strefa ich spiętrzenia na końcach zakładki jest węższa, a w części środkowej końca zakładki dodatkowo zawężona.



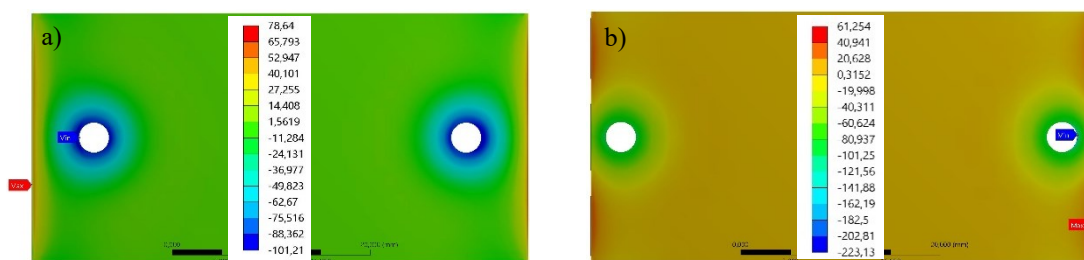
Rysunek 3.21. Porównanie rozkładu maksymalnych naprężeń głównych w spoinie klejowej
a) bez nacisków montażowych od śrub, b) z uwzględnieniem nacisków montażowych od śrub

Porównując otrzymane wyniki i przeprowadzone na ich podstawie analizy [50], można jednoznacznie stwierdzić, iż naciski montażowe pochodzące od zastosowanych w połączeniu łączników mechanicznych wpływają na zmianę rozkładu naprężeń zarówno stycznych, jaki i normalnych w spoinie klejowej. Jest to wystarczającym argumentem, aby przy definiowaniu warunków początkowych uwzględniać występowanie nacisków montażowych, wpływając w ten sposób na poprawę jakości otrzymywanych wyników. Wszystkie następujące po powyższym założeniu obliczenia prowadzono z uwzględnieniem nacisków montażowych zgodnie z warunkiem brzegowym d), rozdział 3.2.1, (str. 98).

3.2.4 Obliczenia numeryczne połączeń jednozakładkowych

Badania eksperymentalne [35, 44, 66, 123, 126, 133], w tym badania własne, dowodzą, że w procesie dwustopniowego niszczenia połączenia hybrydowego w pierwszej kolejności destrukcji ulega połączenie klejowe, a następnie połączenie mechaniczne. Jak wskazują wyżej prezentowane wyniki obliczeń, pozytywny wpływ łączników mechanicznych na rozkład naprężeń w spoinie klejowej jest ograniczony do pola o kształcie zbliżonym do koła o promieniu ok. 1,5 średnicy łącznika. Zgodnie z wytycznymi [62, 105] dotyczącymi warunków montażu łączników dla połączeń mechanicznych w konstrukcjach lotniczych, minimalna odległość montażu łączników od krawędzi powinna wynosić $2d$, czyli dwukrotność wymiaru średnicy łącznika mechanicznego wykorzystanego w połączeniu (wariant $2d$), dlatego też właśnie taki schemat stosowano w pierwszym etapie przeprowadzonych obliczeń numerycznych.

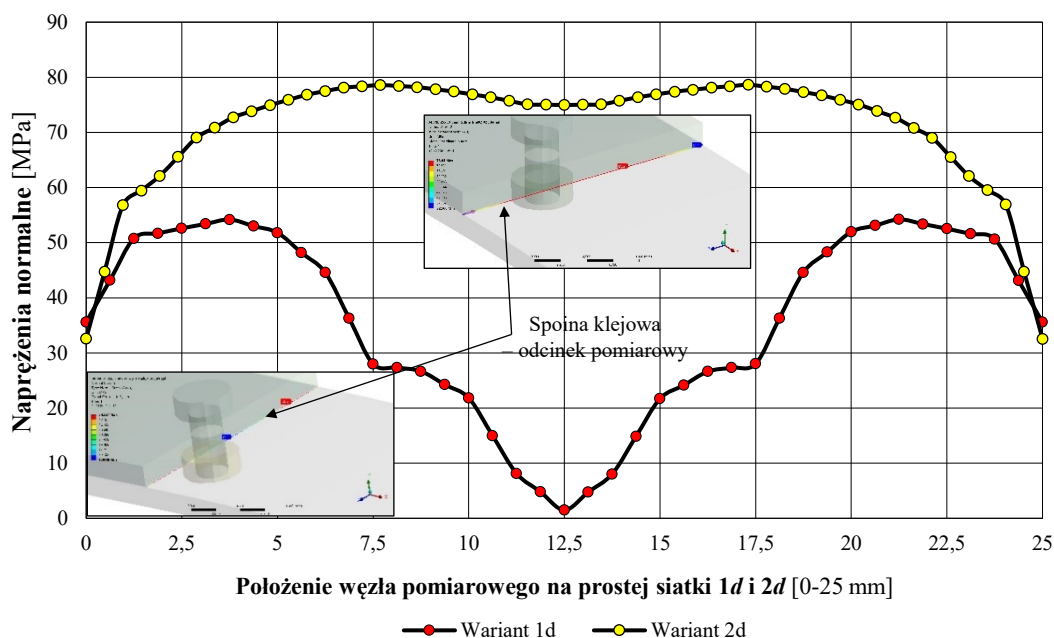
Uwzględniając wielkość pola, w którym występuje pozytywne oddziaływanie łączników na warstwę spoiny klejowej postanowiono wykonać obliczenia dla schematu, w którym łącznik mechaniczny będzie montowany bliżej krawędzi zakładki połączenia – w odległości równej jednej średnicy łącznika mechanicznego ($1d$) mierzonej od osi symetrii łącznika do krawędzi połączenia. Założono, że obecność łączników bliżej krawędzi ograniczy negatywne zjawiska spiętrzenia naprężeń występujące na końcach zakładki i w konsekwencji nastąpi poprawa parametrów wytrzymałościowych połączenia hybrydowego np. jego nośności. Obliczenia wykonano dla połączeń opracowanych zgodnie z danymi zawartymi w tab. 3.1., 3.6. i 3.7. dla dwóch wariantów montażu łączników mechanicznych $1d$ i $2d$, obciążając model połączenia siłą 8250 N. Rozkłady naprężeń normalnych zaprezentowano na rys. 3.22., 3.23. i 3.24.



Rysunek 3.22. Porównanie rozkładu naprężeń normalnych prostopadłych do spoiny klejowej
a) wariant montażu łączników mechanicznych $2d$, b) wariant $1d$

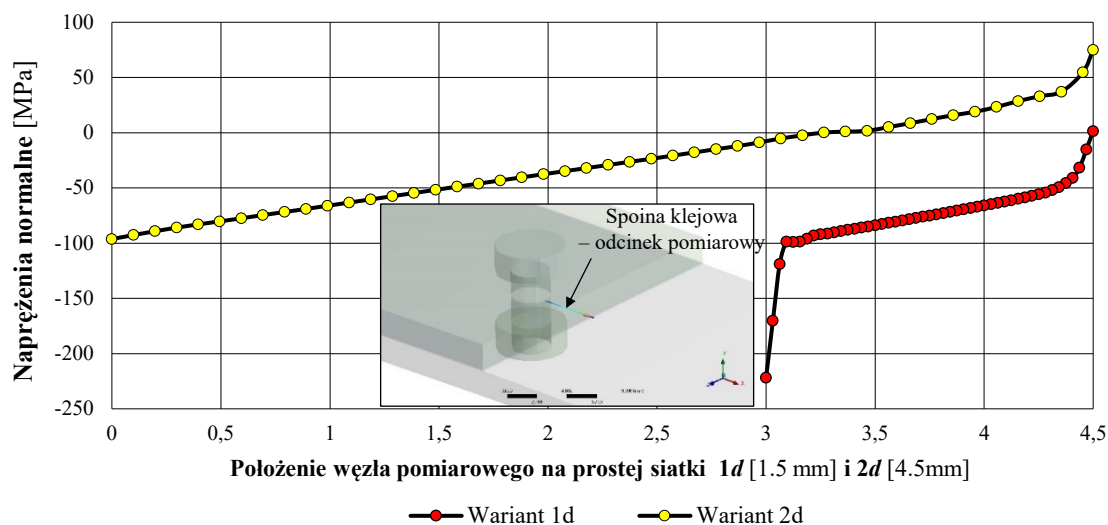
Porównanie otrzymanych wyników w postaci map rozkładów naprężeń normalnych prostopadłych do warstwy klejowej (rys. 3.22.) dla różnych wariantów montażu łączników mechanicznych ($1d$ i $2d$) jednoznacznie wskazuje na to, iż przemieszczenie łączników bliżej krawędzi zakładki połączenia wprowadza pozytywne zmiany niwelujące koncentrację naprężeń w okolicach środkowej części krawędzi zakładki oraz skutkuje obniżeniem maksymalnych wartości naprężeń normalnych prostopadłych do powierzchni kleju o ponad 20%. Wspomnianą prawidłowość potwierdza zmiana wartości naprężeń normalnych w warstwie klejowej na końcach krawędzi zakładki, prezentowana na rys. 3.23. Naprężenia normalne występujące na odcinku pomiarowym (krawędź zakładki) dla obu wariantów montażu łączników mechanicznych są zbliżone jedynie na końcach krawędzi zakładki – na długości około 1 mm po każdej ze stron. W pozostałej części krawędzi zakładki w kierunku do jej środka widoczna jest znaczna różnica w wartościach naprężeń dla poszczególnych wariantów montażu łączników sięgająca około 70 MPa – mniejsze wartości naprężeń występują dla

wariantu 1d. Schemat montażu łączników mechanicznych bliżej krawędzi zakładki ma istotny wpływ na obniżenie wartości naprężeń normalnych występujących na ponad 90% szerokości spoiny klejowej. Analizując otrzymane rezultaty stwierdzono dodatkowo, że przemieszczenie łączników bliżej krawędzi zakładki powoduje rozdzielenie strefy spiętrzenia naprężeń na dwie części i powstanie w okolicach otworów obszaru o znacznie mniejszych naprężeniach. Dlatego też na końcach zakładki połączenia nie występuje ciągła strefa spiętrzenia naprężeń, jak w przypadku wariantu 2d, ale dwie mniejsze strefy rozmieszczone symetrycznie względem osi otworów. Wielkość pola spiętrzenia naprężeń w wariantcie 1d jest więc znacznie mniejsza w porównaniu do wariantu 2d.



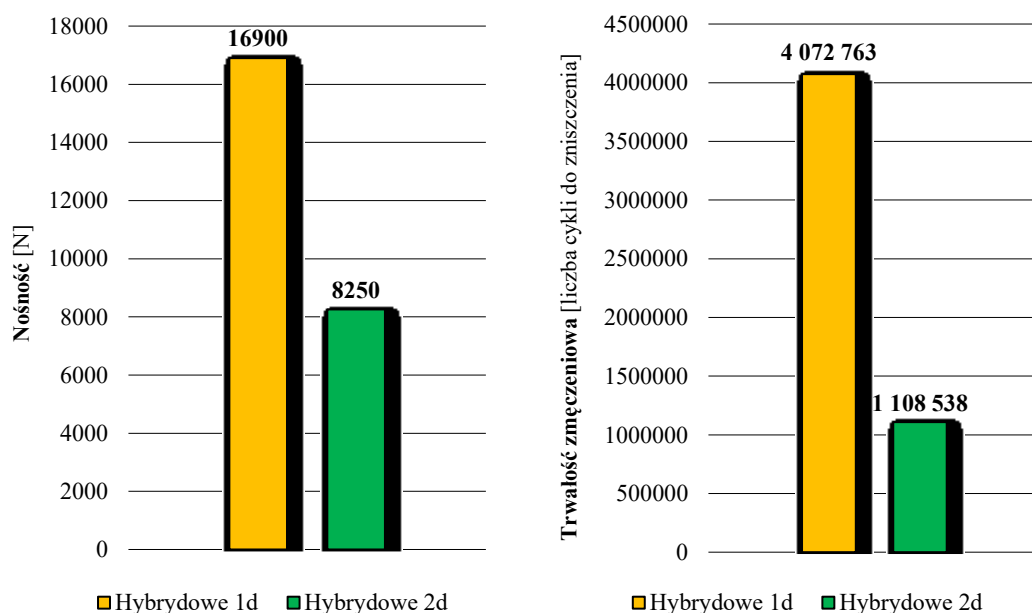
Rysunek 3.23. Porównanie rozkładu naprężeń normalnych na odcinku pomiarowym (25 mm) spoiny klejowej dla montażu łączników w wariantcie 1d i 2d

Kolejną ewaluację rozkładów naprężeń w różnych wariantach montażu łączników mechanicznych wykonano poprzez porównanie wartości naprężeń normalnych prostopadłych do warstwy klejowej występujących na odcinku od końca (krawędzi) zakładki w kierunku osi otworu montażowego (por. rys. 3.24.). Dla wariantu 1d długość odcinka pomiarowego wynosiła 1,5 mm, natomiast dla wariantu 2d – 4,5 mm. Widoczna różnica w wartościach naprężeń normalnych dla rozpatrywanych wariantów montażowych, na poziomie około 50 MPa również wskazuje na prawidłowość, iż montaż łączników bliżej krawędzi zakładki wpływa pozytywnie na dekoncentrację i redukcję naprężeń normalnych tzw. oddzierających.



Rysunek 3.24. Porównanie rozkładu naprężeń normalnych na odcinku pomiarowym spoiny klejowej o długości 1,5 mm dla montażu łączników w wariancie 1d i 4,5 mm dla wariantu 2d (długość odcinka pomiarowego w wartościach względnych)

Biorąc pod uwagę negatywny wpływ naprężeń oddzierających na trwałość połączenia, których to koncentracja występuje właśnie na końcach zakładki, montaż łączników w wariancie 1d skutkujący jej redukcją powinien pozytywnie wpływać na parametry wytrzymałościowe połączenia. Jak dowiedziono we własnych badaniach eksperymentalnych [123, 126], modyfikacja układu geometrycznego połączenia poprzez montaż łączników mechanicznych w wariancie 1d spowodowała istotną poprawę nośności połączeń hybrydowych oraz wzrost ich trwałości zmęczeniowej – rys. 3.25.



Rysunek 3.25. Porównanie nośności i trwałości zmęczeniowej połączeń hybrydowych w wariantach 1d i 2d otrzymanych w badaniach eksperymentalnych własnych

3.3 Podsumowanie

Zasadniczym celem realizacji opisanych w rozdziale badań była próba weryfikacji hipotezy badawczej. Badane próbki połączeń hybrydowych poddawano modyfikacjom geometrycznym polegającym na zmianie długości zakładki oraz schematu montażu łączników mechanicznych. Badania eksperymentalne w zakresie statycznym i w zakresie trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych i mechanicznych oraz połączeń hybrydowych (klejowo-mechanicznych) wykazały istnienie zależności pomiędzy schematem montażowym łączników mechanicznych w połączeniu hybrydowym a jego parametrami wytrzymałościowymi i użytkowymi. Zaproponowana modyfikacja miejsca montażu łączników mechanicznych w postaci przesunięcia otworów montażowych bliżej krawędzi zakładki okazała się korzystnym zabiegiem w aspekcie wzrostu nośności i trwałości zmęczeniowej badanych połączeń hybrydowych.

Ponieważ zastosowanie łączników mechanicznych w połączeniu hybrydowym o długości zakładki równej 25 mm było mało efektywnym rozwiązaniem, w badaniach wykorzystano również połączenia o zakładce 50 mm. W przypadku połączeń klejowych 2-krotne zwiększenie powierzchni zakładki połączenia skutkowało wzrostem nośności połączeń klejowych o około 35%, natomiast w przypadku połączeń mechanicznych ich nośność praktycznie nie zmieniła się, co jest logicznym następstwem faktu braku zmiany liczby łączników w połączeniu. Podczas badań eksperymentalnych obserwowano również istotny wpływ sposobu przygotowania klejonych powierzchni na nośność połączeń. Połączenia hybrydowe z elementami piaskowanymi cechował wzrost nośności o ponad 80% w porównaniu z połączeniami mechanicznymi, podczas gdy dla połączeń z elementami niepiaskowanymi wzrost tego parametru był praktycznie niezauważalny.

Zwiększenie długości zakładki pozytywnie wpłynęło na trwałość zmęczeniową wszystkich rodzajów połączeń, co należy m.in. tłumaczyć większą sztywnością węzła połączeniowego, a przez to mniejszą podatnością łączonych elementów na działanie wtórnych momentów gnących [47]. Interesujące wyniki otrzymano dla połączeń hybrydowych z elementami niepiaskowanymi, w których wystąpił aż 7,5-krotny wzrost trwałości zmęczeniowej – pomimo, że ich nośność była znacznie niższa od połączeń hybrydowych z elementami piaskowanymi. W ten sposób dowiedziono małej przydatności piaskowania jako metody przygotowania powierzchni do klejenia w kontekście eksploatacji połączeń hybrydowych w warunkach zmiennych obciążeń.

W przypadku połączeń hybrydowych piaskowanych, wraz ze zwiększeniem długości zakładki osiągnięto proporcjonalny wzrost trwałości zmęczeniowej (2-krotne zwiększenie pola klejonej powierzchni).

Badania wpływu modyfikacji rozmieszczenia łączników w połączeniu mechanicznym wykazały, iż zmiana ich rozmieszczenia – montaż bliżej krawędzi zakładki – wpływa na parametry wytrzymałościowe połączeń. Połączenia mechaniczne w wariancie $2d$ charakteryzowała o około 20% większa nośność w porównaniu z tymi w wariancie $1d$.

Największe zmiany powodowane zmianą geometrii połączenia zaobserwowano w połączeniach hybrydowych. Zmiana wariantu rozmieszczenia łączników powodowała istotne różnice w zakresie nośności połączeń i ich trwałości zmęczeniowej. W połączeniu hybrydowym z łącznikami mechanicznymi umieszczonymi w odległości $1d$ od krawędzi zakładki nastąpił wzrost nośności w porównaniu z połączeniami mechanicznymi o ponad 160%. W połączeniu hybrydowym w wariancie $2d$ nie obserwowano tego rodzaju efektu – nastąpił niewielki wzrost nośności na poziomie 3-4%.

Podczas przeprowadzonych prób zmęczeniowych stwierdzono występowanie bardzo dużych różnic pomiędzy wartościami trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych a pozostałymi rodzajami połączeń – mechanicznymi i hybrydowymi. Różnice te sięgają aż trzech rzędów wielkości. Połączenia klejowe ulegały zniszczeniu średnio po 8200 cyklach. Niewątpliwie przyczyną takiej prawidłowości była wysoka wartość maksymalnego obciążenia w cyklu wynosząca 4,5 kN, co stanowi ok 65% wartości obciążenia niszczącego w próbach statycznych. Na podstawie badań prezentowanych w literaturze wiadomo, że zalecane maksymalne wartości obciążeń w cyklu spoin klejowych w badaniach trwałościowych nie powinny przekraczać wartości około 30-50% nośności [120].

W przypadku połączeń mechanicznych zmniejszenie odległości montażu łącznika mechanicznego od krawędzi zakładki doprowadziło do wzrostu trwałości zmęczeniowej. Połączenia w wariancie $1d$ osiągnęły ponad 2-krotnie większą trwałość zmęczeniową w porównaniu z połączeniami przygotowanymi w wariancie $2d$. Zwiększenie trwałości zmęczeniowej w tym przypadku spowodowane było zmniejszeniem wartości wtórnych momentów gnących występujących w przekroju krytycznym.

W przypadku połączeń hybrydowych zmiana montażu łączników mechanicznych spowodowała bardziej istotne zmiany w trwałości połączeń. Trwałość zmęczeniowa modyfikowanych połączeń hybrydowych (wariant 1*d*) była ponad 10-krotnie większa w stosunku do trwałości połączeń mechanicznych z takim samym schematem geometrycznym montażu łączników i 4-krotnie wyższa w odniesieniu do połączeń hybrydowych z łącznikami montowanymi w wariancie 2*d*.

W celu lepszego rozpoznania zjawiska dystrybucji obciążeń w połączeniu hybrydowym w konfiguracji śrubowo-klejowej oraz efektów wywołanych zmianą geometrii rozmieszczenia łączników mechanicznych wykonano obliczenia wykorzystując narzędzie obliczeniowe Ansys Workbench. W trakcie przygotowywania modeli obliczeniowych modyfikowano układ geometryczny połączeń, odwzorowując warunki brzegowe montażu połączeń w maszynie wytrzymałościowej. Oceniono także wpływ wykorzystanej do budowy modelu siatki elementów skończonych na jakość otrzymywanych wyników.

Zagęszczenie elementów siatki oraz przyjęcie ich regularnego kształtu w pobliżu otworów (siatka heksagonalna) spowodowało rozbudowanie zadania obliczeniowego i wydłużenie czasu przygotowania modelu i wykonania obliczeń w porównaniu do modelu z siatką domyślną tetragonalną, jednak otrzymane wyniki, w postaci m.in. rozkładu naprężeń w spoinie połączenia hybrydowego były bardziej zbliżone do wartości naprężeń wyliczanych analitycznie i wyznaczanych w badaniach eksperymentalnych.

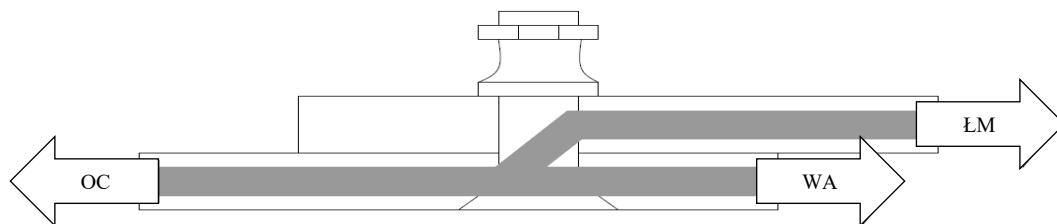
Porównanie otrzymanych wyników w postaci map rozkładów naprężeń normalnych w kierunku prostopadłym do warstwy klejowej dla różnych wariantów montażu łączników mechanicznych (1*d* i 2*d*) jednoznacznie wskazuje na to, iż przemieszczenie łączników bliżej krawędzi zakładki połączenia wprowadza pozytywne zmiany niwelujące koncentrację naprężeń w okolicach środkowej części krawędzi zakładki oraz skutkuje obniżeniem maksymalnych wartości naprężeń normalnych prostopadłych do powierzchni kleju o ponad 20%. Dodatkowo przemieszczenie łączników bliżej krawędzi zakładki powoduje rozdzielenie strefy spiętrzenia naprężeń na dwie części i powstanie w okolicach otworów obszaru o znacznie mniejszych naprężeniach. Ilościowo pole spiętrzenia naprężeń w wariancie 1*d* jest więc mniejsze w porównaniu z wariantem 2*d*. Biorąc pod uwagę negatywny wpływ naprężeń oddzierających na nośność i trwałość połączenia, których to koncentracja występuje na

końcach zakładki, montaż łączników w wariancie 1d (bliżej krawędzi zakładki) i redukcja tego typu naprężeń pozytywnie wpływa na parametry wytrzymałościowe i użytkowe połączeń hybrydowych, co zostało potwierdzone eksperymentalnie.

Analiza wyników wykonanych eksperymentów i badań numerycznych połączeń hybrydowych wskazuje, iż wykorzystanie jednocześnie połączenia mechanicznego i klejowego może być korzystne dla określonych warunków geometrycznych połączenia. Modyfikując rozmieszczenie łączników mechanicznych poprzez ich przemieszczenie w kierunku krawędzi zakładki połączenia uzyskano poprawę nośności i trwałości zmęczeniowej.

IV. BADANIE POŁĄCZEŃ HYBRYDOWYCH – MODYFIKACJA WARSTWY ADHEZYJNEJ

Analizując rezultaty obliczeń numerycznych połączeń hybrydowych prezentowanych w rozdziale III zauważono, iż rozkłady naprężeń w połączeniach składowych (klejowym i mechanicznym) wskazują na możliwość niekorzystnej dystrybucji obciążeń, w przenoszeniu których współuczestniczą. Prowadzone analizy rozkładu pól naprężeń połączeń hybrydowych zarówno w wariancie 1d, jak i 2d doprowadziły do stwierdzenia znacznej różnicy wyężenia łączników mechanicznych w stosunku do obciążenia przenoszonego przez klej. Dysproporcja wskazywała na znaczące obciążenie spoiny klejowej przy niewielkim wyężeniu łączników mechanicznych. Zadane w trakcie obliczeń obciążenie nie było dystrybuowane pomiędzy połączenia składowe – klejowe (warstwa adhezyjna) i mechaniczne (śruby) w sposób najlepszy z możliwych. Pożądanym stanem jest ich odpowiednio korzystny podział, tak aby zarówno łączniki mechaniczne, jak i warstwa klejowa były wyężone i uczestniczyły w przenoszeniu zadanego obciążenia (rys. 4.1.).



Rysunek 4.1. Połączenie hybrydowe jednozakładkowe – schemat ideowy pożądanej dystrybucji obciążenia całkowitego (OC) przenoszonego przez łączniki mechaniczne (ŁM) i warstwę klejową (WA) [97]

Odnosząc się do informacji i danych prezentowanych w literaturze oraz wyników badań własnych [18, 19, 20, 78, 79, 98] stwierdzono, że istnieje możliwość korzystniejszego wyężenia połączeń składowych w połączeniu hybrydowym. W badanych modelach nie dochodziło do pożądanego rozdziału obciążenia pomiędzy klej i śruby. Zastosowane tworzywo adhezyjne (Epidian 57/Z1) wydaje się materiałem na tyle sztywnym, iż do momentu znacznego przemieszczenia obciążanych próbek względem siebie doprowadzało do przeniesienia obciążeń ze spoiny klejowej na łączniki mechaniczne w ograniczonym zakresie.

Zadecydowano więc o rozszerzeniu zakresu prowadzonych badań o ocenę wpływu zastosowanego kleju na dystrybucję obciążeń w połączeniu hybrydowym. Przyjęto założenie, że stosując klej bardziej podatny na odkształcenia doprowadzi

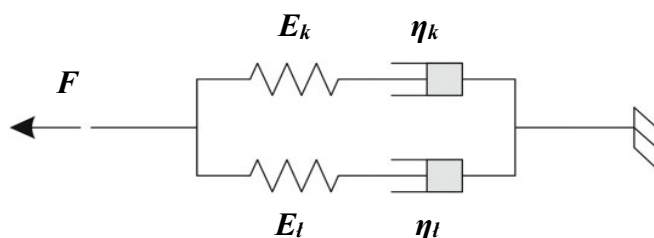
się do większego wyężenia łączników mechanicznych, odciażając tym samym spoinę klejową, co może pozytywnie oddziaływać na właściwości wytrzymałościowe połączeń hybrydowych [36, 37].

W celu oceny wpływu właściwości tworzyw adhezyjnych na dystrybucję naprężeń w połączeniach hybrydowych (śrubowo-klejowych) wykonano szereg obliczeń numerycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Dodatkowo opracowano i poddano testom model połączenia nakładkowego o dużej powierzchni, którego wymiary geometryczne odpowiadały nakładkom stosowanym w naprawie pokrycia konstrukcji półskorupowych statków powietrznych. Jako narzędzie obliczeniowe wykorzystano oprogramowanie Ansys Workbench, wer. 19. Weryfikację wyników obliczeń wykonano w oparciu o badania eksperymentalne. Oceniono również, jaki jest wpływ nacisków montażowych pochodzących od stosowanych łączników mechanicznych na pola naprężeń występujące w warstwie adhezyjnej w okolicy otworów montażowych.

4.1 Obliczenia MES

4.1.1 Metodyka obliczeń

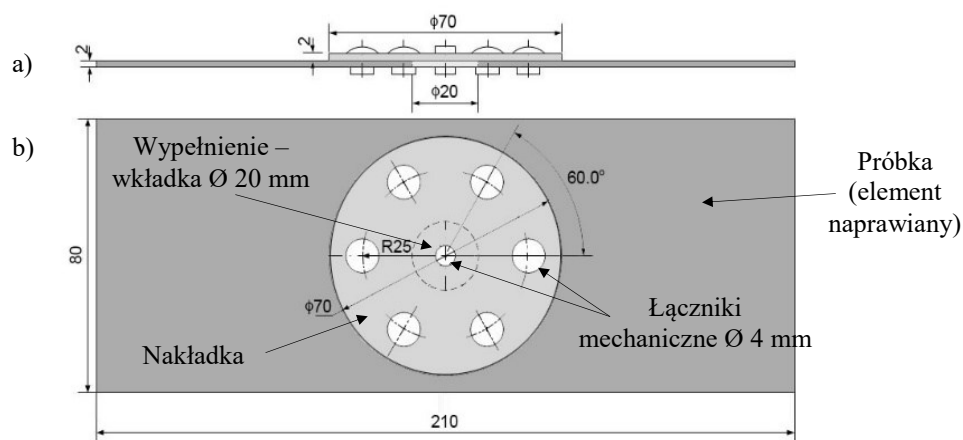
Przyjmując za autorami publikacji [66, 98] uproszczony model połączenia hybrydowego (rys. 4.2.) można założyć, że zastosowanie kleju bardziej podatnego na odkształcenia (m.in. mniejsza wartość modułu sprężystości wzdłużnej E_k) powinno spowodować większe wyężenie łączników mechanicznych. Efektem korzystniejszej dystrybucji obciążenia w połączeniu hybrydowym może być m.in. wzrost nośności połączenia hybrydowego.



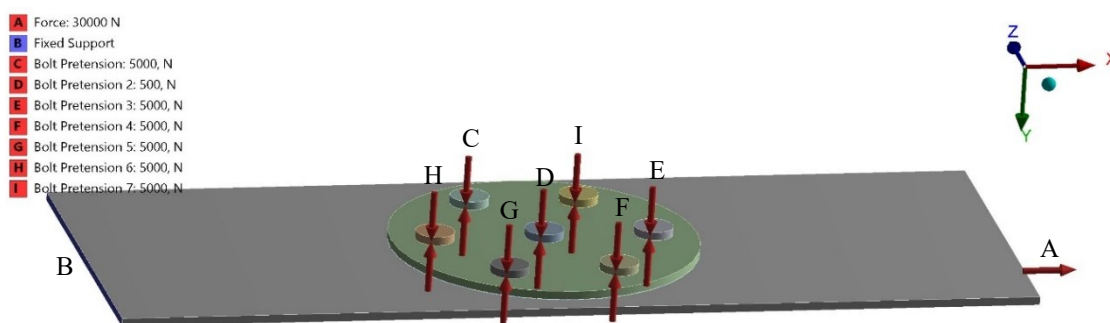
Rysunek 4.2. Uproszczony model połączenia hybrydowego (E_k , E_l – moduły sprężystości wzdłużnej oraz η_k , η_l – współczynniki lepkości dynamicznej odpowiednio kleju i łączników mechanicznych [124])

Chcąc ocenić wpływ zmiany parametrów kleju na rozkład naprężeń w warstwie klejowej oraz łącznikach mechanicznych, przeprowadzono cykl obliczeń dla modeli połączeń hybrydowych w dwóch wariantach:

- a) połączenie zakładkowe – o geometrii prezentowanej w tab. 3.1., rozdział III, wariant rozmieszczenia łączników mechanicznych – 1*d* i 2*d*, warunki brzegowe zgodne z rys. 3.14., rodzaje kontaktów zastosowanych między łączonymi elementami zgodne z przedstawionymi w tab. 3.7.,
- b) połączenie nakładkowe – wykonane z trzech elementów: elementu naprawianego, wkładki wypełniającej otwór w naprawianym elemencie oraz nakładki, kształt oraz wymiary geometryczne modelu przedstawiono na rys. 4.3., warunki brzegowe zgodne z rys. 4.4 rodzaje kontaktów między łączonymi elementami zgodne z danymi prezentowanymi w tab. 4.1.



