

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
mgr inż. Paweł Maćkowiak

ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI I TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ
ZAKŁADKOWYCH POŁĄCZEŃ KLEJONYCH WYKONANYCH
Z MATERIAŁÓW O RÓŻNYCH WŁAŚCIWOŚCIACH
MECHANICZNYCH

PROMOTOR

DR HAB. INŻ. BOGDAN LIGAJ

1. WSTĘP

Połączenia klejone są coraz częściej stosowane. Ich szczególną zaletą jest zdolność do łączenia różnych typów materiałów. Ponadto, połączenia te są lekkie i mniej czasochłonne w wykonaniu. Dzięki tym możliwościom, projektanci uzyskują większą swobodę w doborze materiałów, co przyczynia się do uzyskiwania lżejszych produktów wytwarzanych w krótszym czasie.

Dowodem na to jest szerokie zastosowanie połączeń klejonych w szczególności w przemyśle motoryzacyjnym, szynowym, lotniczym, stoczniowym i biomedycznym. Jako przykład można wskazać klejenie elementów poszycia do metalowej konstrukcji ramowej w samolotach i samochodach, klejenie zewnętrznego skomplikowanego kształtu na aluminiowe rdzenie w śmigłach helikopterów, klejenie konstrukcji ramowej składającej się z elementów metalowych, tworzyw sztucznych wzmocnianych włóknami szklanymi oraz węglowymi w jachtach i samolotach[1]. Przytoczone przykłady potwierdzają, że połączenia klejone stosowane są w odpowiedzialnych fragmentach konstrukcji przenoszących obciążenia eksploatacyjne.

2. HIPOTEZA, CEL I ZAKRES PRACY

2.1. HIPOTEZA BADAWCZA

Wytrzymałość i trwałość zakładkowych połączeń klejonych wykonanych klejem metakrylowym Plexus MA300, w których przełom zniszczenia jest kohezyjny, zależy od sztywności łączonych elementów.

2.2. CELE PRACY

Podstawowymi celami pracy są:

- opracowanie metody realizacji badań w warunkach obciążeń statycznych i zmiennych próbek odlewanych klejów strukturalnych,
- przeprowadzenie badań doświadczalnych w warunkach obciążeń statycznych i zmiennych odlewanych próbek kleju oraz analiza uzyskanych wyników,
- przeprowadzenie badań doświadczalnych w warunkach obciążeń statycznych i zmiennych zakładkowych połączeń klejonych oraz analiza uzyskanych wyników,
- analiza rozkładów naprężeń stycznych wyznaczonych metodami analitycznymi (metodą inżynierską, metodą Volkersena, metodą Golanda-Raisnera, metodą Adamsa-Pepiatta) w zakładkowych połączeniach klejonych,
- analiza rozkładów naprężeń i odkształceń wyznaczonych metodą elementów skończonych w zakładkowych połączeniach klejonych,

2.3. ZAKRES PRACY

Rozprawa doktorska została podzielona na 6 rozdziałów. Pierwsza część pracy zawiera analizę stanu wiedzy, na której podstawie zbudowano plan badawczy oraz dobrano narzędzia i metody obliczeniowe.

Część eksperymentalna pracy obejmuje przeprowadzenie:

a) badań w warunkach obciążeń statycznych:

- badania kleju:
 - metakrylowego Plexus MA300 – podstawowe badania ze względu na realizację pracy,

- epoksydowego Epidian 53+Z1 – badania stanowiące tło dla badań podstawowych,
- kleju poliuretanowego Multibond 3111 – badania stanowiące tło dla badań podstawowych,
- badania zakładkowych połączeń klejonych:
 - stal – stal, klej metakrylowy Plexus MA300,
 - stal – stop aluminium, klej metakrylowy Plexus MA300,
 - stal – tworzywo polimerowe ABS, klej metakrylowy Plexus MA300,
 - stop aluminium – tworzywo polimerowe ABS, klej metakrylowy Plexus MA300,
 - stop aluminium – stop aluminium, klej metakrylowy Plexus MA300,
 - tworzywo polimerowe ABS – tworzywo polimerowe ABS, klej metakrylowy Plexus MA300,
- b) badań w warunkach obciążeń zmiennych:
 - badania kleju:
 - metakrylowego Plexus MA300,
 - badania zakładkowych połączeń klejonych:
 - stal – stal, klej metakrylowy Plexus MA300,
 - stal – stop aluminium, klej metakrylowy Plexus MA300,
 - stop aluminium – stop aluminium, klej metakrylowy Plexus MA300,
- c) wyznaczanie rozkładów naprężeń stycznych zakładkowych połączeń klejonych w warunkach obciążeń statycznych metodami analitycznymi:
 - metodą inżynierską,
 - metodą Volkersena,
 - metodą Golanda-Raisnera,
 - metodą Adamsa-Pepiatta,
- d) wyznaczanie rozkładów naprężeń i odkształceń zakładkowych połączeń klejonych w warunkach obciążeń statycznych metodą elementów skończonych.

3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

3.1. PROGRAM BADAŃ WŁASNYCH

Program badań prowadzonych w celu dokonania analizy wpływu wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej zakładkowych połączeń klejonych wykonanych za pomocą kleju metakrylowego przedstawiono na rysunku 3.1. W pierwszej kolejności zbadano statyczne właściwości mechaniczne i przebiegi naprężenia w funkcji odkształcenia kleju metakrylowego Plexus MA300. Otrzymane wyniki porównano z identycznie wyznaczonymi własnościami przedstawicieli innych grup klejów strukturalnych: kleju epoksydowego Epidian E57+Z1 oraz kleju poliuretanowego Multibond 3111.

Następnie wyznaczono właściwości mechaniczne oraz przebieg naprężeń w funkcji odkształcenia w monotonicznej próbie rozciągania dla materiałów łączonych, które stanowiła: stal C45, aluminium AW-5754, tworzywo termoplastyczne ABS.

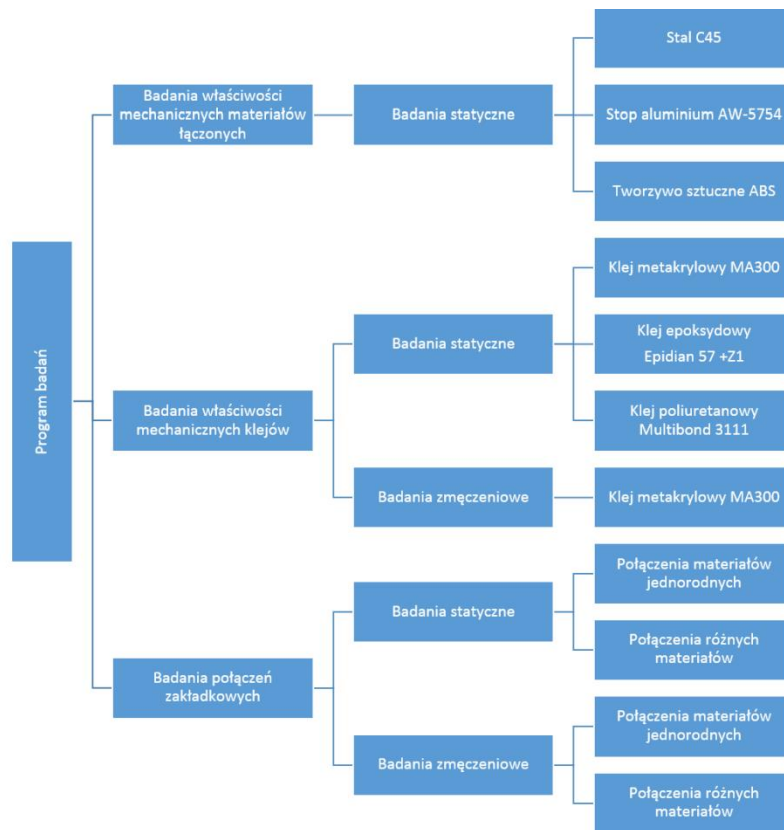
Powyższe dane wyznaczono, celem wykorzystania ich do obliczeń analitycznych i numerycznych analiz naprężeń oraz odkształceń w połączeniach zakładkowych.

