

**RADA NAUKOWA
DYSCYPLINY INŻYNIERIA MECHANICZNA**

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Anna Szymkowiak

**METODA BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI ZŁĄCZA
KLEJONEGO Z ZASTOSOWANIEM PRÓBKI TYPU
„SANDWICH”**

***METHOD OF TESTING THE STRENGTH OF AN
ADHESIVE JOINT USING A "SANDWICH" SAMPLE***

**DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH
DYSCYPLINA: INŻYNIERIA MECHANICZNA**

PROMOTOR PRACY

dr hab. inż. BOGDAN LIGAJ

Bydgoszcz, wrzesień 2024

SPIS TREŚCI

WYKAZ NAJWAŻNIEJSZYCH SYMBOLI I SKRÓTÓW	5
1. Wprowadzenie.....	7
2. Podstawowe informacje o klejach i procesie klejenia	10
2.1. Klasyfikacja i systematyzacja klejów	10
2.1.1. Klasyfikacja ze względu na pochodzenie kleju.....	10
2.1.2. Klasyfikacja kleju ze względu na procesy twardnienia ...	12
2.1.3. Przykłady zastosowania złączy klejonych w budowie maszyn	15
2.2. Właściwości fizyko-chemiczne procesu klejenia	17
2.2.1. Adhezja mechaniczna	19
2.2.2. Adhezja specyficzna	21
2.3. Swobodna energia powierzchniowa a zwilżalność	27
2.4. Wpływ wybranych czynników na wytrzymałość złączy klejonych	35
2.5. Cechy konstrukcyjne połączeń klejonych	43
2.6. Metody badań złączy klejonych.....	48
3. Problem badawczy, teza badawcza, cel i zakres badań	55
3.1. Problem badawczy i teza badawcza.....	55
3.2. Cel badań	57
3.3. Zakres badań.....	58
4. Charakterystyka metody badań złączy klejonych z zastosowaniem próbek typu sandwich.....	61
4.1. Ogólne uwagi dotyczące badań połączeń klejonych.....	61
4.2. Budowa próbki badawczej typu sandwich	63
4.3. Obliczenia numeryczne naprężeń w elementach próbki	69
5. Badania doświadczalne złączy klejonych	87
5.1. Badania zakładkowych połączeń klejonych	87
5.1.1. Próbka badawcza i program badań.....	87
5.1.2. Warunki i wyniki badań.....	89

5.1.3. Analiza wyników badań zakładkowych próbek klejonych.....	93
5.2. Badania złączy klejonych z zastosowaniem próbek typu „sandwich”	105
5.2.1. Próbką badawcza i program badań.....	105
5.2.2. Metoda przygotowania próbek typu „sandwich”	106
5.2.3. Stanowisko badawcze.....	111
5.2.4. Wyniki badań doświadczalnych.....	114
5.2.5. Analiza wyników badań próbek typu sandwich.....	129
6. Analiza wyników badań.....	140
7. Posumowanie i wnioski	152
7.1. Wnioski i spostrzeżenia z realizacji badań	152
7.2. Wnioski do dalszych badań	153
Literatura.....	155
STRESZCZENIE	163
ABSTRACT	165

WYKAZ NAJWAŻNIEJSZYCH SYMBOLI I SKRÓTÓW

Wykaz symboli:

a	– parametr związany z początkową wartością kąta zwilżania w równaniu Lucasa-Washburna,
b	– szerokość spoiny klejonej,
c	– parametr określający zmienność kąta zwilżania w czasie w równaniu Lucasa-Washburna,
f_t	– teoretyczna strzałka ugięcia dla belki górnej M1 próbki sandwich obliczona dla siły F,
f_p	– strzałka ugięcia zmierzona w chwili uszkodzenia złącza klejonego,
l	– długość spoiny klejonej,
n	– wykładnik empiryczny,
r	– promień kapilary modelującej por,
t	– czas penetracji,
x	– głębokość wnikania,
γ	– napięcie międzyfazowe na granicy klej - powietrze,
η	– lepkość kleju,
θ	– kąt zwilżania po czasie nieskończenie długim,
σ	– napięcie powierzchniowe metalu,
σ_0	– stała zależna od rodzaju cieczy,
$\sigma \tau_0$	– napięcie powierzchniowe cieczy w temperaturze topnienia T_{top} ,
$d\sigma/dT$	– współczynnik temperatury napięcia powierzchniowego,
ΔW	– praca niszcząca złącze klejone,
A	– pole powierzchni złącza,
E	– moduł sprężystości podłużnej,
F	– siła działająca w jednym punkcie przyłożenia obciążenia dla czteropunktowego zginania,
F_{max}	– maksymalna siła obciążająca połączenie,
K	– stała dla większości cieczy $2,1 \cdot 10^{-7} \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})^{2/3}$,
T_k	– temperatura krytyczna,
T_{top}	– temperatura topnienia,
M/ρ	– objętość molowa metalu,
W_a	– praca adhezji,
W1, W2	– praca,

S	– pole powierzchni,
S1, S2, S3	– wartość naprężeń zredukowanych,
R _a	– parametr chropowatość określany jako średnie odchylenie profilu od linii średniej,
R _t	– wytrzymałość na ścinanie,
R ²	– współczynnik determinacji,
ε ₁ , ε ₂ , ε ₃	– odkształcenie względne,
σ	– napięcie powierzchniowe,
σ _{AB} , σ _{BC} , σ _{AC}	– napięcia między fazowe pomiędzy stykającymi się fazami,
γ	– energia powierzchniowa,
γ _L	– energia powierzchniowa fazy ciekłej,
γ _S	– energia powierzchniowa fazy stałej,
γ _{LS}	– energia międzyfazowa,
γ _S	– energia powierzchniowa materiału w próżni,
γ _L	– energia powierzchniowa cieczy pomiarowej,
θ	– kąt zwilżania powierzchni cieczą,
Θ _{AB} , Θ _{AC}	– kąty zwilżania,
θ _A i θ _R ,	– oznaczają odpowiednio kąt zwilżenia dla cieczy rozlewającej się i dla cieczy cofającej się.

Wykaz skrótów:

AJ	– spoina klejowa,
g1	– grubość płaskownika górnego,
g2	– grubość płaskownika dolnego,
g3	– grubość warstwy kleju,
M1	– belka górna próbki typu sandwich lub jedna z zakładek próbki zakładkowej,
M2	– belka dolna próbki typu sandwich lub jedna z zakładek próbki zakładkowej,
T	– tensometr,
T1, T2	– punkty pomiarowe znajdujące się na belce górnej M1,
T3	– punkt pomiarowy znajdujący się na belce dolnej M2,
R	– promień krawędzi bocznej spoiny klejonej.

1. Wprowadzenie

Na podstawie analizy statystyk, opracowanych przez Europejskie Stowarzyszenie Producentów Klejów i Szczeliw **FEICA** opublikowało pierwszy w Europie podręcznik klasyfikacyjny dotyczący wyłącznie klejów i obszarów ich zastosowań. W 2008 r. standaryzację klasyfikacji rozszerzono o technologie szczeliw i zharmonizowano ją ze stosowaną w USA klasyfikacją **ASC**, co zapewniło porównywalność danych obu stowarzyszeń. Kolejny krok został poczyniony w 2012 r., gdy trzy wiodące asocjacje reprezentujące łącznie ponad 70% światowego rynku klejów i uszczelnaczy (**ASC** w USA, **CATIA** w ChRL i **FEICA** w Europie) połączyło wysiłki, aby stworzyć zuniifikowany podręcznik klasyfikacyjny. W wersji owego podręcznika z 2012 r. odnotowano jasnego podziału tego rynku na podsegmenty i zwiększono precyzję sformułowań, ułatwiając tym samym analizę porównawczą i agregację danych. Na wstępie dokument ten przyjmuje kilka definicji m.in., że klej jest to substancja, która szczepia lub wiąże ze sobą („*adheres or bonds*”) dwa lub więcej substratów.

Kleje mogą pochodzić ze źródeł naturalnych [6, 7, 16, 52, 68, 83, 89] bądź syntetycznych [14]. Niektóre innowacyjne kleje są ekstremalnie mocne (kleje strukturalne) i pełnią coraz ważniejszą rolę w nowoczesnych konstrukcjach i przemyśle. Klej jest kategorią generalną, obejmującą swoim zakresem m.in.: cementy, lepiszcza, luzy - klajstry (*mucilage*) i spoiwa w postaci pasty. Adhezja może mieć charakter czysto mechaniczny, gdy klej przenika przez niewielkie pory substratu, tworząc w nim rozgałęzione struktury lub pojawiać się w wyniku jednego lub kilku mechanizmów chemicznych. W niektórych przypadkach pomiędzy klejem, a substratem tworzy się prawdziwe (kowalencyjne) wiązanie chemiczne, w innych zaś za łączenie substancji odpowiadają siły międzymolekularne (np. van der Waalsa). W jeszcze innych zachodzi wspomagana wilgocią dyfuzja kleju do wnętrza substratu zakończona twardnieniem. Dobre zwilżenie klejem odpowiednio przygotowanych powierzchni jest wstępnym warunkiem skutecznego sklejenia.

Szczeliwo jest miękkim, elastycznym materiałem używanym do wypełnienia szczelin i pęknięć lub niezbyt trwałych połączeń, gdy ich strukturalna wytrzymałość nie jest wymagana. Szczeliwo, początkowo w stanie płynnym (lub aplikowane na gorąco) umieszczone między dwoma przeciwnymi powierzchniami stałych materiałów, samo staje się ciałem stałym (w wyniku odparowania rozpuszczalnika reakcji chemicznej lub obu tych procesów jednocześnie) i wiąże powierzchnie, do których zostało

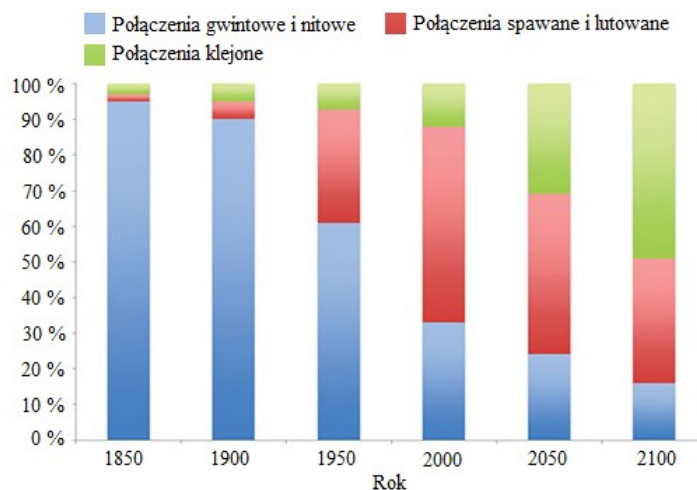
zastosowane. Przeznaczeniem szczeliw jest: zapobieganie nadmiernej absorpcji wody, penetracji przez inne ciecze, gazy lub pyły tworzące aerozol powietrzny. Adhezyjne i kohezyjne właściwości szczeliwa mają zapewnić trwałe uszczelnienie. Szczeliwa mają odpowiednie własności lepko-sprężyste, aby wycisnąć się przez dyszę (stożek wyciskacza), a następnie dać się uformować do pożądanego profilu i jednocześnie wystarczającą płynność, aby następowało grawitacyjne samopoziomowanie. Typowymi współczesnymi szczeliwami są silikony, akryle, uretany, kauczuki butylowe i inne polimery.

Kleje wrażliwe na nacisk (PSA) tworzą odrębną kategorię klejów stosowaną do przygotowania taśm, metek i podobnych wyrobów samoprzylepnych. Kleje PSA pojedynczopowłokowe (jednostronne) nakładane są na jedną ze stron powierzchni np. taśmy lub metki, podczas gdy błony dwustronnie klejące mają powleczone klejem obie strony arkusza. Klej po każdej ze stron nośnika może mieć jednakowy lub różny skład chemiczny i tą samą lub różną grubość naniesionej warstwy.

W XXI wieku klejenie jest już nie tylko alternatywą dla klasycznych metod spajania (tj. spawanie, zgrzewanie i lutowanie), lecz może z nimi skutecznie konkurować [18, 36, 38, 113]. Klejenie jest technologią przyszłości, zwyciężając pod względem najlepszego stosunku ciężaru do sztywności. Z jednej strony potrafi wygenerować oszczędności w procesie produkcyjnym, a z drugiej jest w warunkach przemysłowych jedną z bardziej złożonych i mało znanych technik, wymagających nie tylko specjalnych urządzeń, lecz także dużego doświadczenia. Dziedziną dynamizującą rozwój techniki klejenia jest przede wszystkim lotnictwo i kosmonautyka, a także przemysł samochodowy i budownictwo. Przy budowie samolotów i pojazdów kosmicznych stosuje się ultralekkie, ale niezwykle przy tym wytrzymałe konstrukcje, gdyż np. przy załogowych lotach na Księżyc zredukowanie masy pojazdu o 1 kg pozwala zaoszczędzić do 40 000 \$. Osłona termiczna promu kosmicznego Columbia zawierała ponad 20 000 płytek z czarnego szkliwa HRST, które są zbyt kruche, by wytrzymać naprężenia spowodowane wyginaniem się metalowej konstrukcji płatowca i dlatego przytwierdza się je na podkładach z filcu nomeksowego przyklejanego do aluminiowej konstrukcji klejem RTV (wulkanizującym w temperaturze pokojowej) i tym samym klejem przykleja płytki do podkładów, pozostawiając stosowne szczeliny dylatacyjne. Bardzo podobny radziecki wahadłowiec Buran nie osiągnął dojrzałości do realizacji misji komicznych m.in. z powodu nieco innego składu chemicznego kleju, którym przyklejone płytki już po jednym locie odpadały. W przemyśle narzędziowym coraz odważniej stosuje się do połączeń stali z węglkami spiekany klej binarne

oparte na żywicy metakrylowej łączące dużą wytrzymałość i sztywność z przyczepnością do trudno sklejalnych materiałów.

Nie jest tajemnicą, że udoskonalanie szczeliw i klejów zależne jest od stanu zaawansowania fizykochemii polimerów. Zwiększona wydajność klejenia i wyspecjalizowana funkcjonalność (jak: elastyczne wypełnianie mikroszczelin, przewodnictwo elektryczne i ciepłe, ochrona antykorozyjna, zdolność tłumienia wibracji i szumów) stanowi wyzwanie dla twórców klejów wychodzących naprzeciw niezaspokojonym potrzebom zastosowań przemysłowych i konsumenckich. Gwałtowny postęp w wytwarzaniu klejów osiągany jest przez: zastosowanie postępów chemii supramolekularnej i nanotechnologii, dostęp do doskonalszych składników, precyzyjniejszego sprzętu dozującego i pomiarowego nowych generacji, najnowocześniejszych procesów utwardzania. Materiałoznawstwo i wiedza o wiązaniach międzymolekularnych rozwinęła się niewyobrażalnie w ciągu ostatnich 5 000 lat, czemu towarzyszy wzrost zainteresowania klejeniem (rys. 1.1).



Rys. 1.1. Udział różnych technik łączenia elementów na przestrzeni lat [W5a]

Zgodnie z danymi przedstawionymi na rysunku 1.1. wykorzystanie połączeń klejonych w budowie maszyn na przestrzeni lat systematycznie wzrasta. W wielu rozwiązaniach konstrukcyjnych połączenia klejone zastępują połączenia spawane i lutowane, a także połączenia gwintowe i nitowe. Jest to związane z właściwościami fizyko-chemicznymi klejów. Prognozuje się, że w roku 2100 zastosowanie połączeń klejonych w budowie maszyn może osiągnąć 50%.

2. Podstawowe informacje o klejach i procesie klejenia

2.1. Klasyfikacja i systematyzacja klejów

2.1.1. Klasyfikacja ze względu na pochodzenie kleju

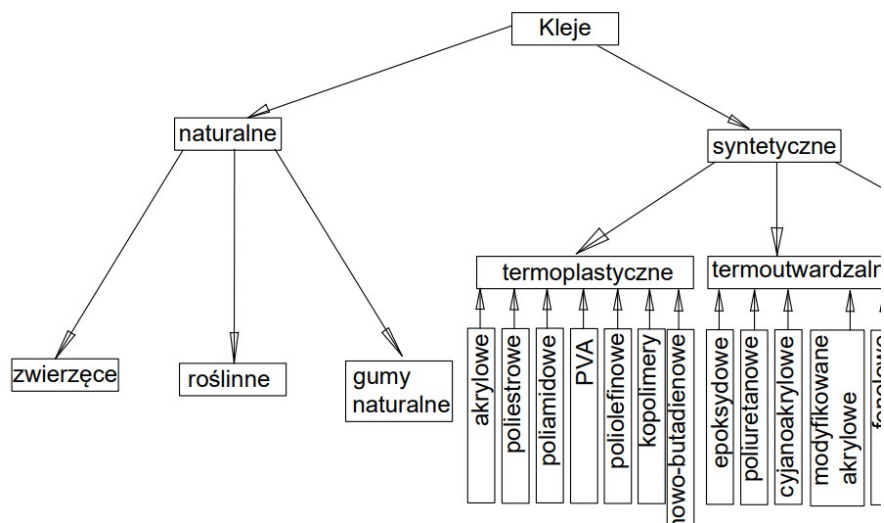
Wobec szerokiego dostępu asortymentu klejów i jeszcze większego, stale rosnącego wachlarza klejonych materiałów [67, 91, 98] zachodzi celowość ich wielowymiarowej klasyfikacji [24], aby ułatwić świadomy dobór i stosowanie. Kleje mogą być stosowane według wielu kryteriów, aczkolwiek żadna klasyfikacja - mimo istnienia norm politetycznego systemu Raynera i systemu SME - nie jest powszechnie przyjęta. Klasyfikacje obejmują pochodzenie (naturalne: roślinne lub zwierzęce i syntetyczne: organiczne lub nieorganiczne), funkcje, skład chemiczny (jedno i dwuskładnikowe; aminowe, ftalowe, epoksydowe, poliakrylowe, poliuretanowe, poliwinylowe, silikonowe), postać fizyczną, mechanizm i parametry utwardzania oraz spektrum zastosowań.

W klejach termoutwardzalnych powstaje usieciowanie za pomocą mocnych wiązań kowalencyjnych tworząc ze skleiny jedną gigantyczną molekułę. Proces sieciowania jest nieodwracalny. Sieciowanie w procesach utwardzania może być inicjowane poprzez ciepło, czynniki chemiczne i wolne rodniki, promieniowanie lub odparowywanie rozpuszczalników. W wyniku twardnienia silnie wzrasta wytrzymałość, elastyczność i trwałość. Większość tych klejów bazuje na epoksydach, poliestrach, poliamidach i fenolach [29].

Kleje termoplastyczne są utworzone przez polimery, które mięknią, stają się bardziej giętkie i plastyczne wskutek ogrzewania. Żadne nowe wiązania sieciujące nie tworzą się podczas ochładzania i twardnienia termoplastów. Proces sklejanie może być wielokrotnie odwracalny i powtarzany poprzez ogrzewanie lub stosowanie właściwego rozpuszczalnika. Struktura molekularna termoplastów jest kombinacją długich łańcuchów polimerowych sąsiadujących naprzemiennie z jednostkami monomerów. Typowe kleje termoplastyczne bazują na poliamidach, cyjanookrylanach, poliakrylanach oraz polioctanie winylu (PVA).

Kleje elastomerowe charakteryzują się podwyższoną sprężystością (- mogą być odwracalnie rozciągane w wysokim stopniu), a przy tym odpornością na działanie rozpuszczalników i starzenie oraz znaczną wytrzymałością mechaniczną. Zawierają one długie łańcuchy w niewielkim stopniu usieciowane. Umacnianie się skleiny zachodzi poprzez twardnienie termiczne lub odparowanie rozpuszczalnika w wyniku wzrostu stopnia usieciowania. Typowe kleje elastomerowe zawierają jako główny składnik kauczuki naturalne

(poliizoprenowe), silikony, butadien akrylonitrylowy (kopolimer butadienu i akrylonitrylu), neopren (kautczuk polichloroprenowy), kautczuk butadienowo - styrenowy oraz butylowy albo poliuretany. Powyższe rozważania podsumowuje drzewo klasyfikacyjne zobrazowane na rysunku 2.1 [37].



Rys. 2.1. Klasyfikacja klejów ze względu na pochodzenie i rodzaj polimeru

Kleje naturalne organiczne podzielić można na roślinne (dekstrynowe, sojowe, lateksowe, tapioka, żywice) i zwierzęce (kazeinowe, albuminowe, skórne, kostne, rybne, szelak naturalny, chitozan) wyodrębniając gumy naturalne jako oddzielną kategorię. Ich użycie raczej ogranicza się do sklejanego papieru, tektury, sklejk, lekkiego drewna i podobnych materiałów. Są one niedrogie, proste w stosowaniu i charakteryzują się długim okresem przydatności. Wiążą szybko, ale wytrzymałość sklejenia jest niewielka. Większość z nich jest rozpuszczalna w wodzie lub używa wody jako rozpuszczalnika, niektóre stanowią koloidalne zawiesiny w rozpuszczalnikach organicznych. Dostępne są w postaci płynnej lub jako proszki do wymieszania z wodą. Przykładem składników nieorganicznych są krzemiany sodu i potasu (szkło wodne) oraz proszki metalowe (Cu, Ni, Ti, Nb, Zr).

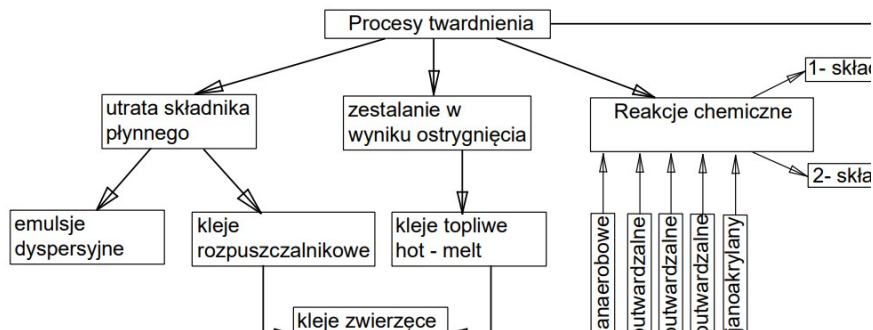
2.1.2. Klasyfikacja kleju ze względu na procesy twardnienia

Klasyfikacja pod względem funkcjonalnym obejmuje kleje strukturalne (ich zadaniem jest spajanie konstrukcji i wytrzymałość wysokich obciążeń) oraz niestrukturalne (przeznaczone np. do wypełniania luk albo jako kleje wiążące w zastosowaniach biurowych). Ze względu na formę fizyczną kleje mogą występować w postaci płynnej lub półpłynnej - elastycznej, past o wysokiej lepkości, taśm i folii samoprzylepnych, proszków i granulatów do podgrzewania lub rozpuszczania. Kleje są również często klasyfikowane ze względu na technikę nanoszenia, która zależy od ich parametrów reologicznych, a zwłaszcza lepkości: natryskiwanie, powlekanie, rozsmarowywanie (szczotkowanie), użycie taśmy klejącej czy ekstruzję past i mastyksów za pomocą pistoletów do uszczelniania, specjalnych strzykawek do kleju lub pneumatycznych urządzeń pompujących. Istotniejszym jednak kryterium klasyfikacji jest metoda tworzenia złącza (chemiczna lub fizyczna). Niektóre kleje zestalają się po prostu w procesie odparowywania rozpuszczalnika, podczas gdy inne twardnieją w wyniku aktywacji czynnikami fizycznymi lub chemicznymi, takimi jak:

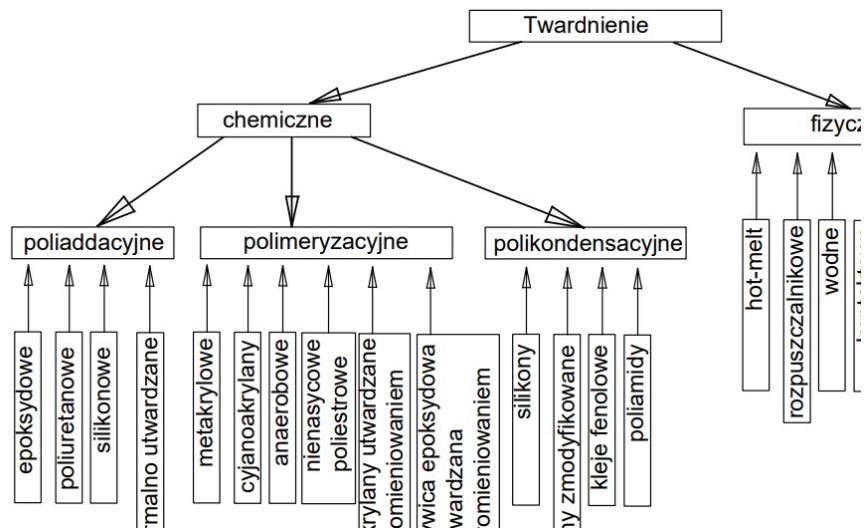
- a) ciepło – kleje tego typu (epoksydy, poliuretany, poliimidy) stanowią już gotową mieszaninę dwóch składników,
- b) światło widzialne lub ultrafioletowe o odpowiedniej długości fali – kleje światłoutwardzalne (akryle, cyjanoakrylany, uretany) zwykle zawierają fotoinicjatory potęgujące i przyspieszające proces twardnienia,
- c) wilgotność – kleje hydrotwardzalne (RTV silikon, cyjanoakrylany, uretany) twardnieją pod wpływem wilgoci z powietrza lub obecnej na powierzchni sklejanego substratu,
- d) odcięcie tlenu – kleje anaerobowe, zwykle akrylowe, twardnieją pomiędzy substratami metalowymi, których powierzchnie zostały pozbawione dostępu do tlenu.

Systemy klejące czułe na ciśnienie stają się płynne pod wysokim ciśnieniem, a tworzą trwałe połączenie po zaprzestaniu stosowania zwiększonego nacisku. Typowym przykładem są tu taśmy samoprzylepne.

Kleje dwuskładnikowe (epoksydowe, uretanowe, akrylowe, silikonowe) twardnieją w wyniku reakcji (polimeryzacji, polikondensacji lub poliaddycji) zagęszczających usieciowanie polimerów, gdy ich oba (czasami nawet więcej) składniki zostają wymieszane. Poszczególne procesy zostały przedstawione na rysunkach: 2.2 oraz 2.3, wykonane na podstawie pozycji [24, 37].



Rys. 2.2. Podział klejów ze względu na proces twardnienia [24, 37]



Rys. 2.3. Rodzaje procesów twardnienia [24, 37]

Tabelaryczne zestawienie stosowanych typów i form klejów ze względu na czynnik powodujący utwardzanie przedstawiono w tabeli 2.1 [37].

Z przyczyn praktycznych kleje klasyfikuje się również ze względu na łączone adherenty (substraty) odróżniając kleje od metali, drewna, plastiku, szkła, ceramiki, skóry itp. oraz wymagania dotyczące odporności na czynniki środowiskowe: kleje kwasoodporne, wodoodporne, odporne na wysokie temperatury lub kriogeniczne, odporne na warunki atmosferyczne oraz niekrytyczne (ogólnego stosowania).

Tabela 2.1. Czynniki powodujące inicjację procesu utwardzania kleju [37]

Wielkość fizyczna	Wymagania procesu	Stosowane formy	Uwagi
Ciepło	Od temperatur pokojowych do 232 ^o C, w klejeniu strukturalnym najpowszechniejsze 121-177 ^o C	Wszystkie formy, najczęściej płynna	Ogrzewanie zwiększa moc wiązania nawet dla klejów twardniejących w temperaturach pokojowych
Ciśnienie	Kontaktowe kleje do 3,5 MPa, w klejeniu strukturalnym najpowszechniejsze 0,17- 1,38 MPa	Wszystkie formy, najczęściej płyn i proszek	
Czas (twardnienie w temperaturach pokojowych)	Od kilku sekund do tygodnia, w klejeniu strukturalnym typowo 0,5- 24 h	Wszystkie formy	Wymagany czas zależy od stosowanej temperatury i ciśnienia oraz mocy wiązania
Katalizator (w temp. pokojowych)	Ekstremalna zmienność wymaganych katalizatorów, może zawierać rozcieńczalniki itp.	2-składnikowe: pasta+ płyn lub 2 płyny	Niekiedy wymaga podwyższonej temperatury (>100 ^o C) lub ciśnienia obok czynnika chemicznego
Wulkanizacja	Różne typy wymagające dodatku składnika chemicznego (zwykle S), mogą zawierać katalizator	2 płynne składniki	Dostępne są typy o wstępnie zmieszanych składnikach do wulkanizacji w temp. 121 ^o -177 ^o C
Reaktywacja	Typy wymagające ciepła lub rozpuszczalnika lub ponownego pokrycia klejem	Sucha powłoka lub wcześniej naniesiona ciecz	Termoutwardzalny skład jest najlepszy dla nieporowatych powierzchni i maksymalnej mocy wiązania
Promieniowanie	UV - akryle, kationowe epoksydy, kleje podwójnie utwardzalne	ciecze	Krótszy czas twardnienia niż kleje konwencjonalne, zwiększają tempo produkcji

Wyróżnia się także mikrokapsułkowane substancje klejące, a wśród nich: kleje przewodzące ciepłnie, elektrycznie w tym anizotropowe, wstępnie zmieszane kleje mrożone, kleje szybkowiążące, elastomery wrażliwe na nacisk, kleje anaerobowe i – przeciwnie - aerobowe.

2.1.3. Przykłady zastosowania złączy klejonych w budowie maszyn

Metoda klejenia jest powszechnie stosowana w przemyśle maszynowym, w budowie przyrządów i narzędzi medycznych, w środkach transportu itd. Proces klejenia jest procesem, na który wpływa wiele czynników takich jak: chropowatość powierzchni, sposób przygotowania powierzchni do klejenia, wilgotność, temperatura itp. W związku z tymi czynnikami możemy uzyskać złącze klejone o znacząco różnej wytrzymałości [43, 61, 103].

Prawidłowy wybór kleju jest procesem decyzyjnym [94, 106], polegającym na optymalizacji zespołu wielu czynników w ich wzajemnych uwikłaniach [110], np.:

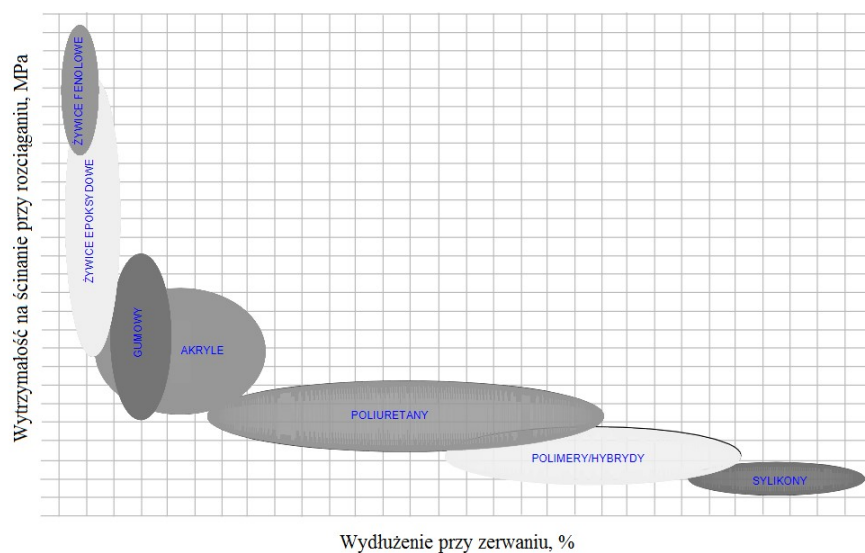
- a) materiał sklejanych substratów (adherentów),
- b) wymagana moc wiązania,
- c) wymagana elastyczność spoiny klejowej,
- d) warunki otoczenia (wilgotność, zmienność temperatury środowiska, agresywne czynniki chemiczne itp.),
- e) przewidziana temperatura pracy,
- f) projektowana struktura złącza klejowego,
- g) pożądane warunki twardnienia,
- h) biodegradowalność i względy ekologiczne,
- i) pracochłonność i trudność przygotowania powierzchni,
- j) efektywność kosztowa, komfort i przewidywany czas eksploatacji.

Przykładową wytrzymałość na ścinanie i towarzyszące rozerwaniu wydłużenie względne dla 7 grup klejów przedstawiono na rysunku 2.4 [2].

Przykładami są środki transportu m.in. pojazdy szynowe (rys. 2.5.a), autobusy (rys. 2.5.b), w których klejenie pozwala na:

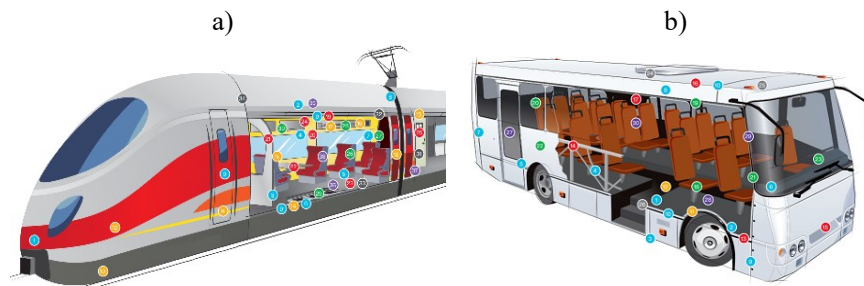
- a) kompensację błędów wykonywania elementów konstrukcyjnych,
- b) możliwość uzyskania szczelnych połączeń,
- c) wysoką wytrzymałość, zwłaszcza na ścinanie, nowoczesnych klejów konstrukcyjnych,
- d) odporność na korozję,
- e) zdolność do tłumienia drgań,
- f) możliwość łączenia materiałów o różnych właściwościach fizycznych,

- g) nieosłabienie łączonych elementów przez brak konieczności wykonywania w nich otworów,
- h) zmniejszenie masy pojazdu, skrócenie czasu produkcji.



Rys. 2.4. Względna klasyfikacja klejów z kategorii chemoutwardzalnych [2]

Przedstawienie właściwości poszczególnych klejów (rys. 2.4) wskazuje na powiązanie parametrów wytrzymałości na ścinanie z wydłużeniem przy zerwaniu kleju. Wraz ze wzrostem wytrzymałości maleje wydłużenie kleju i odwrotnie, tj. dużym wartościom wydłużeń towarzyszy niska wartość wytrzymałości.



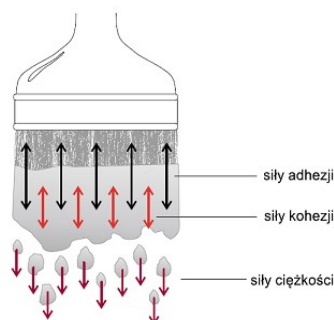
Rys. 2.5. Wykorzystanie połączeń adhezyjnych w produkcji [W2]:
a - pojazdów szynowych, b - autobusów

Wykorzystanie klejów w budowie maszyn na przykładzie pojazdu szynowego (rys. 2.5a) [W2]:

- a) kolor żółty - epoksydowe, akrylowe lub poliuretanowe kleje strukturalne stosowane do montażu czujników, klejenia materiałów kompozytowych (drzwi), montażu elementów kompozytowych, klejenia elementów poszycia, montażu podłóg itd.,
- b) kolor niebieski - poliuretanowe i hybrydowe kleje uszczelniające stosowane do montażu kompozytowych elementów czoła pojazdu, klejenia paneli, łączenia metalowych wsporników z ramą, montażu materiałów izolacyjnych, montażu konstrukcji siedzenia, montażu różnych instalacji i podłóg, klejenia/uszczelniania ram okiennych itp.

2.2. Właściwości fizyko-chemiczne procesu klejenia

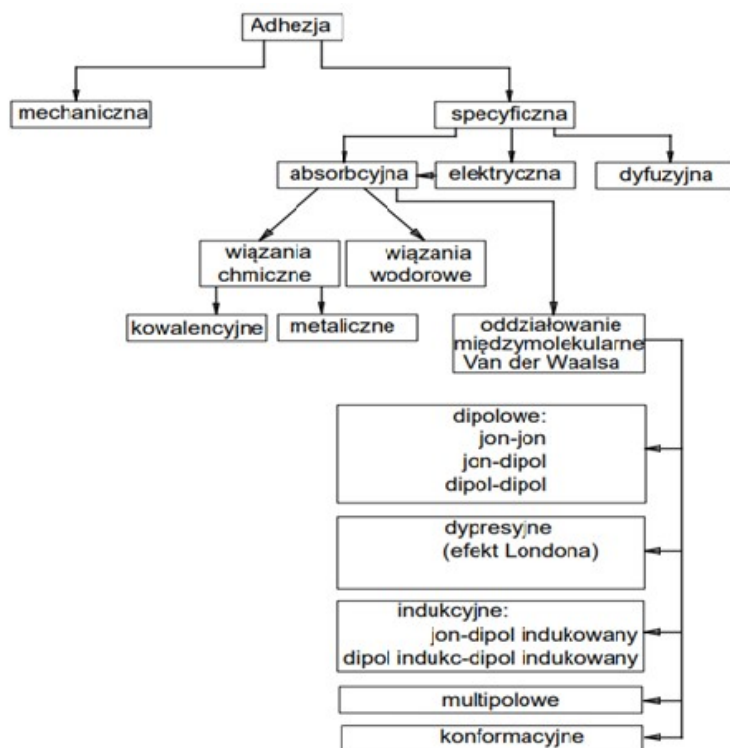
Uzyskanie trwałego i funkcjonalnego połączenia klejonego wymaga spełnienia dwóch fundamentalnych warunków: odpowiedniego związania spoiny klejowej z powierzchniami łączonych substratów (adhezja) oraz osiągnięcia wymaganej wytrzymałości w samej spoinie klejowej (kohezja). W prawidłowo zaprojektowanym i wykonanym połączeniu klejonym pożądana jest przybliżona równość tych sił. Zjawiska odpowiedzialne za powstawanie połączeń klejonych przedstawiono na rysunku 2.6 [120].



Rys. 2.6. Działanie sił adhezji i kohezji w praktyce [120]

Pomimo, że chemia kwantowa wyjaśnia naturę wiązań międzycząsteczkowych, nie osiągnięto jeszcze w naukach technicznych powszechnej zgody o przyczynach (i teoriach) adhezji [119, 25, 4, 3, 97, 118, 37, 34], ani o wyjaśniających w pełni mechanizmach procesu sklejanania. W ciągu 100 lat opracowano różne teorie, lecz okazało się jednak, iż trudno jest opisać złożony

proces klejenia pojedynczym teoretycznym mechanizmem. Prawdopodobnie kombinacja kilku różnych mechanizmów odpowiada za tworzenie się połączenia adhezyjnego o dużej wytrzymałości. Kuczmaszewski [71] systematyzuje graficznie różne teorie adhezji, które rozwijały się od lat dwudziestych ubiegłego stulecia. Po niewielkich modyfikacjach uwzględniających elektryczną naturę wiązań i uszczegóławiających ich typologię drzewo klasyfikacyjne przedstawiono na rysunku 2.7.

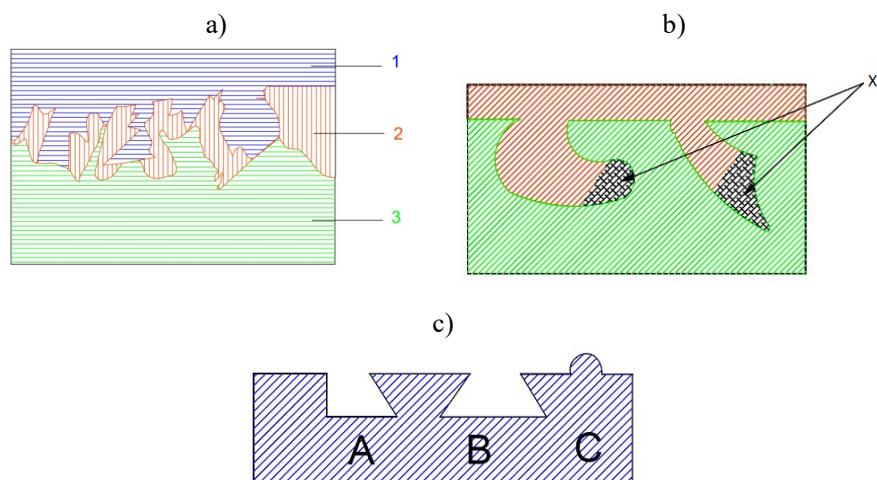


Rys. 2.7. Podział mechanizmów adhezji [71]

Wyróżnić można adhezję mechaniczną i specyficzną (właściwą), przy czym w realnych warunkach występują one łącznie, zaś adhezja właściwa dominuje przy jednoczesnym udziale adhezji mechanicznej.

2.2.1. Adhezja mechaniczna

Teoria adhezji mechanicznej (z 1925 r.), której twórcą jest Mc Bain, podaje, że wytrzymałość złącza klejonych rośnie wraz ze wzrostem chropowatości powierzchni łączonych materiałów. Klej o małej lepkości penetruje nierówności powierzchni i mikroszczeliny, wypierając z nich powietrze i zakotwiczając się w nich mocno, tworząc po utwardzeniu w kapilarach substratu wiążące mostki (rys. 2.8).



Rys. 2.8. Schematyczne przedstawienie adhezji mechanicznej: a – schemat przekroju poprzecznego złącza klejonego, b – wada wykonania połączenia klejonego, c – kształt wgłębień/wypukłości zwiększających pole powierzchni klejenia; 1 – materiał łączony nr I, 2 – warstwa kleju, 3 – materiał łączony nr II, x – niewypełnione przez klej dna porów i wgłębień, A – wgłębienie typu $\frac{1}{2}$ trapez, B – wgłębienie typu trapez, C – wypukłość typu $\frac{1}{2}$ walec [124]

Wytrzymałość jest efektem oporu, jaki stawia obciążeniu zewnętrznemu zestalona masa klejąca w wyniku mechanicznego jej zakotwiczenia [40, 124]. Zwiększenie chropowatości powierzchni substratu oznacza zwiększenie liczby wgłębień i rys, powodując czysto geometryczny wzrost pola powierzchni sklejenia. Do wgłębień o nieregularnych kształtach klej wnika nie zawsze całkowicie wypełniając pory (rys. 2.8.b), co można zaobserwować na fotografiach spod skaningowego mikroskopu elektronowego zamieszczonych w pracy [96]. Zbyt duża liczba drobnych porów jest bowiem pewną przeszkodą w ich wypełnianiu przez klej i osadza się on wówczas przede wszystkim na wierzchołkach nierówności. W głębi owych porów znajdują się zamknięte

pęcherzyki powietrza tworzące warstewkę graniczną, która osłabia połączenie adhezyjne. Istnieje zatem optymalny stopień schropowacenia, przekroczenie którego tworzy niekorzystne warunki oddziaływania międzymolekularnego pomiędzy klejem a materiałem. Stopień penetracji kleju zależy głównie od jego lepkości, temperatury, ciśnienia, czasu wnikania, kształtu i rozmiarów wgłębień w powierzchniach substratów. Do ilościowego opisu zjawisk wnikania kleju w pory i zagłębienia substratu (traktując je jako kapilary o promieniu r) można zastosować równanie Lucasa – Washburna [108], z którego wynika następujący wzór na dynamikę głębokości penetracji x [85]:

$$x^2(t) = \frac{r\gamma \cos\theta_\infty}{2\eta} \left[t - \frac{a}{c} + \frac{ae^{-ct}}{c} \right] \quad (2.1)$$

gdzie:

- x - głębokość wnikania,
- θ - kąt zwilżania po czasie nieskończenie długim,
- a, c - parametry związane z dynamiką zmiany kąta zwilżania,
- r - promień kapilary modelującej por,
- γ - napięcie międzyfazowe na granicy klej - powietrze,
- η - lepkość kleju,
- t - czas penetracji.

Równanie umożliwia ocenę czasu niezbędnego do wypełnienia przez klej wgłębień materiału chropowatego. Na tej podstawie stwierdzić można, że zwiększenie średnicy wgłębień ułatwia penetrację, zaś wzrost lepkości kleju ją ogranicza. Wyprowadzenie (2.1) można znaleźć w pracy [48].

W mechanicznej teorii adhezji przyjmuje się, że połączenia tworzone przez klej z substratem porowatym nie ulegają dekohezji na granicy faz pod wpływem obciążeń zewnętrznych. Dekohezja może zajść wyłącznie wewnątrz najszlubszego materiału złącza. Dlatego, więc decydujący wpływ na wytrzymałość złącza powinna mieć wytrzymałość kleju i łączonych substratów nie zaś zjawiska na styku faz. Powszechnie wiadomo, że za zwiększenie przylegania odpowiada nie tylko samo zakotwiczenie utwardzonego kleju w nierównościach powierzchni, lecz także liczby par i klastrów molekuł oddziałujących bliskozasięgowymi siłami van der Waalsa (adhezja właściwa). Rozwinięcia teorii Mc Baina dokonali w późniejszym

czasie E.M. Boroff oraz G. Salomon, co omówione zostało w pracy [124] oraz pracach [4, 3].

Mechaniczny charakter mają też późniejsze teorie adhezji opartych na teorii słabej warstwy granicznej. Podstawową cechą opracowanej przez J.J. Bikermana teorii słabej warstwy granicznej jest dostrzeżenie zależności adhezji dwóch materiałów od kształtu i rozmiarów tej warstwy. Wyjaśnia ona powód zmniejszonej adhezji istnieniem słabych warstw usytuowanych na powierzchni rozdziału faz lub w jej pobliżu, które uniemożliwiają dobre zwilżanie lub tworzą się w jego trakcie, hamując ów proces. Warstwy te mają małą kohezję lub też słabo przylegają do jednej z faz (lub obu z nich), co przesądza o wyraźnym zmniejszeniu wytrzymałości połączenia adhezyjnego. Usunięcie zaś słabych warstw granicznych z podłoża prowadzi do znacznego wzrostu wytrzymałości tego połączenia. W ten sposób teoria słabych warstw granicznych jest w stanie przewidzieć fakt, iż obróbka plazmowa skutkuje wyraźnym wzrostem adhezji, mimo, iż zwilżalność polimeru nie ulega zmianie.

2.2.2. Adhezja specyficzna

Pierwsze teorie dotyczące adhezji specyficznej stworzyli w 1944 Norman de Bruyne (wynalazca klejów *Redux* na bazie fenolowoformaldehydowej lub poliwinylowo – formaldehydowej) oraz w 1949, A.D. McLaren. Adhezja specyficzna jest efektem przyciągających sił molekularnych pomiędzy molekułami łączonych substratów a spoiwem. Teoria adhezji specyficznej obejmuje teorie adsorpcyjną, elektryczną i dyfuzyjną [68].

Adsorpcyjna teoria adhezji (której twórcami byli w 1963 L.H. Sharpe i H. Shornhorn) podaje, że zasadniczą przyczyną adsorpcji i adhezji jest różnica stanów energetycznych molekuł w głębi fazy skondensowanej i na powierzchni tej fazy. Na granicy faz molekuły zarówno kleju jak i substratu klejonego oddziałują bezpośrednio na siebie. Jeśli molekuły te obdarzone są nieznikającym momentem dipolowym, to ponadto zachodzi ich orientacja na granicy faz, aby zminimalizować powierzchnię entalpię swobodną. Zachodzi wówczas adsorpcja fizyczna, na którą może się także w przypadku niektórych materiałów nałożyć chemisorpcja w wyniku oddziaływań specyficznych związanych z efektem orientacyjnym (Keesoma), indukcyjnym (Debye’a), a w przypadku adsorpcji jonów również z oddziaływaniami elektrostatycznymi [30, 31]. W adsorpcyjnej teorii adhezji główną rolę odgrywają tzw. niespecyficzne siły międzycząsteczkowe, wśród których można wyróżnić 5 głównych grup: dipolowe (orientacyjne, Keesoma), indukcyjne

(Debye’a), dyspersyjne (Londona), konformacyjne i multipolowe wyższych rzędów. Siły dipolowe występują pomiędzy molekułami obdarzonymi trwałym momentem dipolowym, a ich energia (uśredniona po wszystkich orientacjach, co wolno uczynić jedynie wtedy, gdy dipole mają swobodę obrotu) jest odwrotnie proporcjonalna do szóstej potęgi odległości i do pierwszej potęgi temperatury bezwzględnej. Malejąca zależność od temperatury wynika (poprzez rozkład Boltzmanna) z konkurencyjności przyciągania między dipolami wobec coraz intensywniejszych ruchów termicznych. Wysokowytrzymałe połączenie między klejem a substratem o wiązaniach polaryzowanych tworzy się wtedy, gdy momenty dipolowe tych substancji są do siebie zbliżone (gdyż wtedy iloczyn ich kwadratów występujący w liczniku wzoru na energię jest duży). Siły indukcyjne Debye’a (między dipolami trwałymi a indukowanymi) są słabsze, więc ich znaczenie w adhezji też nie jest duże, choć ich energia również jest odwrotnie proporcjonalna do szóstej potęgi odległości. Nie zależą one od temperatury. Jeszcze słabsze, także niezależne od temperatury i o energii odwrotnie proporcjonalnej do szóstej potęgi r są siły dyspersyjne Londona. Przyciągające siły pomiędzy wzajemnie się indukującymi dipolami powstają wskutek synchronizacji ruchów elektronów w obu niepolarnych molekułach. Efekt działania tych sił występuje we wszystkich materiałach, a skuteczność ich oddziaływań manifestuje się w sytuacji jak największego zbliżenia pomiędzy molekułami klejonego substratu a molekułami kleju. Siły konformacyjne są wynikiem obrotu wokół wiązań chemicznych poszczególnych grup funkcyjnych lub atomów w ramach molekuly. Zmiana ich usytuowania przestrzennego (zwanego konformacją) powoduje zmiany chwilowego momentu dipolowego (podobnie jak zmiana we wzajemnym położeniu elektronów w przypadku sił dyspersyjnych Londona), a synchronizacja tych efektów rodzi zmiany w stanie energetycznym i przejawia się jako oddziaływanie międzymolekularne. Efekt ten dodaje się do efektu dyspersyjnego, a w przypadku makrocząsteczek polimerów może nie być zaniedbywalny w mechanizmach adhezji. Siły multipolowe powstają pomiędzy multipolami wyższych rzędów (kwadrupolami, oktopolami itp.) i wiążą się z wewnętrzną geometryczną kompensacją momentów dipolowych fragmentów cząsteczki. Energia oddziaływania dwóch kwadrupoli jest odwrotnie proporcjonalna do dziesiątej potęgi odległości, więc siły te nie mają wielkiego znaczenia w teorii adhezji, mimo iż występują powszechnie. Jak trafnie zauważają autorzy prac [34, 108], nie negując znaczenia sił Van der Waalsa w teorii adhezji, warto zwrócić uwagę na wiązania chemiczne, co do roli, których brak do dzisiaj w literaturze pełnej zgodności, choć wiadomo,

że w wielu procesach klejenia stosuje się podkłady (czyli specjalne powłoki poprawiające adhezję), co wskazuje na istotność chemisorpcji w procesach klejenia. Istotność ta wypływa między innymi z faktu, że siły wiązań chemicznych są około 100 razy większe od sił międzycząsteczkowych, a efekt ich działania zależy od aktywności chemicznej cząstek adsorbowanych i stanu energetycznego powierzchni. To właśnie wiązania chemiczne dają bardzo wytrzymałe połączenia i są mniej podatne na desorpcyjne działanie czynników dyfuzyjnych na granicy faz. Niezawodność w długotrwałej eksploatacji połączeń klejowych jest między innymi uwarunkowana występowaniem wiązań chemicznych. Wśród wiązań chemicznych można wyróżnić m.in.: wiązania kowalencyjne, jonowe oraz specyficzne wodorowe. Różnią się one przede wszystkim zmianą gęstości chmury elektronowej łączących się atomów. Jest to przyczyną dużego zróżnicowania energii potencjalnej tych wiązań.

Wiązanie wodorowe jest specyficznym rodzajem wiązania, które może być zarówno wewnątrzcząsteczkowe jak i międzycząsteczkowe. Czynnikiem powodującym występowanie tego rodzaju wiązania jest jądro wodoru, czyli proton, który ze względu na swe małe wymiary może przenikać w obszar powłoki elektronowej silnie elektroujemnego atomu, tworząc z otaczającymi elektronami silne oddziaływanie elektrostatyczne. Wiązania wodorowe występują szczególnie w cząsteczkach zawierających grupy hydroksylowe. One to między innymi decydują o szczególnej wytrzymałości polimerów. Wiele polimerów jest wzmocnionych przez wiązania wodorowe w łańcuchach i między nimi. Wśród polimerów syntetycznych znanym przykładem jest nylon, w którym wiązania wodorowe występują w powtarzalnej jednostce (monomerze) i odgrywają główną rolę podczas krystalizacji materiału. Wiązania te występują między grupami karbonyłowymi i aminowymi w powtarzalnej jednostce amidowej. Skutecznie łączą one sąsiednie łańcuchy, co wzmacnia materiał. Efekt jest spektakularny we włóknie aramidowym, gdzie wiązania wodorowe stabilizują poprzecznie łańcuchy liniowe. Osie łańcucha są ustawione wzdłuż osi włókna, dzięki czemu włókna są wyjątkowo sztywne i mocne. Sieci wiązań wodorowych sprawiają, że zarówno naturalne, jak i syntetyczne polimery są wrażliwe na poziom wilgotności w atmosferze, ponieważ cząsteczki wody mogą dyfundować na powierzchnię i zakłócać sieć. Wiązanie wodorowe stanowi czynnik spójności między poszczególnymi cząsteczkami wody, w wyniku czego obserwuje się stosunkowo wysoką entalpię parowania wody, współczynnik napięcia powierzchniowego oraz temperaturę wrzenia. Energie wiązań wodorowych są znacznie większe niż w zwykłych oddziaływaniach dipolowych i osiągają wartości w granicach

15÷50 kJ/mol. Wiązania wodorowe odgrywają ważną rolę nie tylko w przypadku adhezji, lecz również kohezji. Zapewniają one, jak wyżej zauważono (jako wewnątrzcząsteczkowe wiązania wodorowe), szczególnie dużą wytrzymałość poliamidów, poliuretanów i naturalnych włókien celulozowych.

Wiązania kowalencyjne charakteryzują się najwyższą energią zawierającą się w przedziale od 400 kJ/mol do 600 kJ/mol. Występują rzadko jako czynnik powodujący adhezję. Wiązania jonowe tworzą się między dwoma łączącymi się atomami o dużej różnicy w elektroujemności. Ich energia zawiera się w granicach 200÷400 kJ/mol.