Rysunek 4.3. Model geometryczny nakładkowego połączenia hybrydowego:
a) widok z boku, b) widok z góry [125]



Rysunek 4.4. Warunki brzegowe zadane w procesie obliczeń MES

W modelu połączenia nakładkowego zdefiniowano następujące warunki brzegowe (rys. 4.4.):

- a) dla swobodnego końca naprawianego elementu zamodelowano obciążenie w postaci siły przyłożonej do powierzchni jego przekroju ($F = 30\,000\text{ N}$) oraz odebrano stopnie swobody zgodnie ze schematem: $D_z = 0$, R_x , R_y , $R_z = 0$ – rys. 4.4. lit. A,

- b) w drugim końcu naprawianego elementu odebrano wszystkie stopnie swobody ($D_x, D_y, D_z, R_x, R_y, R_z = 0$), odtwarzając w ten sposób warunki mocowania połączenia w uchwycie maszyny wytrzymałościowej – rys. 4.4. lit. B,
- c) naciski wywołane oddziaływaniem łącznika mechanicznego po montażu (naciski montażowe) odtworzono wykorzystując definiowany w narzędziu Ansys warunek brzegowy naprężenia wstępnego łącznika mechanicznego „bolt pretension”. Dla łbów i pierścieni łączników mechanicznych nakładki *bolt pretension* = 5000 N – rys. 4.4. lit. C, E÷I, natomiast dla łącznika wypełnienia-wkładki *bolt pretension* = 500 N – rys. 4.4. lit. D.

Tabela 4.1. Rodzaje kontaktów pomiędzy elementami połączenia zdefiniowanych w procesie modelowania próbek

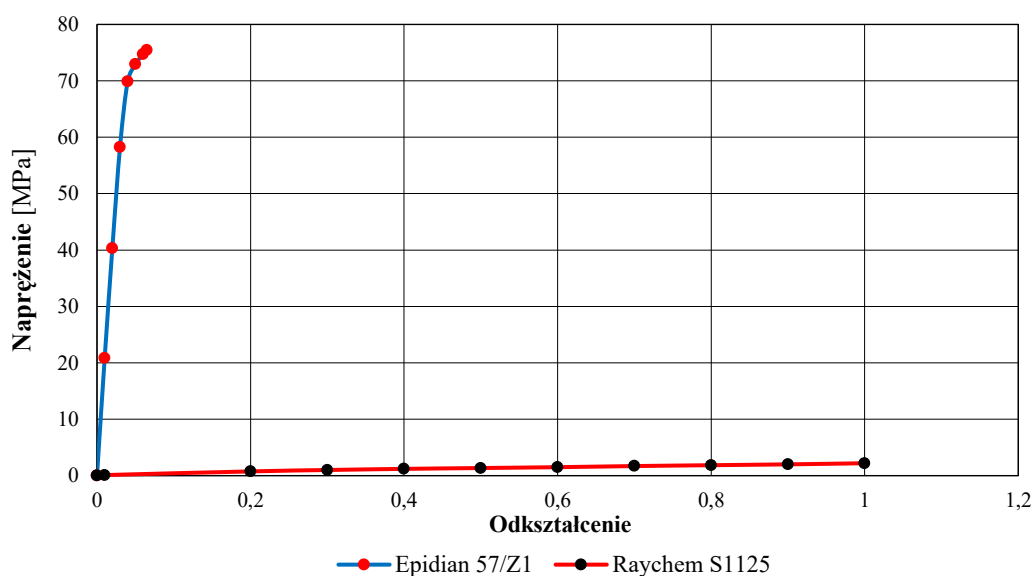
Rodzaje i właściwości kontaktów							
Łączone elementy (LE)	Wypełnienie – próbka	Wypełnienie – nakładka	Nakładka – próbka	Łby łączników mechanicznych (ŁM) – ŁE	Trzpienie ŁM – wewnętrzne powierzchnie otworów	Pierścienie ŁM – powierzchnie ŁE	Pierścienie ŁM – powierzchnie trzpieni
Rodzaj kontaktu	Sklejone (bonded)	Sklejone (bonded)	Sklejone (bonded)	Ruchome z tarciem, $f = 0,2$ (frictional)	Ruchome z tarciem, $f = 0,01$ (frictional)	Ruchome z tarciem, $f = 0,2$ (frictional)	Sklejone (bonded)

Podczas obliczeń warstwę klejową modelowano dwoma rodzajami tworzywa adhezyjnego. W pierwszym etapie przypisano jej parametry kleju Epidian 57/Z1, w drugim natomiast warstwie klejowej nadano właściwości Raychem S1125. Łączonym elementom nadano nieliniowe właściwości stopu aluminium serii AW 2024-T3, tworzywu adhezyjnemu – nieliniowe właściwości kleju Epidian 57/Z1 w I etapie oraz kleju Raychem S1125 w II etapie obliczeń, a łącznikom mechanicznym – nieliniowe właściwości stali dla połączenia zakładkowego i tytanu w połączeniu nakładkowym. W tab. 4.2. zamieszczono parametry materiałowe odpowiednich grup elementów wykorzystanych podczas modelowania połączenia. Obciążenie badanego połączenia zakładkowego zdefiniowano siłą $F = 8250$ N nawiązując tym do warunków badań prowadzonych w rozdziale III, natomiast połączenie nakładkowe poddano działaniu obciążenia o wartości $F = 30\,000$ N. Wartość siły wynikała z przyjętego kryterium dopuszczalnych naprężeń normalnych występujących w przekroju krytycznym z otworem, które dla materiału AW 2024-T3 kształtują się na poziomie około 230 MPa. Obliczenia prowadzono w zakresie nieliniowym.

Tabela 4.2. Parametry przyjęte do definiowania właściwości materiałowych poszczególnych grup elementów badanych połączeń

Parametry elementów składowych połączeń												
Łączone elementy AW 2024-T3	σ [MPa]	0	330,0	348,5	366,0	411,0	469,0	507,0	540,0	540,0	-	-
	ε	0	0,005	0,010	0,020	0,040	0,080	0,120	0,160	0,192	-	-
Klej Epidian 57/Z1	σ [MPa]	0	20,830	40,344	58,282	69,913	72,951	74,690	75,453	-	-	-
	ε	0	0,010	0,020	0,030	0,040	0,050	0,060	0,065	-	-	-
Klej Raychem S1125	σ [MPa]	0	0,50	0,75	1,00	1,20	1,35	1,50	1,70	1,85	2,00	2,20
	ε	0	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,010
Łączniki Stal	σ [MPa]	0	100,0	200,0	242,0	251,4	252,2	253,1	254,2	255,9	257,2	-
	ε	0	0,0005	0,001	0,0012	0,002	0,0025	0,003	0,004	0,005	0,006	-
Łączniki Tytan (MBF2110AB-05-150)	σ [MPa]	0	482,0	681,1	931,6	942,5	953,4	967,0	980,6	996,9	1014,0	-
	ε	0	0,005	0,007	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,04	0,05	-

Wykorzystane w badaniach tworzywa adhezyjne: Epidian 57/Z1 firmy Ciech S.A. (Polska) oraz Raychem S1125 firmy Cheney Manor Industrial Estate (Wielka Brytania) znacznie różniły się podatnością na odkształcenia. Epidian 57/Z1 jest tworzywem sztywnym, natomiast Raychem S1125 tworzywem elastycznym o silnych właściwościach lepkosprężystych. Wyznaczone krzywe rozciągania dla stosowanych tworzyw zaprezentowano na rys. 4.5.

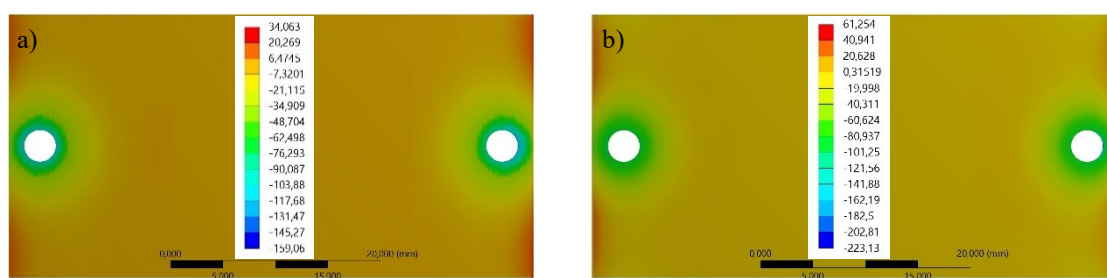


Rysunek 4.5. Krzywe rozciągania (prędkość 2 mm/min) dla tworzyw adhezyjnych wykorzystanych w badaniach: Epidian 57/Z1 i Raychem S1125

4.1.2 Ocena wpływu zmiany właściwości warstwy adhezyjnej na rozkład naprężeń w połączeniu zakładkowym

Prowadzone na potrzeby rozdziału III analizy wskazały na pewną tendencję dotyczącą dystrybucji obciążeń w połączeniu hybrydowym, polegającą na lokalnym odciążeniu warstwy klejowej poprzez łączniki mechaniczne. Na tej podstawie przyjęto założenie, że im bardziej podatny na odkształcenia będzie materiał spoiny klejowej, tym pole powierzchni „pozytywnego” oddziaływania łączników mechanicznych będzie większe. Aby dowiedzieć, czy rzeczywiście poziom wyężenia łączników mechanicznych będzie warunkowany podatnością kleju na odkształcenia oraz czy poprzez modyfikację warstwy adhezyjnej możliwe będzie polepszenie właściwości badanego połączenia hybrydowego, m.in. nośności, wykonano badania porównawcze połączeń z dwoma różnymi modelami spoiny klejowej. Proces badawczy rozpoczęto od etapu obliczeń MES.

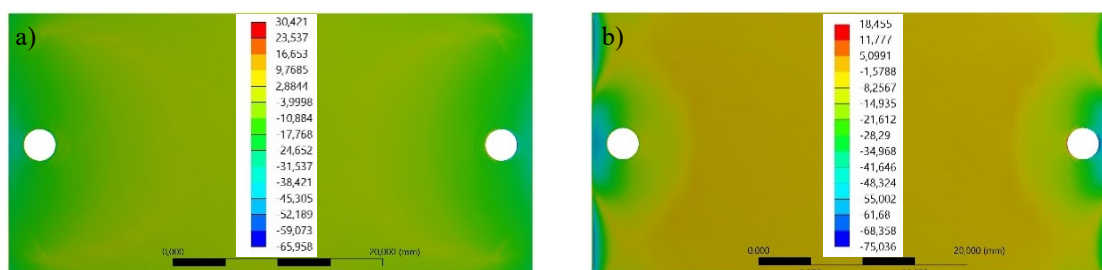
Otrzymane wyniki obliczeń porównawczych przedstawiono w postaci rozkładów naprężeń na rys. 4.6. – 4.8. Dla modelu połączenia z łącznikami mechanicznymi umieszczonymi w odległości $1d$, rozkłady naprężeń normalnych prostopadłych do płaszczyzny spoiny klejowej dla obu rodzajów klejów są jakościowo podobne. Różnice występują natomiast w ocenie ilościowej. Dla Epidian 57/Z1 maksymalne wartości naprężeń w sąsiedztwie otworów montażowych są około 2-krotnie wyższe od wartości otrzymanych dla Raychem S1125 (rys. 4.6.).



Rysunek 4.6. Rozkład naprężeń normalnych w warstwie adhezyjnej połączenia hybrydowego w wariancie $1d$:
a) dla kleju Raychem S1125, b) dla kleju Epidian 57/Z1

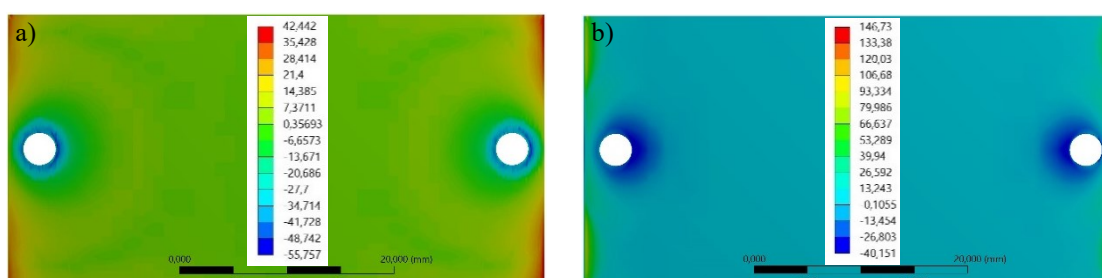
Istotne różnice zaobserwowano analizując rozkłady naprężeń stycznych. W tym zakresie w modelu ze spoiną Raychem S1125 rozkład naprężeń był bardziej równomierny, nie stwierdzono zasadniczych różnic w wyężeniu warstwy adhezyjnej. W przypadku modelu Epidian 57/Z1 rozkład naprężeń stycznych jest znacznie bardziej nieregularny. Zasadnicze różnice w poziomie wyężenia kleju

widoczne są pomiędzy okolicami krawędzi zakładki i łączników mechanicznych a centralną częścią warstwy adhezyjnej (rys. 4.7.).



Rysunek 4.7. Rozkład naprężeń stycznych w warstwie adhezyjnej połączenia hybrydowego w wariancie 1d: a) dla kleju Raychem S1125, b) dla kleju Epidian 57/Z1

W zakresie analizy maksymalnych naprężeń głównych (rys. 4.8.), podobnie jak w przypadku analizy naprężeń normalnych, odnotowano zbliżony charakter ich dystrybucji (rozkładu) w warstwie adhezyjnej, zauważalna jest natomiast znaczna rozbieżność w ich wartościach – dla Raychem S1125 wartości maksymalne kształtują się na poziomie 40 MPa, natomiast dla Epidian 57/Z1 wartości te osiągają 140 MPa.



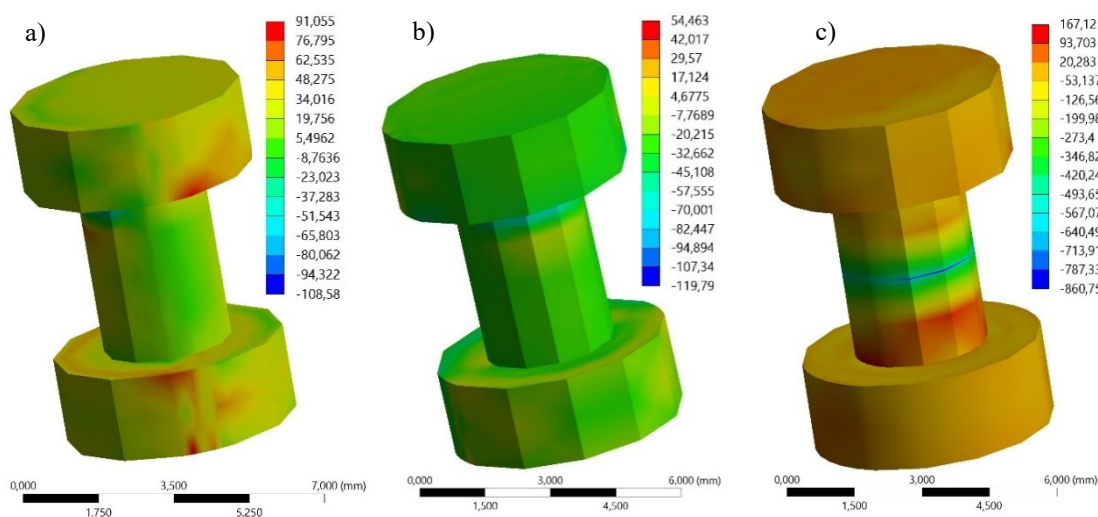
Rysunek 4.8. Rozkład maksymalnych naprężeń głównych w warstwie adhezyjnej połączenia hybrydowego w wariancie 1d: a) dla kleju Raychem S1125, b) dla kleju Epidian 57/Z1

Przypuszczalnie, w przypadku połączeń hybrydowych mniejsze różnice między wartościami naprężeń na końcach zakładki i w jej środkowej części skutkować będą m.in. wzrostem trwałości zmęczeniowej połączenia [87].

Analizując rozkład naprężeń stycznych w łącznikach mechanicznych umieszczonych w odległości $1d$ od krawędzi zakładki, stwierdzono znaczne różnice w ich wartościach dla poszczególnych wariantów połączeń. Dla modelu połączenia z Raychem S1125 maksymalne wartości naprężeń stycznych osiągnęły 91 MPa, natomiast w modelu połączenia z Epidian 57/Z1 wyniosły około 54 MPa.

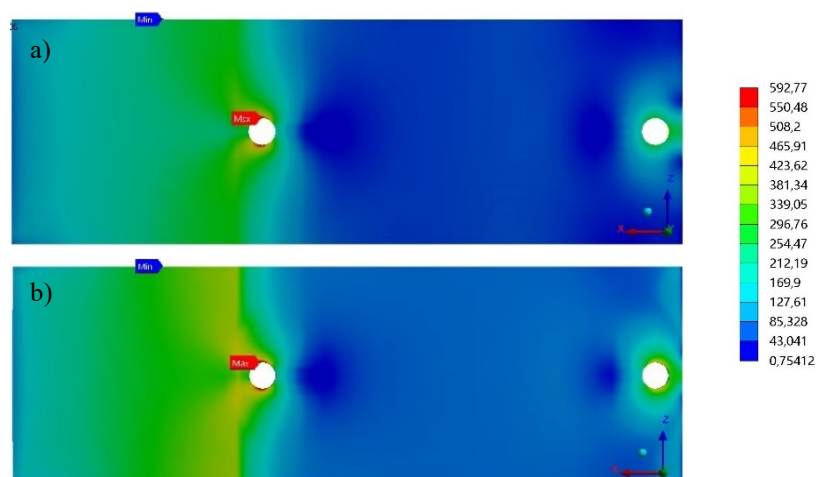
Dodatkowo włączono do analizy połączenia mechaniczne z łącznikami umieszczonymi w odległości $1d$ od krawędzi zakładki. Dla tego przypadku maksymalne wartości naprężeń stycznych osiągnęły wartość 167 MPa. Wskazuje to na ograniczone

wyłączenie łączników mechanicznych w połączeniu z klejem sztywniejszym (Epidian 57/Z1), większy ich udział w dystrybucji obciążeń dla kleju bardziej podatnego na odkształcenia (Raychem S1125) oraz na największe wyłączenie łączników w połączeniu mechanicznym, co uzasadnione jest brakiem warstwy adhezyjnej jako połączenia składowego w modelach hybrydowych (rys. 4.9.).



Rysunek 4.9. Rozkład naprężeń stycznych w łącznikach mechanicznych połączenia (wariant 1d):
a) hybrydowego z Raychem S1125, b) hybrydowego z Epidian 57/Z1, c) mechanicznego

W celu oceny wyłączenia elementów łączonych, analizie poddano ich rozkłady naprężeń von Misesa (rys. 4.10.). Zasadniczo w ocenie jakościowej zarówno dla modelu połączenia z Raychem S1125 (rys. 4.10.a) jak i Epidian 57/Z1 (rys. 4.10.b) rozkłady są zbliżone, przy czym dla połączenia z Raychem S1125 są bardziej jednorodne. Wartości maksymalne naprężeń w modelach łączonych elementów dla obu warstw adhezyjnych występują na krawędziach otworów montażowych. Dla modelu połączenia z Raychem S1125 wartości naprężeń są o około 150 MPa wyższe, co może świadczyć o większym udziale łączników w dystrybucji obciążeń w połączeniu. Dla modelu połączenia z Epidian 57/Z1 obserwowano wyraźną strefę koncentracji naprężeń występującą w okolicach przekroju krytycznego – na wysokości otworu montażowego w kierunku prostopadłym do działającego obciążenia na całej szerokości próbki. Może być to miejsce potencjalnej lokalizacji zarodków uszkodzeń zmęczeniowych. Dla modeli połączeń z Raychem S1125 poziom koncentracji naprężeń w okolicach przekroju krytycznego jest mniejszy i odsunięty od otworu montażowego, co powinno pozytywnie wpływać na zwiększenie trwałości zmęczeniowej analizowanego połączenia.



Rysunek 4.10. Rozkład naprężeń von Misesa w próbce badanego połączenia hybrydowego w wariancie 1d:
a) dla kleju Raychem S1125, b) dla kleju Epidian 57/Z1

W przypadku połączeń hybrydowych z łącznikami mechanicznymi umiejscowionymi w odległości $2d$ od krawędzi zakładki, rozkłady naprężeń były jakościowo zbliżone do modeli połączeń w wariancie 1d. Zasadniczą różnicą było proporcjonalnie mniejsze wyężenie łączników mechanicznych zarówno dla modeli połączeń z Raychem S1125, jaki i z Epidian 57/Z1 spowodowane większą odległością łączników od krawędzi zakładki – umiejscowieniem ich w strefie mniejszych wartości naprężeń.

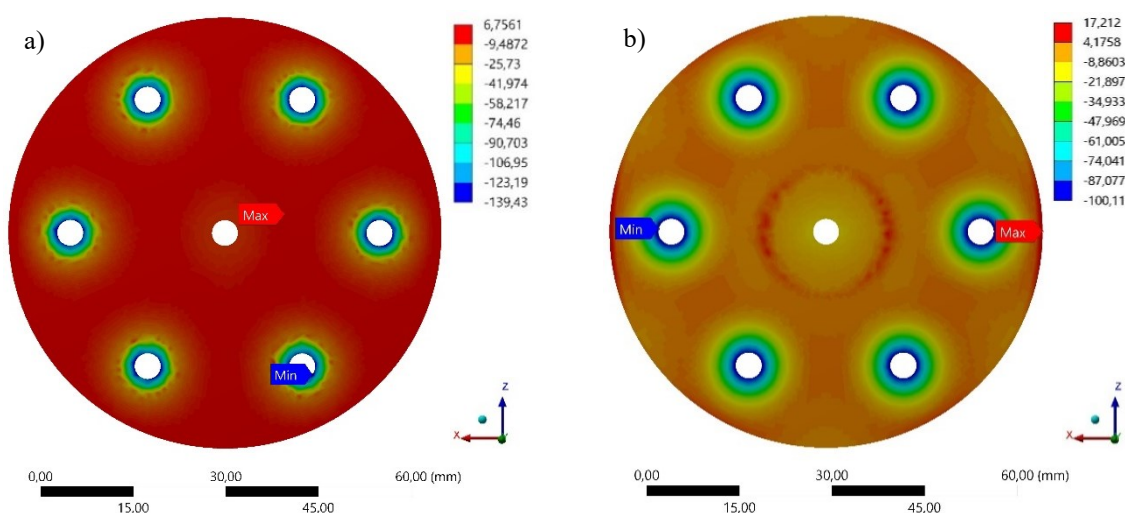
4.1.3 Ocena wpływu zmiany właściwości warstwy adhezyjnej na rozkład naprężeń w połączeniu nakładkowym (model węzła naprawczego)

Podstawowym problemem, który występuje w połączeniach nitowych długotrwale eksploatowanych w konstrukcjach lotniczych, jest zjawisko powstawania i rozwoju pęknięć zmęczeniowych w rejonach otworów montażowych. Złożoność problematyki zmęczenia tego typu połączeń ma swoje źródło w mnogości zmiennych związanych z konstrukcją połączenia, jego wytwarzaniem oraz warunkami obciążenia podczas eksploatacji.

Na potrzeby analiz związanych z przygotowaniem hybrydowego połączenia nakładkowego wykorzystywanego w naprawach pokryw konstrukcji półskorupowych opracowano kolejny model połączenia nakładkowego (rys. 4.3.). Obliczenia prowadzono zgodnie z ustalonymi warunkami brzegowymi (rys. 4.4.) przy zastosowaniu danych z tab. 4.1. i 4.2.

Na rys. 4.11. zamieszczono rozkład naprężeń normalnych prostopadłych do kierunku działania obciążenia (Y) dla analizowanych modeli warstw adhezyjnych. W modelu spoiny Raychem S1125 (rys. 4.11.a) naprężenia „odzierające” są bardziej

równomiernie rozłożone – brak jest obszarów z widoczną ich koncentracją – a strefy kumulacji naprężeń w pobliżu otworów montażowych są mniejsze. Maksymalne wartości naprężeń występują w pobliżu krawędzi otworu centralnego ($d = 20$ mm) w naprawianym elemencie. Dla połączenia hybrydowego z Epidian 57/Z1 (rys. 4.11.b) maksymalne wartości naprężeń normalnych w warstwie adhezyjnej są około 3-krotnie wyższe niż w połączeniu z Raychem S1125, a ich rozkład nie jest równie jednorodny. Obserwowane zjawisko jest analogiczne jak w przypadku połączeń zakładkowych, dla których maksymalne naprężenia normalne były średnio dwa razy większe dla połączenia z Epidian 57/Z1. Widoczna jest również koncentracja naprężeń w okolicach otworu centralnego w naprawianym elemencie, a wartości maksymalne naprężeń obserwowane były w pobliżu krawędzi nakładki na kierunku działania obciążenia (rys. 4.11.b).



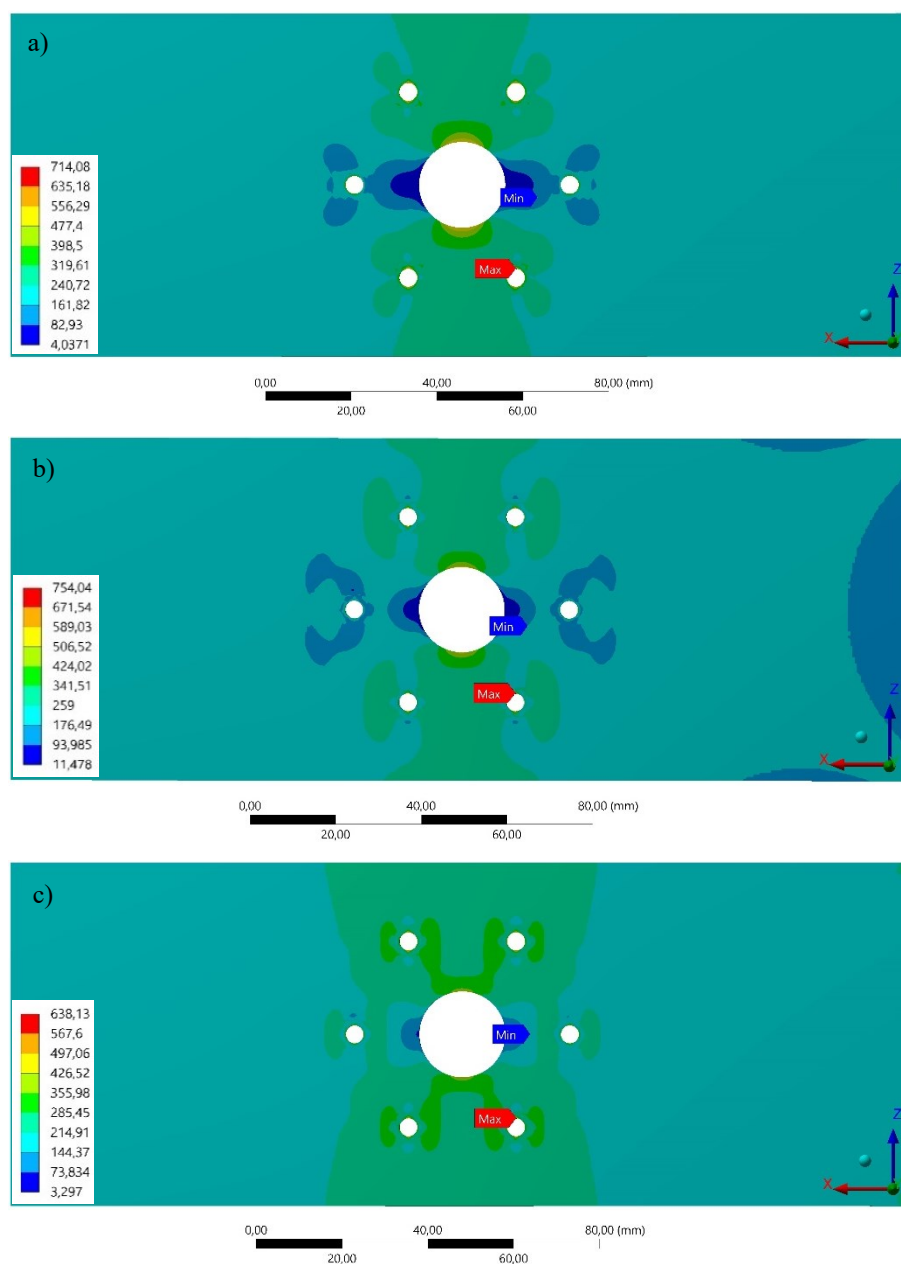
Rysunek 4.11. Rozkład naprężeń normalnych prostopadłych do kierunku działania obciążenia w modelach warstw klejowych badanych połączeń hybrydowych: a) Raychem S1125, b) Epidian 57/Z1

Przeanalizowano również rozkłady naprężeń von Misesa (rys. 4.12.) oraz naprężeń normalnych (rys. 4.13.) w kierunku działającego obciążenia w naprawianych elementach. Analizę porównawczą przeprowadzono dla trzech wariantów:

- węzeł naprawczy – połączenie mechaniczne,
- węzeł naprawczy – połączenie hybrydowe z klejem Raychem S1125,
- węzeł naprawczy – połączenie hybrydowe z klejem Epidain 57/Z1.