Kolejny etap pracy obejmował badania cykliczne próbek odlewanych kleju metakrylowego Plexus MA300. Dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$. Wyznaczono wykres trwałości zmęczeniowej oraz umowną granicę zmęczenia dla $N=5 \cdot 10^6$ liczby cykli.

Następny obszar dotyczył wyznaczenie wytrzymałości na ścinanie przy rozciąganiu połączeń zakładkowych wykonanych przy użyciu kleju metakrylowego Plexus MA300. W celu

określenia wpływu sztywności połączeń na ich wytrzymałość badano różne konfiguracje materiałów łączonych: stali C45, stopu aluminium AW-5754 i tworzywa termoplastycznego ABS. Aby zwiększyć grupę porównawczą w badaniach statycznych, elementy z aluminium łączono nie tylko dla grubości płaskowników 1,5 mm, ale również dla grubości 3 mm oraz 5 mm.

Ostatnim elementem badań doświadczalnych było badanie trwałości zmęczeniowej połączeń zakładkowych materiałów o różnych właściwościach mechanicznych. Do badań przyjęto trzy typy połączeń stopu aluminium AW-5754 i stali konstrukcyjnej C45.

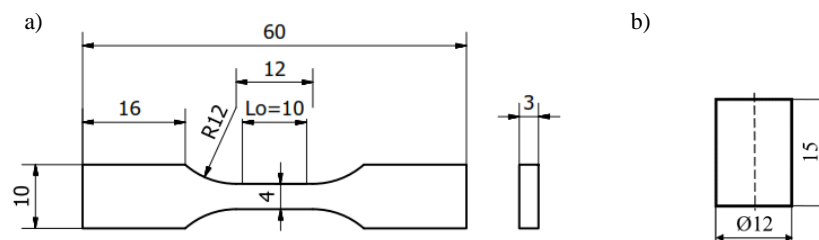


Rys. 3.1. Program badań własnych

3.2. BADANIA STATYCZNE KLEJÓW

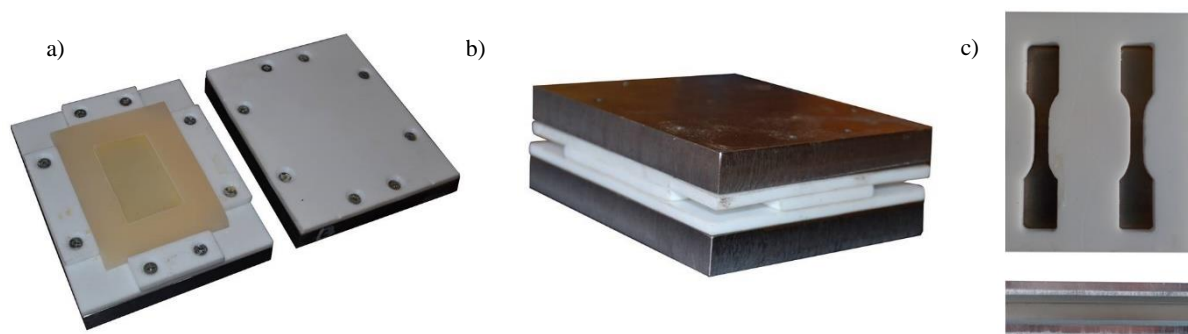
3.2.1. Obiekty badań i metody wykonania próbek klejów

Próbki do badań właściwości mechanicznych klejów wykonywano na podstawie normy PN-EN ISO 527:2020 (rys. 3.2). Próbki z kleju stosowane do próby ściskania wykonano zgodnie z zaleceniami normy PN-EN ISO 604:2006.



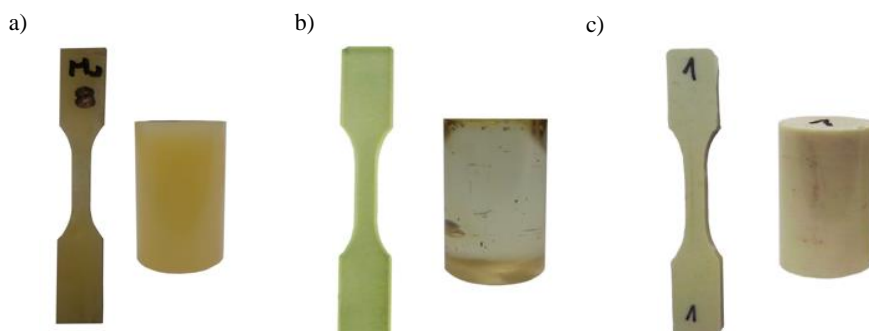
Rys.3.2. Wymiary kształtek do badań właściwości materiałowych klejów: a) w próbie rozciągania, b) w próbie ściskania

W celu wytworzenia próbek z kleju metakrylowego oraz epoksydowego odlano płyty z tych materiałów. Dla klejów metakrylowych o dużej lepkości konieczne jest zastosowanie dużego nacisku, którego celem jest równomierne rozprowadzenie materiału w formie (rys. 3.3) oraz uniknięcie powstania pęcherzy powietrza. Ze względu na niską sztywność kleju poliuretanowego, nie jest możliwe uzyskanie docelowego kształtu próbki poprzez obróbkę mechaniczną. Do wytworzenia próbek z kleju poliuretanowego wykorzystano teflonową formę z wyfrezowanymi otworami w docelowym kształcie. Po obu stronach teflonowej formy umieszczono przekładki z płyty silikonowej, a całość zaciśnięto pomiędzy sztywnymi płytami.



Rys. 3.3. Zdjęcia form: a) otwarta dla kleju epoksydowego; b) zamknięta dla kleju metakrylowego; c) otwarta dla kleju poliuretanowego

Do badań przygotowano zestawy próbek, które przedstawiono na rysunku 3.4.



Rys. 3.4. Przykładowe próbki: a) kleju metakrylowego Plexus MA300; b) kleju epoksydowego Epidian 53+Z1; c) kleju poliuretanowego Multibond 3111

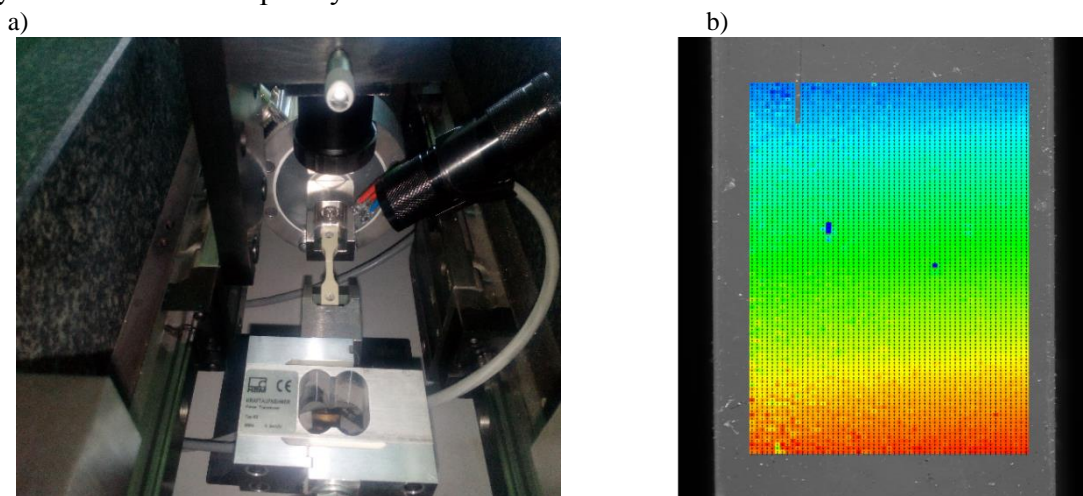
3.2.2. Metoda badań i stanowisko badawcze

Badanie właściwości statycznych kleju w próbie rozciągania przeprowadzono zgodnie z zaleceniami normy PN-EN ISO 527-2:2012. Próbę przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej z napędem śrubowym INSTRON 5966 z siłomierzem o zakresie pomiarowym do 10 kN.

