



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ
I ŚRODOWISKA



Imię i nazwisko studenta: Erwin Wojtczak
Nr albumu: 144831
Studia drugiego stopnia
Forma studiów: stacjonarne
Kierunek studiów: Budownictwo
Specjalność/profil: Modelowanie Konstrukcji Inżynierskich

PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

Analiza wytrzymałościowa zakładkowego połączenia klejonego

Strength analysis of single lap adhesive joint

Potwierdzenie przyjęcia pracy	
Opiekun pracy	Kierownik Katedry/Zakładu
<i>podpis</i>	<i>podpis</i>
dr hab. inż. Magdalena Rucka	prof. dr hab. inż. Krzysztof Wilde

Data oddania pracy do dziekanatu:



OŚWIADCZENIE

Imię i nazwisko: Erwin Wojtczak
Data i miejsce urodzenia: 01.06.1993, Radziejów
Nr albumu: 144831
Wydział: Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Kierunek: budownictwo
Poziom studiów: I stopnia - inżynierskie
Forma studiów: stacjonarne

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę/~~nie wyrażam zgody*~~ na korzystanie z mojej pracy dyplomowej zatytułowanej:

Analiza wytrzymałościowa zakładkowego połączenia klejonego
do celów naukowych lub dydaktycznych.¹

Gdańsk, dnia

.....
podpis studenta

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. z 2006 r., nr 90, poz. 631) i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2012 r., poz. 572 z późn. zm.),² a także odpowiedzialności cywilno-prawnej oświadczam, że przedkładana praca dyplomowa została opracowana przeze mnie samodzielnie.

Niniejsza(y) praca dyplomowa nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem tytułu zawodowego.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. pracy dyplomowej, uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami zgodnie z art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

Potwierdzam zgodność niniejszej wersji pracy dyplomowej z załączoną wersją elektroniczną.

Gdańsk, dnia

.....
podpis studenta

Upoważniam Politechnikę Gdańską do umieszczenia ww. pracy dyplomowej w wersji elektronicznej w otwartym, cyfrowym repozytorium instytucjonalnym Politechniki Gdańskiej oraz poddawania jej procesom weryfikacji i ochrony przed przywłaszczeniem jej autorstwa.

Gdańsk, dnia

.....
podpis studenta

*) niepotrzebne skreślić

¹ Zarządzenie Rektora Politechniki Gdańskiej nr 34/2009 z 9 listopada 2009 r., załącznik nr 8 do instrukcji archiwalnej PG.

² Ustawa z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym:

Art. 214 ustęp 4. W razie podejrzenia popełnienia przez studenta czynu podlegającego na przypisaniu sobie autorstwa istotnego fragmentu lub innych elementów cudzego utworu rektor niezwłocznie poleca przeprowadzenie postępowania wyjaśniającego.

Art. 214 ustęp 6. Jeżeli w wyniku postępowania wyjaśniającego zebrany materiał potwierdza popełnienie czynu, o którym mowa w ust. 4, rektor wstrzymuje postępowanie o nadanie tytułu zawodowego do czasu wydania orzeczenia przez komisję dyscyplinarną oraz składa zawiadomienie o popełnieniu przestępstwa.

STRESZCZENIE

Przedmiotem pracy jest analiza wytrzymałościowa połączenia klejonego elementów konstrukcji metalowych. Badaniom poddano złącze zakładkowe pojedyncze płaskowników aluminiowych, obciążone na ścinanie. Wykonano pomiary eksperymentalne prowadzące do wyznaczenia nośności połączenia. Na podstawie rozwiązań analitycznych określono rozkład naprężeń stycznych w złączu. Przygotowano także proste modele MES połączenia. Otrzymane wyniki analizy teoretycznej oraz numerycznej porównano ze sobą, uzyskując zadowalającą zgodność obydwu podejść obliczeniowych. Na podstawie przeprowadzonych badań oraz obliczeń określono przydatność modelu numerycznego i teoretycznego do analizy wytrzymałości jednozakładkowych połączeń klejonych.

Słowa kluczowe:

analiza wytrzymałościowa, jednozakładkowe połączenie klejone, klejenie konstrukcyjne, modele analityczne, badania doświadczalne, MES

ABSTRACT

The subject of this study is the strength analysis of adhesive joint of metal members. The object of the research was a single lap joint consisted of aluminum flats, subjected to shearing. The experimental measurement was applied to determine the strength of the joint. Based on the analytical solutions, the distribution of shear stresses in the lap joint was specified. Also, simple FEM models were prepared. The results of both analytical and numerical analyses were compared, giving the acceptable agreement of this two approaches. Based on the applied experiment and calculations the utility of numerical and theoretical models to strength analysis of single lap adhesive joints were specified.

Keywords:

strength analysis, single lap adhesive joint, constructional gluing, analytical models, experimental testing, FEM

SPIS TREŚCI

Streszczenie	3
Abstract	4
Wykaz ważniejszych oznaczeń	6
1. Wstęp i cel pracy	7
1.1. Połączenia klejone w konstrukcjach inżynierskich	7
1.2. Zastosowanie połączeń klejonych w konstrukcjach metalowych	8
1.2.1. Historia połączeń klejonych w konstrukcjach metalowych.....	8
1.2.2. Współczesne zastosowania połączeń klejonych elementów metalowych.....	9
1.3. Charakterystyka połączeń klejonych elementów metalowych	10
1.4. Mechanizmy zniszczeń połączeń klejonych	13
1.4.1. Zniszczenie adhezyjne	14
1.4.2. Zniszczenie kohezyjne	14
1.5. Normy dotyczące połączeń klejonych	14
1.6. Cel i zakres pracy	15
2. Modele analityczne połączeń klejonych	16
2.1. Uproszczona analiza liniowo-sprężysta	16
2.2. Model Volkersena	17
2.3. Obliczenia z wykorzystaniem modeli teoretycznych	20
2.4. Podsumowanie rozwiązań analitycznych	21
3. Badania doświadczalne	22
3.1. Przygotowanie próbek	22
3.2. Badania połączeń klejonych (próbki 1 – 5)	25
3.3. Badania płaskowników aluminiowych (próbki 6 oraz 7)	28
3.4. Wnioski z badań doświadczalnych	31
4. Analiza numeryczna	33
4.1. Model numeryczny płaskownika	33
4.2. Model numeryczny połączenia	35
4.2.1. Złącze jako kontakt kohezywny	35
4.2.2. Złącze jako odrębna warstwa elementów	37
4.3. Wnioski z analizy numerycznej	39
5. Podsumowanie	41
Wykaz literatury	42
Wykaz rysunków	44
Wykaz fotografii	45
Wykaz tabel	46

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

Małe litery łacińskie

- b_p – szerokość płaskownika
- b_z – szerokość zakładki
- g_c – grubość całkowita próbki
- g_k – grubość spoiny klejowej
- g_p – grubość płaskownika
- l – długość płaskownika poza złączem
- l_c – długość całkowita próbki
- $l_{o,e}$ – początkowa długość bazy pomiarowej ekstensometru w badaniu modułu Younga
- l_p – długość płaskownika
- l_{pn} – długość pojedynczego płaskownika w modelu numerycznym
- Δl_p – wydłużenie bezwzględne płaskownika
- x – współrzędna określająca położenie analizowanego przekroju złącza
- z – długość zakładki

Małe litery greckie

- β_z – współczynnik korekcyjny ze względu na rozlanie kleju w spoinie
- δ_0 – względne przemieszczenie elementów klejonych na początku zakładki
- δ_x – względne przemieszczenie elementów klejonych w przekroju o współrzędnej x
- ε – odkształcenie
- ε_1 – odkształcenie podłużne górnego płaskownika
- ε_2 – odkształcenie podłużne dolnego płaskownika
- ε_E – odkształcenie płaskownika w badaniu modułu Younga
- ε_m – odkształcenie niszczące materiał płaskownika
- σ – naprężenia normalne w próbce
- σ_E – naprężenia normalne w płaskowniku w badaniu modułu Younga
- σ_m – wytrzymałość na rozciąganie stopu aluminium wykorzystanego do badań
- $\tau_{d,k}$ – naprężenia ścinające niszczące klej
- τ – naprężenia ścinające w spoinie klejowej
- $\tilde{\tau}$ – bezwymiarowy mnożnik średniej wartości naprężeń stycznych
- τ_m – wartość średnia naprężeń stycznych na jednostkę szerokości złącza
- τ_x – funkcja naprężeń stycznych w przekroju na jednostkę szerokości złącza

Wielkie litery łacińskie

- A_p – pole przekroju poprzecznego płaskownika
- A_z – rzeczywista powierzchnia zakładki
- E – moduł sprężystości podłużnej (Younga) płaskowników
- G – moduł ścinania (Kirchhoffa) materiału kleju
- G_c – rzeczywista, pomierzona grubość całkowita próbki
- G_k – rzeczywista, pomierzona grubość spoiny klejowej
- P – siła rozciągająca próbkę
- P_{max} – maksymalna siła rozciągająca próbkę
- Z – rzeczywista, pomierzona długość zakładki

1. WSTĘP I CEL PRACY

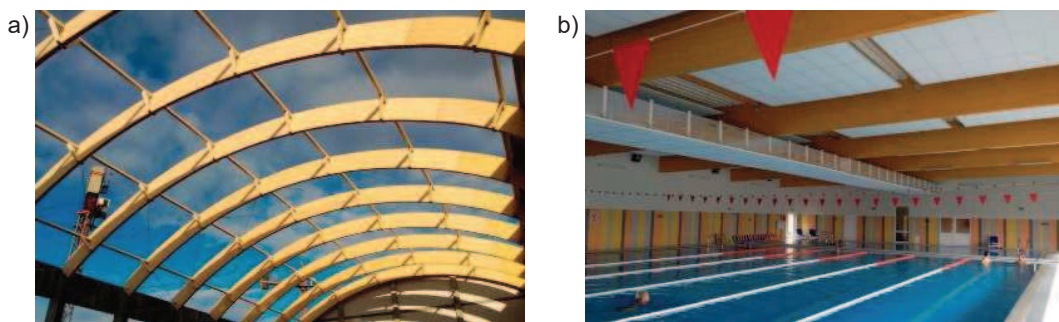
1.1. Połączenia klejone w konstrukcjach inżynierskich

Połączenia klejone znajdują zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. W przypadku konstrukcji inżynierskich, zwykle pierwszym skojarzeniem są elementy wykonane w technologii drewna klejonego. Polega ona na scalaniu elementów drewnianych o odpowiednio przygotowanej geometrii (fot. 1.1), tworząc w ten sposób dźwigary znacznych rozpiętości i nośności.



Fot. 1.1. Przykład połączenia belki drewnianej na długości (tzw. mikrowczepy) [26]

Elementy nośne wykonane w technologii drewna klejonego mogą posiadać zróżnicowaną, niekiedy bardzo skomplikowaną geometrię. W powszechnych zastosowaniach występują przede wszystkim dźwigary proste oraz łukowe. Są one wykorzystywane, między innymi, do konstruowania wielkopowierzchniowych hal, nierzadko pełniących funkcje obiektów widowiskowo-sportowych (fot. 1.2).



Fot. 1.2. Przykłady realizacji konstrukcji z drewna klejonego [23]:
a) hala sportowa w Kosakowie, b) pływalnia w Gryficach

Produkty z tworzyw adhezyjnych znajdują także zastosowanie w robotach budowlanych wykończeniowych i remontowych. Różnego rodzaju zaprawy klejowe są niezastąpione w wykonywaniu dociepleń elewacji budynków. Stosuje się je również jako uszczelniacze, np. do zabezpieczania pomieszczeń o charakterze mokrym przed szkodliwym oddziaływaniem wilgoci na elementy konstrukcyjne.

1.2. Zastosowanie połączeń klejonych w konstrukcjach metalowych

1.2.1. Historia połączeń klejonych w konstrukcjach metalowych

Połączenia klejone elementów metalowych były wykorzystywane już w latach 40. XX wieku. Jednym z pierwszych zastosowań było spajanie metalowych części szkieletów konstrukcji samolotów w roku 1942. Użyto wówczas kleju fenoloformaldehydowego ulepszanego termoplastycznym proszkiem z metylalu poliwinylowego [14]. Spoiwa adhezyjne o podobnym składzie są stosowane w przemyśle lotniczym do dnia dzisiejszego.

Istotnym momentem w historii klejenia elementów metalowych było rozpowszechnienie techniki trawienia spajanych powierzchni kwasem chromowym i późniejsze wprowadzenie żywic epoksydowych. W porównaniu do innych rodzajów klejów, są to spoiwa o znacznej wytrzymałości i sztywności [14].

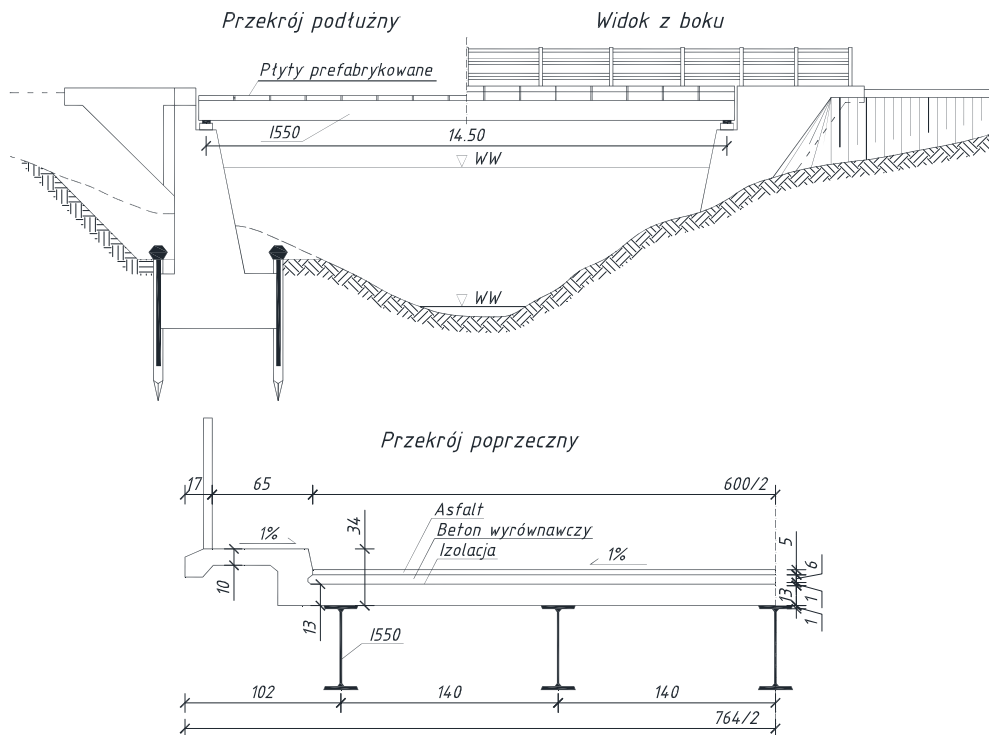
Przykładem udanych realizacji z wykorzystaniem połączeń adhezyjnych w budownictwie są konstrukcje mostowe. Jedną z pierwszych był skonstruowany w 1956 roku stalowy most nad kanałem Lippe-Seiten w Niemczech (fot. 1.3). Z racji innowacyjnego charakteru połączeń i z uwagi na ryzyko awarii, praca kleju miała być asekurowana przez śruby umieszczone w otworach powiększonych. Praca śrub była więc możliwa dopiero w przypadku zniszczenia spoiny klejowej. Przegląd konstrukcji przeprowadzony w roku 2006 nie wykazał uszkodzeń połączeń klejonych [22], co, świadczy o ich znacznej trwałości.



Fot. 1.3. Pierwszy na świecie stalowy most „klejony” [22]

Innym przykładem jest polski most wykonany w 1964 roku. Konstrukcję zaprezentowano na rys. 1.1. Składała się ona z płyt żelbetowych przyklejanych do stalowych dźwigarów dwuteowych. Rozpiętość mostu w osiach podpór wyniosła 14.5 m. Do połączenia płyt z dźwigarami wykorzystano klej Epidian 3 na bazie żywic epoksydowych [11].