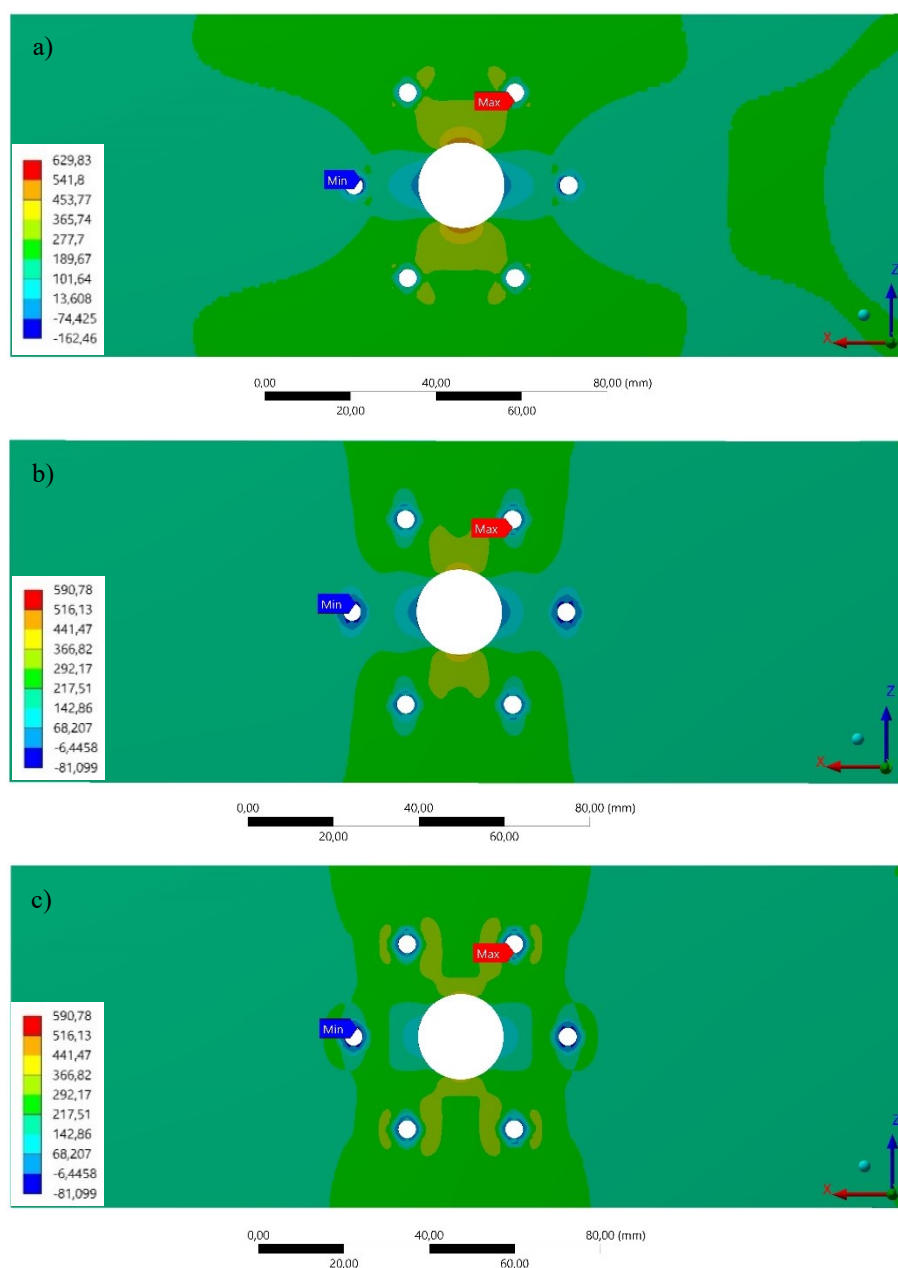
Na podstawie porównania rozkładów naprężeń von Misesa w naprawianym elemencie stwierdzono, że wprowadzenie tworzywa adhezyjnego do połączenia wpłynęło na zmniejszenie koncentracji naprężeń w okolicy otworu centralnego ($d = 20$ mm).

W połączeniu z modelem tworzywa Raychem S1125 (rys. 4.12.b) widoczna jest największa redukcja naprężeń modelu kleju oraz zmniejszenie wartości naprężeń w sąsiedztwie otworów montażowych w odniesieniu do połączeń mechanicznego i hybrydowego z Epidian 57/Z1. Zastosowanie kleju bardziej podatnego na odkształcenia spowodowało również „odsunięcie” maksymalnych naprężeń od krawędzi otworów na łączniki, co powinno utrudniać powstanie ogniska pęknięcia i zwiększyć trwałość zmęczeniową analizowanego połączenia.



Rysunek 4.12. Rozkład naprężeń von Misesa w badanych wariantach połączenia:
a) mechanicznym oraz hybrydowym b) z klejem Raychem S1125 i c) z klejem Epidian 57/Z1

Rozkład naprężeń normalnych w kierunku działania obciążenia (X) wskazuje na znaczące zmniejszenie wyężenia obszarów w okolicach otworów montażowych po zastosowaniu tworzywa adhezyjnego (rys. 4.13.b i 4.13.c). Korzystnie prezentuje się rozkład naprężeń dla połączenia hybrydowego z tworzywem Raychem S1125 (rys. 4.13.b). Podobnie jak w przypadku analizy rozkładu naprężeń von Misesa stwierdzono, że zastosowanie tego tworzywa spowodowało zmniejszenie naprężeń przy otworach montażowych i „odsunięcie” ich od krawędzi, wpływając pozytywnie na jednorodność rozkładu obciążeń.



Rysunek 4.13. Rozkład naprężeń normalnych w kierunku działania obciążenia (X) w badanych wariantach modelu połączenia: a) mechanicznym oraz hybrydowym b) z klejem Raychem S1125 i c) z klejem Epidian 57/Z1

4.2 Badania eksperymentalne

Przeprowadzone w rozdziale 4.1.2 i 4.1.3 obliczenia wykazały m.in., że zastosowanie kleju bardziej podatnego na odkształcenia (mniejsza wartość modułu sprężystości wzdłużnej E_k) spowodowało po pierwsze większe wyężenie łączników mechanicznych w połączeniu hybrydowym, po wtóre korzystniejsze rozkłady naprężeń w połączeniach nakładkowych wykorzystywanych w naprawach konstrukcji lotniczych [138].

Kolejny etap weryfikacji hipotezy o pozytywnym wpływie podatnych, elastycznych tworzyw adhezyjnych na nośność i trwałość zmęczeniową połączeń hybrydowych w porównaniu ze sztywnymi klejami konstrukcyjnymi, polegał na wykonaniu badań eksperymentalnych. Dodatkowo w trakcie badań, oprócz określania wpływu zastosowanego kleju na trwałość zmęczeniową połączeń hybrydowych nakładkowych, poszukiwano skutecznego sposobu podwyższenia trwałości zmęczeniowej połączeń. Zaplanowane eksperymenty miały charakter badań porównawczych. Proponowane rozwiązanie w postaci połączenia hybrydowego z elastycznym tworzywem adhezyjnym porównano z próbkami połączeń hybrydowych z tworzywem sztywnym oraz połączeniami mechanicznymi z łącznikami w postaci znanych od lat nitów ze stopu aluminium oraz stosowanymi we współczesnych konstrukcjach lotniczych ze stopu tytanu typu Jo-Bolt® lub Hi-Lok®.

4.2.1 Metodyka badań

Badaniom eksperymentalnym poddano następujące warianty połączeń nakładkowych (tab. 4.3):

- a) połączenie mechaniczne (rys. 4.3.), nitowane:
 - nitami zwykłymi, grzybkowymi o średnicy 4 mm, oznaczonymi symbolem 3558A-4-10 wytwarzanymi ze stopu W65,
 - nitami jednostronnymi tytanowymi, z łbem okrągłym, rdzeniowymi nawlekanyymi o średnicy 4,2 mm, oznaczonymi symbolem MBF2110AB-05-150,
- b) połączenie hybrydowe (rys. 4.3.) z tworzywem adhezyjnym Epidian 57/Z1, nitowane:
 - nitami zwykłymi 3558A-4-10,
 - nitami zwykłymi 3558A-4-10 z wprowadzoną między łączone powierzchnie warstwą tkaniny szklanej Synglass E81 o gramaturze 101 g/m²,

- nitami jednostronnymi tytanowymi MBF2110AB-05-150,
 - nitami jednostronnymi tytanowymi MBF2110AB-05-150 z wprowadzoną między łączone powierzchnie warstwą tkaniny szklanej Synglass E81,
- c) połączenie hybrydowe (rys. 4.3.) z tworzywem adhezyjnym Raychem S1125, nitowane:
- nitami zwykłymi 3558A-4-10,
 - nitami jednostronnymi tytanowymi MBF2110AB-05-150,
 - nitami jednostronnymi tytanowymi MBF2110AB-05-150 z wprowadzoną między łączone powierzchnie warstwą tkaniny szklanej Synglass E81.

Tabela 4.3. Zestawienie wariantów połączeń wykorzystanych w badaniach eksperymentalnych

Badane warianty połączeń nakładkowych						
Lp.	Rodzaj połączenia	Łącznik mechaniczny 3558A-4-10	Łącznik mechaniczny MBF2110AB-05-150	Warstwa adhezyjna Epidian 57/Z1	Warstwa adhezyjna Raychem S1125	Tkanina szklana Synglass E81
1.	Mechaniczne	x*	-	-	-	-
2.	Mechaniczne	-	x	-	-	-
3.	Hybrydowe	x	-	x	-	-
4.	Hybrydowe	x	-	x	-	x
5.	Hybrydowe	-	x	x	-	-
6.	Hybrydowe	-	x	x	-	x
7.	Hybrydowe	x	-	-	x	-
8.	Hybrydowe	-	x	-	x	-
9.	Hybrydowe	-	x	-	x	x

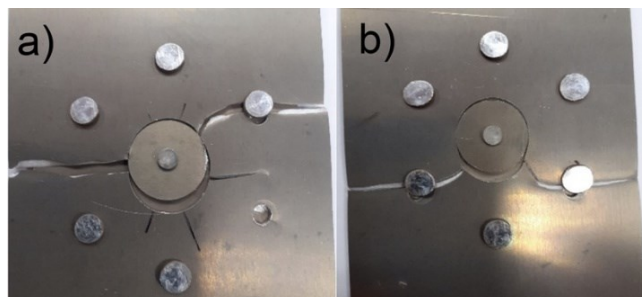
*x – element wykorzystany w połączeniu

Połączenia hybrydowe wykonano montując łączniki mechaniczne przed utwardzeniem tworzywa. Ponieważ spodziewano się, że wykorzystanie w połączeniach nitów tytanowych MBF2110AB-05-150 o dużej sile zacisku może powodować wyciskanie kleju z przestrzeni pomiędzy łączonymi elementami i osłabienie połączenia adhezyjnego wykonywano również próbki, w których pomiędzy łączone elementy została wprowadzona jedna warstwa tkaniny szklanej Synglass E81 o gramaturze 101 g/m². Połączenia z tworzywem Epidian 57/Z1 były utwardzane dwustopniowo, tzn. przez 12 godzin w temperaturze pokojowej (ok. 20°C) i przez 6 godzin w temperaturze 80°C,

natomiast połączenia z tworzywem Raychem S1125 przez siedem dni w temperaturze pokojowej. Badania prowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej Instron 8802. Testy zmęczeniowe połączeń nakładkowych zostały przeprowadzone w zakresie obciążeń sinusoidalnych od $F_{min} = 20\,000\text{ N}$ do $F_{maks} = 30\,000\text{ N}$ lub od $F_{min} = 25\,000\text{ N}$ do $F_{maks} = 35\,000\text{ N}$, z częstotliwością 8 Hz. Przy maksymalnym obciążeniu naprężenia nominalne w przekroju próbki osłabionym otworem 20 mm wynosiły 250 MPa, a więc były niższe od granicy plastyczności AW 2024-T3 (wynoszącej około 330 MPa).

4.2.2 Badanie trwałości zmęczeniowej połączenia mechanicznego

Badania połączeń mechanicznych miały na celu przede wszystkim zdefiniowanie ich trwałości zmęczeniowej, której wartości posłużyły za punkt referencyjny w ocenie trwałości zmęczeniowej połączeń hybrydowych. W pierwszej fazie eksperymentu oceniono właściwości wytrzymałościowe samego połączenia mechanicznego, będącego w kolejnej fazie eksperymentu składowym połączenia hybrydowego. Zbadano trwałość zmęczeniową połączeń nakładkowych mechanicznych, nitowanych za pomocą nitów zwykłych 3558A-4-10 (I wariant) oraz tytanowych MBF2110AB-05-150 (II wariant). Zniszczenie zmęczeniowe próbki połączenia z nitami zwykłymi 3558A-4-10 wystąpiło po 301 600 cyklach (rys. 4.14.a) i różniło się od zniszczenia przy statycznej próbie rozciągania (rys. 4.14.b). Zniszczenie występujące w statycznej próbie rozciągania przebiegało przez przekrój krytyczny próbki tj. otwór centralny oraz dwa otwory pod nity. W przypadku próbki obciążonej zmęczeniowo ($F_{maks} = 30\,000\text{ N}$) mechanizm zniszczenia zmienił się z doraźnego rozerwania próbki w miejscu występowania spiętrzenia naprężeń na inicjację pęknięcia w jednym z otworów, rozwój pęknięcia i dołamanie próbki przy niesymetrycznym obciążeniu.

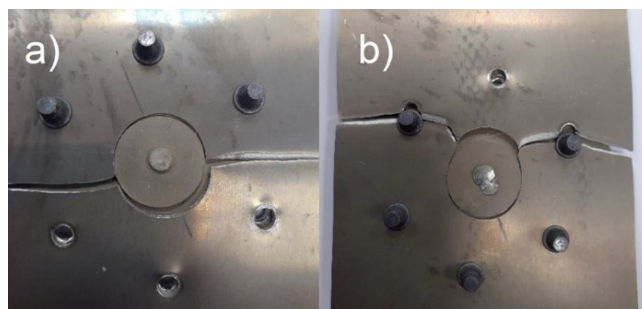


Rysunek 4.14. Widok sposobu zniszczenia próbki nakładkowej nitowanej nitami zwykłymi 3558A-4-10:
a) po próbie zmęczeniowej, b) po statycznej próbie rozciągania

Przeprowadzono również badanie drugiej próbki naprawianej z zastosowaniem nitów zwykłych 3558A-4-10, której trwałość zmęczeniowa wyniosła 567 200 cykli. W tym przypadku inicjacja pęknięć nastąpiła symetrycznie w dwóch otworach pod nity. Kolejna próbka uległa uszkodzeniu po 470 250 cyklach. Inicjacja pęknięcia rozpoczęła się od jednego z otworów montażowych.

Podczas badania połączenia nakładkowego, w którym do montażu nakładki wykorzystano nity tytanowe MBF2110AB-05-150, zniszczenie zmęczeniowe próbki wystąpiło po 957 200 cyklach – rys. 4.15.a. Kolejne dwie próbki uległy uszkodzeniu po odpowiednio 1 111 500 i 998 200 cyklach. We wszystkich trzech badaniach pęknięcie zmęczeniowe nie przebiegało przez żaden z otworów na nity.

Odnosząc obserwowane zjawisko do przeprowadzonych analiz obliczeń numerycznych można zauważyć pewną analogię: występujące przy stosowaniu nitów tytanowych wielokrotnie wyższe siły zacisku w porównaniu do nitów zwykłych powodują, iż większa część obciążenia jest przenoszona przez siły tarcia blach w połączeniu, a miejsca inicjacji pęknięć przenoszone są poza przekroje krytyczne otworów pod nity. Powoduje to, iż przekrojem krytycznym staje się przekrój w osi centralnego otworu na wypełnienie (20 mm) w naprawianym elemencie. Dodatkowo w tym miejscu występują maksymalne naprężenia pochodzące od wtórnych momentów gnących (generowanych geometrią połączenia nakładkowego). Natomiast w statycznej próbie rozciągania (rys. 4.15.b), podobnie jak w przypadku próbki z nitami zwykłymi, występujące zniszczenie przebiega przez przekrój krytyczny próbki tj. otwór centralny oraz dwa otwory pod nity.

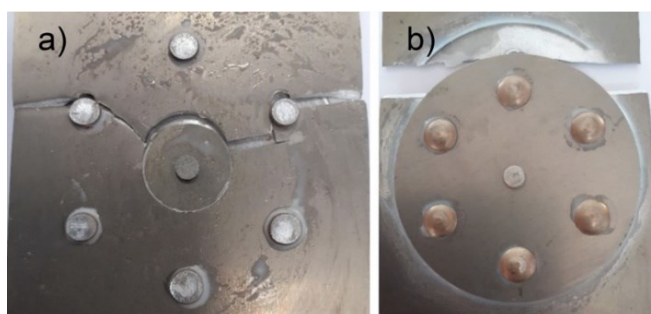


Rysunek 4.15. Widok sposobu zniszczenia próbki nakładkowej nitowanej nitami tytanowymi MBF2110AB-05-150: a) po próbie zmęczeniowej, b) po statycznej próbie rozciągania

4.2.3 Badanie trwałości zmęczeniowej hybrydowych połączeń nakładkowych

Próbki z warstwą adhezyjną i nitami zwykłymi 3558A-4-10

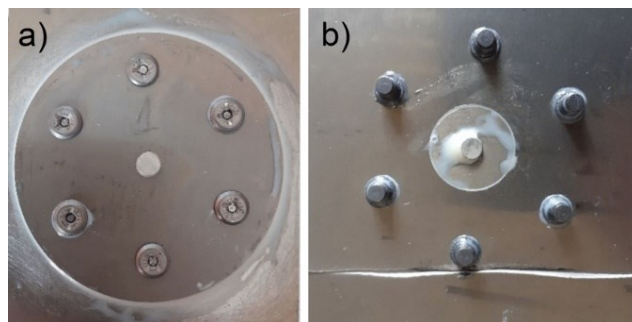
Pierwszym badanym wariantem połączenia hybrydowego była konfiguracja z wykorzystaniem nitów zwykłych 3558A-4-10. Przygotowano trzy warianty połączenia nakładkowego, w tym dwa z klejem Epidian 57/Z1 różniące się obecnością jednej warstwy tkaniny szklanej Synglass E81 w warstwie adhezyjnej oraz jeden wariant połączenia z wykorzystaniem kleju Raychem S1125. Próbkę obciążano w zakresie sił od $F_{min} = 20\,000\text{ N}$ do $F_{maks} = 30\,000\text{ N}$, w cyklu sinusoidalnym o częstotliwości zmian 8 Hz. Połączenie hybrydowe z Epidian 57/Z1 bez tkaniny szklanej uległo zniszczeniu po 751 100 cyklach obciążeniowych, natomiast z tkaniną szklaną po 1 017 400 cyklach obciążeniowych. Pęknięcie w połączeniu bez tkaniny propagowało od otworu centralnego $d = 20\text{ mm}$ (rys. 4.16.a) natomiast w połączeniu z tkaniną od skrajnego łącznika (rys. 4.16.b). Dodatkowo określono trwałość próbki łączonej nitami zwykłymi 3558A-4-10, w której zastosowano klej Raychem S1125. Zniszczenie wystąpiło po 950 597 cyklach obciążeniowych.



Rysunek 4.16. Zniszczenie zmęczeniowe połączenia hybrydowego (nity 3558A-4-10 i tworzywo Epidian 57/Z1):
a) bez tkaniny szklanej, b) z tkaniną szklaną

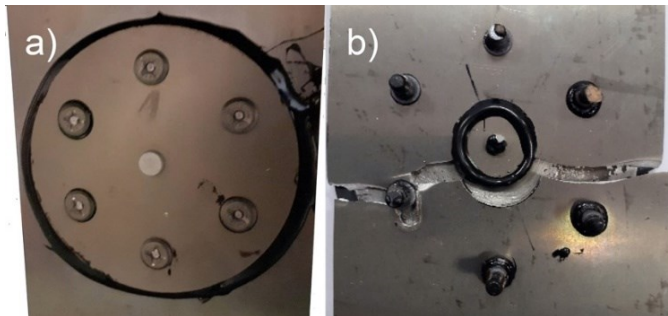
Próbki z warstwą adhezyjną i nitami tytanowymi MBF2110AB-05-150

Kolejnym etapem badań było określenie trwałości zmęczeniowej połączenia hybrydowego, w którym do montażu nakładki wykorzystano oprócz nitów tytanowych MBF2110AB-05-150, klej Epidian 57/Z1 i Raychem S1125 (rys. 4.17). Próbkę połączenia hybrydowego z Epidian 57/Z1 (rys. 4.17.a) obciążano w zakresie sił od $F_{min} = 20\,000\text{ N}$ do $F_{maks} = 30\,000\text{ N}$, w cyklu sinusoidalnym o częstotliwości zmian 8 Hz. Zniszczenie połączenia wystąpiło po 1 506 300 cyklach obciążeniowych. Ognisko pęknięcia powstało przy krawędzi pierścienia nitu znajdującego się w osi obciążenia próbki i propagowało w kierunku jednej z krawędzi próbki i dalej w obu jej kierunkach (rys. 4.17.b).



Rysunek 4.17. Widok nakładkowego połączenia hybrydowego (nity MBF2110AB-05-150 i tworzywo Epidian 57/Z1): a) po przygotowaniu próbki, b) zniszczonego po badaniach trwałościowych

Następnie przeprowadzono badania połączeń hybrydowych zastępując tworzywo adhezyjne Epidian 57/Z1 klejem Raychem S1125, który jest tworzywem bardziej podatnym na odkształcenia. Połączenie hybrydowe z nitami tytanowymi i Raychem S1125 (rys. 4.18.a) obciążano w zakresie sił od $F_{min} = 20\,000\text{ N}$ do $F_{maks} = 30\,000\text{ N}$, w cyklu sinusoidalnym o częstotliwości zmian 8 Hz. Po 3 059 100 cyklach obciążenia i braku uszkodzeń próbki, obciążenie zwiększono do zakresu od $F_{min} = 25\,000\text{ N}$ do $F_{maks} = 35\,000\text{ N}$. Po kolejnych 328 200 cyklach nastąpiło zniszczenie połączenia, a ognisko pęknięć powstało przy otworze ($d = 20\text{ mm}$) na wypełnienie (rys. 4.18.b).



Rysunek 4.18. Widok nakładkowego połączenia hybrydowego (nity MBF2110AB-05-150 i tworzywo Raychem S1125): a) po przygotowaniu próbki, b) zniszczonego po badaniach trwałościowych

Podczas oględzin zniszczonych próbek stwierdzono, że naciski występujące przy montażu nitów powodują wyciśnięcie tworzywa adhezyjnego z przestrzeni pomiędzy łączonymi elementami. Zakładając, iż niedoskonałości występujące w spoinie połączenia adhezyjnego, szczególnie w okolicach otworów montażowych mogą mieć wpływ na trwałość zmęczeniową połączenia, przygotowano kolejne próbki połączeń hybrydowych, tym razem wprowadzając do warstwy adhezyjnej (pomiędzy nakładką a próbką z wypełnieniem) jedną warstwę tkaniny szklanej Synglass E81 o gramaturze 101 g/m^2 . Testy przeprowadzono dla połączenia hybrydowego z Epidian 57/Z1, obciążanego zgodnie z przyjętym w metodyce zakresem sił i częstotliwości. Po 3 015 300 cyklach

i braku widocznych uszkodzeń zwiększono obciążenie do zakresu od $F_{min} = 25\ 000\ \text{N}$ do $F_{maks} = 35\ 000\ \text{N}$. Zniszczenie połączenia wystąpiło po kolejnych 1 947 000 cyklach. Spodziewając się podwyższonej trwałości zmęczeniowej próbki połączenia z nitami tytanowymi i tworzywem Raychem S1125 zmodyfikowanej obecnością tkaniny szklanej Synglass E81 w warstwie adhezyjnej, badanie prowadzono od początku przy zwiększonym obciążeniu – zakres od $F_{min} = 25\ 000\ \text{N}$ do $F_{maks} = 35\ 000\ \text{N}$. Próbkę uległą zniszczeniu po 3 114 700 cyklach obciążeniowych. Jak pokazano na rys. 4.19., pęknięcie propagowało od otworu na wypełnienie ($d = 20\ \text{mm}$) w kierunku do krawędzi próbki.



Rysunek 4.19. Zniszczenie zmęczeniowe hybrydowego połączenia nakładkowego (nity MBF2110AB-05-150 i tworzywo Raychem S1125 z warstwą tkaniny Synglass E81)

W tab. 4.4. zamieszczono uzyskane rezultaty testów eksperymentalnych trwałości zmęczeniowej wybranych połączeń nakładkowych, w których modyfikacji poddawano rodzaj łączników mechanicznych (aluminiowe/tytanowe) oraz warstwę adhezyjną (Raychem S1125/Epidian 57/Z1), włączając wprowadzenie dystansującej tkaniny szklanej Synglass E81.

Tabela 4.4. Porównanie trwałości zmęczeniowej mechanicznych i hybrydowych połączeń nakładkowych

Trwałość zmęczeniowa połączeń nakładkowych		
Lp.	Rodzaj próbki	Liczba cykli do zniszczenia
1.	Mechaniczne połączenie nakładkowe – nity 3558A-4-10	301 600 567 200 470 250
2.	Mechaniczne połączenie nakładkowe – nity tytanowe MBF2110AB-05-150	957 200 1 111 500 998 200
3.	Hybrydowe połączenie nakładkowe – nity 3558A-4-10, tworzywo adhezyjne Epidian 57/Z1	751 100
4.	Hybrydowe połączenie nakładkowe – nity 3558A-4-10, tworzywo adhezyjne Epidian 57/Z1 z tkaniną szklaną Synglass E81	1 017 400

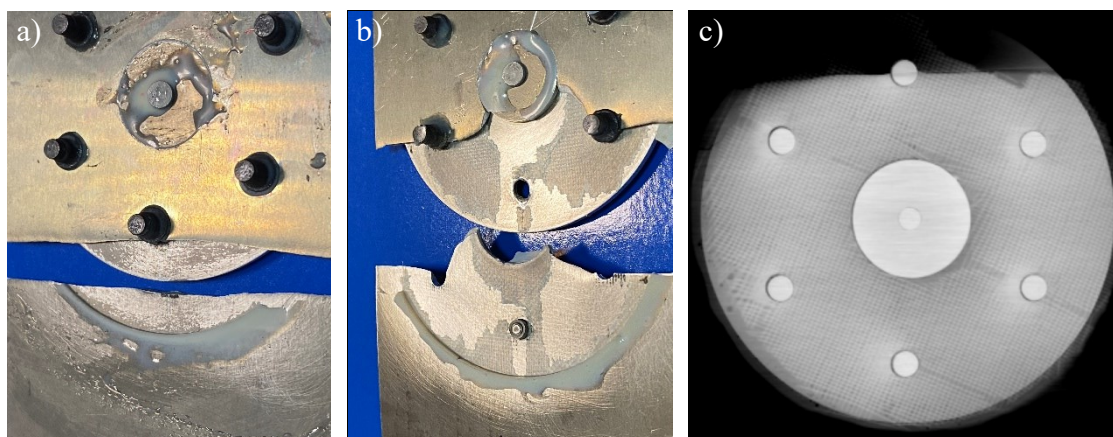
Tabela 4.4. c.d. Porównanie trwałości zmęczeniowej mechanicznych i hybrydowych połączeń nakładkowych

5.	Hybrydowe połączenie nakładkowe – nity 3558A-4-10, tworzywo adhezyjne Raychem S1125	950 597
6.	Hybrydowe połączenie nakładkowe – nity MBF2110AB-05-150, tworzywo adhezyjne Epidian 57/Z1	1 506 300
7.	Hybrydowe połączenie nakładkowe – nity MBF2110AB-05-150, tworzywo adhezyjne Raychem S1125	>3 059 100 (3 059 100 cykli przy obciążeniu 20 – 30 kN i dodatkowo 328 200 cykli przy obciążeniu 25 – 35 kN)
8.	Hybrydowe połączenie nakładkowe – nity MBF2110AB-05-150, tworzywo adhezyjne Epidian 57/Z1 z tkaniną szklaną Synglass E81	>3 015 300 (3 015 300 cykli przy obciążeniu 20 – 30 kN i dodatkowo 1 947 000 cykli przy obciążeniu 25 – 35 kN)
9.	Hybrydowe połączenie nakładkowe – nity MBF2110AB-05-150, tworzywo adhezyjne Raychem S1125 z tkaniną szklaną Synglass E81	3 114 700 (przy zwiększonym obciążeniu 25 – 35 kN)

Przeprowadzone badania eksperymentalne jednoznacznie wykazały, że w zakresie zapewnienia trwałości zmęczeniowej połączeń elementów wykonanych ze stopu aluminium AW 2024-T3, wykorzystanie nitów jednostronnych tytanowych jest korzystniejsze niż stosowanie nitów zwykłych. Stwierdzono również zasadność stosowania połączeń hybrydowych (klejowo-nitowych) w połączeniach nakładkowych np. w naprawach uszkodzonego pokrycia statków powietrznych. Większą trwałość zmęczeniową uzyskano stosując tworzywo adhezyjne o mniejszej sztywności tj. klej Raychem S1125. Sztywna spoina klejowa, uzyskana po wykorzystaniu kleju Epidian 57/Z1, w aspekcie trwałości zmęczeniowej połączenia była mniej efektywnym rozwiązaniem.

Istotnym problemem podczas formowania połączenia hybrydowego przed utwardzeniem warstwy klejowej jest jakość uzyskiwanych połączeń adhezyjnych. Naciski wywierane przez łączniki mechaniczne podczas ich montażu powodują, że w strefie ich występowania tworzywo adhezyjne jest wyciskane i efektywna powierzchnia połączenia adhezyjnego jest mniejsza od wymiarów geometrycznych przyklejanej nakładki (rys. 4.20.a). Nie bez znaczenia, w zakresie trwałości zmęczeniowej połączeń hybrydowych, pozostaje brak tworzywa adhezyjnego w okolicach otworów montażowych, które są miejscami koncentracji naprężeń. Obecność tworzywa adhezyjnego właśnie w tych miejscach jest szczególnie pożądana, gdyż istotnie ogranicza wartość współczynników koncentracji naprężeń. Rozwiązaniem problemu, jak wskazują wyniki badań eksperymentalnych, może być wprowadzenie do tworzywa adhezyjnego warstwy wypełniacza, który ograniczy

negatywny efekt wyciskania tworzywa adhezyjnego podczas montażu łączników mechanicznych. W badaniach własnych z powodzeniem wykorzystano warstwę tkaniny szklanej, której obecność w połączeniu wpływała pozytywnie na wytrzymałość adhezyjną połączenia klejowego (rys. 4.20.b i 4.20.c).