Odształcenie mierzono za pomocą ekstensometru wzdłużnego mocowanego na próbce o bazie pomiarowej 10 mm oraz ekstensometru poprzecznego. Przeprowadzono badanie na minimum 5 próbkach, których szerokość oraz grubość w części roboczej zmierzono w trzech punktach. Na podstawie otrzymanych wykresów naprężenie – odkształcenie wyznaczono wartość: E , R_m , R_e , A oraz v .

Celem weryfikacji otrzymanych wyników, powtórzono badanie stosując do pomiaru odkształceń metodę cyfrowej korelacji obrazu (rys. 3.5). Wykorzystano identyczny kształt próbek i warunki obciążenia. Wynikiem metody cyfrowej korelacji obrazu są mapy przemieszczeń przedstawione na rysunku 3.5 oraz pliki danych, w których punktom przypisuje się wartość przemieszczenia w dwóch kierunkach: wzdłużnym oraz poprzecznym. Pozwala to

na przyjętym odcinku pomiarowym wyznaczyć odkształcenia wzdłużne oraz poprzeczne, a co za tym idzie określić współczynnik Poissona.



Rys. 3.5. a) Stanowisko do badań wytrzymałości próbek z jednoczesnym pomiarem odkształceń z wykorzystaniem metody cyfrowej korelacji obrazu; b) mapa przemieszczeń wzdłużnych w rozciąganej próbce kleju wyznaczona za pomocą metody cyfrowej korelacji obrazu

Badanie właściwości statycznych klejów w próbie ściskania przeprowadzono zgodnie z zaleceniami normy PN-EN ISO 604:2006. Badania przeprowadzono na 5 próbkach. Na podstawie otrzymanych wykresów naprężenie – odkształcenie wyznaczono wartość R_{ec} , E_c .

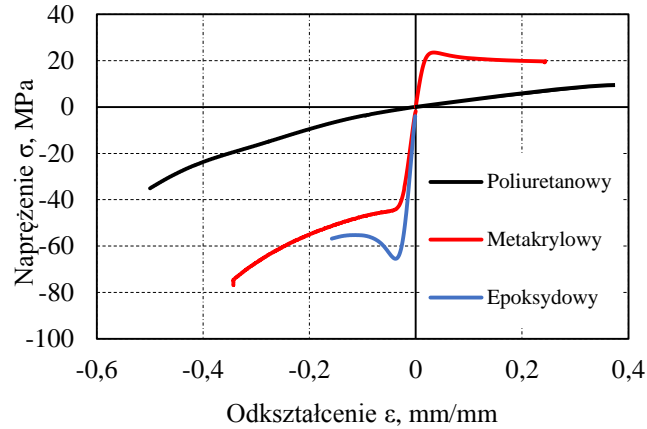
3.2.3. Wyniki badań statycznych klejów

W celu porównania wyznaczonych różnymi metodami właściwości mechanicznych klejów, w tabeli 3.1 przedstawiono ich średnie wartości. Analiza wskazuje na różnice w liczbie Poissona uzyskanej metodą pomiaru odkształceń z wykorzystaniem ekstensometru v oraz z wykorzystaniem metody cyfrowej korelacji obrazu v_{DIC} .

Tabela 3.1. Zestawienie właściwości mechanicznych badanych klejów wyznaczonych różnymi metodami w próbie rozciągania oraz próbie ściskania

	Próba rozciągania						Próba ściskania	
	R_e	R_m	E_r	A	v	v_{DIC}	R_{ec}	E_c
Klej	MPa	MPa	MPa	%	-	-	MPa	MPa
Metakrylowy	23,7	23,7	1610,5	19,4	0,42	0,40	45,8	1748,2
Epoksydowy	47,1	47,1	2730,6	8,5	0,39	0,40	51,6	2611,6
Poliuretanowy	2,57	6,55	51,6	30,0	-	0,47	-	33,25

Aby lepiej zobrazować różnice właściwości mechanicznych badanych klejów oraz różnice wynikające z metod ich wyznaczania połączono uzyskane wykresy z prób rozciągania i ściskania (rys. 3.6). Widoczne są różnice charakterystyk dla klejów. Klej metakrylowy oraz klej epoksydowy posiadają wyraźne granice plastyczności, która jest jednocześnie granicą wytrzymałości. Dla kleju poliuretanowego można wyznaczyć tylko umowną granicę plastyczności. Klej poliuretanowy posiada zdecydowanie mniejszą sztywność w stosunku do pozostałych dwóch przebadanych materiałów.

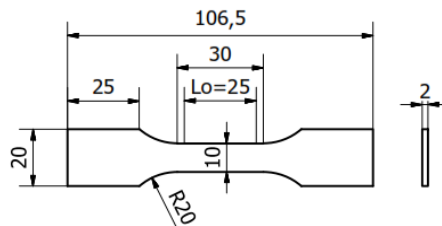


Rys. 3.6. Przykładowe zależności naprężenie-odkształcenie dla obciążeń rozciągających i ściskających klejów: metakrylowego - Plexus MA300, epoksydowego - Epidian 57+Z1, poliuretanowego - Multibond 3111

3.3. BADANIA STATYCZNE MATERIAŁÓW ŁĄCZONYCH

3.3.1. Próbkki do badań materiałów łączonych

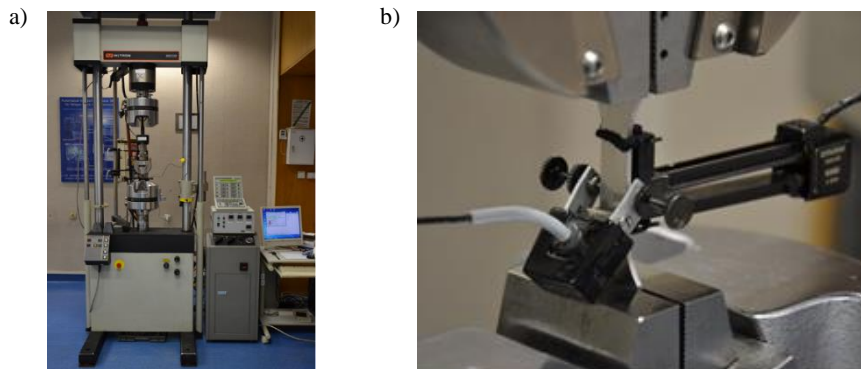
Zgodnie z planem badań próbki zakładkowe zostaną wykonane z następujących materiałów: stal C45, stop aluminium AW-5754 i tworzywo sztuczne ABS. Próbkki do badań właściwości mechanicznych łączonych materiałów wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2020. Kształt i wymiary próbek przedstawiono na rysunku 3.7.



Rys. 3.74. Wymiary próbek do badań właściwości materiałowych

3.3.2. Metoda i stanowisko do badań statycznych

Badanie właściwości statycznych przeprowadzono zgodnie z zaleceniami normy PN-EN ISO 6892-1. Próbkę przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej z napędem hydraulicznym INSTRON 8502 z siłomierzem o zakresie pomiarowym do 200 kN (rys. 3.8.a). Odkształcenie mierzono za pomocą ekstensometru wzdluznego, mocowanego na próbce o bazie pomiarowej 25 mm oraz ekstensometru poprzecznego (rys. 3.8.b).



Rys. 3.8. a) Stanowisko do badań statycznych: a) maszyna wytrzymałościowa Instron 8502; b) próbka z zamocowanymi ekstensometrem wzdluznym i poprzecznym

Przeprowadzono badanie na 5 próbkach z każdego materiału. Na podstawie otrzymanych wykresów naprężenie – odkształcenie wyznaczono wartość: E , R_m , R_e , A oraz ν .