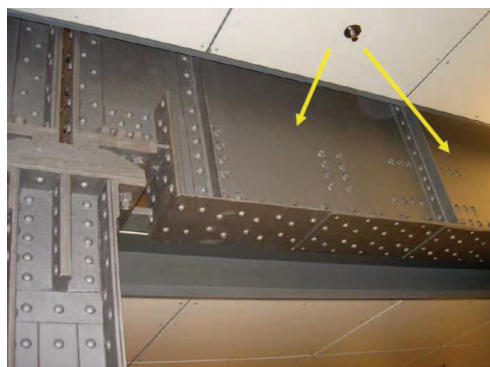
W drugiej połowie lat 60. klejenie konstrukcyjne elementów metalowych straciło na znaczeniu wskutek wyparcia przez szybko rozwijającą się technologię spawania. Współcześnie, zastosowanie tworzyw adhezyjnych w konstrukcjach staje się możliwe dzięki coraz lepszemu zaopatrzeniu rynku w kleje o znacznie lepszych własnościach [14, 22].



Rys. 1.1. Pierwszy polski most „klejony”, przekroje oraz widok, na podstawie [11]

1.2.2. Współczesne zastosowania połączeń klejonych elementów metalowych

Obecnie klejenie konstrukcyjne elementów metalowych znajduje szereg zastosowań. Kleje można wykorzystywać do łączenia elementów konstrukcji cienkościennych, np. smukłych blachownic [22]. Tworzywa adhezyjne stosuje się do spajania blach, w sytuacjach, gdy spawanie jest utrudnione lub niemożliwe (brak odpowiedniego sprzętu, brak technicznych możliwości zastosowania urządzeń ze względu na ich wymiary). Możliwe jest także wzmocnianie konstrukcji blachownic, np. poprzez doklejenie blach wzmocniających (fot. 1.4).



Fot. 1.4. Przykład blachownicy wzmocnionej płytami przyklejonymi do środnika [22]

Należy także wspomnieć o przyklejaniu elementów metalowych jako o metodzie wzmocniania konstrukcji innych niż metalowe. Jeżeli element z jakiegoś powodu wymaga zwiększenia nośności (błędy wykonawcze, zmiana obciążenia), to jednym z rozwiązań jest zastosowanie tzw. zbrojenia zewnętrznego. Może ono mieć formę płaskowników lub blach metalowych. Rozwiązanie to jest z powodzeniem stosowane w konstrukcjach żelbetowych, drewnianych, a nawet ceglanych [5, 14, 22]. Przykładem zastosowania metody wzmocniania

poprzez doklejanie są konstrukcje mostowe. Rozwiązania tego rodzaju nie są jednak pozbawione wad, ponieważ nierzadko zaburzają estetykę konstrukcji.

Tworzywa adhezyjne są również stosowane do konstruowania fasad budynków [14, 21], zarówno szklanych jak i metalowych. Znajdują one zastosowanie do łączenia poszczególnych składowych metalowego szkieletu oraz do mocowania elementów zewnętrznych elewacji (blach, płyt szklanych) do konstrukcji nośnej. Ze względu oddziaływania temperaturowe, stosuje się głównie kleje poliuretanowe i akrylowe, które są bardziej plastyczne niż żywice epoksydowe, przez co pozwalają na kompensację odkształceń termicznych. Przykładem fasady wykonanej w technologii klejenia jest elewacja kościoła Serca Jezusowego w Monachium (fot. 1.5).



Fot. 1.5. Kościół Serca Jezusowego w Monachium – przykład elewacji „klejonej” [21]

1.3. Charakterystyka połączeń klejonych elementów metalowych

Klejenie konstrukcyjne nie jest obecnie powszechną metodą spajania elementów metalowych ze względu na dużą popularność połączeń spawanych oraz śrubowych. Za taki stan rzeczy odpowiada małe zaufanie projektantów do tworzyw adhezyjnych oraz wysoki poziom cen i słabe zaopatrzenie rynku w odpowiedniej wytrzymałości kleje w czasie bardzo szybkiego rozwoju spawalnictwa [11, 14].

Poruszanie problematyki wad oraz zalet tworzyw adhezyjnych w konstrukcjach ma praktyczne zastosowanie w przypadku zestawiania ich własności z cechami innych rodzajów połączeń. Zalet tworzyw adhezyjnych należy doszukiwać się przede wszystkim w aspekcie słabych stron połączeń spawanych oraz śrubowych, wykluczających ich zastosowanie [22].

Problem klejenia konstrukcyjnego nie jest również pozbawiony wad, zarówno w zakresie wykonawstwa połączeń, jak i ich trwałości. Nie należy jednak negować faktu, iż większość niedogodności wynika (lub wynikała) z niskiej jakości oferowanych na rynku klejów oraz nieznaności skutecznych metod ich stosowania (szczególnie w przeszłości). Wraz z rozwojem technologii klejenia zniwelowano negatywne aspekty [14].

Istotnym problemem, który w przeszłości wykluczał stosowalność połączeń klejonych była niska wytrzymałość kleju w stosunku do wytrzymałości spajanych materiałów [13]. Praktyka projektowa zakłada, iż każde złącze konstrukcji musi posiadać nośność większą niż łączone elementy (aby ich nośność była w pełni wykorzystana). Obecnie problem ten już nie występuje, ponieważ współcześnie oferowane tworzywa adhezyjne posiadają nośność znacznie wyższą niż dawniej. Najjaskrawszym przykładem jest podniesienie ciężarówki o masie 5 ton, przymocowanej do dźwigu za pomocą kleju Loctite Superglue [14].

Jedną z głównych zalet połączeń klejonych jest ich uniwersalność. Praktycznie wszystkie metale mogą być klejone, nie wszystkie natomiast dają się spawać. Duża wytrzymałość elementów stalowych (np. w konstrukcjach mostowych) zwykle wiąże się z ich słabą spawalnością [22], co dyskwalifikuje zastosowanie spoin spawanych. Poza tym, przy użyciu tworzyw adhezyjnych wykonywane mogą być połączenia heterogeniczne (elementów wykonanych z różnych materiałów, nie tylko z metali [4]), co zwykle nie jest możliwe w przypadku spawania choćby ze względu na ryzyko wystąpienia zjawiska korozji bimetalicznej (elektrochemicznej) [6].

Należy zwrócić uwagę na fakt, iż wykonanie połączeń klejonych nie wymaga użycia specjalistycznego sprzętu, nie jest także konieczne zatrudnienie wykwalifikowanej kadry wykonawczej. W przypadku wykonywania połączeń spawanych występuje konieczność stosowania różnego rodzaju urządzeń, które nierzadko posiadają wymiary ograniczające możliwości ich wykorzystania.

Bardzo istotny jest fakt, iż wykonanie złącza klejonego nie wpływa negatywnie na stan naprężeń w konstrukcji. W przypadku połączeń śrubowych konieczne jest wykonanie w łączonych elementach otworów, wokół których (podczas obciążania elementu) powstają strefy koncentracji naprężeń. Proces spawania, z kolei, powoduje wprowadzenie w konstrukcji wstępnych naprężeń oraz odkształceń spawalniczych, które mogą ujemnie wpływać na późniejszą pracę konstrukcji [2]. Nawet najlepsze wykonanie złącza nie gwarantuje ochrony przed niepożądanymi skutkami spawania. Połączenia klejone nie wpływają natomiast w żaden sposób na strukturę łączonych elementów, wobec czego konstrukcja nie doznaje osłabienia w strefie złącza [22].

Ponadto spoiny klejowe mogą pełnić w pewnym stopniu funkcję tłumików drgań [4, 15]. Dotyczy to szczególnie klejów o mniejszej sztywności, które ze względu na zwiększoną elastyczność są naturalnymi kompensatorami drgań konstrukcji.

Jednym z trudnych do wyeliminowania czynników wpływających na brak popularności klejów jest stosunkowo długi okres czasu oczekiwania na uzyskanie przez złącze odpowiedniej nośności. Złącze spawane lub śrubowe jest gotowe do obciążenia niemal natychmiast po jego wykonaniu. Natomiast większość powszechnie stosowanych klejów konstrukcyjnych, uzyskuje pożądaną wytrzymałość w czasie od kilku godzin do kilku dób. Czynnikiem decydującym o czasie wiązania są, między innymi, rodzaj zastosowanego kleju (jego skład), metoda utwardzania (jednostopniowe, dwustopniowe) oraz warunki wykonania i sezonowania połączenia (temperatura i wilgotność otoczenia). Dla przykładu, klej Epidian 57, utwardzany jednostopniowo w temperaturze otoczenia wiąże w czasie 7 dób, a utwardzany dwustopniowo (przy zachowaniu odpowiednich warunków zewnętrznych) osiąga stan związany po ok. 18 godzinach [9]. Istotne utrudnienie procesu wykonywania połączeń stanowi konieczność unieruchamiania elementów do czasu uzyskania pożądanego wytrzymałości złącza [13, 22].

Problematyczna bywa także konieczność odpowiedniego przygotowania elementów do scalenia, która jest niezbędnym warunkiem osiągnięcia pożądanego nośności połączenia [14, 15, 18, 19, 22]. Istnieje wiele metod przygotowywania powierzchni złącz, można wyróżnić kilka grup. Pierwszą z nich jest odtłuszczenie (oczyszczanie chemiczne), polegające na usunięciu

zanieczyszczeń za pomocą acetonu, benzyny, etanolu czy toluenu [16]. Drugą grupę stanowią metody mechaniczne obróbki powierzchni. Wśród nich wyróżnić można piaskowanie, obróbkę narzędziami ściernymi, szrotkowanie, skrobanie, itp. [3]. Odrębną grupę stanowi trawienie powierzchni klejonych, polegające na zanurzaniu elementów w roztworach odpowiednich związków chemicznych (kwas chromowy, kwas siarkowy, kwas azotowy) [14]. W zależności od zastosowanej metody, złącza uzyskują zróżnicowane poziomy wytrzymałości [13].

W przypadku połączeń klejonych bardzo ważnym aspektem jest zjawisko starzenia, polegające na pogorszeniu się własności skleiny z czasem [4, 13]. Istotne jest tutaj rozróżnienie pojęć wytrzymałość doraźna i wytrzymałość długotrwała. Wytrzymałość doraźna dotyczy połączenia tuż po osiągnięciu przez nie pełnej nośności. Wytrzymałość długotrwała (czasowa) uwzględnia możliwość spadku nośności spoiny w czasie. W przypadku złączy śrubowych czy spawanych spadek nośności w czasie jest zauważalny jedynie w przypadku wystąpienia bardzo niekorzystnych warunków (np. podwyższona temperatura), które mają miejsce sporadycznie. Tworzywa adhezyjne nawet w temperaturze otoczenia mogą ulegać negatywnym zjawiskom wpływającym niekorzystnie na nośność połączeń (np. pęczaniu) [8, 9]. Szkodliwe efekty mogą być (niestety, jedynie w pewnym zakresie) ograniczane poprzez odpowiednie modyfikacje składu zastosowanych klejów.

Nie może ująć uwadze fakt, iż spoiny klejowe wykazują niską odporność na oddziaływania termiczne [4]. Większość klejów powstaje na bazie tworzyw sztucznych, które, z reguły, wykazują niską odporność na zmiany temperatury, szczególnie jej podwyższenie.

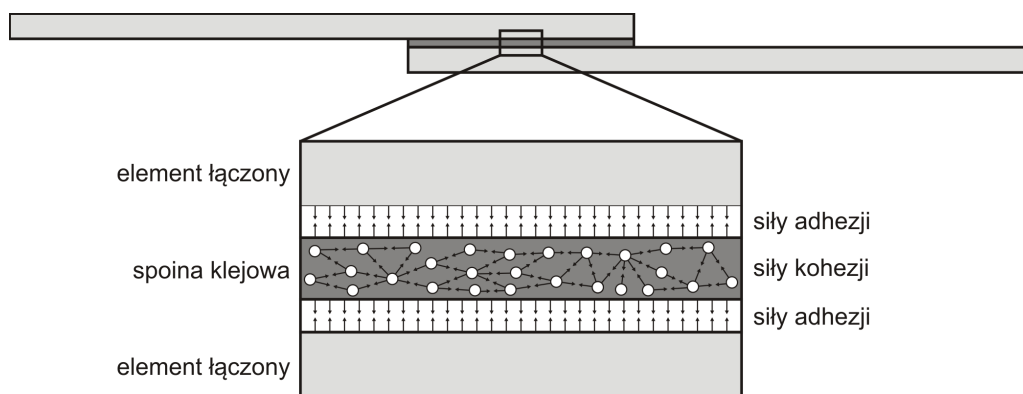
Kolejną wadą spoin klejowych jest niska odporność na obciążenia dynamiczne [13]. Pomimo iż złącza klejone mają pozytywny wpływ na redukcję drgań, same w sobie stosunkowo łatwo ulegają zniszczeniu w wyniku wystąpienia efektów zmęczeniowych.

Charakterystyczne cechy połączeń klejonych można przedstawić w postaci zwięzłego bilansu wad i zalet, który przedstawia się następująco:

- zalety:
 - wysoka wytrzymałość złączy obciążonych na ścinanie i ściskanie,
 - uniwersalność, możliwość łączenia różnego rodzaju materiałów,
 - brak wymogu stosowania specjalistycznego sprzętu i wykwalifikowanej kadry,
 - brak ingerencji w strukturę łączonego elementu,
 - brak efektu koncentracji naprężeń oraz wstępnych naprężeń i odkształceń,
 - naturalne tłumienie drgań,
- wady:
 - stosunkowo długi czas oczekiwania na osiągnięcie pożądanej wytrzymałości,
 - konieczność specjalnego przygotowywania powierzchni elementów klejonych,
 - spadek wytrzymałości w czasie (efekty starzenia kleju),
 - wrażliwość na zmiany temperatury,
 - mała odporność na efekty dynamiczne.

1.4. Mechanizmy zniszczeń połączeń klejonych

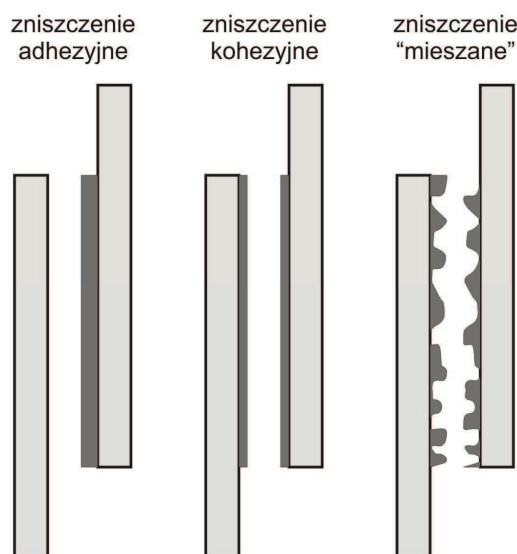
Nośność złączy klejonych determinują dwa zjawiska: adhezja oraz kohezja. Adhezja, innymi słowy, przyczepność, rozumiana jest jako zdolność przywierania kleju do powierzchni łączonych materiałów. Wyróżnia się adhezję mechaniczną, wynikającą z zazębienia się kleju i powierzchniowych warstw elementów, oraz właściwą (chemiczną), związaną z działaniem sił występujących na styku łączonych ciał (siły dyspersyjne, elektrostatyczne i indukcyjne) [22]. Kohezja, z kolei, to spoistość, określana jako wytrzymałość materiału tworzącego klej. W sposób schematyczny rozkład sił decydujących o nośności połączenia przedstawia rys. 1.2.



Rys. 1.2. Siły kohezji i adhezji w złączy klejowym

W zależności od tego, które z sił są przekroczone w wyniku działania obciążenia, można mówić o różnych mechanizmach zniszczenia połączenia klejonego. Wyróżniamy zniszczenia: adhezyjne, kohezyjne oraz mieszane (adhezyjno-kohezyjne), będące w pewnym sensie złożeniem dwóch podstawowych (rys. 1.3).