Chemiczne teorie adhezji koncentrują się na chemisorpcji pomiędzy klejem a substratem dzięki występującym w ich cząsteczkach grupom funkcyjnym zdolnym do tworzenia wiązań chemicznych. Jakość połączeń chemicznych można zwiększyć przez zastosowanie odpowiednich utwardzaczy i termoobróbki. Jest to szczególnie uzasadnione przy wpływie wilgotności na połączenie. W celu poprawy wiązania chemicznego używa się silanów. Są one szeroko stosowane w połączeniach z podłożem szklanym lub krzemionkowym, gdzie zastosowany polimer jest często wzmacniany włóknami szklanymi. Wśród nowoczesnych teorii chemicznych Sina Ebnesajjad [37, str. 22] wyodrębnia teorię zwilżania (która zostanie zreferowana w kolejnym podrozdziale) oraz wspomina o dość młodej teorii kwasowo-zasadowej (Fowkes, Gutmann, Bolger & Michaels) opartej na elektronowej teorii kwasów Lewisa: kwasem jest akceptor pary elektronowej. Szczególnym przypadkiem oddziaływania kwas – zasada Lewisa jest tworzenie się wiązań wodorowych. Oddziaływania na granicy faz pomiędzy substancjami mogącymi funkcjonować jako donory bądź akceptory pary elektronowej leżą u podstaw kwasowo – zasadowej teorii adhezji, wyjaśniając wiele przypadków klejenia oraz – z przeciwnej perspektywy praktycznej – procesów tribologicznych.

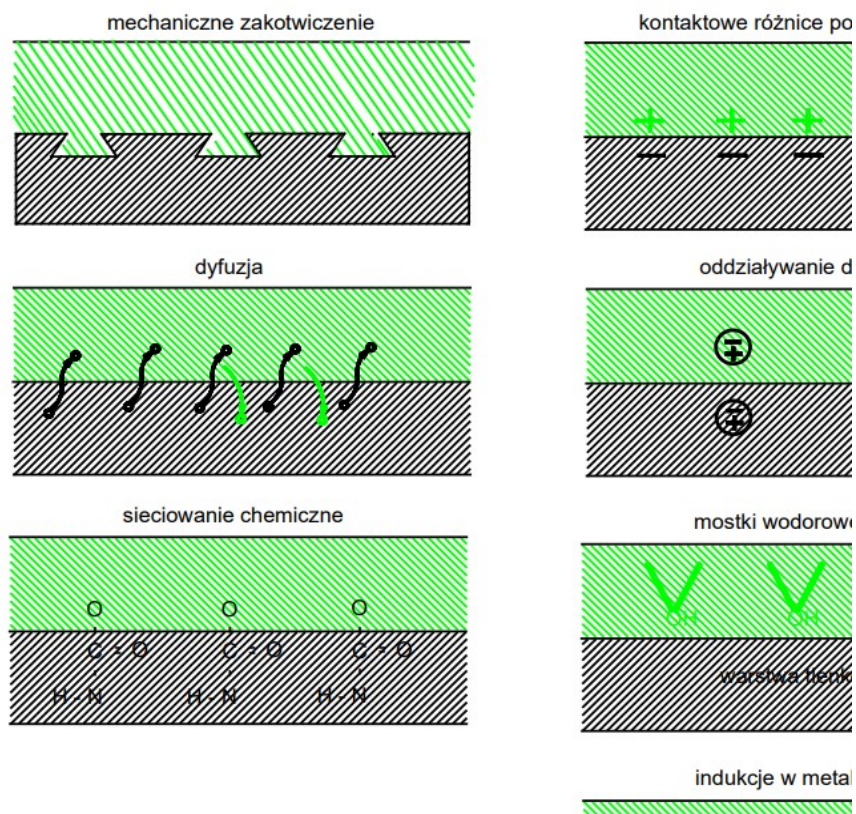
W 1948r. B. U. Dieriajin i N. A. Krotowa wystąpili z hipotezą, że podstawę adhezji stanowi przyciąganie elektrostatyczne podwójnej warstwy elektrycznej (elektryczna teoria adhezji). Siły oddziaływania w teorii adhezji elektrycznej są wynikiem oddziaływania spoin i powierzchni ciała klejonego. Powstają w wyniku różnych prac wyjścia elektronów, w efekcie czego następuje przechodzenie elektronów z jednego materiału na drugi. W wyniku tego jedna z warstw staje się względnie uboższa w elektrony, co prowadzi do powstania podwójnej warstwy elektrycznej powodującej efekt przyciągania. Teoria ta ma jednak ścisły związek z teorią adsorpcyjną, gdyż przejścia elektronów wywołuje orientowana adsorpcja grup polarnych kleju

na powierzchni ciała łączonego, co łączy się z obecnością i ilością grup polarnych.

W 1948 B. V. Dieriagin (Борис Владимирович Дерягин) i Natalia Alexandrowna Krotowa [30, 31]) wystąpili z hipotezą, że podstawę adhezji stanowi przyciąganie elektrostatyczne podwójnej warstwy elektrycznej. Siły oddziaływania w teorii adhezji elektrycznej są wynikiem oddziaływania spoin i powierzchni substratu klejonego. Powstają one w wyniku różnic prac wyjścia elektronów, w efekcie czego następuje przechodzenie elektronów z jednego materiału na drugi dla wyrównania się poziomów Fermiego. W wyniku tego jedna z warstw staje się względnie uboższa w elektrony, co prowadzi do powstania podwójnej warstwy elektrycznej powodującej efekt przyciągania. Siły te mają charakter elektrostatyczny i odpowiadają za odporność złącza na oddzieranie. Uznano je za jedną ze składowych sił adhezji, ponieważ przeciwdziałają oddzieraniu obu materiałów tworzących złącze. Ich wielkość przypadająca na jednostkę powierzchni tak powstałego złącza zależy głównie od gęstości ładunku powierzchniowego w obu częściach podwójnej warstwy elektrycznej. Wartość tych sił, przypadająca na jednostkę powierzchni tak powstałego połączenia, zależy głównie od gęstości ładunku powierzchniowego w obu częściach podwójnej warstwy elektrycznej. Autorzy elektrostatycznej teorii adhezji podjęli próbę wykorzystania prawa Pashena do obliczeń wytrzymałości złącz adhezyjnych. Prawo to określa zależność wartości napięcia przeskoku ładunku elektrostatycznego między dwoma elektrodami od iloczynu odległości między nimi i ciśnienia gazu w przestrzeni międzyelektrodowej. Za elektrody uznano powierzchnie warstwy kleju i materiału klejonego odsuwane od siebie podczas oddzierania do momentu, w którym następuje między nimi wyładowanie elektryczne. Próby te zakończyły się niepowodzeniem, aczkolwiek późniejsze badania oddzierania złącz adhezyjnych złożonych z różnych materiałów potwierdziły jednoznacznie, że oddzieraniu towarzyszą wyładowania elektryczne oraz emisja fal elektromagnetycznych, między innymi w zakresie widma światła widzialnego [32]. Badania elektrometryczne wykazały również obecność ładunków elektrostatycznych. Wszystko to przemawia na korzyść elektrostatycznej teorii adhezji, która, choć nie ma znaczenia podstawowego, to jednak dobrze tłumaczy niektóre aspekty zjawisk adhezji.

Dyfuzyjna teoria adhezji, opracowana przez S.S. Vojuckiego [124] oraz Ju. S. Lipatowa, przedstawia zjawisko adhezji, jako wzajemne przenikanie atomów kleju do podłoża i podłoża do kleju. Dyfuzję można traktować jako rodzaj nanopłączenia mechanicznego na poziomie molekularnym. Przyczyną dyfuzji

napędzanej ruchami Browna jest różnica potencjałów termodynamicznych (entalpii swobodnych) cząsteczek łączonych materiałów. Zaletą dyfuzyjnych połączeń adhezyjnych są ograniczone naprężenia własne w strefie międzyfazowej, a zmiana właściwości fizycznych, przy przejściu z jednej fazy do drugiej, nie ma charakteru skokowego (grubość warstwy międzyfazowej wynosi 1-100 nm). Nie występuje więc na tym obszarze międzyfazowym żadna koncentracja naprężeń, gdyż brak jakichkolwiek nieciągłości własności fizycznych. Teoria dyfuzyjna ma zwłaszcza zastosowanie do opisu przyczepności polimerów w przypadku, gdy i adherent i klej zbudowane są z makromolekuł o relatywnie długich łańcuchach, zdolnych do ruchów Browna. Dyfuzją molekuł wyjaśnia mechanizm cementowania rozpuszczalnikowego oraz zgrzewania na gorąco. Model dyfuzyjny nie wyjaśnia wszakże w sposób wyczerpujący powstawania zjawiska adhezji polimerów z powodu różnic usieciowienia, krystalizacji i temperatury zeszklenia.

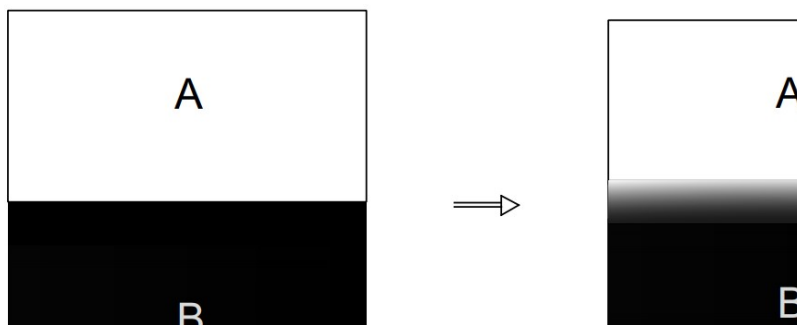


Rys. 2.9. Fizyczne i chemiczne przyczyny adhezji warstwy pokrywającej do substratu

Z powodu złożoności zjawisk występujących podczas klejenia powstała koncepcja uogólnionej teorii adhezji, opartej na elementach teorii fizykochemicznej, jednak obejmująca także główne pomysły zawarte w innych przedstawionych wyżej teoriach [124]. Wskazuje ona na bezpośredni związek między siłami oddziaływań międzycząsteczkowych i odległością między tymi cząsteczkami. Próba unifikacji istniejących teorii umożliwia dokonanie ilościowej oceny adhezji (wytrzymałości spoiny) jako siły wiązań przypadających na jednostkę powierzchni. Formuluje ona warunek konieczny do powstawania złączy o dużej wytrzymałości adhezyjnej [12]: zbliżenie cząstek dwóch ciał na odległość $< 0,9$ nm oraz wystarczający: duże siły przyciągania przy możliwie najniższej (najbardziej ujemnej) energii potencjalnej wiązania. Współgrające ze sobą w tworzeniu połączenia klejonego fizyczne i chemiczne mechanizmy adhezji przedstawiono na rysunku 2.9.

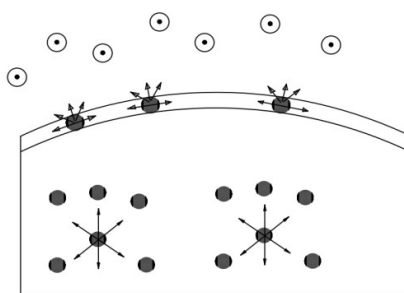
2.3. Swobodna energia powierzchniowa a zwilżalność

Adhezja jest zjawiskiem, które zachodzi na międzyfazowych powierzchniach styku adherentów (substratów) i kleju (rys. 2.10). Należy tu doprecyzować, że w wyniku mechanizmów dyfuzyjnych po pewnym czasie przestaje istnieć granica faz (*interface*), a w jej miejsce pojawia się obszar międzyfazowy (*intephase*), w którym znika nieciągłość własności fizycznych kleju i substratu i zmieniają się one w sposób ciągły (obszar międzyfazowy nie może być więc traktowany jako powierzchnia przenosząca naprężenia) [17].



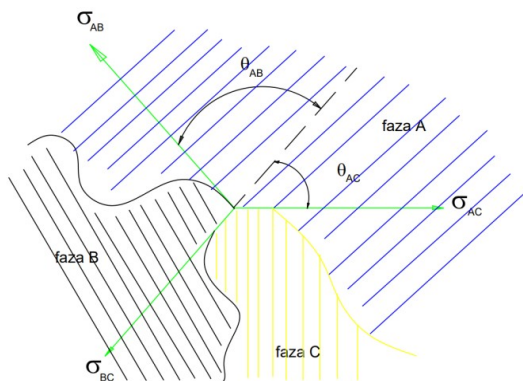
Rys. 2.10. Zanik granicy faz w wyniku mechanizmów dyfuzyjnych

Rozumienie sił, które tworzą się na styku faz jest kluczowe dla poprawnego doboru kleju, właściwego przygotowania sklejanych powierzchni oraz efektywności procesu powstawania wiązania klejonego. Molekuły w pobliżu powierzchni międzyfazowej różnią się energetycznie od takich samych molekuł wewnątrz objętości materiałów, gdyż sąsiadują z molekułami innej fazy, z którymi inaczej oddziałują (rys. 2.11). Skład cząsteczkowy i energia zmienia się w sposób ciągły w obszarze międzyfazowym o grubości rzędu 100 nm.



Rys. 2.11. Stan energetyczny molekuł wewnątrz fazy i w obszarze międzyfazowym

Przyczyną napięcia powierzchniowego są oddziaływania międzycząsteczkowe pomiędzy molekułami cieczy [35, 56]. Napięcie powierzchniowe na granicy faz termodynamicznych A i B nazywane jest również napięciem międzyfazowym. Jego wysoka wartość (mierzona liczoną na jednostkę powierzchni entalpią swobodną na granicy faz) oznacza, że siły kohezji wewnątrz faz A-A i B-B są większe niż siły adhezji na granicy faz A-B. Jest ono przypadającą na jednostkę długości konturu siłą styczną wzdłuż tego konturu do powierzchni rozdziału faz i wobec tego posiada charakter wektorowy (rys. 2.12).



Rys. 2.12. Napięcia międzyfazowe

Wartość sił adhezji na granicy faz wyraża się wzorem (2.2):

$$\sigma_{BC} = \sigma_{AB} \cos \theta_{AB} + \sigma_{AC} \cos \theta_{AC} \quad (2.2)$$

gdzie:

σ_{AB} , σ_{BC} , σ_{AC} - napięcia międzyfazowe pomiędzy stykającymi się fazami,

θ_{AB} , θ_{AC} - kąty zwilżania.

Nazwa napięcia powierzchniowego jest zwykle zarezerwowana dla sytuacji, gdy drugą fazą jest gaz (powietrze nasycone parami danej fazy skondensowanej). Współdziałanie sił napięcia powierzchniowego, grawitacji i sił aerodynamicznych konstryuuje kształt spadających kropli deszczu. Nieruchoma kropla w warunkach nieważkości przyjąłaby kształt kuli, minimalizując pole powierzchni (rozdziálu faz) przy ustalonej objętości.

Napięcie powierzchniowe (wyrażone w N/m) i swobodna energia powierzchniowa (wyrażona w J/m²) w przypadku cieczy mają jednakowe wartości (choć jedna z tych wielkości jest wektorem, a druga skalarem). W przypadku powierzchni ciał stałych nie musi być to prawdą ([37], str. 19). Energia powierzchniowa polimerów może być rozseparowana na dwie addytywne składowe: polarną i dyspersyjną, stosownie do odpowiedzialnych za nią sił van der Waalsa. W bardziej zaawansowanych modelach, takich jak OWRK (Owensa, Wendta, Rabela i Kaelble) stosuje się nawet rozkład na 6 składowych: dyspersyjną, polarną, pochodzącą od mostków wodorowych, indukcyjną, kwasowo-zasadową i pozostałą.

Napięcie powierzchniowe cieczy maleje wraz z temperaturą, dla większości cieczy spadek ten jest liniowy i wyraża się półempirycznym równaniem Eötvösa o postaci ogólnej (2.3):

$$\sigma \left(\frac{M}{\rho} \right)^{2/3} = k(T_k - T - \delta) \quad (2.3)$$

gdzie:

- K - stała dla większości cieczy $2,1 \cdot 10^{-7} \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})^{2/3}$,
- M/ρ - objętość molowa substancji,
- T_k - temperatura krytyczna,
- δ - poprawka około 6 K.

W równaniu tym tkwi założenie, iż napięcie powierzchniowe znika w temperaturze krytycznej. Dokładniejsze ujęcie wymaga pomniejszenia tej temperatury o poprawkę (Ramay & Shields) δ około 6 K. Guggenheim i Katayama zaproponowali nieliniową formułę zależności temperaturowej napięcia powierzchniowego (2.4):

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 - \frac{T}{T_c} \right)^n \quad (2.4)$$

gdzie:

- σ₀ - stała zależna od rodzaju cieczy,
- n - wykładnik empiryczny.

W pracy [66] empiryczny wykładnik n dla rozpuszczalników organicznych wynosi 11/9.

Jeśli znamy napięcie powierzchniowe danej substancji w jej temperaturze topnienia, to możemy przewidzieć napięcie powierzchniowe cieczy w dowolnej wyższej temperaturze za pomocą zastosowanego do zjawisk powierzchniowych termodynamicznego równania Gibbsa-Helmholtza (2.5):

$$\sigma = \sigma\tau_0 + \frac{d\sigma}{dT}(T - T_{\text{top}}) \quad (2.5)$$

gdzie:

- στ₀ - napięcie powierzchniowe cieczy w temperaturze topnienia T_{top},
- dσ/dT - współczynnik temperatury napięcia powierzchniowego.

W przypadku metali napięcie powierzchniowe zależy proporcjonalnie od bezwzględnej temperatury topnienia i wyraża się wzorem (2.6):

$$\sigma = 3,6 \cdot T_{top} \left(\frac{M}{\rho} \right)^{-2/3} \quad (2.6)$$

gdzie

- σ - napięcie powierzchniowe metalu,
- T_{top} - temperatura topnienia,
- M/ρ - objętość molowa metalu.

Ciało stałe rozumiemy tu jako materiał posiadający sprężystość objętości i postaci. Wiązania między atomami lub molekułami są w ciałach stałych na tyle silne, że uniemożliwiają w pełni swobodny ich ruch - możliwe są jedynie oscylacje (których anharmoniczny charakter obserwujemy jako rozszerzalność termiczną). Do ciał stałych należą więc fazy o silnie uorganizowanej strukturze dalekiego zasięgu (jak: faza krystaliczna, kryształy plastyczne, kryształy condis i quasikryształy) oraz pozbawiona zdefiniowanej struktury faza amorficzna. Kryształy plastyczne charakteryzuje zdolność do obracania się wokół własnej osi tworzących je molekuł składowych. Molekuły kryształów condis mogą zmieniać swoje konformacje, a quasikryształy co prawda mają uporządkowaną strukturę (z przewagą 5-krotnych osi symetrii), ale uporządkowanie to nie jest regularne. Faza amorficzna, choć posiadająca fenomenologiczne atrybuty ciała stałego, pod względem struktury molekularnej bardziej przypomina przechłodzoną, bardzo lepka cieciz (szkła, w tym szkła metaliczne, żywice polisiloksanowe, opale, bursztyny, obsydian). Działając siłą ścinającą na ciało stałe można wytworzyć w nim pole naprężeń i odwracalną lub nieodwracalną zmianę kształtu. Energia powierzchniowa rozumiana jako praca wymagana do jednostkowego, izotermicznego i odwracalnego zwiększenia powierzchni swobodnej nie może w przypadku ciał stałych być zmierzona metodami opracowanymi dla cieczy, gdyż odwracalne formowanie ich powierzchni napotyka nieprzewyciężone trudności.

Powierzchnie materiałów stałych można jakościowo podzielić na 2 kategorie: o wysokiej i niskiej energii powierzchniowej. Do materiałów o wysokiej energii powierzchniowej należą metale i związki nieorganiczne takie jak: tlenki, krzemiany, krzemionka, diament i azotki. Napięcie powierzchniowe takich materiałów wynosi $0,2 \div 0,5$ N/m. Materiały o niskiej energii powierzchniowej zwykle złożone są ze związków organicznych (w tym polimerów) o krytycznym napięciu powierzchniowym poniżej 100 N/m. Materiały o niskiej energii powierzchniowej (jak smary i oleje), są spontanicznie absorbowane przez powierzchnie o wysokiej energii, gdyż

proceeds to the reduction of the total free energy of the surface of the system. For this reason, a clean surface of the material with a high surface energy, in ordinary conditions of the environment, will not remain clean for a long time due to the absorption of water and organic particles from the atmosphere. Therefore, it is necessary to clean the surface directly before operations such as: gluing or coating, before the surface cleaning.

Reversible thermodynamic work, required to separate the interface of two separate and non-interacting phases (so they do not interact with each other) is called adhesion work and in the case of contact of a liquid phase with a solid phase is expressed by the Dupré equation (2.7):

$$W_a = \gamma_L + \gamma_S - \gamma_{LS} \quad (2.7)$$

gdzie:

- γ_L - energia powierzchniowa fazy ciekłej,
- γ_S - energia powierzchniowa fazy stałej,
- γ_{LS} - energia międzyfazowa,
- W_a - praca adhezji.

Wzrost przyciągania międzyfazowego dokonuje się kosztem wzrostu pracy adhezji. Szczegóły zostały opisane w pracy [20].

Dependence between surface energy σ (vector value) and surface energy γ is described by Shuttleworth's equation relating to the mechanical definition of surface energy (2.8):

$$\sigma = \gamma + S \cdot \frac{d\gamma}{dS} \quad (2.8)$$

gdzie:

- σ - napięcie powierzchniowe,
- γ - energia powierzchniowa,
- S - powierzchnia.

Praca [84a] discusses the question of its proper and improper interpretation. In the case of a liquid (e.g. in the process of spreading of glue) a new surface S molecules spontaneously take new positions, equilibrium, so the term with the derivative disappears and the equality $\sigma = \gamma$ holds. Therefore, in the case of a liquid we usually talk about surface energy (which is easier to measure), and in the case of solids about surface energy. From equation (2.8) it also follows that adhesion work, when both phases (L, S) are identical and no phase boundary is formed (2.9):

$$W_c = 2 \cdot \gamma_s \quad (2.9)$$

gdzie: $\gamma_L = \gamma_s$ oraz $\gamma_{LS} = 0$.

Większość cieczy zwilża w różnym stopniu powierzchnie ciał stałych i możemy wtedy zaobserwować kąt zwilżania θ , rozumiany jako kąt utworzony przez powierzchnię ciała stałego (S) i płaszczyznę styczną do powierzchni cieczy (L) graniczącej z tym ciałem stałym w atmosferze jej pary nasyconej (V). W układzie statycznym kąt zwilżania może być mierzony w stanie równowagi.

Rysunek 2.13 przedstawia kąt zwilżania θ w idealnym systemie, w którym powierzchnia ciała stałego jest jednorodna, gładka, płaska i sztywna. Napięcia międzyfazowe γ reprezentują wartości równowagowe w punkcie, w którym wszystkie 3 fazy się kontaktują. Warunek równowagi (2.10):

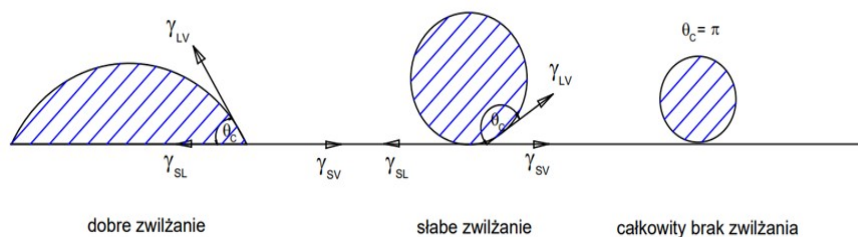
$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos(\theta_c) \quad (2.10)$$

nosi nazwę równania Younga (1805). Równanie to opisuje stan układu idealnego i wyznaczenie z niego energii powierzchniowej ciała stałego nie jest możliwe, gdyż zawiera ono 2 niewiadome: γ_{SV} i γ_{SL} . Dlatego w celach praktyczno - obliczeniowych stosuje się następującą postać równania Younga (2.11):

$$\gamma_s = \gamma_{SL} + \gamma_L \cos(\theta) \quad (2.11)$$

gdzie:

- γ_s - energia powierzchniowa materiału w próżni,
- γ_L - energia powierzchniowa cieczy pomiarowej,
- θ - kąt zwilżania powierzchni ową cieczą.



Rys. 2.13. Kąt zblizania

W przypadku zwilżania materiału stałego cieczą dochodzi do jej adhezji na granicy styku faz, wymagającej pracy opisanej równaniem Dupré (2.7). W wyniku połączenia równań (2.7) i (2.11) otrzymuje się równanie Younga-Dupré (2.12):

$$W_a = \gamma_L (1 + \cos(\theta)) \quad (2.12)$$

Na podstawie równania (2.12) pracę adhezji cieczy do ciała stałego można wyliczyć na podstawie znajomości jedynie energii powierzchniowej cieczy i kąta zwilżania.

W realiach technicznych powierzchnie mają niejednorodny skład i nie są idealnie gładkie. Proces zwilżania takiej powierzchni może prowadzić do stanu równowagi lub zatrzymać się w stanie metastabilnym. W przypadku powierzchni idealnych dodanie lub usunięcie niewielkiej objętości cieczy z kropli skutkuje odpowiednio jej postępowaniem lub cofaniem się, a kąt zwilżania powraca do swojej wartości równowagowej. W przypadku realnych powierzchni, które mogą zawierać chropowatości i niejednorodności składu, istnieje zwłoka w ruchu kropli w jej reakcji na dodanie lub usunięcie niewielkiej ilości cieczy. Wartość kąta zwilżania cieczy postępującej po powierzchni ciała stałego przekracza wartość kąta zwilżania tejże cieczy cofającej się po tej samej powierzchni. Zjawisko to, mierzone różnicą w wartościach kąta zwilżania (postępującego θ_A i cofającego θ_R), nazywa się histerezą kąta zwilżania i wymaga rewizji koncepcji kąta styku. R. Tadmor i E. Chibowski [23] zauważyli, że zjawisko to występuje nawet na powierzchniach gładkich i wówczas równowagowy kąt zwilżania należy wyrazić poprzez swoistą średnią ważoną cosinusów (2.13):

$$\cos \theta_c = \frac{r_A \cos \theta_A + r_R \cos \theta_R}{r_A + r_R} \quad (2.13)$$

gdzie:

$$r_A = \sqrt[3]{\frac{\sin^3 \theta_A}{2 - 3 \cos \theta_A + \cos^3 \theta_A}} \quad (2.14)$$

$$r_B = \sqrt[3]{\frac{\sin^3 \theta_R}{2 - 3 \cos \theta_R + \cos^3 \theta_R}} \quad (2.15)$$

θ_A i θ_R - oznaczają odpowiednio kąt zwilżenia dla cieczy rozlewającej się i dla cieczy cofającej się.

Harkins i Livingston w pracy [49] zaproponowali poprawkę do równania Younga (2.10) dotyczącą sytuacji, gdy na powierzchni ciała stałego powstała cieniutka warstwa skroplonej pary. Energia powierzchniowa takiej granicy faz zawierającej zaadsorbowaną warstwę pary (γ_{SA}) jest mniejsza niż powierzchni czystej, niezawilgoconej. Ma to praktyczne znaczenie, gdyż czyste powierzchnie wykazują tendencję do chłonięcia z atmosfery par i olejów. Czyste powierzchnie wymagają zatem przed naniesieniem kleju ochrony od niepożądanego adsorpcji. Poprawka Harkinsa i Livingstona zwana współczynnikiem rozprzestrzenienia π_E została wskazana w równaniu (2.16), a po podstawieniu do równania Younga (2.10) daje (2.17):

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SA} - \pi_E \quad (2.16)$$

$$\gamma_{SA} = \gamma_{LV} \cos(\theta_c) + \gamma_{SL} + \pi_E \quad (2.17)$$

Międzymolekularną interpretację tego ciśnienia w równaniu Younga przedstawia praca [111]. Współczynnik rozprzestrzenienia może być mierzony techniką opracowaną przez Paddy'ego. Goniometria kąta zwilżania może natomiast służyć do oceny stopnia oczyszczenia sklepanych powierzchni.

2.4. Wpływ wybranych czynników na wytrzymałość złączy klejonych

W celu dokonania odpowiedniego doboru kleju do połączenia wybranych elementów należy określić jego właściwości, techniki wzmacniania adhezji, a także sposób przygotowywania powierzchni [101]. Z kolei zbadanie wybranych połączeń, które są wynikiem procesu klejenia, wymaga stosownego doboru testów [115, 117], co jest konsekwencją złożoności omawianego procesu. W związku z potrzebami branż przemysłowych w zakresie metod testowania oraz oceny połączeń klejonych opracowano ich cały wachlarz z uwzględnieniem znormalizowanych prób ISO, norm europejskich EN, a także Amerykańskiego Stowarzyszenia Badań i Materiałów ASTM.

Autorzy w swoich pracach [9, 81, 82, 79] podejmowali próby określenia sposobów przygotowania próbek, a także metod badań właściwości mechanicznych klejów i zespoleń. Uzyskane wyniki badań przedstawione w artykułach [44, 76, 26] jednoznacznie wskazują na brak różnic pomiędzy wyznaczonymi wartościami w zakresie tych samych klejów na odlewanych próbkach i próbkach „in situ”, aczkolwiek dostępne są wyniki badań, które wykazują znaczące różnice. Postać zależności $\sigma = f(\epsilon)$ i uzyskane wartości

parametrów wytrzymałości statycznej są zależne od wybranej metody badania [28].

Na podstawie dostępnej literatury z zakresu badania klejów jako materiałów można stwierdzić, że przeważającym rodzajem badań są testy w warunkach obciążeń długotrwałych – pełzanie, natomiast jeśli chodzi o obciążenia zmienne - pękanie. W doświadczeniach dotyczących określania odporności na pełzanie kleju wyznaczano krzywe pełzania opisujące wartość odkształcenia w funkcji czasu przy stałym obciążeniu [45, 65, 92, 112], a także krzywe relaksacji określające spadek naprężenia w materiale w funkcji czasu przy stałej wartości zadanego odkształcenia na początku próby [116]. Dotychczasowe badania zmęczeniowe odnoszą się do niewielkiej ilości klejów, a realizowane były na próbkach typu „in situ” [53, 60]. Prace badawcze zmęczeniowe realizowane mogą być na próbkach typu TAST (połączenia zakładkowe grubych elementów) czy też na próbkach Arcan-Mines (próbka połączenia doczołowego sztywnych elementów). Z uwagi na większą sztywność łączonych elementów próbki te charakteryzują bardziej równomierne rozkłady naprężeń w porównaniu z normatywnymi próbkami zakładkowymi do badań statycznych. Otrzymane wyniki z próbek typu TAST i Arcan-Mines dają zbliżone rezultaty.

Na podstawie dostępnej literatury można stwierdzić, że podejmowane były próby określenia wytrzymałości klejonych połączeń zakładkowych - badano wpływ różnych rodzajów klejów i materiałów sklejanых. Dzięki temu, że testy bardzo często realizowano na próbkach, które były wykonane w oparciu o wytyczne norm europejskich [N5] oraz amerykańskich [N1] możliwe było porównanie uzyskanych rezultatów badań przez różnych naukowców.

Prowadzono również badania w zakresie określenia zależności pomiędzy wytrzymałością połączenia, a grubością spoiny [33, 41]. Autorzy na podstawie uzyskanych wyników stwierdzili, że dla danego rodzaju kleju występuje optymalna grubość spoiny i wówczas uzyskuje największą wytrzymałość. Ponadto, można stwierdzić, że nałożenie cieńszej warstwy kleju powoduje osłabienie połączenia, natomiast naniesienie większej grubości warstwy zmniejsza wytrzymałość połączenia [45, 72].

W artykułach [80, 78] zaprezentowano wyniki badań dotyczące wytrzymałości połączeń wykonanych z różnych materiałów. Autorzy [102] prowadzili badania połączeń zakładkowych: miedzi, żeliwa, stopów aluminium, magnezu, stali i mosiądzu, które były wykonane klejem epoksydowym Epidian 2. Na podstawie uzyskanych wyników sformułowali następujące wnioski:

największą wytrzymałością charakteryzowały się połączenia stopów aluminium oraz stali, najmniejszą zaś połączenia żeliwa, mosiądzu, magnezu i miedzi. Z kolei w zakresie połączeń materiałów różniamiennych, największą wytrzymałością cechowało się połączenie aluminium ze stalą, natomiast połączenie stali z pozostałymi wyżej wymienionymi materiałami skutkowało uzyskiwaniem wytrzymałości na zbliżonym poziomie lub nieznacznie wyższym w zakresie połączeń jednorodnych drugiego materiału.

W literaturze przedmiotu można wyróżnić publikacje z zakresu przygotowania powierzchni. Prowadzono badania [19, 107], w których określano wytrzymałość połączeń ze względu na zastosowaną obróbkę ścierną i uzyskaną chropowatość. Autorzy Ci uzyskali rezultaty, na podstawie których stwierdzili, że występowała optymalna chropowatość powierzchni dla łączonych materiałów i danego kleju. Z kolei w innych pracach [27, 46, 109] analizowano wpływ zastosowania środka czyszczącego (benzyny, acetonu, alkoholu) na wytrzymałość połączeń zakładkowych. Na podstawie uzyskanych wyników, autorzy stwierdzili, że najwyższą wytrzymałością połączeń zakładkowych charakteryzowały się próbki, których powierzchnie były czyszczone acetonem.

Ponadto, w zakresie badań nad wytrzymałością połączeń klejonych określano również wpływ długości zakładki na ten parametr [8, 70]. Uzyskane wyniki badań potwierdziły teoretyczne przemyślenia odnoszące się do granicznej długości zakładki, po której przekroczeniu wytrzymałość połączenia nie zmienia się w znaczący sposób. Nadmienić należy, że proporcjonalnie do zwiększenia długości zakładki maleje wytrzymałość połączenia.

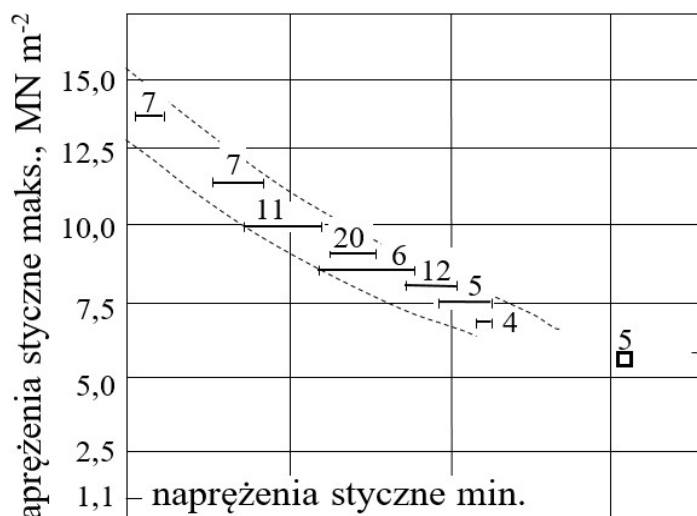
Na wytrzymałość statyczną połączeń, poza parametrami wymienionymi powyżej, wpływają modyfikacje geometrii zakładki [22, 70, 100]. Do modyfikacji zakładki zaliczyć można fazowanie krawędzi łączonych płaskowników, pozostawienie wypływek kleju, zmniejszanie ich grubości na końcach zakładek, czy też gięcia przed sklejeniem mającego na celu osiowe obciążenie połączenia. Na podstawie uzyskanych wyników autorzy stwierdzili, że dzięki zastosowaniu ww. metod można zwiększyć wytrzymałości połączeń. Połączenia klejone są popularne między innymi ze względu na fakt, że nie wymagają dodatkowych obróbek, które generują koszty, zatem specjalne przygotowanie próbek może być wykazane jako wada.

Pierwsze wzmianki z zakresu prowadzenia badań nad trwałością zmęczeniową połączeń klejonych przedstawili w 1968 r. Matting i Draugelates [88]. W serii wykreślono wykresy Wöhlera (rys. 2.14) dla zakładkowych

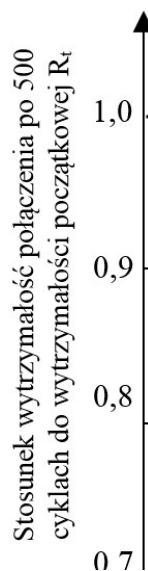
połączeń klejonych wykonanych przy użyciu kleju epoksydowego. Do opisu użyto skali bilogarytmicznej. Określono wpływ temperatury i częstotliwości na trwałość zmęczeniową.

Natomiast Adams analizował wytrzymałość statyczną próbek, które uprzednio zostały poddane 500. cyklom obciążeń zmiennych (rys. 2.15). Wytrzymałość badanych próbek była na wysokim poziomie przy obciążeniu zmiennym nieprzekraczającym 40% wytrzymałości statycznej połączenia. Wyższe wartości obciążeń zmiennych powodowały spadek wytrzymałości połączeń zakładkowych [1].

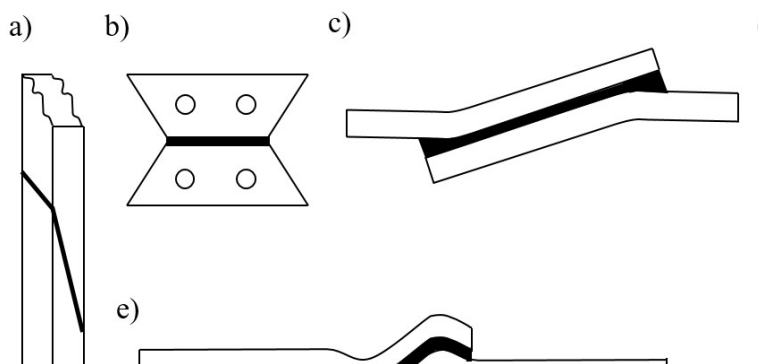
Jen w swoich badania [62] podjął się określenia trwałości zmęczeniowej zakładkowych połączeń klejonych (rys. 2.16.a) z różnymi kątami zakładki. Uzyskane wyniki w ramach powyższego eksperymentu wykazały, że trwałość zmęczeniowa wzrasta proporcjonalnie ze wzrostem kąta zakładki. Ponadto, autor wykazał, że zmienia się sposób zniszczenia z adhezyjnego - dla małych kątów zakładki na kohezyjny - dla dużych kątów zakładki.



Rys. 2.14. Wykres trwałości zmęczeniowej [88]



Rys. 2.15. Zależność wytrzymałości połączenia po 500 cyklach obciążeń zmiennych w funkcji nominalnego maksymalnego naprężenia stycznego w cyklu [1]



Rys. 2.16. Połączenia zakładkowe: a) kątowe b) typu butterfly c) z odwrotnie wygiętymi materiałami łączonymi d) DLJ i schodkowe e) faliste

W swoich badaniach Altan i wsp., [5] określali połączenia typu butterfly i próbki doczołowe. W parciu o otrzymane rezultaty autorzy Ci stwierdzili, że sklejone złącza typu butterfly (rys. 2.16.b) charakteryzowały się wyższą trwałością zmęczeniową w porównaniu z połączeniami doczołowymi.

Natomiast Fessel i wsp., [39] w swoich badaniach określali trwałość zmęczeniową klejonych połączeń zakładkowych na próbkach, które zostały

zmodyfikowane poprzez odwrotne wygięcie łączonych fragmentów blach (rys. 2.16.c). Okazało się, że owe próbki charakteryzowały się zdecydowanie wyższą trwałością.

Z kolei Zhang i wsp., [122] w swoim doświadczeniu badali wytrzymałość próbki DLJ (rys. 2.16.d) z zastosowaniem łączenia CFRP (laminat wzmocniony włóknem węglowym). Próbki zostały poddane zmiennym obciążeniom rozciągającym, dzięki temu zabiegowi wyznaczono ich krytyczną sztywność i wydłużenie, przy których dochodziło do uszkodzenia próbki niezależnie od poziomu obciążenia. Podobne badania prowadzili Tenchev i Falzon [114], którzy to wykonywali testy zmęczeniowe na schodkowych połączeniach klejonych kompozytów (rys. 2.16.d). Na podstawie uzyskanych wyników autorzy Ci stwierdzili, że schodkowe połączenia klejowe charakteryzują się mniejszą wytrzymałością statyczną i trwałością zmęczeniową kompozytów.

Testy wytrzymałości winyloestrowego kleju zastosowanego w połączeniach typu T w warunkach obciążeń zmiennych przeprowadzili Marcadon i wsp., [86]. Na podstawie analizy uzyskanych wyników autorzy Ci dokonali podziału trwałości zmęczeniowej połączeń klejonych na fazę trwałości zmęczeniowej i fazę przyrostu pęknięcia. Wyznaczono również długość fazy trwałości zmęczeniowej, która to kończy się w chwili wystąpienia inicjacji pęknięcia. Faza przyrostu pęknięcia kończy się w momencie uszkodzenia połączenia.

Natomiast na podstawie badań przeprowadzonych przez Zenga i Suna [121] wnioskować można, że faliste połączenie zakładkowe charakteryzuje się wyższą wytrzymałością zmęczeniową w porównaniu z połączeniem zwykłym (rys. 2.16.e).

Jak wspomiano powyżej na wytrzymałość zmęczeniową w połączeniach zakładkowych ma wpływ wiele parametrów i jednym z nich jest długość zakładki. Uzyskiwane wyniki przez różnych badaczy mogą się różnić ze względu na rodzaj złącza, grubość warstwy kleju lub typ podłoża. W swoim doświadczeniu Da Costa Mattos i wsp., [25] przeprowadzili badania statyczne i zmęczeniowe laminatów węglowych i epoksydowych, które spajane były żywicą epoksydową dla różnych długości zakładki. Na podstawie uzyskanych wyników autorzy Ci stwierdzili, że współczynnik kształtu może być parametrem wykorzystywanym w celu skorelowania trwałości zmęczeniowej dwóch połączeń o różnych długościach zakładki.

Jen i Ko [63] w swoich badaniach określali wytrzymałość zmęczeniową zakładkowych połączeń typu SLJ stopów aluminium. Na podstawie uzyskanych

efektów badań autorzy stwierdzili, że stosunek trwałości do statycznej wytrzymałości połączeń zmniejszał się proporcjonalnie do wzrostu długości zakładki. Ponadto, po dokonaniu analizy numerycznej metodą elementów skończonych, autorzy zaobserwowali, że naprężenia odrywające były główną przyczyną zmęczeniowego zniszczenia połączeń typu SLJ.

Z kolei Bernasconi i wsp., [13] wykonali badania zmęczeniowe połączeń klejonych zakładkowych laminatów kompozytowych o grubości 9,9 mm. W ramach eksperymentu testowano próbki, które były zróżnicowane pod względem długości zakładki od 25 do 110 mm, o połączeniach kompozyt-stal i kompozyt-kompozyt, a także występowaniem lub brakiem fazowania krawędzi. Następnie dokonano dwuwymiarowej analizy połączeń metodą elementów skończonych. Na podstawie uzyskanych wyników autorzy wykazali zależność pomiędzy maksymalnymi naprężeniami sprężystymi, a liczbą cykli do zniszczenia. Wszystkie punkty eksperymentalne pod względem naprężenia maksymalnego (ścianania lub zredukowanego wg. Tresca) i liczby cykli do zniszczenia prezentowały małe rozproszenie względem krzywej zmęczeniowej

Ponadto, na podstawie badań przeprowadzonych przez Melander i wsp., [90] którzy w swoim doświadczeniu określali trwałość zmęczeniową próbek, które były obciążone sztucznymi wadami w różnych konfiguracjach, okazało się, że owe wady znacznie wpływają na sztywność i trwałość zmęczeniową próbek.

Natomiast Blanchard i wsp., [15] w swoich badaniach poddali monotonicznemu rozciąganiu i różnym obciążeniom próbki zakładkowych połączeń klejonych grubych elementów. Elementy połączono przy użyciu kleju epoksydowego. Na podstawie uzyskanych wyników autorzy stwierdzili, że wytrzymałość spoiny w dużym stopniu zależy od szybkości odkształcania, a także od grubości spoiny. Przy cienkiej warstwie kleju lub wysokiej szybkości odkształcania występują kohezyjne przełomy w warstwie kleju, natomiast w przypadku grubej spoiny i małej szybkości odkształcania decydujące znaczenie mają siły adhezyjne pomiędzy klejem, a elementem łączonym. Ponadto, charakter uszkodzenia łączenia był analogiczny do tego jaki występował w próbie monotonicznego rozciągania.

Poza badaniami doświadczalnymi prowadzone są także badania numeryczne w zakresie obciążeń zmęczeniowych i statycznych [51]. W dostępnych pracach naukowych poruszane są kwestie kształtowania geometrii połączeń, modelowania właściwości materiałów, występowania osobliwości na końcach zakładek, generowanie siatki elementów skończonych.

Na rynku dostępne są kleje najnowszej generacji, które posiadają duży zakres odkształceń plastycznych, co może w sposób bezpośredni kształtować zachowanie zmęczeniowe połączeń klejowych. Kumar i Pandey [73] wykonali symulacje obliczeniowe SLJ rozpatrując geometryczne oraz materiałowe nieliniowości. Stosując zmodyfikowane równanie Coffin-Mansona uzyskano zbieżne z doświadczeniem rezultaty. Natomiast Markolefas i Papathanassiou [87] opracowali model shear-lag, który to umożliwił ocenę redystrybucji naprężeń w połączeniach typu DLJ poddanych cyklicznemu rozciąganiu. We Wstępnie autorzy Ci założyli, że materiały łączone charakteryzują się liniową sprężystością, podczas gdy właściwości kleju były idealnie sprężysto-plastyczne. Na tej podstawie wysnuto wniosek, który wskazuje, że w trakcie odciążania w warstwie kleju, w strefach plastycznych mogą powstawać naprężenia o przeciwnych znakach pomimo braku odwracania kierunku obciążenia.

Prowadzono również badania nad trwałością zmęczeniową łączy klejonych cienkich pasków aluminium typu DLJ. Nolting i wsp., [93] stwierdzili, że przy większych wartościach obciążenia występowały uszkodzenia adhezyjne, natomiast przy niższych obciążeniach uszkodzenia kohezyjne stopu aluminium. Zmiany wartości naprężeń dokonywano poprzez zmianę grubości łączonych elementów, długości zakładki oraz zwięzania jej szerokości. Dzięki zastosowaniu analizy numerycznej, autorzy wykazali, że istnieje związek wykładniczy między trwałością zmęczeniową, a maksymalnym naprężeniem głównym w kleju dla przełomów adhezyjnych oraz naprężeniem odrywającym w kleju dla przełomów kohezyjnych.

Ponadto, Ishii i wsp., [95, 99] wykonali badania zmęczeniowe z użyciem próbek doczołowych, zakładkowych chcąc określić kryterium zniszczenia zmęczeniowego połączenia CFRP-metal. Próbki poddawano obciążeniom wieloosiowym. Na podstawie uzyskanych wyników badań autorzy stwierdzili, że granice zmęczenia są zależne od maksymalnych naprężeń głównych.

Prowadzono również badania w zakresie wytrzymałości długotrwałej połączeń klejonych [54, 100]. Badane próbki przygotowano z użyciem klejów epoksydowych bez wypełniaczy, z wypełniaczami: metalicznymi, elektrokorundem i tkaniną szklaną. Na podstawie przeprowadzonych badań autorzy stwierdzili, że większą wytrzymałością statyczną i trwałością charakteryzują się modyfikowane spoiny o podwyższonej temperaturze w porównaniu ze spoinami bez wypełniaczy.

Rudawska [109] w swoim doświadczeniu badała wytrzymałość połączeń zakładkowych stopów tytanu, aluminium i kompozytów polimerowych wytworzonych przy użyciu kleju epoksydowego w zależności od sposobu przygotowania powierzchni próbki. Autorka wykazała, że czyszczenie chemiczne ma bezpośredni wpływ na wzrost wytrzymałości połączeń klejonych.

Z kolei w swojej pracy Godzimirski i Komorek [42] określili trwałość zmęczeniową i wytrzymałość statyczną różnych próbek, w tym: zakładkowych, czołowych, czopowo-walcowych. W doświadczeniu elementy sklejjane stanowiła stal St3, jako kleju użyto epidianu 57 z utwardzaczem Z1. Na podstawie uzyskanych rezultatów badań autorzy, stwierdzili, że wyższą trwałością zmęczeniową wykazały połączenia, które charakteryzowały się większą nierównomiernością rozkładu naprężeń w porównaniu z tymi, w których zanotowano podobne naprężenia w całej objętości warstwy kleju.

W pracach [57, 58, 59] przedstawiono ideę oceny uszkodzenia złączy klejowych z zastosowaniem próbek typu sandwich. Metoda oceny bazuje na pomiarze odkształceń jednego z łączonych elementów pod wpływem monotonicznie narastającej wartości momentu zginającego. Połączenie klejone należy uznać za uszkodzone wówczas, gdy wartości naprężeń/odkształceń w punktach pomiarowych 1 i 2 będą posiadały zbliżoną wartość. Sposób ten nie pozwala na określenie wytrzymałości złącza klejonego w takim rozumieniu, jak to jest określane w próbkach zakładkowych. Lecz metoda ta pozwala na określenie wartości odkształcenia konstrukcji, przy której może zaistnieć uszkodzenie złącza klejonego. Wynikiem badań jest także określenie wartości pracy powodującej uszkodzenie złączy klejonych.

Analizy literatury dotycząca badań doświadczalnych złączy klejonych w warunkach obciążeń statycznych i zmiennych wskazuje, że podstawowym typem próbek stosowanych w badaniach są próbki typu zakładkowego. Kolejnymi typami próbek stosowanymi w testach są próbki czołowe.

2.5. Cechy konstrukcyjne połączeń klejonych

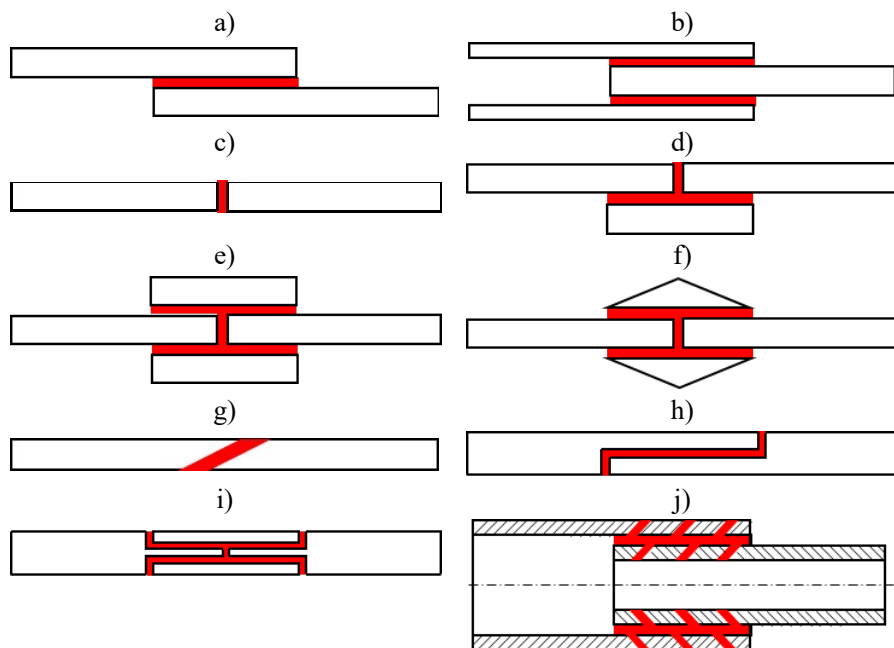
Z badań literaturowych wynika, że dostępnych jest wiele przykładów połączeń klejonych (rys. 2.17), których zastosowanie wynika z rodzaju obciążeń mechanicznych [21, 10, 61]. Opracowanie poprawnej konstrukcji złącza klejonego powinno bazować na właściwym doborze jego pola powierzchni, zapewniającego uzyskanie poziomu naprężeń mniejszej od

wartości naprężeń dopuszczalnych. Drugim istotnym elementem jest dobór grubości złącza, która musi odnosić się do właściwości stosowanego kleju.

Pierwszym przykładem złącza jest pojedyncze połączenie zakładkowe stosowane głównie przy łączeniu cienkich elementów (rys. 2.17.a). Zaletą tego typu połączeń jest prosta procedura wytwarzania i wysoka nośność złącza. Na rysunku 2.17.b przedstawiono podwójne połączenie zakładkowe, w którym stosunek grubości ścianek powinien wynosić 1:2:1. Rysunek 2.17.c przedstawia połączenie czołowe, które położone jest prostopadle do kierunku działania siły. Taka budowa zapewnia najmniejszą powierzchnię klejenia, a tym samym ograniczone zastosowanie w budowie maszyn. Wzmocnienie połączenia czołowego realizowane jest poprzez przyklejenie pojedynczej (rys. 2.17.d) lub podwójnej (rys. 2.17.e) nakładki. Utworzenie połączenia typu *strap joint* (rys. 2.17.d) pozwala na uzyskanie jednej gładkiej powierzchni połączenia oraz zwiększenie jego wytrzymałości w stosunku do złącza czołowego (*butt joint*). Połączenie typu *double strap joint* (rys. 2.17.e) charakteryzuje się wysoką wytrzymałością uzyskaną poprzez zastosowanie podwójnej spoiny. Jego wadą jest to, że żadna strona nie ma gładkiej powierzchni. Zwiększenie elastyczności połączenia *double strap joint* realizuje się poprzez zastosowanie nakładek o zmiennej sztywności, co prowadzi do utworzenia połączenia *tapered double strap joint* (rys. 2.17.f). Zwiększenie wytrzymałości połączenia doczołowego (rys. 2.17.c) można osiągnąć poprzez zwiększenie powierzchni czynnej klejenia (rys. 2.17.g). Połączenie typu *stepped lap joint* (rys. 2.17.h) charakteryzuje się płaską powierzchnią łączonych elementów oraz zmianą jego sztywności w miejscu występowania kleju. W przypadku tego połączenia przygotowanie elementów do klejenia powoduje wzrost kosztów wykonania połączenia. Połączenie przedstawione na rysunku (rys. 2.17.i) jest modyfikacją połączenia *double strap joint* (rys. 2.17.e), które może być stosowane w przypadku łączenia elementów o dużej grubości ze względu na odpowiednie ukształtowania łączonych powierzchni. Połączenie to zapewnia dużą powierzchnię klejenia (co wpływa na wytrzymałość) oraz płaską powierzchnię połączenia. Na rysunku 2.17.j przedstawiono połączenie dwóch rur wykonane przy użyciu kleju. Otwory w elementach zostają wypełnione klejem, co zwiększa zdolność do przenoszenia obciążeń przez połączenie.