3.3.3. Wyniki i wnioski z badań statycznych materiałów C45, AW-5754, tworzywa ABS

Właściwości mechaniczne wyznaczone podczas badań zebrano w tabeli 3.2. Trzy przebadane materiały cechują się różnymi wartościami podstawowych właściwości mechanicznych, w tym w szczególności: modułem Younga, granicą plastyczności oraz granicą wytrzymałości.

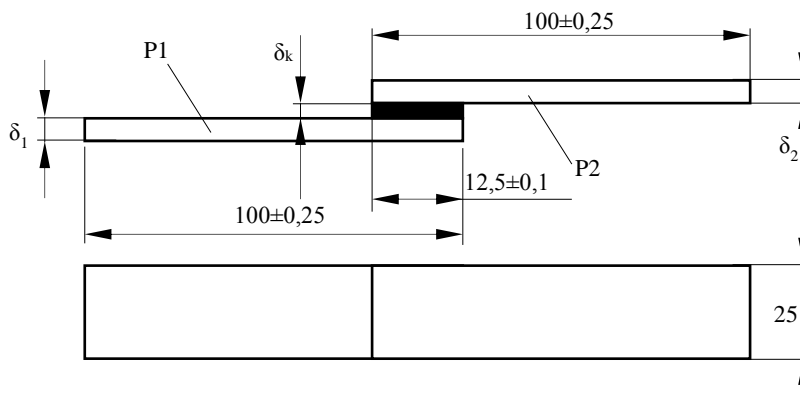
Tabela 3.2. Wartości średnie wybranych właściwości statycznych wyznaczonych podczas próby rozciągania

	Moduł Younga E	Granica wytrzymałości R_m	Granica plastyczności R_e	Wydłużenie przy zerwaniu A	Współczynnik Poissona ν
	GPa	MPa	MPa	%	-
Aluminium AW-5754	74,0	213	107,8	21,4	0,34
Stal C45	214,7	524,5	324,6	22,7	0,30
ABS	2,4	30,2	30,2	27,6	0,38

3.4. BADANIA STATYCZNE KLEJONYCH POŁĄCZEŃ ZAKŁADKOWYCH

3.4.1. Próbki do badań statycznych połączeń zakładkowych

Próbki do badań zakładkowych połączeń klejonych zaprojektowano na podstawie normy PN-EN 1465-2009 (rys. 3.9). Materiały łączone stanowiły płaskowniki ze stali C45 i tworzywa sztucznego ABS o grubościach 1,5 mm oraz płaskowniki aluminiowe o trzech różnych grubościach 1,5 mm, 3,0 mm, 5,0 mm. Do badań przyjęto 5 konfiguracji połączeń (tabela 3.3). W każdym połączeniu do łączenia elementów zastosowano klej metakrylowy Plexus MA300. Grubość warstwy kleju wynosiła 1 mm.

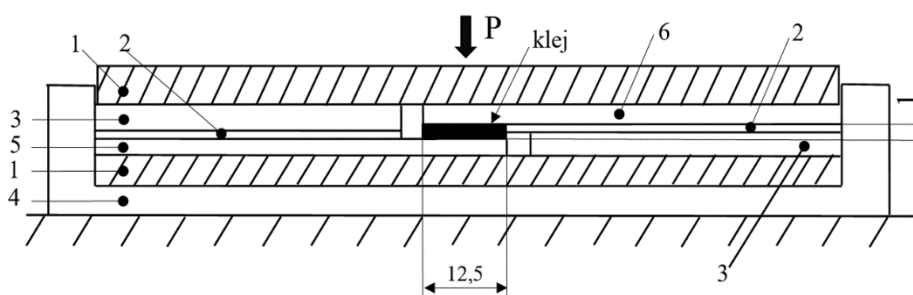


Rys. 3.9. Wymiary próbki zakładkowego połączenia klejonego zgodnie z PN-EN 1465-2009

Do sklejenia połączeń zastosowano przygotowany w tym celu przyrząd (rys. 3.10). Przed przystąpieniem do procesu klejenia na drewnianej podstawie (4) ułożone są przekładki (1,2,3) część próbki (5) oraz folia ochronna. Po nałożeniu kleju następuje kolejno: nałożenie drugiej części próbki (6), przełożenie folii, nałożenie przekładki (1) oraz dociśnięcie połączenia z wykorzystaniem ścisku stolarskiego.

Tabela 3.3. Typy połączeń zakładkowych przyjęte do badań wytrzymałości statycznej

Oznaczenie próbki	Materiały i ich grubości		
	Pierwszy element (P1)	Drugi element (P2)	Klej
S-S	Stal C45 $\delta_1 = 1,5$ mm	Stal C45 $\delta_2 = 1,5$ mm	Plexus MA300 $\delta_k = 1$ mm
S-A	Stal C45 $\delta_1 = 1,5$ mm	AW-5754 $\delta_2 = 1,5$ mm	
A-A	AW-5754 $\delta_1 = 1,5$ mm	AW-5754 $\delta_2 = 1,5$ mm	
A3-A3	AW-5754 $\delta_1 = 3,0$ mm	AW-5754 $\delta_2 = 3,0$ mm	
A5-A5	AW-5754 $\delta_1 = 5,0$ mm	AW-5754 $\delta_2 = 5,0$ mm	
ABS-ABS	ABS $\delta_1 = 2,0$ mm	ABS $\delta_1 = 2,0$ mm	
S-ABS	Stal C45 $\delta_1 = 1,5$ mm	ABS $\delta_1 = 2,0$ mm	
A-ABS	AW-5754 $\delta_1 = 1,5$ mm	ABS $\delta_1 = 2,0$ mm	



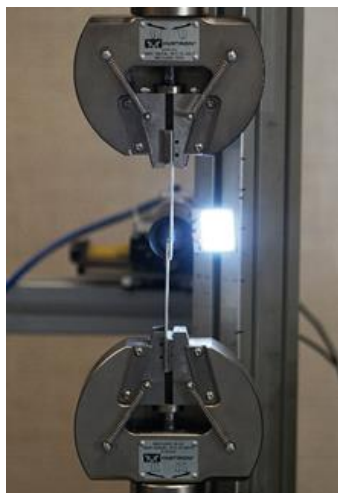
Rys. 3.10. Schemat stanowiska do klejenia pojedynczej próbki zakładkowej:

- 1, 3 –przekładka stalowa, 2 –przekładka PTFE, 4 – podstawa stanowiska,
5,6 – elementy próbki, P – siła docisku

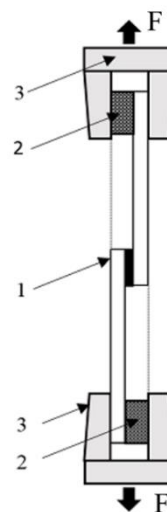
3.4.2. Metoda badań wytrzymałości statycznej zakładkowych połączeń klejonych

Próbki zakładkowe połączeń klejonych mocowano w uchwytach maszyny wytrzymałościowej INSTRON 5966 (rys. 3.11.a). Badanie przeprowadzono w warunkach otoczenia: temperatura 20°C, wilgotność 50%. Obciążenie próbki w osi warstwy kleju uzyskano poprzez zastosowanie podkładek w szczękach (rys. 3.11.b). Podkładki miały grubość równą łącznej grubości kleju i drugiego elementu sklejanego. Próbki badano w warunkach sterowania przemieszczeniem tłoka maszyny z prędkością wynoszącą 0,05 mm/s. W trakcie próby rejestrowano wartość: siły i przemieszczenia uchwytu maszyny.

a)



b)



Rys. 3.11. Sposób zamocowania próbki w uchwytach maszyny wytrzymałościowej: a) sposób zamocowania próbek; b) schemat montażu: 1 – próbka, 2 – podkładka, 3 – uchwyt maszyny wytrzymałościowej

Wynikiem rozciągania zakładkowych połączeń klejonych jest ich wytrzymałość na ścinanie R_t podawana w MPa. Wytrzymałość na ścinanie zakładkowego połączenia klejonego jest maksymalnym nominalnym naprężeniem stycznym osiągniętym w trakcie próby rozciągania.