Warto zauważyć, że w przypadku badań eksperymentalnych rodzaj zniszczenia próbek determinuje możliwość określenia danego rodzaju wytrzymałości. Jeżeli próbka uległa zniszczeniu wskutek mechanizmu adhezyjnego, to możliwe jest wyznaczenie wytrzymałości adhezyjnej. W przeciwnym wypadku można określić wartość wytrzymałości kohezyjnej [8].



Rys. 1.3. Mechanizmy zniszczenia połączeń klejonych

1.4.1. Zniszczenie adhezyjne

Zniszczenie adhezyjne polega na utracie przyczepności skleiny do łączonych elementów. Występuje, gdy naprężenia wywołane obciążeniem zewnętrznym przekraczają graniczne naprężenia przyczepności spoiny klejowej do spajanych materiałów. Skleina zniszczona w wyniku mechanizmu adhezyjnego charakteryzuje się całkowitym odspojeniem od części klejonych (rys. 1.3), niekoniecznie w pełni od jednej z nich. Zakładając prawidłowe przyjęcie innych parametrów, przyczyn tego rodzaju zniszczenia można doszukiwać się w nieprawidłowym przygotowaniu powierzchni klejonych elementów. Występuje ono jednak również w przypadku złączy prawidłowo przygotowanych, zwykle ze względu na wysoką wytrzymałość materiału tworzącego klej w stosunku do wytrzymałości adhezyjnej połączenia.

1.4.2. Zniszczenie kohezyjne

Zniszczenie kohezyjne wynika z utraty nośności materiału tworzącego klej. Wiąże się ono ściśle z wytrzymałością samego tworzywa adhezyjnego. Występuje, gdy stan naprężeń wywołany obciążeniem zewnętrznym prowadzi do zniszczenia skleiny samej w sobie. Jest to pożądany mechanizm zniszczenia, ponieważ pozwala na lepsze wykorzystanie własności tworzywa adhezyjnego. Złącze zniszczone w sposób kohezyjny charakteryzuje się rozwarstwieniem spoiny. Część kleju pozostaje praktycznie na całej powierzchni obydwu materiałów łączonych (rys. 1.3). W przypadku zastosowania kleju odpowiedniej wytrzymałości oraz prawidłowego przygotowania powierzchni elementów łączonych, ten rodzaj zniszczenia występuje, gdy wykonana warstwa kleju posiada znaczną grubość.

1.5. Normy dotyczące połączeń klejonych

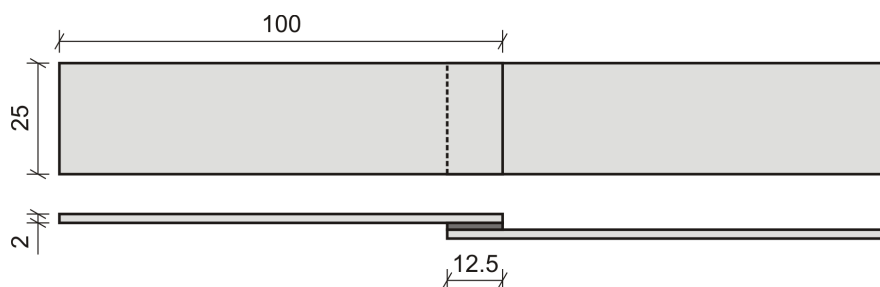
Z racji stosunkowo małej popularności połączeń klejonych nie powstały normy projektowe umożliwiające kompleksowe projektowanie konstrukcji z ich wykorzystaniem. Eurokod 3 (PN-EN 1993-1-8:2006 Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 1-8 Projektowanie węzłów) nie wspomina nawet możliwości stosowania kleju do łączenia elementów metalowych, podając metody obliczeń jedynie dla połączeń spawanych oraz trzpieniowych (śruby, nity, sworznie) [20].

Istnieją jednak normy pozwalające na wyznaczanie nośności elementarnych złączy. Ich zastosowanie umożliwia określenie wytrzymałości pojedynczych połączeń, wydzielonych z konstrukcji. Do takich norm należą, między innymi:

- PN-69/C-89300 Kleje do metali, oznaczenie wytrzymałości na ścinanie [18],
- PN-EN 1465:2009 Kleje. Oznaczanie wytrzymałości na ścinanie przy rozciąganiu połączeń na zakładkę [19],
- DIN EN ISO/DIS 11003-2 Klebstoffe, Bestimmung des Scherverhaltens von Strukturklebstoffen, Teil 2., Scherprüfverfahren für dicke Fügeile. Dezember 2001 [17].

Są to normy dotyczące połączeń zakładowych pojedynczych pracujących na ścinanie. Pierwsza z wspomnianych norm podaje informacje na temat określania wytrzymałości połączeń

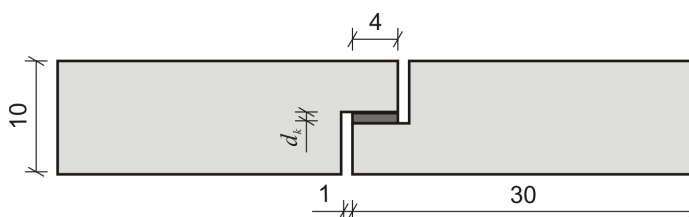
klejonych jednozakładkowych. Ścisłe określona jest geometria próbek, które należy wykonać na potrzeby badań (rys. 1.4, wymiary w mm).



Rys. 1.4. Próbką do badań wytrzymałości na ścinanie według [18]

Wspomniana norma została wycofana, a jej miejsce zajęła [19]. W stosunku do wersji pierwotnej zmieniła się nieco geometria próbki (grubość płaskowników zmniejszono do 1.6 mm).

Normy te jednak nie podają metody wyznaczania zależności naprężenia stycznego od kąta odkształcenia postaciowego (poślizgu). Z pomocą przychodzi norma niemiecka [17]. Zakłada ona zastosowanie zupełnie innych próbek (rys. 1.5, wymiary w mm), ponieważ w typowym połączeniu jednozakładkowym występują dodatkowe odkształcenia wynikające z nieosiowego charakteru obciążenia.



Rys. 1.5. Próbką do badań wytrzymałości na ścinanie według [17]

1.6. Cel i zakres pracy

Praca obejmuje swoim zakresem analizę wytrzymałościową połączenia zakładkowego pojedynczego elementów konstrukcji metalowych, wykonanych z aluminium. Na wybór tego rodzaju połączenia wpłynął niski stopień skomplikowania, prostota wykonania i przeprowadzania badań oraz powszechność zastosowania w konstrukcjach klejonych [1].

Problem został przeanalizowany na trzy sposoby. Pierwsze podejście polegało na wyznaczeniu teoretycznego rozkładu naprężeń stycznych w spoinie klejowej według modeli analitycznych (rozdział 2). Kolejną część stanowiła analiza doświadczalna, polegająca na wyznaczeniu nośności połączenia na podstawie badań niszczących przygotowanych próbek złącza (rozdział 3). Ostatnie podejście do problemu polegało na analizie numerycznej modelu metody elementów skończonych w programie Abaqus (rozdział 4).

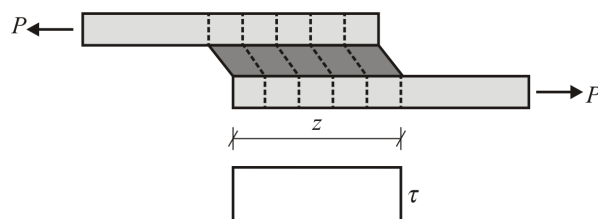
Celem pracy było określenie nośności połączenia oraz rozkładu naprężeń w spoinie za pomocą trzech przytoczonych podejść. Na podstawie porównania wyników poszczególnych analiz możliwa była weryfikacja modelu numerycznego oraz założeń poczynionych na potrzeby obliczeń analitycznych.

2. MODELE ANALITYCZNE POŁĄCZEŃ KLEJONYCH

Analizie teoretycznej poddano klejone połączenie zakładkowe pojedyncze o ustalonej geometrii obciążone na ścinanie. Modele analityczne wykorzystano w celu wyznaczenia rozkładu naprężeń stycznych na długości spoiny. Zastosowano uproszczone podejście liniowo-sprężyste oraz analizę według Volkersena.

2.1. Uproszczona analiza liniowo-sprężysta

Model uproszczony zakłada nieodkształcalność elementów klejonych, uznając je za sztywne części obciążone osiowo [1]. Spoina klejowa, z kolei, potraktowana jest jako ciało doznające jedynie odkształceń postaciowych, stałych na długości zakładki (rys. 2.1).



Rys. 2.1. Deformacje w złączu jednozakładkowym ze sztywnymi elementami łączonymi [1]

Skutkiem powyższych założeń jest równomierny rozkład naprężeń stycznych na długości zakładki. Wartość tych naprężeń można wyznaczyć ze wzoru (2.1). Naprężenia normalne w elementach poza zakładką są stałe, a ich wartość wyznacza się według wzoru (2.2), natomiast na długości zakładki ich wartość spada liniowo do zera.

$$\tau = \frac{P}{b_z z} \quad (2.1)$$

τ – naprężenia ścinające w spoinie klejowej,

P – siła rozciągająca próbkę.

b_z – szerokość zakładki,

z – długość zakładki.

$$\sigma = \frac{P}{A_p} \quad (2.2)$$

σ – naprężenia normalne w próbce,

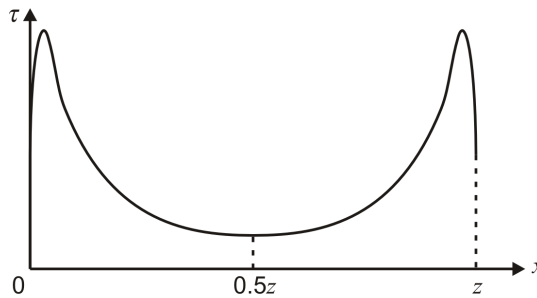
A_p – pole przekroju poprzecznego płaskownika.

Zaprezentowane podejście obliczeniowe wynika z podstawowych zależności wytrzymałościowych, wobec czego jest proste w zastosowaniu. W praktyce wykorzystuje się je do wyznaczania nośności połączeń obciążonych na ścinanie w ujęciu normowym [18, 19].

W opracowaniu podejście to zostało zastosowane do wyznaczenia wytrzymałości na ścinanie połączeń klejonych w badaniach doświadczalnych (pkt. 3).

Prostota analizy liniowo-sprężystej ze sztywnymi elementami łączonymi umożliwia jedynie wstępną ocenę nośności złącza, ponieważ wiąże się z pewnymi błędami. Przede wszystkim, w rzeczywistości rozkład naprężeń w połączeniu nie jest jednorodny,

czego dowiedziono na podstawie wielu studiów [1, 3, 13, 14]. W typowym przypadku naprężenia styczne zmieniają się wzdłuż długości zakładki w sposób zaprezentowany na rys. 2.2.

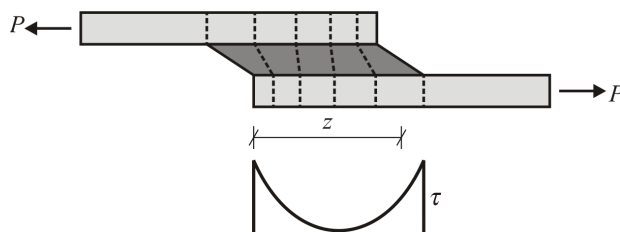


Rys. 2.2. Rozkład naprężenia stycznego w spoinie klejowej na długości zakładki według [3]

Potrzeba przeprowadzania bardziej złożonych analiz wpłynęła na konieczność powstawania bardziej skomplikowanych, lecz dokładniejszych podejść analitycznych. Należy tutaj wspomnieć, między innymi, opisany poniżej model według Volkersena.

2.2. Model Volkersena

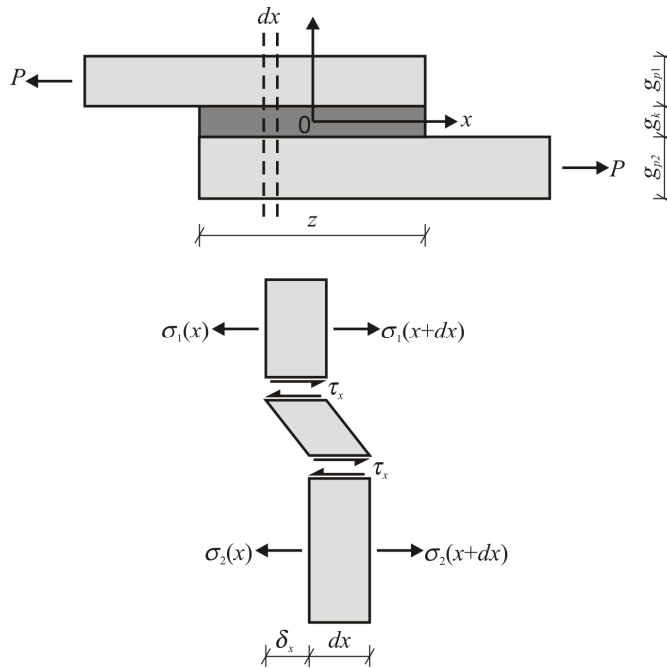
Model zaproponowany przez Volkersena w 1938 roku [1] jest rozszerzeniem podejścia uproszczonego. Tutaj także obowiązuje założenie osiowości obciążenia, jednak elementy łączone nie są już sztywne, lecz sprężyste, posiadają więc sztywność o pewnej ustalonej skończonej wartości. Skutkuje to zróżnicowaniem odkształceń płaskownika na długości zakładki (rys. 2.3). Nadal są to jedyne odkształcenia, jakich doznaje element łączony.



Rys. 2.3. Deformacje w złączu jednozakładkowym ze sprężystymi elementami łączonymi [1]

Przy założeniu idealnego przylegania kleju do płaskowników, niejednorodny rozkład odkształceń podłużnych elementów łączonych przekłada się na zróżnicowanie odkształceń postaciowych spoiny. Rozkład naprężeń jest wówczas zbliżony do rzeczywistego – wartości maksymalne występują przy krawędziach zakładki, a minimalna wartość osiągnięta jest w środku złącza (por.rys. 2.2 i 2.3).

Model, pomimo pewnego rozbudowania i zbliżenia do wyników rzeczywistych, nadal nie jest zbyt skomplikowany. W analizie wykorzystuje się założenie, że elementy klejone są poddane jedynie działaniu naprężeń normalnych a skleina – naprężeń stycznych. Naprężenia panujące w przekrojach po obu stronach nieskończenie małego wycinka złącza o szerokości dx przedstawia rys. 2.4.



Rys. 2.4. Naprężenia w przekroju złącza klejonego według teorii Volkersena [1]

Względne przemieszczenie obydwu łączonych elementów dla wyciętego elementu wyznaczyć można ze wzoru (2.3).

$$\delta_x = \delta_0 - \int_{-0.5z}^x \varepsilon_1 dx + \int_{-0.5z}^x \varepsilon_2 dx \quad (2.3)$$

- δ_x – względne przemieszczenie elementów klejonych w przekroju o współrzędnej x ,
- δ_0 – względne przemieszczenie elementów klejonych na początku zakładki,
- x – współrzędna określająca położenie analizowanego przekroju złącza,
- z – długość zakładki,
- ε_1 – odkształcenie podłużne górnego płaskownika,
- ε_2 – odkształcenie podłużne dolnego płaskownika.

Obliczenia przeprowadzono dla jednostkowej szerokości zakładki ($b_z = 1$) przy założeniu działania obciążenia P na górny płaskownik. Wówczas odkształcenia podłużne płaskowników wyznaczyć można ze wzorów (2.4) oraz (2.5).