Rysunek 4.20. Widok spoiny klejowej w hybrydowym połączeniu nakładkowym:
a) bez tkaniny szklanej, b) z warstwą tkaniny szklanej, c) po analizie tomografem komputerowym z warstwą tkaniny szklanej

4.3 Badanie węzła naprawczego z połączeniem hybrydowym przy wykorzystaniu belki śmigłowca Mi-8

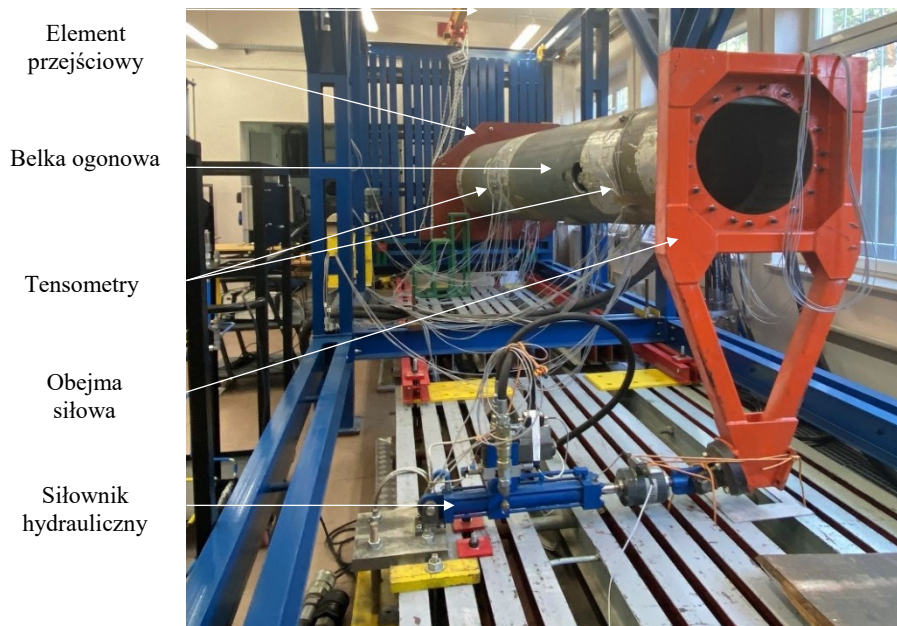
Przeprowadzone i opisane w rozdziale 4.2 badania eksperymentalne dowiodły zasadności stosowania połączeń hybrydowych (klejowo-mechanicznych) w połączeniach nakładkowych np. w naprawach uszkodzonego pokrycia statków powietrznych. W badaniach własnych wykazano również, że zastosowanie łączników jednostronnych tytanowych typu Jo-Bolt® jest rozwiązaniem korzystniejszym niż użycie np. nitów zwykłych.

W celu potwierdzenia skuteczności i efektywności zaproponowanych rozwiązań w zakresie stosowania połączeń hybrydowych zrealizowano próby trwałościowe węzła naprawczego wykonanego na belce ogonowej śmigłowca Mi-8. Do naprawy wykorzystano łączniki mechaniczne i tworzywo adhezyjne będące przedmiotem wcześniejszych badań i testów.

4.3.1 Metodyka badań

Badania belki ogonowej śmigłowca Mi-8 przeprowadzono z wykorzystaniem hydraulicznego układu obciążającego oraz tensometrycznego układu pomiarowego na stanowisku do badania elementów wytrzymałościowych konstrukcji lotniczych

w Zakładzie Konstrukcji i Eksploatacji Statków Powietrznych Instytutu Techniki Lotniczej. Konstrukcja siłowa stanowiska badawczego (rys. 4.21.) składała się ze szkieletu, do którego przymocowano podłogę oraz ścianę konstrukcji siłowej. Ściana w konstrukcji stanowiska służyła do zamocowania belki ogonowej za pośrednictwem elementu przejściowego przy użyciu sześciu śrub M24. Drugi koniec badanej belki ogonowej obciążany był poprzez siłownik za pośrednictwem obejmy siłowej przymocowanej do ostatniej wręgi belki za pomocą osiemnastu śrub M10. Odległość osi belki ogonowej od osi montażu siłownika hydraulicznego wynosiła 1300 mm i odpowiada odległości osi obrotu wirnika ogonowego od osi belki ogonowej. Dzięki temu, możliwe było zadanie obciążenia odpowiadającego faktycznemu obciążeniu belki przez wirnik ogonowy (oś obrotu wirnika ogonowego pokrywa się z osią montażu siłownika). Belkę ogonową obciążano siłą zmieniającą swoją wartość w zakresie od $F_{min} = 0 \text{ N}$ do $F_{maks} = 10\,000 \text{ N}$ z częstotliwością 0,15 Hz. Maksymalna wartość zadawanego obciążenia odpowiadała największej wartości obciążenia występującego w czasie startu śmigłowca. Belka z zamontowaną obejmą podlegała złożonemu stanowi obciążenia – zginanie z jednoczesnym skręcaniem.



Rysunek 4.21. Widok stanowiska do badań wytrzymałościowych belki ogonowej śmigłowca Mi-8

Układ sterujący siłownikiem kontrolowany był za pomocą komputera ze specjalistycznym oprogramowaniem, które pozwala na sterowanie obciążeniem zadawanym za pomocą siłownika o określonym przebiegu przemieszczenia lub siły.

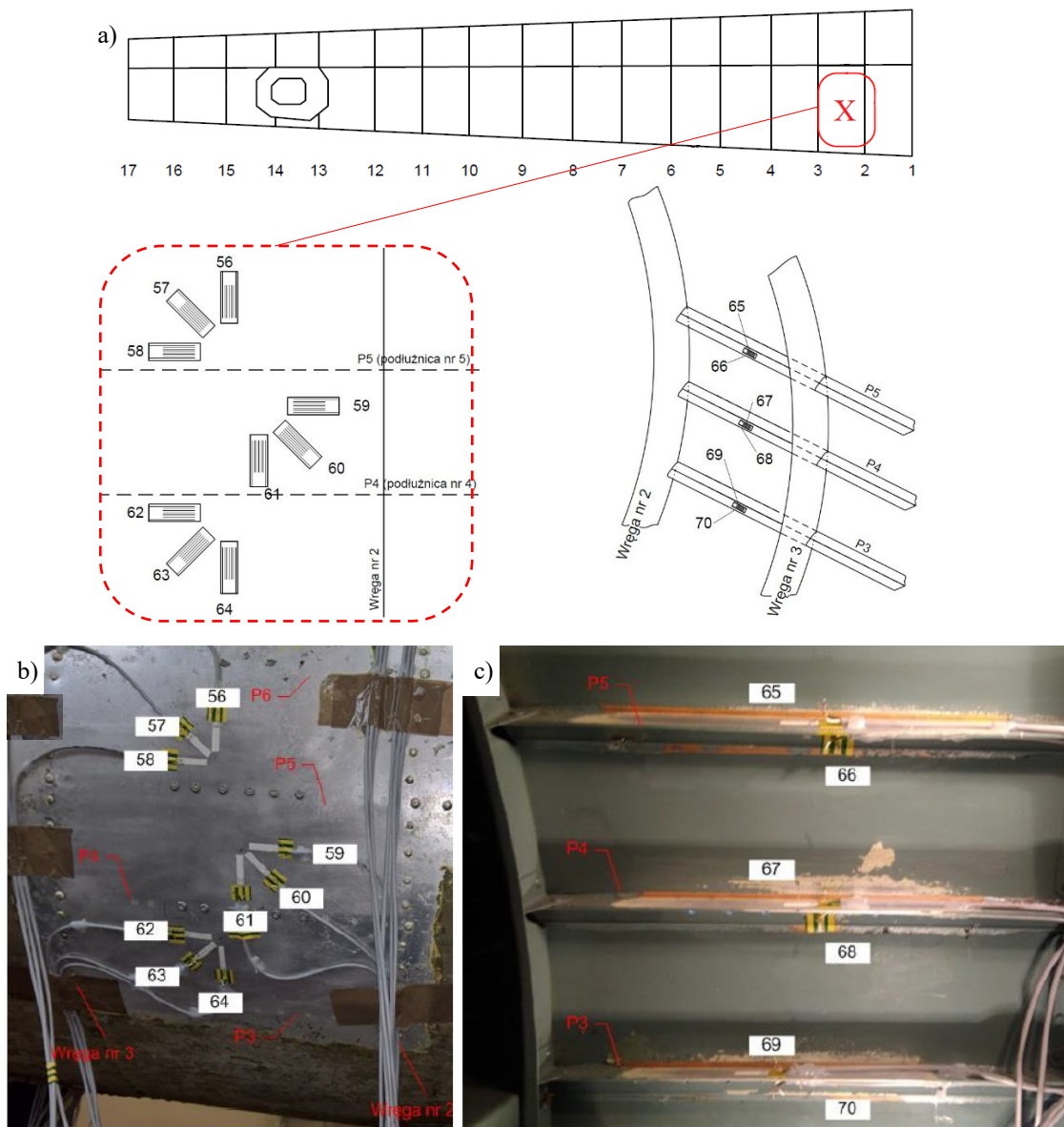
Wchodzący w skład opisywanego układu sterownik HNC100 firmy Rexroth oraz aplikacja WIN-PED umożliwiła zadawanie amplitudy oraz liczby cykli obciążenia. Układ pomiaru odkształceń belki ogonowej składał się z tensometrów elektrooporowych typu liniowego (RL 15/120 i RL 20/120) oraz rejestratora wielokanałowego – mostka tensometrycznego – CL-460 firmy ZEPWN.

Badania realizowano w 23 cyklach (od nr 1 do nr 23), w trakcie których, belkę poddawano sinusoidalnie zmiennym obciążeniom, zadawanym w blokach o określonej liczbie (od kilku do kilkunastu tysięcy razy w ramach każdego cyklu) wprowadzając przy tym określone modyfikacje jej konstrukcji:

- a) cykl od nr 1 do nr 5 dla konstrukcji w konfiguracji fabrycznej (brak modyfikacji płatowca),
- b) cykl nr 6 – konstrukcja z usuniętymi zgrzeinami (12 szt.) łączącymi pokrycie z podłużnicami w badanym obszarze płatowca pn. „X” (rys. 4.22.a),
- c) cykl od nr 7 do nr 15 – dla konstrukcji z wprowadzonymi 12 szt. łączników jednostronnych typu MBF2110-05 w miejsce usuniętych zgrzein łączących pokrycie z podłużnicami w badanym obszarze,
- d) cykl nr 16 (uszkodzenie pokrycia) – konstrukcja z usuniętym fragmentem pokrycia płatowca (rys. 4.24.),
- e) cykl nr 17 i nr 18 (uszkodzenie pokrycia i fragmentu szkieletu) – dla konstrukcji z usuniętym fragmentem pokrycia płatowca i części podłużnicy (rys. 4.24.),
- f) cykl od nr 19 do nr 23 (belka z węzłem naprawczym) – dla konstrukcji z naprawioną podłużnicą (połączenie mechaniczne) i naprawionym pokryciem płatowca (połączenie hybrydowe) (rys. 4.27. i 4.28.).

Celem badań było m.in. diagnozowanie stanu technicznego węzła naprawczego wykonanego na bazie połączenia hybrydowego (klejowo-mechanicznego) w obszarze *X* (rys. 4.22.a). Ponieważ podczas cykli od nr 1 do nr 15 stwierdzono występowanie w obszarze *X* lokalnego wyboczenia pokrycia, postanowiono wykonać naprawę polegającą na usunięciu fragmentu podłużnicy i pokrycia oraz uzupełnieniu tych uszkodzeń profilem o kształcie kątownika i nakładką z blachy (rys. 4.27.b). Diagnostykę węzła naprawczego wykonano na podstawie pomiarów odkształceń konstrukcji, rejestrowanych dla obciążenia statycznego 10 kN zadanego po każdym bloku cykli obciążenia i wprowadzonych modyfikacjach struktury belki. Odpowiedzi zarejestrowane przez 15 tensometrów układu pomiarowego, które

rozmieszczono jak zaprezentowano na rys. 4.22., posłużyły do oceny zjawisk zachodzących w sąsiedztwie węzła naprawczego. Na pokryciu – obszar *X* – rozmieszczono 3 rozety z łącznie 9 szt. tensometrów od nr 56 do nr 64, a wewnątrz konstrukcji belki 3 pary odpowiednio na podłużnicach P3, P4 i P5 – łącznie 6 szt. od nr 65 do nr 70 (rys. 4.22.a).

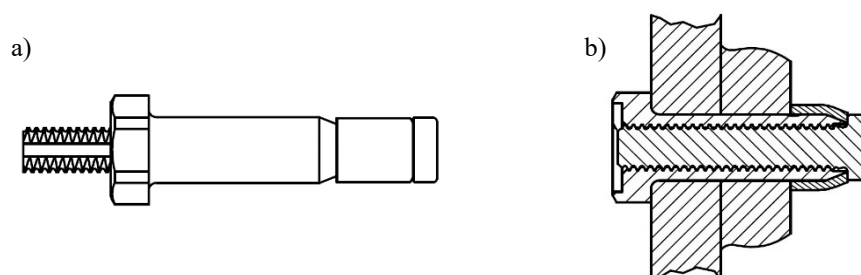


Rysunek 4.22. Lokalizacja badanego obszaru oraz rozmieszczenie tensometrów pomiarowych:
a) badany obszar (X) na belce, b) tensometry – zewnętrzna strona belki, c) tensometry – wewnętrzna strona belki

4.3.2 Badania trwałościowe węzła naprawczego

Podczas badań, przy pomocy układu tensometrów (rys. 4.22.) rejestrowano pomiary odkształceń fragmentów konstrukcji (pokrycia i szkieletu) w okolicach obszaru *X* (rys. 4.24.).

Uwzględniając fakt, iż obecne rozwiązania technologiczne łączników jednostronnych w porównaniu do łączników dwustronnych spełniają warunek równorzędnej wytrzymałości [56], do przygotowania węzła naprawczego wykorzystano łączniki jednostronne Jo-Bolt® typu Visu-Lok® (rys. 4.23.).



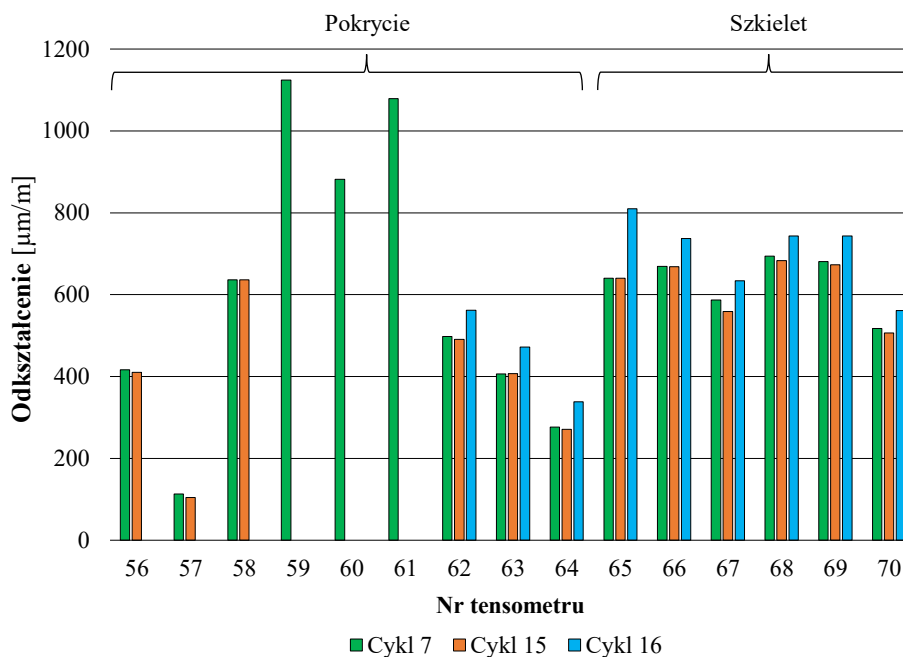
Rysunek 4.23. Łącznik Visu-Lok®: a) widok z boku, b) przekrój zamontowanego łącznika

Na rys. 4.24. przedstawiono obszar płatownca belki z miejscem usunięcia blachy pokrycia – otwór o wymiarach 72 mm × 120 mm, R10 (a) i fragmentu podłużnicy (b).



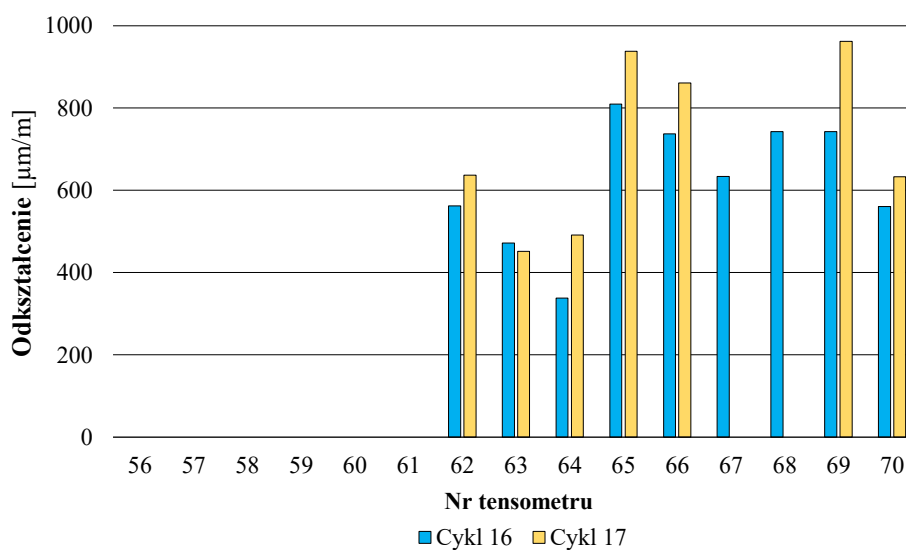
Rysunek 4.24. Badany obszar X:
a) z usuniętą blachą pokrycia, b) z usuniętą blachą pokrycia i fragmentem podłużnicy nr 5

Analizując wyniki otrzymane w cyklu nr 16 (konstrukcja z usuniętą częścią pokrycia, szkielet konstrukcji nie uległ uszkodzeniu) stwierdzono, że po usunięciu blachy pokrycia, zmierzone wartości odkształceń zmieniają się na pokryciu w okolicy wykonanego otworu w płatowncu i elementach szkieletu (rys. 4.25., cykl 16, tensometry 62-70). Należy przy tym zaznaczyć, iż rozety tensometrów nr 56-57-58 oraz 59-60-61 zostały usunięte wraz z blachą pokrycia, stąd na poniższym wykresie nie zobrazowano dla nich żadnych wskazań w cyklu nr 16.



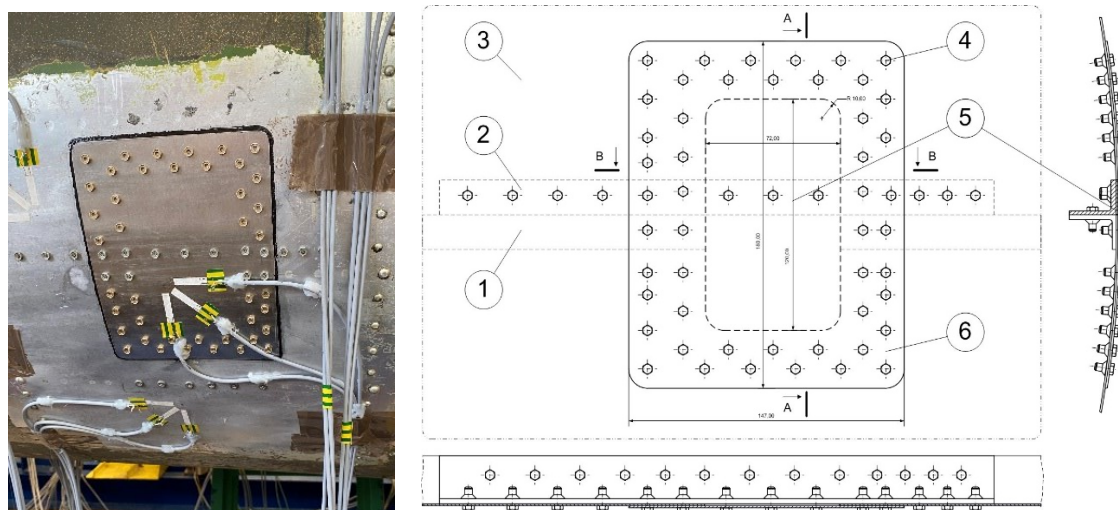
Rysunek 4.25. Wartości odkształceń mierzone w obszarze belki z usuniętą blachą pokrycia (badanie cyklu nr 16) w zestawieniu z pomiarami z badań cykli nr 7 i 15

Wyniki otrzymane w cyklu nr 17 wskazują jednoznacznie, że po usunięciu fragmentu podłużnicy nr 5, wartości odkształceń wzrastają znacząco jedynie w obszarze X (rys. 4.26., cykl 17, tensometry 62-66 i 69-70). Wyniki pomiarów w pozostałych obszarach nie zmieniają się. Należy zaznaczyć, iż tensometry nr 56-57-58 oraz 59-60-61 zostały usunięte wraz z blachą pokrycia, a nr 67 i 68 wraz z podłużnicą, stąd na poniższym wykresie nie zobrazowano dla nich żadnych wskazań.



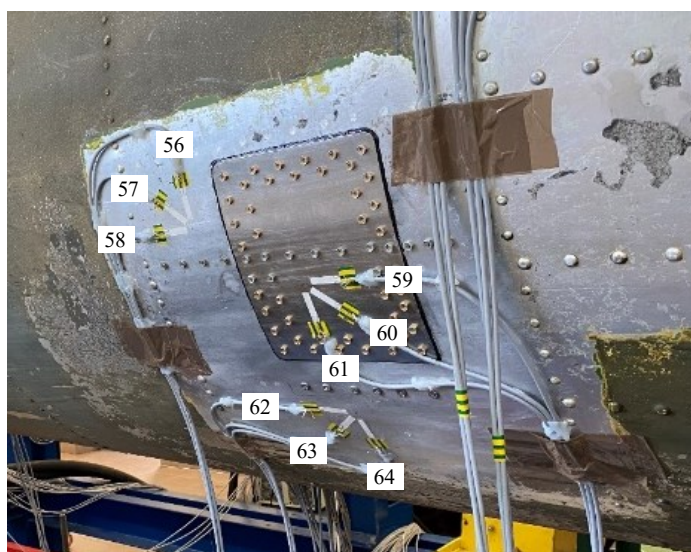
Rysunek 4.26. Wartości odkształceń mierzone w obszarze belki z usuniętą blachą pokrycia i fragmentem podłużnicy nr 5. Badanie cyklu nr 17 w zestawieniu z pomiarami z badania cyklu nr 16

W cyklu nr 19 na powierzchni belki zamontowano łąkę zewnętrzną, a konstrukcję wzmocniono poprzez uzupełnienie fragmentu usuniętej podłużnicy kątownikiem (rys. 4.27.). Naprawę pokrycia (uszkodzenia) belki śmigłowcowca przeprowadzono poprzez wykonanie połączenia hybrydowego. W naprawie zastosowano nakładkę (łąkę) z blachy AW 2024-T3 o wymiarach 147 mm × 180 mm, łączniki jednostronne typu PLT210-5 (Jo-Bolt®) oraz tworzywo adhezyjne Raychem S1125.



Rysunek 4.27. Widok konstrukcji belki z zamontowaną blachą pokrycia i kątownikiem wzmacniającym;
a) widok ogólny, b) rysunek: 1) podłużnica, 2) kątownik wzmacniający, 3) pokrycie, 4) łącznik jednostronny,
5) wkładka dystansowa, 6) łąka

Tensometry (9 szt.) rozmieszczono zgonie ze schematem zaprezentowanym na rys. 4.28. – na pokryciu płatowca ponownie naklejono rozety tensometrów 56-57-58 oraz 59-60-61 natomiast wewnątrz belki 67-68.

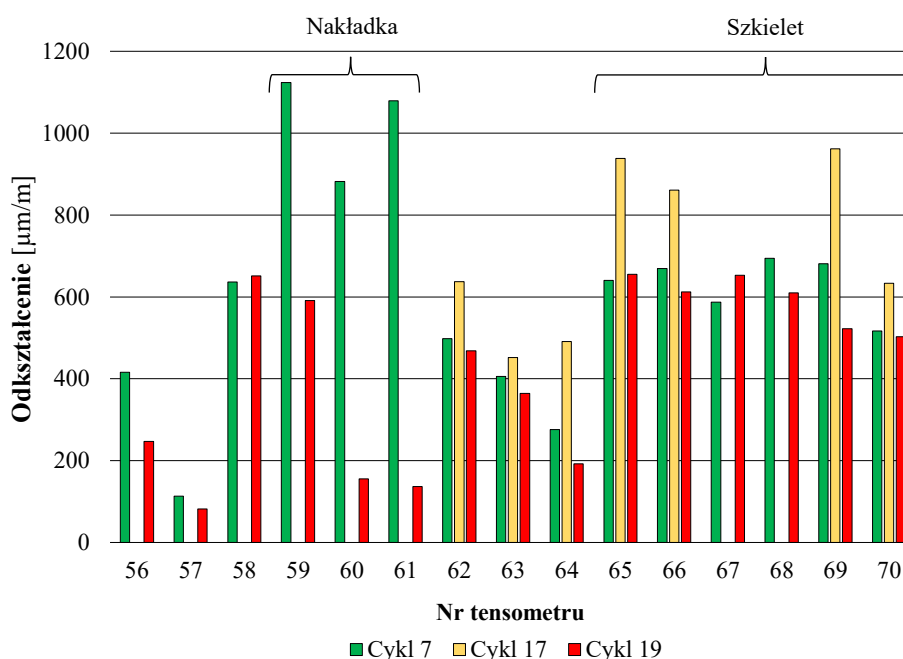


Rysunek 4.28. Obszar belki z zamontowaną blachą pokrycia i kątownika – umiejscowienie tensorów

Wykonane w cyklu nr 19 pomiary miały na celu określenie wpływu montażu węzła naprawczego na odkształcenia konstrukcji belki.

Analizując wyniki stwierdzono, że po dokonaniu naprawy fragmentu pokrycia poprzez wykonanie połączenia hybrydowego – zastosowanie łąty z blachy AW 2024-T3 z łącznikami jednostronnymi typu PLT210-5 oraz tworzywa adhezyjnego Raychem S1125 i podłużnicy, zmierzone wartości odkształceń w badanym obszarze (rys. 4.29., cykl 19) znacząco się zmniejszyły, w szczególności w miejscu naprawy (rys. 4.29., cykl 19, tensometry 59-61). W wyniku naprawy odtworzono strukturę szkieletu – odkształcenia na podłużnicach uzyskały wartości jak przed wykonaniem uszkodzenia (rys. 4.29., por. cykl 7 i 19, tensometry 65-70). Nakładka naprawcza z pewnością wzmocniła i usztywniła połączenie konstrukcji lokalnie – stąd mierzone wartości odkształceń na rozetach montowanych na pokryciu są mniejsze.

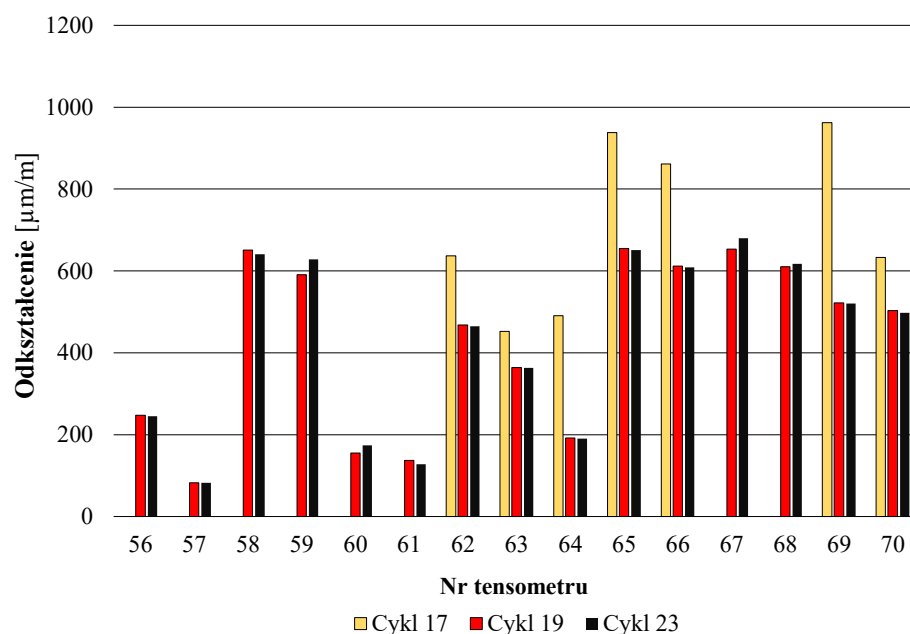
W dalszej części badań oceniono trwałość węzła naprawczego, w którym zastosowano wcześniej badane rozwiązanie w formie połączenia hybrydowego.



Rysunek 4.29. Wartości odkształceń mierzone w obszarze belki z zamontowaną łątą naprawczą (badanie cyklu nr 19) w zestawieniu z pomiarami z badań cykli nr 7 i 17

Kontynuując eksperyment zadawano kolejne bloki obciążeń w liczbie 20 000 cykli każdy, do momentu osiągnięcia łącznie 180 000 cykli obciążenia belki ogonowej śmigłowca, rejestrując przy tym odkształcenia elementów konstrukcji belki. Uzyskane dane zamieszczono w tab. 4.5. Dla liczby 180 000 cykli obciążeniowych, którym

poddano belkę, w badanym obszarze nie zidentyfikowano żadnych uszkodzeń konstrukcji belki, nakładki, łączników mechanicznych oraz warstwy adhezyjnej. Zbliżone wartości zarejestrowanych odkształceń w trakcie 80 000 cykli (tab. 4.5., rys. 4.30) od wykonania naprawy (cykl nr 19) do zakończenia badań (cykl nr 23) świadczą o pełnej sprawności i funkcjonalności wszystkich elementów wykonanego połączenia hybrydowego.