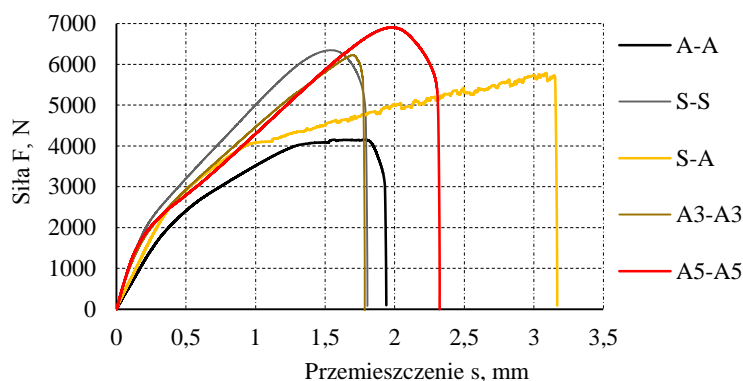
3.4.2.1. Wytrzymałość statyczna połączeń zakładkowych stali C45 i aluminium AW-5754

Wartości średnie uzyskanych sił niszczących dany typ połączenia zestawiono w tabeli 3.4. W tabeli podano również odchylenie standardowe oraz wartość nominalnych naprężeń niszczących. W tabeli zawarto również obliczone wartości średnie wytrzymałości na ścinanie, dla każdego przebadanego typu połączenia zakładkowego. Oznaczenie próbek przyjęto według tabeli 3.3.

W celu graficznego zobrazowania przebiegu rozciągania różnych badanych połączeń wybrano po jednej próbce każdego typu i przedstawiono na jednym zbiorczym wykresie (rys. 3.18).

Tabela 3.4. Maksymalne wartości sił dla przebadanych próbek różnych typów zakładkowych połączeń metal - metal

Numer próbki	Wartości sił niszczących połączenia zakładkowe F_{max} , N				
	A-A	S-S	S-A	A3-A3	A5-A5
Wartość średnia	4308,0	6737,0	4989,8	5953,9	6965,8
Odchylenie stand.	282,9	432,4	379,6	467,9	291,6
R_t , MPa	13,8 MPa	21,1 MPa	15,2 MPa	19,7 MPa	22,3 MPa



Rys. 3.18. Przykładowe wyniki badań próbek zakładkowych połączeń metal-metal

3.4.2.2. Wytrzymałość statyczna połączeń zakładkowych tworzywa sztucznego ABS

Wartości średnie uzyskanych sił niszczących dany typ połączenia zestawiono w tabeli 3.5. W tabeli podano również odchylenie standardowe oraz wartość nominalnych naprężeń niszczących R_t .

Tabela 3.5. Wyniki badań próbek zakładkowych połączeń tworzywo sztuczne – tworzywo sztuczne oraz metal – tworzywo sztuczne

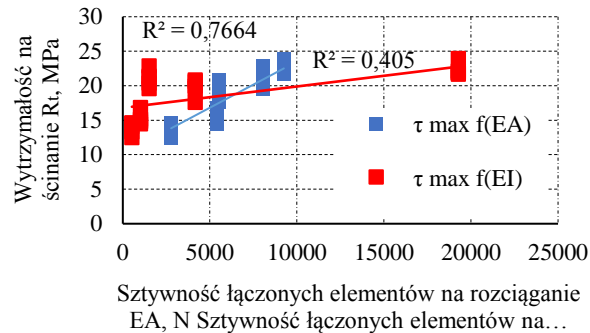
Numer próbki	Wartości sił niszczących połączenia zakładkowe F_{max} , N		
	ABS-ABS	S-ABS	A-ABS
Wartość średnia	1100,0	1412,5	1321,9
Odchylenie stand.	61,0	84,1	85,9
R_t , MPa	3,5 MPa	4,5 MPa	4,2 MPa

3.4.3. Analiza wyników badań wytrzymałości statycznej zakładkowych połączeń klejonych

Największą wytrzymałością charakteryzowały się próbki połączeń płaskowników stalowych grubości 1,5 mm z ABS grubości 2 mm. Najmniejszą wytrzymałość uzyskano w połączeniu dwóch płaskowników ABS o grubości 2 mm.

W celu określenia wpływu wzrostu średniej sztywności łączonych elementów na wytrzymałość połączenia obliczono dwa rodzaje sztywności: na rozciąganie oraz na zginanie.

Wyniki przedstawiono również w formie wykresu zależności wytrzymałości na ścinanie połączeń w zależności od obu parametrów (rys. 3.12).



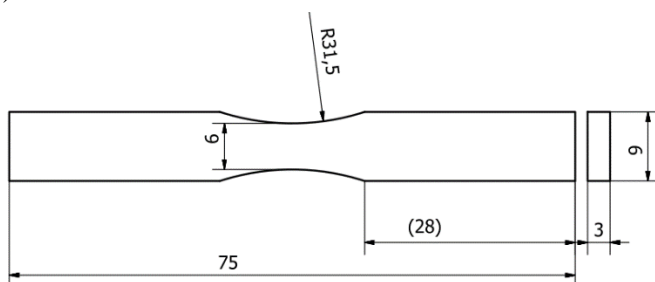
Rys. 3.12. Wykres zależności wytrzymałości połączenia na ścinanie w zależności od sztywności na rozciąganie oraz sztywności na zginanie łączonych elementów

3.5. BADANIA ZMĘCZENIOWE KLEJU METAKRYLOWEGO PLEXUS MA300

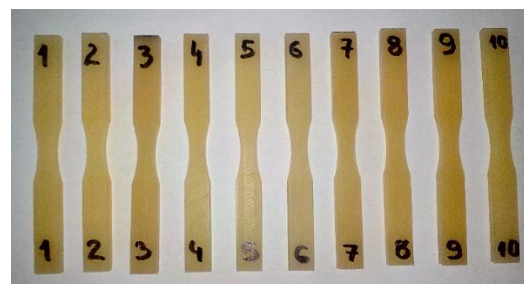
3.5.1. Metoda wytwarzania próbek do badań zmęczeniowych

Na podstawie wyników badań statycznych przedstawionych w punkcie 3.2.3, do badań zmęczeniowych przyjęto klej metakrylowy Plexus MA300. Próbki zaprojektowano zgodnie z wycofaną normą do badań metali na zmęczenie PN-74 H-04327. Próbki uzyskiwano analogicznie jak próbki do badań statycznych poprzez obróbkę mechaniczną z odlewanych płyt z kleju. W związku z tym wybrano próbki płaskie o zmiennym przekroju (rys. 3.13).

a)



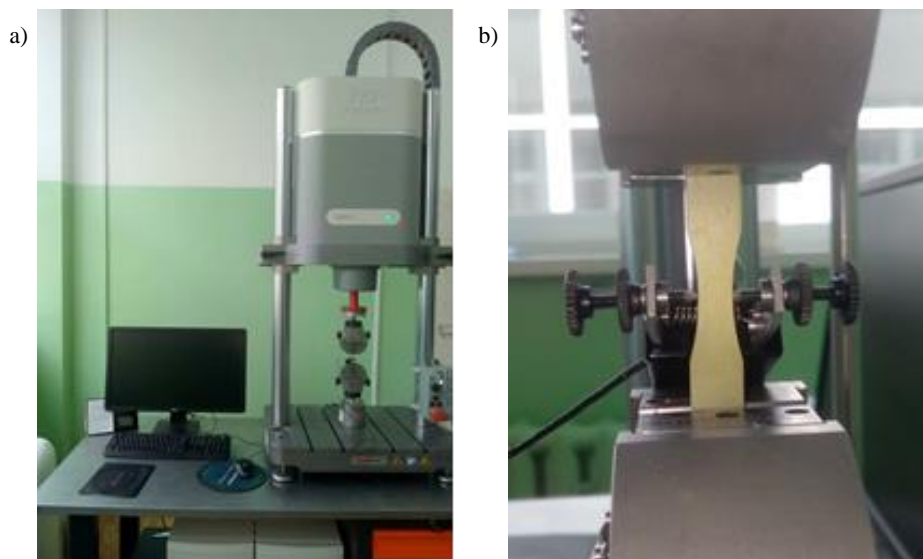
b)



Rys. 3.13. a) Wymiary próbki do badań w warunkach obciążeń zmiennych; b) Przykładowe próbki kleju przyjęte do badań w warunkach obciążeń zmiennych

3.5.2. Metoda badań i stanowisko badawcze

Badanie trwałości zmęczeniowej kleju metakrylowego Plexus MA300 przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron E10000 (rys. 3.14.a). Przyjęto współczynnik asymetrii cyklu $R = 0,1$. Badania przeprowadzono przy sterowaniu siłą, zmienną sinusoidalnie z częstotliwością $f = 5$ Hz. Dane rejestrowano z częstotliwością 1000 Hz, co pozwala na zapis 200 punktów na jedną pętlę obciążenia. Na próbkach montowano ekstensometr do pomiaru odkształceń poprzecznych (rys. 3.14.b).