Badania doświadczalne tego typu połączeń mają na celu wyznaczenie podstawowych właściwości wytrzymałościowych ($R_{p0,2}$, R_m) lub/i trwałości zmęczeniowej. W przypadku badań grubych złączy klejonych mamy do czynienia w obszarze złącza ze złożonym rozkładem naprężeń/odkształceń, którego postać zależy od właściwości spoiny klejowej oraz właściwości

elementów łączonych. Gruba spoina klejona to spoina, której grubość przekracza 1 mm [125, 126, 127, 128, 129]. Spoina ta umożliwia kompensowanie nierówności powierzchni oraz absorpcję naprężeń/odkształceń, co jest istotne w aplikacjach wymagających dużej wytrzymałości mechanicznej i trwałości.



Rys. 2.17. Przykłady budowy połączeń klejonych [61, W1, W3]

Grube spoiny klejowe wykonane z kleju metakrylowego znalazły swoje zastosowanie w wielu zaawansowanych i wymagających technicznie dziedzinach przemysłu. Ich unikalne właściwości mechaniczne, chemiczne oraz zdolność do tworzenia trwałych i elastycznych połączeń sprawiają, że są one idealnym rozwiązaniem do łączenia różnorodnych materiałów, takich jak: stopy metali, kompozyty, tworzywa polimerowe czy ceramika. Szeroki zakres właściwości klei metakrylowych czynią je idealnymi do różnorodnych zastosowań w wielu gałęziach przemysłu. Przykłady klejów metakrylowych przeznaczonych do tworzenia grubych spoin są:

- a) kleju CTA 2155 [W8]:
 - grubość spoiny: do 3 mm,
 - wytrzymałość na rozciąganie: $25 \div 30$ MPa,
 - wytrzymałość na ścinanie: $18 \div 22$ MPa,

- wydłużenie przy rozciąganiu: $10 \div 20\%$,
- b) klej Partite 7330 [W9, W10]:
 - grubość spoiny: do 3 mm,
 - wytrzymałość na rozciąganie: $22 \div 26$ MPa,
 - wytrzymałość na ścinanie: $21 \div 22$ MPa,
 - wydłużenie przy rozciąganiu: $9 \div 20\%$,
- c) klej ASI MP 55420FS [W11, W12]:
 - grubość spoiny: do 6 mm,
 - wytrzymałość na rozciąganie: $22 \div 32$ MPa,
 - wytrzymałość na ścinanie: $21 \div 27$ MPa,
 - wydłużenie przy rozciąganiu: $10 \div 20\%$,
- d) klej Loctite AA H4710 [W13, W14]:
 - grubość spoiny: do 9 mm,
 - wytrzymałość na rozciąganie: 29 MPa,
 - wytrzymałość na ścinanie: $12 \div 28$ MPa,
 - wydłużenie przy rozciąganiu: $5 \div 10\%$,
- e) klej SCIGRIP SG5000-03 [W15, W16]:
 - grubość spoiny: $0,5 \div 12,7$ mm,
 - wytrzymałość na rozciąganie: $35 \div 40$ MPa,
 - wytrzymałość na ścinanie: $18 \div 25$ MPa,
 - wydłużenie przy rozciąganiu: $5 \div 10\%$,
- f) klej Plexus MA300 [W17]:
 - grubość spoiny: $0,3 \div 3,2$ mm,
 - wytrzymałość na rozciąganie: $24 \div 30$ MPa,
 - wytrzymałość na ścinanie: $20 \div 25$ MPa,
 - wydłużenie przy rozciąganiu: $20 \div 40\%$,
- g) klej MultiBond – 5824 [W18]:
 - grubość spoiny: do 5 mm,
 - wytrzymałość na ścinanie: stop AW-6060 <27 MPa, stal <30MPa, PC <13 MPa, ABS <8 MPa,
 - wydłużenie przy rozciąganiu: 10%.

Grube złącza klejone odgrywają istotną rolę w nowoczesnych technologiach inżynierskich. Ich zdolność do kompensowania nierówności powierzchni oraz absorpcji naprężeń/odkształceń pozwalają na szerokie zastosowanie m.in. w przemyśle:

- a) motoryzacyjny:
 - klej CTA 2155:

- jest wykorzystywany do łączenia elementów nadwozia i podwozia pojazdów, takich jak: panele karoserii, drzwi, dachy i zderzaki,
- dzięki jego wysokiej wytrzymałości na rozciąganie i ścinanie, połączenia te są trwałe i odporne na obciążenia dynamiczne,
- klej Partite 7330:
 - łączenie metalowych i kompozytowych elementów konstrukcyjnych w pojazdach, takich jak: ramy, osłony silnika,
 - łączenie aluminiowych paneli nadwozia w lekkich samochodach sportowych, gdzie liczy się redukcja masy przy zachowaniu wysokiej wytrzymałości strukturalnej,
- b) stoczniowy:
 - klej Loctite AA H4710:
 - stosowany do łączenia dużych paneli kompozytowych i metalowych w kadłubach statków, gdzie wymagana jest wysoka odporność na działanie wody morskiej i korozji,
 - klej SCIGRIP SG5000-03:
 - używany do napraw i łączenia elementów konstrukcyjnych jachtów i łodzi, w tym naprawa uszkodzonych sekcji kadłuba jachtów,
 - naprawy form z włókna szklanego,
- c) lotniczy:
 - klej ASI MP 55420FS:
 - jest wykorzystywany do łączenia kompozytowych struktur skrzydeł, kadłubów oraz innych elementów lotniczych, gdzie wymagana jest wysoka wytrzymałość mechaniczna i odporność na zmiany temperatury,
 - klej Plexus MA300:
 - używany do łączenia elementów konstrukcyjnych wykonanych z włókna węglowego i aluminium, stosowanych w nowoczesnych samolotach i śmigłowcach, gdzie wymagana jest wysoka wytrzymałość i minimalna masa,
- d) odnawialnych źródeł energii:
 - klej Loctite AA H4710:
 - stosowany do łączenia dużych paneli kompozytowych w turbinach wiatrowych oraz montażu paneli słonecznych, gdzie

wymagana jest odporność na warunki atmosferyczne i obciążenia dynamiczne,

- Plexus MA300:
 - używany do montażu struktur nośnych paneli słonecznych, gdzie wymagana jest wysoka wytrzymałość i odporność na warunki atmosferyczne.

Kleje metakrylowe znajdują zastosowanie w różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych, gdzie wymagane jest zastosowanie grubych spoin klejowych. Każdy z przytoczonych przykładów klejów posiada unikalne właściwości, które czynią go odpowiednim do specyficznych zastosowań przemysłowych. Dzięki swoim właściwościom, kleje te przyczyniają się do zwiększenia efektywności produkcji oraz uzyskania wymaganych właściwości fizyczno-chemicznych elementów maszyn.

2.6. Metody badań złączy klejonych

Metody badań złączy klejonych obejmują szeroki zakres technik i procedur, które mają na celu ocenę wytrzymałości, trwałości i jakości połączeń klejonych w różnych warunkach eksploatacyjnych. Metody badań połączeń klejonych obejmują:

- a) badania wytrzymałości na ścinanie z zastosowaniem pojedynczego złącza zakładkowego lub podwójnego złącza zakładkowego:
 - wynikiem badań są: siła niszcząca oraz wytrzymałość na ścinanie obliczana jako siła niszcząca podzielona przez pole powierzchni połączenia (EN-ISO-1465-2009, PN-EN 14869-2:2011, ASTM D1002-10, ASTM D3166, BS 5350),
 - postać geometryczna i wymiary próbek: próbki jedno- lub dwuzakładkowe o wymiarach zalecanych przez normę, która stanowi podstawę realizacji badań (przykłady budowy próbek przedstawiono na rysunku 2.17a i 2.17b),
 - warunki realizacji obciążeń:
 - zalecana prędkość obciążenia: do 2 mm/min,
 - środowisko badań: próbki powinny być badane w standardowych warunkach laboratoryjnych zgodnych z normą ISO 291,

- b) badania wytrzymałości na rozciągania z zastosowaniem złącza doczołowego:
- wynikiem badań są: siła niszcząca oraz wytrzymałość na rozciąganie obliczana jako siła niszcząca podzielona przez pole powierzchni połączenia (PN-EN ISO 527-1÷5, ASTM D 2095, ISO 6922),
 - wymiary próbek mogą różnić się w zależności od zaleceń normy - przykładowe wymiary próbek zgodnie z ASTM D 2095:
 - średnica próbki: 12,7 mm,
 - zalecane wymiary grubości kleju: do 1,6 mm,
 - warunki realizacji obciążeń:
 - zalecana prędkość obciążenia: 2 mm/min,
 - środowisko badań: próbki powinny być badane w standardowych warunkach laboratoryjnych zgodnych z normą ISO 291,
- c) badania wytrzymałości na odrywanie:
- wynikiem badań są: średnia siła odrywająca (peel force) oraz wytrzymałość na odrywanie (peel strength) obliczane jako średnia siła wymagana do oderwania warstwy kleju od podłoża na jednostkę szerokości próbki (ISO 8510-1, ISO 8510-2, ASTM D1876, ASTM B571, ASTM D429 (metoda B), ASTM D2861, ASTM D3330 (metoda F), ASTM D6252, ASTM D6862, BS EN 1464),
 - wymiary próbek wg normy ISO 8510-1 dla elementów:
 - sztywnych powierzchnia klejenia wynosi: szerokość 25,0 mm ± 0,5 mm i minimalną długość 150 mm,
 - elastycznych powierzchnia klejenia wynosi: szerokość 25,0 mm ± 0,5 mm i minimalną długość 250 mm,
 - badania są prowadzone także na podstawie innych obowiązujących norm (zatem postać geometryczna próbek wynika z wytycznych określonych norm), co jest bezpośrednio związane z postacią geometryczną złączy klejonych,
 - warunki realizacji obciążeń:
 - prędkość odrywania: standardowo 100 mm/min, choć niektóre normy mogą zalecać inne prędkości w zależności od specyfiki materiału i zastosowania,

- kąt odrywania: 90° lub 180° (np. ISO 8510), a także inne wartości kątów,
 - maszyna testowa powinna być wyposażona w odpowiednie uchwyty, aby zapewnić stały kąt odrywania podczas całego testu,
 - środowisko badań: próbki powinny być badane w standardowych warunkach laboratoryjnych zgodnych z normą ISO 291,
- d) badania wytrzymałości na zginanie:
- wynikiem badań są:
 - wytrzymałość na zginanie wyrażana jako maksymalne naprężenie zginające, jakie złącze klejone może wytrzymać przed osiągnięciem punktu złamania lub odkształcenia plastycznego (ISO 178:2010 – norma stosowana także do badań złączy klejonych, ASTM D790, ASTM D6272, ISO 14125),
 - badanie na zginania są bardziej odpowiednie dla sztywnych i kruchych materiałów wykazujących małe ugięcie przy zerwaniu, niż dla materiałów bardzo miękkich i ciągliwych,
 - wymiary próbek:
 - badania kleju: wymiary próbek wg normy ISO 178:2010,
 - próbki zakładkowe: wymiary próbek wg np. PN-EN 14869-2:2011, EN-ISO-1465-2009,
 - próbki doczołowe: wymiary próbek wg np. ASTM D 2095,
 - warunki realizacji obciążeń:
 - zalecana prędkość obciążenia: 1,2 mm/min,
 - środowisko badań: próbki powinny być badane w standardowych warunkach laboratoryjnych zgodnych z normą ISO 291,
- e) badania wytrzymałości na ścinanie metodą skręcania połączonych czołowo elementów w kształcie wydrążonych walców:
- wynikiem badań są:
 - maksymalny moment skręcający, który może wytrzymać złącze tuż przed uszkodzeniem (PN-EN 14869-1:2011),
 - kąt skręcania, przy którym następuje uszkodzenie złącza,
 - wymiary próbek:

- średnica zewnętrzna walca: typowa średnica 20 mm, ale może różnić się w zależności od wymagań zastosowania wyników badań,
- grubość ściany walca: zazwyczaj około 2 mm, w zależności od materiału,
- długość połączenia: zwykle około 50 mm,
- warunki realizacji obciążeń:
 - zalecana prędkość 1° na sekundę, co pozwala na równomierne i kontrolowane obciążenie próbki,
 - maszyna testowa powinna być wyposażona w odpowiednie uchwyty, aby zapewnić precyzyjne sterowanie kontem skręcenia podczas całego testu,
 - środowisko badań: próbki powinny być badane w standardowych warunkach laboratoryjnych zgodnych z normą ISO 291,
- f) badania wytrzymałości na rozdieranie poprzez wprowadzenie klina pomiędzy dwa połączone elementy:
 - wynikiem badań jest:
 - długość pęknięcia złącza klejonego po wprowadzeniu klina (PN-EN 14444:2006, ASTM D3762),
 - czas potrzebny do propagacji pęknięcia po wprowadzeniu klina,
 - wymiary próbek:
 - długość próbki: do 200 mm,
 - szerokość próbki: 25 mm,
 - grubość łączonych elementów: zwykle około 3 mm,
 - warunki realizacji obciążeń:
 - siła wprowadzania klina - klin jest wprowadzany pomiędzy elementy złącza z kontrolowaną siłą, prędkość wprowadzenia zależy od specyfikacji testu,
 - klin używany w badaniach powinien mieć określony kąt (około 14° wg normy ASTM D3762) i być wykonany z materiału o wysokiej twardości,
 - środowisko badań: próbki powinny być badane w standardowych warunkach laboratoryjnych zgodnych z normą ISO 291,

g) badania trwałości zmęczeniowej:

- wynikiem badań jest wykres trwałości zmęczeniowej w ujęciu naprężeniowym (określający zależność pomiędzy amplitudą naprężeń a liczbą cykli do pęknięcia) lub odkształceniowym (określający zależność pomiędzy amplitudą odkształcenia a liczbą nawrotów cykli do pęknięcia),
- wymiary próbek mogą różnić się w zależności od: kształtu złącza, wytycznych norm według których prowadzone są badania, rodzaju materiału itp.,
- warunki realizacji obciążeń obejmuje określenie:
 - zakres i rodzaj obciążeń,
 - charakter zmian obciążenia,
 - częstotliwość zmian obciążeń,
 - środowisko badań: próbki powinny być badane w standardowych warunkach laboratoryjnych zgodnych z normą ISO 291,

h) badania odporności na pełzanie:

- wynikiem badań są:
 - zależność stopnia odkształcenia próbki w funkcji czasu,
 - czas deformacji lub uszkodzeniu pod stałym obciążeniem,
 - współczynnik pełzania określający prędkość zachodzenia deformacji (ISO 899-1, ISO 899-2, ASTM D2990),
- wymiary próbek mogą różnić się w zależności od: kształtu złącza, wytycznych norm według których prowadzone są badania, rodzaju materiału itp.,
- warunki realizacji obciążeń obejmuje określenie:
 - zakres i rodzaj obciążeń,
 - stały charakter obciążeń,
 - czas trwania obciążenia,
 - środowisko badań: próbki powinny być badane w standardowych warunkach laboratoryjnych zgodnych z normą ISO 291.

Wybór odpowiedniej metody badań złączy klejonych jest kluczowy, aby zapewnić ich niezawodność i trwałość w określonych warunkach eksploatacyjnych. Każda metoda badawcza dostarcza szczegółowych informacji o różnych aspektach wytrzymałości. W projektowaniu maszyn, wiedza o tych

właściwościach złączy klejonych pozwala inżynierom na dokonywanie świadomych wyborów dotyczących użytych materiałów i rodzajów klejów, które najlepiej odpowiadają wymaganiom danej konstrukcji. Dzięki temu możliwe jest nie tylko osiągnięcie wysokiej wytrzymałości połączeń, ale również optymalizacja procesu produkcyjnego.

Właściwy dobór materiałów klejowych i ich dokładne przetestowanie w warunkach zbliżonych do rzeczywistych pozwala na minimalizację ryzyka uszkodzenia podczas eksploatacji maszyn. Złącza klejone, które poddano odpowiednim testom wytrzymałościowym, cechują się większą niezawodnością, co przekłada się na wyższą trwałość całej maszyny oraz zmniejszenie kosztów związanych z jej serwisowaniem. Dodatkowo, zastosowanie odpowiednich metod badawczych pozwala na redukcję masy konstrukcji, co jest szczególnie ważne w przypadku maszyn, gdzie każdy gram może mieć znaczenie np.: w przemyśle lotniczym czy motoryzacyjnym.

Metody badań złączy klejonych dostarczają istotnych danych, które są niezbędne w procesie projektowania i budowy maszyn. Wyniki tych badań są fundamentem dla tworzenia zaawansowanych i bezpiecznych konstrukcji, które spełniają wysokie standardy jakości i wytrzymałości. Uwzględnienie wyników badań w procesie inżynierskim pozwala na optymalizację konstrukcji maszyn pod kątem wytrzymałości, bezpieczeństwa i efektywności kosztowej. Oznacza to, że dzięki odpowiednio dobranym metodom testowania, inżynierowie mogą projektować maszyny, które nie tylko spełniają oczekiwania użytkowników, ale również są bardziej ekonomiczne w produkcji i eksploatacji.

Opracowywanie nowych metod badawczych stanowi kluczowy element w odpowiedzi na wyzwania, jakie stawia współczesna inżynieria materiałowa i technologie wykorzystywane w budowie maszyn. Tradycyjne techniki testowania, choć sprawdzone i szeroko stosowane, mogą być niewystarczające do pełnej charakterystyki wytrzymałościowej i trwałościowej złączy klejonych, zwłaszcza w kontekście nowo rozwijanych materiałów kompozytowych i klejów o zaawansowanych właściwościach mechanicznych oraz chemicznych. Jak wskazują badania przedstawione w pracy [130], innowacyjne podejścia w testowaniu materiałów są kluczowe dla zrozumienia ich zachowania w warunkach rzeczywistych.

Wprowadzenie nowych metod badawczych jest zatem niezbędne do precyzyjnej oceny właściwości tych materiałów, a także do zapewnienia ich niezawodności w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Zgodnie z wynikami przedstawionymi w pracy [131], innowacyjne techniki badawcze

umożliwiają dokładniejsze odwzorowanie złożonych obciążeń wieloosiowych oraz wpływów środowiskowych, co przekłada się na bardziej rzetelną ocenę trwałości złączy klejonych.

W kontekście tych badań, istotną rolę odgrywa również konstrukcja próbek. Optymalizacja geometrii, grubości oraz struktury materiałowej próbek jest kluczowa dla uzyskania wyników badawczych, które dokładnie odwzorowują zachowanie złączy w warunkach rzeczywistych. Praca [72] wskazuje, że odpowiednie zaprojektowanie próbek jest nieodzowne dla prawidłowej oceny właściwości mechanicznych nowych materiałów klejowych.

Rozwój nowych metod badawczych w połączeniu z dopracowaną konstrukcją próbek umożliwia inżynierom określenie wybranych właściwości mechanicznych materiałów i złączy, co przekłada się na optymalizację projektowania konstrukcji maszyn. Takie podejście pozwala nie tylko na zwiększenie niezawodności i trwałości maszyn, ale także na podniesienie poziomu bezpieczeństwa i efektywności kosztowej w kontekście ich produkcji i eksploatacji, odpowiadając tym samym na rosnące wymagania współczesnego przemysłu [132].

3. Problem badawczy, teza badawcza, cel i zakres badań

3.1. Problem badawczy i teza badawcza

Podstawowymi zaletami połączeń klejonych w porównaniu z innymi połączeniami mechanicznymi, są one: tańsze w wykonaniu, odporne na korozję, nie wymagają wykonywania obróbki mechanicznej (tj. wiercenie, frezowanie itp.) oraz bardziej elastyczne [21, 10, 74]. Porównanie właściwości połączeń klejonych z innymi połączeniami mechanicznymi (m.in.: spawanymi, nitowymi) wskazuje na możliwość uzyskania następujących korzyści [55]:

- a) łączenie cienkościennych elementów konstrukcyjnych pozwalające na zmniejszenie masy i redukcji kosztów maszyn,
- b) redukcja lub eliminacja operacji mechanicznych wykorzystywanych na etapie przygotowania elementów,
- c) szczelność i odporność na korozję połączenia,
- d) izolacja elektryczna i termiczna łączonych elementów,
- e) do 20-stu razy większa trwałość zmęczeniowa połączeń klejonych niż połączeń nitowych dla identycznych elementów,
- f) tłumienie drgań i redukcja hałasu w porównaniu z połączeniami nitowanymi.

Czynnikami decydującymi o możliwości uzyskania najwyższej wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej złącza klejonego są operacje technologiczne związane z przygotowaniem powierzchni klejenia oraz warunkami środowiskowymi przebiegu procesu. Istotność wskazanych zagadnień skutkowało powstaniem wytycznych zapisanych w aktach normatywnych, w tym w normie PN-EN 13887:2005.

Na właściwości mechaniczne połączeń klejonych w warunkach eksploatacji mają wpływ: wartość i charakter obciążeń, temperatura pracy, oddziaływania substancji agresywnych i inne czynniki wynikające z warunków środowiskowych.

W literaturze przedstawiane są wyniki badań dotyczące łączenia elementów wykonanych z różnych materiałów. W badaniach stosowane są próbki standardowe lub fragmenty elementów konstrukcyjnych. Na ich podstawie oceniana jest wytrzymałość ($R_{p0,2}$, R_m) i trwałość zmęczeniowa połączeń. Wyniki badań przedstawiane są w ujęciu naprężeniowym.

Wytrzymałość złącza klejonego w warunkach obciążeń statycznych określana jest jako maksymalna wartość obciążenia, jaką jest ono w stanie przenieść przed osiągnięciem punktu uszkodzenia. Najczęściej badania wytrzymałości złączy klejonych przeprowadza się z użyciem próbek zakładkowych, których postać geometryczna ustalana jest przez zapisy w normie PN-EN 1465-2009. Warunki wykonywania testów są określane przez normę PN-EN ISO 527-2:2012 (próba rozciągania). Na podstawie zależności $F = f(s)$ wyznaczonej podczas badań próbek istnieje możliwość wyznaczenia pracy mechanicznej niszczącej połączenie. Praca mechaniczna określa ilość energii przekazywanej do złącza wynikającej z działającej siły i przemieszczenia.

W projektowaniu elementów maszyn inżynierowie posługują się głównie parametrami wytrzymałościowymi stanowiącymi podstawę wyznaczenia wartości naprężeń dopuszczalnych. Wynika to także z faktu, że materiały o wysokiej wytrzymałości mogą charakteryzować się niską wartością pracy. Na przykład: bardzo wytrzymałe materiały mogą być kruche, co oznacza, że pękają przy małej wartości pracy. Z kolei materiały o niższej wytrzymałości mogą charakteryzować się znacząco wyższą wartością energii niszczącej. Jest to związane z absorbowaniem energii wywołanej obciążeniem i rozpraszaniem jej w określonej objętości (np. w objętości złącza).

W ramach niniejszej pracy zostanie przedstawiona metoda oceny uszkodzenia złącza klejonego w warunkach obciążeń statycznych bazująca na zastosowaniu próbek typu sandwich [57]. Postać geometryczna próbki typu sandwich jest znacząco różna od postaci próbki typu zakładkowego. Zastosowanie próbki typu sandwich pozwala na określenie wartości odkształcenia konstrukcji, przy której zaistnieje uszkodzenie złącza klejonego. Metoda oceny bazuje na pomiarze odkształceń jednego z łączonych elementów pod wpływem monotonicznie narastającej wartości momentu zginającego. Połączenie klejone należy uznać za uszkodzone wówczas, gdy wartości odkształceń/naprężeń w punktach pomiarowych T_1 i T_2 będą posiadały zbliżoną wartość. Wynikiem badań jest także określenie wartości pracy powodującej uszkodzenie złącza klejonego. Sposób ten nie pozwala na określenie wytrzymałości złącza klejonego w takim rozumieniu, jak to jest określone w próbkach zakładkowych. Szczegółowy opis metodyki badań został przedstawiony w rozdziale 4.

Problemem badawczym niniejszej pracy jest doświadczalna weryfikacja opracowanej metody badań złączy klejonych z zastosowaniem próbek typu

sandwich w warunkach obciążeń statycznych. Uszkodzenie złącza klejonego następuje, gdy:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \quad (3.1)$$

a wartość pracy niszczącej (energii niszczącej)

$$\Delta W = W_1 - W_2 \quad (3.2)$$

Punktem odniesienia dla wyników badań doświadczalnych próbek typu sandwich, będą wyniki badań zakładkowych próbek klejonych. Omawiana metodyka została opracowana z myślą o badaniach grubych złączy klejonych.

Sformułowano także tezę badawczą, która brzmi: **metoda oceny wytrzymałości grubych złączy klejonych z zastosowaniem próbek typu sandwich pozwala na precyzyjne określenie maksymalnej wartości odkształcenia elementu konstrukcyjnego poddanego obciążeniu prowadzącemu do zniszczenia połączenia w warunkach obciążeń statycznych.**

Użycie próbek typu sandwich w metodzie oceny wytrzymałości grubych złączy klejonych umożliwia dokładne określenie wartości odkształceń elementu poddanego obciążeniu prowadzącym do zniszczenia wskazanego połączenia. Wskazane próbki pozwalają na bezpośrednie monitorowanie odkształceń elementu konstrukcyjnego aż do momentu zniszczenia.

Dokładne określenie maksymalnych odkształceń elementu/elementów w momencie zniszczenia połączenia ma kluczowe znaczenie w projektowaniu elementów maszyn. Oprócz kryteriów wytrzymałościowych w postaci dopuszczalnych naprężeń, można formułować kryteria sztywnościowe w postaci dopuszczalnych odkształceń konstrukcji, co może mieć bezpośrednie przełożenie na praktyczne rozwiązania inżynierskie.

Nowa metoda nie tylko umożliwia precyzyjną ocenę odkształceń, ale również dostarcza informacji, które są trudniejsze do uzyskania przy użyciu tradycyjnych metod. Dzięki temu inżynierowie mogą dokładniej dobrać cechy geometryczne złączy, co może prowadzić do bardziej zoptymalizowanych konstrukcji pod względem wytrzymałości i trwałości.

3.2. Cel badań

Głównym celem pracy jest doświadczalna weryfikacja możliwości zastosowania próbek typu sandwich do określenia maksymalnej wartości

odkształcenia konstrukcji ε_2 oraz pracy niszczącej połączenie ΔW w momencie zniszczenia grubych złączy klejonych.

Zniszczenie grubych złączy klejonych odnosi się do sytuacji, w której pod wpływem działającego obciążenia zewnętrznego deformacja złącza przekracza granicę, po której dochodzi do nieodwracalnych uszkodzeń materiału kleju lub strefy kontaktu klej-materiał, co prowadzi do utraty integralności strukturalnej.

Realizacja głównego celu wymaga weryfikacji celów szczegółowych:

- a) ocena wpływu grubości warstwy kleju na wartość odkształceń ε_2 oraz pracy niszczącej złącze klejone ΔW w próbce typu sandwich,
- b) ocena wpływu grubości łączonych elementów na wartość odkształceń ε_2 oraz pracy niszczącej złącze klejone ΔW w próbce typu sandwich,
- c) ocena wpływu rodzaju materiału łączonych elementów na wartość odkształceń ε_2 oraz pracy niszczącej złącze klejone ΔW w próbce typu sandwich,
- d) ocena wpływu grubości warstwy kleju na wartość siły niszczącej F_{\max} oraz pracy niszczącej złącze klejone W w zakładkowej próbce klejonej,
- e) ocena wpływu grubości łączonych elementów na wartość siły niszczącej F_{\max} oraz pracy niszczącej złącze klejone W w zakładkowej próbce klejonej,
- f) ocena wpływu rodzaju materiału łączonych elementów na wartość siły niszczącej F_{\max} oraz pracy niszczącej złącze klejone W w zakładkowej próbce klejonej,
- g) analiza porównawcza wyników badań uzyskanych dla próbek typu sandwich z wynikami dla zakładkowych próbek klejonych.

3.3. Zakres badań

Rozprawę doktorską podzielono na 6 rozdziałów. W rozdziałach pierwszym i drugim przedstawiono analizę stanu wiedzy, która pozwoliła na sformułowanie celów badawczych. Ich realizacja wymagała przeprowadzenia następujących badań:

- a) badania próbek typu sandwich w warunkach obciążeń statycznych wykonanych z płaskownika M1 (stal 41Cr4) o grubości $g_1 = 4$ mm i płaskownika M2 wykonanego z:
 - stal 41Cr4 o grubości $g_2 = 4$ mm i grubości warstwy kleju:
 - $g_k = 2$ mm,

- $g_k = 3$ mm,
 - $g_k = 4$ mm,
 - stal 41Cr4 o grubości $g_2 = 6$ mm i grubości warstwy kleju:
 - $g_k = 2$ mm,
 - $g_k = 3$ mm,
 - $g_k = 4$ mm,
 - stopu AW-5754 o grubości $g_2 = 4$ mm i grubości warstwy kleju:
 - $g_k = 2$ mm,
 - $g_k = 3$ mm,
 - $g_k = 4$ mm,
 - stopu AW-5754 o grubości $g_2 = 6$ mm i grubości warstwy kleju:
 - $g_k = 2$ mm,
 - $g_k = 3$ mm,
 - $g_k = 4$ mm,
- b) badania zakładkowych próbek klejonych w warunkach obciążeń statycznych wykonanych z płaskownika M1 (stal 41Cr4) o grubości $g_1 = 4$ mm i płaskownika M2 wykonanego z:
- stal 41Cr4 o grubości $g_2 = 2$ mm i grubości warstwy kleju:
 - $g_k = 2$ mm,
 - $g_k = 3$ mm,
 - $g_k = 4$ mm,
 - stal 41Cr4 o grubości $g_2 = 4$ mm i grubości warstwy kleju:
 - $g_k = 2$ mm,
 - $g_k = 3$ mm,
 - $g_k = 4$ mm,
 - stal 41Cr4 o grubości $g_2 = 6$ mm i grubości warstwy kleju:
 - $g_k = 2$ mm,
 - $g_k = 3$ mm,
 - $g_k = 4$ mm,
 - stopu AW-5754 o grubości $g_2 = 2$ mm i grubości warstwy kleju:
 - $g_k = 2$ mm,
 - $g_k = 3$ mm,
 - $g_k = 4$ mm,
 - stopu AW-5754 o grubości $g_2 = 4$ mm i grubości warstwy kleju:
 - $g_k = 2$ mm,
 - $g_k = 3$ mm,
 - $g_k = 4$ mm,

- stopu AW-5754 o grubości $g_2 = 6$ mm i grubości warstwy kleju:
 - $g_k = 2$ mm,
 - $g_k = 3$ mm,
 - $g_k = 4$ mm,
- c) wyznaczenie rozkładów naprężeń w elementach próbki typu sandwich w warunkach obciążeń statycznych metodą elementów skończonych przyjmując zmienne parametry:
 - geometryczne:
 - grubość belki dolnej (M2) g_2 : 4 mm, 6 mm, 8 mm,
 - grubość spoiny klejonej (AJ) g_3 : 2 mm, 3 mm, 4 mm,
 - kształt krawędzi bocznych spoiny klejonej (AJ): wklęsła, wypukła, płaska,
 - materiałowe:
 - belka dolny M2: stal konstrukcyjna 41Cr4, stop aluminium AW-5754, tworzywo polimerowe ABS.

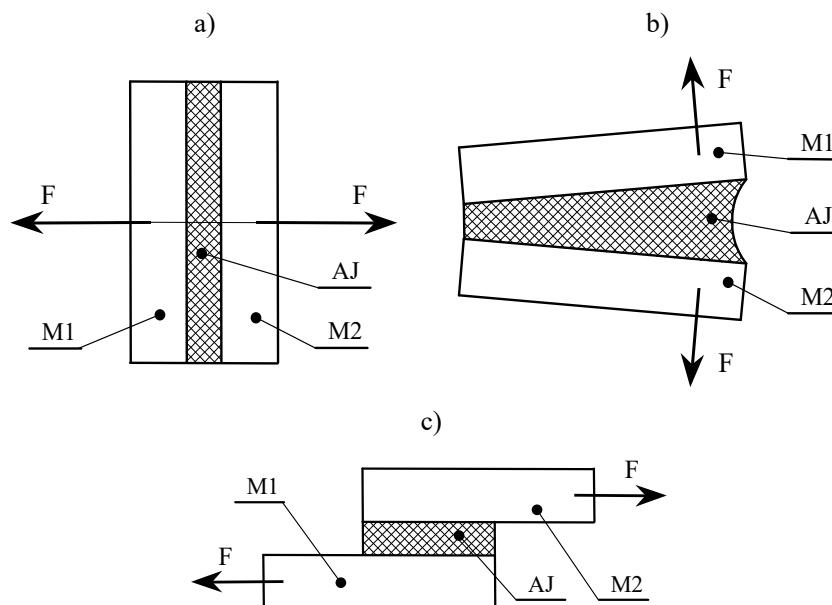
W ostatnim rozdziale przedstawiono spostrzeżenia i wnioski wynikające z analizy wyników badań oraz wskazanie dalszych kierunków badań.

4. Charakterystyka metody badań złączy klejonych z zastosowaniem próbek typu sandwich

4.1. Ogólne uwagi dotyczące badań połączeń klejonych

Ocena wytrzymałości złącza klejonego realizowana w warunkach laboratoryjnych ma dostarczyć informacji niezbędnych do właściwego doboru cech geometrycznych połączenia. Badania doświadczalne realizowane są na próbkach o wymiarach określonych właściwymi normami. Na rysunku 4.1 schematycznie przedstawiono podstawowe warunki badań złączy klejonych.

Rysunek 4.1.a dotyczy złącza doczołowego obciążonego siłą rozciągającą. Tego typu złącze jest zalecane w projektowaniu elementów maszyn ze względu na jego równomierne obciążenie. Przykładem badań złączy klejonych według przedstawionego modelu są badania złączy klejonych przeznaczonych do mocowania szyb do konstrukcji budynków. W literaturze istnieje szereg artykułów przedstawiających wyniki badań tego typu połączeń.

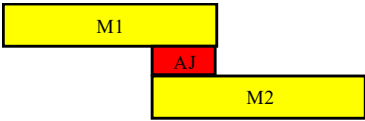
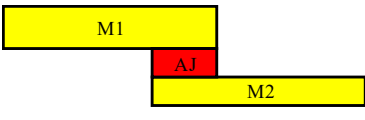
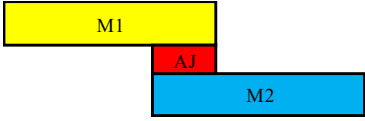
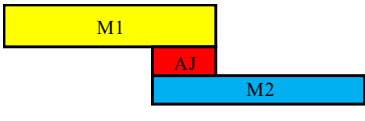


Rys. 4.1. Metoda badań złączy klejonych w warunkach obciążeń: a - rozciągających, b - odrywających, c - ścinających; M1 – element nr 1, M2 – element nr 2, AJ – złącze klejone

Rysunek 4.1.b dotyczy badań próbek na odrywanie (np. badania butów). Obciążenie tego typu złączy klejonych jest niekorzystne ze względu na złożony stan naprężeń. Pod wpływem działającego obciążenia w złączu klejonym dominującymi naprężeniami są naprężenia normalne o nierównomiernym rozkładzie wartości, które niekorzystnie wpływają na wytrzymałość tego złącza.

Rysunek 4.1.c dotyczy postaci geometrycznej złącza klejonego często stosowanego w badaniach doświadczalnych. W złączach tego typu podczas działania siły obciążającej występuje złożony stan naprężeń: ścinanie i rozciąganie. Stosunek wskazanych naprężeń zależy od sztywności łączonych elementów. Wraz ze spadkiem sztywności rośnie wartość naprężeń rozciągających, które niekorzystnie wpływają na wytrzymałość złącza klejonego [2, 11, 64, 110, 105, 117].

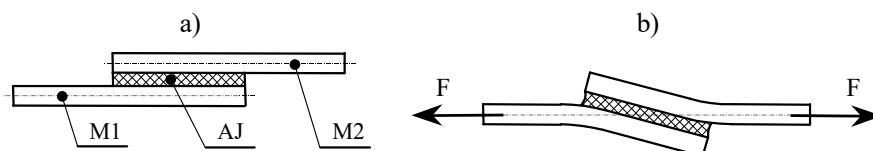
Tabela 4.1. Schematyczne przedstawienie wariantów budowy próbki zakładkowej

Lp.	Schemat złącza zakładkowego	Właściwości złącza
1		Grubość łączonych blach: $g_1 = g_2$. Właściwości materiału: $M_1 = M_2$. Grubość warstwy kleju: $g_3 = \text{const.}$
2		Grubość łączonych blach: $g_1 \neq g_2$. Właściwości materiału: $M_1 = M_2$. Grubość warstwy kleju: $g_3 = \text{const.}$
3		Grubość łączonych blach: $g_1 = g_2$. Właściwości materiału: $M_1 \neq M_2$. Grubość warstwy kleju: $g_3 = \text{const.}$
4		Grubość łączonych blach: $g_1 \neq g_2$. Właściwości materiału: $M_1 \neq M_2$. Grubość warstwy kleju: $g_3 = \text{const.}$
Legenda: g_1 – grubość blachy wykonanej z materiału o właściwościach mechanicznych M1, g_2 – grubość blachy wykonanej z materiału o właściwościach mechanicznych M2, g_3 – grubość warstwy kleju AJ o określonych właściwościach mechanicznych.		

Badania złączy klejonych są przeprowadzane na próbkach wykonanych zgodnie z normą PN-EN 1465:2009 [N4]. Próbki te mogą być wykonane zarówno z materiałów jednoimiennych (czyli tego samego rodzaju), jak i

różnoimiennych (czyli różnych rodzajów materiałów). Norma określa warunki obciążenia oraz postać geometryczną obiektów badań. W badaniach złączy klejonych opartych na próbkach zakładkowych można wyróżnić kilka wariantów związanych z cechami fizycznymi obiektu badań (Tabela 4.1).

Przedstawione warianty budowy próbki zakładkowej opracowano dla założenia: stałych właściwości mechanicznych kleju, stałej grubości warstwy kleju g_3 oraz stałej szerokości łączonych blach. Na podstawie analizy literatury stwierdzono, że dla każdego z przedstawionych wariantów złączy (Tabela 4.1) uzyskuje się różne wyniki wytrzymałości złącza klejonego na ścinanie. Wynika to z różnej sztywności poszczególnych próbek, co prowadzi do zmiany wartości stosunku naprężeń stycznych do naprężeń normalnych w kleju. Celowość badania wytrzymałości złączy klejonych łączących materiały o różnych właściwościach mechanicznych wynika z potrzeb konstruowania zespołów maszyn np. połączenia klejonego łączącego szybę czołową z konstrukcją nośną pojazdu, czy też połączenia klejonego łączącego poszycie pojazdu z jego konstrukcją nośną.



Rys. 4.2. Złącze zakładkowe stanowiące próbkę badawczą: a - przed obciążeniem, b - po obciążeniu; M1 – element nr 1, M2 – element nr 2, AJ – złącze klejone

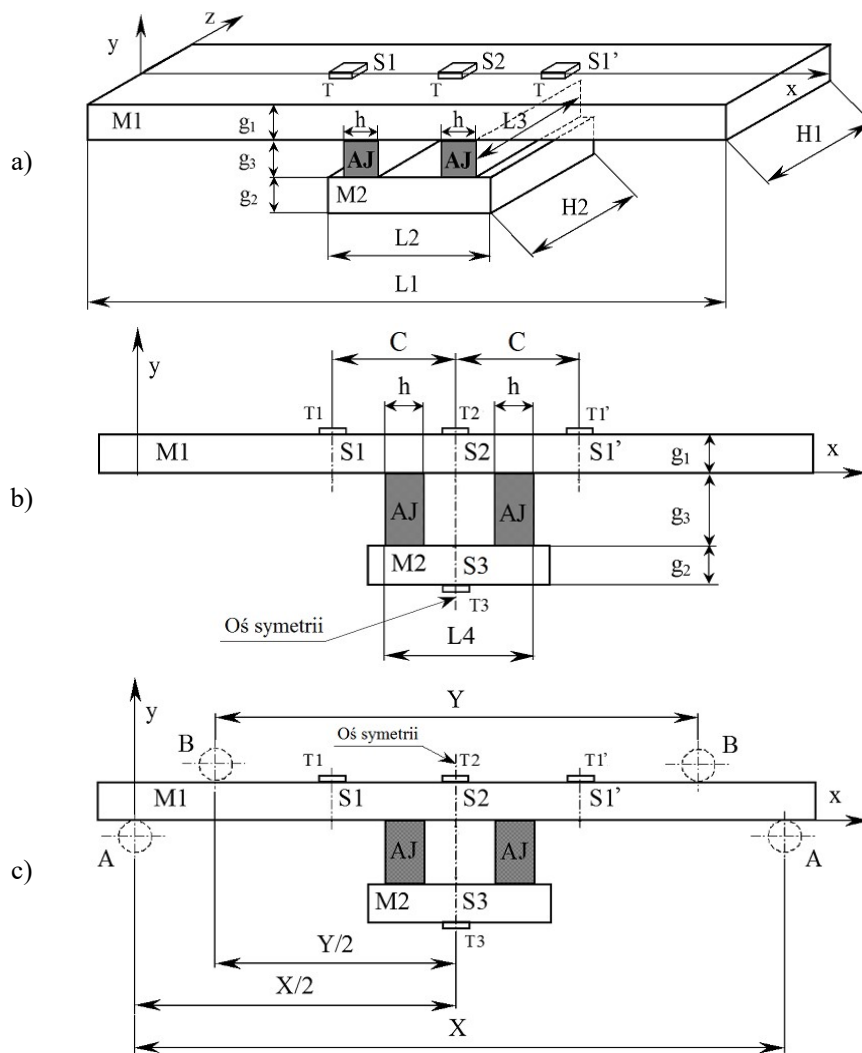
Wadą testów realizowanych na próbkach zakładkowych, łączących materiały o małej sztywności, jest występujące przeginięcie obiektu badań, co prowadzi do obciążenia fragmentów złącza naprężeniami tnącymi oraz rozciągającymi (rys. 4.2). Występowanie wysokich wartości naprężeń rozciągających na krawędziach połączenia prowadzi do jego uszkodzenia na skutek odrywania elementów.

4.2. Budowa próbki badawczej typu sandwich

Badania wytrzymałości złączy klejonych można przeprowadzać z zastosowaniem próbek o kształcie przedstawionym na rysunku 4.3. Budowę próbki zgłoszono jako wynalazek do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej, w którym zarejestrowano go pod numerem P.422884 [P2].

Próbka do badań zbudowana jest z: belki górnej (M1), belki dolnej (M2), dwóch złączy klejonych (AJ) i czujników tensometrycznych (T). Cechy geometryczne elementów próbki są następujące (rys.4.3):

- belka górna (M1): $L1$ – długość, $H1$ – szerokość, $g1$ – grubość,
- belka dolna (M2): $L2$ – długość, $H2$ – szerokość, $g2$ – grubość,
- złącze klejone (AJ): $L3$ – długość, h – szerokość, $g3$ – grubość,
- czujnik tensometryczny (T) np. TEN-TFS5/120-P.



Rys. 4.3. Schemat innowacyjnej próbki do badań wytrzymałości złącza klejonych

Złącza klejone (AJ) położone są symetrycznie względem długości L_1 belki górnej (M1). Odległość pomiędzy złączami AJ określa wymiar L_4 . Belka dolna (M2) o długości L_2 położona jest symetrycznie względem belki M1 oraz złączy AJ. Szerokości belek: M1 i M2 oraz długość złącza AJ mają takie same wartości: $H_1 = H_2 = L_3$. Na belce M1 oraz belce M2 określono punkty pomiarowe (S), w których dokonywany jest pomiar odkształceń w chwili obciążenia próbki. Punkty pomiarowe (S) położone są symetrycznie względem osi próbki w zakresie szerokości H_1 i H_2 , a także długości L_1 .

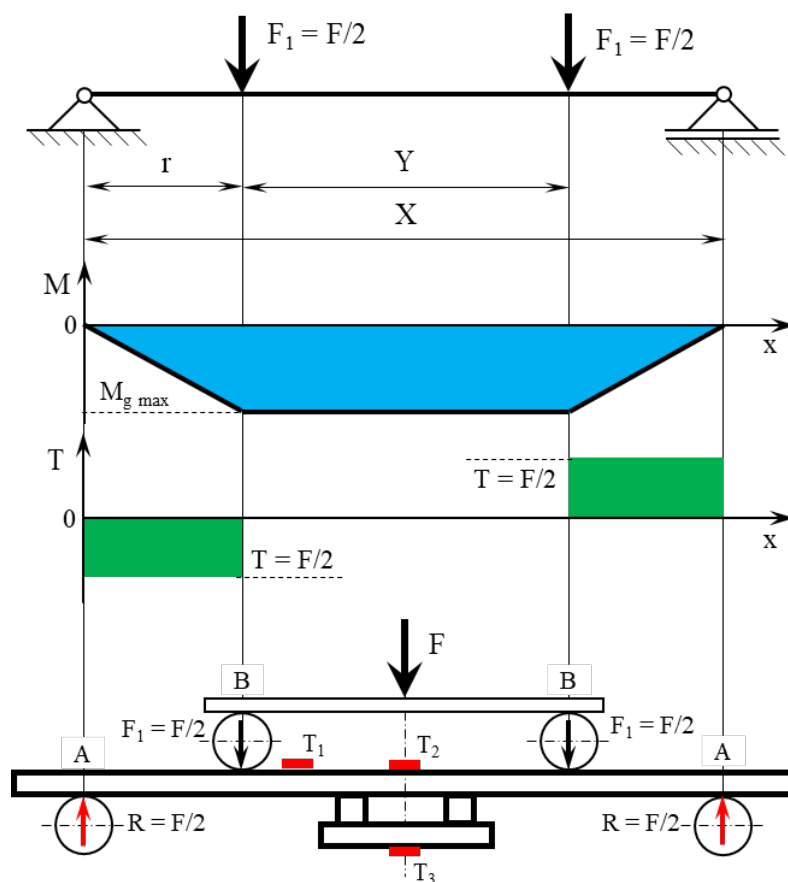
Oś symetrii próbki wyznacza położenie punktu pomiarowego: S2 na belce M1 oraz S3 na belce M2. Osi próbki oddalona jest od krawędzi belki M1 o wartość $0,5 L_1$. Położenie punktu pomiarowego S1 względem osi symetrii określa wymiar C. Wartość powinna mieścić się w przedziale $L_4 < 2C < Y$. W każdym punkcie pomiarowym S1, S2 i S3 zamontowano czujnik tensometryczny (T), położony po zewnętrznej stronie belki. Zadaniem czujników tensometrycznych T jest pomiar odkształceń elementów próbki tj. belki górnej M1 oraz belki dolnej M2.

Omawiana próbka przeznaczona jest do oceny wytrzymałości złączy klejonych w warunkach kontrolowanych odkształceń elementów konstrukcyjnych maszyn. Najkorzystniejszą formą obciążenia próbki jest czteropunktowe zginanie o monotonicznie narastającej wartości momentu zginającego. Budowa próbki pozwala także na realizację badań w warunkach obciążeń cyklicznych o współczynniku asymetrii cyklu $R \geq 0$. Sposób przyłożenia obciążenia przedstawiono na rysunkach 4.3.c oraz 4.4.

Podczas badań próbka spoczywa na podporach A oddalonych od siebie o wartość X (rys. 4.3.c, rys. 4.4). Siły obciążające próbkę $F/2$ przykładane są w punktach B, oddalonych od siebie o wartość Y. Punkty przyłożenia obciążenia B położone są symetrycznie względem podpór A. Położenie osi symetrii próbki względem podpór A określa wymiar $X/2$. Wartość momentu zginającego obciążającego próbkę zależy od wartości działających sił, a także od wartości wymiarów X i Y.

Sztywność belki górnej M1, a także belki dolnej M2 kształtowana jest poprzez dobór: kształtu przekroju poprzecznego, wymiarów geometrycznych oraz rodzaju materiału. Przekrój poprzeczny zastosowanych belek może przyjmować kształt figur prostych (np. prostokąt, kwadrat) lub figur złożonych (np. przekrój „C”, przekrój „L” i inne). Kształt przekroju oraz jego wymiary wpływają na wartość statycznego momentu bezwładności I_z . Przedstawiona na rysunku 4.3 próbka zbudowana jest z belki M1 oraz belki M2 posiadających

przekrój prostokątny. Wymiary przekroju belki M1 to $H1 \cdot g_1$, natomiast belki M2 to $H2 \cdot g_2$. O wartości momentu bezwładności każdej z belek decyduje grubość g_0 ($I_{z0} = (H_0 \cdot g_0^3)/12$), gdyż wartości $H1 = H2$. Współczynnik sztywności belek M1 i M2 jest iloczynem statycznego momentu bezwładności I_z i modułu sprężystości podłużnej E (modułu Younga). Moduł Younga E jest parametrem charakterystycznym dla materiału belki.



Rys. 4.4. Sposób obciążenia próbki typu „sandwich” podczas badań w warunkach czteropunktowego zginania

Badanie próbki w warunkach czteropunktowego zginania o monotonicznie narastającej wartości momentu zginającego (rys. 4.4) polega na pomiarze wartości odkształceń ε w punktach pomiarowych: T_1 , T_2 i T_3 . Na podstawie

pomiaru odkształceń ε wyznaczana jest wartość naprężeń S . Punkty pomiarowe T_1 i T_2 znajdują się w miejscach, gdzie wartość momentu zginającego ma stałą wartość. Punkt T_1 położony jest poza złączami klejonymi, a punkt T_2 pomiędzy złączami klejonymi. Zmiana wartości odkształceń ε_1 w punkcie T_1 jest proporcjonalna do zmiany wartości momentu zginającego M_g . Moment zginający M_g dla czteropunktowego zginania wyrażany jest wzorem:

$$M_g = F_1 \cdot r \quad (4.1)$$

gdzie:

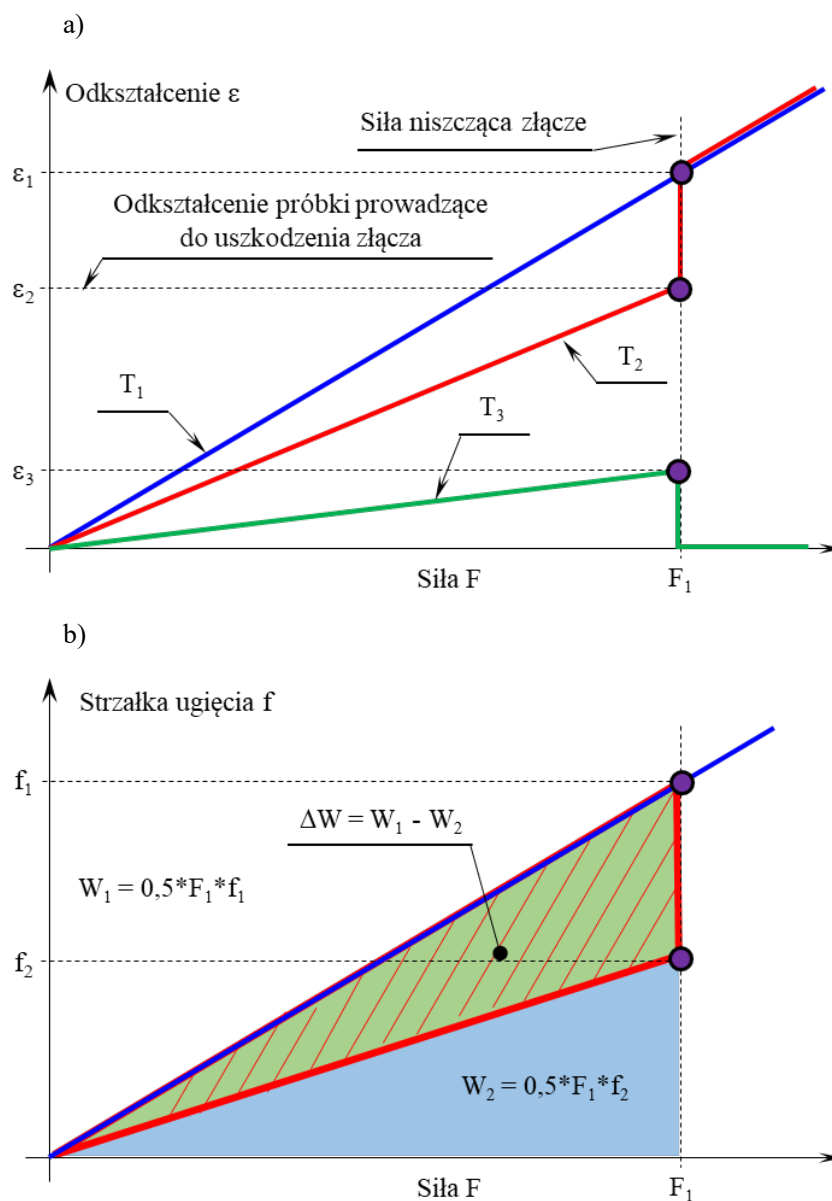
- F_1 – siła obciążająca ($F_1 = F/2$),
- r – ramię działania siły.

W wyniku monotonicznie narastającego obciążenia (rys. 4.5.a) wzrasta wartość odkształceń w punktach pomiarowych T_1 , T_2 i T_3 , a tym samym wartość naprężeń ($S = \varepsilon \cdot E$). Odkształcający się sprężyste element konstrukcyjny prowadzi do powstania różnych wartości odkształceń w obszarze T_1 , T_2 i T_3 . Wynika to z usztywnienia belki górnej M1 dodatkowym elementem M2 połączonym za pomocą złączy klejonych AJ. Do chwili uszkodzenia złącza klejonego przebiegi zmian wartości odkształceń ε_1 i ε_2 są różne. W chwili uszkodzenia złącza następuje gwałtowny wzrost wartości odkształcenia ε_2 i dalszy jego przebieg zgodnie z przebiegiem ε_1 . Wartość odkształceń $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ świadczy o pełnym uszkodzeniu złącza. Zależność $\varepsilon = f(F)$ można podzielić na dwa obszary (rys. 4.5.a):

- a) obszar I – proporcjonalnie zmieniającej się wartości odkształceń ε_1 , ε_2 i ε_3 względem monotonicznie narastającej wartości obciążenia, co świadczy o braku uszkodzenia złącza,
- b) obszar II – uszkodzenia złącza klejonego przejawiającego się wyrównaniem wartości odkształceń ε_1 i ε_2 oraz spadkiem wartości odkształceń ε_3 do zera ($\varepsilon_3 = 0$).