Rysunek 4.30. Wartości odkształceń mierzone w obszarze X belki;
badanie cyklu nr 17 – z usuniętym pokryciem i częścią podłużnicy nr 5 w porównaniu z badaniami cyklu 19 i 23
– z zamontowaną łatką naprawczą po 80 000 cyklach obciążeń

Tabela 4.5. Porównanie wartości odkształceń rejestrowanych w badanym obszarze w 23 cyklach – 180 000 prób

Wartości odkształceń																
Cykl	Liczba obciążeń 10 kN	Nr tensometru														
		56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
1	1000															
2	1000															
3	1000															
4	1000															
5	10 000	445	98	628	1015	865	1142	499	407	295	644	670	506	713	0	0
6	10 000	493	90	731	1195	907	1045	516	403	301	642	675	459	718	665	528
7	10 000	416	113	636	1124	882	1079	498	406	276	640	669	587	694	681	517
8	20 000	415	107	639	1096	867	1079	497	409	275	643	671	570	692	680	515
9	20 000	417	108	639	1098	869	1080	499	410	276	644	672	569	695	708	516
10	20 000	416	106	636	1093	864	1078	498	408	276	643	671	567	694	681	515

Tabela 4.5. c.d Porównanie wartości odkształceń rejestrowanych w badanym obszarze w 23 cyklach – 180 000 prób

11	30 000	415	106	637	1055	860	1079	498	408	277	643	671	566	692	682	513
12	40 000	415	106	639	1039	861	1077	497	407	276	642	670	561	691	714	511
13	60 000	413	107	639	1038	851	1075	496	407	275	642	669	566	689	709	510
14	80 000	410	105	636	uszk.*	845	uszk.	491	407	272	641	668	561	686	674	507
15	100 000	410	104	636	uszk.	uszk.	uszk.	491	407	271	640	668	559	683	673	506
16	100 000	dem.*	dem.	dem.	dem.	dem.	dem.	562	472	338	810	737	634	743	743	561
17	100 000	dem.	dem.	dem.	dem.	dem.	dem.	637	452	491	938	861	dem.	dem.	962	633
18	100 000	dem.	dem.	dem.	dem.	dem.	dem.	638	452	495	941	uszk.	dem.	dem.	uszk.	631
19	100 000	247	82	651	591	155	137	468	364	192	655	612	653	610	522	503
20	120 000	246	81	641	624	174	128	465	360	192	651	609	681	618	520	496
21	140 000	246	83	642	629	174	141	465	361	191	651	611	682	618	519	496
22	160 000	245	83	641	628	175	130	464	363	190	651	608	680	617	519	498
23	180 000	245	82	641	628	174	128	465	363	190	651	609	680	617	520	498

*uszk. – uszkodzenie tensometru

*dem. – demontaż tensometru związany z modyfikacją badanej konstrukcji

4.4 Podsumowanie

Wykonane obliczenia zakładkowych połączeń hybrydowych z łącznikami mechanicznymi umieszczonymi w odległości 1d dla dwóch różnych modeli tworzywa adhezyjnego (Epidian 57/Z1 i Raychem S1125) wskazały, że rozkłady naprężeń normalnych prostopadłych do klejonych powierzchni są jakościowo podobne. Zauważalne są natomiast różnice w samych wartościach. Większe wartości naprężeń normalnych prostopadłych do klejonych powierzchni występują dla połączenia z Epidian 57/Z1. Bardziej widoczne różnice zaobserwowano w rozkładzie naprężeń stycznych. Dla modelu spoiny Raychem S1125 rozkład naprężeń jest bardziej regularny – spiętrzenie naprężeń w okolicach otworów montażowych oraz na końcach zakładki jest mniejsze. Widoczne jest bardziej równomierne wyłączenie całej powierzchni warstwy adhezyjnej. Dla modelu Epidian 57/Z1 rozkład naprężeń stycznych był znacznie bardziej nieregularny. W zakresie maksymalnych naprężeń głównych, podobnie jak w przypadku naprężeń normalnych odnotowano zbliżony charakter ich dystrybucji w warstwie adhezyjnej. Widoczne różnice dotyczyły wartości naprężeń. Dla Raychem S1125 wartości maksymalne odnotowane w pobliżu krawędzi zakładki, kształtowały się na poziomie około 40 MPa, natomiast dla Epidian 57/Z1 wartości te osiągały 140 MPa. W przypadku połączeń hybrydowych mniejsze różnice między wartościami naprężeń na końcach zakładki i w jej środkowej części mogą pozytywnie wpływać

na trwałość zmęczeniową połączenia [87]. Dodatkowo różnice w wartościach naprężeń stycznych łączników mechanicznych dla poszczególnych wariantów połączeń (dla modelu połączenia z Raychem S1125 – 91 MPa, natomiast w modelu połączenia z Epidian 57/Z1 – 54 MPa) wskazują na ich różne obciążenie, w zależności od podatności warstwy adhezyjnej.

Ocenie poddano również rozkład naprężeń von Misesa w klejonych próbkach. Zasadniczo, dla połączenia z Raychem S1125 jak i Epidian 57/Z1 rozkłady naprężeń w klejonych elementach były zbliżone, przy czym dla modelu z Raychem S1125 bardziej jednorodne. Dla połączeń z Epidian 57/Z1 w wariancie 1d stwierdzono wyraźną strefę koncentracji naprężeń, występującą w klejonych próbkach na wysokości otworu montażowego w kierunku prostopadłym do działającego obciążenia na całej szerokości próbki, praktycznie wzdłuż przekroju krytycznego. Jest to miejsce potencjalnej lokalizacji ogniska uszkodzenia. Dla próbek łączonych Raychem S1125 w konfiguracji 1d, poziom koncentracji naprężeń w okolicach przekroju krytycznego został obniżony i odsunięty od otworu pod łącznik. W konsekwencji powinno to utrudnić inicjację uszkodzeń badanego obiektu i pozytywnie wpływać na zwiększenie trwałości zmęczeniowej analizowanego połączenia. W przypadku połączeń hybrydowych z łącznikami mechanicznymi umiejscowionymi w odległości $2d$ od krawędzi zakładki, rozkłady naprężeń były jakościowo zbliżone do omówionych dla wariantu 1d. Zasadniczą różnicą było proporcjonalnie mniejsze wyężenie łączników mechanicznych, spowodowane większą odległością łączników od krawędzi zakładki i umiejscowieniem ich w części zakładki poddanej mniejszym obciążeniom.

Analiza wyników przeprowadzonych obliczeń MES potwierdziła założenie o pozytywnym wpływie podatnej warstwy adhezyjnej na równomierne wyężenie elementów przenoszących obciążenie w połączeniu hybrydowym, co może skutkować wzrostem trwałości zmęczeniowej proponowanego rozwiązania. Kolejnym etapem weryfikacji powyższego założenia była realizacja serii doświadczeń.

Przeprowadzone badania eksperymentalne wykazały większą trwałość zmęczeniową połączeń hybrydowych z tworzywem adhezyjnym o mniejszej sztywności tj. z Raychem S1125. Spoina klejowa Epidian 57/Z1 sztywniejsza od Raychem S1125, wpływała negatywnie na trwałość zmęczeniową połączenia – powodowała jej obniżenie. Podczas testów eksperymentalnych dowiedziono, iż stosowana w warstwie klejowej tkanina szklana przeciwdziałała zjawisku pomniejszania efektywnej powierzchni

połączenia (wyciskania kleju), co zapewnia utrzymanie właściwego kontaktu kleju z próbkami, a w okolicach otworów montażowych istotnie ogranicza wartość współczynników koncentracji naprężeń.

W drugim etapie badań eksperymentalnych weryfikowano efektywność wykorzystania połączeń hybrydowych w naprawie belki ogonowej śmigłowca Mi-8. Badania eksperymentalne dowiodły, że stosowanie połączeń hybrydowych (adhezyjno-nitowych) np. w lotniczych naprawach konstrukcji półskorupowych jest zasadne. Stosując w węźle naprawczym tworzywo adhezyjne Raychem S1125 i łączniki jednostronne typu Jo-Bolt® odtworzono stan techniczny konstrukcji oraz potwierdzono wysoką trwałość zmęczeniową proponowanych rozwiązań.

Wykorzystując system pomiarowy oparty na czujnikach tensometrycznych, w badanej konstrukcji nie zdiagnozowano wtórnych uszkodzeń zmęczeniowych.

V. POŁĄCZENIA HYBRYDOWE W MONTAŻU ELEMENTÓW KOMPOZYTOWYCH – PROPOZYCJE DAŁSZYCH BADAŃ

W ostatnich latach w budowie maszyn, w tym również w konstrukcjach obecnie produkowanych statków powietrznych, obserwowany jest wzrost wykorzystania materiałów kompozytowych typu CFRP. Powodem wzrostu zainteresowania i stosowania tego rodzaju materiału są jego istotne zalety, w szczególności bardzo wysoka trwałość zmęczeniowa [11, 17, 85, 89, 140] oraz mniejsza gęstość w porównaniu ze stopami aluminium, które przez lata dominowały w budowie statków powietrznych.

Problemem, który związany jest ze stosowaniem materiałów kompozytowych w budowie maszyn jest ich niższa, w porównaniu do metali konstrukcyjnych, odporność na naciski powierzchniowe [23, 24, 83] co powoduje ciągle poszukiwania najbardziej efektywnych sposobów montażu elementów wykonanych z kompozytów. Elementy kompozytowe najczęściej łączy się adhezyjnie (połączenia klejowe), mechanicznie lub stosując jednocześnie obie wymienione technologie hybrydowo (połączenia klejowo-mechaniczne).

Uwzględniając powyższe, w ramach dalszych prac badawczych nad połączeniami hybrydowymi, jako propozycję postanowiono wykonać ich kolejną analizę, tym razem jednak przy montażu elementów kompozytowych. W trakcie zrealizowanych badań połączeń hybrydowych materiałów kompozytowych przeprowadzono również obserwacje procesu uszkodzenia kompozytów w strefach montażu łączników mechanicznych. Na potrzeby rejestracji i obserwacji uszkodzeń połączeń kompozytu wykorzystano technologię tomografii komputerowej, która jest jedną z najbardziej wiarygodnych i efektywnych metod weryfikacji niszczenia zmęczeniowego materiałów kompozytowych [48, 54]. Badania tomograficzne wykonywano za pomocą tomografu komputerowego GE v/tome/x m.

Przeprowadzone badania połączeń w zakresie statycznym i zmęczeniowym mogą stanowić rzetelną podstawę do prowadzenia dalszych badań. Zgłębianie proponowanej problematyki w czasach stale rosnącej popularności materiałów kompozytowych jest tematem, którego podjęcie może okazać się niezwykle wartościowym przedsięwzięciem, szczególnie istotnym w aspekcie poszukiwania najbardziej efektywnych sposobów łączenia materiałów kompozytowych w lotnictwie.

5.1 Badania eksperymentalne

W projektowaniu połączeń mechanicznych oraz hybrydowych, czego starano się dowieść w rozdziałach III i IV, istotnym czynnikiem montażowym jest geometria rozmieszczenia łączników w węźle konstrukcyjnym. W przypadku łączenia elementów kompozytowych m.in. ze względu na ograniczoną wytrzymałość materiału kompozytowego na naciski powierzchniowe [25], zalecenia montażowe związane z geometrią rozmieszczenia łączników (schemat wykonania otworów montażowych) są jeszcze bardziej rygorystyczne niż w przypadku elementów metalowych. Uszkodzenia kompozytów wynikające z przekroczenia ich wytrzymałości na naciski powierzchniowe mają postać wyboczenia włókien „podpartych” syciwem w płaszczyźnie warstwy kompozytowej, ścinania spoiwa na granicy włókien lub zniszczenia włókien uwolnionych z matrycy [145, 149, 154]. Problemy montażowe elementów kompozytowych pogłębia dodatkowo ich warstwowa budowa i anizotropowe właściwości [72]. Dlatego też w przypadku materiałów kompozytowych już samo wykonanie otworów montażowych staje się istotnym zagadnieniem badawczym, a liczne analizy i eksperymenty wykazały, że wytrzymałość połączeń mechanicznych zależy m.in. od uszkodzeń powstałych w procesie wiercenia otworów czy zbyt dużych luzów montażowych (pasowania otworu i łącznika) [46, 75, 90, 117, 153].

Na podstawie danych literaturowych wiadomo, że w połączeniach mechanicznych, w przenoszeniu obciążeń pomiędzy łączonymi elementami uwzględnia się również zjawisko tarcia [52, 55]. W elementach metalowych poddanych działaniu cyklicznych obciążeń, wartości sił tarcia w okolicach otworów montażowych wzrastają, co jest pochodną m.in. zużycia współpracujących powierzchni łączonych elementów i ilości występujących produktów zużycia. Zjawisko to występuje analogicznie w elementach kompozytowych łączonych za pomocą łączników mechanicznych. W tym rodzaju połączenia, obciążenie również jest częściowo przenoszone przez siły tarcia [73, 74, 77], a dane prezentowane w publikacjach wskazują na prawidłowość związaną ze wzrostem współczynnika tarcia w badaniach zmęczeniowych połączeń, w których wykorzystano materiały kompozytowe i łączniki mechaniczne [137]. Dodatkowo sugeruje się [73], iż efekt zwiększania się współczynnika tarcia w połączeniach cyklicznie obciążanych może kompensować utratę zacisku montażowego, co jest efektem lepkosprężystych właściwości materiału kompozytowego i zmiany wymiarów geometrycznych łączonych elementów w obszarze montażu łączników mechanicznych.

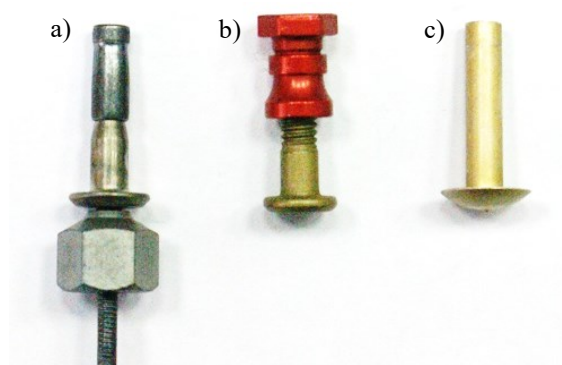
Pozytywny efekt działania sił tarcia można potęgować poprzez zwiększenie pola oddziaływania nacisków montażowych. Stąd w licznych publikacjach prezentowane są właściwości połączeń, w których wykorzystywano materiały kompozytowe stosując przy tym łączniki mechaniczne i podkładki [53, 135]. Efektywność oddziaływania podkładek mechanicznych na właściwości połączeń zależy m.in. od geometrii podkładek, co bezpośrednio związane jest w wielkością pola działania nacisków montażowych [77, 135]. Problem ograniczonej wytrzymałości materiału kompozytowego na naciski powierzchniowe można również w bardzo efektywny sposób rozwiązywać poprzez wykorzystanie połączeń hybrydowych (mechaniczno-adhezyjnych) [78, 79, 53, 152, 155], w których warstwa klejowa, najbardziej wyłożona na końcach zakładki połączeń (obszar otworów montażowych), istotnie ogranicza naciski trzpienia łącznika na powierzchnię otworu w materiale kompozytowym [86]. W celu weryfikacji, w jakim zakresie warstwa klejowa w połączeniach hybrydowych ogranicza naciski trzpienia łącznika na powierzchnię otworu w materiale kompozytowym wpływając w ten sposób pozytywnie na trwałość zmęczeniową połączeń wykonano badania eksperymentalne [49, 58].

5.1.1 Metodyka badań

W badaniach eksperymentalnych wykorzystywano elementy wycinane z materiału kompozytowego techniką „waterjet”. Materiał kompozytowy typu CFRP został wykonany technologią autoklawową z siedmiu warstw prepregu typu DF285 ułożonych wg schematu $[45^\circ, 0^\circ, 45^\circ, 45^\circ, 0^\circ, 45^\circ, 0^\circ]$. Warunki utwardzania kompozytu były następujące: podgrzewanie do temperatury 120°C z gradientem $2^\circ\text{C}/\text{min}$, wygrzewanie w temperaturze 120°C przez 90 min i chłodzenie do temperatury 40°C z gradientem $2^\circ\text{C}/\text{min}$. Z wyciętych elementów o wymiarach: długość 100 mm, szerokość 25 mm oraz grubość 2,2 mm przygotowano połączenia jednozakładkowe o długości zakładki 50 mm. Do połączenia elementów wykorzystano łączniki mechaniczne typu: nity ze stopu aluminium 3560A o średnicy 4 mm, Hi-Lok® serii HL 1012 o średnicy 4,12 mm – łączniki wykonane ze stopu tytanu z aluminiowym kołnierzem oraz łączniki jednostronne typu Jo-Bolt® – tytanowo-stalowe o średnicy 4,12 mm (rys. 5.1.).

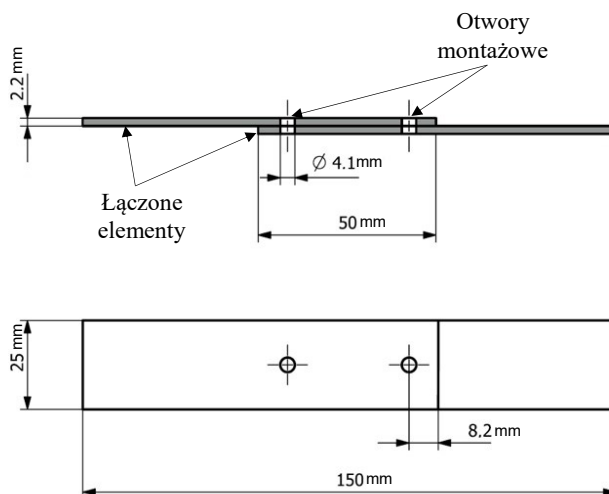
Łączniki wykorzystane do badań są certyfikowane dla materiałów kompozytowych. Zasadniczą zaletą materiału, z którego są wykonywane – stop tytanu –

jest wysoka trwałość zmęczeniowa, oraz brak inicjacji negatywnego zjawiska korozji elektrochemicznej [57] w kontakcie z materiałami CFRP. Ponadto ich montaż nie jest skomplikowany i może być również realizowany za pomocą narzędzi ręcznych przy zachowaniu pełnej powtarzalności właściwości tychże połączeń [84].



Rysunek 5.1. Łączniki wykorzystane do przygotowania połączeń próbek kompozytu:
a) Jo-Bolt®, b) Hi-Lok®, c) nit 3560A

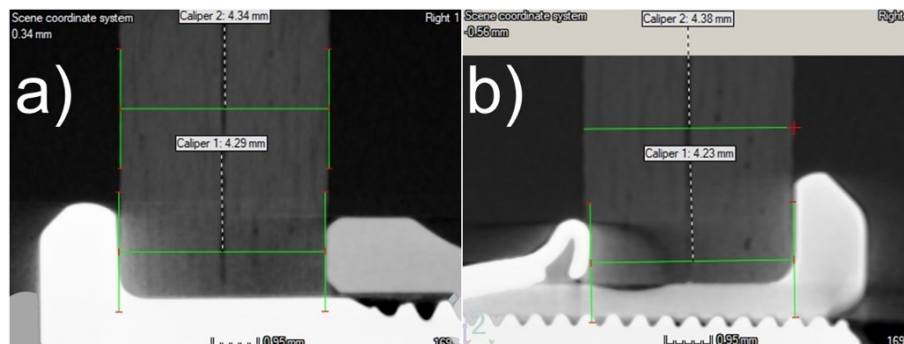
Schemat połączenia wykorzystywanego w badaniach eksperymentalnych zaprezentowano na rys. 5.2. Otwory montażowe o średnicy 4,1 mm były wykonane w połowie szerokości łączonych elementów i w odległości od krawędzi zakładek równej dwóm średnicom łączników montażowych ($2d$).



Rysunek 5.2. Schemat połączenia materiałów kompozytowych w badaniach eksperymentalnych

Wykorzystywane w badaniach łączniki, różniły się właściwościami materiałów, z których zostały wykonane, oraz wartościami sił nacisku, jakie wywierały na łączone elementy. Pomiar grubości łączonych elementów w pobliżu otworów wykonany z użyciem tomografu komputerowego wskazywał, że największe naciski występowały po montażu elementów łącznikami typu Jo-Bolt®. Wartości pomiarów wykazały

zmniejszenie grubości próbek w miejscu montażu łączników na poziomie około 1,2% grubości dla łączników Hi-Lok® i około 3,4% dla łączników Jo-Bolt® (rys. 5.3.).



Rysunek 5.3. Przykładowe tomogramy połączeń w okolicy otworów montażowych:
a) z wykorzystaniem łączników typu Hi-Lok®, b) z wykorzystaniem łączników typu Jo-Bolt®

Do wykonania połączeń hybrydowych (mechaniczno-klejowych) oprócz ww. łączników mechanicznych wykorzystano klej Epidian 57/Z1 mieszany z utwardzaczem Z1 w proporcjach masowych 10:1. Łączniki mechaniczne w połączeniach hybrydowych były montowane identycznie jak w połączeniach mechanicznych, w odległości $2d$ od krawędzi zakładki, czyli w pobliżu końca zakładki połączenia adhezyjnego, w strefie, gdzie spoina klejowa jest najbardziej wyężona. W badaniach nie wykorzystywano natomiast tworzywa Raychem S1125. Jest to klej dedykowany do łączenia metali i ich stopów, a w odniesieniu do materiałów kompozytowych wykazuje bardzo niską adhezję w konsekwencji czego nie jest zalecany do ich łączenia.

Klej był utwardzany dwustopniowo, zgodnie z rekomendacjami producenta, tzn. 24 godziny w temperaturze pokojowej i 8 godzin w temperaturze 80°C . Proces utwardzania spoiny klejowej odbywał się po montażu łączników mechanicznych. W celu zachowania grubości spoiny klejowej na poziomie 0,1 mm, do spoiny połączenia zostały wprowadzone nicie dystansowe. Powierzchnie do klejenia zostały przygotowane poprzez mycie acetonem.

5.1.2 Badanie statycznej nośności połączeń mechanicznych i hybrydowych

W pierwszym etapie testów eksperymentalnych wyznaczano statyczną nośność połączeń mechanicznych i hybrydowych. Wartość nośności połączeń została wykorzystana m.in. do definiowania obciążeń w próbach zmęczeniowych (trwałościowych). Zarówno w badaniach statycznych jak i zmęczeniowych wykorzystano maszynę wytrzymałościową MTS 809 Axial/Torsional (rys. 3.3.). Nośność połączeń

mechanicznych i hybrydowych oceniano na podstawie trzech próbek połączeń. Badania statyczne realizowano z prędkością 2 mm/min. Próby trwałościowe realizowano w zakresie zmiennych obciążeń z częstotliwością 20 Hz, zgodnie z wartościami obciążeń przedstawionymi w tab. 5.1.

Tabela 5.1. Wartości obciążeń połączeń w testach zmęczeniowych

Wartości obciążeń				
Typ łącznika/kleju w połączeniu	Obciążenie w cyklu zmęczeniowym min-max [kN]	Obciążenie średnie cyklu [kN]	Współczynnik asymetrii cyklu	Iloraz maksymalnego obciążenia zmęczeniowego i siły niszczącej
Nity 3560A	3,5-5,5	4,5	0,64	0,82
Hi- Lok® HL 1012	5-8	6,5	0,63	0,77
Jo-Bolt®	5-8	6,5	0,63	0,83
Nity 3560A /Epidian 57/Z1	3,5-5,5	4,5	0,64	0,38
Hi-Lok® HL 1012 /Epidian 57/Z1	7-10	8,5	0,7	0,70
Jo-Bolt® /Epidian 57/Z1	7-10	8,5	0,7	0,67

W próbach zmęczeniowych dla połączeń mechanicznych przyjęto maksymalną wartość obciążenia w cyklu równą ok. 80% wartości nośności połączeń, co odpowiadało w przypadku połączeń z nitami 3560A wartości 5,5 kN, natomiast w przypadku połączeń z Hi-Lok® i Jo-Bolt® wartości równej 8 kN. Przyjęta wysoka wartość maksymalna obciążenia w cyklu wynikała z faktu, iż materiały kompozytowe CFRP charakteryzuje wyjątkowo wysoka trwałość zmęczeniowa.

W połączeniach hybrydowych z łącznikami typu Hi-Lok® oraz Jo-Bolt® obniżono maksymalne obciążenie w cyklu do wartości około 70% nośności połączeń, co przy znacznie większej nośności połączeń hybrydowych oznaczało maksymalną wartość obciążenia w cyklu równą 10 kN (o 2 kN wyższą niż w przypadku połączeń mechanicznych). W przypadku prób zmęczeniowych połączeń hybrydowych, w których wykorzystano nity 3560A, wartości obciążeń w cyklu były identyczne jak w przypadku połączeń mechanicznych. Obciążenie maksymalne w cyklu stanowiło około 38% nośności połączenia hybrydowego, co wynika ze znacznie większej nośności połączeń hybrydowych w porównaniu z połączeniami mechanicznymi. W przypadku połączeń hybrydowych z nitami odstępiono od zasady przyjęcia maksymalnych obciążeń w cyklu

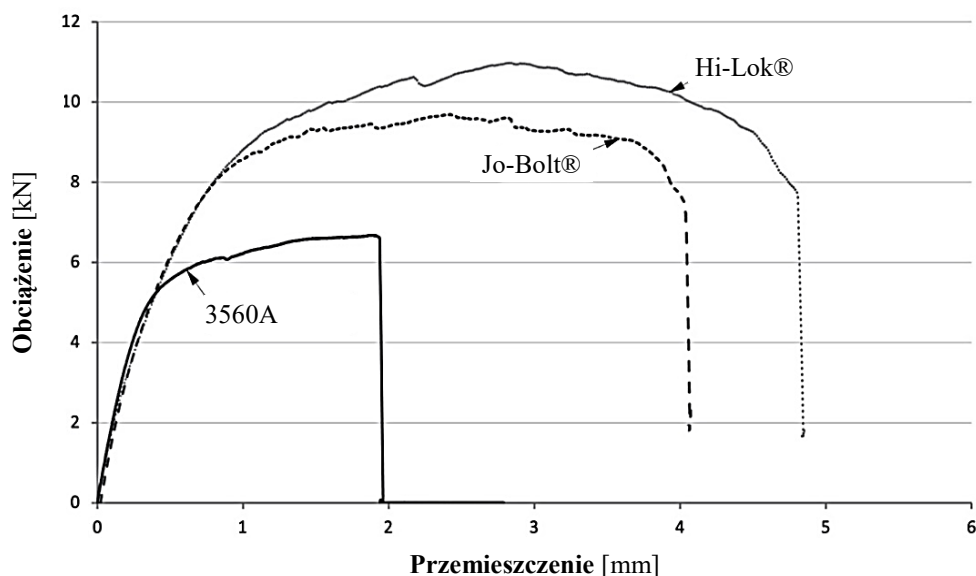
na poziomie ok. 70%, ponieważ w połączeniach mechanicznych z nitami to łączniki mechaniczne ulegały zniszczeniu zmęczeniowemu. Spodziewano się więc, że w przypadku połączeń hybrydowych z nitami, wyłączenie ich obciążeniem na poziomie 70% może doprowadzić do szybkiego zniszczenia połączeń (poprzez zniszczenie nitów).

Uzyskane wartości nośności połączeń mechanicznych dla trzech prób każdego z wariantów łączników mechanicznych zamieszczono w tab. 5.2. Największą nośność charakteryzowało połączenie z łącznikami typu Hi-Lok® – wartość średnia – 10,44 kN. Dla połączeń z łącznikami typu Jo-Bolt® wartość średnia nośności wynosiła 9,59 kN, natomiast dla połączeń z nitami 3560A równa była 6,73 kN.

Tabela 5.2. Nośność połączeń mechanicznych w testach zmęczeniowych

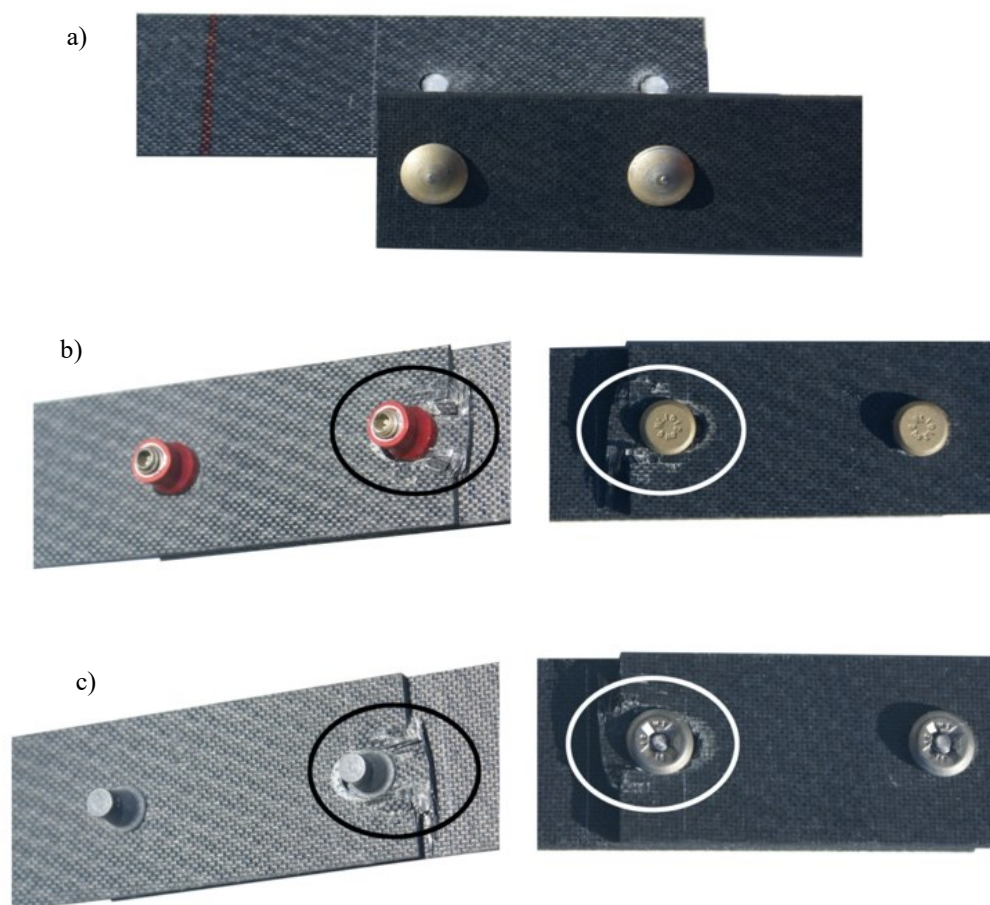
Nośność połączeń mechanicznych				
Typ łącznika w połączeniu	Nośność próbki I [kN]	Nośność próbki II [kN]	Nośność próbki III [kN]	Nośność średnia połączenia [kN]
Nity 3560A	6,68	6,83	6,68	6,73
Hi- Lok® HL 1012	10,98	10,10	10,25	10,44
Jo-Bolt®	9,30	9,69	9,78	9,59

Na rys. 5.4. zaprezentowano przykładowe krzywe rozciągania badanych połączeń mechanicznych z różnymi łącznikami.



Rysunek 5.4. Krzywa rozciągania połączeń mechanicznych kompozytu

Nośność połączeń, w których wykorzystano łączniki typu Jo-Bolt® i Hi-Lok® była znacznie wyższa od połączeń, gdzie stosowano nity 3560A. W zależności od zastosowanego łącznika obserwowano także różne postacie niszczenia połączenia. Zniszczenie połączeń z nitami 3560A nastąpiło w wyniku ścięcia nitów, natomiast połączeń z łącznikami Hi-Lok® i Jo-Bolt® w wyniku nacisków powierzchniowych i ścinania materiału kompozytowego (rys. 5.5.).



Rysunek 5.5. Formy niszczenia połączeń mechanicznych:
a) z nitami 3560A, b) z łącznikami typu Hi-Lok®, c) z łącznikami Jo-Bolt®

Badania tomograficzne wybranych połączeń mechanicznych wykonywano po serii prób zmęczeniowych zgodnie ze schematem zaprezentowanym w tab. 5.3., np. dla próbki *MHI* badania zrealizowano po 1,5 mln, 4,5 mln, 7,5 mln oraz 12 mln cykli. Dla połączeń hybrydowych zastosowano podobny schemat – realizowano badania tomograficzne zgodnie z informacją zawartą w tab. 5.5. Wykonując diagnostykę tomograficzną oceniano stopień degradacji węzła połączeniowego w okolicy otworów montażowych.