Rys. 3.14. Stanowisko badawcze do badań zmęczeniowych kleju metakrylowego: a) maszyna wytrzymałościowa Instron E10000; b) próbka zmontowana w uchwytach maszyny z założonym ekstensometrem do pomiaru odkształceń poprzecznych

Badanie rozpoczynało obciążanie próbki do wartości minimalnej siły w cyklu, które trwało przez 5 s. Następnie program przechodził do obciążenia cyklicznego. Maksymalne obciążenia w cyklu σ_{\max} liczone tak aby stanowiły procentową wartość wytrzymałości materiału na rozciąganie, wyznaczonej w próbie statycznej:

Po próbnej serii badań przyjęto 4 progi obciążenia na poziomie: 100% R_m , 90% R_m , 80% R_m , 70% R_m . W tabeli 3.7 zestawiono wartości naprężeń maksymalnych oraz minimalnych w cyklu. Ponadto, podano amplitudę naprężeń σ_a i naprężenie średnie σ_m .

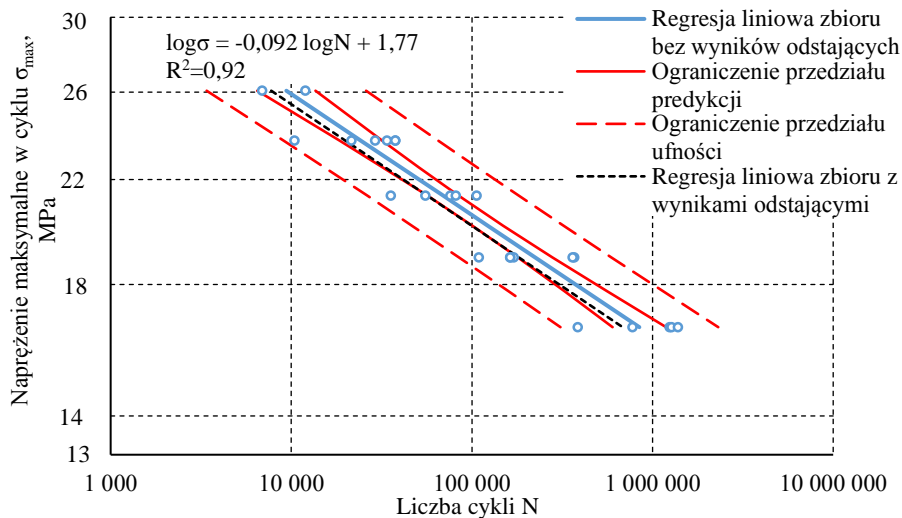
Tabela 3.7. Wartości naprężeń w cyklu dla określonych poziomów obciążenia

Poziom obciążenia	Wartości naprężeń w cyklu			
	σ_{\max}	σ_{\min}	σ_a	σ_m
110% R_m	26,1	2,61	11,7	14,4
100% R_m	23,7	2,37	10,7	13,0
90% R_m	21,3	2,13	9,59	11,7
80% R_m	19,0	1,90	8,55	10,5
70% R_m	16,6	1,66	7,47	9,13
60% R_m	14,2	1,42	6,39	7,81

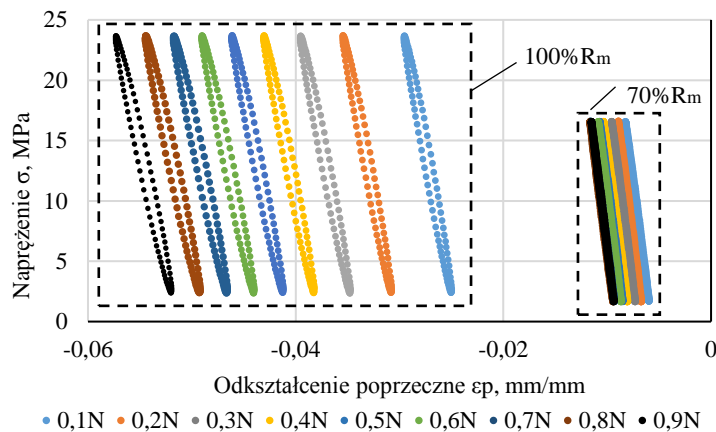
Wyniki badań zmęczeniowych kleju metakrylowego Plexus MA300 przedstawiono na wykresie (rys. 3.15). Przebadano 36 próbek. Dwie próbki badane na najniższym poziomie obciążenia nie uległy uszkodzeniu po 5 milionach cykli. Powyżej tej wartości próbę przerywano.

W trakcie badań rejestrowano naprężenia i odkształcenia w każdym cyklu. Na rysunku 3.16 przedstawiono pętle histerezy dla próbki obciążanej maksymalnie w cyklu na poziomie 100% R_m ($\sigma_{\max} = 23,7$ MPa) oraz 70% R_m ($\sigma_{\max} = 16,6$ MPa). Pierwsza z nich osiągnęła 34 016 cykli druga 1 277 175 cykli. Na wykresach przedstawiono wybrane pętle histerezy w zakresie od 0,1 N do 0,9 N, co 0,1N.

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów analizy pętli w postaci zależności wybranych parametrów w funkcji liczby cykli. Oprócz analizy charakteryzujących pojedyncze pętle można również rozpatrywać skumulowane wartości. Wartości te są sumą parametrów wyznaczanych dla wszystkich pojedynczych pętli histerezy aż do zniszczenia danej próbki.



Rys. 3.15. Wykres trwałości zmęczeniowej kleju metakrylowego Plexus MA300 dla zbioru po odrzuceniu wyników odstających



Rys. 3.5. Przykładowe pętle histerezy dla próbek kleju metakrylowego Plexus MA300 obciążonej maksymalnie na poziomie 100% R_m oraz 70% R_m

3.6. BADANIA ZMĘCZENIOWE ZAKŁADKOWYCH POŁĄCZEŃ KLEJONYCH

3.6.1. Obiekt badań oraz metoda wytwarzania próbek zakładkowych połączeń klejonych

Obiektami do badań trwałości zmęczeniowej były próbki zastosowane w badaniach statycznych. Ze względu na spodziewany duży rozrzut wyników badań, konieczne było przygotowanie większej liczby próbek. Zestawienie badanych typów próbek z wyszczególnieniem łączonych materiałów, ich grubości oraz oznaczeniem przedstawiono w tabeli 3.8. Wytworzono i przebadano zmęczeniowo ponad 100 próbek, po więcej niż 30 próbek każdego typu.