Badania próbki typu sandwich pozwalają na wyznaczenie pracy niszczącej ΔW potrzebnej do uszkodzenia złącza klejonego. Ideę wyznaczenia pracy ΔW przedstawiono na rysunku 4.5.b. Podstawą wyznaczenia pracy niszczącej złącze klejone ΔW jest zależność $f = f(F)$. Praca ΔW jest różnicą pracy W_1 (teoretycznym ugięciem belki górnej próbki M1 pod działaniem siły niszczącej F_1) i pracy W_2 (ugięciem belki górnej M1 pomiędzy złączami klejonymi w chwili uszkodzenia złącza):

$$\Delta W = W_1 - W_2 \quad (4.2)$$



Rys. 4.5. Idea oceny uszkodzenia złącza klejonych: a – metoda wyznaczania odkształceń, b – metoda obliczeń pracy

Przedstawiona metodyka wyznaczania obciążenia niszczącego złącza klejonego bazuje na odkształceniu jednego z łączonych elementów.

Metoda badań wykorzystująca próbki typu sandwich pozwala na precyzyjne określenie maksymalnych wartości odkształceń oraz energii potrzebnej do zniszczenia połączenia. Wyniki uzyskane z takich badań mogą znaleźć zastosowanie przy projektowaniu innych połączeń klejonych w następujący sposób:

- a) wyniki dotyczące maksymalnych odkształceń elementów poddanych obciążeniu mogą stanowić kryteria projektowe określające dopuszczalne wartości odkształceń, którym mogą podlegać elementy konstrukcyjne będące częścią złącza klejonego w warunkach eksploatacyjnych; pozwala to na lepsze dopasowanie parametrów konstrukcji do rzeczywistych warunków pracy,
- b) badania grubych złączy klejonych z wykorzystaniem próbek typu sandwich umożliwiają określenie zależności między niszczącym odkształceniem elementu wchodzącego w skład połączenia a grubością warstwy kleju; taka zależność jest istotna przy projektowaniu elementów maszyn, ponieważ umożliwia optymalizację grubości warstwy kleju w kontekście wytrzymałości i trwałości złącza.

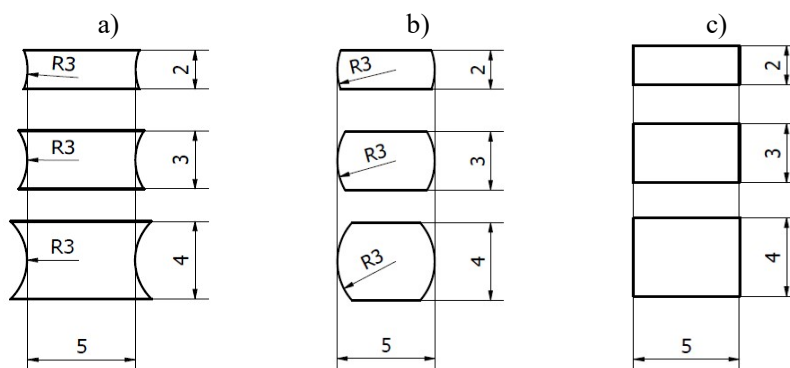
4.3. Obliczenia numeryczne naprężeń w elementach próbki

Obliczenia wartości naprężeń w elementach próbki przeprowadzono metodą MES za pomocą programu SOLIDWORKS Simulation. W obliczeniach zastosowano liniowe czworościenne elementy skończone. Wskazane elementy definiują cztery węzły narożne połączone sześcioma prostymi krawędziami. Długość krawędzi wynosiła 0,05 mm. Oznaczenia wielkości geometrycznych przyjęto zgodnie z oznaczeniami przedstawionymi na rysunku 4.3. Do obliczeń przyjęto:

- a) parametry stałe:
 - geometryczne:
 - rozstaw podpór: $X = 360$ mm,
 - odległość między punktami przyłożenia obciążenia: $Y = 180$ mm,
 - szerokość próbki: $H1 = H2 = L3 = 30$ mm,
 - długość belki górnej M1: $L1 = 500$ mm,
 - długość belki dolnej M2: $L2 = 100$ mm,
 - grubość belki M1: $g_1 = 4$ mm,
 - szerokość spoiny klejonej: $h = 5$ mm,
 - odległość spoin klejonych: $L4 = 48$ mm,

- miejsca pomiaru S1 względem osi symetrii próbki: $C = 65 \text{ mm}$,
 - materiałowe:
 - belka górna M1 – stal konstrukcyjna 41Cr4: $E = 2,05 \cdot 10^5 \text{ MPa}$, $\nu = 0,3$ [75],
 - połączenie klejone AJ – klej: $E = 1610 \text{ MPa}$, $R_m = 23,7 \text{ MPa}$, $\nu = 0,42$ [77],
 - obciążeniowe:
 - charakter obciążenia: statyczny,
 - wartość siły obciążającej: $F = 500 \text{ N}$ (rys. 4.4),
- b) parametry zmienne:
- geometryczne:
 - grubość belki dolnej (M2) g_2 : 4 mm, 6 mm, 8 mm,
 - grubość spoiny klejonej (AJ) g_3 : 2 mm, 3 mm, 4 mm,
 - kształt krawędzi bocznych spoiny klejonej (AJ): K_{wkl} – wklęsła (rys.4.6.a), K_{wyp} – wypukła (rys.4.6.b), K_{pla} – płaska (rys.4.6.c),
 - materiałowe:
 - belka dolna M2: stal konstrukcyjna 41Cr4: $E = 2,05 \cdot 10^5 \text{ MPa}$, $\nu = 0,3$; stop aluminium AW-5754: $E = 68,9 \cdot 10^3 \text{ MPa}$, $\nu = 0,33$ [47]; tworzywo polimerowe ABS: $E = 2240 \text{ MPa}$, $\nu = 0,38$ [77].

Rysunek 4.6 przedstawia kształt przekroju poprzecznego spoin klejowych oraz wymiary użyte w obliczeniach numerycznych. Dla spoin wklęsłych i wypukłych przyjęto stały promień krzywizny $R = 3 \text{ mm}$. Obliczenia pozwoliły wyznaczyć rozkłady naprężeń zredukowanych von Misesa, których przykłady pokazano na rysunkach: rys. 4.7 – belka dolna ze stali, rys. 4.8 – belka dolna ze stopu aluminium, rys. 4.9 – belka dolna z tworzywa ABS.

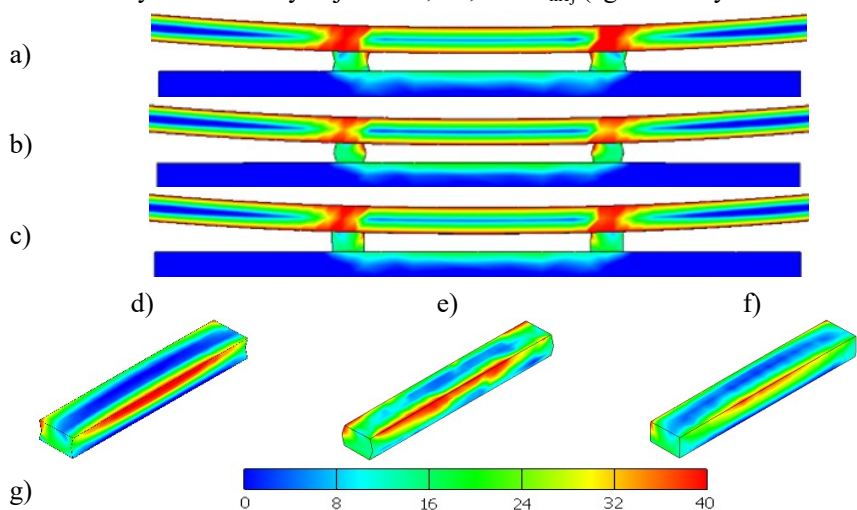


Rys. 4.6. Kształt przekroju poprzecznego spoin klejonych ze względu na kształt krawędzi bocznych: a – wklęsły, b – wypukły, c – płaski

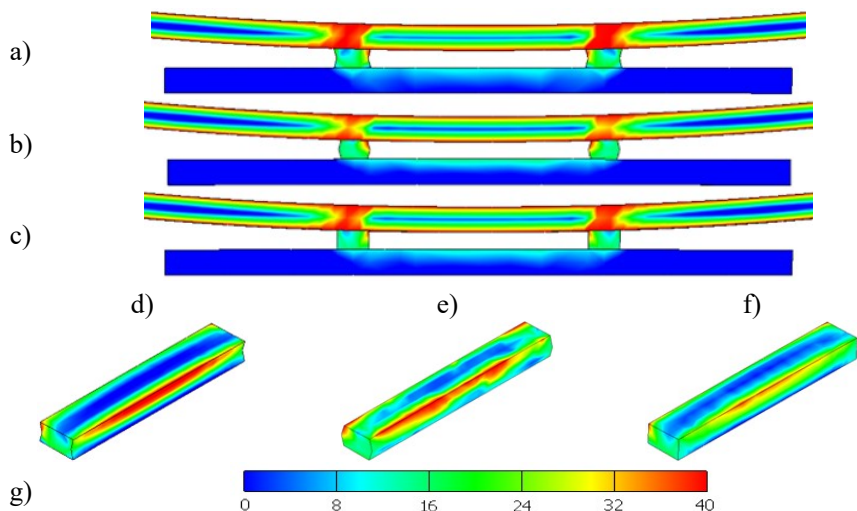
Wstępna analiza map rozkładów przedstawionych na rysunkach 4.7 ÷ 4.9 wskazuje, że w każdym z analizowanych przypadków najwyższe wartości naprężeń w spoinie klejonej uzyskano w obszarze kontaktu spoiny z belką górną M1 (w środkowej jej części). Przypadki wykonania belek dolnych ze stali i ze stopu aluminium wskazują na podobny rozkład naprężeń zredukowanych w spoinie klejonej, gdzie największe pole naprężeń o wartości $\sigma_{zred} > 32$ MPa wystąpiło dla spoiny z wypukłą krawędzią boczną, natomiast najmniejsze dla spoiny z powierzchnią płaską. Dla belki dolnej wykonanej z tworzywa polimerowego ABS wartość naprężeń nie przekroczyła wartości 20 MPa. W dolnej części każdej spoiny, dla wszystkich materiałów belek dolnych, wartości naprężeń σ_{zred} nie przekraczała 10 MPa.

Działające obciążenie na belkę górną było przenoszone na belkę dolną poprzez spoiny klejowe, co skutkowało odkształcaniem belki dolnej. Wartość naprężeń w belce dolnej jest ściśle związana z materiałem (modułem Younga) z jakiego wskazaną belkę wykonano. Belka dolna odkształcała się zgodnie z kierunkiem odkształcenia belki górnej.

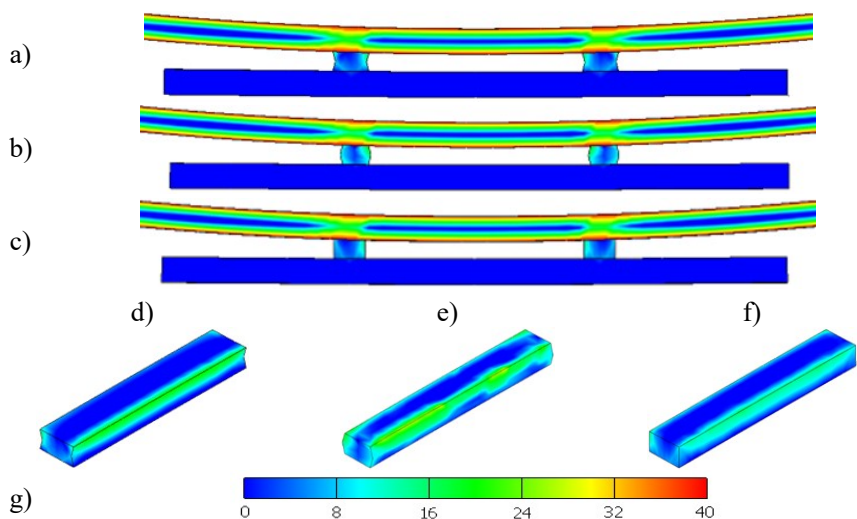
Wyniki obliczeń dla wszystkich założonych przypadków przedstawiono w tablicach 4.2 ÷ 4.4, gdzie podano wartości maksymalne naprężeń zredukowanych oznaczonych jako: S1, S2, S3 i S_{klej} (zgodnie z rysunkiem 4.3).



Rys. 4.7. Przykłady map rozkładu naprężeń von Misesa dla próbki z belką dolną (M2) wykonaną ze stali ($g_2 = 4$ mm) i spoiną klejoną ($g_3 = 3$ mm) o kształcie ściany bocznej: a – wklęsłym, b – wypukłym, c – płaskim; rozkład naprężeń von Misesa w spoinie: d – wklęsłej, e – wypukłej, f – płaskiej, g – legenda dla rozkładu naprężeń w spoinie klejonej



Rys. 4.8. Przykłady map rozkładu naprężeń von Misesa dla próbki z belką dolną (M2) wykonaną ze stopu aluminium ($g_2 = 4$ mm) i spoiną klejoną ($g_3 = 3$ mm) o kształcie ściany bocznej: a – wklęsłym, b – wypukłym, c – płaskim; rozkład naprężeń von Misesa w spoinie: d – wklęsłej, e – wypukłej, f – płaskiej, g – legenda dla rozkładu naprężeń w spoinie klejonej



Rys. 4.9. Przykłady map rozkładu naprężeń von Misesa dla próbki z belką dolną (M2) wykonaną ze tworzywa polimerowego ABS ($g_2 = 4$ mm) i spoiną klejoną ($g_3 = 3$ mm) o kształcie ściany bocznej: a – wklęsłym, b – wypukłym, c – płaskim; rozkład naprężeń von Misesa w spoinie: d – wklęsłej, e – wypukłej, f – płaskiej, g – legenda dla rozkładu naprężeń w spoinie klejonej

Tabela 4.2. Wartości naprężeń zredukowanych S1, S2 i S3 w próbce typu “sandwich” z belką dolną (M2) wykonaną ze stali

Lp.	Parametry zmienne			Naprężenia zredukowane wg von Misesa			
	g ₂ mm	g ₃ mm	AJ ---	S1 MPa	S2 MPa	S3 MPa	S _{klej} MPa
1	4	2	K _{wkl}	281	138	58	35
2	4	2	K _{wyp}	281	149	51	35
3	4	2	K _{pła}	281	143	54	35
4	4	3	K _{wkl}	281	152	41	34
5	4	3	K _{wyp}	281	167	33	40
6	4	3	K _{pła}	281	159	38	29
7	4	4	K _{wkl}	281	158	30	20
8	4	4	K _{wyp}	281	191	15	26
9	4	4	K _{pła}	281	171	25	30
10	6	2	K _{wkl}	281	127	32	37
11	6	2	K _{wyp}	281	140	27	37
12	6	2	K _{pła}	281	134	30	38
13	6	3	K _{wkl}	281	147	21	34
14	6	3	K _{wyp}	281	164	15	41
15	6	3	K _{pła}	281	155	18	30
16	6	4	K _{wkl}	281	155	14	20
17	6	4	K _{wyp}	281	191	5	27
18	6	4	K _{pła}	281	169	10	30
19	8	2	K _{wkl}	281	123	18	38
20	8	2	K _{wyp}	281	138	14	38
21	8	2	K _{pła}	281	131	16	38
22	8	3	K _{wkl}	281	145	11	35
23	8	3	K _{wyp}	281	163	4	41
24	8	3	K _{pła}	281	154	9	30
25	8	4	K _{wkl}	281	155	6	20
26	8	4	K _{wyp}	281	190	1	27
27	8	4	K _{pła}	281	169	4	30

Tabela 4.3. Wartości naprężeń zredukowanych S1, S2 i S3 w próbce typu “sandwich” z belką dolną (M2) wykonaną ze stopu aluminium

Lp.	Parametry zmienne			Naprężenia zredukowane wg von Misesa			
	g ₂ mm	g ₃ mm	AJ ---	S1 MPa	S2 MPa	S3 MPa	S _{klej} MPa
1	4	2	K _{wkl}	281	150	38	33
2	4	2	K _{wyp}	281	159	35	33
3	4	2	K _{pła}	281	154	36	33
4	4	3	K _{wkl}	281	159	29	32
5	4	3	K _{wyp}	281	172	24	38
6	4	3	K _{pła}	281	165	27	27
7	4	4	K _{wkl}	281	162	22	19
8	4	4	K _{wyp}	281	193	13	26

Metoda badań wytrzymałości złącza klejonego z zastosowaniem próbki typu „sandwich”

9	4	4	K _{pla}	281	174	19	29
10	6	2	K _{wkl}	281	135	25	36
11	6	2	K _{wyp}	281	147	21	36
12	6	2	K _{pla}	281	141	23	36
13	6	3	K _{wkl}	281	151	17	34
14	6	3	K _{wyp}	281	166	13	40
15	6	3	K _{pla}	281	158	15	29
16	6	4	K _{wkl}	281	157	12	20
17	6	4	K _{wyp}	281	191	5	26
18	6	4	K _{pla}	281	171	9	30
19	8	2	K _{wkl}	281	128	15	37
20	8	2	K _{wyp}	281	142	13	37
21	8	2	K _{pla}	281	135	14	37
22	8	3	K _{wkl}	281	148	10	34
23	8	3	K _{wyp}	281	164	4	40
24	8	3	K _{pla}	281	156	8	30
25	8	4	K _{wkl}	281	156	6	20
26	8	4	K _{wyp}	281	191	1	27
27	8	4	K _{pla}	281	170	4	30

Tabela 4.4. Wartości naprężeń zredukowanych S1, S2 i S3 w próbce typu “sandwich” z belką dolną (M2) wykonaną z tworzywa polimerowego ABS

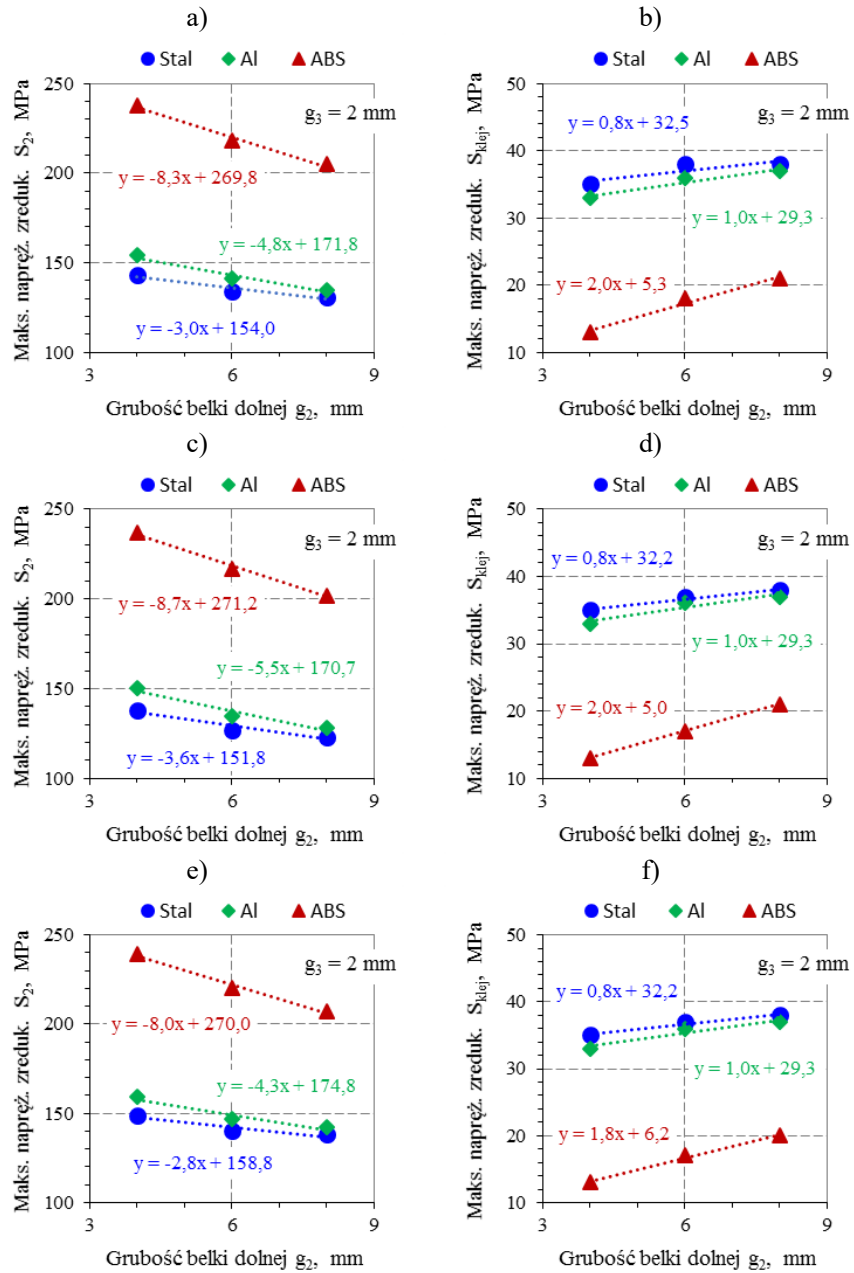
Lp.	Parametry zmienne			Naprężenia zredukowane wg von Misesa			
	g ₂	g ₃	AJ	S1	S2	S3	S _{klej}
	mm	mm	---	MPa	MPa	MPa	MPa
1	4	2	K _{wkl}	281	237	8	13
2	4	2	K _{wyp}	281	239	7	13
3	4	2	K _{pla}	281	238	8	13
4	4	3	K _{wkl}	281	229	7	16
5	4	3	K _{wyp}	281	232	7	19
6	4	3	K _{pla}	281	231	7	13
7	4	4	K _{wkl}	281	222	7	11
8	4	4	K _{wyp}	281	230	6	15
9	4	4	K _{pla}	281	225	7	16
10	6	2	K _{wkl}	281	217	7	17
11	6	2	K _{wyp}	281	220	6	17
12	6	2	K _{pla}	281	218	6	18
13	6	3	K _{wkl}	281	212	6	20
14	6	3	K _{wyp}	281	217	5	24
15	6	3	K _{pla}	281	214	6	16
16	6	4	K _{wkl}	281	206	5	13
17	6	4	K _{wyp}	281	221	4	18
18	6	4	K _{pla}	281	211	5	19
19	8	2	K _{wkl}	281	202	5	21
20	8	2	K _{wyp}	281	207	5	20

Metoda badań wytrzymałości złącza klejonego z zastosowaniem próbki typu „sandwich”

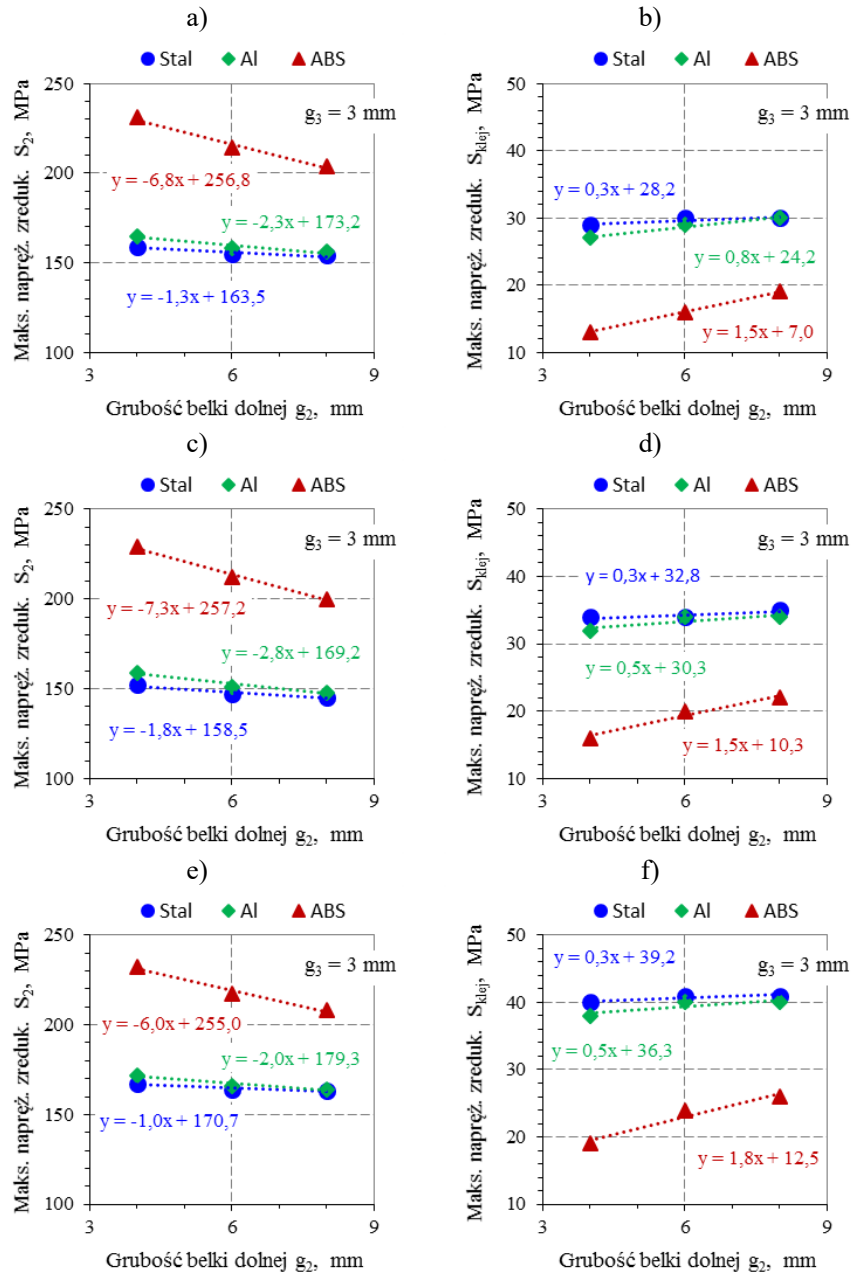
21	8	2	$K_{pła}$	281	205	5	21
22	8	3	K_{wkl}	281	200	5	22
23	8	3	K_{wyp}	281	208	2	26
24	8	3	$K_{pła}$	281	204	4	19
25	8	4	K_{wkl}	281	196	4	14
26	8	4	K_{wyp}	281	216	3	19
27	8	4	$K_{pła}$	281	204	3	21

Na podstawie wyników obliczeń numerycznych przedstawionych w tabelach 4.2 ÷ 4.4 wyznaczono zależności:

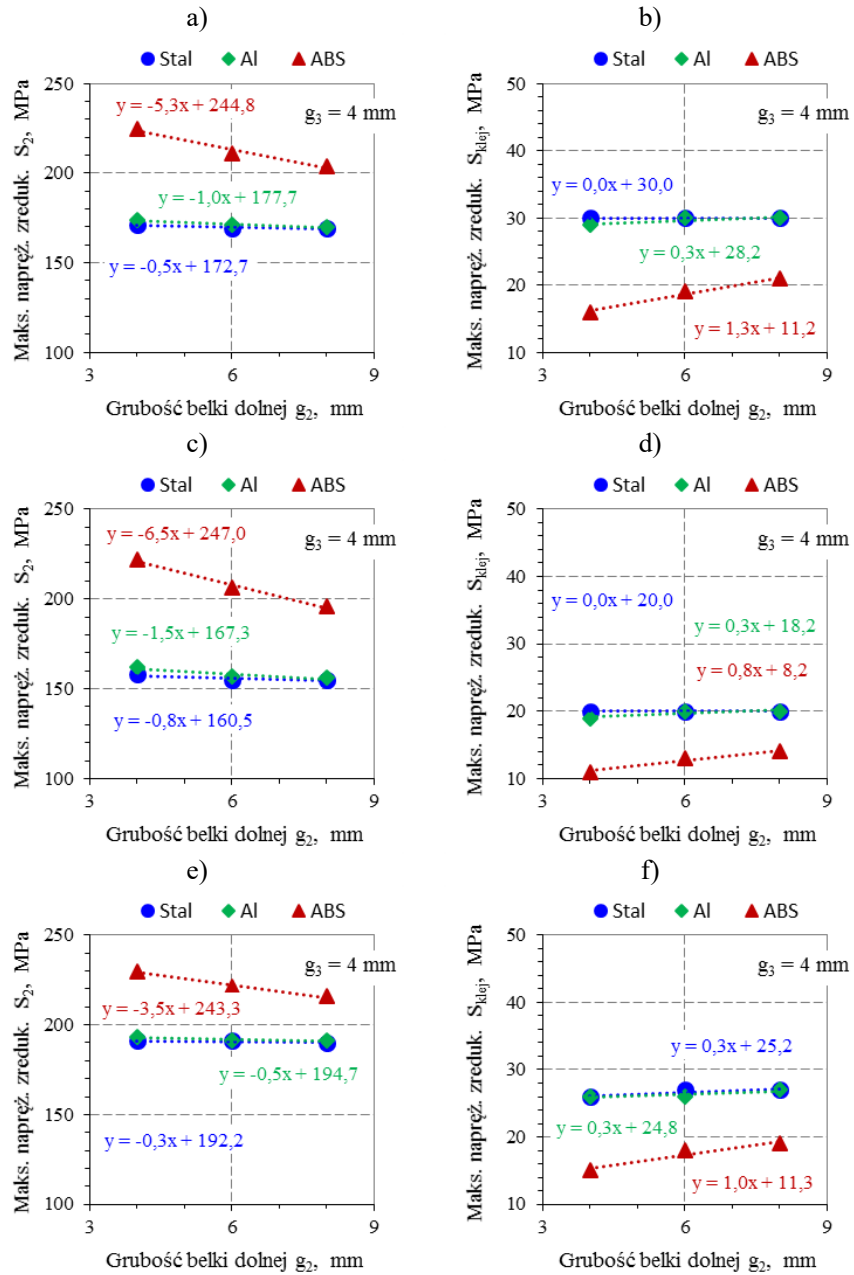
- $S_2 = f(g_2)$ i $S_{klej} = f(g_2)$ dla grubości warstwy kleju $g_3 = 2$ mm (rys. 4.10),
- $S_2 = f(g_2)$ i $S_{klej} = f(g_2)$ dla grubości warstwy kleju $g_3 = 3$ mm (rys. 4.11),
- $S_2 = f(g_2)$ i $S_{klej} = f(g_2)$ dla grubości warstwy kleju $g_3 = 4$ mm (rys. 4.12),
- $S_2 = f(g_3)$ i $S_{klej} = f(g_3)$ dla grubości belki dolnej $g_2 = 4$ mm (rys. 4.13),
- $S_2 = f(g_3)$ i $S_{klej} = f(g_3)$ dla grubości belki dolnej $g_2 = 6$ mm (rys. 4.14),
- $S_2 = f(g_3)$ i $S_{klej} = f(g_3)$ dla grubości belki dolnej $g_2 = 8$ mm (rys. 4.15),
- $S_{klej} = f(S_2)$ dla zmiennego kształtu powierzchni bocznej spoiny (rys. 4.16).



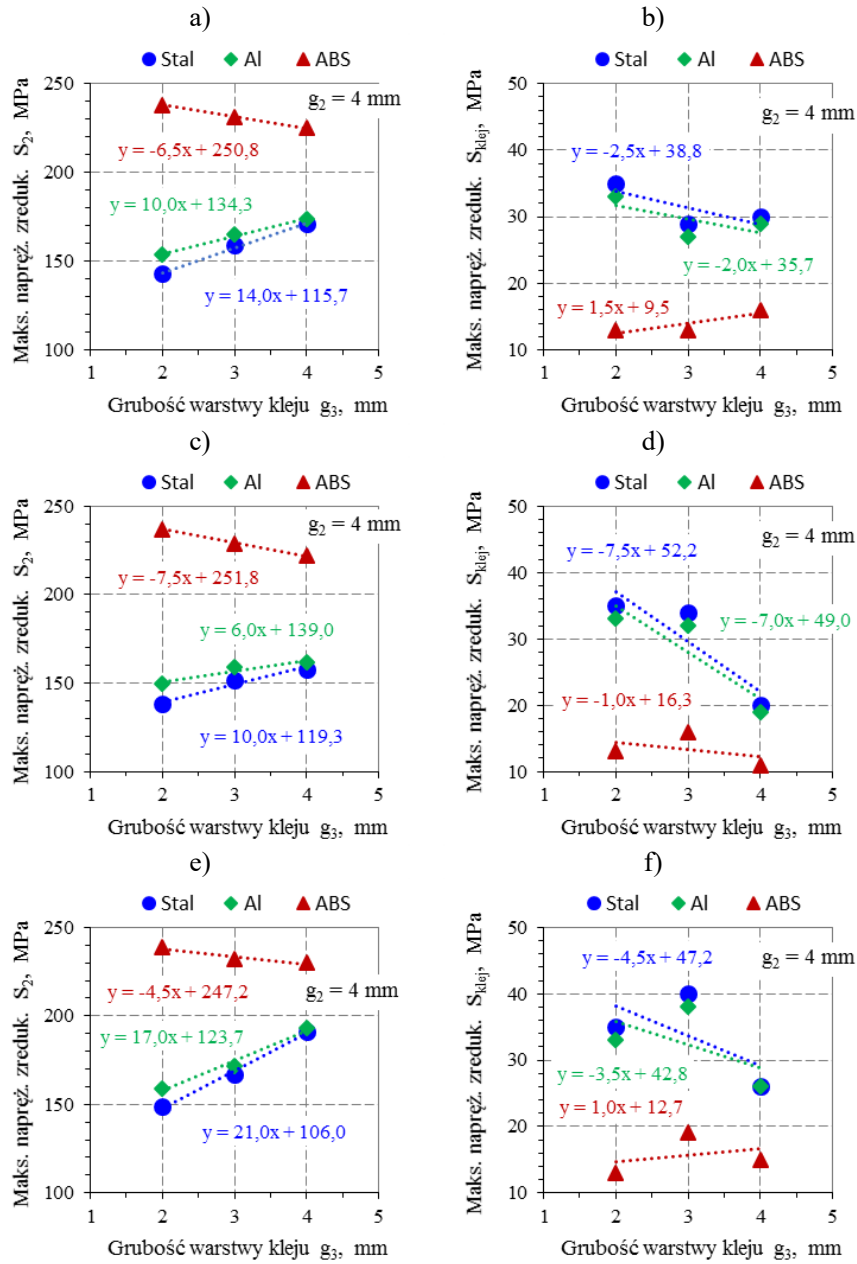
Rys. 4.10. Zależność $S_2 = f(g_2)$ i $S_{klej} = f(g_2)$ dla grubości warstwy kleju $g_3 = 2$ mm dla próbek z: a, b – płaską powierzchnią boczną spoiny, c, d – wklęsłą powierzchnią boczną spoiny, e, f – wypukłą powierzchnią boczną spoiny



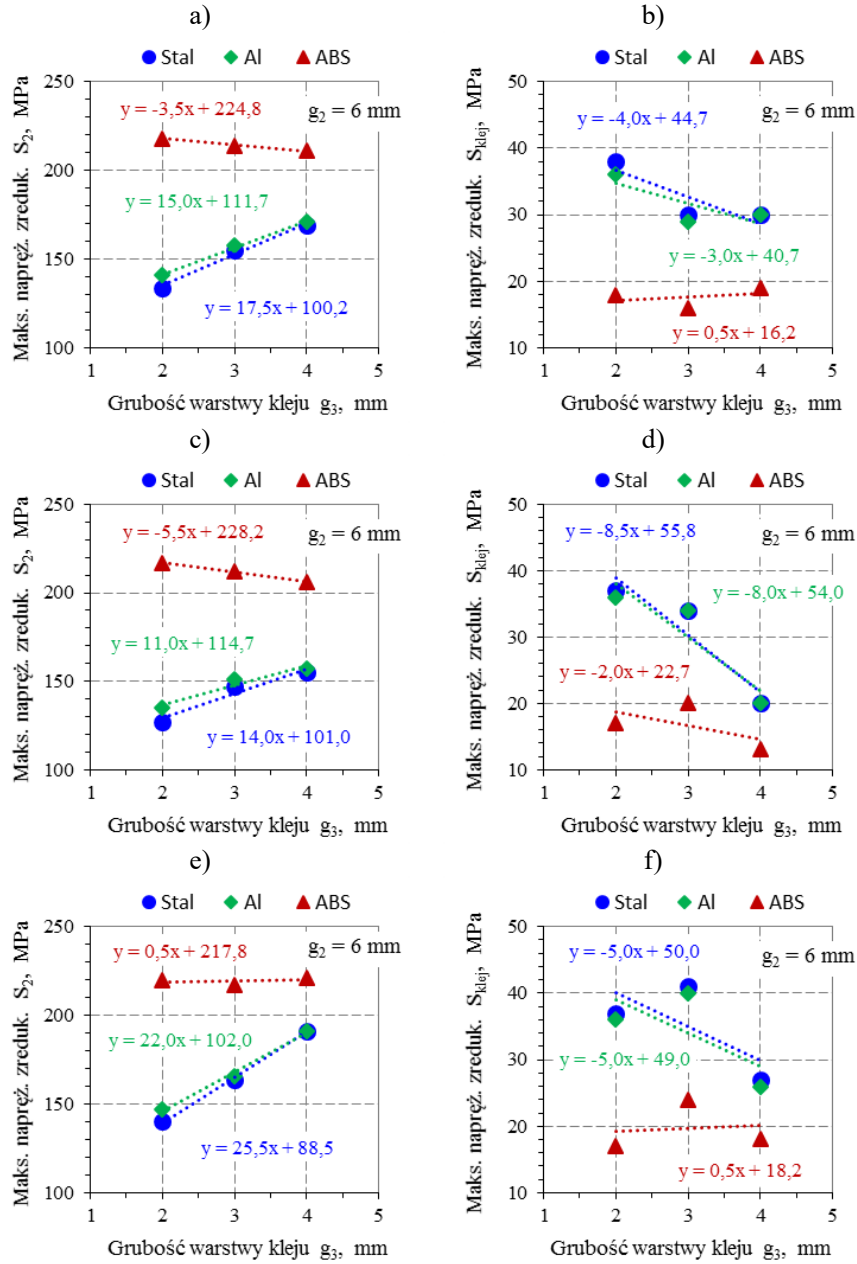
Rys. 4.11. Zależność $S_2 = f(g_2)$ i $S_{klej} = f(g_2)$ dla grubości warstwy kleju $g_3 = 3$ mm dla próbek z: a, b – płaską powierzchnią boczną spoiny, c, d – wklęsłą powierzchnią boczną spoiny, e, f – wypukłą powierzchnią boczną spoiny



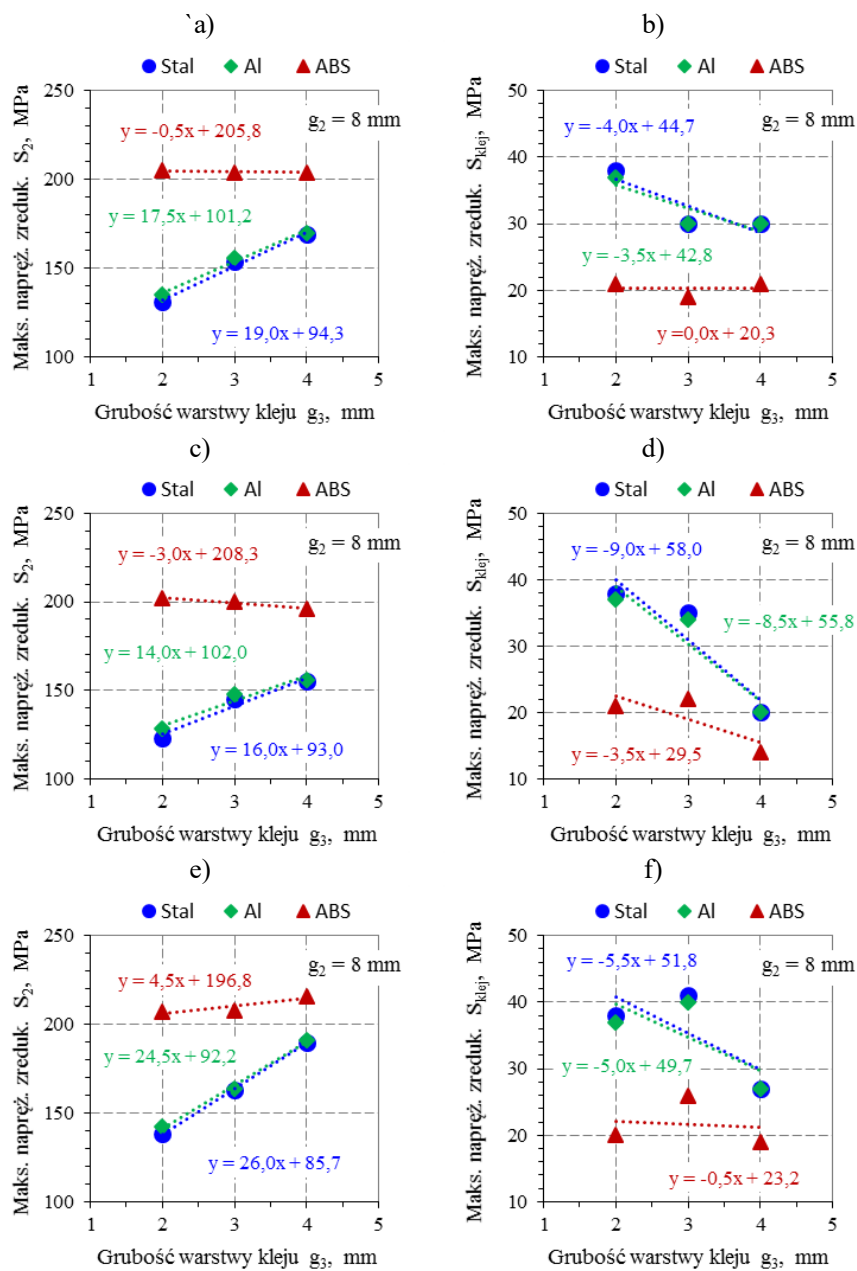
Rys. 4.12. Zależność $S_2 = f(g_2)$ i $S_{klej} = f(g_2)$ dla grubości warstwy kleju $g_3 = 4$ mm dla próbek z: a, b – płaską powierzchnią boczną spoiny, c, d – wklęsłą powierzchnią boczną spoiny, e, f – wypukłą powierzchnią boczną spoiny



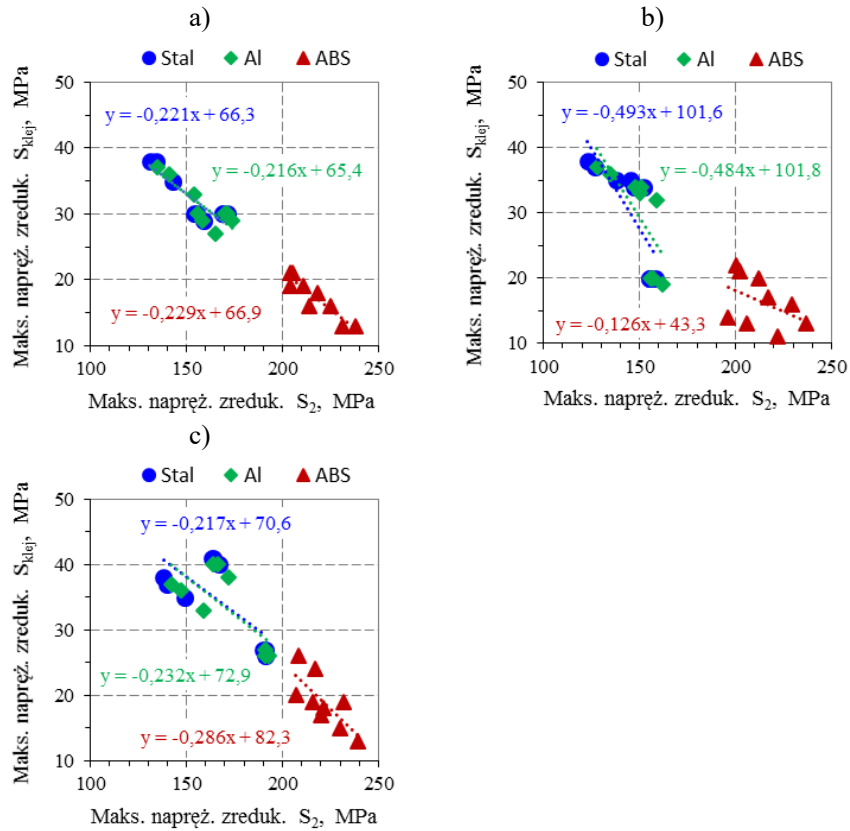
Rys. 4.13. Zależność $S_2 = f(g_3)$ i $S_{klej} = f(g_3)$ dla grubości belki dolnej $g_2 = 4$ mm dla próbek z: a, b – płaską powierzchnią boczną spoiny, c, d – wklęsłą powierzchnią boczną spoiny, e, f – wypukłą powierzchnią boczną spoiny



Rys. 4.14. Zależność $S_2 = f(g_3)$ i $S_{klej} = f(g_3)$ dla grubości belki dolnej $g_2 = 6$ mm dla próbek z: a, b – płaską powierzchnią boczną spoiny, c, d – wklęsłą powierzchnią boczną spoiny, e, f – wypukłą powierzchnią boczną spoiny



Rys. 4.15. Zależność $S_2 = f(g_3)$ i $S_{klej} = f(g_3)$ dla grubości belki dolnej $g_2 = 8$ mm dla próbek z: a, b – płaską powierzchnią boczną spoiny, c, d – wklęsłą powierzchnią boczną spoiny, e, f – wypukłą powierzchnią boczną spoiny



Rys. 4.16. Zależność $S_{klej} = f(S_2)$ dla próbek z: a – płaską powierzchnią boczną spoiny, b – wklęsłą powierzchnią boczną spoiny, c – wypukłą powierzchnią boczną spoiny

Analiza wyników zależności $S_2 = f(g_2)$ uzyskanych dla spoiny z: płaską powierzchnią boczną (rys. 4.10.a, rys. 4.11.a i rys. 4.12.a), wklęsłą powierzchnią boczną (rys. 4.10.c, rys. 4.11.c i rys. 4.12.c) i wypukłą powierzchnią boczną (rys. 4.10.e, rys. 4.11.e i rys. 4.12.e), pozwala dostrzec występujące podobieństwo w ułożeniu wyników obliczeń. Na podstawie przedstawionych wyników zauważono, że:

- wartość naprężeń S_2 zależy od: kształtu powierzchni bocznej spoiny, grubości spoiny g_3 , grubości belki dolnej M2 oraz materiału zastosowanego na belkę M2,
- najwyższe wartości naprężeń S_2 uzyskano dla belki dolnej M2 wykonanej z tworzywa polimerowego ABS dla każdej z przyjętych

- grubości belki dolnej g_2 oraz wszystkich przyjętych grubościach spoin g_3 , a także wszystkich przyjętych kształtów powierzchni bocznej; najniższa wartość naprężeń S2 dla analizowanego wariantu wynosiła 199 MPa,
- c) najniższe wartości naprężeń S2 uzyskano dla belki dolnej M2 wykonanej ze stali dla wszystkich wariantów obliczeń w porównaniu z innymi rodzajami materiałów, z których wykonano belki M2,
 - d) dla wszystkich zastosowanych materiałów na belkę dolną M2 oraz dla wszystkich przyjętych grubości g_3 najwyższe wartości naprężeń S2 uzyskano dla grubości belki dolnej $g_2 = 4$ mm,
 - e) dla wszystkich analizowanych przypadków wraz ze wzrostem grubości belki dolnej g_2 spadała wartość naprężeń S2 o czym świadczą wartości współczynnika kierunkowego równania funkcji liniowej,
 - f) w przypadku spoiny o wypukłych powierzchniach bocznych i belkach M2 wykonanych ze stali i stopu aluminium zanotowano najwyższy wzrost wartości naprężeń S2 wraz ze wzrostem grubości spoiny g_3 ,
 - g) w przypadku spoiny o wklęsłych powierzchniach bocznych i belek M2 wykonanych ze stali i stopu aluminium zauważono najmniejszy wzrost wartości naprężeń S2 spośród wszystkich kształtów powierzchni bocznej spoiny.

Analiza wyników zależności $S_{klej} = f(g_2)$ uzyskanych dla spoiny z: płaską powierzchnią boczną (rys. 4.10.b, rys. 4.11.b i rys. 4.12.b), wklęsłą powierzchnią boczną (rys. 4.10.d, rys. 4.11.d i rys. 4.12.d) i wypukłą powierzchnią boczną (rys. 4.10.f, rys. 4.11.f i rys. 4.12.f), pozwala dostrzec występujące podobieństwo w ułożeniu wyników obliczeń. Na podstawie przedstawionych wyników zauważono, że:

- a) dla belki dolnej M2 wykonanej z tworzywa polimerowego ABS dla wszystkich przypadków obliczeniowych wartość naprężeń S_{klej} wzrasta wraz ze wzrostem grubości g_2 ,
- b) najwyższe wartości naprężeń S_{klej} dla grubości spoiny $g_3 = 2$ mm i $g_3 = 3$ mm uzyskano dla belki dolnej wykonanej ze stali; w przypadku grubości spoiny $g_3 = 4$ mm wartość naprężeń S_{klej} dla belek M2 wykonanych ze stali i stopu aluminium była na zbliżonym poziomie,
- c) dla spoiny o grubości $g_3 = 2$ mm i każdego z analizowanych kształtów powierzchni bocznej spoiny wartości naprężeń S_{klej} oraz rozkład wartości jest zbliżony, o czym świadczą równania funkcji liniowej opisujących wyniki obliczeń; zakres zmian wartości naprężeń S_{klej} dla belki dolnej

wykonanej: ze stali 35÷38 MPa, ze stopu aluminium 33÷37 MPa, tworzywa ABS 13 ÷ 21 MPa.

Analiza wyników zależności $S_2 = f(g_3)$ uzyskanych dla spoiny z: płaską powierzchnią boczną (rys. 4.13.a, rys. 4.14.a i rys. 4.15.a), wklęsłą powierzchnią boczną (rys. 4.13.c, rys. 4.14.c i rys. 4.15.c) i wypukłą powierzchnią boczną (rys. 4.13.e, rys. 4.14.e i rys. 4.15.e), pozwala dostrzec występujące podobieństwo w ułożeniu wyników obliczeń. Na podstawie uzyskanych wyników zauważono, że:

- a) wartość maksymalnych naprężeń zredukowanych S_2 rośnie wraz ze wzrostem grubości spoiny dla belki dolnej wykonanej ze stali i stopu aluminium, co wskazuje na zmniejszanie zdolności przenoszenia obciążenia przez spoinę klejoną (AJ) z belki górnej (M1) na belkę dolną (M2); zależność ta występuje dla wszystkich analizowanych przekroji; najwyższe wartości naprężeń S_2 uzyskano dla spoin z wypukłą powierzchnią boczną, a najniższe wartości S_2 dla spoin z wklęsłą powierzchnią boczną; różnice wartości dla poszczególnych kształtów powierzchni bocznych rosną wraz ze wzrostem grubości spoiny klejonej g_3 ,
- b) wartość maksymalnych naprężeń zredukowanych S_2 nieznacznie maleje wraz ze wzrostem grubości spoiny klejonej dla belki dolnej wykonanej z tworzywa polimerowego ABS w przypadku spoin z płaską i wklęsłą powierzchnią boczną; w przypadku spoiny z wypukłą powierzchnią boczną rozkład wyników jest związany z grubością belki dolnej g_2 , gdzie: dla $g_2 = 4$ mm uzyskuje się spadek wartości S_2 wraz ze wzrostem grubości spoiny g_3 , dla $g_2 = 6$ mm wartość S_2 przyjmuje podobną wartość dla każdej grubości g_3 , dla $g_2 = 8$ mm uzyskuje się wzrost wartości S_2 wraz ze wzrostem grubości spoiny g_3 ; uogólniając można zauważyć nieznaczne zwiększenie zdolności przenoszenia obciążenia przez spoinę klejoną (AJ) z belki górnej (M1) na belkę dolną (M2) wykonaną z tworzywa polimerowego ABS,
- c) dla każdej grubości warstwy kleju g_3 (2 mm, 3 mm, 4 mm) najniższą wartość naprężeń S_2 uzyskano dla belki dolnej wykonanej ze stali, a najwyższą wartość naprężeń S_2 dla belki wykonanej z tworzywa polimerowego ABS, co wskazuje na odciążenie obszaru belki górnej (M1) przez belkę dolną (M2) i jest to związane ze sztywnością belki M2,
- d) wartość naprężeń S_2 zależy od grubości belki dolnej i grubości spoiny g_3 , o czym świadczy wartość współczynnika kierunkowego równania funkcji

liniowej; wartość wskazanego współczynnika przyjmuje wartości dodatnie, które rosną wraz ze wzrostem grubości spoiny dla belek dolnych wykonanych ze stali i stopu aluminium; w przypadku belki z tworzywa polimerowego ABS wartość współczynnika kierunkowego przyjmuje wartości ujemne, które rosną wraz ze wzrostem grubości spoiny o płaskiej i wklęsłej powierzchni bocznej; w przypadku spoiny o wypukłej powierzchni bocznej wartość współczynnika także rośnie od wartości ujemnej do wartości dodatniej.

Analiza wyników zależności $S_{klej} = f(g_3)$ uzyskanych dla spoiny z: płaską powierzchnią boczną (rys. 4.13.b, rys. 4.14.b i rys. 4.15.b), wklęsłą powierzchnią boczną (rys. 4.13.d, rys. 4.14.d i rys. 4.15.d) i wypukłą powierzchnią boczną (rys. 4.13.f, rys. 4.14.f i rys. 4.15.f), pozwala dostrzec występujące podobieństwo w ułożeniu wyników obliczeń. Na podstawie przedstawionych wyników zauważono, że:

- a) najwyższą wartość naprężeń zredukowanych S_{klej} w spoinie z płaską i wklęsłą powierzchnią boczną uzyskano dla grubości spoiny $g_3 = 2$ mm i belki dolnej wykonanej ze stali i stopu aluminium; w przypadku wypukłej powierzchni bocznej najwyższą wartość uzyskano dla grubości spoiny $g_3 = 3$ mm belek dolnych wykonanych ze stali i stopu aluminium; dla spoin o płaskiej i wklęsłej powierzchni bocznej wartość naprężeń S_{klej} maleje wraz ze wzrostem grubości spoiny g_3 tylko dla belek M2 wykonanych ze stali i stopu aluminium; wartość naprężeń S_{klej} dla poszczególnych kształtów powierzchni bocznych i belek dolnych ze stali i stopu aluminium mieści się na zbliżonym poziomie; znacząco różne wyniki uzyskano dla belki dolnej M2 wykonanej z tworzywa polimerowego ABS w odniesieniu do belek M2 ze stali i stopu aluminium; powtarzające się ułożenie wyników występuje tylko dla spoiny o wklęsłych powierzchniach bocznych i belki dolnej M2 wykonanej z tworzywa ABS,
- b) dla spoiny o płaskich powierzchniach bocznych o grubości $g_3 = 3$ mm i $g_3 = 4$ mm dla belki wykonanej ze stali o zmiennych wartościach g_2 (4 mm, 6 mm, 8 mm) wartość naprężeń S_{klej} była na zbliżonym poziomie wynoszącym 30 MPa,
- c) dla belki M2 wykonanej z tworzywa polimerowego ABS wartość naprężeń S_{klej} zależy od grubości belki dolnej g_2 dla każdej grubości spoiny klejonej g_3 ; najniższe wartości naprężeń S_{klej} uzyskuje się dla

grubości belki $g_2 = 4$ mm, natomiast największe wartości dla grubości $g_2 = 8$ mm.