Tabela 5.3. Schemat wykonania badań tomograficznych połączeń mechanicznych

Badania tomograficzne połączeń mechanicznych kompozytu									
Typ łącznika	Numer próbki	Zakres obciążeń w cyklu [kN]	Liczba cykli /T/ - tomograf	Stan próbki					
				Delaminacja	Pęknięcia w materiale	Owalizacja	Uszkodzenie łącznika	Brak uszkodzeń	Zniszczenie próbki
Nit 3560A	MN1	3,5-5,5	1,5 mln /T/				X*		X
	MN2	3,5-5,5	1 831 415				X		X
Hi-Lok®	MH1	5-8	0 /T/					X	
			1,5 mln /T/	X	X	X			
			4,5 mln /T/	X	X	X			
			7,5 mln /T/	X	X	X			
			12 mln /T/	X	X	X			X
	MH2	5-8	0 /T/					X	
			1,5 mln /T/	X	X	X			
			4,5 mln /T/	X	X	X			
			7,5 mln /T/	X	X	X			
			12 mln /T/	X	X	X			X
	MH3	5-8	0 /T/					X	
			4,5 mln /T/	X	X	X			
			9 mln /T/	X	X	X			
			12 mln /T/	X	X	X			X
Jo-Bolt®	MJ1	5-8	0 /T/					X	
			1,5 mln /T/					X	X
	MJ2	5-8	0 /T/					X	
			1,5 mln /T/			X			
			4,5mln /T/			X			
			7,5mln /T/			X			
			12 mln /T/			X			X

* Stan próbki obserwowany podczas badań

Tabela 5.3. c.d Schemat wykonania badań tomograficznych połączeń mechanicznych

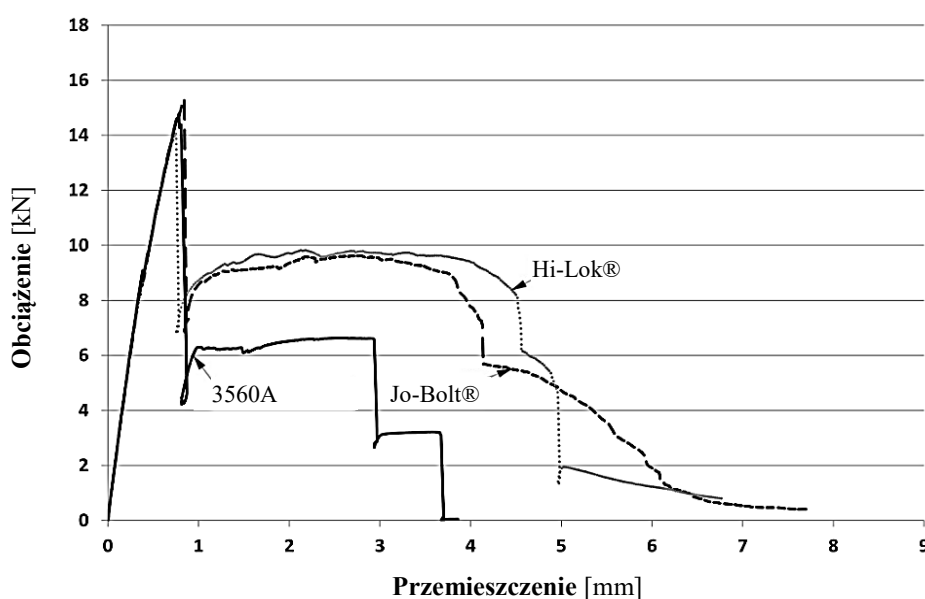
Jo-Bolt®	MJ3	5-8	0 /T/					X		
			4,5 mln /T/			X				
			9 mln /T/			X				
			12 mln /T/			X				X

Określoną w badaniach trzech próbek każdego wariantu połączenia hybrydowego nośność, zaprezentowano w tab. 5.4. Największą nośność uzyskało połączenie z łącznikami typu Jo-Bolt® – wartość średnia – 15,25 kN. Dla połączeń z łącznikami typu Hi-Lok® oraz z nitami 3560A średnia wartość nośności była zbliżona i wynosiła odpowiednio 14,22 kN i 14,53 kN.

Tabela 5.4. Nośność połączeń hybrydowych w testach zmęczeniowych

Nośność połączeń hybrydowych				
Typ łącznika/kleju w połączeniu	Nośność próbki I [kN]	Nośność próbki II [kN]	Nośność próbki III [kN]	Nośność średnia połączenia [kN]
Nity 3560A /Epidian 57/Z1	14,80	14,30	14,50	14,53
Hi-Lok® HL 1012 /Epidian 57/Z1	14,07	14,20	14,40	14,22
Jo-Bolt® /Epidian 57/Z1	15,31	15,05	15,40	15,25

Na rys. 5.6. zaprezentowano przykładowe krzywe rozciągania badanych połączeń hybrydowych z różnymi typami łączników mechanicznych.



Rysunek 5.6. Krzywa rozciągania połączeń hybrydowych kompozytu

Wykonując badania tomograficzne połączeń hybrydowych, zastosowano schemat analogiczny jak w przypadku połączeń mechanicznych, co przedstawiono w tab. 5.5.

Tabela 5.5. Schemat wykonania badań tomograficznych połączeń hybrydowych

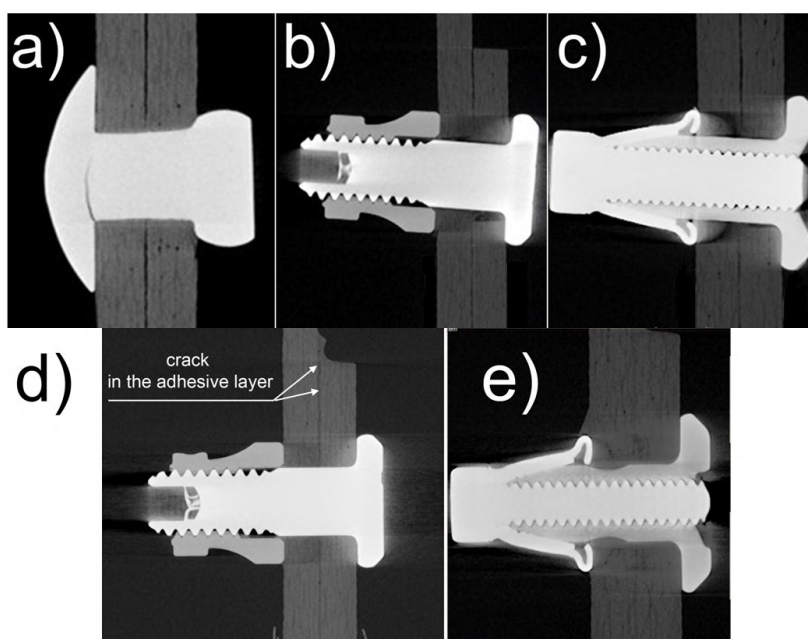
Badania tomograficzne połączeń hybrydowych kompozytu											
Typ łącznika	Numer próbki	Zakres obciążeń w cyklu [kN]	Liczba cykli /T/ – tomograf	Stan próbki							
				Delaminacja	Pęknięcia w materiale	Owalizacja	Uszkodzenie łącznika	Brak uszkodzeń	Zniszczenie próbki	Koniec prób	Zniszczenie połączenia klejowego
Nit 3560A	HNE1	3,5-5,5	0 /T/					X*			
			3 mln /T/								X
			6 mln /T/								X
			9 mln /T/								X
			12 mln /T/								X
Hi-Lok®	HHE1	7-10	0 /T/					X			
			3 mln /T/								X
			6 mln /T/								X
			9 mln /T/								X
			12 mln /T/							X	X
Jo-Bolt®	HJE1	7-10	0 /T/					X			
			3 mln /T/								X
			6 mln /T/								X
			9 mln /T/								X
			12 mln /T/							X	X

* Stan próbki obserwowany podczas badań

5.1.3 Badania zmęczeniowe połączeń mechanicznych i hybrydowych – analiza tomogramów

Tomogramy połączeń poddanych badaniom zmęczeniowym rozpatrywano w obszarze otworów montażowych połączeń zgodnie ze schematem zaprezentowanym

w tab. 5.3. i 5.5. Już wstępna analiza tomogramów wskazywała, że w połączeniach mechanicznych występuje problem niszczenia połączenia w miejscach montażu łączników mechanicznych typu Hi-Lok® lub Jo-Bolt®. Nie jest to widoczne w połączeniach, w których wykorzystywano nity 3560A, ponieważ w badaniach zmęczeniowych tego rodzaju połączeń występowały znacznie niższe obciążenia niż w przypadku badania połączeń z łącznikami typu Hi-Lok® lub Jo-Bolt®. W połączeniach mechanicznych z łącznikami Hi-Lok® i Jo-Bolt® wyższe obciążenia skutkowały pojawieniem się problemu niszczenia materiału kompozytowego w wyniku działania nacisków powierzchniowych. Obserwowano m.in. owalizację otworów montażowych i przy okazji przemieszczenia kątowne samych łączników (ich rotację). W połączeniach hybrydowych problem rotacji łączników nie miał miejsca, występowały natomiast problemy z pęknięciami zmęczeniowymi spoiny klejowej. Przykładowe tomogramy połączeń mechanicznych i hybrydowych zaprezentowano na rys. 5.7.

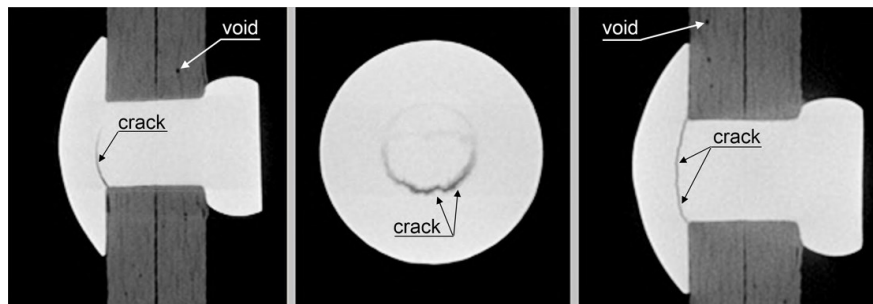


Rysunek 5.7. Tomogramy połączeń mechanicznych i hybrydowych:
a) z nitami, b) z łącznikami typu Hi-Lok®, c) z łącznikami Jo-Bolt® oraz połączeń hybrydowych:
d) z łącznikami typu Hi-Lok®, e) z łącznikami Jo-Bolt®

Połączenia mechaniczne – nity 3560A

Próbki połączeń mechanicznych z nitami uległy zniszczeniu w wyniku uszkodzeń zmęczeniowych łączników mechanicznych. Próbka oznaczona symbolem *MNI* została poddana badaniom tomograficznym po 1,5 mln cykli, jej tomogram zaprezentowano na rys. 5.8. W wyniku badania wykryto pęknięcia zmęczeniowe (crack) w łącznikach

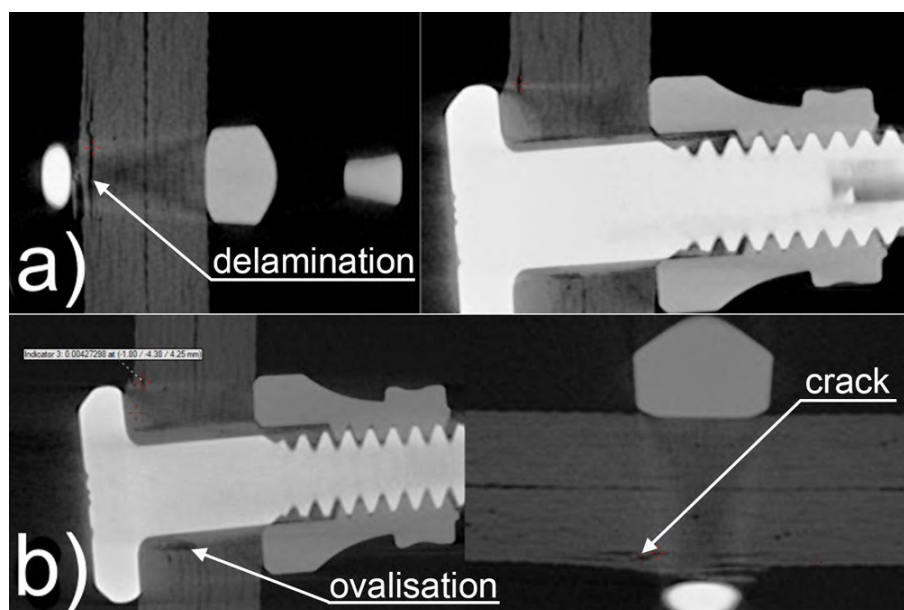
mechanicznych przy braku uszkodzeń materiału kompozytowego. Próbkę oznaczoną symbolem MN2 uległa zniszczeniu po 1 831 415 cyklach.



Rysunek 5.8. Tomogramy połączenia mechanicznego MN1 po badaniach zmęczeniowych (1,5 mln cykli)

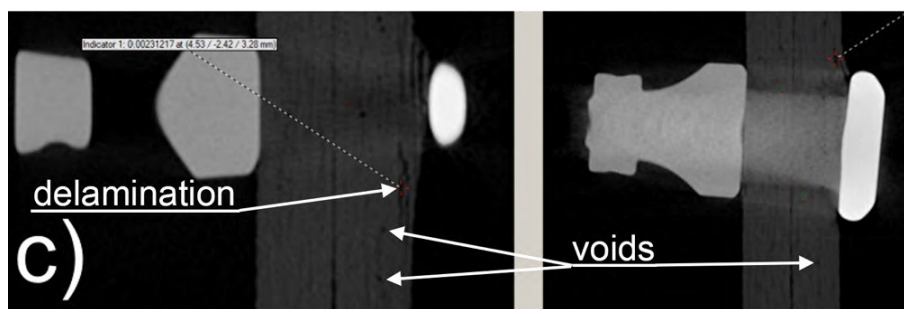
Połączenia mechaniczne – łączniki Hi-Lok®

W przeciwieństwie do połączeń mechanicznych z nitami, w połączeniach, gdzie wykorzystywano łączniki typu Hi-Lok® nie obserwowano uszkodzeń w samych łącznikach. Uszkodzeniom natomiast ulegały łączone elementy w okolicach otworów montażowych. Uszkodzenia miały postać przede wszystkim owalizacji otworów oraz dodatkowo pęknięć i lokalnej delaminacji. Część uszkodzeń występowała bezpośrednio pod elementami łącznika i przy zewnętrznej, wizualnej ocenie połączenia były one niewidoczne. Przykładowe postacie uszkodzenia dla połączeń mechanicznych po testach zmęczeniowych (1,5 mln cykli) z łącznikami Hi-Lok® zaprezentowano na rys. 5.9.



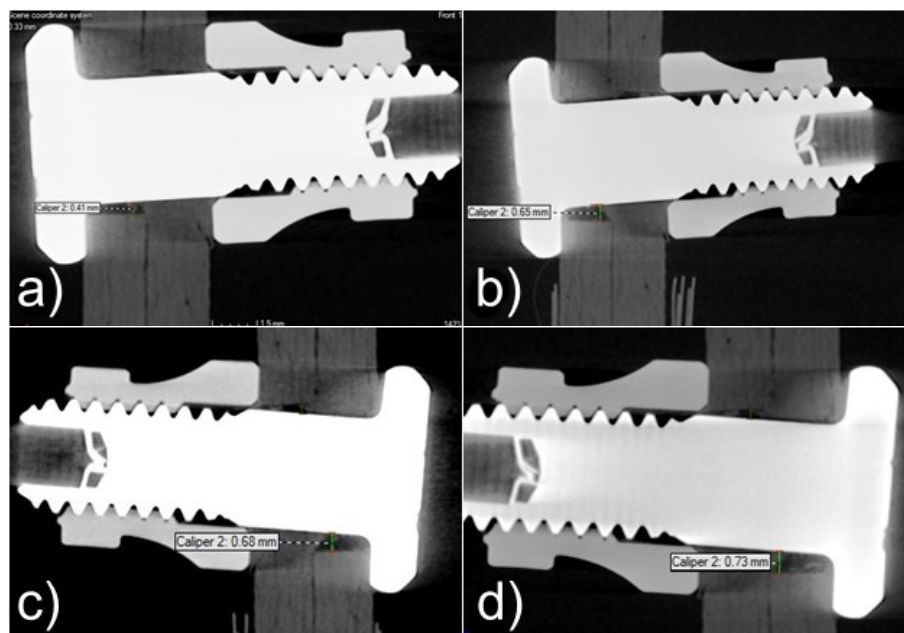
Rysunek 5.9. Przykłady uszkodzeń w połączeniach mechanicznych z łącznikami typu Hi-Lok® po badaniach zmęczeniowych (1,5 mln cykli) w postaci:

a) delaminacji (delamination), b) owalizacji (ovalisation) i pęknięć (crack)



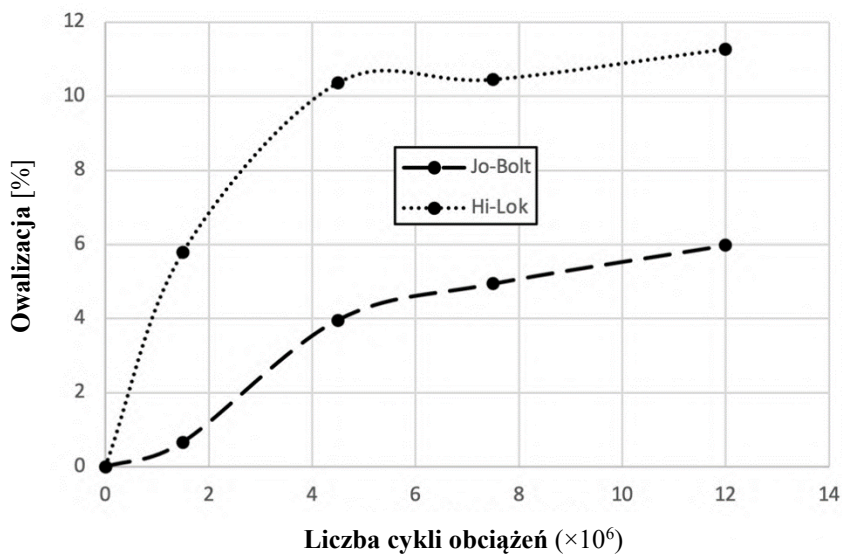
Rysunek 5.9. c.d Przykłady uszkodzeń w połączeniach mechanicznych z łącznikami typu Hi-Lok® po badaniach zmęczeniowych (1,5 mln cykli) w postaci: c) delaminacji (delamination) oraz tzw. pustek (voids)

Wykonując badania tomograficzne połączeń z łącznikami Hi-Lok® po 1,5 mln, 4,5 mln, 7,5 mln oraz 12 mln cykli obserwowano rosnącą, wraz z liczbą cykli owalizację otworów montażowych, co było konsekwencją m.in. nacisków powierzchniowych pojawiających się na granicy: powierzchnia boczna otworu – trzpień łącznika mechanicznego. Przyrost owalizacji otworu powodował również coraz większe odchylenie kątowe (rotację) łącznika mechanicznego w otworze montażowym. Obserwowane zmiany zaprezentowano na rys. 5.10., natomiast na rys. 5.11. przedstawiono średnie wartości zmiany owalizacji otworów dla połączeń mechanicznych z łącznikami Hi-Lok® oraz z łącznikami Jo-Bolt®.



Rysunek 5.10. Przykłady zmiany owalizacji otworów montażowych w połączeniach mechanicznych z łącznikami typu Hi-Lok® w badaniach zmęczeniowych:

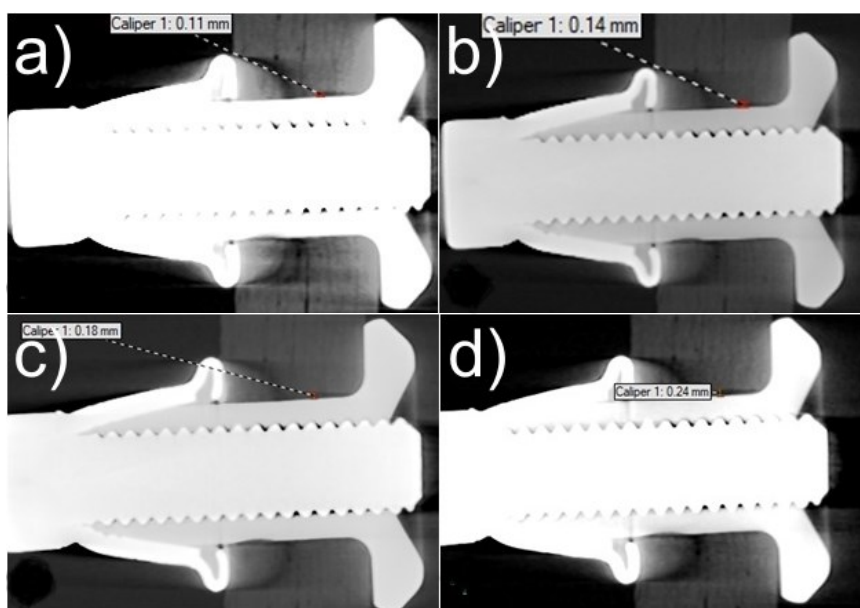
a) po 1,5 mln cykli, b) po 4,5 mln cykli, c) po 7,5 mln cykli, d) po 12 mln cykli



Rysunek 5.11. Przyrost owalizacji otworów montażowych w połączeniach mechanicznych z łącznikami typu Hi-Lok® oraz Jo-Bolt® wraz ze wzrostem liczby cykli zmęczeniowych

Połączenia mechaniczne – łączniki Jo-Bolt®

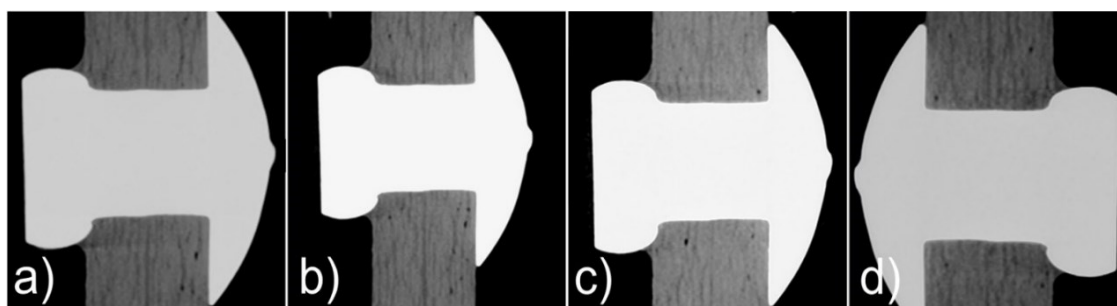
W przypadku połączeń mechanicznych z łącznikami typu Jo-Bolt®, owalizacja otworów była około 2-krotnie mniejsza i dodatkowo w okolicach otworów montażowych, nie obserwowano uszkodzeń w materiale CFRP w postaci delaminacji czy pęknięć (rys. 5.12.).



Rysunek 5.12. Przykładowe tomogramy okolic otworów montażowych połączeń mechanicznych z łącznikami typu Jo-Bolt® w badaniach zmęczeniowych:
a) po 1.5 mln cykli, b) po 4.5 mln cykli, c) po 7.5 mln cykli, d) po 12 mln cykli

Połączenia hybrydowe – łączniki nity 3560A

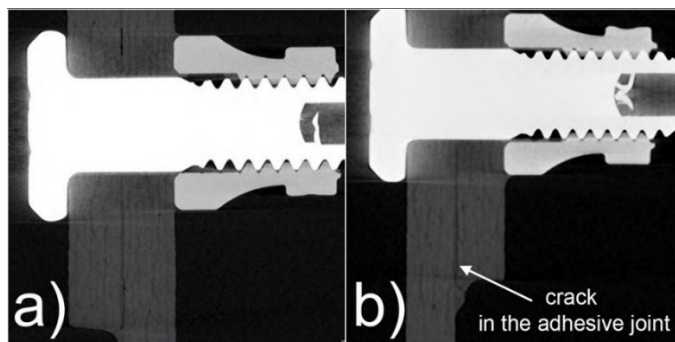
W połączeniach hybrydowych przygotowanych z wykorzystaniem nitów 3560A oraz kleju Epidian 57/Z1 nie obserwowano żadnych uszkodzeń, które występowały w połączeniach mechanicznych. Należy jednak pamiętać, że maksymalne obciążenie w cyklu było w tym badaniu równe ok. 38% nośności połączenia hybrydowego. Na rys. 5.13. zaprezentowano przykładowe tomogramy połączeń hybrydowych w obszarze otworów montażowych po przeprowadzeniu badań zmęczeniowych w zakresie od 1,5 mln do 12 mln cykli.



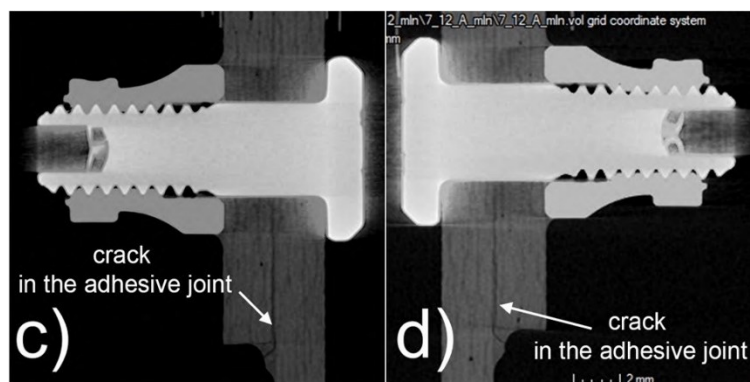
Rysunek 5.13. Przykładowe tomogramy okolic otworów montażowych połączeń hybrydowych z nitami 3560A w badaniach zmęczeniowych: a) po 1.5 mln cykli, b) po 4.5 mln cykli, c) po 7.5 mln cykli, d) po 12 mln cykli

Połączenia hybrydowe – łączniki Hi-Lok® oraz Jo-Bolt®

Próbki, w których zastosowano połączenie hybrydowe wykorzystując łączniki Hi-Lok® lub Jo-Bolt® oraz klej Epidian 57/Z1 po obciążeniu 12 mln. cykli zmęczeniowych nie wykazały powstania owalizacji, ani odchylenia łącznika. Struktura łączników również nie została naruszona. Jedynym defektem widocznym w próbkach było pękanie spoiny kleju w okolicach końca zakładki połączenia. Tomogramy wykonane po kolejnych cyklach zmęczeniowych połączenia hybrydowego Hi-Lok®/Epidian 57/Z1 są widoczne na rys. 5.14.



Rysunek 5.14. Tomogramy okolic otworów montażowych połączeń hybrydowych Hi-Lok®/Epidian 57/Z1 w badaniach zmęczeniowych: a) po 1.5 mln cykli, b) po 4.5 mln cykli z widocznymi uszkodzeniami warstwy adhezyjnej (crack in the adhesive joint)



Rysunek 5.14. c.d. Tomogramy okolic otworów montażowych połączeń hybrydowych Hi-Lok®/Epidain 57/Z1 w badaniach zmęczeniowych: c) po 7.5 mln cykli, d) po 12 mln cykli z widocznymi uszkodzeniami warstwy adhezyjnej (crack in the adhesive joint)

5.2 Podsumowanie

Na podstawie wykonanych badań stwierdzono, że wstępujące w ich trakcie uszkodzenia materiału kompozytowego w okolicach otworów montażowych są charakterystyczne dla obciążeń wywołanych naciskami powierzchniowymi trzpienia łącznika mechanicznego na materiał kompozytowy w płaszczyźnie układania warstw. Problem uszkodzeń materiału kompozytowego wywołany łącznikami mechanicznymi (w wyniku działania nacisków powierzchniowych trzpienia łącznika na powierzchnię otworu montażowego) można częściowo rozwiązać stosując jednocześnie z łącznikami mechanicznymi połączenia klejowe. Powstające w ten sposób połączenia hybrydowe mają nie tylko wyższą nośność i dwustopniowy charakter niszczenia połączenia, ale również są bardziej odporne na skutki występowania zjawiska nacisków powierzchniowych, m.in. nie występuje w nich owalizacja otworów montażowych ani tzw. rotacja łączników mechanicznych. Nawet pomimo pęknięcia spoiny klejowej przy krawędziach połączenia hybrydowego – na odcinku krawędź połączenia-łącznik mechaniczny, pozostała jej część, pomiędzy łącznikami, nie uległa uszkodzeniom zmęczeniowym, co pozytywnie wpływało na trwałość połączenia uniemożliwiając m.in. owalizację otworów i rotację łączników mechanicznych.

Badania potwierdziły również, że siły tarcia występujące w obszarze łączników mechanicznych pozytywnie wpływają na trwałość zmęczeniową, ograniczając procesy niszczenia materiału kompozytowego. Łączniki mechaniczne, za pomocą których w obszarze otworów montażowych wytwarzano wyższe wartości obciążeń montażowych (większe siły tarcia), nie wywoływały w obciążonych węzłach montażowych aż tak

rozległych uszkodzeń charakterystycznych dla materiałów kompozytowych (w tym owalizacji otworów, delaminacji czy pęknięć). Najmniejsze uszkodzenia kompozytu występowały w połączeniach, w których wykorzystano łączniki typu Jo-Bolt® (np. owalizacja otworów była około 2,5-krotnie mniejsza niż w przypadku wykorzystania łączników Hi-Lok®).

Ponieważ materiały CFRP cechuje bardzo wysoka trwałość zmęczeniowa, do ich łączenia należy wykorzystywać łączniki mechaniczne wykonane z materiałów odpornych na długotrwałe, cykliczne obciążenia. Spośród badanych połączeń, najwyższą trwałością zmęczeniową charakteryzowały się łączniki typu Hi-Lok® oraz Jo-Bolt®, wykonane na bazie stopu tytanu.

Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych połączeń materiałów kompozytowych mogą stanowić punkt wyjścia do dalszych rozważań naukowych w przedmiocie połączeń hybrydowych. Interesującym zagadnieniem badawczym wydaje się być analiza propagacji pęknięć w warstwie adhezyjnej połączeń hybrydowych oraz rola łączników mechanicznych w ograniczeniu procesu uszkodzeń zmęczeniowych spoiny klejowej.

VI PODSUMOWANIE

Na podstawie rezultatów badań eksperymentalnych oraz wyników obliczeń MES można stwierdzić, że postawiona hipoteza pracy została zweryfikowana pozytywnie.

Istnieją konstrukcyjne i technologiczne możliwości poprawy właściwości połączeń hybrydowych (klejowo-mechanicznych). W pracy zaproponowano m.in. modyfikację położenia łączników mechanicznych w połączeniu hybrydowym, odchodząc od rekomendacji ich montażu definiowanych dla połączeń mechanicznych oraz wykorzystanie tworzywa adhezyjnego podatnego na odkształcenia. Wykonane badania potwierdziły przydatność proponowanych rozwiązań zarówno w zakresie nośności połączeń hybrydowych jak i w zakresie ich trwałości zmęczeniowej.

Realizacja procesu badawczego umożliwiła sformułowanie wykazanych poniżej wniosków końcowych.