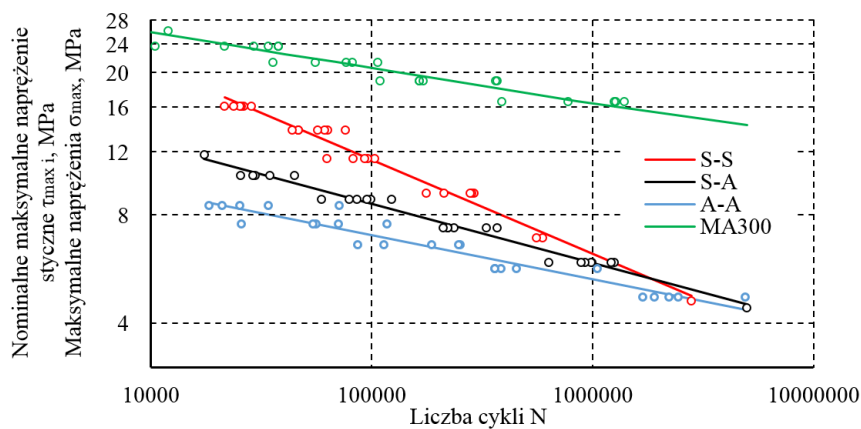
Tabela 3.8. Typy połączeń zakładkowych przyjęte do badań trwałości zmęczeniowej

Oznaczenie próbki	Materiały i ich grubości		
	Pierwszy element	Drugi element	Klej
S-S	Stal C45 $\delta_1 = 1,5$ mm	Stal C45 $\delta_2 = 1,5$ mm	Plexus MA300 $\delta_k = 1$ mm
S-A	Stal C45 $\delta_1 = 1,5$ mm	AW-5754 $\delta_2 = 1,5$ mm	
A-A	AW-5754 $\delta_1 = 1,5$ mm	AW-5754 $\delta_2 = 1,5$ mm	

3.6.2. Metoda badań i stanowisko badawcze

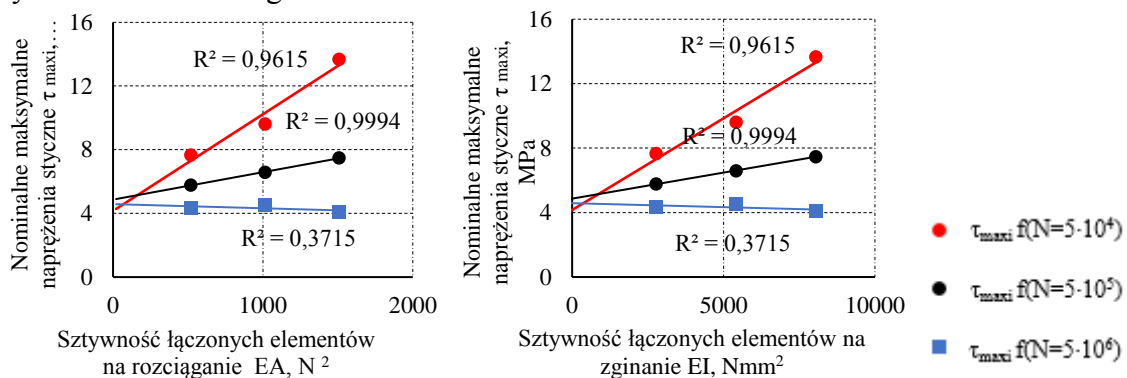
Próbkę montowano w uchwytach maszyny wytrzymałościowej przy użyciu przekładek, identycznie jak opisano w badaniach statycznych połączeń zakładkowych. Badania zrealizowano przy sterowaniu siłą dla zmienności obciążeń $R=0,1$ i częstotliwości 5Hz. Rejestrowano liczbę cykli, siłę oraz przemieszczenie tłoka. Wartości sił obciążających dla poziomów obciążenia przyjęto tak, aby stanowiły one procentową wartość wytrzymałości na ścinanie R_t połączeń zakładkowych.

Wyniki badań różnych typów próbek połączeń zakładkowych oraz kleju metakrylowego Plexus MA300 przedstawiono na rysunku 3.17. Linie regresji dla badanych typów połączeń różnią się wartością współczynników kierunkowych oraz wyrazów wolnych. Przecięcia się linii regresji występuje w zakresie od 4,6 do 5,2 MPa nominalnych maksymalnych naprężeń stycznych obciążających próbki. Poniżej tych wartości badane połączenia nie ulegały uszkodzeniu, bądź ich trwałości były znacząco większe od tych wynikających z wykreślonej linii regresji.



Rys. 3.17. Zestawienie wykresów trwałości zmęczeniowej badanych typów zakładkowych połączeń klejonych oraz kleju metakrylowego Plexus MA300

Określono wpływ średniej sztywności łączonych elementów na osiągnięte wartości naprężeń przy wybranych poziomach trwałości. W tym celu ponownie wykorzystano obliczone w podrozdziale 4.4.4 sztywności na rozciąganie i zginanie łączonych płaskowników. Na wykresie (rys. 3.18) przedstawiono zależność naprężeń na trzech rozpatrywanych poziomach trwałości w funkcji średniej sztywności łączonych elementów na rozciąganie oraz sztywności łączonych elementów na zginanie.



Rys. 3.18. Wpływ średniej sztywności na rozciąganie i zginanie łączonych elementów na wartości naprężeń na poziomach trwałości: $N=5 \cdot 10^4$, $N=5 \cdot 10^5$, $N=5 \cdot 10^6$

4. WYZNACZANIE ROZKŁADÓW NAPRĘŻEŃ I ODKSZTAŁCEŃ W ZAKŁADKOWYCH POŁĄCZENIACH KLEJONYCH

4.1. METODY ANALITYCZNE WYZNACZANIA ROZKŁADÓW NAPRĘŻEŃ

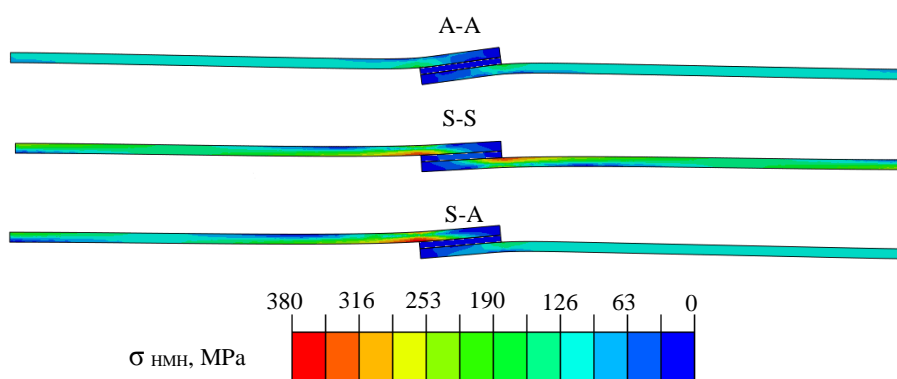
W celu prognozowania wytrzymałości oraz trwałości zakładkowych połączeń klejonych wykorzystuje się metody analityczne. Do ich zastosowania konieczna jest znajomość właściwości mechanicznych kleju oraz materiałów łączonych.

Większość metod analitycznych pozwala na określanie rozkładu naprężeń stycznych w połączeniu zakładkowym. Celem niniejszego rozdziału jest ocena, która z czterech podstawowych metod analitycznych pozwala na uzyskanie najbardziej zbliżonych do siebie wartości maksymalnych naprężeń stycznych, w badanych doświadczalnie typach próbek. Obliczenia rozkładów naprężeń w połączeniach wykonano metodą: inżynierską, Volkersena, Golanda-Reissnera oraz Adamsa-Pepiatta. Jako kryterium uszkodzenia połączenia przyjęto wartość maksymalnego naprężenia stycznego.

4.2. OBLICZENIA NUMERYCZNE POŁĄCZEŃ ZAKŁADKOWYCH

Alternatywą metodą obliczeniową względem metod analitycznych, jest metoda elementów skończonych (MES). Metoda ta umożliwia uwzględnienie nieliniowości oraz złożonego stanu naprężenia w spoinie. W niniejszym podrozdziale podjęto próbę określenia kryterium zniszczenia zakładkowego połączenia klejonego dla obciążeń statycznych i zmiennych na podstawie przeprowadzonych analiz MES.