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{Eg_{p1}} \left[P - \int_{-0.5z}^x \tau_x dx \right] \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{Eg_{p2}} \int_{-0.5z}^x \tau_x dx \quad (2.5)$$

- E – moduł sprężystości podłużnej (Younga) płaskowników,
- g_{p1} – grubość górnego płaskownika,
- g_{p2} – grubość dolnego płaskownika,
- τ_x – funkcja naprężeń stycznych w przekroju na jednostkę szerokości złącza.

Ze względu na fakt, iż założono idealne przyleganie kleju do płaskowników („wspólne odkształcenia”), względne przemieszczenie łączonych elementów można wyznaczyć także w zależności od własności skleiny. Zależność tę przedstawia wzór:

$$\delta_x = \frac{g_k}{G} \tau_x. \quad (2.6)$$

G – moduł ścinania (Kirchhoffa) materiału kleju,

g_k – grubość spoiny klejowej.

Przekształcając odpowiednio zależności (2.4), (2.5) i (2.6) oraz podstawiając je do (2.3), można otrzymać równanie różniczkowe postaci:

$$\tau_x'' = \omega^2 \tau_x. \quad (2.7)$$

W celu przejrzystego zaprezentowania rozwiązania, w powyższym równaniu zastosowano podstawienie – wprowadzono wielkość pomocniczą ω^2 , która oznacza:

$$\omega^2 = \frac{G(g_{p1} + g_{p2})z^2}{Eg_{p1}g_{p2}g_k}. \quad (2.8)$$

Rozwiązanie równania (2.7) przyjmuje postać:

$$\tau_x = A_1 \cosh \omega x + A_2 \sinh \omega x. \quad (2.9)$$

W rozwiązaniu stałe A_1 oraz A_2 zależą od warunków brzegowych. Dla ułatwienia dalszych obliczeń przeprowadzono je na bezwymiarowej wielkości:

$$\tilde{\tau} = \frac{\tau_x}{\tau_m}. \quad (2.10)$$

$\tilde{\tau}$ – bezwymiarowy mnożnik średniej wartości naprężeń stycznych,

τ_m – wartość średnia naprężeń stycznych na jednostkę szerokości złącza.

Średnią wartość naprężeń stycznych na jednostkę szerokości złącza określa się następująco:

$$\tau_m = \frac{P}{z}. \quad (2.11)$$

Po uwzględnieniu warunków brzegowych wzór otrzymuje postać:

$$\tilde{\tau} = \frac{\omega \cosh \omega \tilde{x}}{2 \sinh \frac{\omega}{2}} + \left(\frac{\psi - 1}{\psi + 1} \right) \frac{\omega \sinh \omega \tilde{x}}{2 \cosh \frac{\omega}{2}}. \quad (2.12)$$

We wzorze uwzględniono szereg bezwymiarowych współczynników:

$$\omega^2 = (1 + \psi)\phi \quad \psi = \frac{g_{p1}}{g_{p2}} \quad \phi = \frac{Gz^2}{Eg_{p1}g_k} \quad \tilde{x} = \frac{x}{z}. \quad (2.13)$$

W przypadku, gdy elementy łączone mają identyczną grubość ($g_{p1} = g_{p2} = g_p$), wzór (2.12) upraszcza się do (2.14).

$$\tilde{\tau} = \sqrt{\frac{\phi}{2}} \frac{\cosh \tilde{x} \sqrt{2\phi}}{\sinh \sqrt{\frac{\phi}{2}}} . \quad (2.14)$$

Wartość ekstremalna mnożnika naprężeń średnich wynosi wówczas:

$$\tilde{\tau}_{\max} = \sqrt{\frac{\phi}{2}} \coth \sqrt{\frac{\phi}{2}} . \quad (2.15)$$

Dla długich złączy (z o znacznej wartości) wzór (2.15) upraszcza się do:

$$\tilde{\tau}_{\max} = \sqrt{\frac{\phi}{2}} = \sqrt{\frac{Gz^2}{2Eg_p g_k}} . \quad (2.16)$$

Wartość maksymalnych naprężeń stycznych można wówczas wyznaczyć na podstawie wzorów (2.10), (2.11) i (2.16):

$$\tau_{x,\max} = P \sqrt{\frac{G}{2Eg_p g_k}} . \quad (2.17)$$

Wobec powyższego, wartość naprężeń maksymalnych nie zależy od długości złącza [1].

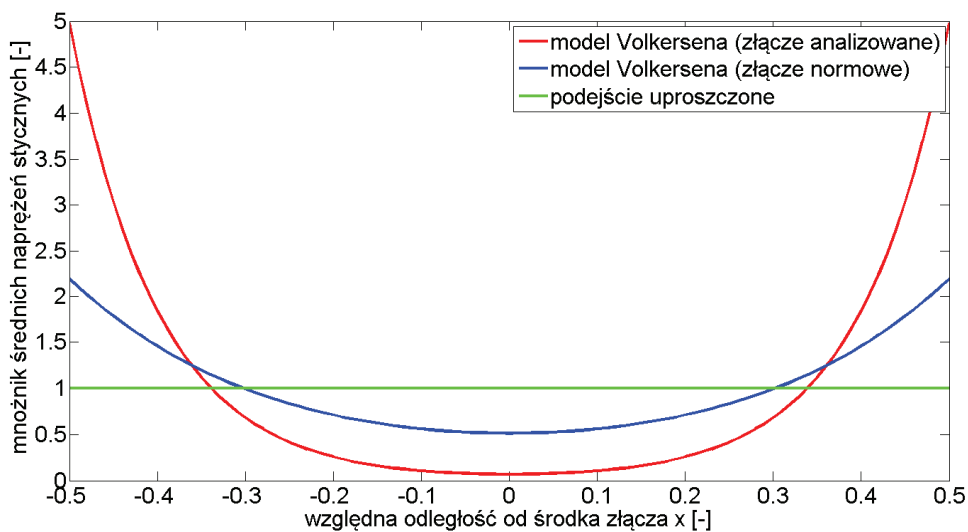
2.3. Obliczenia z wykorzystaniem modeli teoretycznych

Na potrzeby obliczeń przyjęto pewną geometrię złącza oraz materiały (zostaną one wykorzystane także w analizie badań doświadczalnych i modelu numerycznym). Założone wielkości geometryczne i materiałowe są następujące:

$$g_p = 3 \text{ mm} , \quad g_k = 0.2 \text{ mm} , \quad z = 40 \text{ mm} , \quad E = 68.408 \text{ GPa} , \quad G = 1.270 \text{ GPa} .$$

Rozkład naprężeń według modelu Volkersena określono w funkcji bezwymiarowego mnożnika naprężeń średnich $\tilde{\tau}$. Wartość naprężeń średnich określa stały poziom naprężeń w modelu uproszczonym, wobec czego bezwymiarowy współczynnik $\tilde{\tau}$ jest stały i równy 1.

Obliczenia przeprowadzono w programie MATLAB®. Wykorzystano przyjęte dane oraz zależności (2.13) i (2.14). Wyniki porównania modeli przedstawia rys. 2.5.

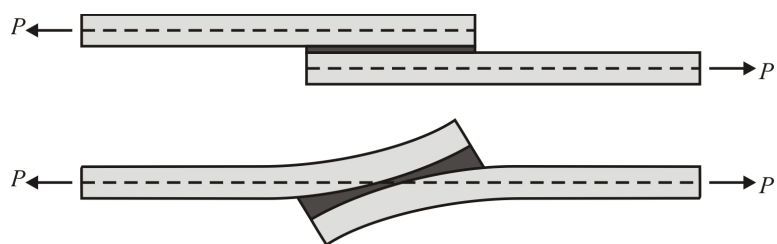


Rys. 2.5. Porównanie rozkładów analitycznych naprężeń stycznych na długości złącza

2.4. Podsumowanie rozwiązań analitycznych

Analizując wykres na rys. 2.5 można zauważyć, że naprężenia styczne w pobliżu krawędzi analizowanego złącza określone na podstawie modelu Volkersena niemal pięciokrotnie przewyższają średni poziom naprężeń określony według podejścia uproszczonego. W przypadku złącza o geometrii normowej (według [18]), wzrost naprężeń na krawędziach jest znacznie mniejszy, około dwukrotny. Prowadzi to do stwierdzenia, iż im mniejsza jest długość zakładki, tym bardziej równomierny jest rozkład naprężenia na jej długości. Wobec tego, uproszczonego modelu nie należy stosować w przypadku złączy o długościach znacznie przekraczających wielkość normową.

Należy pamiętać, że zaprezentowane modele zakładają znaczne uproszczenia. Jednym z nich jest pominięcie wpływu nieosiowego charakteru obciążenia [1]. Początkowo obciążenie P działa na pewnym mimośrodku, powodując powstanie dodatkowego momentu zginającego, wywołującego zginanie płaskowników oraz rozciąganie skleiny (rys. 2.6). Przy osiągnięciu pewnego poziomu obciążenia, mimośród jest redukowany w sposób automatyczny w wyniku uzyskania deformacji złącza.



Rys. 2.6. Rysunek deformacji złącza jednozakładkowego obciążonego nieosiowo

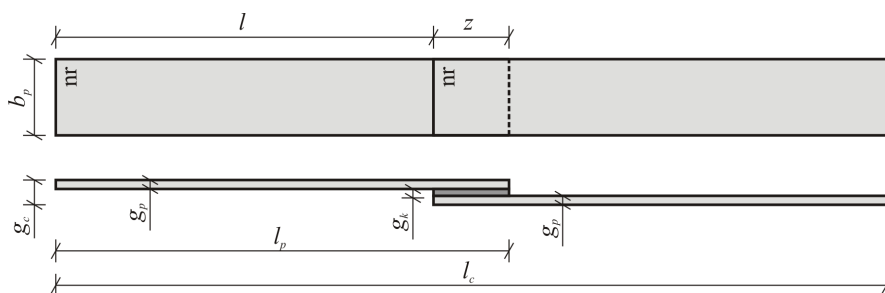
3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Badania doświadczalne stanowią punkt wyjścia do analizy w bardzo wielu praktycznych zagadnieniach inżynierskich. Na ich podstawie możliwe jest określenie zachowania rzeczywistych konstrukcji. Wykonywanie profesjonalnych pomiarów wiąże się jednak nierzadko z koniecznością poświęcenia znacznych ilości czasu oraz środków finansowych. Wobec tego, pojawia się konieczność opracowywania modeli teoretycznych i numerycznych, dla których badania doświadczalne stanowią jedynie podstawę. Raz skonstruowany model może posłużyć do analiz konstrukcji o podobnej strukturze, ale innych parametrach.

W tej części opracowania opisano badania eksperymentalne przeprowadzone na serii próbek pojedynczego zakładkowego połączenia klejonego płaskowników aluminiowych. Przedstawiona została przyjęta metoda przygotowania próbek, przebieg badań, ich rezultaty oraz wnioski.

3.1. Przygotowanie próbek

Przed przystąpieniem do klejenia sporządzono projekt wykonania próbek. Ze względu na brak dostępności do odpowiednich materiałów, zamiast wymiarów zaproponowanych w normie [18], przygotowano własną geometrię (rys. 3.1). Oznaczenia zawarte na rysunkach zostały opisane w tabeli 3.1 wraz z podaniem ich wartości.

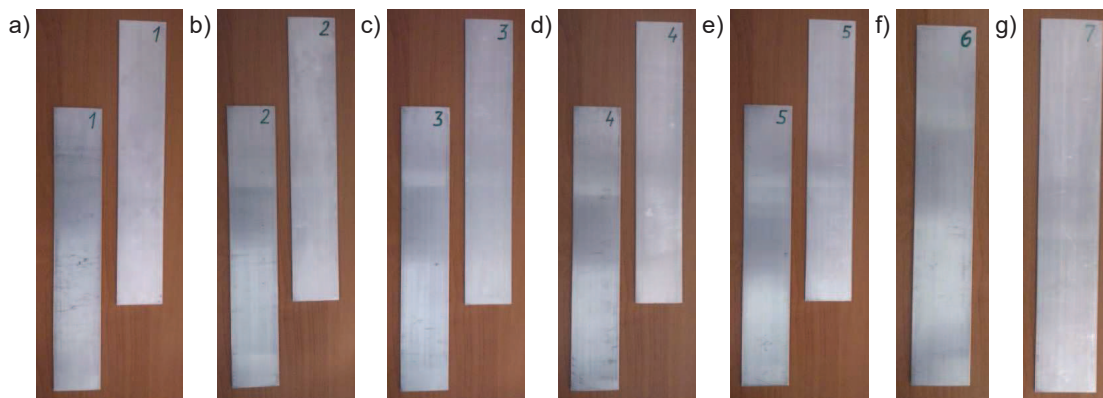


Rys. 3.1. Projekt geometrii próbki klejonej

Tabela 3.1. Projektowana geometria próbek do badań eksperymentalnych

Grubość całkowita g_c [mm]	Długość całkowita l_c [mm]	Grubość płaskownika g_p [mm]	Szerokość płaskownika b_p [mm]	Długość płaskownika l_p [mm]	Długość zakładki z [mm]	Grubość kleju g_k [mm]	Długość poza złączeniem l [mm]
6.2	440	3	40	240	40	0.3	200

Próbki wykonano z płaskowników aluminiowych o wymiarach 3x40x1000 mm. Kształtowniki pocięto piłką ręczną na 12 części o długości 240 mm, a ich krawędzie oszlifowano. Dziesięć belek, ponumerowanych parami od 1 do 5 wykorzystano do przygotowania próbek połączenia zakładkowego (fot. 3.1 a – e). Dwie ostatnie (o numerach 6 i 7) posłużyły do określenia parametrów materiału, z którego wykonano próbki (fot. 3.1 f, g).

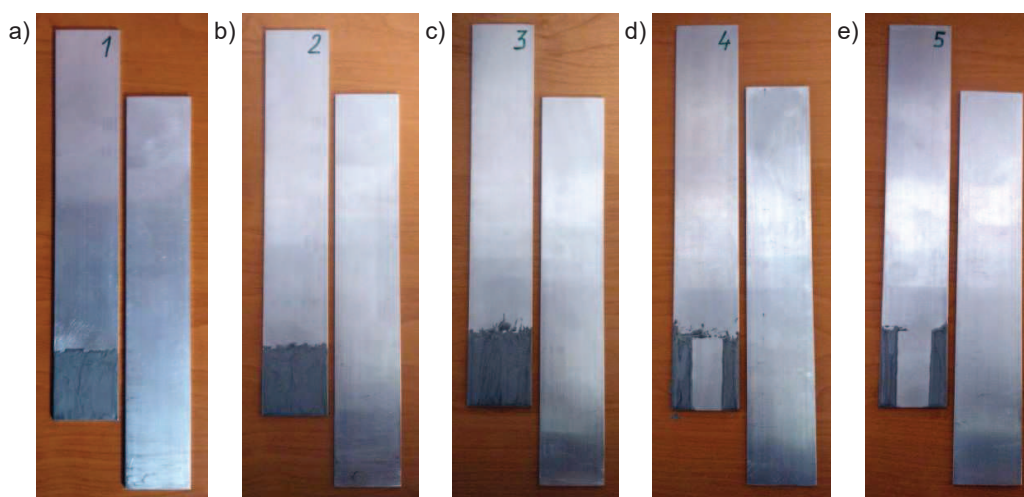


Fot. 3.1. Płaskowniki po podzieleniu na części

Na tym etapie belki 6 i 7 były już gotowe do badań, natomiast próbki o numerach 1 – 5 poddano dalszym przygotowaniom, polegającym na schropowaceniu powierzchni zakładek oraz ich odtłuszczeniu. Miejsca złączeń przetarto papierem ściernym o ziarnistości P220, a następnie przemywano kilkakrotnie ściereczką nasączoną acetonem do momentu, aż ściereczka po przetarciu była czysta.