Zakres konstrukcyjny i technologiczny

1. Przemieszczenie łączników bliżej krawędzi zakładki połączenia wprowadza pozytywne zmiany niwelujące koncentrację naprężeń w spoinie połączenia klejowego w okolicach środkowej części krawędzi zakładki oraz skutkuje obniżeniem maksymalnych wartości naprężeń normalnych prostopadłych do powierzchni kleju o ponad 20%. Dodatkowo przemieszczenie łączników bliżej krawędzi zakładki powoduje rozdzielenie strefy spiętrzenia naprężeń w spoinie na dwie części i powstanie w okolicach otworów obszaru o znacznie mniejszych naprężeniach. Biorąc pod uwagę negatywny wpływ naprężeń normalnych powodujących tzw. oddzieranie na nośność i trwałość połączenia, których to koncentracja występuje na końcach zakładki, montaż łączników bliżej krawędzi zakładki i redukcja tego typu naprężeń pozytywnie wpływa na parametry wytrzymałościowe i użytkowe połączeń hybrydowych, co zostało potwierdzone eksperymentalnie.
2. Efektywne wykorzystanie właściwości wytrzymałościowych połączenia hybrydowego polega przede wszystkim na właściwym podziale obciążenia pomiędzy połączenie klejowe i połączenie mechaniczne. W połączeniach hybrydowych bardzo często ten podział obciążenia nie jest wystarczająco korzystny i odbiega od pożądanego m.in. ze względu na właściwości wytrzymałościowe spoiny klejowej, w tym jej podatność na odkształcenia.

Odpowiednio podatna na odkształcenia warstwa adhezyjna umożliwia większe wyłączenie łączników mechanicznych (odciążając tym samym spoinę klejową) oraz redukuje poziom koncentracji występujących naprężeń, co może skutkować wzrostem parametrów wytrzymałościowych i użytkowych połączeń hybrydowych.

3. Podczas badań eksperymentalnych zaobserwowano istotny wpływ sposobu przygotowania klejonych powierzchni na nośność połączeń. Połączenia hybrydowe (długość zakładki 50 mm) z elementami, które poddano piaskowaniu cechował wzrost nośności o ponad 80% w porównaniu do połączeń mechanicznych i o około 60% w odniesieniu do połączeń hybrydowych, których elementy szorstkowano. W zakresie trwałości zmęczeniowej połączenia hybrydowe cechowała zupełnie odmienna prawidłowość. Dla połączeń hybrydowych z elementami szorstkowanymi wystąpił aż 7,5-krotny wzrost trwałości zmęczeniowej w odniesieniu do połączeń hybrydowych z elementami piaskowanymi. Wykazano pozytywny wpływ piaskowania, jako metody przygotowania elementów do klejenia, na nośność połączeń hybrydowych przy jednoczesnym negatywnym wpływie tego rodzaju procesu na ich trwałość zmęczeniową.
4. Jednoczesne wykorzystanie w łączonych materiałach łączników mechanicznych i połączenia adhezyjnego jest rozwiązaniem korzystnym, ale jak wskazują przeprowadzone badania i obliczenia, przy zachowaniu właściwego stosunku liczby łączników do pola powierzchni spoiny adhezyjnej. W badaniach własnych zwiększano powierzchnię spoiny klejowej (wzrost długości zakładki), co wpłynęło pozytywnie zarówno na nośność jak i na trwałość zmęczeniową połączeń hybrydowych. Definiowanie precyzyjnych rekomendacji wymagałoby przeprowadzenia dodatkowych badań.
5. Korzystnym rozwiązaniem przy wykonywaniu połączeń hybrydowych, szczególnie w konstrukcjach lotniczych jest wykorzystanie nowoczesnych łączników jednostronnych charakteryzujących się wysokimi, powtarzalnymi naciskami montażowymi. Ich montaż w konstrukcjach lotniczych np. półskorupowych, szczególnie w miejscach trudnodostępnych jest znacznie łatwiejszy niż stosowanie śrub czy nitów spęczanych. Pewnym ograniczeniem wykorzystania łączników jednostronnych jest zmniejszanie

efektywnej powierzchni klejowej (w sąsiedztwie otworów montażowych) poprzez występowanie zjawiska „wyciskania” kleju w czasie ich montażu. W badaniach własnych, chcąc przeciwdziałać temu zjawisku do spoiny adhezyjnej wprowadzano wypełniacz w postaci warstwy tkaniny szklanej, co jak potwierdziły rezultaty eksperymentów, okazało się bardzo skutecznym rozwiązaniem.

Zakres wykonywanych obliczeń

1. Wykorzystując narzędzie obliczeniowe Ansys Workbench oparte na metodzie elementów skończonych korzystniej jest stosować w projektowanym modelu połączenia siatkę regularną (heksagonalną) niż domyślną generowaną automatycznie przez program tetragonalną. Przyjęcie takiego rozwiązania jest bardziej pracochłonne i powoduje rozbudowanie zadania obliczeniowego oraz wydłużenie czasu jego rozwiązania, jednak otrzymywane wyniki są zbliżone do wartości otrzymywanych w testach eksperymentalnych.
2. W zadaniu obliczeniowym dotyczącym połączeń hybrydowych należy uwzględniać naciski montażowe łączników mechanicznych. Przeprowadzona analiza obliczeń wskazuje na istotny wpływ nacisków montażowych na zmiany naprężeń normalnych prostopadłych do spoiny w okolicach otworów pod łączniki – ich wzrost – oraz na podwyższenie wartości naprężeń normalnych na końcach zakładki, gdzie rozpoczyna się proces niszczenia połączenia adhezyjnego. Zmianie podlega również rozkład maksymalnych naprężeń głównych, będących miarą kohezji spoiny klejowej. Strefa ich spiętrzenia na końcach zakładki jest węższa, a w części środkowej krawędzi zakładki dodatkowo zawężona. Uwzględnienie nacisków montażowych podczas modelowania połączeń z pewnością zwiększa wiarygodność i jakość otrzymywanych wyników.

Zakres użyteczny

1. Przeprowadzone badania na belce ogonowej śmigłowca Mi-8 potwierdziły przydatność proponowanych w pracy rozwiązań dotyczących wykorzystania połączeń hybrydowych w naprawach lotniczych konstrukcji półskorupowych. Poprzez wykonanie nakładkowego połączenia hybrydowego naprawianą konstrukcję przywrócono do stanu pierwotnego.

Zakres kontynuacji badań z wykorzystaniem połączeń hybrydowych

1. Połączenia hybrydowe wykazują duży potencjał aplikacyjny, szczególnie w nowoczesnych konstrukcjach lotniczych i motoryzacyjnych budowanych z najnowszych materiałów kompozytowych. Na podstawie badań własnych udowodniono, że połączenia hybrydowe znacznie ograniczają proces niszczenia materiału kompozytowego w sąsiedztwie otworów montażowych, wywołany naciskami powierzchniowymi. Dodatkowo dwustopniowy charakter niszczenia połączenia hybrydowego zwiększa jego niezawodność umożliwiając wykrycie początku procesu niszczenia w trakcie diagnostyki, co ma szczególne znaczenie w eksploatacji konstrukcji lotniczych.

LITERATURA

- [1] Adams R. D., Mallick V., *A method for the stress analysis of lap joints*, The Journal of Adhesion 38 (3-4), 1992, 199-217.
- [2] Adams R. D., Peppiatt N. A., *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*, The Journal of Strain Analysis for Engineering Design 9, 1974, 185-196.
- [3] Adams R. D., Wake W. C. *Structural Adhesive Joints in Engineering*. Elsevier, 1984.
- [4] Ahn, J., Duffala N., *Metal-to-Metal and Metal-to-Composite Bonded and Bolted Structural Joints*. Encyclopedia of Aerospace Engineering, 2010.
- [5] Alderliesten R. C., *Introduction to aerospace structure and materials*, Delft University of Technology, 2018.
- [6] Allman D. J., *A theory for elastic stresses in adhesive bonded lap joints*, Mechanics and Applied Mathematics 30, 1977, 415–436.
- [7] Balawender T., Sadowski T., Golewski P., *Experimental and numerical analysis of hybrid clinched-adhesive joint*, Journal of Adhesion Science and Technology, 2011.
- [8] Balawender T., Sadowski T., Knieć M., *Technological problems and experimental investigation of hybrid: clinched – adhesively bonded joint*, Archives of Metallurgy and Materials 56, 2013, 439-446.
- [9] Baldan, A. *Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: Adhesives, adhesion theories and surface pretreatment*, Journal of Materials Science 39(1), 2004.
- [10] Barut A., Madenci E., *Analysis of bolted-bonded composite single-lap joints under combined in-plane and transverse loading*, Composite Structures 88, 2009, 579-594.
- [11] Bathias C., *An engineering point of view about fatigue of polymer matrix composite materials*, International Journal of Fatigue, 28(10), 2006, 1094-1099.p
- [12] Bebera V. C., Schneidera B., Brede M., *Experimental investigation and numerical prediction of static strength and fracture behaviour of notched epoxy-based structural adhesives*, International Journal of Adhesion & Adhesives 93, 2019, 32-39.
- [13] Benson N. K. *Influence of stress distribution on the strength of bonded joints*. Adhesion. Fundamentals and Practice, Elsevier, 1970.
- [14] Bickford J. H. *Introduction to the design and behaviour of bolted joints – fourth edition*, CRC Press, 2008.
- [15] Bickford J. H. *That initial preload – What happens to it? Mechanical Engineering*, 1985.
- [16] Biegus A., *Połączenia śrubowe*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1997.
- [17] Bielawski R., *Rozprawa doktorska Badanie i modelowanie połączeń nitowych w lotniczych strukturach kompozytowych*, Politechnika Warszawska, 2016.

-
- [18] Bodjona K., Lessard L., *Load sharing in single-lap bonded/bolted composite joints. Part II: Global sensitivity analysis*, Composite Structures 129, 2015, 276-283.
- [19] Bodjona K., Raju K., Lim G. H., Lessard L., *Load sharing in single-lap bonded/bolted composite joints. Part I- Model development and validation*, Composite Structures 129, 2015, 268-275.
- [20] Bois Ch., Wagnier H., Wahl J., Le Goff E. *An analytical model for the strength prediction of hybrid (bolted/bonded) composite joints*, Composite Structures 97, 2013, 252-260.
- [21] Brotherhood C. J., Drinkwater B. W., Dixon S., *The detectability of kissing bonds in adhesive joints using ultrasonic techniques*, Ultrasonics 41, 2003, 521-529.
- [22] Budhe S., Banea M.D., de Barros S., da Silva L., *An updated review of adhesively bonded joints in composite materials*, International Journal of Adhesion & Adhesives 72, 2017, 30-42.
- [23] Budiansky B., Fleck N.A., *Compressive failure of fiber composites*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 41(1), 1993, 183-211.
- [24] Budiansky B., Fleck N.A., *Compressive kinking of fiber composites: A topical review*, Applied Mechanics Reviews 47 (6), 1994, 246-270.
- [25] Bystrov V. M., Dekret V. A., Zelenskii V. S., *Loss of stability in a composite laminate compressed by a surface load*, International Applied Mechanics, 53(2), 2017, 156-163.
- [26] Cagle Ch. V., *Kleje i klejenie. Poradnik inżyniera i technika*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1977.
- [27] Camanho, P. P., Tavares, C. M. L., de Oliveira, R., Marques, A. T., Ferreira, A.J.M., *Increasing the efficiency of composites single – shear lap joint using bonded inserts*, Composites: Part B 36, 2005.
- [28] Campilho R., *Strength prediction of adhesively-bonded joints*, A Science Publisher Book, CRC Press, 2017.
- [29] Campilho R., Banea M. D., Da Silva L. F. M. *Comparative evaluation of bonded, welded and weld-bonded structural joints*, Galati University Press 22, 2011.
- [30] *Certyfikacja i Bieżący Nadzór Organizacji Part-147 – Podręcznik*, Urząd Lotnictwa Cywilnego, wydanie I, dokument nr: PP.LPL3.01, 2013.
- [31] Chang B. H., Shi Y. W., Dong S. J., *A study on the role of adhesives in weld-bonded joints*, Welding research supplement, August 1999, 275-279.
- [32] Chang P., Wang J., Wing Kong Chiu, Nabil M. Chowdhury, *Experimental and finite elements studies of bolted, bonded and hybrid step lap joints of thick carbon fibre/epoxy panels used in aircraft structures*, Composites Part B 100, 2016, 68-77.
- [33] Chen D., Cheng S., *An analysis of adhesive-bonded single-lap joints*, Journal of Applied Mechanics 50(1), 1983, 109-115.
- [34] Chen Z., Adams R. D., Da Silva L. F. M., *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joint using an energy failure criterion*, Engineering Fracture Mechanics 78 (6), 2011, 990-1007.

- [35] Chowdhury N., Chiu W. K., Chang P., *Static and fatigue testing thin riveted, bonded and hybrid carbon fiber double lap joints used in aircraft structures*, Composite Structures 121, 2015, 315-323.
- [36] Chowdhury N. M., Chiu W. K., Wang J., Chang P., *Experimental and finite element studies of bolted, bonded and hybrid step lap joints of thick carbon fibre/epoxy panels used in aircraft structures*, Composite Structures Part B 100, 2016, 68-77.
- [37] Chowdhury N. M., Chiu W. K., Wang J., Chang P., *Experimental and finite element studies of thin bonded and hybrid carbon fibre double lap joints used in aircraft structures*, Composite Structures Part B 85, 2016, 233-242.
- [38] Cichowicz R., *Przydatność metod określania nośności granicznej metalowych połączeń klejonych w świetle badań laboratoryjnych*. Biuletyn WAT vol. 16, nr 6 (178), 1967, 87-97.
- [39] Crocombe A. D., Ashcroft I. A., *Simple Lap Joint Geometry*, Modeling of Adhesively Bonded Joints, Springer, 2008.
- [40] Da Silva L. F. M., Adams R. D., *Techniques to reduce peel stresses in adhesive joints with composites*, Internal Journal of Adhesion & Adhesives 27(3), 2007, 227-235.
- [41] Da Silva L. F. M., Das Neves P. J. C., Adams R. D. and Spelt J. K., *Analytical models of adhesively bonded joints – Part I: Literature survey*. International Journal of Adhesion & Adhesives 29(3), 2009, 319-330.
- [42] Da Silva L. F. M., Das Neves P. J. C., Adams R. D. and Spelt J. K., *Analytical models of adhesively bonded joints – Part II: Comparative study*. International Journal of Adhesion & Adhesives 29(3), 2009 331-341.
- [43] Da Silva L., F., M., Lima R., F., T., Teixeira R., M., S., Puga A., *Closed-form solutions for the adhesively bonded joints*, Universidade do Porto.
- [44] Da Silva L. F. M., Pirondi A., Ochsner A., *Hybrid Adhesive Joints*, Springer, 2011.
- [45] Da Silva L. F. M., Rodrigues T. N. S. S., Figueiredo M. A. V., De Moura M. F. S. F., Chousal J. A. G., *Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength*, The Journal of Adhesion, vol. 82, 2006, 1091–1115.
- [46] DeFu L., YongJun T., Cong W. L., *A review of mechanical drilling for composite laminates*, Composite Structures 94(4), 2012, 1265-1279.
- [47] Di Franco G., Zuccarello B., *Analysis and optimization of hybrid double lap aluminum-GFRP joints*, Composite Structures 116, 2014, 682-693.
- [48] Duchene, P., Chaki, S., Ayadi, A., Krawczak P., *A review of non-destructive techniques used for mechanical damage assessment in polymer composites*, Journal of Materials Science 53, 2018, 7915–7938.
- [49] Esmaili F., Chakherlou T. N., Zehsaz M., *Investigation of bolt clamping force on the fatigue life of double lap simple bolted and hybrid (bolted/bonded) joints via experimental and numerical analysis*, Engineering Failure Analysis 45, 2014, 406-420.
- [50] Esmaili F., Zehsaz M., Chakherlou T. N., *Investigation the effect of tightening torque on the fatigue strength of double lap simple bolted and hybrid (bolted-bonded) joints using volumetric method*, Materials and Design 63, 2014, 349-359.

-
- [51] Franco G. Di., Fratini L., Pasta A., *Analysis of the mechanical performance of hybrid (SPR/bonded) single-lap joints between CFRP panels and aluminum blanks*, International Journal of Adhesion & Adhesives 41, 2013, 24-32.
- [52] Friedrich C., Hubbertz H., *Friction behavior and preload relaxation of fastening systems with composite structures*, Composite Structures 110, 2014, 335-341.
- [53] Fu M., Mallic P., *Fatigue of hybrid (adhesive/bolted) joints in SRIM composites*, International Journal of Adhesion & Adhesives 21(2), 2001, 145-159.
- [54] Garcea S. C., Wang Y., Withers P. J., *X-ray computed tomography of polymer composites*, Composites Science and Technology 156, 2018, 305-319.
- [55] Gaul L., Nitsche R., *The role of friction in mechanical joints*, Applied Mechanics Review 54(2), 2001.
- [56] Gąsior J., Komorek A., Rośkowicz M., Tkaczuk S., *Ocena możliwości zastąpienia nitów typu solid w połączeniach konstrukcji lotniczych*, Technologia i Automatyzacja Montażu 2/2018, 53-56.
- [57] George M., *Aerospace Fasteners: Use in Structural Applications*, Encyclopedia of Aluminum and Its Alloys, 2019, 30-45.
- [58] Giannopoulos I. K., Doroni-Dawes D., Kourousis K. I., Yasaei M., *Effects of bolt torque tightening on the strength and fatigue life of airframe FRP laminate bolted joints*, Composites Part B: Engineering 125, 2017, 19-26.
- [59] Godzimirski J., *Analiza wpływu grubości skleiny na wartość naprężeń dopuszczalnych kleju*, Biuletyn WAT 354, 1982, 101-108.
- [60] Godzimirski J., Komorek A., Rośkowicz M., *Trwałość zmęczeniowa tworzywa „Epidian 57”*, Polimery, 2008, 53, 737-742.
- [61] Godzimirski J., Kotlarz W., *Badanie wpływu podwyższonej temperatury na wytrzymałość Epidianu 57*, Biuletyn WAT 522, 1996, 107-116.
- [62] Godzimirski J., Rośkowicz M., Tkaczuk S., *Wytrzymałość połączeń klejowych*. Monografia po redakcją naukową prof. dr. hab. inż. J. Godzimirskiego. Wojskowa Akademia Techniczna, 2009.
- [63] Godzimirski J., *Technologia produkcji płatowców*, Wojskowa Akademia Techniczna, 2000.
- [64] Godzimirski J., *Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2002.
- [65] Goland M., Reissner E., *The stresses in cemented joints*, Journal of Applied Mechanics 66, 1944, A17-A27.
- [66] Gómez S., Onoro J., Pecharroman J., *A simple mechanical model of a structural hybrid adhesive/riveted single lap joint*, Internal Journal of Adhesion & Adhesives 27(4), 2006, 263-267.
- [67] Griogoriev W., Gołdowski P., *Nitowanie konstrukcji ze stopów lekkich*, Wydawnictwo MON, 1957.
- [68] Haraga K., Taguchi K., Yoda K., Nakashima Y., *Assembly technique for control panel enclosures with the combined use of adhesive and rivets and the reduction of*

- Energy consumption*, International Journal of Adhesion & Adhesives 23, 2003, 371-376.
- [69] Harish G., Farris T.N., Wang H.L., Grandt A.F., *Nucleation and growth of cracks in lap joints*. USAF Aircraft Structural Integrity Program Conference, 30 Nov-2 Dec 1999, 1-14.
- [70] Hartman A., *Fatigue tests on single lap joints in clad 2024-T3 aluminum alloy manufactured by a combination of riveting and adhesive bonding*. Report NLR M.2170. NLR, 1966.
- [71] Hart-Smith J., *Bolted and bonded joints*, ASM handbook, vol. 21, 2001, 271-289.
- [72] Hashin, Z., *Theory of fiber reinforced materials*, NASA-CR-1974, Structural Mechanics, 1972.
- [73] Hermsdorf F. Rapp H. *Load transfer by friction in bolted composite joints under cyclic loading Institute of Lightweight Structures*, Department of Aerospace Engineering, Bundeswehr University ECCM18 – 18th European Conference on Composite Athens, Greece, 24-28th June 2018.
- [74] Herrington, P., Douglas, *Fatigue failure of composite bolted joints*, Journal of Composite Materials 27(5), 1993, 491-512.
- [75] Jinyang X., Chao L., Sipei M., Qinglong A., *Study of drilling-induced defects for CFRP composites using new criteria*, Composite Structures 20(1), 2018. 1076-1087.
- [76] Josephs H., Huston R. L., *Blake's design of mechanical joints – second edition*, CRC Press, 2019.
- [77] Katsumata T., Mizutani Y., Todoroki A., Matsuzaki R., *A fundamental study on static strength improvement of CFRP bolted joints by increasing friction force*, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering 4(6), 2010, 711-719.
- [78] Kelly G., *Load transfer in hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints*, Composite Structures 69, 2005, 35-43.
- [79] Kelly G., *Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints*. Composite Structures 72, 2006, 119-129.
- [80] Kohnke P., *Ansys Theory Reference ed. 11*, Ansys, Inc, Southpointe, 1999.
- [81] Komorek A., Godzimirski J., Rośkowicz M., Gąsior J., *Wpływ wartości współczynnika sprężystości wzdłużnej kleju na udarność połączeń klejowych blokowych*. Technologia i Automatyzacja Montażu 3/2018, 53-58.
- [82] Korbel A., Szymczyk E., Skorupa A., *Eksperymentalna i numeryczna analiza procesu instalacji nitu*, Biuletyn WAT, vol. LXII, nr 2, 2013.
- [83] Kyriakides S., Arseculeratne R., Perry E. J., Liechti K. M., *On the compressive failure of fiber reinforced composites*, International Journal of Solids and Structures, 32(6-7), 1995, 689-738.
- [84] Lo, J., *The next generation HI-LOK and HI-LITE system*, SAE Technical Paper 2017-01-2086, 2017.
- [85] Mao H., Mahadevan S., *Fatigue damage modelling of composite materials*, Vanderbilt University, 2002.

-
- [86] Mariam, M., Afendi M., Lieh, W. W., Hafizan K., *ARN Strength of composites hybrid joint*, Journal of Engineering and Applied Sciences 11(1), 2016, 216-221.
- [87] Matwijkenko W. A., *Wpływ czynników konstrukcyjno-technologicznych na wytrzymałość zmęczeniową połączeń klejowo-nitowych*. Technologia i Automatyzacja Montażu 2/1994, str. 33-35.
- [88] Messler R. W. Jr., *Joining of materials and structures – from pragmatic process to enabling technology*, Elsevier, 2004.
- [89] Michel S. A., Kieselbach R., Martens H. J., *Fatigue strength of carbon fibre composites up to the gigacycle regime (gigacycle-composites)*, International Journal of Fatigue, 28(3), 2006, 261-270.
- [90] Miller J., *Machining and Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Composites*, Boeing Company, Seattle, University of Washington, 2013.
- [91] Mohamed Bak K., Prasanna Venkatesn K., Kalai Chelvan K., *Parametric study of bonded, riveted and hybrid composite joints using FEA*. Journal of Applied Sciences 12 (10), 2012, 1058-1062.
- [92] Müller R.P.G., *An experimental and analytical investigation on the fatigue behavior of fuselage riveted lap joints. The significance of the rivet squeeze force, and a comparison of 2024-T3 and Glare 3*. Ph.D. thesis, TU Delft, 1995.
- [93] Norma ASTM D903-98 (reapproved 2004): *Standard Test Method for Peel or Stripping Strength of adhesive Bonds*. American Society for Testing Materials, 2004.
- [94] Ochsner A., Da Silva L. F. M., Adams R., *Complex joint geometry*, Modelling of Adhesively Bonded Joints, Springer, 2008, 131-154.
- [95] Ojalvo I. U., Eidinoff H. L., *Bond thickness effects upon stresses in single-lap adhesive joints*, Aeronautics and Astronautics 16(3), 1978.
- [96] Olmedo A., Santiuste C., Barbero E., *An analytical model for the secondary bending prediction in single-lap composite bolted-joints*, Composite Structures 111, 2014, 354-361.
- [97] Park Ch. Y., Grandt A. F., *A proposed fatigue test protocol for generic mechanical joints*, Engineering Failure Analysis 13, 2006, 136-154.
- [98] Paroissien E., Sartor M., Huet J., *Hybrid (bolted/bonded) joints applied to aeronautic parts: analytical one-dimensional models of a single lap joint*. PhD thesis.
- [99] Petrie E. M., *Handbook of adhesives and sealants*, McGraw-Hill Education, second edition, 2007.
- [100] Pirondi A., Moroni F., *Science of clinch-adhesive joints*, Advanced Structured Materials, 2011, 16 vol. 6 109-147.
- [101] Pitta S., De la Mora Carles V., Roure F., Crespo D., Rojas J., *On the static strength of aluminium and carbon fibre aircraft lap joint*, Composite Structures 201, 2018, 276-290.
- [102] Pitta S., Roure F., Crespo D., Rojas J., *An experimental and numerical study of repairs on composite substrates with composite and aluminium doublers using*

- riveted, bonded and hybrid joints*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Materials 12(18), 2019.
- [103] Polska Norma PN-B-03200:1990 *Konstrukcje stalowe – Obliczenia statyczne i projektowanie*.
- [104] Polska Norma PN-B-03220:1964 *Konstrukcje aluminiowe – Obliczenia statyczne i projektowanie*.
- [105] Polska Norma PN-B-03200:1980 *Konstrukcje stalowe – Obliczenia statyczne i projektowanie*.
- [106] Polska Norma PN-C-89300 *Kleje do metali - Oznaczanie wytrzymałości na ścinanie*.
- [107] Polska Norma PN-C-89301 *Kleje do metali - Oznaczanie wytrzymałości na odrywanie*.
- [108] Polska Norma PN-C-89302 *Kleje do metali - Oznaczanie wytrzymałości na oddzieranie*.
- [109] Polska Norma PN-EN 13887 *Kleje do połączeń konstrukcyjnych – Wytyczne przygotowania powierzchni metali i tworzyw sztucznych przed klejeniem*.
- [110] Polska Norma PN-EN 1465:2009 *Kleje - Oznaczanie wytrzymałości na ścinanie przy rozciąganiu połączeń na zakładkę*.
- [111] Polska Norma PN-EN 1993-1-8 *Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-8 Projektowanie węzłów*.
- [112] Polska Norma PN-EN 1993-1-8:2006 *Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów*.
- [113] Polska Norma PN-ISO 5843-2:2001 *Lotnictwo i kosmonautyka – Wykaz terminów równoznacznych – Nity stosowane w lotnictwie i kosmonautyce*.
- [114] Polska Norma PN-EN ISO 9664 *Kleje – Metody badań właściwości zmęczeniowych klejów do połączeń konstrukcyjnych przy rozciąganiu ścinającym*.
- [115] Polska Norma PN-EN ISO 14588:2003 *Nity jednostronne – Terminy i definicje*.
- [116] Polska Norma PN-EN ISO 14589:2003 *Nity jednostronne – Badania mechaniczne*.
- [117] 119 Raju K. P., Bodjona K., Lim G. H., Lessard L., *Improving load sharing in hybrid bonded/bolted composite joints using an interference-fit bolt*, Composite Structures 149, 2016, 329-338.
- [118] 120 Rams B., Bugalski T., *The application of advanced surface preparation methods in the adhesive bonding process*, Biuletyn Instytutu spawalnictwa 5/2019.
- [119] 121 Rans C. D., *The role of rivet installation on the fatigue performance of riveted lap joints*, Carleton University, 2007.
- [120] Rośkowicz M., *Wpływ lekkosprężystości klejów konstrukcyjnych na wytrzymałość połączeń klejowych*, Wojskowa Akademia Techniczna, 2013.
- [121] Rośkowicz M., *Possibility of repair damaged riveted joint in the aircraft structures*. Biuletyn WAT, vol. LX, Nr 1, 2011.

-
- [122] Rośkowicz M., Chudowolska J., *Wpływ łączników mechanicznych na nośność połączeń hybrydowych*, Technologia i Automatyzacja Montażu 1/2018, 52-54.
- [123] Rośkowicz M., Gąsior J., *Load capacity and fatigue life of hybrid joints*, Technologia i Automatyzacja Montażu 2/2019, 30-33.
- [124] Rośkowicz M., Gąsior J., *Problematic aspects of numerical computation of the hybrid joints*, Technologia i Automatyzacja Montażu 3/2020, 5-14.
- [125] Rośkowicz M., Godzimirski J., Gąsior J., Jasztal M., *Improvement of fatigue life of riveted joints in helicopter airframes*, Eksploatacja i niezawodność – Maintenance and Reliability, 23(1), 2021.
- [126] Rośkowicz M., Godzimirski J., Komorek A., Gąsior J., Jasztal M., *Influence of the arrangement of mechanical fasteners on the static strength and fatigue life of hybrid joints*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Materials 13(23), 2020.
- [127] Rośkowicz M., Leszczyński P., Chudowolska J., *Analysis of load capacity of hybrid joints used in the construction on aircraft*. IV. Polish Conference *Połączenia montażowe – konstrukcje i technologia PM 2016*, Rzeszów – Polańczyk, June 7-10 2016.
- [128] Rośkowicz M., Rożek M., *Analiza trwałości zmęczeniowej połączeń mechanicznych i klejowo-mechanicznych*, Technologia i Automatyzacja Montażu 2/2013, 16-19.
- [129] Rudawska A., Semeniuk M., *Wpływ rodzaju żywicy epoksydowej i utwardzacza na wytrzymałość połączeń klejowych blach stalowych*, Technologia i Automatyzacja Montażu 4/2014, 65-68.
- [130] Rutkowski A., *Części maszyn*, wyd.6 WSiP, 2011
- [131] Sadowski T., Balawender T., Śliwa R., Golewski P., Kneć M., *Modern hybrid joints in aerospace: modelling and testing*, Archives of Metallurgy and Materials, 2013, 163-169.
- [132] Sadowski T., Golewski P., Zarzeka-Raczkowska E., *Damage and failure process of hybrid joints: Adhesive bonded aluminium plates reinforced by rivets*, Computational Materials Science 50, 2010, 1256-1262.
- [133] Sadowski T., Kneć M., Golewski P., *Experimental investigations and numerical modelling of steel adhesive joints reinforced by rivets*, International Journal of Adhesion & Adhesives 30, 2010, 338-346.
- [134] Sadowski T., Zarzeka-Raczkowska E., *Hybrid adhesive bonded and riveted joints – influence of rivet geometrical layout on strength of joints*, Archives of Metallurgy and Materials, 2012, 1127-1135.
- [135] Sajid Z., Karuppanan S., Shah S. Z. H., *Effect of washer size and tightening torque on bearing performance of basalt fiber composite bolted joints*, Journal of Natural Fibers, 2021.
- [136] Schijve J., *Fatigue of structures and materials*, Springer, 2009.
- [137] Schön J., *Coefficient of friction and wear of a carbon fiber epoxy matrix composite*, Wear 257(3-4), 2004, 395-407.