Wyniki obliczeń uzyskanych dla spoiny z: płaską powierzchnią boczną (rys. 4.16.a), wklęsłą powierzchnią boczną (rys. 4.16.b) i wypukłą powierzchnią boczną (rys. 4.16.c), aproksymowano funkcją liniową odrębnie dla każdego materiału belki dolnej M2. Na podstawie przedstawionych wyników zauważono, że:

- a) dla spoin z powierzchnią boczną płaską istnieje zależność pomiędzy wynikami naprężeń S_{klej} a naprężeniami S_2 ; świadczy o tym rozkład wyników obliczeń skoncentrowany w określonych obszarach wykresu oraz zbliżona postać równań funkcji liniowej; wyniki obliczeń dla belki dolnej wykonanej ze stali i ze stopu aluminium są zbliżone,
- b) dla spoin z wklęsłą powierzchnią boczną linie aproksymacyjne opisujące wyniki obliczeń dla belki M2 wykonanej ze stali i ze stopu aluminium są zbliżone, lecz położone w dwóch obszarach wykresu; kierunek linii aproksymacyjnych wyników dla belek M2 ze stali i ze stopu aluminium różnią się istotnie od kierunku linii aproksymacyjnej dla tworzywa polimerowego,
- c) dla spoin z wypukłą powierzchnią boczną wyznaczone linie aproksymacyjne posiadają zbliżone wartości współczynników kierunkowych; wyniki obliczeń uzyskane dla belki dolnej M2 wykonanej ze stali pokrywają się z wynikami uzyskanymi dla belki ze stopu aluminium; wyniki uzyskane dla grubości spoiny $g_3 = 3$ mm odbiegają od zauważanej tendencji rozkładu danych; w przypadku wyników uzyskanych dla belki wykonanej z tworzywa polimerowego ABS nieco odstającymi wynikami od zauważalnego trendu są te uzyskane dla grubości spoiny wynoszącej $g_3 = 3$ mm.

Celem obliczeń MES było określenie orientacyjnych rozkładów naprężeń w próbce typu sandwich dla różnych wariantów geometrycznych i materiałowych. Przeanalizowano 81 modeli bryłowych, których wymiary oparto na wstępnych wynikach badań doświadczalnych. Dlatego Autorka pracy, ze względu na czas trwania pojedynczych analiz MES, wykorzystwała do obliczeń narzędzie SOLIDWORKS Simulation. Uzyskane wyniki należy uznać za orientacyjne, lecz pokazujące zależności pomiędzy zmiennymi parametrami.

Pragnę także podziękować firmie DKM Power Transmission Sp. z o.o. za udostępnienie wyżej wymienionego oprogramowania do realizacji zadania w ramach rozprawy doktorskiej.

5. Badania doświadczalne złączy klejonych

5.1. Badania zakładkowych połączeń klejonych

5.1.1. Próbka badawcza i program badań

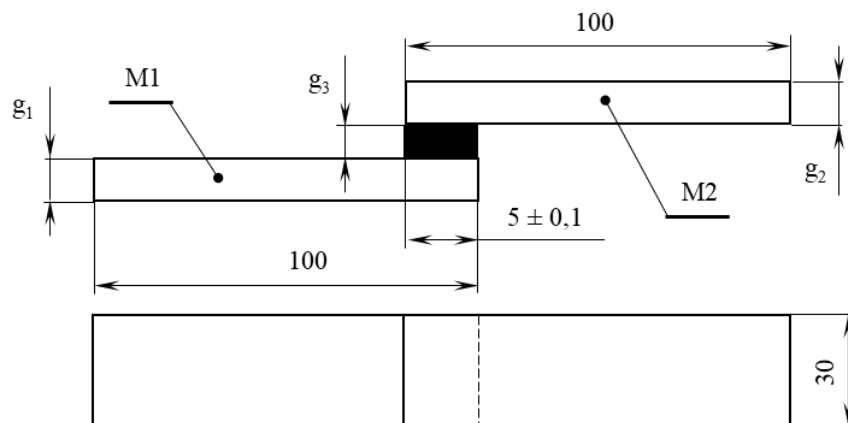
Badania zakładkowych połączeń klejonych zrealizowano z zastosowaniem próbek wykonanych na podstawie normy PN-EN 1465-2009 [N4] (Rys. 5.1). Do wykonania próbek użyto płaskowników ze stali 41Cr4 (poddanej obróbce cieplnej do twardości 48HRC) i stopu aluminium AW-5754 o różnych grubościach. Do wykonywania połączeń klejonych użyto kleju Multibond-5824 [W6]. Jest on dwuskładnikowym klejem konstrukcyjnym w postaci niespływającej pasty, mieszanym w proporcji 1:1, wyprodukowanym na bazie żywic metakrylowych (MMA). Jest klejem stosowanym do łączenia następujących materiałów takich jak: metale (stal, stopy aluminium), ceramika, szkło, drewno, kamień, beton, tworzywo sztuczne, a w szczególności ABS, PMMA (plexi), PC, PCV, włókna szklanego itp. Multibond-5824 jest przeznaczony do pracy w warunkach obciążeń statycznych i zmiennych. Jest odporny na działanie wybranych związków chemicznych spotykanych podczas eksploatacji maszyn oraz na zmienny zakres temperatur. Podstawowe właściwości kleju są następujące [W6]:

- a) grubość spoiny klejonej: < 5 mm,
- b) twardość: 75 ShD,
- c) wytrzymałość na ścinanie z rozciąganiem (ISO EN 9142: utwardzanie w temp.+23°C):
 - stal: < 30 MPa,
 - aluminium 6060: < 27 MPa,
 - PC: < 13 MPa,
 - ABS: < 8 MPa,
- d) odporność na oddzieranie (ISO4578): $6 \div 10$ N/mm,
- e) udarność: $10 \div 12$ kJ/m²,
- f) rozciąganie do zerwania: 10%,
- g) skurcz po utwardzeniu: < 4%.

Czynnikami zmiennymi w badaniach zakładkowych próbek klejonych były:

- a) grubość warstwy kleju g_3 : 2 mm, 3 mm, 4 mm,
- b) grubość płaskownika g_2 : 2 mm, 4 mm, 6 mm,
- c) rodzaj materiału na elementy próbki: stal 41Cr4, stop AW-5754.

Szczegółowy program badań przedstawiono w tabeli 5.1.



Rys. 5.1. Wymiary próbki zakładkowego połączenia klejonego zgodnie z PN-EN 1465-2009 [N4]

Tabela 5.1. Program badań zakładkowych połączeń klejonych

Lp.	Materiały i ich grubości					Oznaczenie próbki		
	Element nr 1 (M1)		Element nr 2 (M2)		Klej Multibond-5824			
	Materiał	g ₁	Materiał	g ₂	g ₃			
	---	mm	---	mm	mm			
1	Stal 41Cr4	4	Stal 41Cr4	2	2	1C4_2C2_K2		
2				2	3	1C4_2C2_K3		
3				2	4	1C4_2C2_K4		
4				4	2	1C4_2C4_K2		
5				4	3	1C4_2C4_K3		
6				4	4	1C4_2C4_K4		
7				6	2	1C4_2C6_K2		
8				6	3	1C4_2C6_K3		
9				6	4	1C4_2C6_K4		
10			Stop AW-5754	4	Stal 41Cr4	2	2	1C4_2A2_K2
11						2	3	1C4_2A2_K3
12						2	4	1C4_2A2_K4
13						4	2	1C4_2A4_K2
14						4	3	1C4_2A4_K3
15						4	4	1C4_2A4_K4
16						6	2	1C4_2A6_K2
17						6	3	1C4_2A6_K3
18						6	4	1C4_2A6_K4

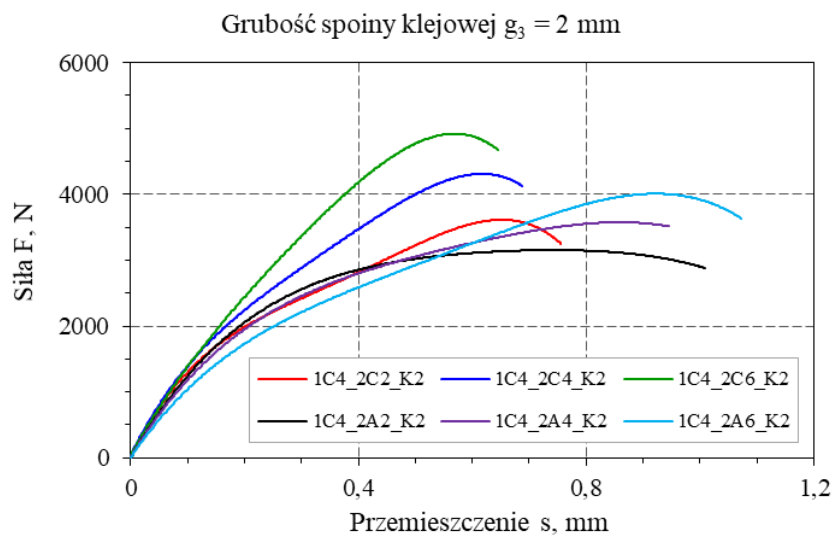
Jednym z czynników istotnie wpływającym na wytrzymałość i trwałość zmęczeniową połączeń klejonych jest metoda przygotowania powierzchni [50, 107, 27]. Powierzchnie elementów użytych do wykonania próbek zakładkowych przygotowano według wytycznych normy PN-EN 13887:2005 [N2]. Pierwszą operacją technologiczną obróbki płaskowników była obróbka strumieniowo-ścierna na sucho elektrokorundem o wielkości ziaren 80 μm . Kolejną operacją było odtłuszczenie acetonem (metodą zanurzeniową) obrobionej mechanicznie powierzchni powtarzane trzykrotnie. Trzecią operacją było przecieranie powierzchni rozpuszczalnikiem, którą również powtarzano trzykrotnie. Średnia wartość chropowatości powierzchni po wykonanej obróbce wynosiła: dla stali 41Cr4 – $R_a = 1,83 \mu\text{m}$, dla stopu aluminium AW-5754 – $R_a = 3,71 \mu\text{m}$.

Próbki zakładkowe wykonywano z użyciem przyrządów zapewniających powtarzalne warunki klejenia. Proces klejenia realizowano z zachowaniem reżimów technologicznych pozwalających na uzyskanie powtarzalnych próbek pod względem geometrycznym. Do badań przyjęto próbki o powtarzalnych wymiarach i małych odchyłkach równoległości sklejanego płaskownika. Usunięto z nich mechanicznie wypłytki kleju. Wszystkie próbki zakwalifikowane do badań sezonowano przez okres 4 tygodni w warunkach pokojowych: temperatura 20°C, wilgotność około 50%.

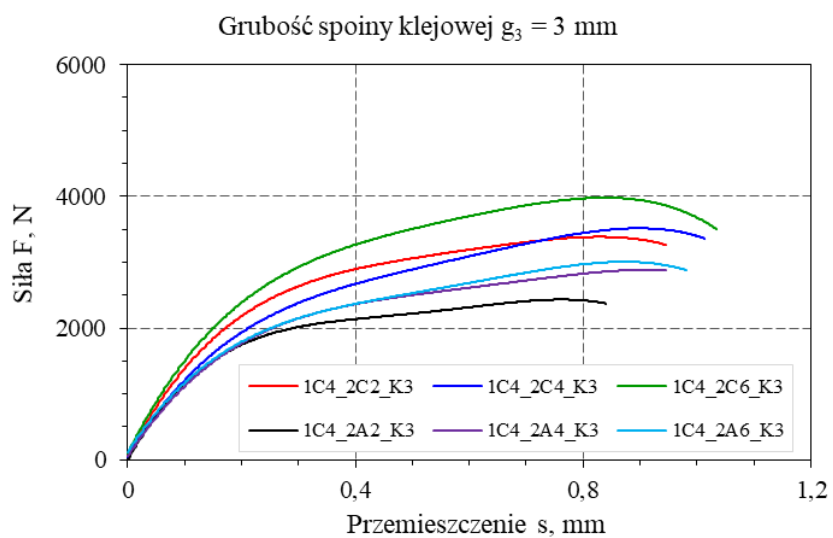
5.1.2. Warunki i wyniki badań

Badania doświadczalne przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej firmy MTS w warunkach laboratoryjnych. Każdą próbkę badawczą montowano w uchwytach maszyny w taki sposób, aby kierunek działania obciążenia przechodził przez środek warstwy kleju. Realizowano to poprzez zastosowanie podkładek dystansowych podczas montażu próbki. Próbki badano w warunkach sterowania przemieszczeniem tłoka maszyny z prędkością wynoszącą $v = 0,05 \text{ mm/s}$. W trakcie próby rejestrowano wartość: siły i przemieszczenia uchwytu maszyny.

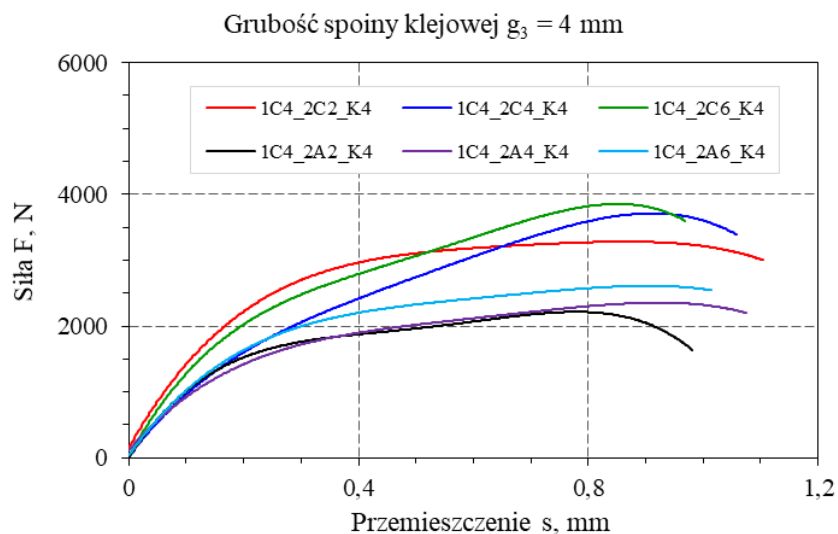
Przeprowadzone badania wytrzymałości statycznej zakładkowych próbek klejonych pozwoliły na wyznaczenie zależności $F = f(s)$ dla każdej badanej próbki. Przykładowe przebiegi zmian $F = f(s)$ dla każdego wariantu próbek przedstawiono na rysunkach 5.2÷5.4.



Rys. 5.2. Przykładowe przebiegi zależności $F = f(s)$ dla zakładkowych próbek klejonych o grubości warstwy kleju $g_3 = 2$ mm



Rys. 5.3. Przykładowe przebiegi zależności $F = f(s)$ dla zakładkowych próbek klejonych o grubości warstwy kleju $g_3 = 3$ mm



Rys. 5.4. Przykładowe przebiegi zależności $F = f(s)$ dla zakładkowych próbek klejonych o grubości warstwy kleju $g_3 = 4 \text{ mm}$

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wyznaczono wartości sił niszczących F_{\max} zakładkowe połączenie klejone, które przedstawiono w tabeli 5.2. Zawarte w tabeli dane wykorzystano do obliczeń średniej wytrzymałości na ścinanie R_t z zależności:

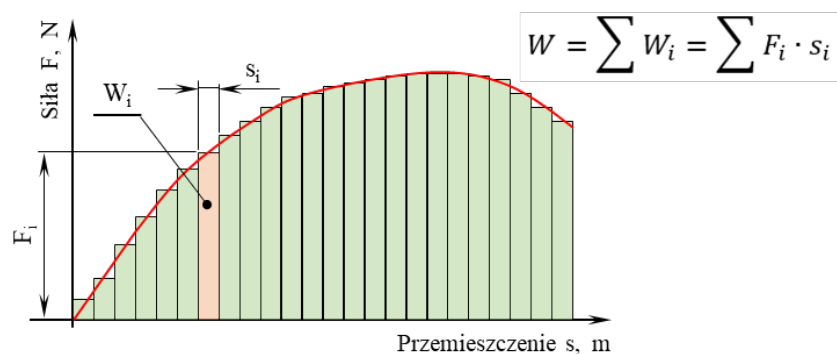
$$R_t = \frac{F_{\max}}{A} = \frac{F_{\max}}{b \cdot l} \quad (5.1)$$

gdzie:

- F_{\max} – maksymalna siła obciążająca połączenie,
- A – pole powierzchni złącza,
- b – szerokość spoiny klejonej (szerokość próbki $b = 30 \text{ mm}$),
- l – długość spoiny klejonej ($l = 5 \text{ mm}$).

Ocena postaci zniszczonych zakładkowych próbek klejonych wykazała, że próbki przyjęte do badań posiadały uszkodzenia warstwy kleju typu kohezyjnego lub kohezyjno-adhezyjnego.

Uzyskane w wyniku badań przebiegi zależności $F = f(s)$ dla zakładkowych próbek klejonych pozwoliły na wyznaczenie pracy W potrzebnej do ich uszkodzenia. Metodę wyznaczania pracy W przedstawiono na rysunku 5.5. Wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 5.3.



Rys. 5.5. Schemat wyznaczenia pracy W prowadzącej do zniszczenia próbki

Tabela 5.2. Zestawienie wartości maksymalnych sił niszczących F_{max} zakładkowych połączeń klejonych

Lp.	Oznaczenie próbki	Siła niszcząca połączenie F_{max} , kN					Wartość F_{max} śr kN	Odchyl. stand. kN	R_t MPa
		I	II	III	IV	V			
1	1C4_2C2_K2	3,19	3,45	3,61	3,84	3,95	3,608	0,305	24,1
2	1C4_2C2_K3	3,66	3,38	3,43	3,33	3,32	3,425	0,141	22,8
3	1C4_2C2_K4	3,02	3,16	3,62	3,28	3,50	3,315	0,243	22,1
4	1C4_2C4_K2	4,03	4,31	4,52	4,49	4,19	4,308	0,203	28,7
5	1C4_2C4_K3	3,81	3,77	3,36	3,69	3,52	3,629	0,189	24,2
6	1C4_2C4_K4	3,70	3,42	3,71	3,09	3,41	3,465	0,255	23,1
7	1C4_2C6_K2	4,76	4,49	5,14	4,92	5,06	4,874	0,259	32,5
8	1C4_2C6_K3	3,98	4,47	3,94	3,81	3,83	4,003	0,268	26,7
9	1C4_2C6_K4	3,61	3,72	3,85	3,88	4,01	3,814	0,152	25,4
10	1C4_2A2_K2	3,15	2,78	2,83	3,22	3,00	2,998	0,192	20,0
11	1C4_2A2_K3	2,38	2,64	2,79	2,60	2,43	2,570	0,165	17,1
12	1C4_2A2_K4	2,54	2,54	2,22	2,27	2,24	2,362	0,162	15,7
13	1C4_2A4_K2	3,39	3,58	3,51	3,67	3,47	3,521	0,105	23,5
14	1C4_2A4_K3	3,17	3,08	2,85	2,89	3,04	3,004	0,133	20,0
15	1C4_2A4_K4	2,36	2,44	2,75	2,60	2,50	2,529	0,152	16,9
16	1C4_2A6_K2	3,55	3,80	3,95	3,57	4,01	3,775	0,213	25,2
17	1C4_2A6_K3	3,01	3,08	2,74	3,25	3,35	3,084	0,238	20,6
18	1C4_2A6_K4	2,40	2,61	2,39	2,47	2,93	2,561	0,224	17,1

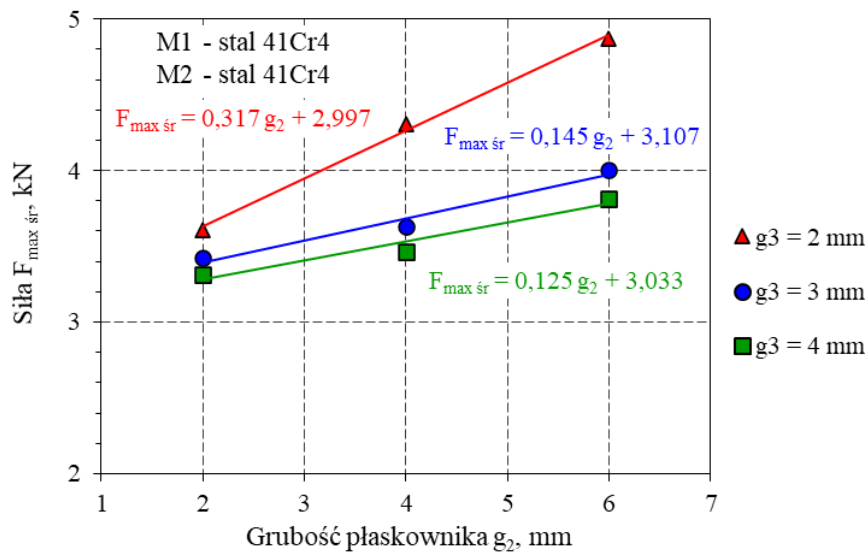
Tabela 5.3. Zestawienie wartości pracy W dla zakładkowych połączeń klejonych

Lp.	Oznaczenie próbki	Praca W, J					Wartość W_{sr}	Odchyl. stand.
		I	II	III	IV	V	J	J
1	1C4_2C2_K2	2,45	2,40	1,92	1,84	1,75	2,07	0,33
2	1C4_2C2_K3	1,81	2,54	1,65	2,08	1,65	1,95	0,37
3	1C4_2C2_K4	1,60	1,44	1,43	3,04	1,63	1,83	0,69
4	1C4_2C4_K2	2,90	2,00	2,11	2,60	2,62	2,45	0,38
5	1C4_2C4_K3	2,75	2,20	2,10	1,73	2,67	2,29	0,42
6	1C4_2C4_K4	1,75	1,90	2,51	1,83	1,93	1,98	0,30
7	1C4_2C6_K2	3,25	2,80	2,14	2,10	3,20	2,70	0,56
8	1C4_2C6_K3	3,24	2,28	2,09	2,10	2,38	2,42	0,48
9	1C4_2C6_K4	1,76	3,12	2,39	1,73	2,47	2,29	0,58
10	1C4_2A2_K2	2,60	1,71	1,53	1,51	1,55	1,78	0,47
11	1C4_2A2_K3	1,26	1,31	1,23	1,35	1,63	1,36	0,16
12	1C4_2A2_K4	1,08	1,23	1,73	1,13	1,19	1,27	0,26
13	1C4_2A4_K2	1,86	2,52	1,81	1,99	1,90	2,02	0,29
14	1C4_2A4_K3	1,41	1,36	1,56	2,46	1,54	1,67	0,45
15	1C4_2A4_K4	2,00	1,28	1,24	1,38	1,46	1,47	0,31
16	1C4_2A6_K2	1,90	2,09	2,03	1,98	3,00	2,20	0,46
17	1C4_2A6_K3	2,26	1,98	1,85	1,79	1,93	1,96	0,18
18	1C4_2A6_K4	1,46	2,10	1,31	1,30	1,48	1,53	0,33

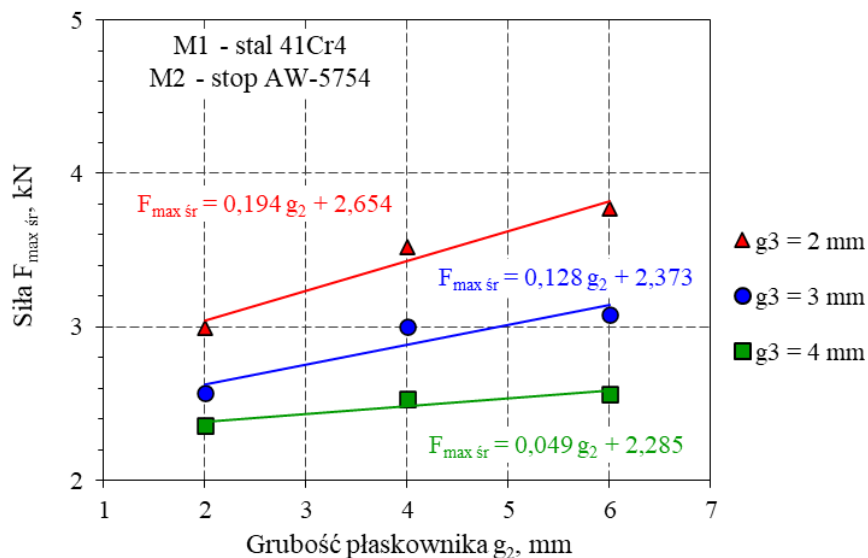
5.1.3. Analiza wyników badań zakładkowych próbek klejonych

Na podstawie wartości $F_{\text{max sr}}$ zamieszczonych w tabeli 5.2, opracowano zależności:

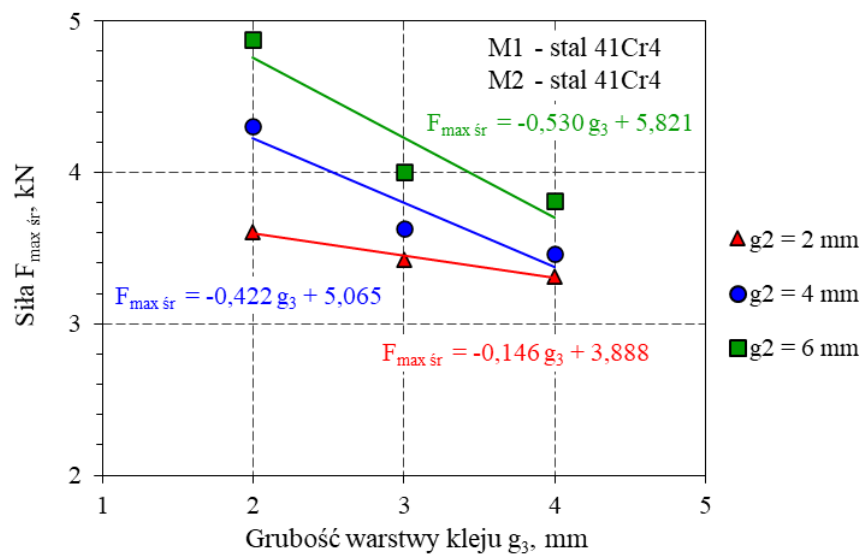
- $F_{\text{max sr}} = f(g_2)$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 w próbkach zakładkowych wykonanych w całości ze stali 41Cr4 (rys. 5.6),
- $F_{\text{max sr}} = f(g_2)$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 w próbkach zakładkowych wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754 (rys. 5.7),
- $F_{\text{max sr}} = f(g_3)$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach zakładkowych wykonanych w całości ze stali 41Cr4 (rys. 5.8),
- $F_{\text{max sr}} = f(g_3)$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach zakładkowych wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754 (rys. 5.9).



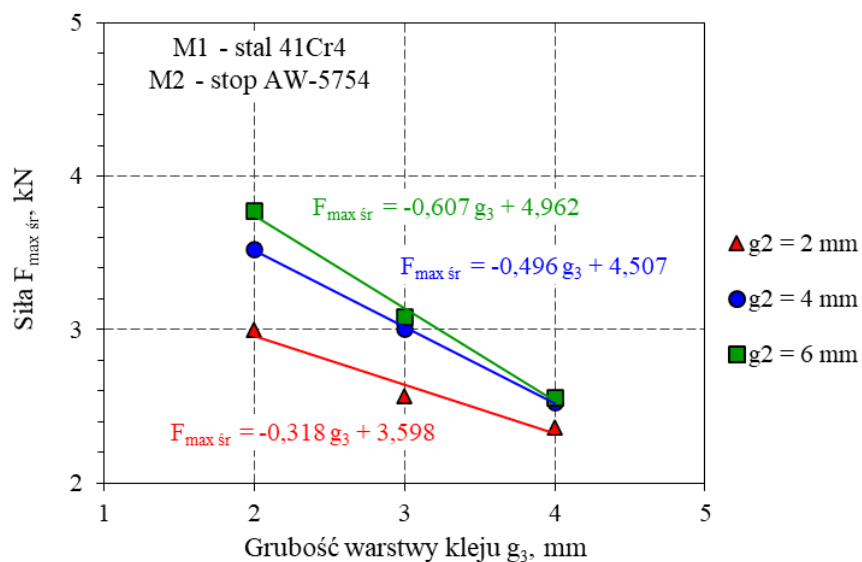
Rys. 5.6. Zależność $F_{\max \text{ śr}} = f(g_2)$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 w próbkach zakładkowych wykonanych w całości ze stali 41Cr4



Rys. 5.7. Zależność $F_{\max \text{ śr}} = f(g_2)$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 w próbkach zakładkowych wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754



Rys. 5.8. Zależność $F_{\max \text{ śr}} = f(g_3)$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach zakładkowych wykonanych w całości ze stali 41Cr4



Rys. 5.9. Zależność $F_{\max \text{ śr}} = f(g_3)$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach zakładkowych wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754

Wyniki pomiarów zamieszczone na rysunkach 5.6 ÷ 5.9 aproksymowano funkcją liniową. Linie aproksymacyjne opisano równaniami, dla których wartości współczynników kierunkowych i wartości wyrazów wolnych zamieszczono w tabeli 5.4. Równanie opisujące zależność $F_{\max \text{ sr}} = f(g_2)$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 ma postać:

$$F_{\max \text{ sr}} = a \cdot g_2 + b, \quad (5.3)$$

natomiast dla zależności $F_{\max \text{ sr}} = f(g_3)$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach zakładkowych wynosi:

$$F_{\max \text{ sr}} = a \cdot g_3 + b \quad (5.4)$$

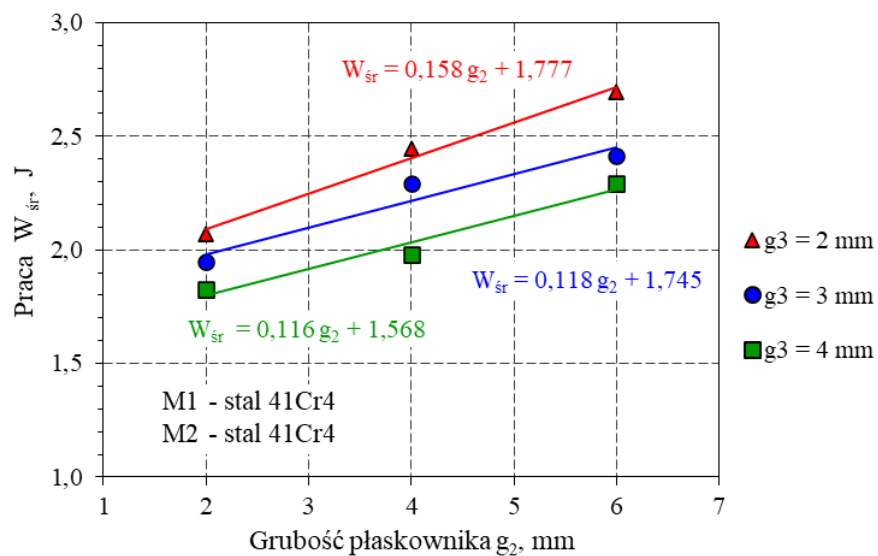
Tabela 5.4. Zestawienie wartości współczynników kierunkowych a i wartości wyrazów wolnych b równań (5.3) i (5.4)

Typ próbki	Grubość warstwy kleju g_3	Zależność $F_{\max \text{ sr}} = f(g_2)$		Grubość płaskownika g_2	Zależność $F_{\max \text{ sr}} = f(g_3)$	
		a	b		a	b
Typ I M1 – 41Cr4 M2 – 41Cr4	2 mm	0,317	2,997	2 mm	-0,146	3,888
	3 mm	0,145	3,107	4 mm	-0,422	5,065
	4 mm	0,125	3,033	6 mm	-0,530	5,821
Typ II M1 – 41Cr4 M2 – AW-5754	2 mm	0,194	2,654	2 mm	-0,318	3,598
	3 mm	0,128	2,373	4 mm	-0,496	4,507
	4 mm	0,049	2,285	6 mm	-0,607	4,962

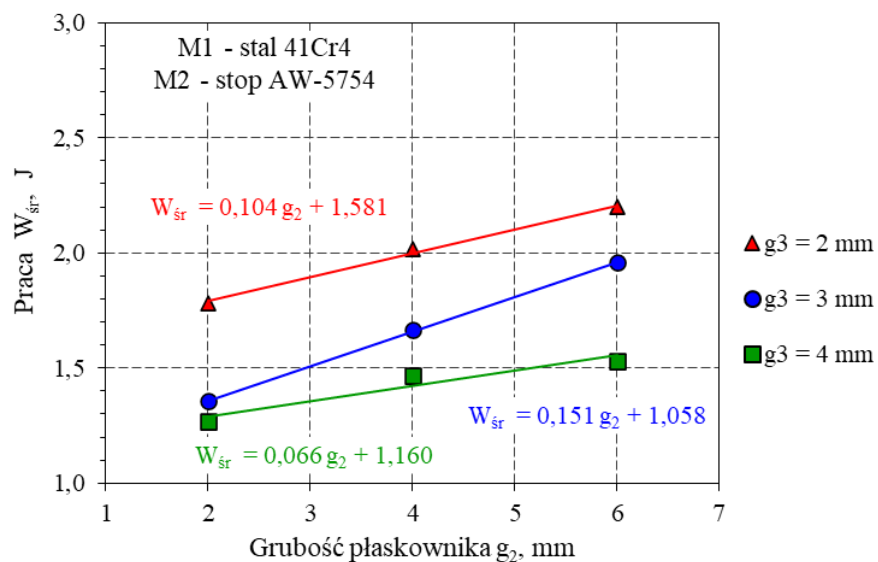
Na podstawie wartości pracy W_{sr} , przedstawionych w tabeli 5.3, opracowano zależności:

- $W_{\text{sr}} = f(g_2)$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 w próbkach zakładkowych wykonanych w całości ze stali 41Cr4 (rys. 5.10),
- $W_{\text{sr}} = f(g_2)$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 w próbkach zakładkowych wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754 (rys. 5.11),
- $W_{\text{sr}} = f(g_3)$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach zakładkowych wykonanych w całości ze stali 41Cr4 (rys. 5.12),
- $W_{\text{sr}} = f(g_3)$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach zakładkowych wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754 (rys. 5.13).

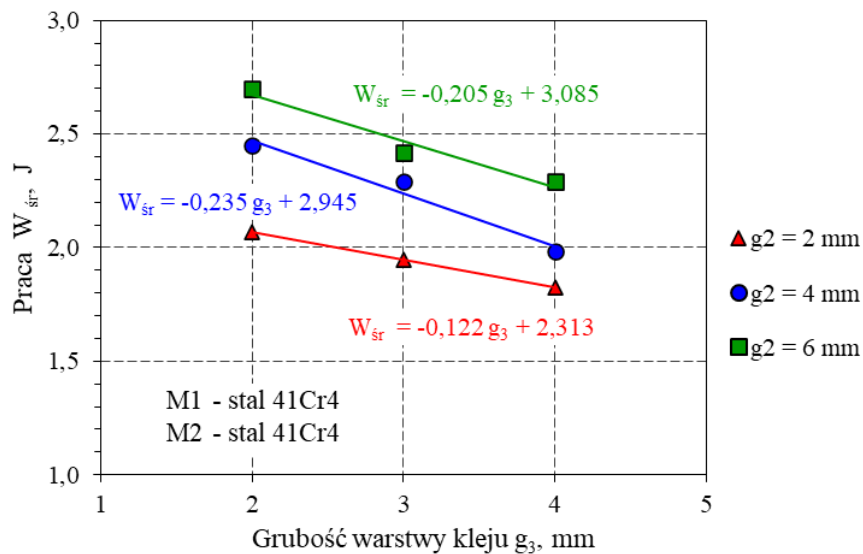
Wyniki obliczeń zamieszczone na rysunkach 5.10 ÷ 5.13 aproksymowano funkcją liniową. Linie aproksymacyjne opisano równaniami, dla których wartości współczynników kierunkowych i wartości wyrazów wolnych zamieszczono w tabeli 5.5.



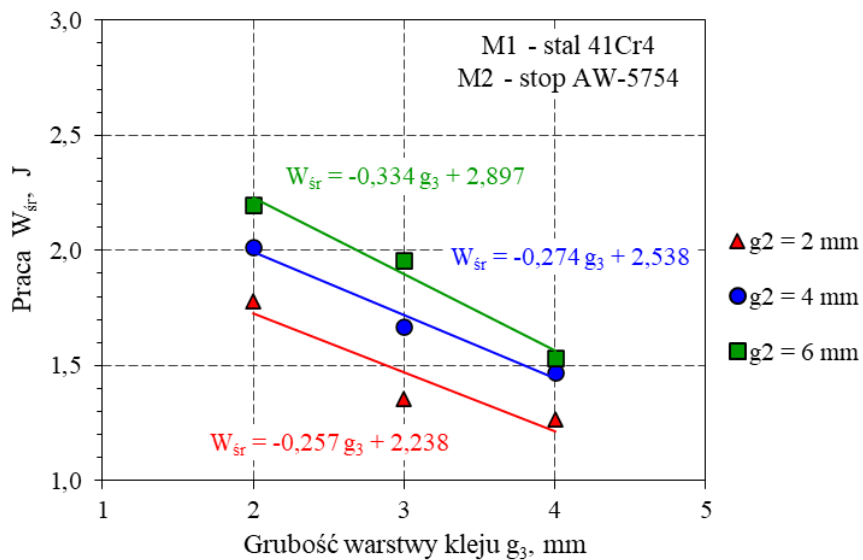
Rys. 5.10. Zależność $W_{sr} = f(g_2)$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 w próbkach zakładkowych wykonanych w całości ze stali 41Cr4



Rys. 5.11. Zależność $W_{sr} = f(g_2)$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 w próbkach zakładkowych wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754



Rys. 5.12. Zależność $W_{sr} = f(g_3)$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach zakładkowych wykonanych w całości ze stali 41Cr4



Rys. 5.13. Zależność $W_{sr} = f(g_3)$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach zakładkowych wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754

Równanie opisujące zależność $W_{sr} = f(g_2)$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 ma postać:

$$W_{sr} = a \cdot g_2 + b, \quad (5.5)$$

natomiast dla zależności $W_{sr} = f(g_3)$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach zakładkowych wynosi:

$$W_{sr} = a \cdot g_3 + b \quad (5.6)$$

Tabela 5.5. Zestawienie wartości współczynników kierunkowych a i wartości wyrazów wolnych b równań (5.5) i (5.6)

Typ próbki	Grubość warstwy kleju g_3	Zależność $W_{sr} = f(g_2)$		Grubości płaskownika g_2	Zależność $W_{sr} = f(g_3)$	
		a	b		a	b
Typ I M1 – 41Cr4 M2 – 41Cr4	2 mm	0,158	1,777	2 mm	-0,122	2,313
	3 mm	0,118	1,745	4 mm	-0,235	2,945
	4 mm	0,116	1,568	6 mm	-0,205	3,085
Typ II M1 – 41Cr4 M2 – AW-5754	2 mm	0,104	1,581	2 mm	-0,257	2,238
	3 mm	0,151	1,058	4 mm	-0,274	2,538
	4 mm	0,066	1,160	6 mm	-0,334	2,897

Analiza wyników badań zakładkowych próbek klejonych pozwala na sformułowanie następujących spostrzeżeń:

- na wytrzymałość zakładkowych próbek klejonych wpływa: grubość warstwy kleju g_3 oraz sztywność łączonych elementów (wynikająca z grubości płaskownika g_2 i zastosowanego materiału),
- najwyższe wartości siły $F_{max\ sr}$ uzyskano dla grubości warstwy kleju $g_3 = 2$ mm oraz grubości płaskownika $g_2 = 6$ mm dla każdego typu próbek zakładkowych, co jest związane z wysoką sztywnością łączonych elementów wpływającą na ograniczenie siły odrywającej podczas obciążenia,
- wpływ sztywności łączonych elementów na wartość $F_{max\ sr}$ jest zauważalny, gdy porównamy wyniki badań uzyskane dla próbek typ I (M1-stal 41Cr4 – M2-stal 41Cr4) z wynikami uzyskanymi dla próbek typu II (M1-stal 41Cr4 – M2-stop AW-5754), co przedstawiono w tabeli 5.6,
- najniższe wartości siły $F_{max\ sr}$ uzyskano dla grubości warstwy kleju $g_3 = 4$ mm oraz grubości płaskownika $g_2 = 2$ mm dla każdego typu próbek zakładkowych, co jest związane z najniższą sztywnością

łączonych elementów wpływającą na możliwość wystąpienia siły odrywającej o najwyższej wartości,

- e) wartości siły $F_{\max \text{ śr}}$ dla zakładkowych próbek klejonych o grubości warstwy kleju $g_3 = 3$ mm mieszczą się pomiędzy wynikami uzyskanymi dla $g_3 = 2$ mm a $g_3 = 4$ mm,
- f) różnice wartości $F_{\max \text{ śr}}$ wynikające ze zmiany sztywności próbki spowodowanej tylko zmianą grubości płaskownika g_2 (tj. dla tego samego typu próbki) przedstawiono w tabeli 5.7,
- g) wyznaczone wartości różnic pomiędzy wynikami $F_{\max \text{ śr}}$ dla określonych typów próbek wykazały mniejsze zakresy zmian dla próbek typu I, co jest związane z większą sztywnością płaskownika g_2 wykonanego ze stali 41Cr4 w porównaniu do płaskownika ze stopu AW-5754,
- h) najwyższe wartości pracy $W_{\text{śr}}$ uzyskano dla grubości warstwy kleju $g_3 = 2$ mm oraz grubości płaskownika $g_2 = 6$ mm dla każdego typu próbek zakładkowych, co jest zbieżne ze sformułowanym spostrzeżeniem dla analizy wyników siły $F_{\max \text{ śr}}$,
- i) analiza skrajnych wartości wyników badań wykazała:
 - porównując wyniki dla typu próbek I i II (tabela 5.6):
 - dla grubości warstwy kleju $g_3 = 2$ mm uzyskano wartości różnicy w ujęciu siły $\delta_F = 20,3\% \div 29,1\%$, a w ujęciu pracy $\delta_W = 16,3\% \div 22,7\%$,
 - dla grubości warstwy kleju $g_3 = 4$ mm uzyskano wartości różnicy w ujęciu siły $\delta_F = 37,0\% \div 48,9\%$, a w ujęciu pracy $\delta_W = 34,9\% \div 49,8\%$,
 - porównując wyniki dla grubości warstwy kleju $g_3 = 2$ mm i $g_3 = 4$ mm (tabela 5.7):
 - dla próbek typu I uzyskano wartości różnicy w ujęciu siły $\delta_F = 8,8\% \div 27,8\%$, a w ujęciu pracy $\delta_W = 13,4\% \div 23,5\%$,
 - dla próbek typu II uzyskano wartości różnicy w ujęciu siły $\delta_F = 26,9\% \div 47,4\%$, a w ujęciu pracy $\delta_W = 37,2\% \div 43,6\%$,
 - porównując wyniki dla grubości płaskownika $g_2 = 2$ mm i $g_2 = 6$ mm (tabela 5.8):
 - dla próbek typu I uzyskano wartości różnicy w ujęciu siły $\delta_F = 15,0\% \div 35,1\%$, a w ujęciu pracy $\delta_W = 24,2\% \div 30,2\%$,
 - dla próbek typu II uzyskano wartości różnicy w ujęciu siły $\delta_F = 8,4\% \div 25,9\%$, a w ujęciu pracy $\delta_W = 20,7\% \div 44,4\%$,

j) dla większości analizowanych przypadków mniejszy zakres zmian wartości różnic uzyskano w ujęciu pracy niszczącej W_{sr} .

Tabela 5.6. Zestawienie wartości różnic wyników badań dla przyjętych typów próbek

Cechy próbki		Wyniki badań				Różnice wartości w ujęciu	
		Próbka typ I		Próbka typ II		$((A/C)-1)*100$	$((B/D)-1)*100$
		Kol. A	Kol. B	Kol. C	Kol. D		
g_3	g_2	$F_{\text{max sr}}$	W_{sr}	$F_{\text{max sr}}$	W_{sr}	Siły δ_F	Pracy δ_W
mm	mm	kN	J	kN	J	%	%
2	2	3,608	2,071	2,998	1,781	20,3	16,3
2	4	4,308	2,447	3,521	2,017	22,3	21,4
2	6	4,874	2,697	3,775	2,198	29,1	22,7
4	2	3,315	1,826	2,362	1,268	40,4	44,0
4	4	3,465	1,982	2,529	1,469	37,0	34,9
4	6	3,814	2,294	2,561	1,531	48,9	49,8

Tabela 5.7. Zestawienie wartości różnic wyników badań dla grubości warstwy kleju $g_3 = 2 \text{ mm}$ i $g_3 = 4 \text{ mm}$

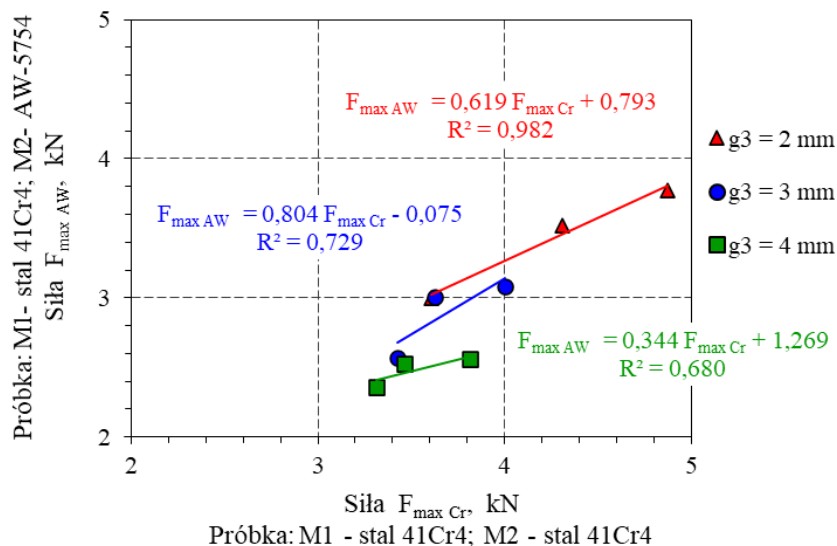
Próbka	Grub. g_2	Wyniki badań				Różnice wartości w ujęciu	
		$g_3 = 2 \text{ mm}$		$g_3 = 4 \text{ mm}$		$((A/C)-1)*100$	$((B/D)-1)*100$
		Kol. A	Kol. B	Kol. C	Kol. D		
	mm	$F_{\text{max sr}}$	W_{sr}	$F_{\text{max sr}}$	W_{sr}	Siły δ_F	Pracy δ_W
	mm	kN	J	kN	J	%	%
Typ I	2	3,608	2,071	3,315	1,826	8,8	13,4
	4	4,308	2,447	3,465	1,982	24,3	23,5
	6	4,874	2,697	3,814	2,294	27,8	17,6
Typ II	2	2,998	1,781	2,362	1,268	26,9	40,5
	4	3,521	2,017	2,529	1,469	39,2	37,2
	6	3,775	2,198	2,561	1,531	47,4	43,6

Tabela 5.8. Zestawienie wartości różnic wyników badań dla grubości płaskownika $g_2 = 2 \text{ mm}$ i $g_2 = 6 \text{ mm}$

Próbka	Grub. g_3	Wyniki badań				Różnice wartości w ujęciu	
		$g_2 = 6 \text{ mm}$		$g_2 = 2 \text{ mm}$		$((A/C)-1)*100$	$((B/D)-1)*100$
		Kol. A	Kol. B	Kol. C	Kol. D		
	mm	$F_{\text{max sr}}$	W_{sr}	$F_{\text{max sr}}$	W_{sr}	Siły δ_F	Pracy δ_W
	mm	kN	J	kN	J	%	%
Typ I	2	4,874	2,697	3,608	2,071	35,1	30,2
	3	4,003	2,416	3,425	1,946	16,9	24,2
	4	3,814	2,294	3,315	1,826	15,0	25,6
Typ II	2	3,775	2,198	2,998	1,781	25,9	23,4
	3	3,084	1,959	2,570	1,356	20,0	44,4
	4	2,561	1,531	2,362	1,268	8,4	20,7

W badaniach doświadczalnych stosowano zakładkowe próbki klejone wykonane w całości ze stali 41Cr4 (typ I) oraz próbki wykonane jednocześnie ze stali 41Cr4 i stopu aluminium AW-5754 (typ II). Wszystkie cechy geometryczne próbek typu I i typu II były takie same. Wskazane założenia pozwoliły na wyznaczenia relacji pomiędzy wynikami uzyskanymi podczas badań dla przyjętych typów próbek.

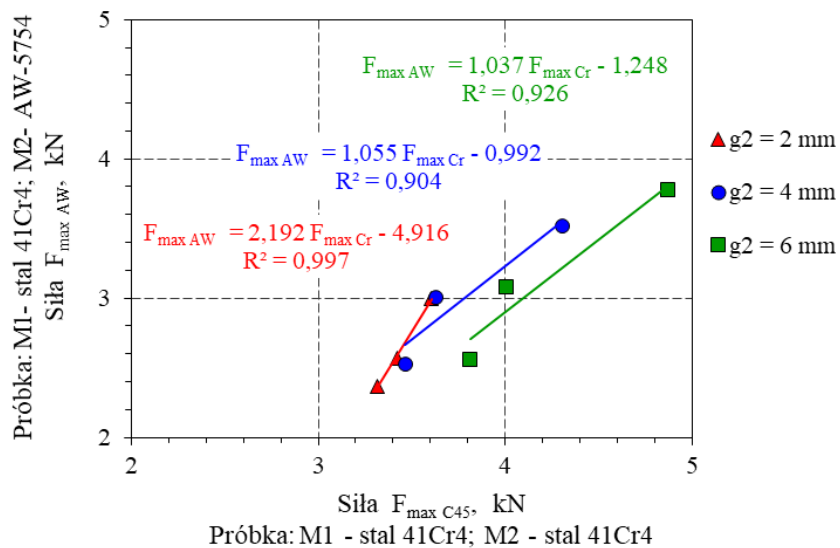
Na rysunku 5.14 przedstawiono zależności $F_{\max AW} = f(F_{\max Cr})$ wyznaczone na podstawie wartości $F_{\max \text{sr}}$ dla przyjętych typów próbek dla stałej grubości warstwy kleju g_3 . Symbolem $F_{\max Cr}$ oznaczono wartości siły uzyskane dla próbek typu I, natomiast symbolem $F_{\max AW}$ oznaczono wartości siły uzyskane dla próbek typu II. Najwyższą korelację wyników badań uzyskano dla grubości warstwy kleju $g_3 = 2$ mm, o czym świadczy współczynnik determinacji $R^2 = 0,982$. Dla grubości warstwy kleju $g_3 = 3$ mm i $g_3 = 4$ mm wartości współczynnika determinacji R^2 są znacząco niższe, co świadczy o niskiej korelacji wyników badań.



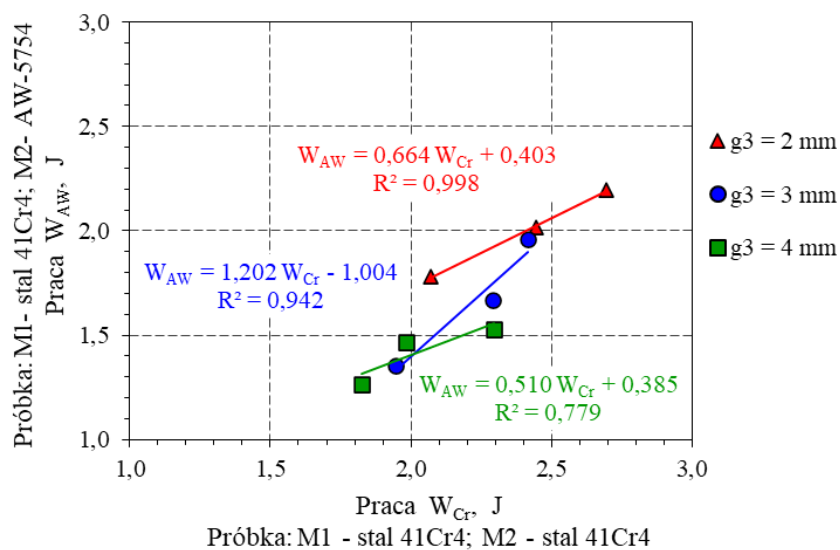
Rys. 5.14. Zależność $F_{\max AW} = f(F_{\max Cr})$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 w próbkach zakładkowych

Rysunek 5.15 przedstawia zależności $F_{\max AW} = f(F_{\max Cr})$ wyznaczone dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach zakładkowych. Analiza ułożenia danych oraz wartości współczynników determinacji R^2 wskazuje na wysoką korelację wyników uzyskanych dla grubości płaskownika $g_2 = 2$ mm, o czym świadczy współczynnik determinacji $R^2 = 0,997$. Dla grubości $g_2 = 4$ mm

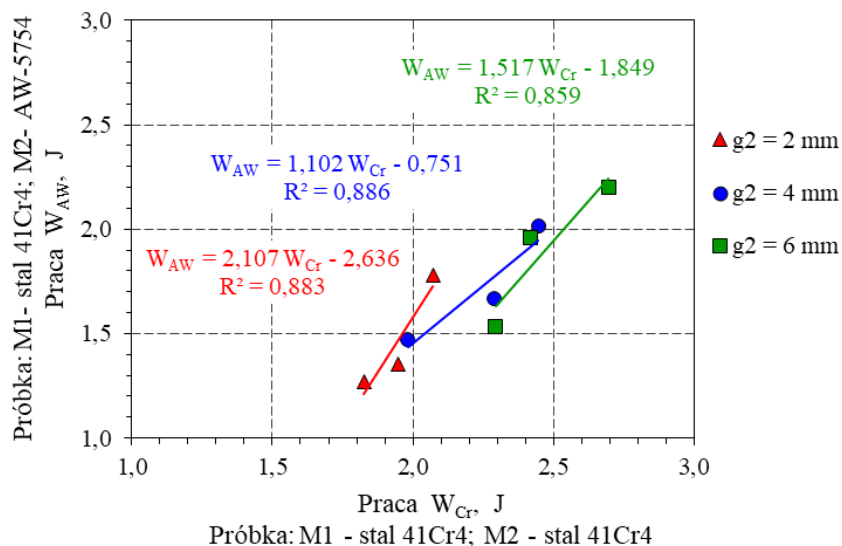
i $g_2 = 6$ mm wartości współczynnika determinacji $R^2 > 0,9$, a linie aproksymacyjne można uznać na równoległe dla analizowanego zakresu sił.