Do połączenia płaskowników wykorzystano dwuskładnikowy klej *Epoxy Glue Metal E-143* firmy Technicqll. Jest to kompozyt żywicy epoksydowych i proszków metali [24], dedykowany do łączenia metali, nadający się również do spajania innych materiałów. Ze strony producenta pobrano informację na temat wytrzymałości kleju na ścinanie: $\tau_{d,k} = 10.5 \text{ MPa}$ [24].

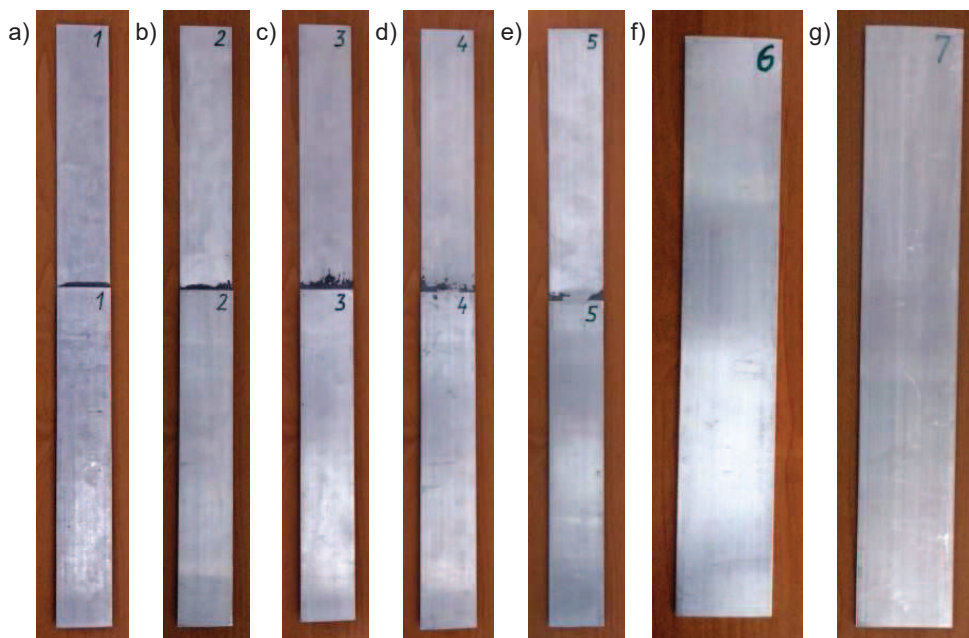
Klejenie próbek przeprowadzono dnia 2 listopada 2015 r. W każdym przypadku jeden element z pary pokryto klejem na powierzchni zakładki, a następnie nałożono drugi. W przypadku próbek 1 – 3 klej został nałożony na całej powierzchni zakładki, natomiast w próbkach nr 4 i 5 pozostawiono pośrodku niepokryty klejem pasek o szerokości 2 cm. Próbki przygotowane do scalenia przedstawia fot. 3.2.



Fot. 3.2. Płaskowniki przygotowane do sklejenia z nałożonym klejem

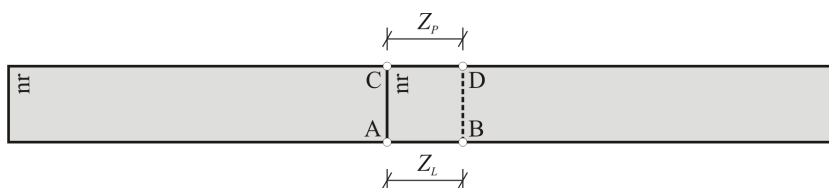
Scalone próbki dociążono masą 1.5 kg przyłożoną centralnie nad zakładką. Po upływie czasu wstępnego wiązania (30 minut) obciążenie usunięto, a odciążone próbki pozostawiono nieruchomo na 24 godziny (czas osiągnięcia pełnej wytrzymałości spoiny).

Według normy [18], aby wyniki pomiarów były miarodajne, należy wykonać minimum 10 próbek. Warunek ten został pominięty ze względu na poglądowy charakter badań. Ostatecznie, wykonano 5 próbek połączeń jednozakładkowych oraz dwie próbki kontrolne do badań własności materiałowych (6 i 7). Gotowe próbki przedstawia fot. 3.3.



Fot. 3.3. Próbkę gotowe do badań

Po wykonaniu próbek spiłowano wystające części spoiny, aby umożliwić przeprowadzenie pomiarów kontrolnych. Zweryfikowano wymiary próbek pod względem geometrii spoiny klejowej. Zbadano długość zakładki oraz grubość warstwy kleju (tę drugą jako różnicę całkowitej grubości próbki w obrębie zakładki i podwójonej grubości płaskownika). Pomiar grubości wykonano w narożach złącza, a długość zakładki zmierzono z obu stron próbki. Schemat pomiarów przedstawia rys. 3.2. Wyniki badań geometrii przedstawiono w tabeli 3.2.



Rys. 3.2. Schemat pomiaru wymiarów rzeczywistych próbki

Tabela 3.2. Rzeczywista geometria badanych próbek

Nr próbki	Zakładki boczne		Średnia długość zakładki Z [mm]	Grubość całkowita próbki				Średnia grubość kleju G_k [mm]
	Z_L [mm]	Z_P [mm]		$G_{c,A}$ [mm]	$G_{c,B}$ [mm]	$G_{c,C}$ [mm]	$G_{c,D}$ [mm]	
1	41.0	40.6	40.8	6.28	6.26	6.30	6.28	0.28
2	41.1	41.3	41.2	6.32	6.28	6.28	6.26	0.29
3	40.8	41.0	40.9	6.28	6.32	6.32	6.34	0.32
4	40.0	40.0	40.0	6.20	6.14	6.16	6.22	0.18
5	40.9	41.1	41.0	6.22	6.24	6.16	6.14	0.19

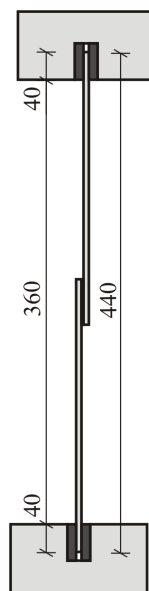
Na podstawie pomiarów kontrolnych określono zgodność wykonania próbek z założeniami projektowymi. Można dostrzec odchylenia od zaplanowanej geometrii. W przypadku długości zakładki, największe odchylenie względne od wartości założonej (próbka nr 2) wynosi 3%. Znacznie większe różnice wystąpiły w przypadku grubości spoiny klejowej. O ile geometria próbek o numerach 1 – 3 nie wykazała się dużymi odstępstwami od założenia (różnica maksymalnie 7%), to w przypadku próbek 4 i 5 odchylenia wyniosły już 40% i 37%. Prawdopodobnie było to spowodowane większą możliwością rozplaszczenia spoiny, ponieważ próbki 4 i 5 nie posiadały kleju na całej powierzchni zakładki.

Konieczność wykonania pomiarów kontrolnych jest uzasadniona możliwością przemieszczania się elementów łączonych podczas wiązania, wypływaniem kleju na krawędziach zakładki oraz rozlewaniem się kleju wewnątrz zakładki (dotyczy próbek 4 i 5).

3.2. Badania połączeń klejonych (próbki 1 – 5)

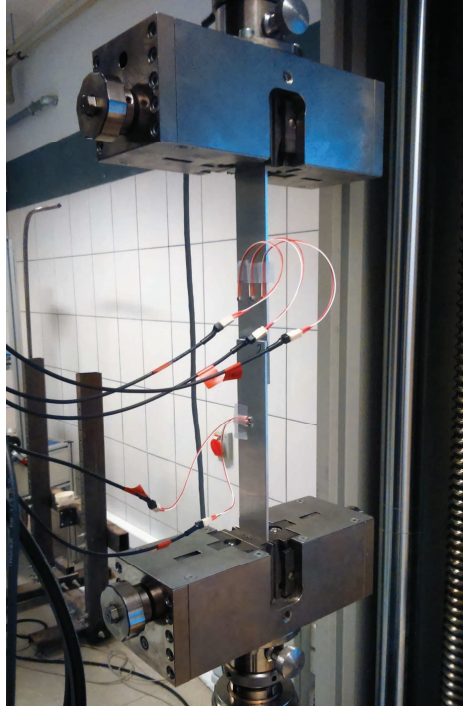
Badania doświadczalne przeprowadzono 4 listopada 2015 r., po upływie 48 godzin od momentu klejenia w Laboratorium Metod Doświadczalnych w Analizie Konstrukcji Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska. Pomiarów wykonano za pomocą maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell 400. Przygotowane próbki poddano jednoosiowemu rozciąganiu.

Kolejne próbki złączy klejonych doprowadzono do zniszczenia po uprzednim umieszczeniu ich w szczękach maszyny w sposób zaprezentowany na rys. 3.3. Przykładową próbkę podczas badania przedstawia fot. 3.4.



Rys. 3.3. Położenie próbki klejonej w szczękach maszyny wytrzymałościowej, wymiary w mm

Podczas każdego z badań rejestrowano w czasie rzeczywistym aktualną wartość siły pionowej rozciągającej złącze oraz wydłużenia bezwzględnego. W przypadku próbki nr 1 założono prędkość badania na poziomie 2 mm/min, a dla kolejnych (2 – 5) przyjęto 0.2 mm/min. Zapisane wyniki pomiarów posłużyły do dalszej analizy.



Fot. 3.4. Próbkę nr 2 podczas obciążania w maszynie wytrzymałościowej

Wszystkie próbki uległy zniszczeniu w wyniku utraty przyczepności spoiny klejowej do łączonych elementów. Wobec tego, każde ze złączy uległo awarii w wyniku adhezyjnego mechanizmu zniszczenia. Zniszczone próbki przedstawia fot. 3.5.



Fot. 3.5. Próbkę 1 – 5 po zniszczeniu

Analiza wyników badań próbek 1 – 5 polegała na określeniu wartości siły niszczącej złącze. Do wykonania obliczeń oraz rysunków posłużył program MATLAB®.

Zgromadzone dane pozwoliły na określenie maksymalnych naprężeń ścinających w spoinie $\tau_{d,k}$. Naprężenia te wyznaczono na podstawie wzoru (3.1).

$$\tau_{d,k} = \frac{P_{\max}}{\beta_A A_z} \quad (3.1)$$

P_{\max} – maksymalna siła rozciągająca próbkę,

A_z – powierzchnia zakładki,

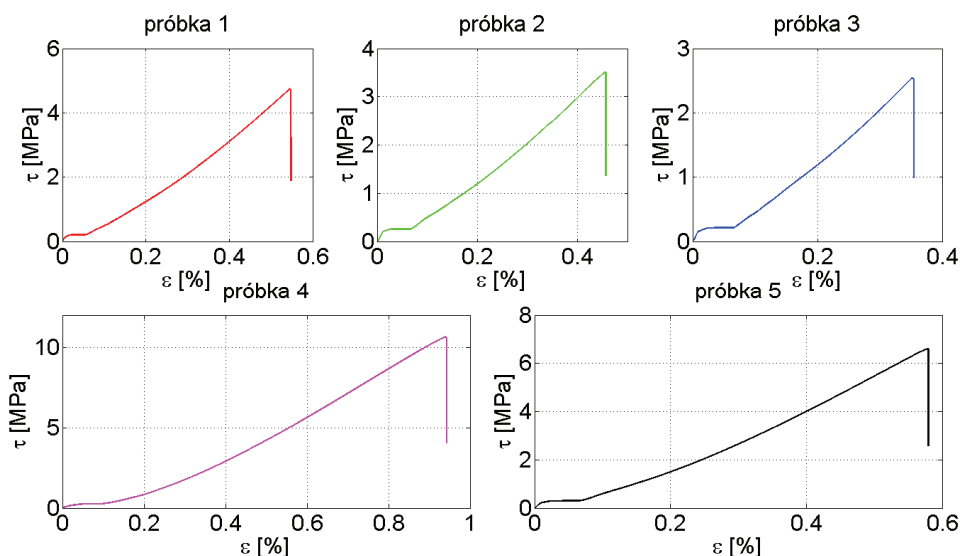
β_A – współczynnik korekcyjny ze względu na rozlanie kleju.

Powyższy wzór stworzono na podstawie uproszczonej zależności (2.1) po zmodyfikowaniu jej przez współczynnik korekcyjny, dotyczący pola powierzchni spoiny. Zastosowano go dla próbek 4 i 5, a jego wartość określono na podstawie pomiarów po zniszczeniu próbek. Współczynnik pokazuje, ile razy pole spoiny zwiększyło się od momentu nałożenia kleju do jego stwardnienia. Wyniki obliczeń przedstawia tabela 3.3.

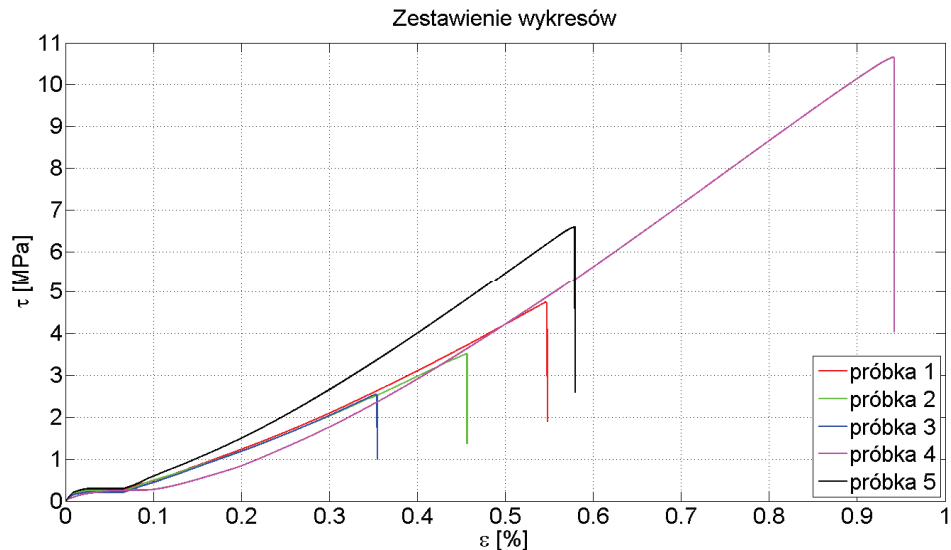
Tabela 3.3. Określenie naprężeń niszczących próbek

Nr próbki	P_{\max} [N]	b_z [mm]	Z [mm]	A_z [mm ²]	β_A [-]	$\tau_{d,k}$ [MPa]
1	7768	40	40.8	1632	1.0	4.76
2	5802	40	41.2	1648	1.0	3.52
3	4160	40	40.9	1636	1.0	2.54
4	13637	20	40.0	800	1.6	10.65
5	7581	20	41.0	820	1.4	6.60

Na podstawie danych pomiarowych przygotowano również wykresy obrazujące zależność naprężeń stycznych w spoinie od odkształceń (rys. 3.4). Porównanie uzyskanych zależności przedstawia rys. 3.5. Zarejestrowane wartości sił przeskalowano według wzoru (3.1). Podobnie postąpiono w przypadku wydłużeń, które podzielono przez rozstaw szczęk maszyny, równy 360 mm. Uzyskane wielkości odkształceń nie są jednak miarodajne ze względu na nieuwzględnienie odkształcalności elementów maszyny.



Rys. 3.4. Wykresy $\tau - \epsilon$ dla próbek o numerach 1 – 5

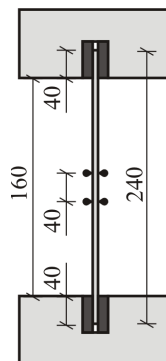


Rys. 3.5. Zestawienie wykresów $\tau - \epsilon$ dla próbek o numerach 1 – 5

3.3. Badania płaskowników aluminiowych (próbki 6 oraz 7)

Próbki nr 6 i 7 poddano badaniom w celu wyznaczenia własności materiałowych stopu aluminium, z którego wykonano płaskowniki, wykorzystane do badań.

W celu wyznaczenia modułu Younga materiału, próbkę nr 6 obciążano czterokrotnie w maszynie wytrzymałościowej przy zastosowaniu ekstensometru. Schemat ułożenia próbki w szczękach maszyny Zwick przedstawia rys. 3.6.