- [138] Schütz W., *Zeitfestigkeit einschnittiger Leichtmetall-Nietverbindungen*. Bericht Nr. F-47, Laboratorium für Betriebsfestigkeit, 1963.
- [139] Segerfröjd G., Wang G. S., Palmberg B. and Blom A. F., *Fatigue behavior of mechanical joints: critical experiments and statistical analyses*, " ICAF 97: Fatigue in New and Ageing Aircraft: Proceedings of the 19th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, Engineering Materials Advisory Services, 18-20 June 1997, 575-598.
- [140] Shabani P., Taheri-Behrooz F., Samareh-Mousavi S. S., Shokrieh M. M., *Very high cycle and gigacycle fatigue of fiber-reinforced composites: A review on experimental approaches and fatigue damage mechanisms*, Progress in Materials Science, 118, 2021.
- [141] Siegmund T., *Damage tolerance and durability of adhesively bonded composite structures*, The Joint Advanced Materials and Structures Center of Excellence, Purdue University.
- [142] Skoć A., Spałek J., *Podstawy Konstrukcji Maszyn t. 1*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
- [143] Skorupa A., Skorupa M., *Riveted lap joints in aircraft fuselage - design, analysis and properties*. Springer, 2012.
- [144] Skorupa M., Skorupa A., Machniewicz T., Korbel A., *An experimental investigation on the fatigue performance of riveted lap joint*. Proceedings of the 25th ICAF Symposium, Bridging the Gap between Theory and Practice, 27-29 May 2009, Springer, 2009, 449-473.
- [145] Sola C., Castanié B., Michel L., Lachaud F., Delabie A., Mermoz E., *On the role of kinking in the bearing failure of composite laminates*, Composite Structures 141, 2016, 184-193.
- [146] Stone M., *Key issues in application of composites to transport aircraft*. Douglas Aircraft Company.
- [147] Szymczyk E., *Numeryczna analiza zjawisk lokalnych w połączeniach nitowych konstrukcji lotniczych*, Wojskowa Akademia Techniczna, 2013.
- [148] Technical manual, Engineering manual series, *Aircraft and missile repair – Structural hardware (ATOS)*, published under authority of the Secretary of the Air Force, 2006.
- [149] Thomson D., Cui H., Erice B., Petrinic N., *A study on the longitudinal compression strength of fibre reinforced composites under uniaxial and off-axis loads using cross-ply laminate specimens*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 121, 2019, 213-222.
- [150] Tkaczuk S., *Rozprawa doktorska Prognozowanie wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych*, Wojskowa Akademia Techniczna, 2006.
- [151] Tsai M. Y., Oplinger D. W., Morton J., *Improved theoretical solutions for adhesive lap joints*, International Journal of Solids and Structures 35(12), 1998, 1163-1185.
- [152] Wang X., Ahn J., Kaboglu C., Yu L., Blackman B. R. K., *Characterisation of composite titanium alloy hybrid joints using digital image correlation*, Composite Structures 140 2016, 702-711.

-
- [153] Wong T. L., Wu S. M., Croy G. M., *An analysis of delamination in drilling composite materials*, 14th National SAMPE Technology Atlanta, 1982, 471.
- [154] Xiao Y., Ishikawa T., *Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints (part I: Experimental investigation)*, Composites Science and Technology 65(7–8), 2005, 1022-1031.
- [155] Xin L., Zhiyong T., Lechen W., Jian Z., Zhen X., Haibo L., *Experimental investigations of bolted, adhesively bonded and hybrid bolted/bonded single-lap joints in composite laminates*, Materials Today Communications, 24(3), 2020.
- [156] Zhang H., Li Ch., Xu M., Liu Z., Jia D., Zhang Y., *A novel method for damage analysis of CFRP single-lap bolted, bonded and hybrid joints under compression*, Composite Structures 251, 2020.
- [157] Zhang Y., Zhou Z., Tan Z., *Compression shear properties of bonded–bolted hybrid single-lap joints of c/c composites at high temperature*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Applied Sciences 10(3), 2020.
- [158] Zielecki W., Perłowski R., Hajduk P., *Porównanie nośności połączeń nitowych wykonanych różnymi metodami*, Technologia i Automatyzacja Montażu 1/2015.

SPIS RYSUNKÓW I TABEL

Rysunki

<i>Rysunek 1.1. Połączenia konstrukcyjne [142].....</i>	<i>17</i>
<i>Rysunek 1.2. Schemat typowych sposobów połączeń klejonych w konstrukcjach lotniczych: a) jednozakładkowe, b) dwuzakładkowe, c) dwunakładkowe, d) jednozakładkowe wpuszczane, e) dwunakładkowe wpuszczane, f) jednozakładkowe [62].....</i>	<i>19</i>
<i>Rysunek 1.3. Modele połączeń klejowych obciążonych na ścinanie: a) zakładkowe obciążone siłami, b) zakładkowe obciążone wydatkiem naprężeń stycznych, c) tulejowe obciążone momentem skręcającym, d) osiowosymetryczne, czołowe obciążone momentem skręcającym.....</i>	<i>21</i>
<i>Rysunek 1.4. Model uproszczony – deformacja połączenia klejowego złącza oraz rozkład naprężeń stycznych w spoinie: F – siła, l – długość zakładki, τ – naprężenia styczne warstwy klejowej [88].....</i>	<i>22</i>
<i>Rysunek 1.5. Model Volkersena – deformacja połączenia klejowego przy uwzględnieniu odkształcalności klejonych elementów [28].....</i>	<i>23</i>
<i>Rysunek 1.6. Połączenie zakładkowe analizowane przez Volkersena: a) geometria, b) diagram elementarny [28].....</i>	<i>24</i>
<i>Rysunek 1.7. Model Golanda i Reissnera – uwzględnienie wtórnych momentów gnących [28].....</i>	<i>26</i>
<i>Rysunek 1.8. Model Golanda i Reissnera – deformacja połączenia [43].....</i>	<i>29</i>
<i>Rysunek 1.9. Rozkłady naprężeń stycznych w połączeniu klejowym: a) i b) w modelu uwzględniającym strefy bez naprężeń stycznych na końcach zakładki, c) wg Volkersena oraz Golanda i Reissnera [41, 43].....</i>	<i>32</i>
<i>Rysunek 1.10. Model Harta-Smitha: a) spoina, b) i c) rozkład naprężeń stycznych w funkcji odkształcenia dla połączenia zakładkowego [28, 42].....</i>	<i>36-37</i>
<i>Rysunek 1.11. Model połączenia zakładkowego wykorzystanego w analizie porównawczej modeli analitycznych [41].....</i>	<i>39</i>
<i>Rysunek 1.12. Porównanie rozkładów naprężeń stycznych połączenia zakładkowego dla wybranych modeli analitycznych [28].....</i>	<i>40</i>
<i>Rysunek 1.13. Porównanie rozkładów naprężeń normalnych połączenia zakładkowego dla wybranych modeli analitycznych [28].....</i>	<i>41</i>
<i>Rysunek 1.14. Rozkład naprężeń stycznych i normalnych połączenia zakładkowego rozpatrywanego w trzech wymiarach: a) widok ogólny, b), c) i d) rozkłady naprężeń włączone do analizy [41].....</i>	<i>42</i>
<i>Rysunek 1.15. Schemat połączenia nitowego [82, 113].....</i>	<i>43</i>
<i>Rysunek 1.16. Rekomendowane rozmieszczanie otworów na łączniki mechaniczne przy konstruowaniu połączeń zakładkowych [112].....</i>	<i>44</i>
<i>Rysunek 1.17. Etapy zakuwania nitu [5].....</i>	<i>45</i>

<i>Rysunek 1.18. Rozkład sił w połączeniu zakładkowym-nitowym: a) dla obciążenia przenoszonego przez siły tarcia, b) dla obciążenia przenoszonego przez nity wyteżone na ścinanie (jednocięte) [130].....</i>	<i>46</i>
<i>Rysunek 1.19. Rodzaje nitów zwykłych stosowanych w budowie płatowców: a), nit z łbem kulistym, b) nit z łbem wpuszczanym płaskim, c) nit z łbem wpuszczanym kulistym, d) nit z łbem trapezowym, e) nit z łbem stożkowym.....</i>	<i>47</i>
<i>Rysunek 1.20. Schemat połączenia śrubowego [88].....</i>	<i>48</i>
<i>Rysunek 1.21. Rodzaje połączeń śrubowych: a) zakładkowe, b) doczołowe [5, 88].....</i>	<i>49</i>
<i>Rysunek 1.22. Rozkład naprężeń stycznych w połączeniu zakładkowym – śrubowym: a) bez uwzględnienia wtórnych momentów gnących, b) naprężenia styczne wywołane obciążeniem i wtórnymi momentami gnącymi, c) wypadkowe naprężenia styczne [5].....</i>	<i>49</i>
<i>Rysunek 1.23. Mapa naprężeń połączenia śrubowego w miejscu montażu łącznika mechanicznego [14, 15, 76].....</i>	<i>50</i>
<i>Rysunek 1.24. Uproszczony model rozkładu naprężeń rozciągających połączenia śrubowego [15, 76].....</i>	<i>50</i>
<i>Rysunek 1.25. Fazy montażu łącznika gwintowanego typu Jo-Bolt® a) montaż trzpienia i pierścienia ślizgowego(odkształcalnego) oraz skręcenie określonym momentem siły, b), docisk i ścięcie trzpienia prowadzącego tuleję zaciskową.....</i>	<i>53</i>
<i>Rysunek 1.26. Fazy montażu łącznika gwintowanego typu Hi-Lok®: a) przygotowanie otworu i montaż trzpienia, b) montaż gwintowanego pierścienia, c) dokręcenie określonym momentem siły, d) docisk i ścięcie końcówki pierścienia, inspekcja wizualna.....</i>	<i>53</i>
<i>Rysunek 1.27. Defekty połączeń klejowych. Brak adhezji – „kissing bond”.....</i>	<i>57</i>
<i>Rysunek 1.28. Połączenie zgrzewano-klejowe: a) metoda „flow-in”, b) metoda „weld-through” [44].....</i>	<i>59</i>
<i>Rysunek 1.29. Schemat wytwarzania połączenia nitowo-klejowego [68].....</i>	<i>60</i>
<i>Rysunek 1.30. Nośność badanych połączeń: mechanicznego (nitowego), klejowego i hybrydowego w funkcji przemieszczenia trawersy maszyny wytrzymałościowej [132].....</i>	<i>61</i>
<i>Rysunek 1.31. Proces przetłaczania punktowego [44]: a) umieszczenie łączonych elementów między stemplem i matrycą, b) wstępny docisk, c) docisk właściwy i formowanie połączenia, d) zwolnienie nacisku stempla.....</i>	<i>62</i>
<i>Rysunek 1.32. Nośność połączeń hybrydowych (klinczowo-klejowych) w funkcji przemieszczenia trawersy maszyny wytrzymałościowej [131].....</i>	<i>63</i>
<i>Rysunek 1.33. Schemat połączenia śrubowo-klejowego [19].....</i>	<i>64</i>
<i>Rysunek 1.34. Wyniki badań eksperymentalnych nośności połączeń klejowych, śrubowych i hybrydowych (śrubowo-klejowych) [53].....</i>	<i>65</i>

Rysunek 1.35. Trwałość zmęczeniowa - wyniki badań eksperymentalnych dla połączeń klejowych, śrubowych i hybrydowych (śrubowo-klejowych) poddawanych obciążeniu 3,55 kN [53].....	66
Rysunek 1.36. Geometria połączenia hybrydowego zastosowana w badaniach [78]...	67
Rysunek 1.37. Nośność połączeń w wariancie połączenia klejowego, śrubowego i hybrydowego (śrubowo-klejowego) dla próbek o grubości 1,6 mm z klejem poliuretanowym Pliogrip 7400/7410 [79].....	68
Rysunek 1.38. Nośność połączeń w wariancie połączenia klejowego, śrubowego i hybrydowego (śrubowo-klejowego) dla próbek o grubości 3,2 mm z klejem poliuretanowym Pliogrip 7400/7410 [79].....	68
Rysunek 1.39. Nośność połączeń w wariancie połączenia klejowego, śrubowego i hybrydowego (śrubowo-klejowego) dla próbek o grubości 3,2 mm z klejem epoksydowym Epibond 1590 A/B [79].....	69
Rysunek 1.40. Wpływ geometrii połączenia na jego nośność [78]: a) dla różnych grubości łączonych elementów t , ($t_a = 0,5$ mm, $L = 20$ mm), b) dla różnej grubości warstwy adhezyjnej t_a , ($t = 3,2$ mm, $L = 20$ mm), c) dla różnej długości zakładki L ($t_a = 0,5$ mm, $t = 3,2$ mm), d) dla różnego rozstawu łączników mechanicznych w/d ($t_a = 0,5$ mm, $t = 3,2$ mm, $L = 20$ mm)...	71
Rysunek 3.1. Schemat badanego połączenia hybrydowego z zakładką o długości 50 mm.....	81
Rysunek 3.2. Schemat zamocowania próbki w maszynie wytrzymałościowej: a) i c) widok ogólny odpowiednio dla długości zakładki 25 mm i 50 mm, b) i d) z widocznym odkształceniem odpowiednio dla długości zakładki 25 mm i 50 mm (spowodowanym osiowym ułożeniem uchwytów maszyny).....	82
Rysunek 3.3. Uniwersalna maszyna wytrzymałościowa MTS 809.....	83
Rysunek 3.4. Porównanie nośności połączeń klejowych, mechanicznych i hybrydowych (dla dwóch wariantów przygotowania powierzchni).....	84
Rysunek 3.5. Widok warstwy adhezyjnej pomiędzy klejonymi powierzchniami elementów poddanych piaskowaniu (stop aluminium AW 2024-T3) przed procesem klejenia.....	85
Rysunek 3.6. Porównanie nośności połączeń klejowych, mechanicznych i hybrydowych (dla dwóch wariantów przygotowania powierzchni).....	86
Rysunek 3.7. Dwuetapowy proces niszczenia połączenia hybrydowego w trakcie badania jego nośności [141].....	89
Rysunek 3.8. Porównanie nośności połączeń klejowych, mechanicznych i hybrydowych z zakładką 50 mm (dla dwóch wariantów rozmieszczenia łączników mechanicznych w odległości 1d i 2d od krawędzi zakładki).....	90
Rysunek 3.9. Widok postaci zniszczenia połączenia mechanicznego w wariancie montażu łączników 1d.....	92
Rysunek 3.10. Zestawienie wyników badań doświadczalnych trwałości zmęczeniowej próbek połączeń mechanicznych i hybrydowych z zakładką 50 mm (wartości średnie dla dwóch wariantów rozmieszczenia łączników mechanicznych w odległości 1d i 2d od krawędzi zakładki).....	92

<i>Rysunek 3.11. Modele geometryczne łączników mechanicznych a) łącznik jednoelementowy, b) łącznik dwuelementowy z ruchomym pierścieniem.....</i>	<i>95</i>
<i>Rysunek 3.12. Model geometryczny połączenia hybrydowego opracowanego na potrzeby badań z zakładką o długości 50 mm i łącznikami mechanicznymi w konfiguracji 2d.....</i>	<i>96</i>
<i>Rysunek 3.13. Modele połączeń opracowane przy zastosowaniu: a) siatki typu tetra oraz b) siatki typu hekza.....</i>	<i>96</i>
<i>Rysunek 3.14. Warunki brzegowe zadane w procesie obliczeń numerycznych opracowanych modeli połączeń mechanicznych i hybrydowych.....</i>	<i>98</i>
<i>Rysunek 3.15. Widok siatki obliczeniowej typu hekza z charakterystyczną regularną formą w pobliżu otworów.....</i>	<i>100</i>
<i>Rysunek 3.16. Porównanie rozkładu naprężeń normalnych prostopadłych do spoiny klejowej: a) dla modelu z wykorzystaniem siatki obliczeniowej typu hekza, b) dla modelu z wykorzystaniem siatki obliczeniowej typu tetra.....</i>	<i>100</i>
<i>Rysunek 3.17. Rozkład maksymalnych naprężeń głównych występujący w spoinie klejowej: a) dla modelu z wykorzystaniem siatki obliczeniowej typu hekza, b) dla modelu z wykorzystaniem siatki obliczeniowej typu tetra.....</i>	<i>101</i>
<i>Rysunek 3.18. Porównanie rozkładu naprężeń normalnych prostopadłych do spoiny klejowej a) bez nacisków montażowych od śrub, b) z uwzględnieniem nacisków montażowych od śrub.....</i>	<i>102</i>
<i>Rysunek 3.19. Porównanie rozkładu naprężeń stycznych w spoinie klejowej: a) bez nacisków montażowych od śrub, b) z uwzględnieniem nacisków montażowych od śrub.....</i>	<i>102</i>
<i>Rysunek 3.20. Porównanie rozkładu naprężeń stycznych na odcinku „a” spoiny klejowej bez nacisków montażowych i z ich uwzględnieniem (w kierunku od krawędzi do łącznika).....</i>	<i>102</i>
<i>Rysunek 3.21. Porównanie rozkładu maksymalnych naprężeń głównych w spoinie klejowej a) bez nacisków montażowych od śrub, b) z uwzględnieniem nacisków montażowych od śrub.....</i>	<i>103</i>
<i>Rysunek 3.22. Porównanie rozkładu naprężeń normalnych prostopadłych do spoiny klejowej a) wariant montażu łączników mechanicznych 2d, b) wariant 1d.....</i>	<i>104</i>
<i>Rysunek 3.23. Porównanie rozkładu naprężeń normalnych na odcinku pomiarowym (25 mm) spoiny klejowej dla montażu łączników w wariancie 1d i 2d.....</i>	<i>105</i>
<i>Rysunek 3.24. Porównanie rozkładu naprężeń normalnych na odcinku pomiarowym spoiny klejowej o długości 1,5 mm dla montażu łączników w wariancie 1d i 4,5 mm dla wariantu 2d.....</i>	<i>106</i>
<i>Rysunek 3.25. Porównanie nośności i trwałości zmęczeniowej połączeń hybrydowych w wariantach 1d i 2d otrzymanych w badaniach eksperymentalnych własnych.....</i>	<i>106</i>

- Rysunek 4.1. Połączenie hybrydowe jednozakładkowe – schemat ideowy pożądanej dystrybucji obciążenia całkowitego (OC) przenoszonego przez łączniki mechaniczne (ŁM) i warstwę klejową (WA) [97]111
- Rysunek 4.2. Uproszczony model połączenia hybrydowego (E_k , E_l – moduły sprężystości wzdłużnej oraz η_k , η_l – współczynniki lepkości dynamicznej odpowiednio kleju i łączników mechanicznych [124]112
- Rysunek 4.3. Model geometryczny nakładkowego połączenia hybrydowego: a) widok z boku, b) widok z góry [125]113
- Rysunek 4.4. Warunki brzegowe zadane w procesie obliczeń MES113
- Rysunek 4.5. Krzywe rozciągania (prędkość 2 mm/min) dla tworzyw adhezyjnych wykorzystanych w badaniach: Epidian 57/Z1 i Raychem S1125115
- Rysunek 4.6. Rozkład naprężeń normalnych w warstwie adhezyjnej połączenia hybrydowego w wariancie 1d: a) dla kleju Raychem S1125, b) dla kleju Epidian 57/Z1116
- Rysunek 4.7. Rozkład naprężeń stycznych w warstwie adhezyjnej połączenia hybrydowego w wariancie 1d: a) dla kleju Raychem S1125, b) dla kleju Epidian 57/Z1117
- Rysunek 4.8. Rozkład maksymalnych naprężeń głównych w warstwie adhezyjnej połączenia hybrydowego w wariancie 1d: a) dla kleju Raychem S1125, b) dla kleju Epidian 57/Z1117
- Rysunek 4.9. Rozkład naprężeń stycznych w łącznikach mechanicznych połączenia (wariant 1d): a) hybrydowego z Raychem S1125, b) hybrydowego z Epidian 57/Z1, c) mechanicznego118
- Rysunek 4.10. Rozkład naprężeń von Misesa w próbce badanego połączenia hybrydowego w wariancie 1d: a) dla kleju Raychem S1125, b) dla kleju Epidian 57/Z1119
- Rysunek 4.11. Rozkład naprężeń normalnych prostopadłych do kierunku działania obciążenia w modelach warstw klejowych badanych połączeń hybrydowych: a) Raychem S1125, b) Epidian 57/Z1120
- Rysunek 4.12. Rozkład naprężeń von Misesa w badanych wariantach połączenia: a) mechanicznym oraz hybrydowym b) z klejem Raychem S1125, c) z klejem Epidian 57/Z1121
- Rysunek 4.13. Rozkład naprężeń normalnych w kierunku działania obciążenia (X) w badanych wariantach modelu połączenia: a) mechanicznym oraz hybrydowym b) z klejem Raychem S1125, c) z klejem Epidian 57/Z1122
- Rysunek 4.14. Widok sposobu zniszczenia próbki nakładkowej nitowanej nitami zwykłymi 3558A-4-10: a) po próbie zmęczeniowej, b) po statycznej próbie rozciągania125
- Rysunek 4.15. Widok sposobu zniszczenia próbki nakładkowej nitowanej nitami tytanowymi MBF2110AB-05-150: a) po próbie zmęczeniowej, b) po statycznej próbie rozciągania126

- Rysunek 4.16. Zniszczenie zmęczeniowe połączenia hybrydowego (nity 3558A-4-10 i tworzywo Epidian 57/Z1): a) bez tkaniny szklanej, b) z tkaniną szklaną.....127
- Rysunek 4.17. Widok nakładkowego połączenia hybrydowego (nity MBF2110AB-05-150 i tworzywo Epidian 57/Z1): a) po przygotowaniu próbki, b) zniszczonego po badaniach trwałościowych.....128
- Rysunek 4.18. Widok nakładkowego połączenia hybrydowego (nity MBF2110AB-05-150 i tworzywo Raychem S1125): a) po przygotowaniu próbki, b) zniszczonego po badaniach trwałościowych.....128
- Rysunek 4.19. Zniszczenie zmęczeniowe hybrydowego połączenia nakładkowego (nity MBF2110AB-05-150 i tworzywo Raychem S1125 z warstwą tkaniny Synglass E81).....129
- Rysunek 4.20. Widok spoiny klejowej w hybrydowym połączeniu nakładkowym: a) bez tkaniny szklanej, b) z warstwą tkaniny szklanej, c) po analizie tomografem komputerowym w hybrydowym połączeniu nakładkowym z warstwą tkaniny szklanej.....131
- Rysunek 4.21. Widok stanowiska do badań wytrzymałościowych belki ogonowej śmigłowca Mi-8.....132
- Rysunek 4.22. Rozmieszczenie tensometrów wykorzystywanych do pomiarów odkształceń badanego obszaru: a) lokalizacja badanego obszaru (E) na belce, b) zewnętrzna strona belki, c) wewnętrzna strona belki.....134
- Rysunek 4.23. Łącznik Visu-Lok®: a) widok z boku, b) przekrój zamontowanego łącznika.....135
- Rysunek 4.24. Badany obszar E: a) z usuniętą blachą pokrycia, b) z usuniętą blachą pokrycia i fragmentem podłużnicy nr 5.....135
- Rysunek 4.25. Wartości odkształceń mierzone w obszarze belki z usuniętą blachą pokrycia (badanie cyklu nr 16) w zestawieniu z pomiarami z badań cykli nr 7 i 15.....136
- Rysunek 4.26. Wartości odkształceń mierzone w obszarze belki z usuniętą blachą pokrycia i fragmentem podłużnicy nr 5. Badanie cyklu nr 17 w zestawieniu z pomiarami z badania cyklu nr 16.....136
- Rysunek 4.27. Widok konstrukcji belki z zamontowaną blachą pokrycia i kątownikiem wzmacniającym: a) widok ogólny, b) rysunek: 1) podłużnica, 2) kątownik wzmacniający, 3) pokrycie, 4) łącznik jednostronny, 5) wkładka dystansowa, 6) lata.....137
- Rysunek 4.28. Obszar belki z zamontowaną blachą pokrycia i kątownika – umiejscowienie tensorów.....137
- Rysunek 4.29. Wartości odkształceń mierzone w obszarze belki z zamontowaną łatą naprawczą (badanie cyklu nr 19) w zestawieniu z pomiarami z badań cykli nr 7 i 17.....138
- Rysunek 4.30. Wartości odkształceń mierzone w obszarze E belki; badanie cyklu nr 17 – z usuniętym pokryciem i częścią podłużnicy nr 5 w porównaniu z badaniami cyklu 19 i 23 – z zamontowaną łatą naprawczą po 80 000 cyklach obciążeń.....139

<i>Rysunek 5.1. Łączniki wykorzystane do przygotowania połączeń próbek kompozytu: a) Jo-Bolt®, b) Hi-Lok®, c) 3560A.....</i>	<i>146</i>
<i>Rysunek 5.2. Schemat połączenia materiałów kompozytowych w badaniach eksperymentalnych.....</i>	<i>146</i>
<i>Rysunek 5.3. Przykładowe tomogramy połączeń w okolicy otworów montażowych: a) z wykorzystaniem łączników typu Hi-Lok®; b) z wykorzystaniem łączników typu Jo-Bolt®.....</i>	<i>147</i>
<i>Rysunek 5.4. Krzywa rozciągania połączeń mechanicznych kompozytu.....</i>	<i>149</i>
<i>Rysunek 5.5. Formy niszczenia połączeń mechanicznych: a) z nitami 3560A, b) z łącznikami typu Hi-Lok®, c) z łącznikami Jo-Bolt®.....</i>	<i>150</i>
<i>Rysunek 5.6. Krzywa rozciągania połączeń hybrydowych kompozytu.....</i>	<i>152</i>
<i>Rysunek 5.7. Tomogramy połączeń mechanicznych i hybrydowych: a) z nitami, b) z łącznikami typu Hi-Lok®, c) z łącznikami Jo-Bolt® oraz połączeń hybrydowych: d) z łącznikami typu Hi-Lok®, e) z łącznikami Jo-Bolt®.....</i>	<i>154</i>
<i>Rysunek 5.8. Tomogramy połączenia mechanicznego MN1 po badaniach zmęczeniowych (1,5 mln cykli).....</i>	<i>155</i>
<i>Rysunek 5.9. Przykłady uszkodzeń w połączeniach mechanicznych z łącznikami typu Hi-Lok® po badaniach zmęczeniowych (1,5 mln cykli) w postaci: a) delaminacji (delamination), b) owalizacji (ovalisation) i pęknięć (crack), c) delaminacji (delamination) oraz tzw. pustek (voids).....</i>	<i>155-156</i>
<i>Rysunek 5.10. Przykłady zmiany owalizacji otworów montażowych w połączeniach mechanicznych z łącznikami typu Hi-Lok® w badaniach zmęczeniowych: a) po 1,5 mln cykli, b) po 4,5 mln cykli, c) po 7,5 mln cykli, d) po 12 mln cykli.....</i>	<i>156</i>
<i>Rysunek 5.11. Przyrost owalizacji otworów montażowych w połączeniach mechanicznych z łącznikami typu Hi-Lok® oraz Jo-Bolt® wraz ze wzrostem liczby cykli zmęczeniowych.....</i>	<i>157</i>
<i>Rysunek 5.12. Przykładowe tomogramy okolic otworów montażowych połączeń mechanicznych z łącznikami typu Jo-Bolt® w badaniach zmęczeniowych: a) po 1.5 mln cykli, b) po 4.5 mln cykli, c) po 7.5 mln cykli, d) po 12 mln cykli.....</i>	<i>157</i>
<i>Rysunek 5.13. Przykładowe tomogramy okolic otworów montażowych połączeń hybrydowych z nitami 3560A w badaniach zmęczeniowych: a) po 1.5 mln cykli, b) po 4.5 mln cykli, c) po 7.5 mln cykli, d) po 12 mln cykli.....</i>	<i>158</i>
<i>Rysunek 5.14. Tomogramy okolic otworów montażowych połączeń hybrydowych Hi-Lok®/Epidain 57/Z1 w badaniach zmęczeniowych: a) po 1.5 mln cykli, b) po 4.5 mln cykli, c) po 7.5 mln cykli, d) po 12 mln cykli z widocznymi uszkodzeniami warstwy adhezyjnej (crack in the adhesive joint).....</i>	<i>158-159</i>

Tabele

<i>Tabela 1.1. Analiza właściwości połączeń klejowych [3]</i>	<i>20-21</i>
<i>Tabela 1.2. Analiza właściwości połączeń mechanicznych</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 1.3. Analiza właściwości połączeń hybrydowych [44, 131, 132, 133]</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 3.1. Parametry elementów składowych połączeń badanych w I i II etapie...79-80</i>	
<i>Tabela 3.2. Trwałość zmęczeniowa połączeń o zakładce 25 mm [liczba cykli do zniszczenia połączenia], montaż łączników mechanicznych w odległości 2d od krawędzi zakładki.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 3.3. Trwałość zmęczeniowa połączeń o zakładce 50 mm [liczba cykli do zniszczenia połączenia], montaż łączników mechanicznych w odległości 2d od krawędzi zakładki.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 3.4. Trwałość zmęczeniowa połączeń o zakładce 50 mm, montaż łączników mechanicznych w odległości 1d i 2d od krawędzi zakładki.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabela 3.5. Porównanie liczby elementów oraz węzłów obliczeniowych modelu połączenia dla siatek typu tetra i hekza</i>	<i>97</i>
<i>Tabela 3.6. Parametry przyjęte do definiowania właściwości materiałowych poszczególnych grup elementów badanych połączeń.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabela 3.7. Rodzaje kontaktów pomiędzy elementami połączenia zdefiniowanych w procesie modelowania próbek.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabela 4.1. Rodzaje kontaktów pomiędzy elementami połączenia zdefiniowanych w procesie modelowania próbek.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabela 4.2. Parametry przyjęte do definiowania właściwości materiałowych poszczególnych grup elementów badanych połączeń.....</i>	<i>115</i>
<i>Tabela 4.3. Zestawienie wariantów połączeń wykorzystanych w badaniach eksperymentalnych.....</i>	<i>124</i>
<i>Tabela 4.4. Porównanie trwałości zmęczeniowej mechanicznych i hybrydowych połączeń nakładkowych.....</i>	<i>129-130</i>
<i>Tabela 4.5. Porównanie wartości odkształceń rejestrowanych w badanym obszarze w 24 cyklach – 180 000 prób.....</i>	<i>139-140</i>
<i>Tabela 5.1. Wartości obciążeń połączeń w testach zmęczeniowych.....</i>	<i>148</i>
<i>Tabela 5.2. Nośność połączeń mechanicznych w testach zmęczeniowych.....</i>	<i>149</i>
<i>Tabela 5.3. Schemat wykonania badań tomograficznych połączeń mechanicznych.....</i>	<i>151-152</i>
<i>Tabela 5.4. Nośność połączeń hybrydowych w testach zmęczeniowych.....</i>	<i>152</i>
<i>Tabela 5.5. Schemat wykonania badań tomograficznych połączeń hybrydowych.....</i>	<i>153</i>