Wyniki obliczeń przedstawiono dla obciążeń niszczących 3 typów zakładkowych połączeń klejonych. Jako obciążenia przyjęto obciążenie niszczące wyznaczone podczas statycznego rozciągania połączeń zakładkowych. Postać odkształcona próbek jest zbieżna z obserwowanym odkształceniem podczas badań eksperymentalnych (rys. 4.1). Największa rotacja połączenia występuje w próbce o najmniejszej sztywności na zginanie (A-A), najmniejsza rotacja widoczna jest w próbkach o największej sztywności (S-S).



Rys. 4.1. Postać odkształcenia próbek zakładkowych połączeń klejonych pod wpływem działania siły obciążającej

5. WNIOSKI

5.1. WNIOSKI Z BADAŃ

Analiza wyników badań doświadczalnych oraz obliczeń analitycznych i numerycznych w ramach realizacji rozprawy doktorskiej pt.: „Analiza wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej zakładkowych połączeń klejonych wykonanych z materiałów o różnych właściwościach mechanicznych” pozwoliła na sformułowanie szeregu uwag i wniosków. Do najważniejszych osiągnięć naukowych rozprawy należą:

- a) doświadczalna weryfikacja trwałości zmęczeniowej próbek zakładkowych wykonanych z materiałów o różnych właściwościach mechanicznych połączonych za pomocą kleju metakrylowego Plexus MA300 wykazała:
 - różnice w trwałości zmęczeniowej dla badanych typów próbek,
 - dla trwałości powyżej $5 \cdot 10^6$ cykli połączenia zakładkowe wykazały zbliżone wartości maksymalnych naprężeń stycznych, co wskazuje na brak wpływu sztywność łączonych materiałów na wytrzymałość zmęczeniową; praktycznym znaczeniem powyższego stwierdzenia jest możliwość przyjęcia jednej wartości naprężeń dopuszczalnych dla badanych typów połączeń zakładkowych podczas projektowania ze względu na trwałość zmęczeniową; wartość wyznaczonych maksymalnych naprężeń stycznych dla $5 \cdot 10^6$ cykli nie jest zbliżona do wartości wytrzymałości statycznej tych połączeń,
 - wartości maksymalnych naprężeń stycznych dla liczby cykli z zakresu 10^4 do 10^6 wykazują różnice wynikające ze współczynnika kierunkowego prostych opisujących wyniki trwałości zmęczeniowej dla określonych typów próbek zakładkowych; wartość maksymalnych naprężeń stycznych dla liczby cykli z zakresu od $2,5 \cdot 10^6$ do $5 \cdot 10^6$ cykli badanych typów połączeń mieści się w zakresie od 4,3 - 4,6 MPa,
- b) analiza wyników badań trwałości zmęczeniowej kleju metakrylowego Plexus MA300 wykazała:
 - duży rozrzut wyników badań trwałości zmęczeniowej,
 - zjawiska charakterystyczne dla tworzyw sztucznych w zakresie zachowania się materiału, obserwowanego zmianami pętli histerezy; do zjawisk tych można zaliczyć pełzanie oraz tłumienie powodujące dysypację energii; przypuszcza się że zjawiska te spowodowane są rozprostowywaniem się łańcuchów polimerowych fazy amorficznej oraz tarcieniem zachodzącym pomiędzy nimi (opisuje to literatura),
 - wykresy trwałości zmęczeniowej w ujęciu energetycznym charakteryzuje się wyższym współczynnikiem determinacji ($R^2 = 0,97$) niż wykres trwałości zmęczeniowej w ujęciu naprężeniowym ($R^2 = 0,92$),
- c) wskazanie kryteriów zniszczenia zakładkowych połączeń klejonych wykonanych za pomocą kleju metakrylowego:
 - dla obciążeń statycznych i na wysokich poziomach obciążeń zmiennych, proponuje się przyjęcie kryterium maksymalnego odkształcenia w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozciągania,
 - dla połączeń o wymaganej trwałości powyżej $5 \cdot 10^6$ cykli, można wykorzystywać kryterium maksymalnych naprężeń stycznych, obliczanych wzorem inżynierskim,
- d) opracowanie metodyki wykonywania próbek do badań właściwości statycznych i cyklicznych kleju metakrylowego Plexus MA300, którą zweryfikowano poprzez realizację badań doświadczalnych w warunkach obciążeń statycznych; niewielki rozrzut wyników w ujęciu statystycznym uzyskany w warunkach obciążeń statycznych

wskazał na poprawność przyjętej metodyki opartej na autorskiej technologii wykonywania powtarzalnych próbek pod względem geometrycznym i materiałowym.

Odnosząc się do celów pracy można sformułować następujące wnioski:

- Zaprezentowana w pracy metoda wykonywania odlewanych próbek kleju oraz przedstawione metody badań pozwalają na wyznaczenie właściwości mechanicznych klejów (metakrylowego Plexus MA300, epoksydowego Epidian 57+Z1, poliuretanowego Multibond 3111). Niewielki rozrzut wyników badań w warunkach obciążeń statycznych wskazuje, że przyjęta metodyka jest poprawna.
- Pętle histerezy występujące podczas obciążeń zmiennych, jednostronnych ($R = 0,1$) próbek kleju metakrylowego Plexus MA300 są porównywalne do zachowania się pętli histerezy dla tworzyw polimerowych. Zjawiska te opisywane są w literaturze. Energia dysypowana w cyklach ma większą wartość dla wysokich poziomów obciążenia. Dla wysokich poziomów obciążenia wartość energii w pętlach rośnie w kolejnych cyklach. Dla niskich poziomów obciążenie (dla wysokiej trwałości) pola powierzchni kolejnych pętli nie zmieniają się w sposób istotny.
- Wytrzymałość połączeń zakładkowych zależy głównie od mechanizmu uszkodzenia połączenia. Największą wytrzymałość połączeń uzyskuje się dla kohezijnego przełomu przez warstwę kleju. Przełom adhezyjny dla kleju metakrylowego w badanych typach połączeń należy uznać za błąd przygotowania powierzchni lub procesu klejenia.
- Trwałość zmęczeniowa zakładkowych połączeń klejonych na wyższych poziomach obciążeń (powyżej $\tau_{\max,i} = 5$ MPa) zależy od sztywności łączonych elementów. Dla niższych poziomów obciążeń poniżej $\tau_{\max,i} = 5$ MPa, sztywność połączenia ma znacząco mniejszy wpływ.
- Stosunek umownej granicy zmęczenia połączenia ($N = 5 \cdot 10^6$) do jego wytrzymałości statycznej jest mniejszy niż stosunek umownej granicy zmęczenia odlewanych próbek kleju do ich wytrzymałości na rozciąganie,
- Analiza rozkładów naprężeń stycznych wyznaczonych metodami analitycznymi (metodą inżynierską, metodą Volkersena, metodą Golanda-Raisnera, metodą Adamsa-Pepiatta) w zakładkowych połączeniach klejonych nie pozwala na szacowanie ich wytrzymałości na wyższych poziomach obciążeń. Metody te nie uwzględniają powstawania stref plastycznych w warstwie kleju i wyrównywania naprężeń wzdłuż jej długości.
- Analiza rozkładów naprężeń i odkształceń wyznaczonych metodą elementów skończonych w zakładkowych połączeniach klejonych, wykazała, że największe naprężenia występują na granicy klej-element łączony. Dla obciążeń niszczących z prób statycznych obserwuje się wyrównanie naprężeń i uplastycznienie kleju. Zasięg stref plastycznych od końców zakładki zależy od sztywności łączonych elementów. Potwierdza to analiza przełomów. Dla połączeń najsztyniejszych elementów cały przekrój warstwy kleju ulega uplastycznieniu. Dla najbardziej podatnych połączeń uplastyczniona strefa warstwy kleju występuje tylko w pobliżu końców zakładki.

W wyniku przeprowadzonych prac związanych z realizacją niniejszej pracy doktorskiej zgłoszono do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej trzy rozwiązania konstrukcyjne usprawniające proces wytwarzania i badania próbek połączeń klejonych. Uzyskano jeden patent, a dwa rozwiązania oczekują na weryfikację.