Rys. 3.6. Położenie płaskownika w szczękach maszyny wytrzymałościowej, wymiary w mm

W kolejnych podejściach zakładano zróżnicowane poziomy obciążenia, kolejno: 2 kN, 2 kN, 6 kN i 10 kN. Według szacunków siły te nie wywołały powstania w próbce naprężeń przekraczających granicę plastyczności, wobec czego badania były prowadzone w zakresie liniowo-sprężystym. Prędkość pomiaru w pierwszym badaniu założono równą 2 mm/min a w kolejnych – 1 mm/min. Początkową długość bazy pomiarowej ekstensometru ustalono na poziomie 40 mm.

Podczas badań, podobnie, jak dla próbek 1 – 5, rejestrowano wartość siły oraz przemieszczenia odniesione do bazy pomiarowej ekstensometru. Na podstawie zebranych danych możliwe było wyznaczenie modułu Younga dla materiału, z którego wykonane zostały płaskowniki.

W ostatnim kroku próbki nr 6 i 7 obciążono do zniszczenia. Prędkość badania przyjęto równą 5 mm/min (6), a następnie 2 mm/min (7). Dla przykładu, zniszczoną próbkę nr 6 przedstawiono na fot. 3.6.



Fot. 3.6. Próbkę 6 po zniszczeniu

Na podstawie rozciągania próbki nr 6 z wykorzystaniem ekstensometru określono zależność naprężeń normalnych panujących w przekroju płaskownika σ_E od jego odkształceń ε_E . Podczas badań zarejestrowano wielkości siły rozciągającej P oraz wydłużenia u . Wielkości te odpowiednio przeskalowano do naprężeń i odkształceń według wzorów:

$$\sigma_E = \frac{P}{A_p}, \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_E = \frac{u}{l_{o,e}}, \quad (3.3)$$

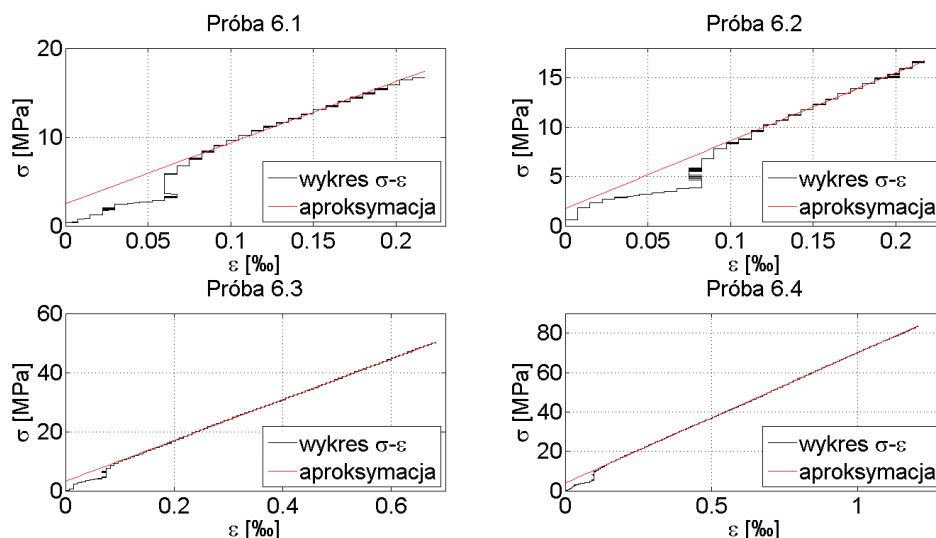
P – siła rozciągająca płaskownik,

A_p – pole przekroju poprzecznego płaskownika,

Δl_p – wydłużenie bezwzględne płaskownika,

$l_{o,e}$ – początkowa długość bazy pomiarowej ekstensometru.

Wykresy $\sigma - \varepsilon$ sporządzono dla czterech prób rozciągania próbki nr 6 (6.1 – 6.4). Zostały one zaprezentowane na rys. 3.7.



Rys. 3.7. Wykresy $\sigma - \varepsilon$ dla próbek nr 6 do wyznaczenia modułu Younga

Na wykresach zależności naprężeń od odkształceń zawarto aproksymację zakresu obowiązywania prawa Hooke'a linią prostą. W tym przedziale możliwe jest wyznaczenie modułu Younga E , który jest współczynnikiem proporcjonalności pomiędzy naprężeniami σ a odkształceniami ε (3.4).

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.4)$$

Aproksymacji zakresu liniowo-sprężystego prostą dokonano w programie MATLAB® za pomocą funkcji *polyfit*. Następnie odczytano współczynnik kierunkowy prostej, który jest poszukiwanym modułem Younga, co wynika bezpośrednio z równania (3.4). Wyniki obliczeń zaprezentowano w tabeli 3.4.

Tabela 3.4. Wyznaczenie modułu Younga materiału próbek

Nr próby	1	2	3	4	średnia
E [GPa]	71.17	66.80	68.99	66.67	68.41

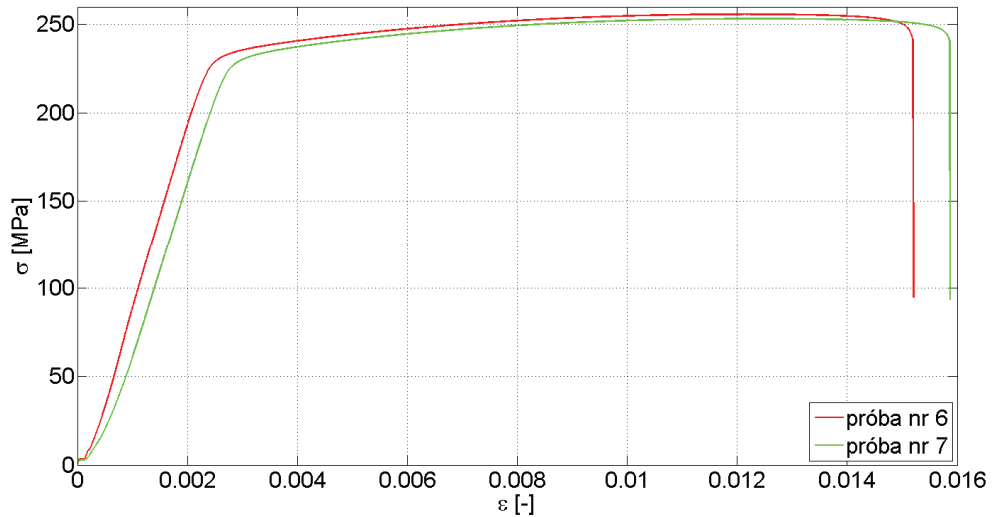
Wartość modułu Younga dla analizowanych płaskowników aluminiowych określona na podstawie pomiarów wyniosła 68.408 GPa.

Poza określeniem modułu Younga, wyznaczono także wytrzymałość na rozciąganie materiału próbek. Przygotowano wykresy prezentujące zależność $\sigma - \varepsilon$ (rys. 3.8). Na ich podstawie określono maksymalne wartości naprężeń, które są wytrzymałością materiału na rozciąganie σ_m . Wyniki przedstawia tabela 3.5.

Tabela 3.5. Wyznaczenie wytrzymałości na rozciąganie materiału próbek

Nr próby	1	2	średnia
σ_m [MPa]	255.79	252.24	254.51

Wyniki pomiarów wskazują na fakt, iż wytrzymałość na rozciąganie stopu aluminium zastosowanego do wykonania płaskowników wynosi ok. 254 MPa.

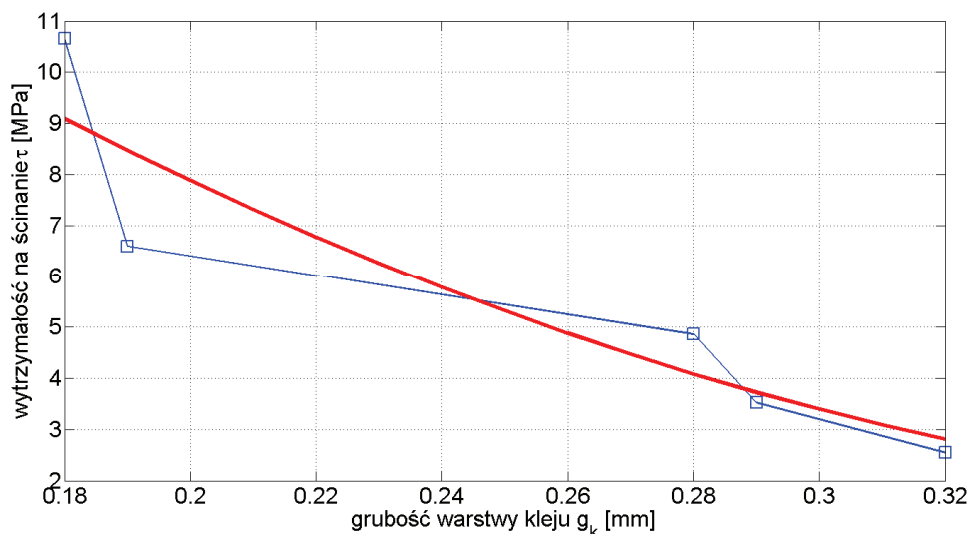


Rys. 3.8. Wykresy $\sigma - \varepsilon$ dla próbek nr 6 i 7

3.4. Wnioski z badań doświadczalnych

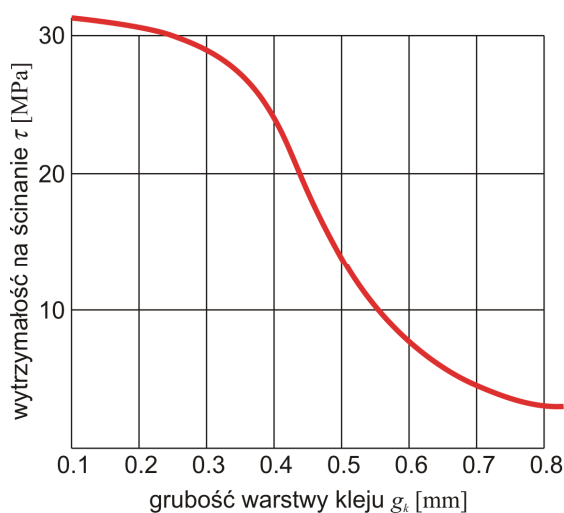
Zestawiając określone wartości naprężeń maksymalnych (tab. 3.3) z deklarowaną przez producenta wytrzymałością kleju na ścinanie, równą 10.5 MPa [24], można zauważyć duże rozbieżności. Zaledwie w przypadku jednej z prób osiągnięto oczekiwany poziom naprężeń. Prawdopodobnie niskie wartości wytrzymałości na ścinanie pozostałych złączy były wynikiem nieprawidłowości, występujących w trakcie ich przygotowywania. Mogło to być spowodowane małym doświadczeniem eksperymentatora oraz brakiem profesjonalnych przyrządów i środków umożliwiających prawidłowe wykonanie połączeń.

Na wykresach rozciągania próbek nr 1 – 5 (rys. 3.5) zaobserwowano występowanie w początkowej fazie obciążania przedziału, w którym następuje przyrost odkształceń bez wyraźnej zmiany wartości siły. Zjawisko to mogło być spowodowane elastycznym zachowaniem kleju w stosunkowo niedużym zakresie obciążenia.



Rys. 3.9. Zależność $\tau - g_k$ dla kleju wykorzystanego w badaniach

Należy zauważyć, iż wyższe wytrzymałości osiągnięto w przypadku złączy, posiadających cieńsze spoiny klejowe. Zauważalna jest tendencja, według której im grubsza warstwa kleju, tym mniejsza jest nośność połączenia. W przypadku przeprowadzonych badań jest to zależność monotoniczna, stale malejąca (rys. 3.9). Na wykresie przebieg zmienności został zaproksymowany funkcją wielomianową stopnia drugiego. Zauważona zależność jest zgodna z wynikami innych badań. Dla porównania, na rys. 3.10 zaprezentowano wykres zależności wytrzymałości na ścinanie od grubości spoiny dla kleju WK-3 [13].



Rys. 3.10. Zależność $\tau - g_k$ dla kleju WK-3 (według [13])

Interpretując wykresy rozciągania prób nr 6 i 7 (także w próbach z ekstensometrem) należy zauważyć, że przebieg ścieżki obciążenia jest na początku zaburzony. Efekt ten najprawdopodobniej wynika ze zjawiska dopasowywania się próbki do szczęk maszyny wytrzymałościowej.

Wartość modułu Younga wyznaczona na podstawie doświadczeń (68.408 GPa) wykazuje bardzo dobrą zgodność z wielkością charakterystyczną. W zależności od przyjętego źródła, moduł sprężystości aluminium wynosi: 69 GPa [25] lub 70 GPa [27]. W obu przypadkach względna różnica wielkości wyznaczonej względem charakterystycznej wynosi poniżej 1%.

Wyznaczona wartość wytrzymałości na rozciąganie (254.41 MPa) także jest prawidłowa dla aluminium. Według [12], dla typowych elementów wielkość ta waha się w granicach 70 – 700 MPa, co sprawia, że otrzymany wynik można uznać za poprawny.

4. ANALIZA NUMERYCZNA

Implementację numeryczną wykonano w programie Abaqus 6.11. Przygotowano model pojedynczego płaskownika (jako próbną) oraz model całego połączenia (w dwóch wariantach).

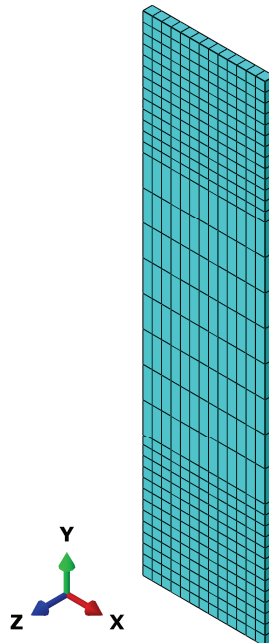
W każdym z modeli zastosowano ośmiowzłowe elementy bryłowe typu C3D8 (*solid*).

4.1. Model numeryczny płaskownika

Pojedynczy płaskownik wymodelowano jako element wykonany z materiału jednorodnego izotropowego, korzystając z modelu ciała idealnie sprężystego (ciała Hooke'a). Zależność naprężeń σ od odkształceń ε prezentuje, przytoczony w poprzednim rozdziale wzór (3.4).

Współczynnikiem proporcjonalności naprężeń względem odkształceń jest moduł odkształcenia podłużnego (moduł Younga) E , który w modelu przyjęto równy 68.408 GPa (na podstawie badań doświadczalnych). Określono także wartość współczynnika Poissona równą 0.33 (według [25]).

Wymiary elementu determinowało położenie płaskownika w maszynie wytrzymałościowej – analizowano jedynie część pomiędzy szczękami. Na podstawie rys. 3.6 określono długość płaskownika ($l_{pm} = 160$ mm). Ze względu na ograniczone możliwości programu Abaqus w wersji studenckiej, przyjęto siatkowanie według rys 4.1. Siatka posiada oczka o wymiarze 10 mm z zagęszczeniem do 4 mm w pobliżu końców.