Rys. 5.15. Zależność $F_{max AW} = f(F_{max Cr})$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach zakładkowych



Rys. 5.16. Zależność $W_{AW} = f(W_{Cr})$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 w próbkach zakładkowych



Rys. 5.17. Zależność $W_{AW} = f(W_{Cr})$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach zakładkowych

Na rysunku 5.16 przedstawiono zależności $W_{AW} = f(W_{Cr})$ wyznaczone na podstawie wartości W_{sr} dla przyjętych typów próbek dla stałej grubości warstwy kleju g_3 . Symbolem W_{Cr} oznaczono wartości pracy obliczonej dla próbek typu I, natomiast symbolem W_{AW} oznaczono wartości pracy obliczonej dla próbek typu II. Najwyższą korelację wyników badań uzyskano dla grubości warstwy kleju $g_3 = 2$ mm i $g_3 = 3$ mm, o czym świadczy współczynnik determinacji $R^2 > 0,94$. Dla grubości warstwy kleju $g_3 = 4$ mm wartości współczynnika determinacji $R^2 < 0,9$, co świadczy o niskiej korelacji wyników badań.

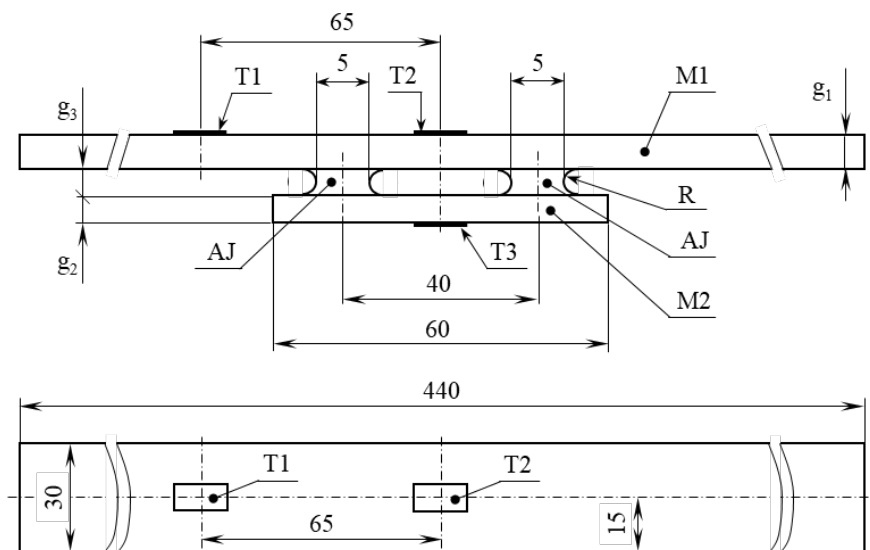
Rysunek 5.17 przedstawia zależności $W_{AW} = f(W_{Cr})$ wyznaczone dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach zakładkowych. Analiza ułożenia danych oraz wartości współczynników determinacji R^2 wskazuje na niską korelację wyników uzyskanych dla wszystkich grubości płaskowników, o czym świadczy współczynnik determinacji $R^2 < 0,9$.

Analiza wyników badań wykazały, że wpływ na wartość pracy niszczonej W_{sr} zakładkowe próbki klejone wpływa: grubość warstwy kleju g_3 , rodzaj materiału płaskownika M2 oraz grubość płaskownika g_2 . Uzyskane wyniki stanowią punkt odniesienia do weryfikacji metody badań wytrzymałości złącza klejonych z zastosowaniem próbek typu sandwich. Analiza ta zostanie przeprowadzona w rozdziale 6 niniejszej pracy.

5.2. Badania złączy klejonych z zastosowaniem próbek typu „sandwich”

5.2.1. Próbką badawcza i program badań

Badania złączy klejonych można przeprowadzać z zastosowaniem próbek typu „sandwich” [P2]. Do wykonania próbek użyto płaskowników ze stali 41Cr4 i stopu aluminium AW-5754 o różnych grubościach. Stal 41Cr4 poddano obróbce cieplnej do twardości 48HRC. Do wykonywania połączeń klejonych użyto kleju Multibond-5824 [W6], tego samego który zastosowano do wykonania zakładkowych próbek klejonych. Postać próbki badawczej przedstawiono na rysunku 5.18. Program badań przedstawiono w tabeli 5.9.



Rys. 5.18. Wymiary geometryczne próbki typu „sandwich”:
M1 – belka górna, M2 – belka dolna, AJ – spoina klejona,
T – tensometr, R – promień krawędzi bocznej spoiny klejonej

W badaniach wytrzymałości połączeń klejonych z zastosowaniem próbek typu „sandwich” przyjęto następujące czynniki:

a) stałe:

- grubość belki g_1 (M1): 4 mm,
- szerokość spoiny klejonej: 5 mm,
- odległość osi spoin klejonych: 40 mm,
- szerokość próbki: 30 mm,

- kształt krawędzi bocznych spoiny klejonej (AJ): wklęsła,
 - promień krawędzi bocznej spoiny klejonej R: 3 mm,
- b) zmienne:
- grubość warstwy kleju (AJ) g_3 : 2 mm, 3 mm, 4 mm,
 - grubość płaskownika (M2) g_2 : 4 mm, 6 mm,
 - rodzaj materiałów na elementy próbki: stal 41Cr4, stop AW-5754.

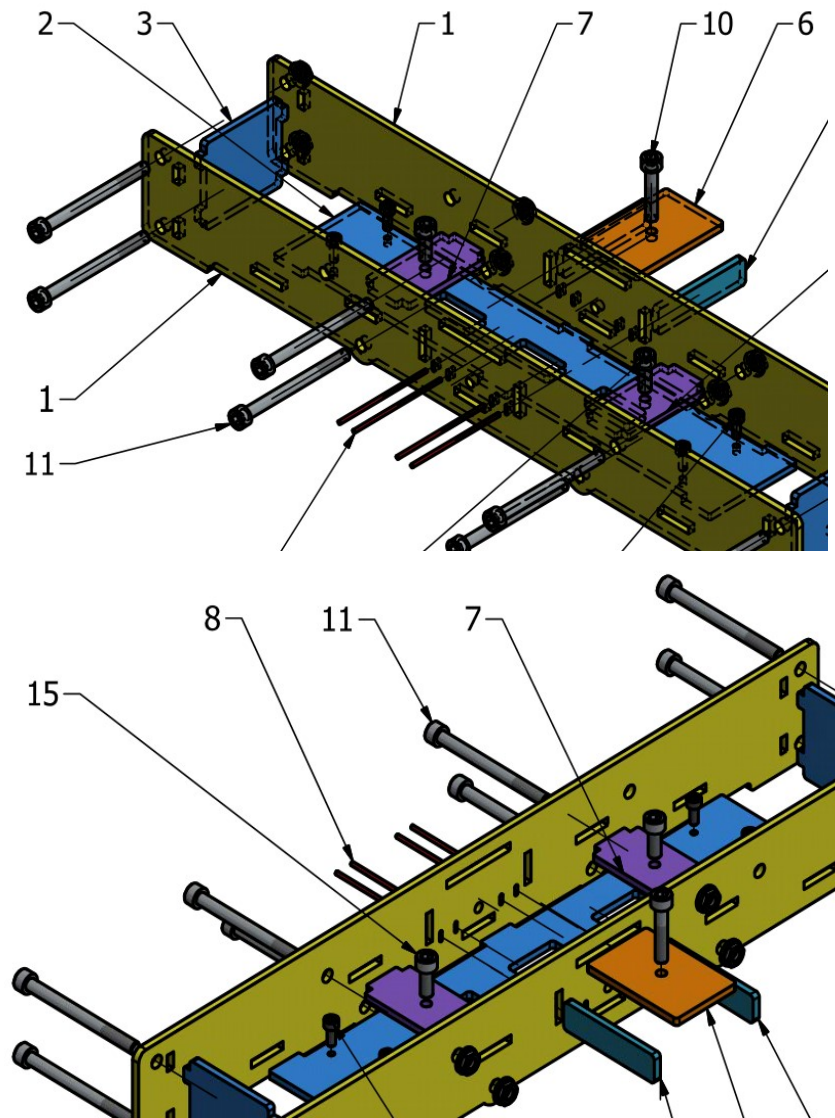
Tabela 5.9. Program badań próbek typu „sandwich”

Lp.	Materiały i ich grubości					Oznaczenie próbki	
	Belka górna (M1)		Belka dolna (M2)		Klej Multibond-5824		
	Materiał	g_1	Materiał	g_2	g_3		
	---	mm	---	mm	mm		
1	Stal 41Cr4	4	Stal 41Cr4	4	2	S-ch_1C4_2C4_K2	
2				4	3	S-ch_1C4_2C4_K3	
3				4	4	S-ch_1C4_2C4_K4	
4				6	2	S-ch_1C4_2C6_K2	
5				6	3	S-ch_1C4_2C6_K3	
6				6	4	S-ch_1C4_2C6_K4	
7		Stop AW-5754			4	2	S-ch_1C4_2A4_K2
8					4	3	S-ch_1C4_2A4_K3
9					4	4	S-ch_1C4_2A4_K4
10					6	2	S-ch_1C4_2A6_K2
11					6	3	S-ch_1C4_2A6_K3
12					6	4	S-ch_1C4_2A6_K4

5.2.2. Metoda przygotowania próbek typu „sandwich”

Technologia przygotowania elementów na próbki typu „sandwich” była analogiczna jak technologia obróbki elementów zastosowanych na zakładkowe próbki klejone. Podstawą przygotowania elementów były wytyczne zawarte w normie PN-EN 13887:2005 [N2]. Pierwszą operacją technologiczną obróbki płaskowników była obróbka strumieniowo-ścierna na sucho elektrokorundem o wielkości ziaren 80 μm . Kolejną operacją było odtłuszczenie acetonem (metodą zanurzeniową) obrobionej mechanicznie powierzchni powtarzaną trzykrotnie. Trzecią operacją było przecieranie powierzchni rozpuszczalnikiem, którą powtarzano trzykrotnie. Średnia wartość chropowatości powierzchni po wykonanej obróbce wynosiła: dla stali 41Cr4 – $R_a = 1,83 \mu\text{m}$, dla stopu aluminium AW-5754 – $R_a = 3,71 \mu\text{m}$.

Przygotowanie elementów (płaskowników: ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754) było pierwszym etapem wykonywania próbek badawczych. W celu zapewnienia geometrycznej powtarzalności próbek zaprojektowano i wykonano przyrząd, który przedstawiono na rysunku 5.19 [P1]. Budowa i zasada działania przyrządu jest przedmiotem zgłoszenia patentowego nr P.432465.



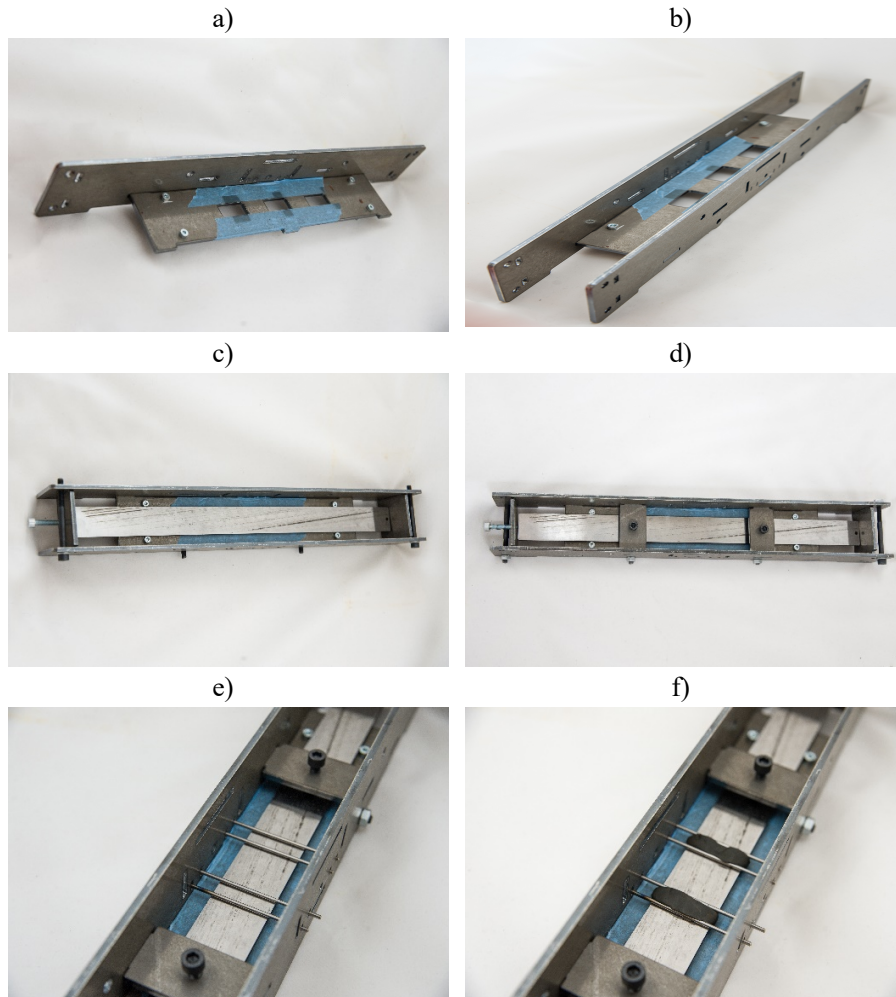
Rys. 5.19. Budowa przyrządu do wykonywania próbek typu „sandwich” [P1]

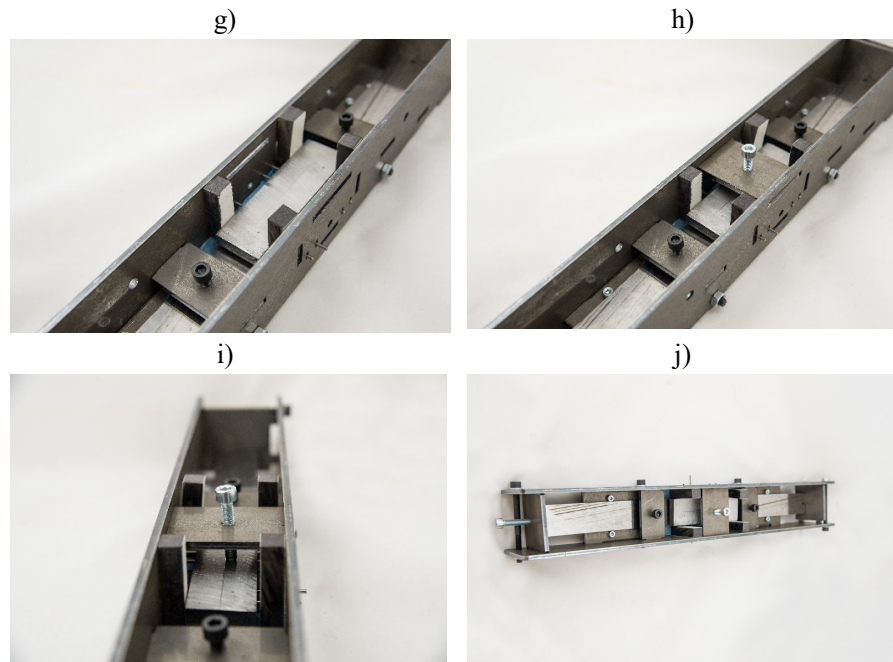
Przyrząd zbudowany jest z płyty bocznej prawej 1 i płyty bocznej lewej 1 połączonych płytą przednią 3, płytą tylną 4, belką I 6, belką II 7 i postawą 2 (rys. 5.19). Wymienione elementy zespolone są wzajemnie połączeniami kształtowymi zapewniającymi ich określone położenie. Utrzymanie wzajemnego położenia elementów realizowane jest za pomocą połączeń śrubowych 11, 12 i 13. Cechy geometryczne płyty bocznej prawej 1 i płyty bocznej lewej 1 są takie same. W płytę tylną 4 wkręcona jest śruba IV, a jej oś położona jest symetrycznie względem płyty bocznej prawej 1 i płyty bocznej lewej 1. W belkę I 6 wkręcona jest śruba I 10, której oś symetrii jest prostopadła do powierzchni podstawy 2. W belkę II 7 wkręcona jest śruba II 15, której oś symetrii jest prostopadła do powierzchni podstawy 2. Do podstawy 2 zamontowano cztery sworznie 9, z których każdy posiada jeden stopień swobody tj. obrót wokół osi pionowej. Sworznie 9 posiada łeb walcowy, którego oś symetrii jest przesunięta względem osi symetrii części walcowej. Sworznie 9 położone są symetrycznie względem osi symetrii przyrządu po dwa z każdej ze stron. W otworach podłużnych wykonanych w płycie bocznej prawej 1 i płycie bocznej lewej 1 zamontowano pręty 8 posiadające dwa stopnie swobody. Wzajemne położenie pary prętów 8 określa wymiar szerokości spoiny, natomiast rozstaw par prętów określa rozstaw spoin na próbce. W płycie bocznej prawej 1 i płycie bocznej lewej 1 wykonano otwory, w których zamontowano zderzaki 5.

Na potrzeby realizacji badań wykonano 30 przyrządów pozwalających w krótkim odstępie czasu (tj. w tych samych warunkach środowiskowych) na wykonanie całej serii jednego typu próbek badawczych. Etapy procesu wykonywania próbki badawczej przedstawiono na rysunku 5.20.

Pierwszym etapem wykonania próbek jest montaż płyt bocznych lewej i prawej 1 z: podstawą 2, płytą przednią 3 i płytą tylną 4 (rys. 5.20.a, rys. 5.20.b, rys. 5.20.c). Następnie na podstawie 2 pomiędzy sworzniami 9 montowana jest belka górna próbki (rys. 5.20.c), po zamontowaniu której pomiędzy płytami bocznymi elementów dwóch belek II 7, połączone kształtowo elementy są łączone za pomocą połączeń śrubowych 11, 12 i 13 (rys. 5.20.d). Po skręceniu głównych elementów konstrukcyjnych przyrządu dokonano ustalenia położenia belki górnej próbki względem: płyty przedniej 3 za pomocą śruby 14 oraz podstawy 2 za pomocą śrub 15 (rys. 5.20.d). Kolejnym krokiem wykonywania próbki jest montaż w otworach płyt bocznych 1 przyrządu prętów 8 (rys. 5.20.e), pomiędzy którymi umieszczono klej (rys. 5.20.f). Następnie na warstwę kleju położono belkę dolną próbki zapewniając jej symetryczne położenie względem osi wzdłużnej i poprzecznej przyrządu (rys. 5.20.g). Docisk belki

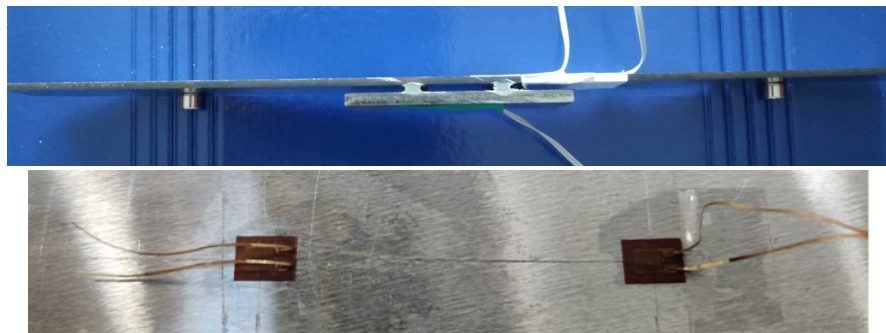
dolnej próbki do belki górnej próbki przez pręty 8 realizowano poprzez śrubę 10 zamontowanej w belce I 6 (rys. 5.20.h, rys. 5.20.i). Zmontowany przyrząd wraz z elementami próbki był sezonowany w stałych warunkach środowiskowych przez 48 godzin. Po wskazanym czasie wykonana grupa próbek była wyjmowana z przyrządów i sezonowana przez kolejne 28 dni. Sezonowanie odbywało się w warunkach pokojowych: temperatura 20°C, wilgotność około 50%. Do badań przyjęto próbki o powtarzalnych wymiarach i małych odchyłkach równoległości sklejanych płaskowników. Mechanicznie usunięto z nich wypływki kleju.





Rys. 5.20. Metoda wykonywania próbki typu „sandwich” z zastosowaniem przyrządu

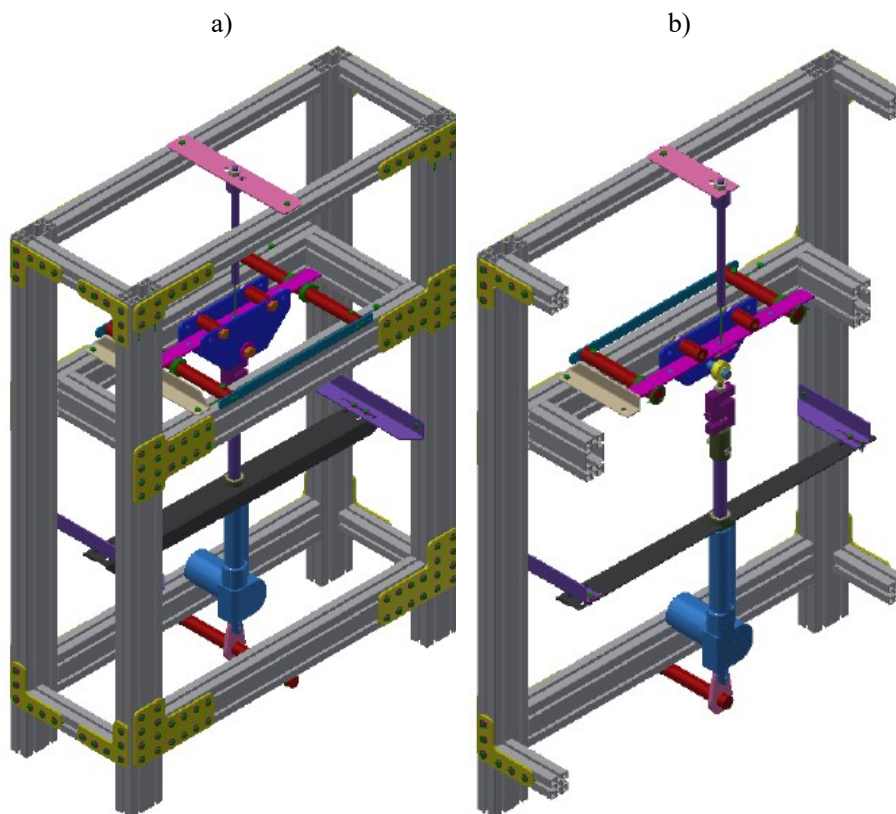
Na wykonane próbki typu sandwich naklejono tensometry oporowe foliowe w miejscach wskazanych na rysunku 5.18. W badaniach zastosowano tensometry firmy Tenmex typu TF-5 o parametrach: $k = 2,19 \pm 0,5\%$, $R = 120,2 \pm 0,2\%$ [W7]. Do precyzyjnego naklejenia tensometrów na próbkach opracowano i wykonano przyrząd wspomagający wskazaną operację. Na budowę i zasadę działania przyrządu uzyskano patent nr Pat.236915 udzielony przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej [P3]. Przykład próbki z naklejonymi tensometrami przedstawiono na rysunku 5.21.



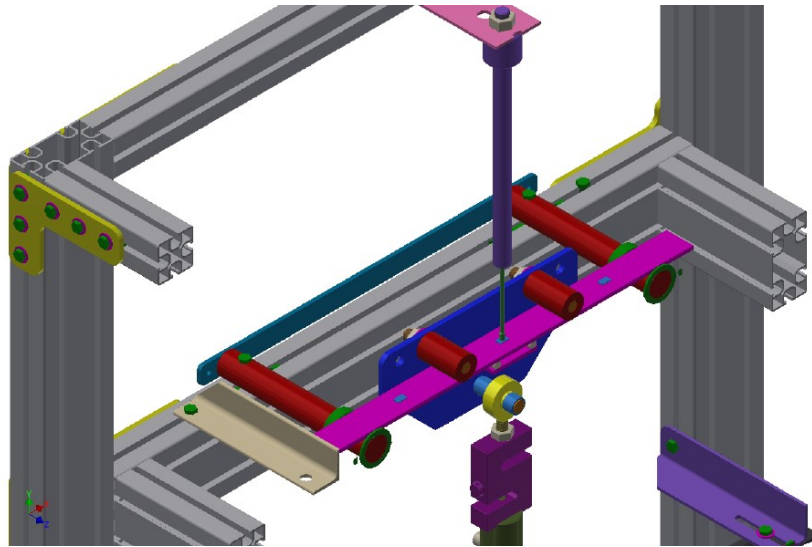
Rys. 5.21. Przykład próbki typu „sandwich” z naklejonymi tensometrami

5.2.3. Stanowisko badawcze

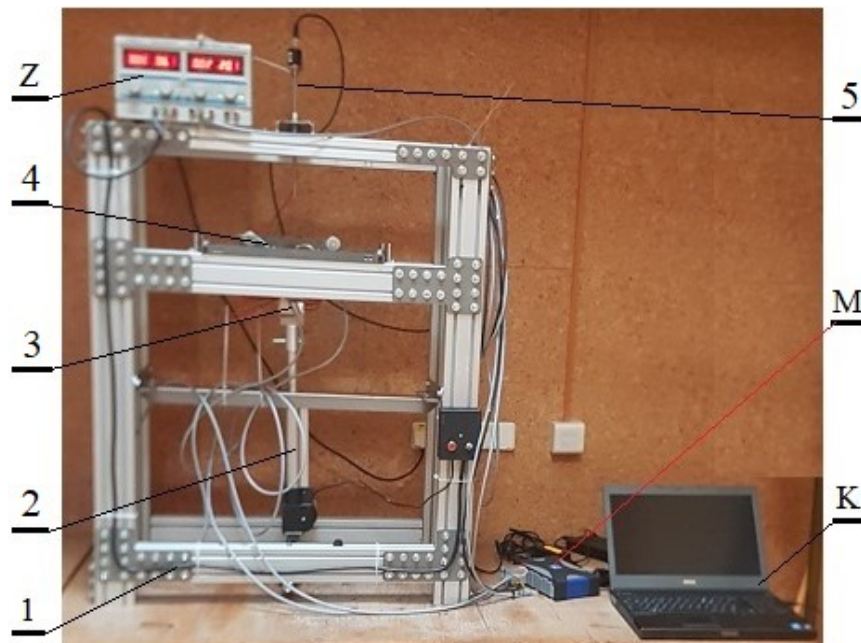
Na potrzeby realizacji badań doświadczalnych zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze, które przedstawiono na rysunkach 5.22 i 5.23. Ramę wykonano z profili aluminiowych 80x40 oraz 40x40, które połączono za pomocą połączeń śrubowych. Próbka badawcza montowana jest na podporach (prętach stalowych o średnicy 25 mm) posiadających możliwość płynnej regulacji rozstawu. Zamontowana na podporach próbka obciążana jest poprzez przyrząd z dwoma prętami o średnicy 25 mm. Do przyrządu zamontowano siłomierz, którego drugi koniec połączono do elektrycznego siłownika liniowego. Siłownik liniowy połączony jest z ramą stanowiska. Przesunięcie tłoczyska siłownika pozwala na obciążenie próbki powodując jej zginanie. Wartość siły obciążającej mierzona jest przez siłomierz. Ugięcie próbki mierzone jest czujnikiem przemieszczeń.



Rys. 5.22. Stanowisko do badań próbek złączy klejonych w warunkach czteropunktowego zginania: a – widok stanowiska, b – przekrój stanowiska



Rys. 5.23. Fragment zespołu obciążającego próbkę badawczą



Rys. 5.24. Budowa stanowiska badawczego: 1 – rama, 2 – silownik elektryczny, 3 – siłomierz, 4 – przyrząd przenoszący obciążenie z silownika na próbkę, 5 – czujnik przemieszczeń, Z – zasilacz, M – wzmacniacz pomiarowy HBM, K – komputer obsługujący program rejestrujący dane

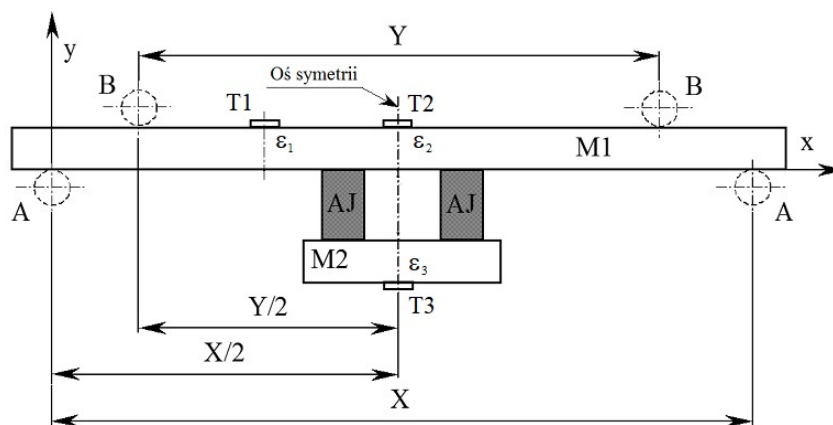
Fizyczną postać stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 5.24. Zadawanie obciążenia realizowano za pomocą liniowego siłownika elektrycznego HAD9 o parametrach: $F_{\max} = 4000 \text{ N}$, $V_{\max} = 6 \text{ mm/s}$, $U = 24\text{V}$. Do pomiaru siły wykorzystano czujnik wagowy typu „S” Keli DEE o parametrach: zakres pomiaru siły $F = 2000 \text{ N}$, klasa dokładności C3. Pomiar przemieszczeń realizowano za pomocą czujnika indukcyjnego LVP – 200 o parametrach: zakres pomiarowy $L = 200 \text{ mm}$, rozdzielczość: $0,1 \text{ mm}$, liniowość: $0,6 \text{ mm}$. W stanowisku badawczym zamontowano szereg elementów pozwalających na powtarzalny montaż próbek badawczych, co zapewniało zbliżone warunki ich badań. Stanowisko badawcze poddano walidacji, która potwierdziła poprawność wykonywania pomiarów.

Sposób realizacji badań prowadzony był następująco:

- a) montaż próbki badawczej na podporach stanowiska oraz montaż przyrządu przenoszącego obciążenie z siłownika elektrycznego na próbkę,
- b) podłączenie przyrządu obciążającego próbkę do siłownika wraz z siłomierzem,
- c) wprowadzenie wstępnego obciążenia próbki siłą o wartości nie przekraczającej $0,5 \text{ N}$,
- d) montaż czujnika przemieszczeń odpowiadającego za pomiar strzałki ugięcia próbki,
- e) podłączenie czujników tensometrycznych do wzmacniacza pomiarowego HBM, odpowiadających za pomiar odkształceń elementów próbki,
- f) układy: pomiaru siły, przemieszczenia i odkształcenia próbki, podłączone są do wzmacniacza pomiarowego, a wzmacniacz podłączony jest do komputera w celu jednoczesnej rejestracji wymienionych parametrów,
- g) sprawdzenie działania układów i ich kalibracja pozwala na włączenie rejestracji danych,
- h) włączenie liniowego siłownika elektrycznego; tłoczyko siłownika przemieszcza się ze stałą prędkością około $v = 0,5 \text{ mm/s}$,
- i) obciążenie próbki prowadzi się do chwili uszkodzenia złącza lub trwałego odkształcenia próbki,
- j) zatrzymanie rejestracji danych i zapisanie na dysku komputera wyników pomiarów.

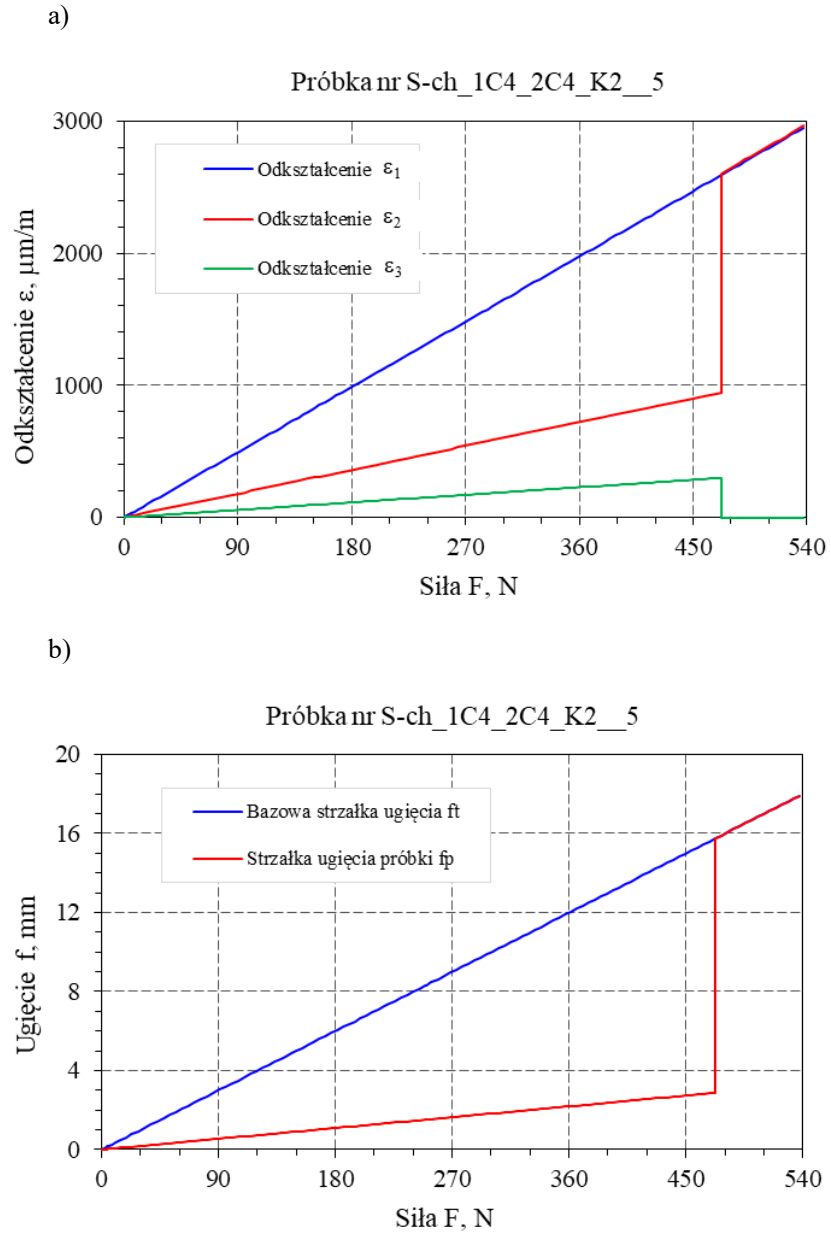
5.2.4. Wyniki badań doświadczalnych

Badania wytrzymałości złączy klejonych przeprowadzono przy użyciu próbek typu „sandwich” poddanych czteropunktowemu zginaniu o monotonicznie narastającej wartości momentu zginającego. Zmiana wartości momentu zginającego jest ściśle związana z wartością monotonicznie narastającej wartości siły, gdyż wartości odległości X i Y przyjmujemy jako stałe (rys. 5.25). Próbki badano w warunkach sterowania przemieszczeniem tłoka siłownika elektrycznego z prędkością wynoszącą $v = 0,1$ mm/s. W badaniach rozstaw podpór $X = 360$ mm, a odległość między punktami przyłożenia obciążenia $Y = 180$ mm.

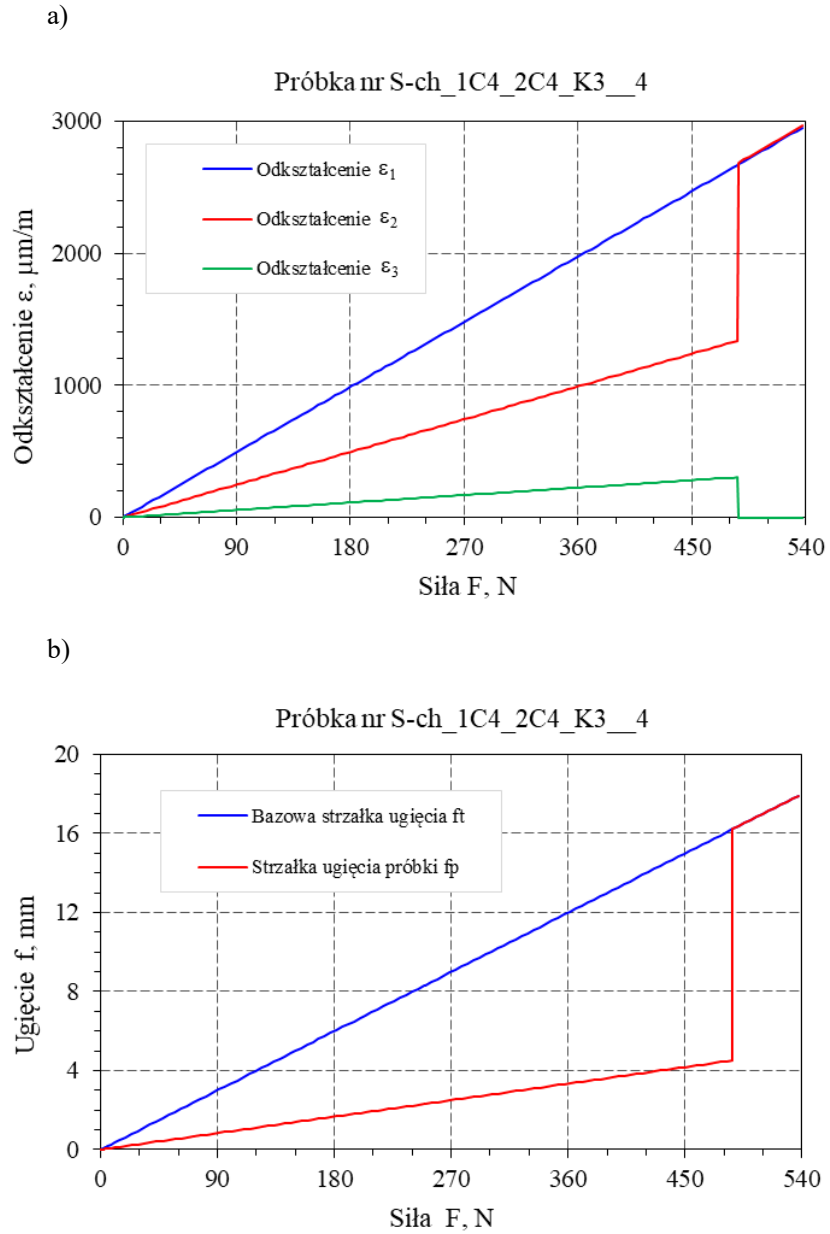


Rys. 5.25. Schemat obciążenia próbki podczas badań

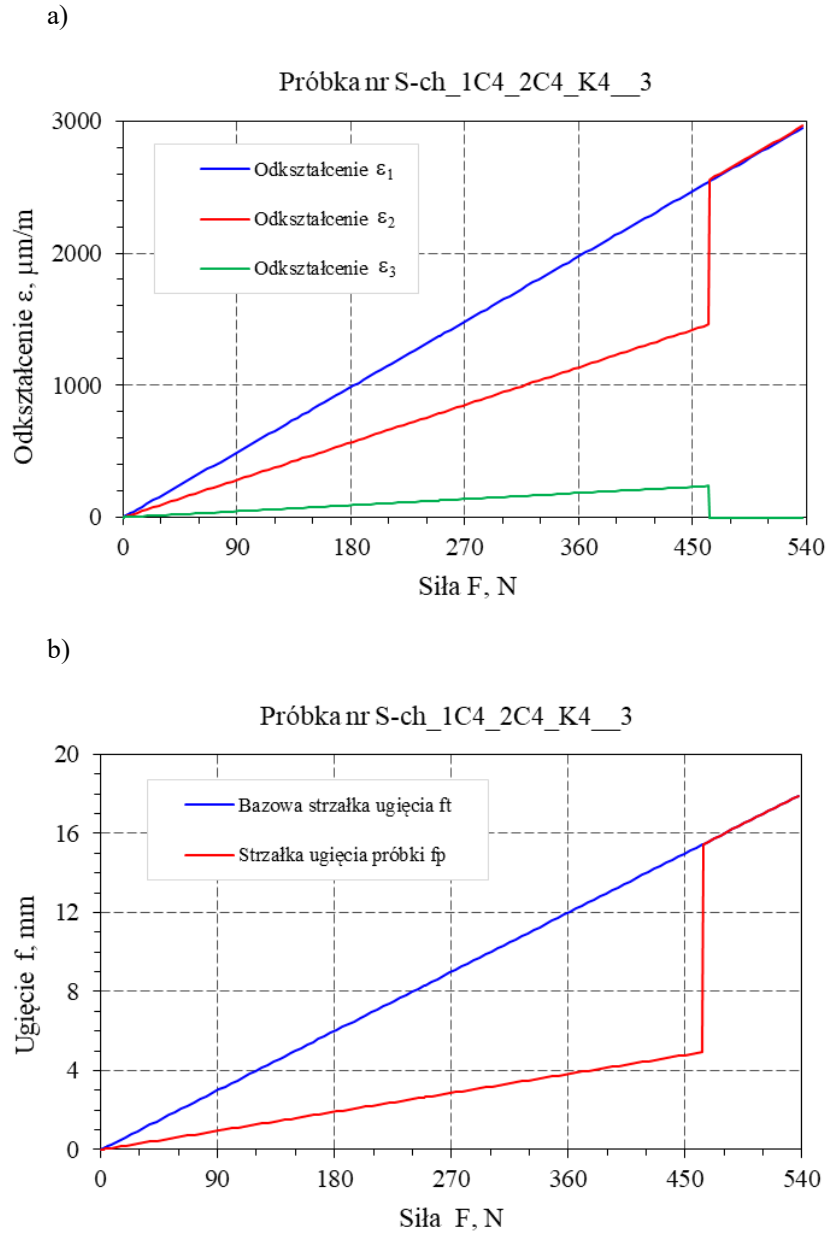
Na podstawie pomiaru odkształceń w punktach oznaczonych: T1, T2 i T3, istnieje możliwość wyznaczenia wartości odkształceń/naprężeń. Punkty pomiarowe T1 i T2 znajdują się na belce górnej M1 w miejscach, gdzie wartość momentu zginającego ma stałą wartość. Punkt pomiarowy T1 położony jest poza złączami klejonymi, a punkt T2 znajduje się pomiędzy złączami klejonymi. Zmiana wartości odkształceń/naprężeń w punkcie T1 jest proporcjonalna do zmiany wartości momentu zginającego. Punkty pomiarowe T3 znajdują się na belce dolnej M2. Pomiar odkształceń w elementach próbki: ε_1 , ε_2 i ε_3 , realizowano metodą tensometrii oporowej. Dla każdego przyjętego wariantu badań (Tabela 5.9) przeprowadzono (minimum) 5 niezależnych testów, co wskazuje na łączną liczbę badanych próbek wynoszącą 60 sztuk. Przykładowe wyniki badań w postaci zależności: $\varepsilon = f(F)$ i $f = f(F)$, przedstawiono na rysunkach 5.26÷5.37. Uśrednione wartości wyznaczonych parametrów przedstawiono w tabeli 5.10.



Rys. 5.26. Przykładowy wynik badań dla próbki typu sandwich o oznaczeniu S-ch_1C4_2C4_K2 (Tabela 5.9): a – zależność $\varepsilon = f(F)$, b – zależność $f = f(F)$

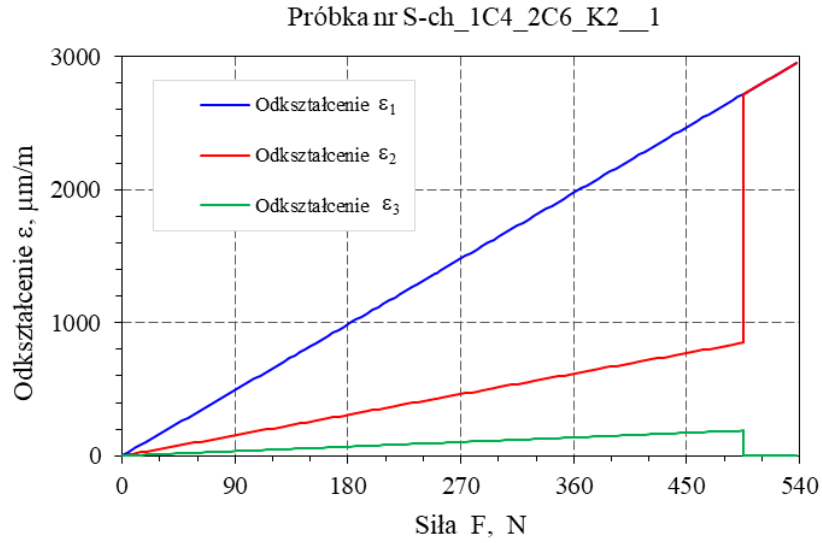


Rys. 5.27. Przykładowy wynik badań dla próbki typu sandwich o oznaczeniu S-ch_1C4_2C4_K3 (Tabela 5.9): a – zależność $\epsilon = f(F)$, b – zależność $f = f(F)$

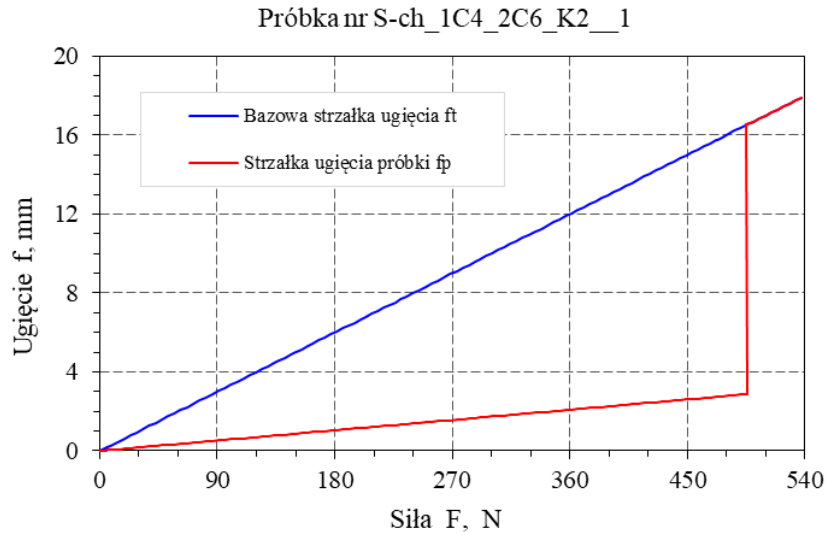


Rys. 5.28. Przykładowy wynik badań dla próbki typu sandwich o oznaczeniu S-ch_1C4_2C4_K4 (Tabela 5.9): a – zależność $\epsilon = f(F)$, b – zależność $f = f(F)$

a)

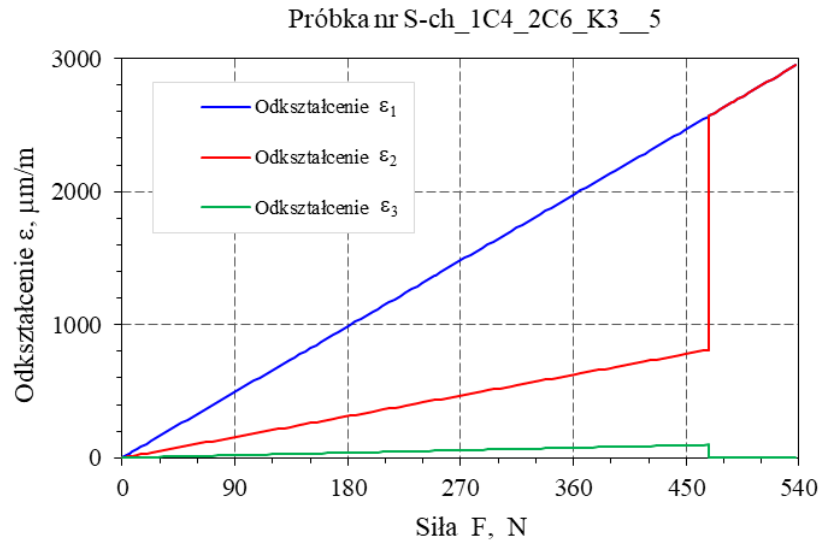


b)

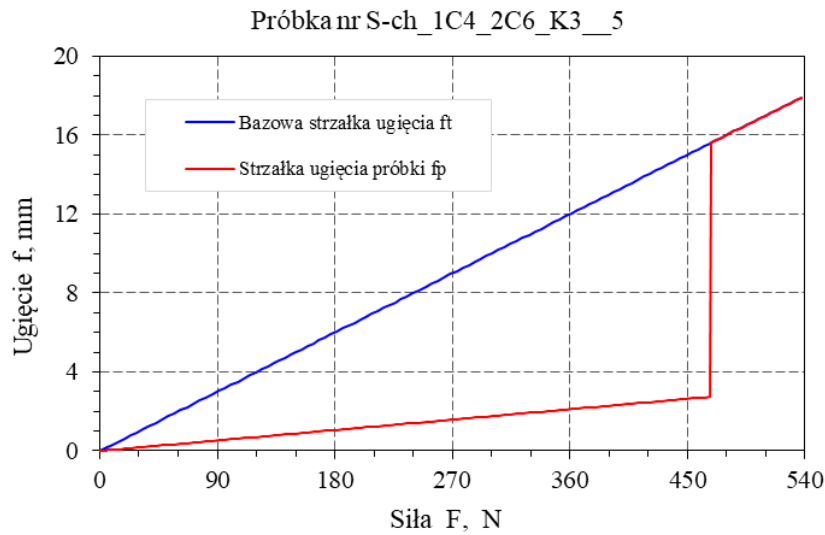


Rys. 5.29. Przykładowy wynik badań dla próbki typu sandwich o oznaczeniu S-ch_1C4_2C6_K2 (Tabela 5.9): a – zależność $\varepsilon = f(F)$, b – zależność $f = f(F)$

a)

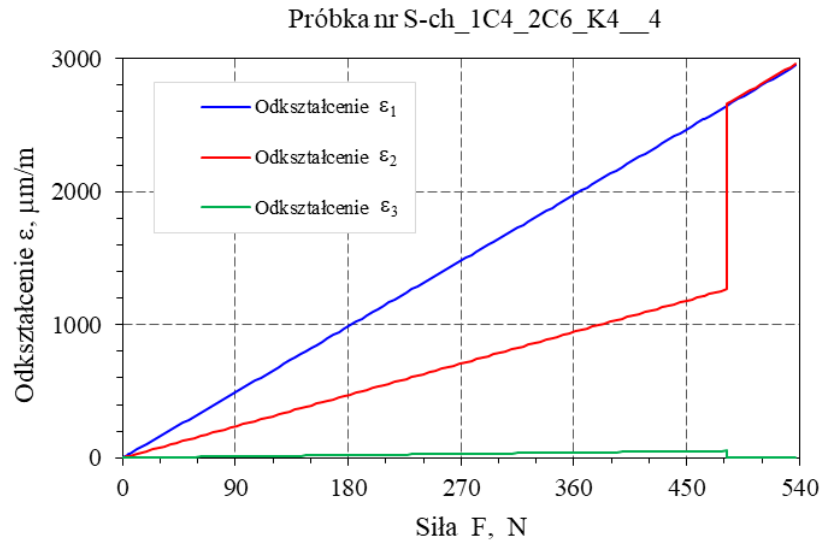


b)

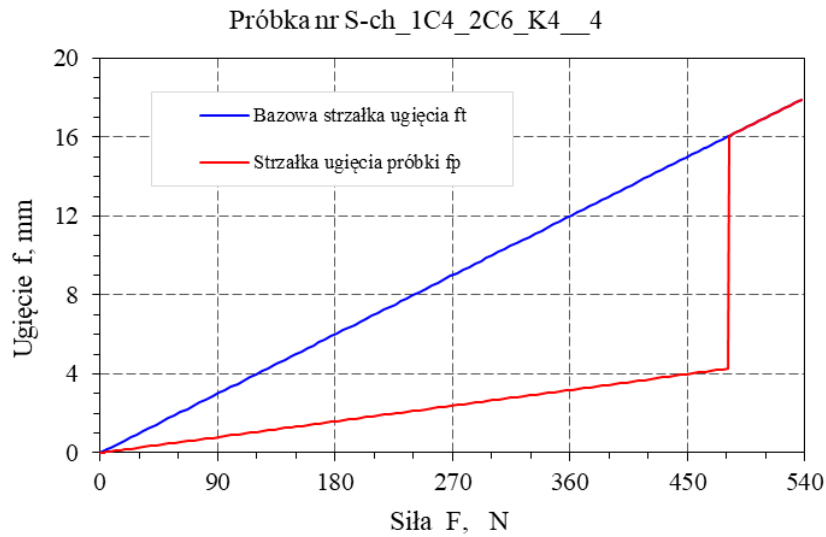


Rys. 5.30. Przykładowy wynik badań dla próbki typu sandwich o oznaczeniu S-ch_1C4_2C6_K3 (Tabela 5.9): a – zależność $\varepsilon = f(F)$, b – zależność $f = f(F)$

a)

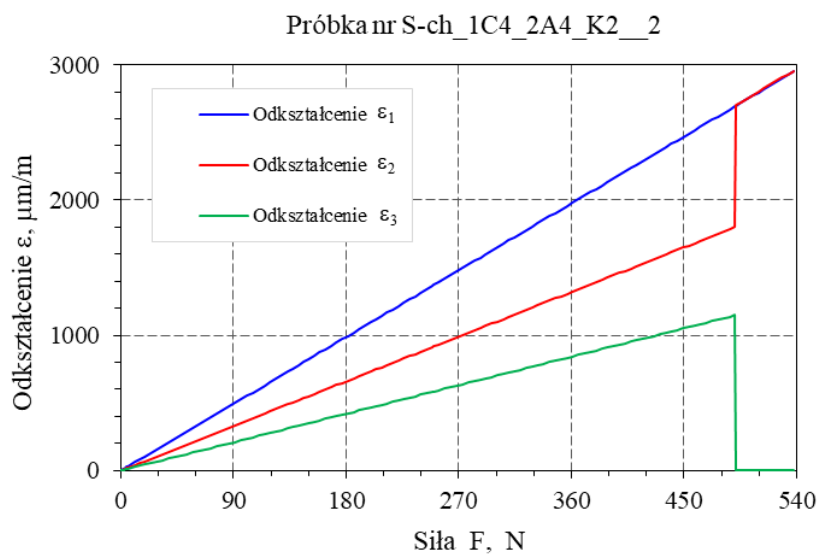


b)

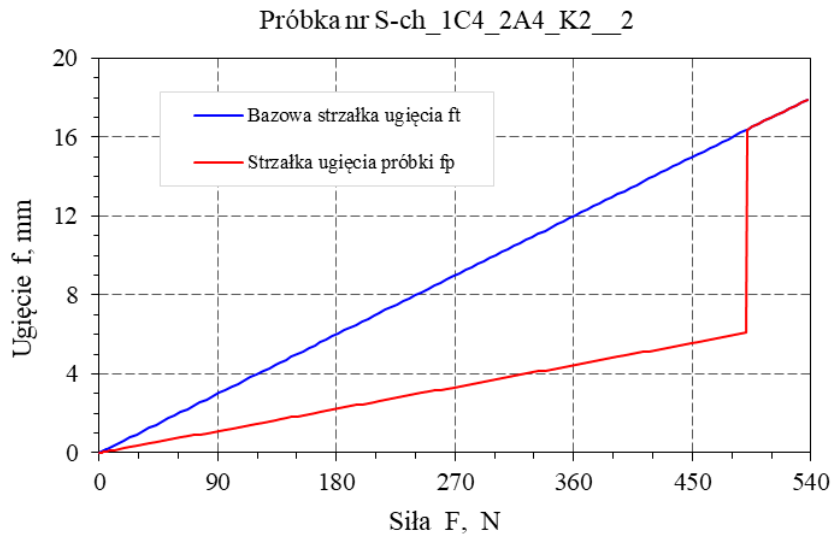


Rys. 5.31. Przykładowy wynik badań dla próbki typu sandwich o oznaczeniu S-ch_1C4_2C6_K4 (Tabela 5.9): a – zależność $\varepsilon = f(F)$, b – zależność $f = f(F)$

a)

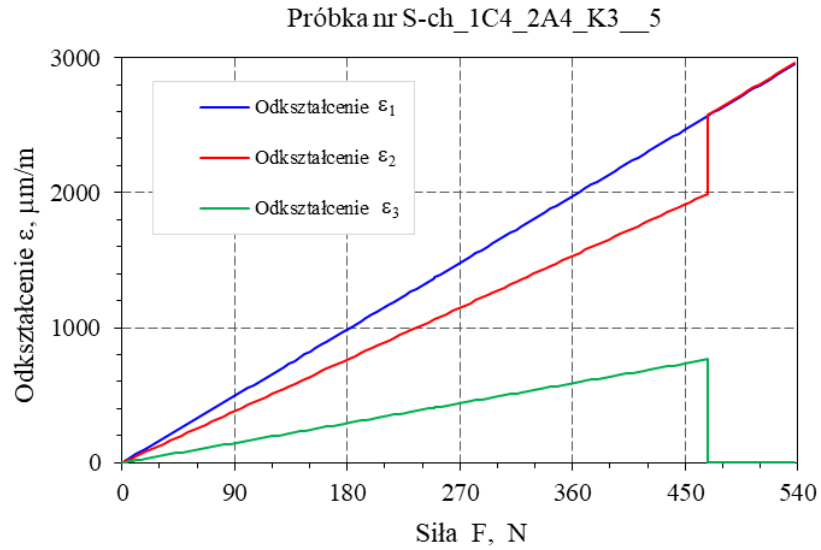


b)

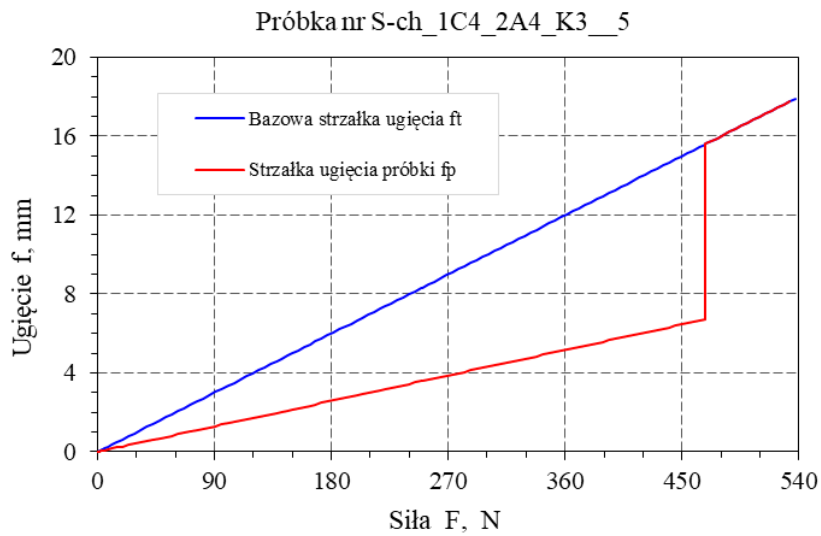


Rys. 5.32. Przykładowy wynik badań dla próbki typu sandwich o oznaczeniu S-ch_1C4_2A4_K2 (Tabela 5.9): a – zależność $\epsilon = f(F)$, b – zależność $f = f(F)$

a)

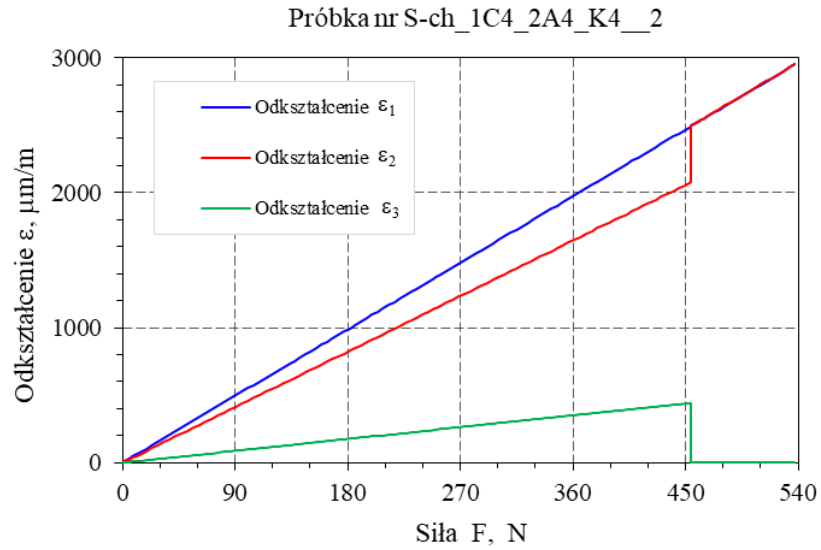


b)

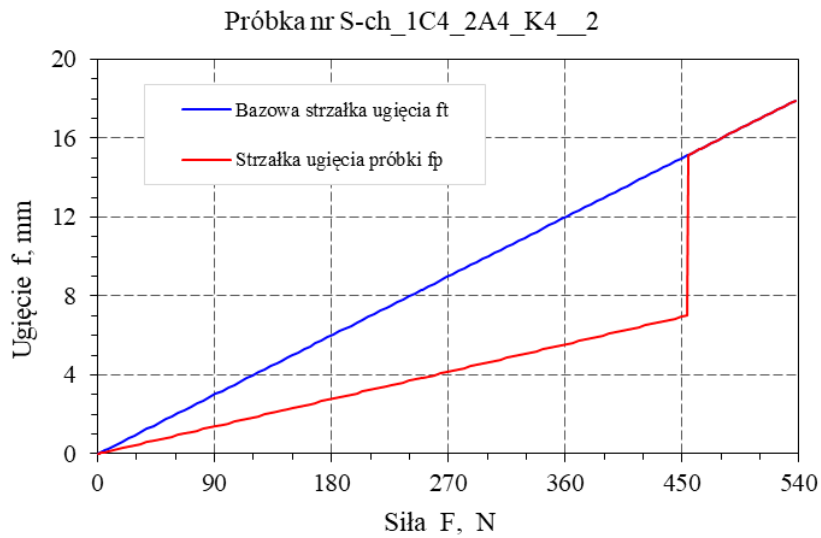


Rys. 5.33. Przykładowy wynik badań dla próbki typu sandwich o oznaczeniu S-ch_1C4_2A4_K3 (Tabela 5.9): a – zależność $\varepsilon = f(F)$, b – zależność $f = f(F)$

a)

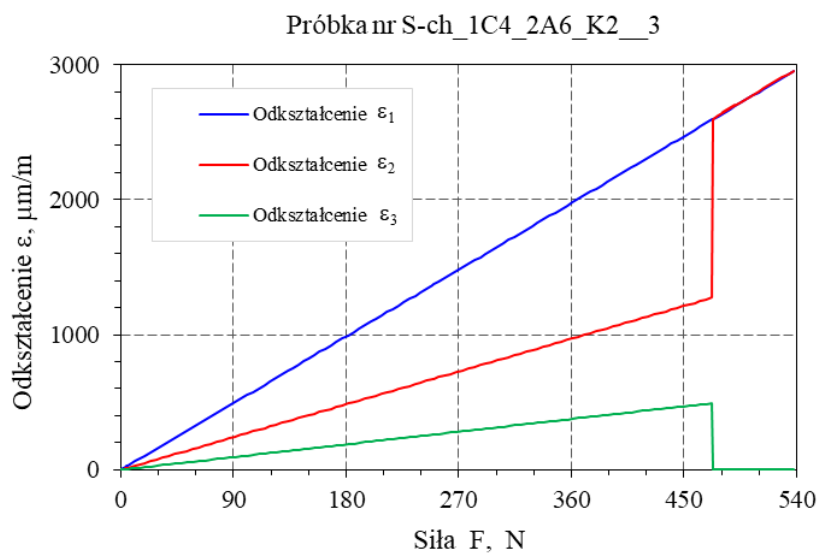


b)

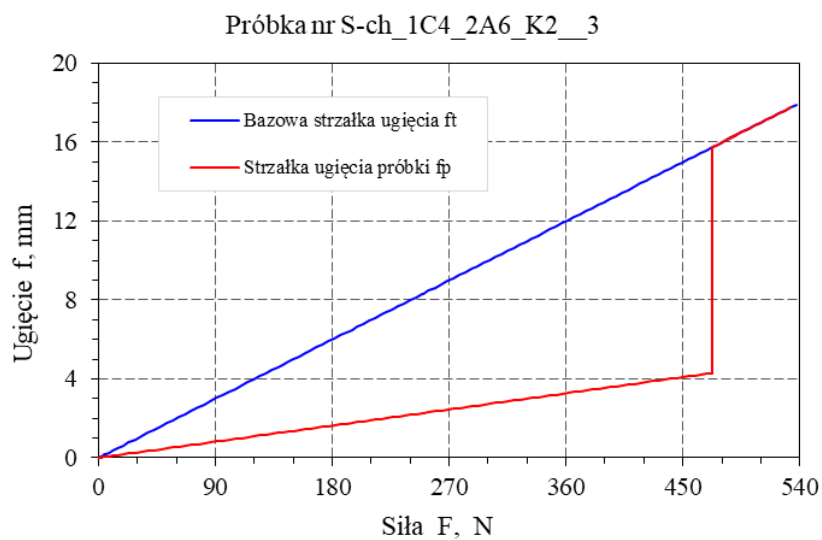


Rys. 5.34. Przykładowy wynik badań dla próbki typu sandwich o oznaczeniu S-ch_1C4_2A4_K4 (Tabela 5.9): a – zależność $\varepsilon = f(F)$, b – zależność $f = f(F)$

a)

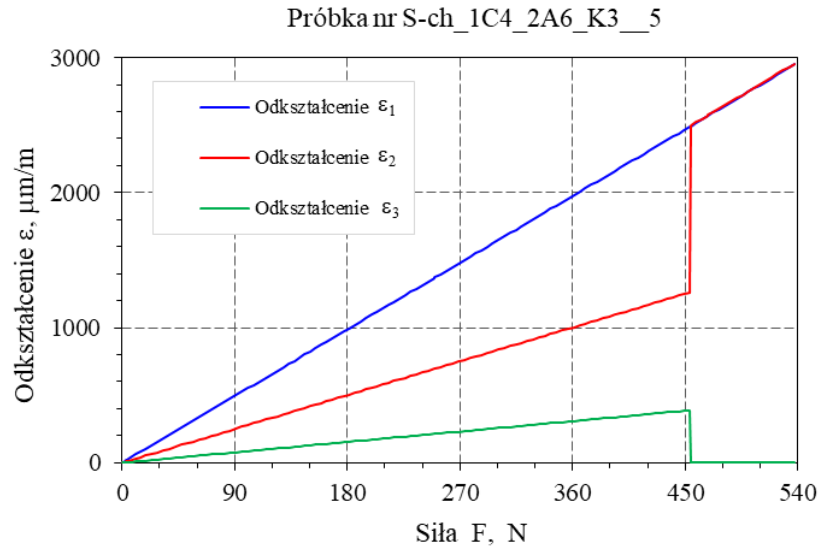


b)

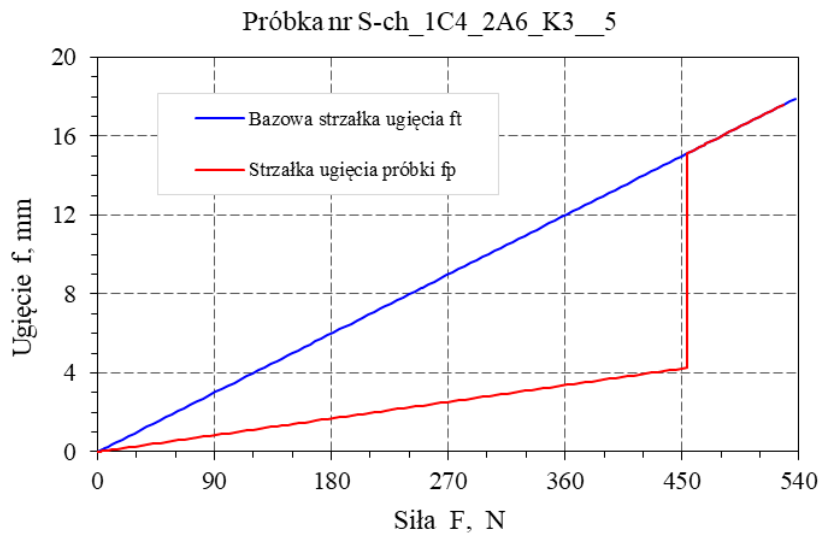


Rys. 5.35. Przykładowy wynik badań dla próbki typu sandwich o oznaczeniu S-ch_1C4_2A6_K2 (Tabela 5.9): a – zależność $\varepsilon = f(F)$, b – zależność $f = f(F)$

a)

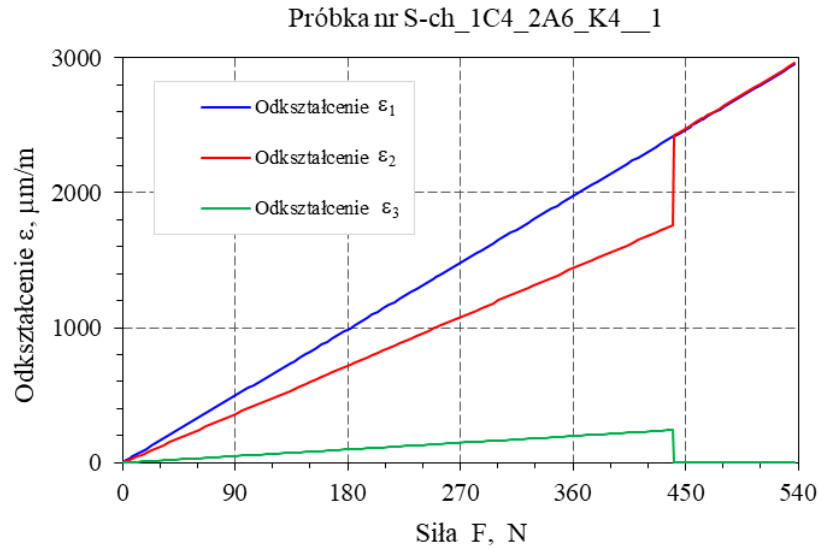


b)

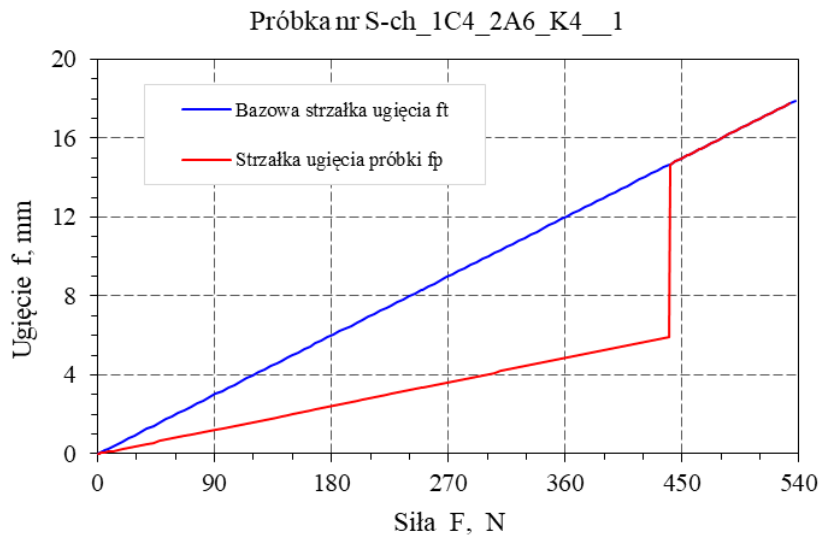


Rys. 5.36. Przykładowy wynik badań dla próbki typu sandwich o oznaczeniu S-ch_1C4_2A6_K3 (Tabela 5.9): a – zależność $\varepsilon = f(F)$, b – zależność $f = f(F)$

a)



b)



Rys. 5.37. Przykładowy wynik badań dla próbki typu sandwich o oznaczeniu S-ch_1C4_2A6_K4 (Tabela 5.9): a – zależność $\varepsilon = f(F)$, b – zależność $f = f(F)$

Tabela 5.10. Uśrednione wartości parametrów wyznaczonych na podstawie wyników badań próbek typu „sandwich” w warunkach obciążeń statycznych

Oznaczenie próbki	Główne parametry $\varepsilon = f(F)$ i $f = f(F)$					
	Siła F_1	Odształcenie			Strzałka ugięcia	
		ε_1	ε_2	ε_3	f_t	f_p
	N	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	mm	mm
S-ch 1C4 2C4 K2	469,3	2573,78	798,44	287,14	15,65	2,69
S-ch 1C4 2C4 K3	485,7	2661,58	1321,83	269,22	16,19	4,46
S-ch 1C4 2C4 K4	472,1	2590,24	1576,84	245,56	15,74	5,32
S-ch 1C4 2C6 K2	495,9	2716,46	886,25	199,64	16,53	2,99
S-ch 1C4 2C6 K3	475,4	2606,70	954,20	117,88	15,85	3,22
S-ch 1C4 2C6 K4	482,3	2645,12	1264,75	45,78	16,08	4,27
S-ch 1C4 2A4 K2	479,1	2628,66	1638,00	1165,64	15,97	5,53
S-ch 1C4 2A4 K3	486,6	2667,08	2280,74	786,38	16,22	7,69
S-ch 1C4 2A4 K4	462,8	2535,36	2226,42	454,02	15,43	7,51
S-ch 1C4 2A6 K2	471,5	2584,76	1222,78	515,34	15,72	4,13
S-ch 1C4 2A6 K3	459,7	2518,90	1398,02	355,32	15,33	4,72
S-ch 1C4 2A6 K4	446,3	2447,56	1883,45	237,30	14,88	6,36

Ocena postaci zniszczonych próbek typu sandwich wykazała, że próbki przyjęte do badań posiadały uszkodzenia warstwy kleju typu kohezynno-adhezyjnego. Wyniki badań przedstawione w tabeli 5.10 pozwoliły na wyznaczenie wartości naprężeń: S_1 , S_2 i S_3 (tabela 5.11), wg zależności:

$$S_0 = \varepsilon_0 \cdot E \quad (5.5)$$

oraz pracy (rys. 4.5): W_1 , W_2 i ΔW (tabela 5.12), ze wzorów:

$$W_1 = 0,5 \cdot F_1 \cdot f_t \quad (5.6)$$

$$W_2 = 0,5 \cdot F_1 \cdot f_p \quad (5.7)$$

$$\Delta W = W_1 - W_2 \quad (5.8)$$

gdzie:

ε_0 – wartość odkształceń zmierzonych podczas badań,

E – moduł sprężystości podłużnej: dla stali 41Cr4 – $E = 2,05 \cdot 10^5$ MPa, dla stopu aluminium AW-5754 – $E = 68,9 \cdot 10^3$ MPa,

F_1 – siła działająca w jednym punkcie przyłożenia obciążenia dla czteropunktowego zginania,

f_t – teoretyczna strzałka ugięcia belki górnej (M1) próbki sandwich obliczona wg wzoru: $f = (2 \cdot F_1 \cdot a^2 \cdot (L - a)^2) / (3 \cdot E \cdot I_x \cdot L)$,

f_p – strzałka ugięcia zmierzona w chwili uszkodzenia złącza klejonego,

ΔW – praca niszcząca złącze klejone.

Tabela 5.11. Wartości naprężeń S_1 , S_2 i S_3 obliczone na podstawie pomiarów odkształceń ε_0

Oznaczenie próbki	Odkształcenie			Naprężenie		
	ε_1	ε_2	ε_3	S_1	S_2	S_3
	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	MPa	MPa	MPa
S-ch_1C4_2C4_K2	2573,78	798,44	287,14	527,6	163,7	58,9
S-ch_1C4_2C4_K3	2661,58	1321,83	269,22	545,6	271,0	55,2
S-ch_1C4_2C4_K4	2590,24	1576,84	245,56	531,0	323,3	50,3
S-ch_1C4_2C6_K2	2716,46	886,25	199,64	556,9	181,7	40,9
S-ch_1C4_2C6_K3	2606,70	954,20	117,88	534,4	195,6	24,2
S-ch_1C4_2C6_K4	2645,12	1264,75	45,78	542,2	259,3	9,4
S-ch_1C4_2A4_K2	2628,66	1638,00	1165,64	538,9	335,8	80,3
S-ch_1C4_2A4_K3	2667,08	2280,74	786,38	546,8	467,6	54,2
S-ch_1C4_2A4_K4	2535,36	2226,42	454,02	519,7	456,4	31,3
S-ch_1C4_2A6_K2	2584,76	1222,78	515,34	529,9	250,7	35,5
S-ch_1C4_2A6_K3	2518,90	1398,02	355,32	516,4	286,6	24,5
S-ch_1C4_2A6_K4	2447,56	1883,45	237,30	501,7	386,1	16,3

Tabela 5.12. Praca $W_{1\text{sr}}$, $W_{2\text{sr}}$ i ΔW_{sr} obliczona na podstawie wyników pomiarów

Oznaczenie próbki	Parametry zmierzone			Parametry obliczone		
	Siła F_1	Strzałka ugięcia		Praca		
		f_t	f_p	$W_{1\text{sr}}$	$W_{2\text{sr}}$	ΔW_{sr}
	N	mm	mm	Nmm	Nmm	Nmm
S-ch_1C4_2C4_K2	469,3	15,65	2,69	3672,3	631,2	3041,1
S-ch_1C4_2C4_K3	485,7	16,19	4,46	3931,7	1083,1	2848,6
S-ch_1C4_2C4_K4	472,1	15,74	5,32	3715,4	1255,8	2459,6
S-ch_1C4_2C6_K2	495,9	16,53	2,99	4098,6	741,4	3357,2
S-ch_1C4_2C6_K3	475,4	15,85	3,22	3767,5	765,4	3002,2
S-ch_1C4_2C6_K4	482,3	16,08	4,27	3877,7	1029,7	2848,0
S-ch_1C4_2A4_K2	479,1	15,97	5,53	3826,1	1324,7	2501,4
S-ch_1C4_2A4_K3	486,6	16,22	7,69	3946,8	1871,0	2075,8
S-ch_1C4_2A4_K4	462,8	15,43	7,51	3570,3	1737,8	1832,5
S-ch_1C4_2A6_K2	471,5	15,72	4,13	3705,8	973,6	2732,1
S-ch_1C4_2A6_K3	459,7	15,33	4,72	3522,7	1084,9	2437,8
S-ch_1C4_2A6_K4	446,3	14,88	6,36	3320,2	1419,2	1901,0

Pracę niszczącą ΔW złącze klejone wyznaczono według metodyki opisanej w podrozdziale 4.2. Obliczenia wykonano z użyciem wzorów: (5.6), (5.7) i (5.8), a ich wyniki przedstawiono w tabeli 5.12. Wartości parametrów: F i f_p , są wartościami średnimi wyznaczonymi na podstawie 5 niezależnych pomiarów, które wykorzystano do obliczenia wartości średniej pracy niszczącej ΔW_{sr} .

5.2.5. Analiza wyników badań próbek typu sandwich

Na podstawie wartości odkształceń $\varepsilon_{2\text{sr}}$, zamieszczonych w tabeli 5.10, opracowano zależności:

- e) $\varepsilon_{2\text{sr}} = f(g_2)$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 w próbkach sandwich wykonanych w całości ze stali 41Cr4 (rys. 5.38),
- f) $\varepsilon_{2\text{sr}} = f(g_2)$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 w próbkach sandwich wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754 (rys. 5.39),
- g) $\varepsilon_{2\text{sr}} = f(g_3)$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach sandwich wykonanych w całości ze stali 41Cr4 (rys. 5.40),
- h) $\varepsilon_{2\text{sr}} = f(g_3)$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach sandwich wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754 (rys. 5.41).

Wyniki pomiarów zamieszczone na rysunkach 5.38 ÷ 5.41 aproksymowano funkcją liniową. Linie aproksymacyjne opisano równaniami, dla których wartości współczynników kierunkowych i wartości wyrazów wolnych zamieszczono w tabeli 5.13. Równanie opisujące zależność $\varepsilon_{2\text{sr}} = f(g_2)$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 ma postać:

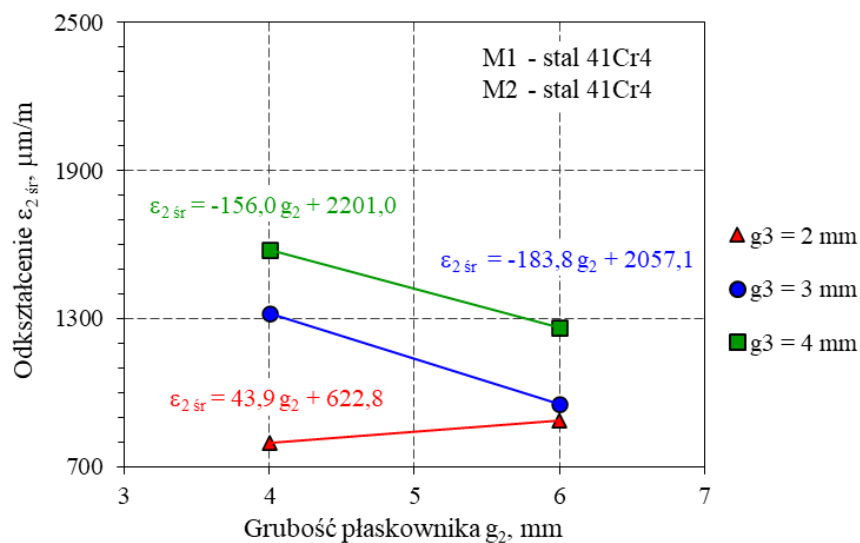
$$\varepsilon_{2\text{sr}} = a \cdot g_2 + b, \quad (5.9)$$

natomiast dla zależności $\varepsilon_{2\text{sr}} = f(g_3)$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach sandwich wynosi:

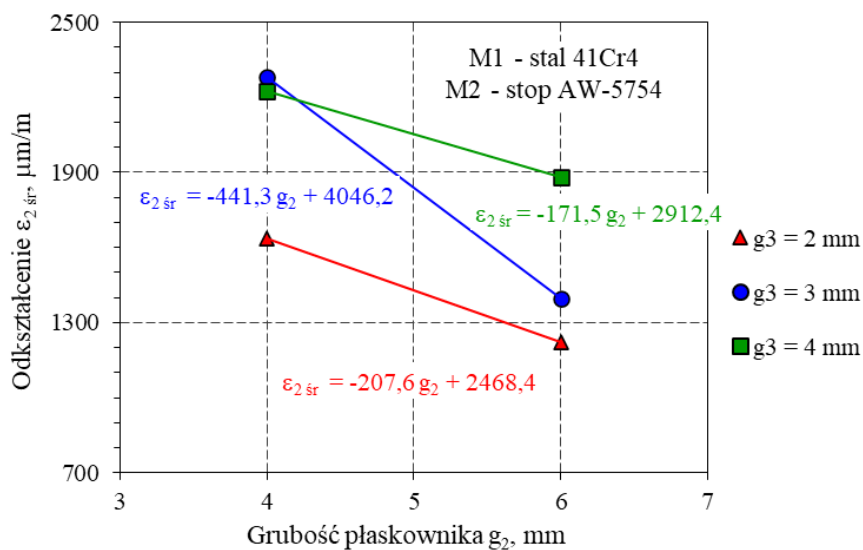
$$\varepsilon_{2\text{sr}} = a \cdot g_3 + b \quad (5.10)$$

Tabela 5.13. Zestawienie wartości współczynników kierunkowych a i wartości wyrazów wolnych b równań (5.9) i (5.10)

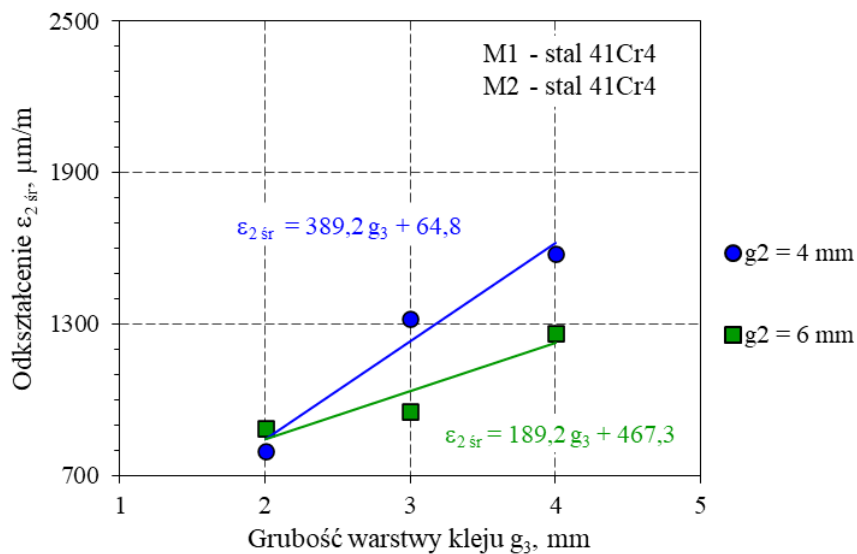
Typ próbki	Grubość warstwy kleju g_3	Zależność $\varepsilon_{2\text{sr}} = f(g_2)$		Grubość płaskownika g_2	Zależność $\varepsilon_{2\text{sr}} = f(g_3)$	
		a	b		a	b
Typ Is M1 – 41Cr4 M2 – 41Cr4	2 mm	43,9	622,8	---	---	---
	3 mm	-183,8	2057,1	4 mm	389,2	64,8
	4 mm	-156,0	2201,0	6 mm	189,2	467,3
Typ IIs M1 – 41Cr4 M2 – AW-5754	2 mm	-207,6	2468,4	---	---	---
	3 mm	-441,3	4046,2	4 mm	294,2	1165,8
	4 mm	-171,5	2912,4	6 mm	330,3	510,4



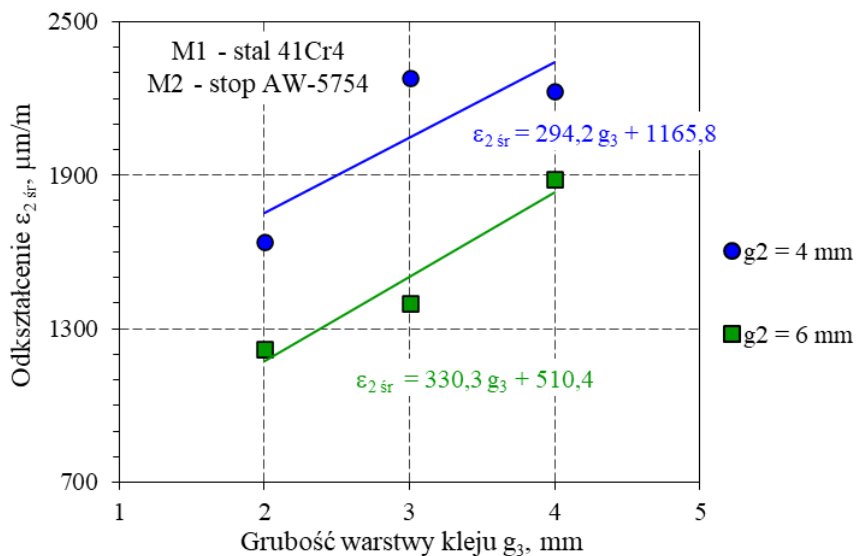
Rys. 5.38. Zależność $\epsilon_{2\text{sr}} = f(g_2)$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 w próbkach sandwich wykonanych w całości ze stali 41Cr4



Rys. 5.39. Zależność $\epsilon_{2\text{sr}} = f(g_2)$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 w próbkach sandwich wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754



Rys. 5.40. Zależność $\epsilon_{2\text{sr}} = f(g_3)$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach sandwich wykonanych w całości ze stali 41Cr4



Rys. 5.41. Zależność $\epsilon_{2\text{sr}} = f(g_3)$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach sandwich wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754

Na podstawie wartości ΔW_{sr} , przedstawionych w tabeli 5.12, opracowano zależności:

- $\Delta W_{sr} = f(g_2)$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 w próbkach sandwich wykonanych w całości ze stali 41Cr4 (rys. 5.42),
- $\Delta W_{sr} = f(g_2)$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 w próbkach sandwich wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754 (rys. 5.43),
- $\Delta W_{sr} = f(g_3)$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach sandwich wykonanych w całości ze stali 41Cr4 (rys. 5.44),
- $\Delta W_{sr} = f(g_3)$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach sandwich wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754 (rys. 5.45).

Wyniki obliczeń zamieszczone na rysunkach 5.42 ÷ 5.45 aproksymowano funkcją liniową. Linie aproksymacyjne opisano równaniami, dla których wartości współczynników kierunkowych i wartości wyrazów wolnych zamieszczono w tabeli 5.14. Równanie opisujące zależność $\Delta W_{sr} = f(g_2)$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 ma postać:

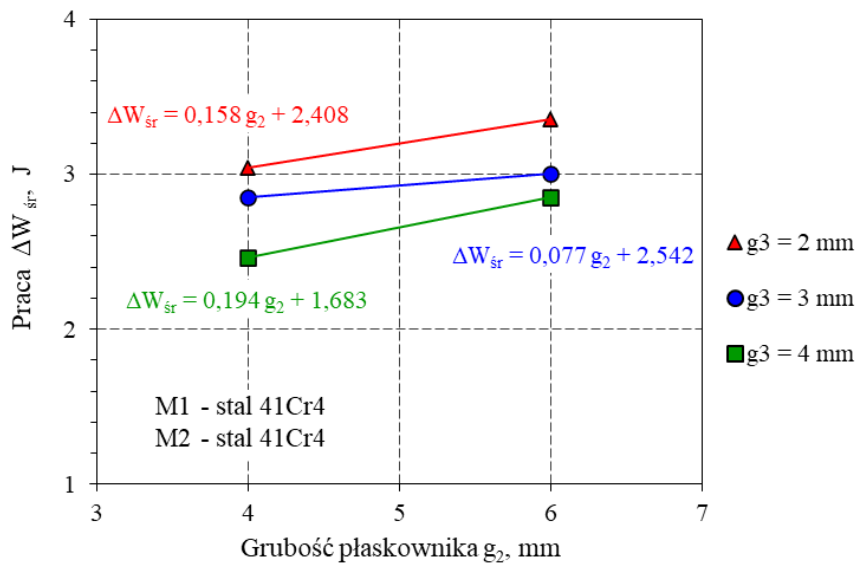
$$\Delta W_{sr} = a \cdot g_2 + b, \quad (5.11)$$

natomiast dla zależności $\Delta W_{sr} = f(g_3)$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach sandwich wynosi:

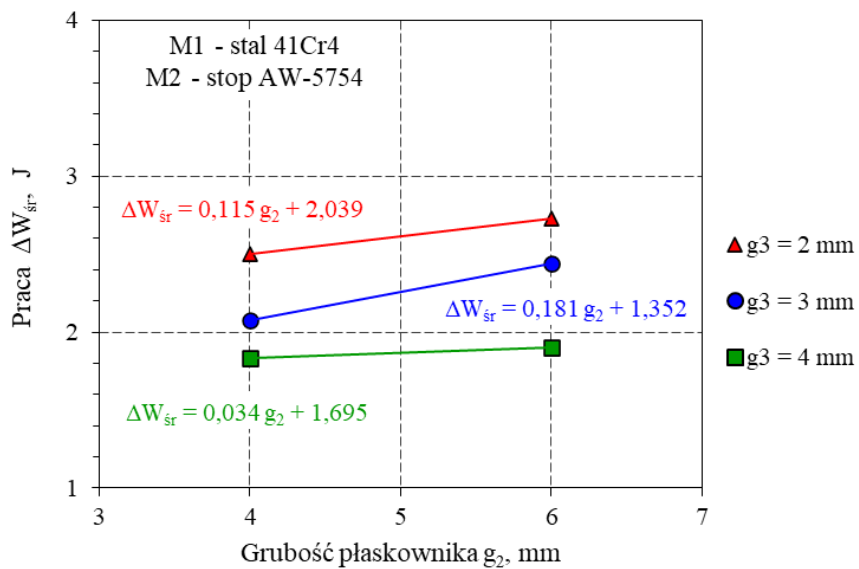
$$\Delta W_{sr} = a \cdot g_3 + b \quad (5.12)$$

Tabela 5.14. Zestawienie wartości współczynników kierunkowych a i wartości wyrazów wolnych b równań (5.11) i (5.12)

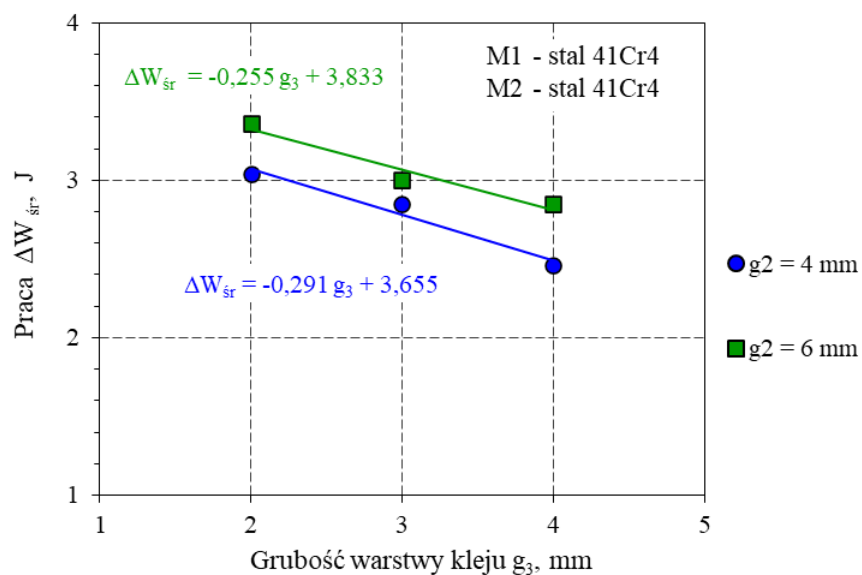
Typ próbki	Grubość warstwy kleju g_3	Zależność $\Delta W_{sr} = f(g_2)$		Grubość płaskownika g_2	Zależność $\Delta W_{sr} = f(g_3)$	
		a	b		a	b
Typ Is	2 mm	0,158	2,408	---	---	---
M1 – 41Cr4	3 mm	0,077	2,542	4 mm	-0,291	3,655
M2 – 41Cr4	4 mm	0,194	1,683	6 mm	-0,255	3,833
Typ IIs	2 mm	0,115	2,039	---	---	---
M1 – 41Cr4	3 mm	0,181	1,352	4 mm	-0,334	3,139
M2 – AW-5754	4 mm	0,034	1,695	6 mm	-0,415	3,604



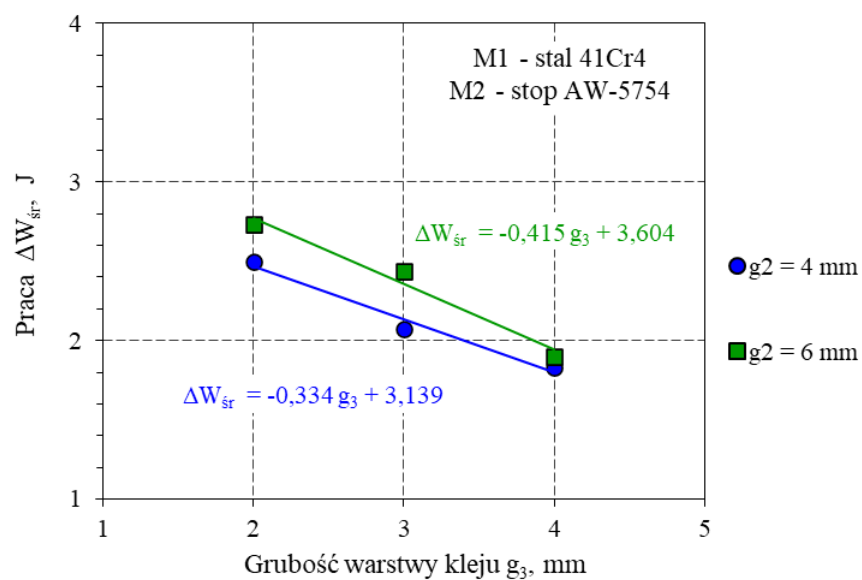
Rys. 5.42. Zależność $\Delta W_{sr} = f(g_2)$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 w próbkach sandwich wykonanych w całości ze stali 41Cr4



Rys. 5.43. Zależność $\Delta W_{sr} = f(g_2)$ dla stałej grubości warstwy kleju g_3 w próbkach sandwich wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754



Rys. 5.44. Zależność $\Delta W_{sr} = f(g_3)$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach sandwich wykonanych w całości ze stali 41Cr4



Rys. 5.45. Zależność $\Delta W_{sr} = f(g_3)$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach sandwich wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754

Analiza wyników badań próbek typu sandwich pozwala na sformułowanie następujących spostrzeżeń:

- a) na wytrzymałość próbek typu sandwich wpływa: grubość warstwy kleju g_3 oraz sztywność łączonych elementów (wynikająca z grubości płaskownika g_2 i zastosowanego materiału),
- b) najwyższe wartości odkształcenia $\varepsilon_{2\text{ sr}}$ uzyskano: dla grubości warstwy kleju $g_3 = 4$ mm oraz grubości płaskownika $g_2 = 4$ mm dla próbek typ Is (M1 - stal 41Cr4 – M2 - stal 41Cr4) oraz dla grubości warstwy kleju $g_3 = 3$ mm i $g_3 = 4$ mm oraz grubości płaskownika $g_2 = 4$ mm dla próbek typu IIs (M1 - stal 41Cr4 – M2 - stop AW-5754), co jest związane z niską sztywnością łączonych elementów i dużą grubością spoiny klejowej wpływającą na wzrost siły odrywającej w złączu klejonym podczas obciążenia,
- c) wpływ sztywność łączonych elementów na wartość odkształceń $\varepsilon_{2\text{ sr}}$ jest zauważalny, gdy porównany wyniki badań uzyskane dla próbek typ Is (M1-stal 41Cr4 – M2-stal 41Cr4) z wynikami uzyskanymi dla próbek typu IIs (M1-stal 41Cr4 – M2-stop AW-5754), co przedstawiono w tabeli 5.15; niższe wartości odkształceń $\varepsilon_{2\text{ sr}}$ uzyskano dla próbek typu Is (M1-stal 41Cr4 – M2-stal 41Cr4),
- d) najniższe wartości odkształceń $\varepsilon_{2\text{ sr}}$ uzyskano: dla grubości warstwy kleju $g_3 = 2$ mm i grubości płaskownika $g_2 = 6$ mm dla typu IIs oraz dla grubości warstwy kleju $g_3 = 2$ mm i grubości płaskownika $g_2 = 4$ mm i $g_2 = 6$ mm dla typu Is, co jest związane ze sztywnością (elementu M2 i sztywnością warstwy kleju) wpływającą na ograniczenie wartości siły odrywającej w złączu,
- e) wartości odkształceń $\varepsilon_{2\text{ sr}}$ dla próbek typu Is o grubości warstwy kleju $g_3 = 3$ mm mieszczą się pomiędzy wynikami uzyskanymi dla $g_3 = 2$ mm a $g_3 = 4$ mm,
- f) różnice wartości odkształceń $\varepsilon_{2\text{ sr}}$ wynikające ze zmiany sztywności próbki spowodowanej tylko zmianą grubości płaskownika g_2 (tj. dla tego samego typu próbki) przedstawiono w tabeli 5.16,
- g) wyznaczone wartości różnic pomiędzy wynikami odkształceń $\varepsilon_{2\text{ sr}}$ wykazały mniejszy zakres zmian dla próbek typu IIs, co jest związane z mniejszą sztywnością płaskownika g_2 wykonanego ze stopu AW-5754 w porównaniu do płaskownika ze stopu stali 41Cr4,

- h) najwyższe wartości pracy ΔW_{sr} uzyskano dla grubości warstwy kleju $g_3 = 2$ mm oraz grubości płaskownika $g_2 = 6$ mm uzyskano dla próbek typu sandwich, co jest związane z wysoką sztywnością łączonych elementów i małą grubością spoiny klejowej wpływającą na ograniczenie wartości siły odrywającej w złączu klejonym podczas obciążenia,
- i) analiza skrajnych wartości wyników badań wykazała:
- porównując wyniki dla typu próbek Is i IIs (tabela 5.15):
 - dla grubości warstwy kleju $g_3 = 2$ mm uzyskano wartości różnicy w ujęciu siły $\delta_e = -27,5\% \div -51,3\%$, a w ujęciu pracy $\delta_{\Delta W} = 21,6\% \div 37,2\%$,
 - dla grubości warstwy kleju $g_3 = 4$ mm uzyskano wartości różnicy w ujęciu siły $\delta_e = -29,2\% \div -32,8\%$, a w ujęciu pracy $\delta_{\Delta W} = 23,1\% \div 49,8\%$,
 - porównując wyniki dla grubości warstwy kleju $g_3 = 2$ mm i $g_3 = 4$ mm (tabela 5.16):
 - dla próbek typu Is uzyskano wartości różnicy w ujęciu siły $\delta_e = -29,9\% \div -49,4\%$, a w ujęciu pracy $\delta_{\Delta W} = 17,9\% \div 23,6\%$,
 - dla próbek typu IIs uzyskano wartości różnicy w ujęciu siły $\delta_e = -26,4\% \div -35,1\%$, a w ujęciu pracy $\delta_{\Delta W} = 36,4\% \div 43,7\%$,
 - porównując wyniki dla grubości płaskownika $g_2 = 4$ mm i $g_2 = 6$ mm (tabela 5.17):
 - dla próbek typu Is uzyskano wartości różnicy w ujęciu siły $\delta_e = -27,9\% \div 11,0\%$, a w ujęciu pracy $\delta_{\Delta W} = 5,4\% \div 15,8\%$,
 - dla próbek typu IIs uzyskano wartości różnicy w ujęciu siły $\delta_e = -15,4\% \div -38,7\%$, a w ujęciu pracy $\delta_{\Delta W} = 3,7\% \div 17,4\%$,
- j) dla większości analizowanych przypadków mniejszy zakres zmian wartości różnic uzyskano dla ujęcia pracy niszczącej ΔW_{sr} .

W badaniach doświadczalnych stosowano próbki typu sandwich wykonane w całości ze stali 41Cr4 (typ Is) oraz próbki wykonane jednocześnie ze stali 41Cr4 i stopu aluminium AW-5754 (typ IIs). Wszystkie cechy geometryczne próbek typu Is i typu IIs były takie same. Wskazane założenia pozwoliły na wyznaczenia relacji pomiędzy wynikami uzyskanymi podczas badań dla przyjętych typów próbek, które przedstawiono na rysunkach 5.46 i 5.47.

Tabela 5.15. Zestawienie wartości różnic wyników badań dla przyjętych typów próbek

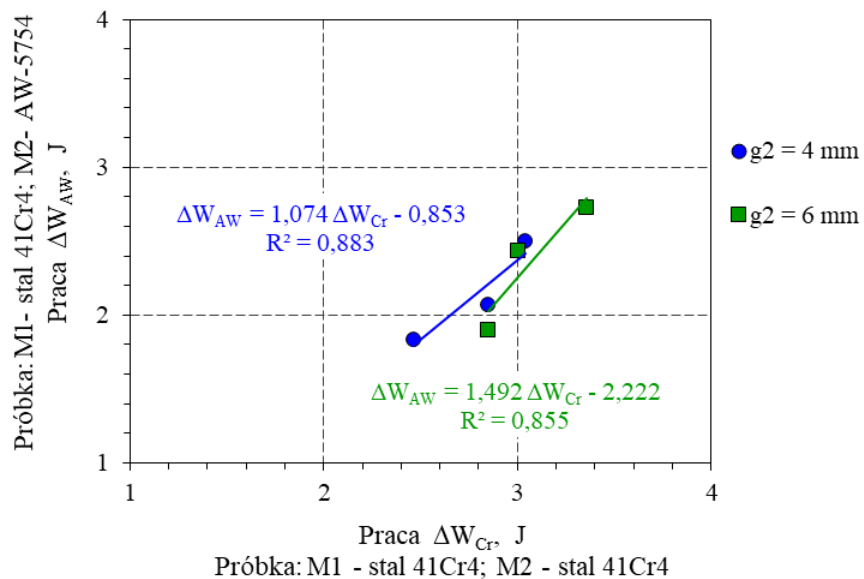
Cechy próbki		Wyniki badań				Różnice wartości w ujęciu	
		Próbka typ Is		Próbka typ IIs		((A/C)-1)*100	((B/D)-1)*100
		Kol. A	Kol. B	Kol. C	Kol. D		
g_3	g_2	$\epsilon_{2\text{ śr}}$	$\Delta W_{\text{śr}}$	$\epsilon_{2\text{ śr}}$	$\Delta W_{\text{śr}}$	Odkoszt. δ_ϵ	Pracy $\delta_{\Delta W}$
mm	mm	$\mu\text{m/m}$	J	$\mu\text{m/m}$	J	%	%
2	4	798,44	3,041	1638,00	2,501	-51,3	21,6
2	6	886,25	3,357	1222,78	2,732	-27,5	22,9
3	4	1321,83	2,849	2280,74	2,076	-42,0	37,2
3	6	954,20	3,002	1398,02	2,438	-31,7	23,1
4	4	1576,84	2,460	2226,42	1,833	-29,2	34,2
4	6	1264,75	2,848	1883,45	1,901	-32,8	49,8

Tabela 5.16. Zestawienie wartości różnic wyników badań dla grubości warstwy kleju $g_3 = 2\text{ mm}$ i $g_3 = 4\text{ mm}$

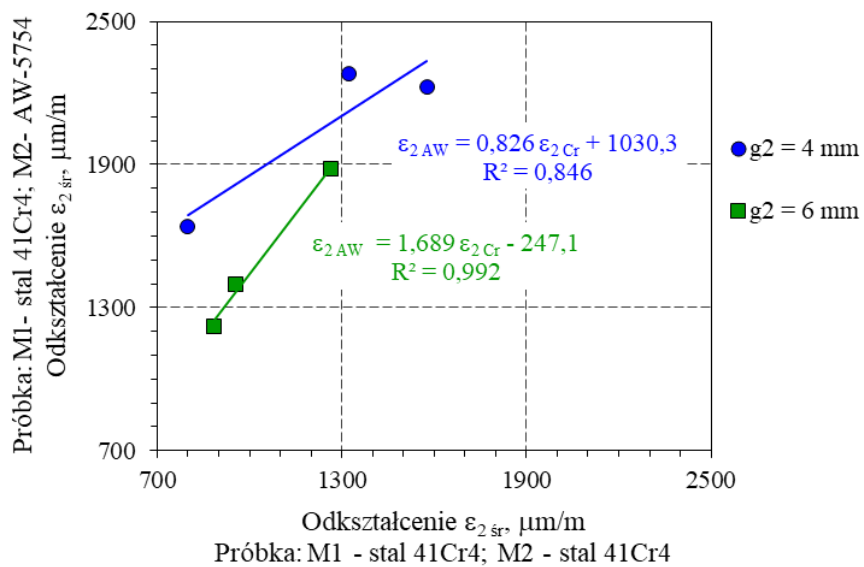
Próbka	Grub. g_2	Wyniki badań				Różnice wartości w ujęciu	
		$g_3 = 2\text{ mm}$		$g_3 = 4\text{ mm}$		((A/C)-1)*100	((B/D)-1)*100
		Kol. A	Kol. B	Kol. C	Kol. D		
		$\epsilon_{2\text{ śr}}$	$\Delta W_{\text{śr}}$	$\epsilon_{2\text{ śr}}$	$\Delta W_{\text{śr}}$	Odkoszt. δ_ϵ	Pracy $\delta_{\Delta W}$
	mm	$\mu\text{m/m}$	J	$\mu\text{m/m}$	J	%	%
Typ Is	4	798,44	3,041	1576,84	2,460	-49,4	23,6
	6	886,25	3,357	1264,75	2,848	-29,9	17,9
Typ IIs	4	1638,00	2,501	2226,42	1,833	-26,4	36,4
	6	1222,78	2,732	1883,45	1,901	-35,1	43,7

Tabela 5.17. Zestawienie wartości różnic wyników badań dla grubości płaskownika $g_2 = 4\text{ mm}$ i $g_2 = 6\text{ mm}$

Próbka	Grub. g_3	Wyniki badań				Różnice wartości w ujęciu	
		$g_2 = 6\text{ mm}$		$g_2 = 4\text{ mm}$		((A/C)-1)*100	((B/D)-1)*100
		Kol. A	Kol. B	Kol. C	Kol. D		
		$\epsilon_{2\text{ śr}}$	$\Delta W_{\text{śr}}$	$\epsilon_{2\text{ śr}}$	$\Delta W_{\text{śr}}$	Odkoszt. δ_ϵ	Pracy $\delta_{\Delta W}$
	mm	$\mu\text{m/m}$	J	$\mu\text{m/m}$	J	%	%
Typ Is	2	886,25	3,357	798,44	3,041	11,0	10,4
	3	954,20	3,002	1321,83	2,848	-27,8	5,4
	4	1264,75	2,848	1576,84	2,460	-19,8	15,8
Typ IIs	2	1222,78	2,732	1638,00	2,501	-25,3	9,2
	3	1398,02	2,438	2280,74	2,076	-38,7	17,4
	4	1883,45	1,901	2226,42	1,833	-15,4	3,7



Rys. 5.46. Zależność $\Delta W_{AW} = f(\Delta W_{Cr})$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach sandwich



Rys. 5.47. Zależność $\varepsilon_{2AW} = f(\varepsilon_{2Cr})$ dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach sandwich

Na rysunku 5.46 przedstawiono zależności $\Delta W_{AW} = f(\Delta W_{Cr})$ wyznaczone na podstawie wartości ΔW_{sr} dla przyjętych typów próbek dla stałej grubości płaskownika g_2 . Symbolem W_{Cr} oznaczono wartości pracy obliczonej dla próbek typu Is, natomiast symbolem W_{AW} oznaczono wartości pracy obliczonej dla próbek typu IIs. Zbliżoną korelację wyników badań uzyskano dla grubości płaskownika $g_2 = 4$ mm i $g_2 = 6$ mm, o czym świadczy współczynnik determinacji $R^2 > 0,85$. Rozkład wyników wskazuje, że większą pracę należy użyć do uszkodzenia złącza klejonego próbkach wykonanych w całości ze stali 41Cr4.