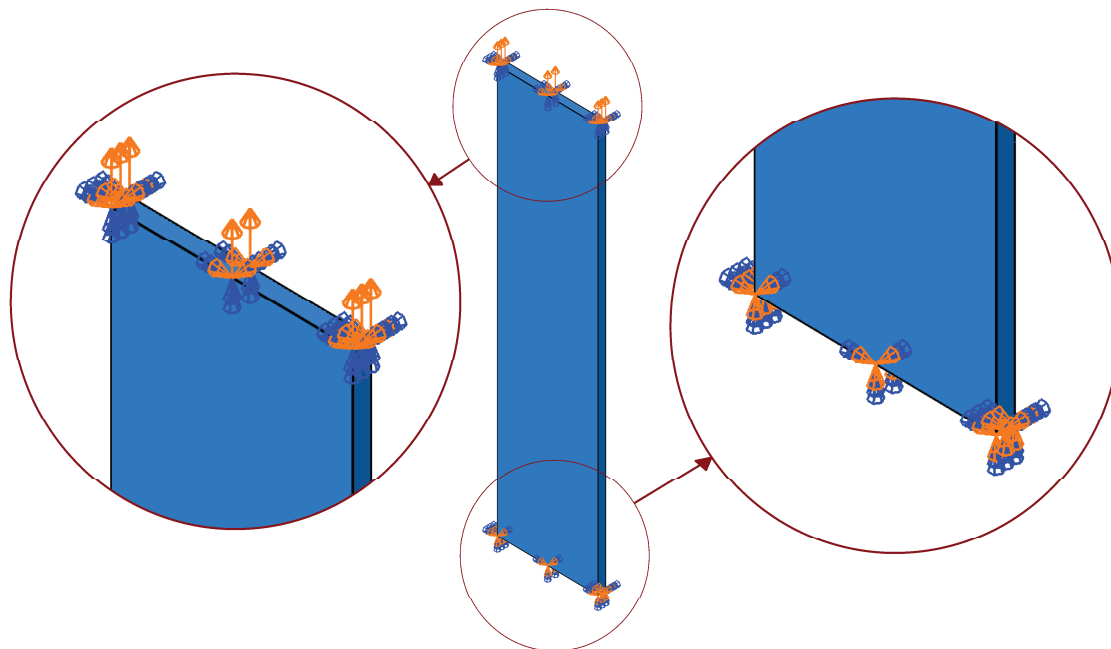


Rys. 4.1. Podział na elementy skończone w modelu płaskownika

Schemat warunków brzegowych przedstawia rys. 4.2. W celu oddania rzeczywistego zachowania konstrukcji, zablokowano wszystkie stopnie swobody na spodniej powierzchni elementu (utwierdzenie w jednej ze szczęk). Podobnie, na powierzchni górnej zablokowano obroty i translacje z wyjątkiem przemieszczenia na kierunku wzdłuż osi płaskownika (stopień swobody U2). Na tym stopniu swobody zadano obciążenie w postaci wymuszonego

przesunięcia Δl_p , symulując przesunięcie szczęki górnej maszyny. Stosunek wymuszenia do początkowej długości płaskownika określa wielkość odkształcenia:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_p}{l_{pn}}. \quad (4.1)$$



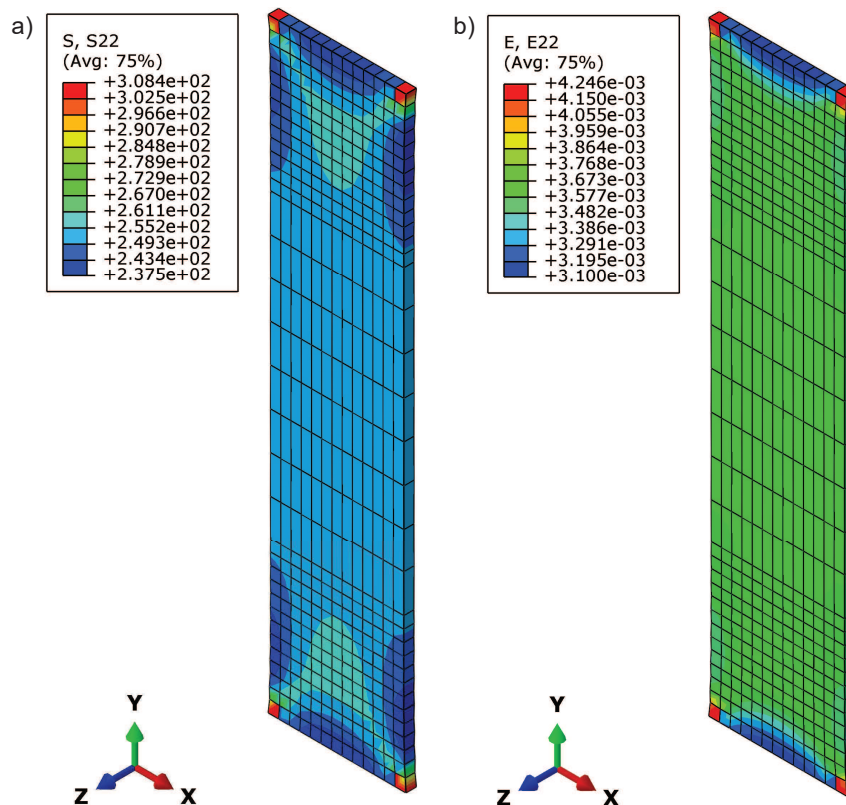
Rys. 4.2. Warunki brzegowe w modelu płaskownika

Zakładając jednorodny rozkład naprężeń w elemencie wyznaczono wielkość odkształceń niszczących ε_m , a następnie przesunięć potrzebnych do osiągnięcia wyznaczonej na podstawie badań wytrzymałości na rozciąganie ($\sigma = \sigma_m$). Skorzystano z zależności (3.4) i (4.1). Określoną wartość wymuszenia zastosowano w modelu numerycznym.

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma}{E} = \frac{\sigma_m}{E} = \frac{254}{68408} = 3.713 \cdot 10^{-3} [-]$$

$$\Delta l_p = \varepsilon_m l_{pn} = 3.713 \cdot 10^{-3} \cdot 160 = 0.594 \text{ mm}$$

Dla wykonanego modelu obliczeniowego określono rozkład naprężeń normalnych i odkształceń podłużnych (rys. 4.3). Zgodnie z oczekiwaniami, osiągnięto poziom naprężeń normalnych zbliżony do wytrzymałości na rozciąganie. Podobnie było w przypadku odkształceń. Wobec tego, model płaskownika uznano za poprawny. Należy zwrócić uwagę na pojawiające się strefy koncentracji naprężeń oraz stowarzyszony z nimi wzrost odkształceń. Są one efektem przyjęcia warunków brzegowych. Brak możliwości odkształceń poprzecznych powoduje powstanie dodatkowych naprężeń, które osiągają znaczne wartości w narożach płaskowników.



Rys. 4.3. Mapy naprężeń oraz odkształceń w modelu płaskownika

4.2. Model numeryczny połączenia

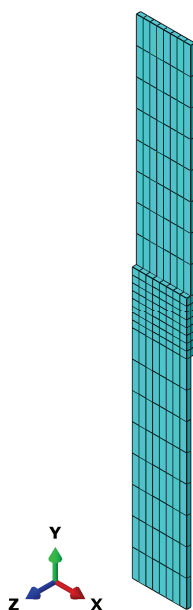
Tworząc model numeryczny całego złącza zastosowano dwa warianty o różnym stopniu skomplikowania. Następnie wyniki analiz zestawiono ze sobą oraz z wynikami analizy według Volkersena.

4.2.1. Złącze jako kontakt kohezywny

W najprostszym ujęciu połączenie klejone wymodelowano jako kontakt pomiędzy elementami klejonymi. W modelu nie zastosowano odrębnej warstwy tworzywa adhezyjnego, a połączenie płaskowników zapewniono poprzez przyjęcie interakcji w postaci kontaktu kohezywnego (*cohesive contact*). Przyjęto domyślne parametry interakcji.

Model materiałowy oraz własności płaskowników założono identyczne, jak w punkcie 4.1. Na podstawie rys. 3.1 i rys. 3.3 określono długość płaskownika w próbce ($l_{pn} = 200$ mm) oraz wymiary spoiny, tj. powierzchni kontaktu. Podział na elementy skończone próbki przedstawia rys. 4.4. Siatka posiada oczka 20 mm z zagęszczeniem do 5 mm w obrębie zakładki.

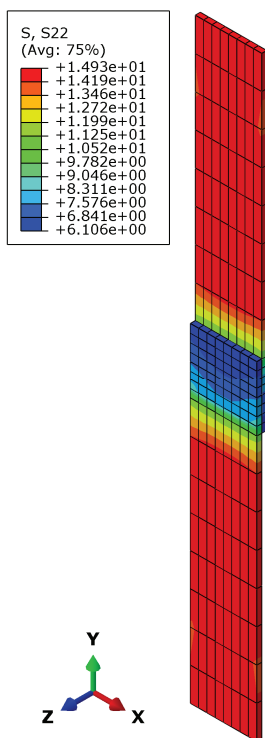
Warunki brzegowe przyjęto analogicznie do modelu z pojedynczym płaskownikiem. Zablokowano wszystkie translacyjne i rotacyjne stopnie swobody na dolnej powierzchni dolnego elementu klejonego. Analogicznie postąpiono w przypadku górnej powierzchni górnego płaskownika, przy czym założono wymuszenie przemieszczeniem wzdłuż osi pionowej. Jego wielkość przyjęto na poziomie 3.4 mm. Jest to maksymalna wielkość przemieszczenia osiągnięta dla próbki klejonej w badaniach doświadczalnych.



Rys. 4.4. Podział na elementy skończone w modelu z kohezywnym kontaktem

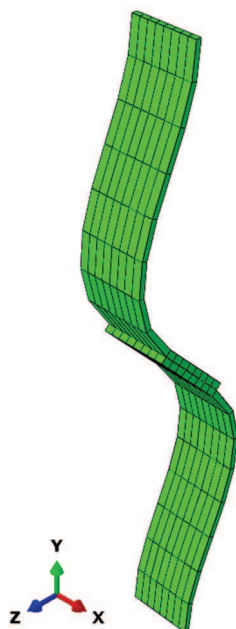
Ze względu na brak wystąpienia w modelu warstwy kleju, nie określono wartości oraz przebiegu naprężeń ścinających skleinę. Celowość zastosowania modelu z kontaktem kohezywnym uzasadnia możliwość weryfikacji rozkładu naprężeń normalnych w elementach łączonych.

Na podstawie analizy naprężeń podłużnych w płaskownikach (rys. 4.5) można dojść do wniosku, iż poza złączem mają one w przybliżeniu stały rozkład i przyjmują wtedy wartość ekstremalną (tutaj ok. 15 MPa). Na długości zakładki ich wartość spada do ok. 6 MPa. Taki rozkład jest w przybliżeniu zgodny z modelami teoretycznymi (por. pkt. 2.1).



Rys. 4.5. Mapa naprężeń normalnych w modelu z kohezywnym kontaktem

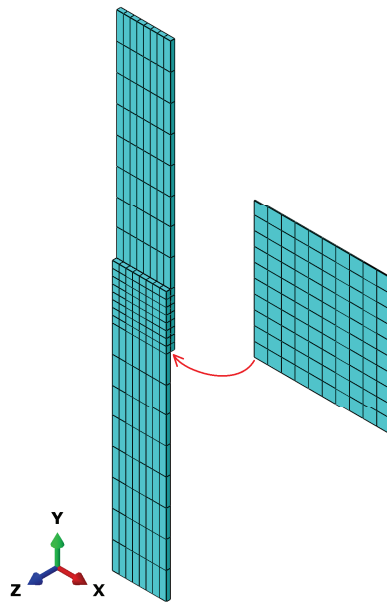
Należy także zwrócić uwagę na deformację układu (rys. 4.6). Założeniem w obydwu zastosowanych w opracowaniu podejściach teoretycznych był osiowy sposób przyłożenia obciążenia. W rzeczywistości warunek ten nie jest spełniony, a nieosiowy charakter obciążenia skutkuje wystąpieniem dodatkowych przemieszczeń na kierunku prostopadłym do płaszczyzny przyłożenia tego obciążenia (por. rys. 2.6).



Rys. 4.6. Deformacja próbki w modelu z kohezywnym kontaktem

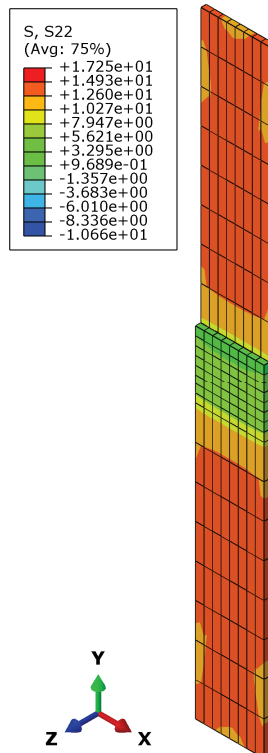
4.2.2. Złącze jako odrębna warstwa elementów

W drugim modelu skleinę reprezentuje warstwa tworzywa adhezyjnego, wymodelowana dla uproszczenia materiałem liniowo-sprężystym o module Younga równym 3.43 GPa oraz współczynnika Poissona 0.35. Wielkości te przyjęto jako przykładowe dla kleju na bazie żywic epoksydowych według [7]. Pozostałe cechy modelu (elementy łączone, warunki brzegowe oraz obciążenie) przyjęto tak, jak w punkcie 4.2.1. W celu zapewnienia współpracy elementów modelu w przenoszeniu obciążeń, warstwa kleju została połączona z płaskownikami za pomocą sztywnego połączenia typu *tie*. Siatkowanie płaskowników przyjęto tak, jak w modelu z kontaktem kohezywnym. Jako dodatkowa pojawiła się kwestia dyskretyzacji skleiny. Przyjęto możliwie gęstą siatkę, o oczkach 4 mm. Podział na elementy skończone przedstawia rys. 4.7. W celu umożliwienia kontroli zgodności wyników pomiędzy modelami numerycznymi, obciążenie oraz warunki brzegowe przyjęto identycznie, jak w modelu z kohezywnym kontaktem (wymuszeniem przemieszczeniem 3.4 mm).



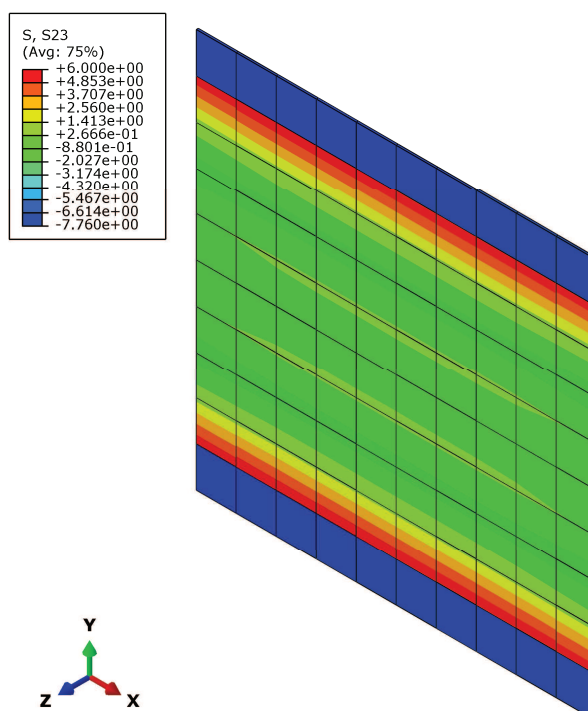
Rys. 4.7. Podział na elementy skończone w modelu ze skleją

Analizując naprężenia podłużne w płaskownikach (rys. 4.8) zaobserwowano, że ich rozkład jest niemal identyczny, jak w poprzednim modelu, zarówno w aspekcie wartości jak i ich zmienności. Wartość ekstremalna w płaskowniku wynosi ok. 15 MPa. Potwierdza to zgodność obydwu modeli. Co istotne, na długości zakładki naprężenia redukują się niemalże do zera. Fakt ten czyni model bardziej dokładnym niż poprzedni.



Rys. 4.8. Mapa naprężeń normalnych w modelu ze skleją

Deformacja układu jest identyczna jak w poprzednim modelu (zgodna z rys. 4.6). Przyczyny takiego kształtu deformacji wynikają z analogicznego sposobu obciążenia próbki.



Rys. 4.9. Mapa naprężeń ścinających spoinę w modelu ze skleiną

W celu weryfikacji modelu obliczeniowego, określono wartości naprężeń ścinających spoinę klejową (rys. 4.9). Analizując zmienność naprężeń stycznych można zauważyć, że osiągają one ekstremalne wartości w pobliżu krawędzi zakładki i spadają niemalże do zera w obrębie środka złącza. Przebieg ten jest zgodny z teorią Volkersena. Niepokojącym faktem jest występowanie naprężeń o przeciwnym znaku na krawędzi zakładki. Efekt ten należy uznać za błąd, wynikający prawdopodobnie z braku uwzględnienia współpracy skleiny z elementem łączonym w tym obszarze.

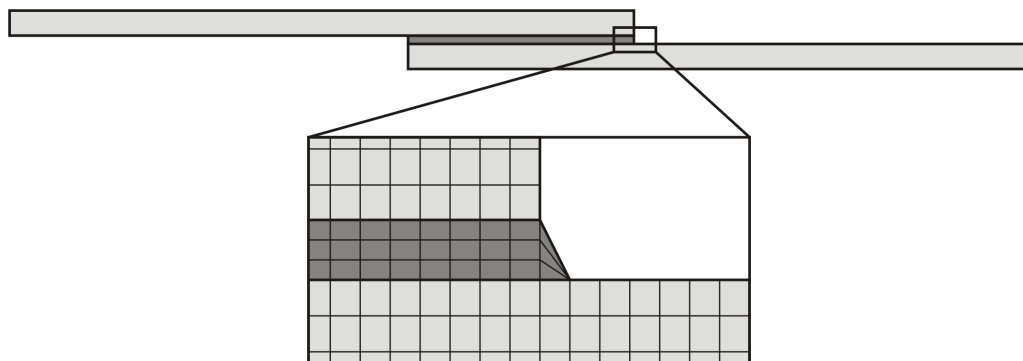
Ponadto naprężenia ścinające nie osiągają zamierzonego poziomu. Próbką doznająca analogicznego przemieszczenia w badaniach doświadczalnych osiągnęła naprężenia równe gwarantowanej wytrzymałości spoiny na ścinanie. Pierwszą z potencjalnych przyczyn takiego stanu rzeczy jest fakt, iż na przemieszczenia rejestrowane podczas badania składają się nie tylko przemieszczenia próbki, ale także elementów maszyny wytrzymałościowej, co znacznie zaburza wyniki. Ponadto, należy zauważyć, że w modelu obliczeniowym spoina jest pełna, a w próbce nr 4, dla której osiągnięto pożądany poziom naprężeń zakładka nie była w pełni pokryta klejem. Nie należy także pomijać faktu, iż w modelu poczyniono znaczne uproszczenia.

4.3. Wnioski z analizy numerycznej

Podsumowując przeprowadzone obliczenia numeryczne należy stwierdzić, iż modelowanie spoin klejowych z wykorzystaniem oprogramowania MES jest zagadnieniem bardzo złożonym. Niezwykle trudno jest stworzyć model wiernie oddający zachowanie rzeczywistego elementu. Decyduje o tym wiele czynników.

Pierwszym z nich jest konieczność uwzględnienia nieliniowego zachowania materiału kleju pod wpływem obciążenia. Należy zastosować odpowiedni model materiałowy, którego wprowadzenie do programu numerycznego może nastęrczać wielu trudności.

Istotnym problemem jest również odpowiedni podział skleiny na elementy skończone. Przyjęcie, iż krawędź spoiny jest prostopadła do powierzchni złącza daje błędne wyniki. Aby uzyskać prawidłowy rozkład naprężeń należy zastosować model z tzw. wypływką (rys. 4.10), która symbolizuje klej wyciekający na krawędziach złącza. Dowiedziono, iż zastosowanie takiego podejścia uniezależnia rozkład naprężeń na długości spoiny od liczby warstw modelujących skleinę, wobec czego można ją modelować za pomocą jednej warstwy elementów [10].



Rys. 4.10. Przekrój podłużny w obrębie krawędzi złącza w modelu z tzw. wypływką

Jak wykazano wcześniej, pomimo zastosowania wielu uproszczeń, analiza numeryczna daje rezultaty zbliżone do modelu teoretycznego (Volkersena). Zgodność jest zauważalna w zakresie rozkładu naprężeń normalnych w elementach łączonych i częściowo również dla naprężeń stycznych na długości spoiny.

5. PODSUMOWANIE

Przedmiotem opracowania była analiza jednozakładkowego połączenia klejonego elementów konstrukcji metalowych, obciążonego na ścinanie. W opracowaniu zrealizowano założony zakres prac. Na podstawie analizy teoretycznej określono rozkład naprężeń stycznych w spoinie. Porównano wyniki dwóch podstawowych modeli obliczeniowych, wykazując, że podejście uproszczone prowadzi do prawidłowych rezultatów jedynie w przypadku złączy o nieznaczących długościach.

Badania doświadczalne przeprowadzono w celu wyznaczenia nośności połączenia przy zastosowaniu uproszczonej metody jej wyznaczania. Pomiary eksperymentalne nie pozwoliły na jednoznaczne zweryfikowanie wytrzymałości na ścinanie zastosowanego kleju. Uzyskano dużą rozbieżność wyników, ponadto w większości próbek nie osiągnięto pożądanego stanu naprężeń, co mogło świadczyć o nieprawidłowym przygotowaniu ich do badań. W celu poprawy rezultatów należy zastosować większą liczbę próbek oraz przyjąć odpowiednią metodę ich przygotowania. Krokiem w dobrym kierunku jest również modyfikacja geometrii próbek, szczególnie w zakresie skrócenia zakładki.

Przygotowano również modele numeryczne metody elementów skończonych, które posłużyły weryfikacji podejść analitycznych w zakresie analizy naprężeń. Z racji zastosowania wielu uproszczeń, porównanie rezultatów obliczeń numerycznych i teoretycznych nie było możliwe w aspekcie ilościowym, a jedynie jakościowym. Otrzymano zadowalający stopień zgodności wyników obu analiz. Punktem wyjścia do dalszych badań jest stworzenie dokładniejszego modelu, szczególnie w zakresie prawidłowego odzwierciedlenia rzeczywistego zachowania spoiny klejowej pod wpływem obciążenia.

Przeprowadzona analiza pozwoliła na stwierdzenie, iż połączenia klejone stanowią bardzo złożone zagadnienie. Świadczy o tym przede wszystkim fakt, iż, pomimo swojej prostoty, złącze jednozakładkowe nie jest łatwe w analizie. Trudność przeprowadzania obliczeń, a także niewielka popularność w praktycznych zastosowaniach sprawia, iż problem klejenia konstrukcyjnego nie jest w pełni rozpoznany, wobec czego stwarza pole do dalszych prac nad tematem.

WYKAZ LITERATURY

Książki

- [1] Adams R. D., Wake W. C., *Structural Adhesive Joints in Engineering*, Elsevier Applied Science Publishers, London and New York, 1984, s. 19-23.
- [2] Łubiński M., Filipowicz A., Żółtowski W., *Konstrukcje metalowe, część I – Podstawy Projektowania*, Arkady, Warszawa, 2003, s. 212.
- [3] Rudawska A., *Wybrane zagadnienia konstytuowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych*, Politechnika Lubelska, Lublin, 2013, s. 115-130.
- [4] Rutkowski A., *Części maszyn*, WSiP, Warszawa, 2009, s. 79-80.

Artykuły z czasopism naukowych

- [5] Bednarz Ł., *Metody wzmacniania zabytkowych, zakrzywionych konstrukcji ceglanych*, Wiadomości konserwatorskie, nr 14, 2003, s. 34-42.
- [6] Brytan Z., *Kontakt stali nierdzewnej z innymi materiałami metalowymi*, Euro Inox – Materiały i zastosowania, zeszyt nr 10, 2011, s. 2-4.
- [7] Doliński Ł., *Porównanie wybranych modeli delaminacji w kompozytach warstwowych*, Modelowanie Inżynierskie, nr 32, 2006, s. 113-118.
- [8] Godzimirski J., *Problemy klejenia konstrukcyjnego*, Technologia i Automatyzacja Montażu, nr 1, 2009, s. 25-31.
- [9] Godzimirski J., Rośkiewicz M., *Wytrzymałość doraźna i długotrwała oraz pełzanie kleju Epidian 57*, Polimery, t. 47, nr 10, 2002, s. 721-726.
- [10] Godzimirski J., Tkaczuk S., *Modelowanie spoin klejowych w obliczeniach MES*, Biuletyn WAT, vol. LIX, nr 4, 2010, s. 399-410.
- [11] Jasakow M., Rybak M., *Pierwszy w Polsce most klejony*, Drogownictwo, nr 5, 1965, s. 81-85.
- [12] Kwiatkowski T., *Charakterystyka i wykorzystanie stopów aluminium oraz taśm węglowych w budownictwie*, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej, Nr 167, 2011, s. 112-118.
- [13] Pancewicz Z., Nurek W., *Wybrane zagadnienia projektowania klejonych złączy elementów metalowych*, Archiwum Inżynierii Lądowej, t. XXII, nr 1, 1976, s. 165-173.
- [14] Piekarczyk M., *Zastosowanie połączeń klejonych w konstrukcjach metalowych*, Technical Transactions, zeszyt 1-B, 2002, s. 99-137.
- [15] Rudawska A., Cisek J., Semotiuk L., *Wybrane aspekty wytrzymałości połączeń klejowych oraz lutowanych stosowanych w konstrukcjach lotniczych*, Technologia i Automatyzacja Montażu, nr 2, 2012, s. 61-66.
- [16] Rudawska A., Czarnota M., *Wpływ operacji odtłuszczenia na właściwości adhezyjne warstwy wierzchniej oraz wytrzymałość połączeń klejowych blach miedzianych*, Postępy Nauki i Techniki, nr 8, 2011, s. 137-147.

Normy

- [17] DIN EN ISO/DIS 11003-2 Klebstoffe, Bestimmung des Scherverhaltens von Strukturklebstoffen, Teil 2., Scherprüfverfahren für dicke Fügeteile. Dezember 2001.
- [18] PN-69/C-89300 Kleje do metali, oznaczenie wytrzymałości na ścinanie.
- [19] PN-EN 1465:2009 Kleje. Oznaczanie wytrzymałości na ścinanie przy rozciąganiu połączeń na zakładkę.
- [20] PN-EN 1993-1-8:2006 Projektowanie konstrukcji stalowych, cz. 1-8 Projektowanie węzłów.

Materiały pokonferencyjne

- [21] Hagl A., *How to Join Steel and Glass. Complex Adhesive Behaviour*, Eurosteel 2008, 3-5 September 2008, Graz, Austria, s. 929-946.

Prace dyplomowe

- [22] Kubieniec G., *Nośność blachownic stalowych wzmacnianych z zastosowaniem klejenia*, praca doktorska, Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej, 2008, s.13-20.

Strony internetowe

- [23] <http://lilleheden.informatorbudownictwa.pl/>
(dostęp: 19.10.2015 r.).
- [24] <http://technicqll.pl/index.php/pl/produkty/epoksydy/18-klej-metalowy-epoksydowy>
(dostęp: 23.10.2015 r.).
- [25] <http://www.sebros.eu/aluminium/wlasciwosci-aluminium-i-stopow-aluminium/>
(dostęp: 01.11.2015 r.).
- [26] <http://www.zetbeer.pl/pl/Drewno-klejone-KVH-i-BSH.html>
(dostęp: 19.10.2015 r.).
- [27] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Glin>
(dostęp: 01.11.2015 r.).

WYKAZ RYSUNKÓW

Rys. 1.1. Pierwszy polski most „klejony”, przekroje oraz widok, na podstawie [11].....	9
Rys. 1.2. Siły kohezji i adhezji w złączu klejowym	13
Rys. 1.3. Mechanizmy zniszczenia połączeń klejonych	13
Rys. 1.4. Próbką do badań wytrzymałości na ścinanie według [18]	15
Rys. 1.5. Próbką do badań wytrzymałości na ścinanie według [17]	15
Rys. 2.1. Deformacje w złączu jednozakładkowym ze sztywnymi elementami łączonymi [1]	16
Rys. 2.2. Rozkład naprężenia stycznego w spoinie klejowej na długości zakładki według [3] ...	17
Rys. 2.3. Deformacje w złączu jednozakładkowym ze sprężystymi elementami łączonymi [1]..	17
Rys. 2.4. Naprężenia w przekroju złącza klejonego według teorii Volkersena [1]	18
Rys. 2.5. Porównanie rozkładów analitycznych naprężeń stycznych na długości złącza.....	20
Rys. 2.6. Rysunek deformacji złącza jednozakładkowego obciążonego nieosiowo	21
Rys. 3.1. Projekt geometrii próbki klejonej	22
Rys. 3.2. Schemat pomiaru wymiarów rzeczywistych próbki.....	24
Rys. 3.3. Położenie próbki klejonej w szczękach maszyny wytrzymałościowej, wymiary w mm	25
Rys. 3.4. Wykresy $\tau - \varepsilon$ dla próbek o numerach 1 – 5	27
Rys. 3.5. Zestawienie wykresów $\tau - \varepsilon$ dla próbek o numerach 1 – 5.....	28
Rys. 3.6. Położenie płaskownika w szczękach maszyny wytrzymałościowej, wymiary w mm ...	28
Rys. 3.7. Wykresy $\sigma - \varepsilon$ dla próbki nr 6 do wyznaczenia modułu Younga.....	30
Rys. 3.8. Wykresy $\sigma - \varepsilon$ dla próbek nr 6 i 7	31
Rys. 3.9. Zależność $\tau - g_k$ dla kleju wykorzystanego w badaniach.....	31
Rys. 3.10. Zależność $\tau - g_k$ dla kleju WK-3 (według [13])	32
Rys. 4.1. Podział na elementy skończone w modelu płaskownika	33
Rys. 4.2. Warunki brzegowe w modelu płaskownika	34
Rys. 4.3. Mapy naprężeń oraz odkształceń w modelu płaskownika	35
Rys. 4.4. Podział na elementy skończone w modelu z kohezywnym kontaktem.....	36
Rys. 4.5. Mapa naprężeń normalnych w modelu z kohezywnym kontaktem.....	36
Rys. 4.6. Deformacja próbki w modelu z kohezywnym kontaktem	37
Rys. 4.7. Podział na elementy skończone w modelu ze skleina	38
Rys. 4.8. Mapa naprężeń normalnych w modelu ze skleina	38
Rys. 4.9. Mapa naprężeń ścinających spoinę w modelu ze skleina	39
Rys. 4.10. Przekrój podłużny w obrębie krawędzi złącza w modelu z tzw. wypływką	40

WYKAZ FOTOGRAFII

Fot. 1.1. Przykład połączenia belki drewnianej na długości (tzw. mikrowczepy) [26].....	7
Fot. 1.2. Przykłady realizacji konstrukcji z drewna klejonego [23]:	7
Fot. 1.3. Pierwszy na świecie stalowy most „klejony” [22]	8
Fot. 1.4. Przykład blachownicy wzmocnionej płytami przyklejonymi do środka [22]	9
Fot. 1.5. Kościół Serca Jezusowego w Monachium – przykład elewacji „klejonej” [21]	10
Fot. 3.1. Płaskowniki po podzieleniu na części.....	23
Fot. 3.2. Płaskowniki przygotowane do sklejenia z nałożonym klejem.....	23
Fot. 3.3. Próbki gotowe do badań	24
Fot. 3.4. Próbkę nr 2 podczas obciążania w maszynie wytrzymałościowej.....	26
Fot. 3.5. Próbki 1 – 5 po zniszczeniu	26
Fot. 3.6. Próbkę 6 po zniszczeniu	29

WYKAZ TABEL

Tabela 3.1. Projektowana geometria próbek do badań eksperymentalnych	22
Tabela 3.2. Rzeczywista geometria badanych próbek.....	24
Tabela 3.3. Określenie naprężeń niszczących próbki.....	27
Tabela 3.4. Wyznaczenie modułu Younga materiału próbek.....	30
Tabela 3.5. Wyznaczenie wytrzymałości na rozciąganie materiału próbek	30