Rysunek 5.47 przedstawia zależności $\varepsilon_{2AW} = f(\varepsilon_{2Cr})$ wyznaczone dla stałej grubości płaskownika g_2 w próbkach zakładkowych. Analiza ułożenia danych oraz wartości współczynników determinacji R^2 wskazuje na wysoką korelację wyników uzyskanych dla grubości płaskownika $g_2 = 6$ mm, o czym świadczy współczynnik determinacji $R^2 = 0,992$. Dla grubości $g_2 = 4$ mm wartości współczynnika determinacji $R^2 < 0,9$.

Przeprowadzone analizy wyniki badań wykazały, że wpływ na wartość pracy niszczącej ΔW_{sr} wpływa: grubość warstwy kleju g_3 , rodzaj materiału płaskownika M2 oraz grubość płaskownika g_2 .

Do weryfikacji możliwości zastosowania próbek typu sandwich w badaniach wytrzymałościowych złączy klejonych zostaną wykorzystane tylko wyniki pracy niszczącej ΔW_{sr} . Analiza ta zostanie przeprowadzona w rozdziale 6 niniejszej pracy.

6. Analiza wyników badań

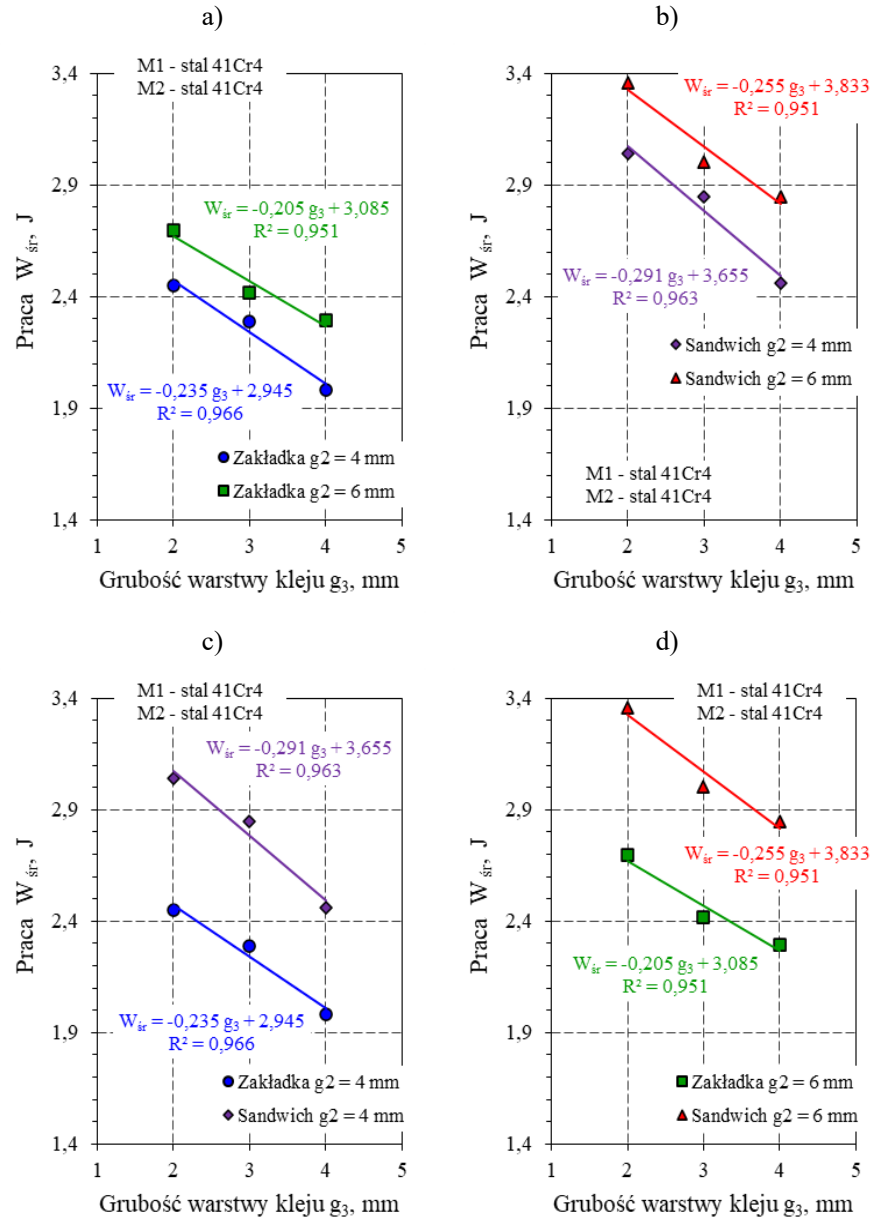
Wyniki przedstawione w rozdziale 5 poddano analizie statystycznej w celu oceny możliwości badań uszkodzenia złączy klejonych z zastosowaniem próbek typu sandwich. Szczegółowej analizie poddano wartości pracy niszczącej W połączenia klejone próbek zakładkowych i próbek sandwich. Na rysunkach od 6.1 do 6.4 zestawiono wyniki badań, dla których wyznaczono równania funkcji liniowej oraz wartości współczynnika determinacji R^2 .

Analizę statystyczną danych przeprowadzono stosując test U Manna-Whitney'a oraz test t Studenta. Warianty analizy danych przedstawiono w tabeli 6.1.

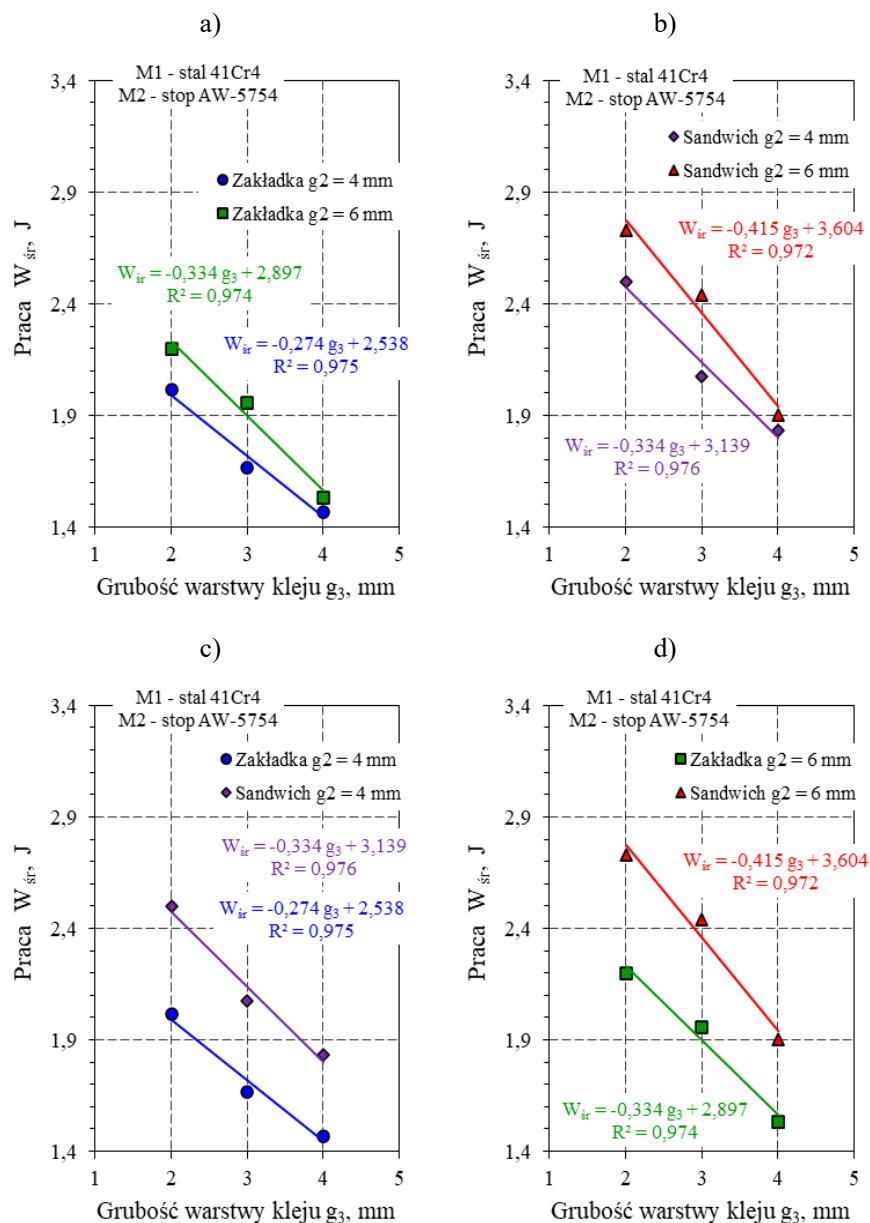
Tabela 6.1. Zestawienie wyników obliczeń w zakresie statystyki opisowej oraz parametrów dla test U Manna-Whitney'a i test t Studenta

Wariant obliczeń		Parametry testów statystycznych			
Oznaczenie charakterystyki I	Oznaczenie charakterystyki II	M±SD		test t Studenta	
		GI	GII	t	p
Zakł., Cr-Cr, 4 mm	Zakł., Cr-Cr, 6 mm	2,24±0,24	2,47±0,21	-1,263	0,275
Sand., Cr-Cr, 4 mm	Sand., Cr-Cr, 6 mm	2,78±0,30	3,07±0,26	-1,254	0,278
Zakł., Cr-Cr, 4 mm	Sand., Cr-Cr, 4 mm	2,24±0,24	2,78±0,30	-2,483	0,068
Zakł., Cr-Cr, 6 mm	Sand., Cr-Cr, 6 mm	2,47±0,21	3,07±0,26	-3,121	0,035
Zakł., Cr-AL, 4 mm	Zakł., Cr-AL, 6 mm	1,72±0,28	1,90±0,34	-0,707	0,519
Sand., Cr-AL, 4 mm	Sand., Cr-AL, 6 mm	2,14±0,34	2,36±0,42	-0,707	0,519
Zakł., Cr-AL, 4 mm	Sand., Cr-AL, 4 mm	1,72±0,28	2,14±0,34	-1,659	0,173
Zakł., Cr-AL, 6 mm	Sand., Cr-AL, 6 mm	1,90±0,34	2,36±0,42	-1,478	0,214
Zakł., Cr-Cr, 4 mm	Zakł., Cr-AL, 4 mm	2,24±0,24	1,72±0,28	2,482	0,068
Zakł., Cr-Cr, 6 mm	Zakł., Cr-AL, 6 mm	2,47±0,21	1,90±0,34	2,503	0,067
Sand., Cr-Cr, 4 mm	Sand., Cr-AL, 4 mm	2,78±0,30	2,14±0,34	2,490	0,068
Sand., Cr-Cr, 6 mm	Sand., Cr-AL, 6 mm	3,07±0,26	2,36±0,42	2,488	0,068
Zakł., Cr-Cr, 4 mm	Zakł., Cr-AL, 6 mm	2,24±0,24	1,90±0,34	1,442	0,223
Zakł., Cr-Cr, 6 mm	Zakł., Cr-AL, 4 mm	2,47±0,21	1,72±0,28	3,764	0,020
Sand., Cr-Cr, 4 mm	Sand., Cr-AL, 6 mm	2,78±0,30	2,36±0,42	3,417	0,027
Sand., Cr-Cr, 6 mm	Sand., Cr-AL, 4 mm	3,07±0,26	2,14±0,34	3,778	0,019

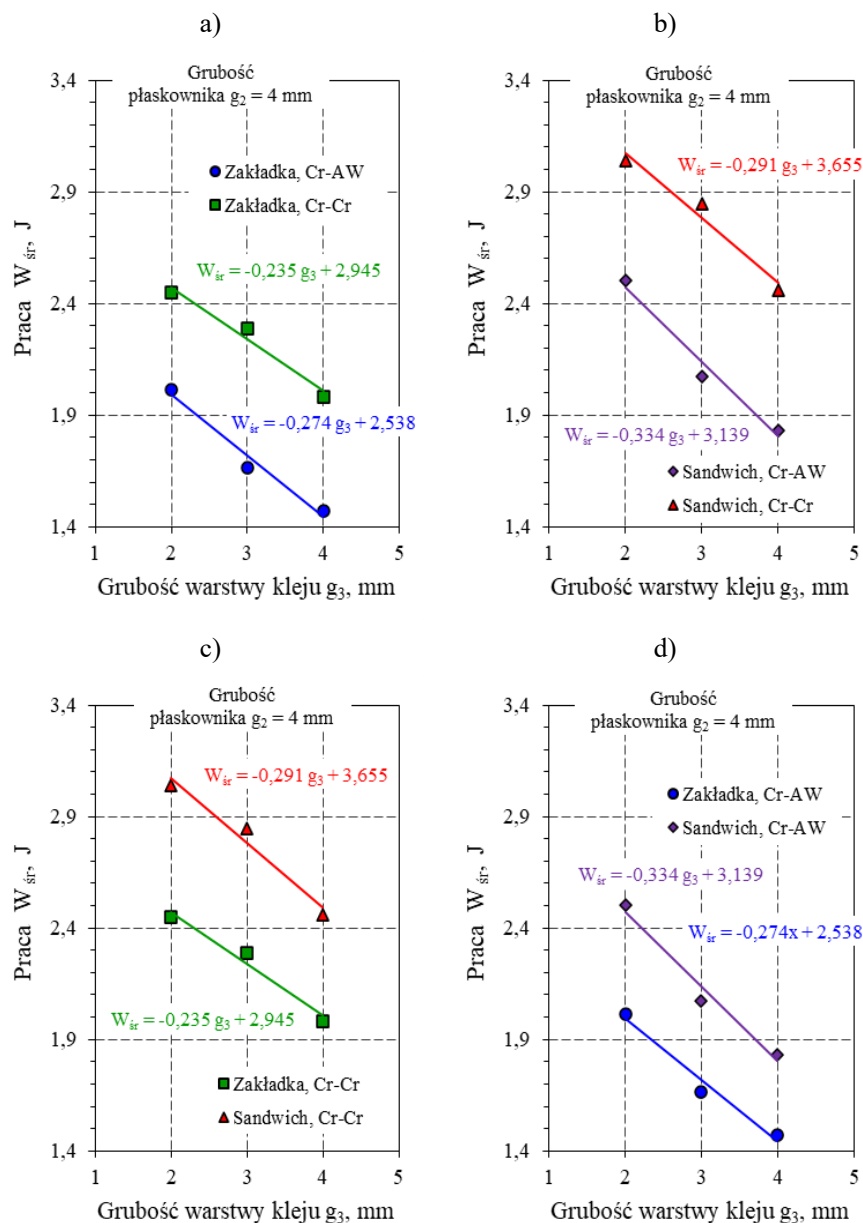
Oznaczenia:
 „Zakł.” – zakładkowa próbka klejona, „Sand.” – próbka typu sandwich, „Cr-Cr” – próbka wykonana z: M1-41Cr4 – M2-41Cr4, „Cr-AL” – próbka wykonana z: M1-41Cr4 – M2-stop AW-5754, „4 mm” – grubość płaskownika M2 wynoszący $g_2 = 4$ mm, „6 mm” – grubość płaskownika M2 wynoszący $g_2 = 6$ mm,
 M – średnia arytmetyczna; SD – odchylenie standardowe



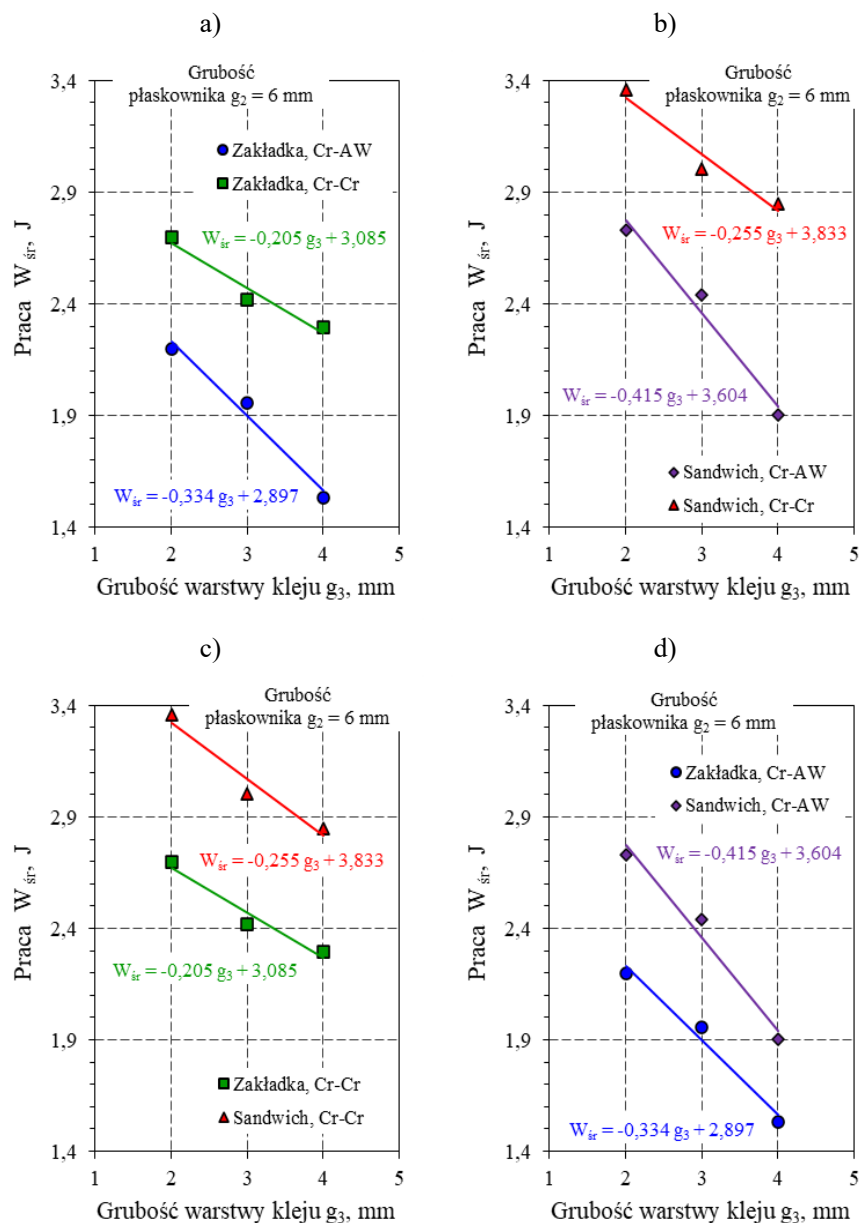
Rys. 6.1. Zestawienie zależności $W_{sr} = f(g_3)$ dla wyników badań próbek (stal 41Cr4-stal 41Cr4): a – zakładkowych próbek klejonych, b – próbek typu sandwich, c – dla grubości płaskownika $g_2 = 4$ mm obydwu typów próbek, d – dla grubości płaskownika $g_2 = 6$ mm obydwu typów próbek



Rys. 6.2. Zestawienie zależności $W_{sr} = f(g_3)$ dla wyników badań próbek (stal 41Cr4-stop AW-5754): a – zakładkowych próbek klejonych, b – próbek typu sandwich, c – dla grubości płaskownika $g_2 = 4$ mm obydwu typów próbek, d – dla grubości płaskownika $g_2 = 6$ mm obydwu typów próbek



Rys. 6.3. Zestawienie zależności $W_{sr} = f(g_3)$ dla wyników badań próbek w ujęciu grubości płaskownika $g_2 = 4$ mm: a – zakładkowych próbek klejonych, b – próbek typu sandwich, c – dla obydwu typów próbek stal 41Cr4-stal 41Cr4, d – dla obydwu typów próbek stal 41Cr4-stop AW-5754



Rys. 6.4. Zestawienie zależności $W_{sr} = f(g_3)$ dla wyników badań próbek w ujęciu grubości płaskownika $g_2 = 6$ mm: a – zakładkowych próbek klejonych, b – próbek typu sandwich, c – dla obydwu typów próbek stal 41Cr4-stal 41Cr4, d – dla obydwu typów próbek stal 41Cr4-stop AW-5754

W każdym z przedstawionych wykresów występuje istotna zależność liniowa między grubością warstwy kleju g_3 a pracą niszczącą połączenie W.

Dodatkowym elementem było porównanie uzyskanych wyników w konfiguracjach jednowymiarowych (rys. 6.5) wynikających z typu próbek (próbka zakładkowa vs. próbka sandwich), jak również rodzaju materiału płaskownika M2 (Cr-Cr vs. Cr-AL), a także grubości zastosowanego materiału na płaskownik M2 (4mm vs. 6mm).

W tak przygotowanych porównaniach jednowymiarowych uzyskane rezultaty wskazują, że istotna różnica między średnimi dotyczyła jedynie porównania między typem połączenia zakładkowego vs. połączenia typu sandwich przy zastosowaniu grubości materiału płaskownika M2 o $g_2 = 6\text{mm}$ (wartość $p = 0,035$ dla testu t Studenta).

Porównanie skrajnych układów takich jak próbki typu zakładkowego „Zakł., Cr-Cr, 6 mm” vs. „Zakł., Cr-AL, 4 mm” daje istotne różnice ($p=0,020$). Oznacza to, że efekt różnicujący nasilił się przy wystąpieniu różnej grubości materiału płaskownika M2, jak i różnych materiałów łączących.

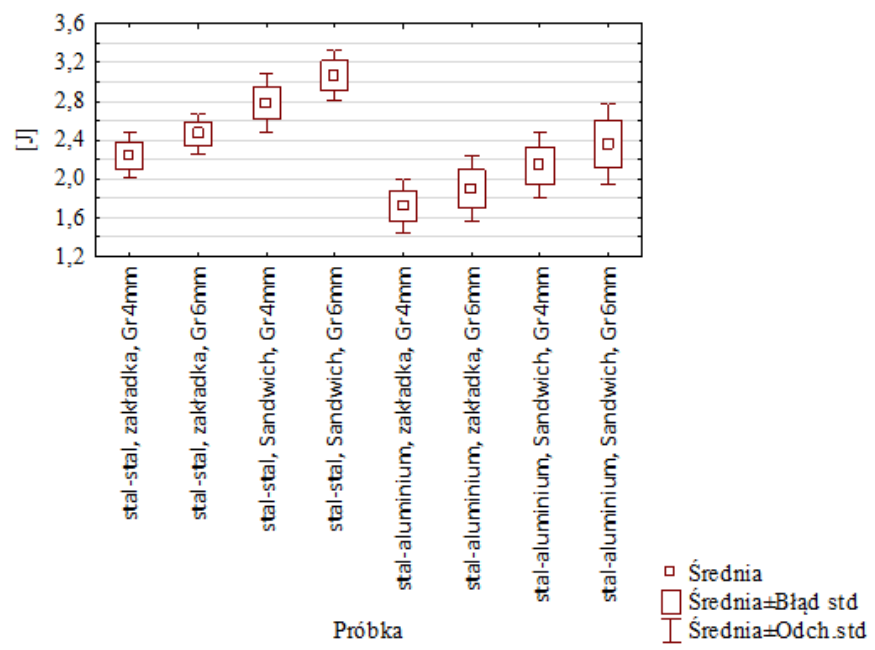
Różnice istotne występują w porównaniu próbek typu sandwich, lecz różniących się rodzajem i grubości płaskownika M2: „Sand., Cr-Cr, 4 mm” vs. „Sand., Cr-AL, 6 mm” ($p = 0,027$). Efekt ten bardziej się nasilił w porównaniu „Sand., Cr-Cr, 6 mm” vs. „Sand., Cr-AL, 4 mm”.

Dane przedstawione na rysunkach od 6.1 do 6.4 poddano regresji wielorakiej, której wyniki przedstawiono w tabeli 6.2. W regresji wielorakiej wykorzystano trzy wymiary jako zmienne niezależne, tj. rodzaj materiału (Cr-Cr – 1; Cr-AL – 0) oraz typ próbki (Zakł. – 1; Sand. – 0), jak i grubość materiału płaskownika M2 (G4mm – 1; G6mm – 0). Zmienną zależną w tym wielowymiarowym układzie była praca niszcząca W [J].

Uzyskany model jest istotny statystycznie, gdzie $R^2 = 0,730$ a $p < 0,001$. Średni błąd procentowy (MPE) utworzonego modelu jest na poziomie 1,29%. Dla poszczególnych składowych wykazano, że istotnym czynnikiem jest materiał płaskownika M2, jak również typ próbki.

Zastosowanie stali, jako materiału na płaskownik M2, wpłynęło na wyniki pracy niszczącej W, które są średnio wyższe o 0,613J ($p < 0,001$) od wyników dla stopu AW-5754. W przypadku próbki typu sandwich wyniki pracy są większe średnio o 0,505 J ($p < 0,001$) od wyników dla próbek zakładkowych. Brak istotnych różnic dotyczy grubości materiału płaskownika M2, choć i w tym przypadku widać pewną tendencję statystyczną. Oznacza to, że oba

czynniki mają istotny statystyczny wpływ na model matematyczny jaki utworzono.



Rys. 6.5. Zestawienie wyników średnich dla rezultatów z podziałem na utworzone grupy

Tabela 6.2. Zestawienie wyników obliczeń regresji wielorakiej

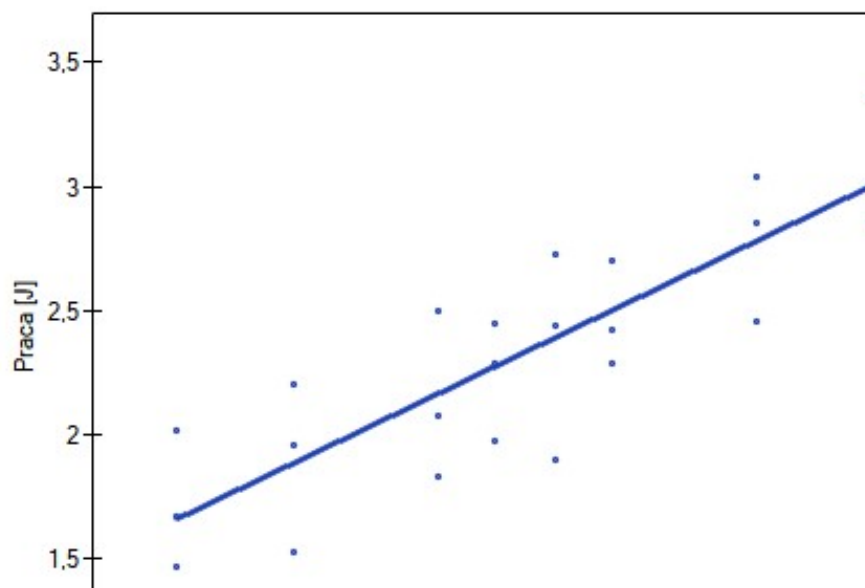
Zmienne	Wartości parametrów					Wartość p
	Wsp. b	Błąd b	-95% CI	+95% CI	Stat. t	
Wyraz wolny	1,709	0,298	1,088	2,330	5,740	<0,001
Materiał (Cr-Cr – 1; Cr-AL. – 0)	0,613	0,113	0,379	0,848	5,450	<0,001
Typ próbki (Zakł. – 1; Sand. – 0)	0,505	0,113	0,740	0,270	4,487	<0,001
Grubość g ₂ (G4mm – 1; G6mm – 0)	0,114	0,056	-0,003	0,232	2,029	0,056

Oznaczenie:

- Wsp. b – wielkość zmiany wartości pracy w zależności od zmiany parametru o 1,
- Błąd b. – wielkość błędu wsp. b,
- CL -95%+95% – przedział ufności wsp. b

Graficzne przedstawienie wyników rzeczywistych pracy niszczącej W względem utworzonego modelu obliczeniowego zawarto na rysunku 6.6.

Analizując wyniki badań przedstawione na rysunkach 6.1÷6.4 można stwierdzić, że na wartość pracy niszczącej W złącze klejone wpływa grubość warstwy kleju dla każdego wariantu wykonania próbek. Obliczenia wartości różnic względnych dla poszczególnych przypadków obiektów badań przedstawiono w tabelach: tabela 6.3 (rys. 6.1), tabela 6.4 (rys. 6.2), tabela 6.5 (rys. 6.3) i tabela 6.6 (rys. 6.4). Obliczenia różnic względnych przeprowadzono według zależności przedstawionych w tabelach 6.3÷6.6 w kolumnach 6÷9. Symbole użyte we wzorach (A, B, C i D) opisują kolumny tabeli 2÷5.



Rys. 6.6. Zestawienie zależności pracy wykonanej podczas próby względem wartości przewidywanej uzyskanej z modelu regresji wielorakiej

Tabela 6.3. Wartości różnic pomiędzy wynikami badań próbek wykonanych w całości ze stali 41Cr4

Elementy próbki: M1 – 41Cr4, M2 – 41Cr4								
Grubość warstwy kleju g_3 , mm	Wyniki badań doświadczalnych				Wartości różnic wg wzorów			
	Zakł., $g_2 = 4$ mm	Zakł., $g_2 = 6$ mm	Sand., $g_2 = 4$ mm	Sand., $g_2 = 6$ mm	$\frac{((B-A)/A)}{x 100\%}$	$\frac{((D-C)/C)}{x 100\%}$	$\frac{((C-A)/A)}{x 100\%}$	$\frac{((D-B)/B)}{x 100\%}$
	A	B	C	D	%	%	%	%
2	2,45	2,70	3,04	3,36	9,2	10,4	24,3	24,5
3	2,29	2,42	2,85	3,00	5,5	4,4	24,4	24,3
4	1,98	2,29	2,46	2,85	15,7	16,8	24,1	24,2

Tabela 6.4. Wartości różnic pomiędzy wynikami badań próbek wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754

Elementy próbki: M1 – 41Cr4, M2 – AW-5754								
Grubość warstwy kleju g_3 , mm	Wyniki badań doświadczalnych				Wartości różnic wg wzorów			
	Zakł., $g_2 = 4$ mm	Zakł., $g_2 = 6$ mm	Sand., $g_2 = 4$ mm	Sand., $g_2 = 6$ mm	$\frac{((B-A)/A)}{x 100\%}$	$\frac{((D-C)/C)}{x 100\%}$	$\frac{((C-A)/A)}{x 100\%}$	$\frac{((D-B)/B)}{x 100\%}$
	A	B	C	D	%	%	%	%
2	2,02	2,20	2,50	2,73	9,0	9,2	24,0	24,3
3	1,67	1,96	2,08	2,44	12,5	17,4	24,5	24,4
4	1,47	1,53	1,83	1,90	8,2	3,7	24,7	24,2

Tabela 6.5. Wartości różnic pomiędzy wynikami badań próbek o grubości płaskownika $g_2 = 4$ mm

Grubość płaskownika $g_2 = 4$ mm								
Grubość warstwy kleju g_3 , mm	Wyniki badań doświadczalnych				Wartości różnic wg wzorów			
	Zakł., Cr-Cr	Zakł., Cr-AW	Sand., Cr-Cr	Sand., Cr-AW	$\frac{((B-A)/A)}{x 100\%}$	$\frac{((D-C)/C)}{x 100\%}$	$\frac{((C-A)/A)}{x 100\%}$	$\frac{((D-B)/B)}{x 100\%}$
	A	B	C	D	%	%	%	%
2	2,45	2,02	3,04	2,50	-11,6	-17,8	24,3	24,0
3	2,29	1,67	2,85	2,08	-24,2	-27,1	24,4	24,5
4	1,98	1,47	2,46	1,83	-27,9	-25,5	24,1	24,7

Tabela 6.6. Wartości różnic pomiędzy wynikami badań próbek o grubości płaskownika $g_2 = 6$ mm

Grubość płaskownika $g_2 = 6 \text{ mm}$								
Grubość warstwy kleju g_3 , mm	Wyniki badań doświadczalnych				Wartości różnic wg wzorów			
	Zakł., Cr-Cr	Zakł., Cr-AW	Sand., Cr-Cr	Sand., Cr-AW	$\frac{(B-A)}{A} \times 100\%$	$\frac{(D-C)}{C} \times 100\%$	$\frac{(C-A)}{A} \times 100\%$	$\frac{(D-B)}{B} \times 100\%$
	A	B	C	D	%	%	%	%
2	2,70	2,20	3,36	2,73	-15,3	-18,6	24,5	24,3
3	2,42	1,96	3,00	2,44	-20,9	-18,8	24,3	24,4
4	2,29	1,53	2,85	1,90	-29,8	-33,2	24,2	24,2

Analizując wartości różnic przedstawione w tabelach 6.3÷6.6 można stwierdzić, że dla przyjętych grubości kleju g_3 wartości wynoszą:

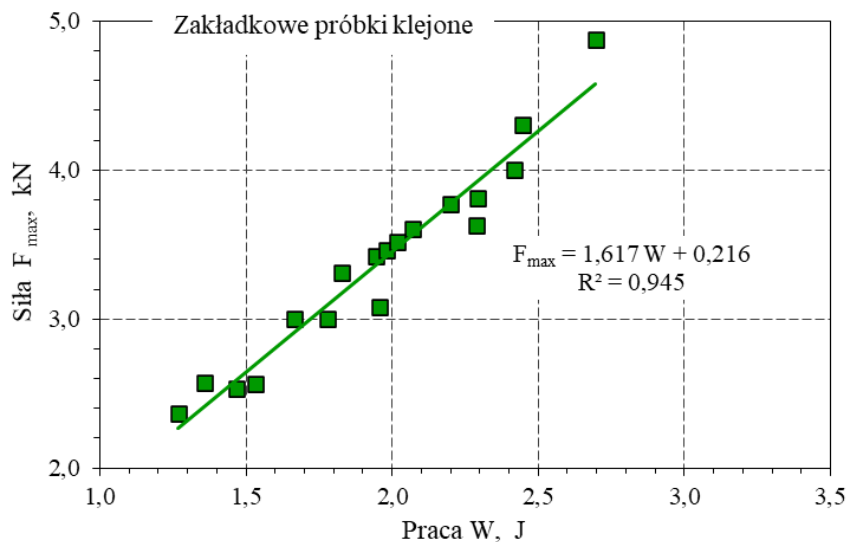
- a) dla próbek typu sandwich wartość różnic względnych wynosi:
 - dla próbek wykonanych w całości ze stali 41Cr4 i zmiennej grubości płaskownika M2: 4,4%÷16,8%,
 - dla próbek wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754, oraz zmiennej grubości płaskownika M2: 3,7%÷17,4%,
 - dla stałej grubości płaskownika $g_2 = 4 \text{ mm}$ i zmiennego rodzaju materiału płaskownika M2: -17,8%÷-27,1%,
 - dla stałej grubości płaskownika $g_2 = 6 \text{ mm}$ i zmiennego rodzaju materiału płaskownika M2: -18,6%÷-33,1%,
- b) dla zakładkowych próbek klejonych wartość różnic względnych wynosi:
 - dla próbek wykonanych w całości ze stali 41Cr4 i zmiennej grubości płaskownika M2: 5,5%÷15,7%,
 - dla próbek wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754, oraz zmiennej grubości płaskownika M2: 8,2%÷12,5%,
 - dla stałej grubości płaskownika $g_2 = 4 \text{ mm}$ i zmiennego rodzaju materiału płaskownika M2: -11,6%÷-27,9%,
 - dla stałej grubości płaskownika $g_2 = 6 \text{ mm}$ i zmiennego rodzaju materiału płaskownika M2: -15,3%÷-29,8%,

Wartości różnic względnych wskazuje, że dla obydwu typu próbek na wartość pracy niszczącej połączenie klejone ma wpływ: rodzaj materiału płaskownika M2, jego grubość oraz grubość warstwy kleju g_3 . Najwyższe wartości pracy uzyskano dla: grubości warstwy kleju $g_3 = 2 \text{ mm}$, płaskownika M2 wykonanego ze stali 41Cr4 o grubości $g_2 = 6 \text{ mm}$. Natomiast najniższe wartości wyznaczono dla: grubości warstwy kleju $g_3 = 4 \text{ mm}$, płaskownika M2

wykonanego ze stopu aluminium AW-5754 o grubości $g_2 = 4$ mm. Wartości pracy dla grubości $g_3 = 3$ mm mieściły się pomiędzy wartościami dla $g_3 = 2$ mm i $g_3 = 4$ mm. Zastanawiająca jest zbieżna wartość różnic dla obydwu typu próbek. Można ją wytłumaczyć jedynie dużą starannością wykonywania próbek, podobnym okresem sezonowania oraz poprawnością wykonania badań doświadczalnych.

Analiza porównawcza wyników badań uzyskanych dla zakładkowych próbek klejonych z wynikami dla próbek typu sandwich wskazuje na bardzo dużą zgodność wyników dla wszystkich wariantów ich wykonania. Wartości różnic względnych mieszczą się w zakresie od 24,0% do 24,7%. Niewielki rozrzut wyników badań pozwala na określenie wartości współczynnika, który umożliwi przeliczenie wyników uzyskanych dla próbek typu sandwich na próbki typu zakładkowego.

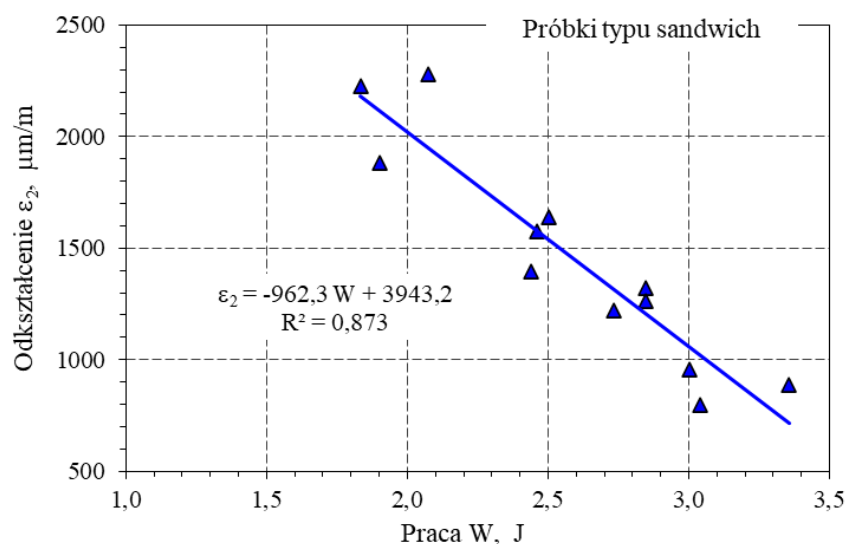
Na rysunku 6.7 przedstawiono zależność pomiędzy maksymalną siłą niszczącą połączenie zakładkowe a pracą niszczącą W . Do wyznaczenia zależności $F_{\max} = f(W)$ wykorzystano wszystkie wyniki uzyskane podczas badań.



Rys. 6.7. Zależność $F_{\max} = f(W)$ wyznaczona na podstawie wyników badań zakładkowych próbek klejonych

Aproksymacja liniowa wyników badań (rys. 6.7) wskazuje na występowanie zależności pomiędzy siłą F_{\max} a pracą niszczącą W , o czym świadczy bardzo wysoka wartość współczynnika determinacji $R^2 = 0,945$.

Na rysunku 6.8 przedstawiono zależność pomiędzy odkształceniem ε_2 a pracą niszczącą W . Do wyznaczenia zależności $\varepsilon_2 = f(W)$ wykorzystano wszystkie wyniki uzyskane podczas badań.



Rys. 6.8. Zależność $\varepsilon_2 = f(W)$ wyznaczona na podstawie wyników badań próbek typu sandwich

Aproksymacja liniowa wyników badań (rys. 6.8) wskazuje na występowanie zależności pomiędzy odkształceniem ε_2 a pracą niszczącą W , o czym świadczy wysoka wartość współczynnika determinacji $R^2 = 0,873$.

Przeprowadzone badania doświadczalne potwierdzają możliwość realizacji badań złączy klejonych w warunkach obciążeń statycznych z zastosowaniem próbek typu sandwich. Świadczy o tym duża zgodność wyników badań próbek typu sandwich z wynikami badań zakładkowych próbek klejonych. Należy zaznaczyć, że weryfikację przeprowadzono dla ściśle określonych: cech geometrycznych próbek, sposobu ich wykonania i warunków realizacji badań.

7. Posumowanie i wnioski

7.1. Wnioski i spostrzeżenia z realizacji badań

Osiągnięciem naukowym pracy jest weryfikacja doświadczalna metody oceny uszkodzenia złącza klejonego na podstawie badań próbek typu sandwich. Przeprowadzony szeroki zakres badań wykazał, że istnieje możliwość oceny uszkodzenia złącza klejonego poprzez pomiar wartości odkształceń elementu poddanego obciążeniu. Określono także wartość pracy potrzebnej do zniszczenia badanego złącza.

Sformułowana teza badawcza o treści: *„metoda oceny wytrzymałości grubych złączy klejonych z zastosowaniem próbek typu sandwich pozwala na precyzyjne określenie maksymalnej wartości odkształcenia elementu konstrukcyjnego poddanego obciążeniu prowadzącemu do zniszczenia połączenia w warunkach obciążeń statycznych.”*, może być przyjęta na podstawie uzyskanych wyników testów.

Zaproponowana procedura badawcza oparta na zastosowaniu próbek typu sandwich wykazała, wysoką zgodność wyników w ujęciu pracy niszczącej z wynikami uzyskanymi dla zakładkowych próbek klejonych dla ściśle określonych: cech geometrycznych próbek, sposobu ich wykonania i warunków realizacji badań.

Analiza wyników badań doświadczalnych w ramach realizacji rozprawy doktorskiej pt.: *„Metoda badań wytrzymałości złącza klejonego z zastosowaniem próbki typu sandwich”* pozwoliła na sformułowanie szeregu uwag i wniosków:

- a) zastosowanie w badaniach próbek typu sandwich pozwala na określenie maksymalnej wartości odkształcenia elementów prowadzących do uszkodzenia złącza klejonego oraz wartość pracy niszczącej to złącze,
- b) najniższe wartości odkształcenia ε_2 osiągnięto dla grubości warstwy kleju $g_3 = 2$ mm i najwyższej sztywności płaskownika M2, co wynika z wyznaczonych zależności $\varepsilon_{2\text{ sr}} = f(g_3)$,
- c) na wartość pracy niszczącej ΔW złącze klejone w próbkach typu sandwich wpływa: grubość warstwy kleju g_3 , grubość i rodzaj materiału płaskownika M2, co wynika z wyznaczonych zależności $\Delta W_{\text{sr}} = f(g_3)$,
- d) najwyższe wartości siły F_{max} uzyskano dla zakładkowych próbek klejonych o: grubości warstwy kleju $g_3 = 2$ mm oraz grubości płaskownika M2 wynoszącej $g_2 = 6$ mm, co wynika z wyznaczonych zależności $F_{\text{max sr}} = f(g_3)$ oraz $F_{\text{max sr}} = f(g_2)$,

- e) na wartość pracy niszczącej W zakładkowe próbki klejone wpływa: grubość warstwy kleju g_3 , grubość i rodzaj materiału płaskownika M_2 , co wynika z wyznaczonych zależności $W_{sr} = f(g_3)$ i $W_{sr} = f(g_2)$,
- f) badania wykazały liniową zależność pomiędzy parametrami będącymi wynikiem testów ($\varepsilon_2 = f(W)$ i $F_{max} = f(W)$), które uzyskano dla ściśle określonych: cech geometrycznych próbek, sposobu ich wykonania i warunków realizacji badań.

Istotną wadą metodyki badawczej opartej na próbkach typu sandwich jest ich złożona budowa i koszt wykonania. Wykonanie próbki wymaga przeprowadzenia wielu operacji technologicznych, w których należy użyć specjalistycznych przyrządów w celu uzyskania powtarzalności obiektów badań.

Należy także zauważyć, że belka M_1 próbki typu sandwich musi być wykonana z materiału, który podczas obciążeń będzie odkształcał się w zakresie obowiązywania prawa Hooke’a. W innym przypadku, uzyskane wyniki nie pozwolą na właściwą ocenę parametrów uszkodzenia złącza klejonego.

Wykonane symulacje numeryczne metodą MES wykazały, że w spoinach klejonych próbki typu sandwich występuje złożony stan odkształceń, który zależy od wielu czynników geometrycznych i materiałowych próbki.

Przeprowadzone badania doświadczalne, których wyniki wykorzystano do realizacji rozprawy doktorskiej wykonano na: 90-ciu zakładkowych próbkach klejonych i 60-ciu próbkach typu sandwich (łącznie liczba próbek wynosi 150 sztuk). Pragnę nadmienić, że we wskazanej liczbie nie ujęto próbek wykorzystanych na etapie badań wstępnych.

Realizacja niniejszej rozprawy doktorskiej pozwoliła na wykonanie trzech zgłoszeń patentowych do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej dotyczących metodyki badań złączy klejonych oraz procesu wykonywania próbek [P1, P2, P3]. Uzyskano jeden patent [P3], a dwa rozwiązania oczekują na weryfikację Urzędu [P1, P2].

7.2. Wnioski do dalszych badań

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych i analizy wyników sformułowano wnioski mogące stanowić punkt wyjścia do dalszych badań.

W analizie wyników badań Autorka nie zajmowała się analizą wyników pomiarów odkształceń ε_3 i ich związku z wartością pozostałych odkształceń (ε_1

i ε_2) w kontekście zmiennych grubości warstwy kleju g_3 i sztywności elementu M2.

Przypuszcza się, że istnieje fizyczny związek pomiędzy wartościami odkształceń ε_3 i ε_2 pozwalający na wyznaczenie matematycznego modelu określającego maksymalną wartość odkształceń w warstwie kleju. Ten aspekt będzie przedmiotem dalszych dociekań Autorki.

Badania doświadczalne przeprowadzono na próbkach badawczych, w których klej użyty do wykonania złącza posiadał wydłużenie $\varepsilon = 10\%$ (wg danych producenta). Wydaje się uzasadnione przeprowadzenie weryfikacji doświadczalnej metodyki badań dla klejów charakteryzujących się wyższą wartością wydłużenia ($\varepsilon > 10\%$).

Możliwości wykorzystania próbek typu sandwich zweryfikowano dla określonych cech geometrycznych i materiałowych w warunkach obciążeń statycznych. Celowym jest przeprowadzenie oceny możliwości zastosowania próbek w badaniach w warunkach obciążeń zmiennych np. o wartości współczynnika asymetrii cyklu $R = 0$.

Ważnym aspektem eksploatacji elementów konstrukcyjnych jest zachowanie się złączy klejonych w warunkach długotrwale działających obciążeń statycznych. Wydaje się, że próbka typu sandwich może być użyta do oceny wytrzymałości na pełzanie tego typu złączy.

Literatura

Książki i artykuły naukowe:

- [1] Adams R. D., Wake W. C., *Structural Adhesive Joints in Engineering*, Elsevier, 1984.
- [2] Akhavan-Safar A., Ayatollahi M. R., Bahreinian S. A., da Silva L. F. M., Application of adhesively bonded single lap joints for fracture assessment of adhesive materials, *Journal of Adhesion*, vol. 95, issue: 3, 2017, pp. 1-22.
- [3] Allen K. W., A Review of Contemporary Views of Theories of Adhesion, *Journal of Adhesion*, 21, 3-4, 1987, pp.261-277.
- [4] Allen K. W., Current theories of adhesion and their relevance to adhesive technology, *Journal de Physique IV Proceedings*, EDP Sciences, 03 (C7), 1993, pp.1511-1516.
- [5] Altan G., Topçu M., Çağlıoğlu H., The Effects of the Butterfly Joints on Failure Loads and Fatigue Performance of Composite Structures, *Science and Engineering of Composite Materials*, 17, 2010.
- [6] American Chemical Society, *The Bakelizer*, National Museum of American History Smithsonian Institution, November 9, 1993, pp.1-8.
- [7] Aubert M., Brumm A., Huntley J., Early dates for ‘Neanderthal cave art’ may be wrong, *Journal of Human Evolution* 125, 2018, pp.215-217.
- [8] Balkova R., Holcnerova S., Cech V., Testing of adhesives for bonding of polymer composites, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 22 (4), 2002, pp.291–295.
- [9] Banea M., da Silva L.F.M., Campilho, R., Moulds design for adhesive bulk and joint specimens manufacturing, *Assembly Automation*, 32, 2012, pp.284–292.
- [10] Banea M.D., da Silva L.F.M., Adhesively bonded joints in composite materials: an overview, *Proc IMECHE*. 223, 2009, pp.1–18.
- [11] Bauer M., Dilger K., Vieth S., *Debonding technologies for adhesive bonded structures*, Von der Fakultät für Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, 1981.
- [12] Bernaciak M. M., *Klejenie tworzyw sztucznych - poradnik*, AMB Technic, 2015, pp.1-148.
- [13] Bernasconi A., Beretta S., Moroni F., Pirondi A., Local Stress Analysis of the Fatigue Behaviour of Adhesively Bonded Thick Composite Laminates, *The Journal of Adhesion*, 86, (5–6), 2010, pp.480–500.
- [14] Bikerman J. J., *The science of adhesive joints*, Academic Press, 1968, pp.1- 349.
- [15] Blanchard C., Chateauminos A., Vincent, L., A new testing methodology for the assessment of fatigue properties of structural adhesives, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 16, 1996, pp.289–299.
- [16] Boëda É., Bonilauri S., Connan J., Jarvie D., Mercier N., Tobey M., Valladas H., al Sakhel H., New Evidence for Significant Use of Bitumen in Middle Palaeolithic Technical Systems at Umm el Tlel (Syria) around 70,000 BP, *Paléorient*, Vol. 34, No. 2, 2008, pp.67-83.
- [17] Bracco G., Holst B., *Surface Science Techniques*, Springer Series in Surface Sciences 51, 2013.
- [18] Brockmann W., Geiss P. L., *The historical development of adhesive bonding w: Adhesive bonding : materials, applications and technology*, Willey, 2008, pp.5-10.
- [19] Budhe S., Ghumatkar A., Birajdar N., Banea M.D., Effect of surface roughness using different adherend materials on the adhesive bond strength, *Applied Adhesion Science*, 3:20, 2015, DOI 10.1186/s40563-015-0050-4.

- [20] Butt H. J., Graf K., Kappl M., *Physics and Chemistry of Interfaces*, Wiley, Weinham, 2003, pp.1-376.
- [21] Cabral T.D., *A first approach to structural health monitoring of adhesive bonded joints in pipelines using integrated fiber optic sensors*, University of Campinas, 2016.
- [22] Campbell F. C., *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, 2003.
- [23] Chodkowski M. P., Terpiłowski K., *Significance of the receding contact angle in the determination of surface free energy*, *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, Lublin*, 73, 1, 2018, pp.61- 80.
- [24] Cope B. C., *Adhesive classification*, w: *Handbook of adhesion* (ed. D.E.Packham), Wiley, 2005, pp.25-28.
- [25] da Costa Mattos H. S., Monteiro A. H., Palazzetti R., *Failure analysis of adhesively bonded joints in composite materials*, *Materials & Design*, 33, 2012, pp.242–247.
- [26] da Silva L. F. M., Adams R. D., Gibbs M., *Manufacture of adhesive joints and bulk specimens with high-temperature adhesives*, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 24, 1, 2004, pp.69–83.
- [27] da Silva L. F. M., Ferreira N.M, Richter-Trummer V., Marques E.A.S., *Effect of grooves on the strength of adhesively bonded joints*, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 30, 8, 2010, pp.735–743.
- [28] Dean G.D., Duncen B.C., Adams R.D., Thomas R., Vaughn L., *Basic mechanical properties for design*, 1996.
- [29] Delmonte J., *The Technology of Adhesives*, LLC, 2012, pp.1-526 .
- [30] Derjaguin B. V., Smilga V. P., *Electronic Theory of Adhesion*, *Journal of Applied Physics*, 38, 4609, 1967, pp.4609-4616.
- [31] Deryagin B. V., Krotova N. A., Knyazeva N. P., *Appearance of penetrating radiation when adhesive contact is disturbed*, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 215, 5, 1974, pp.1078–1081.
- [32] Dickinson J.T., Jensen L.C., Lee S., Scudiero L., Langford S.C., *Fracto-emission and electrical transients due to interfacial failure*, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 8, 11, 1994, pp.1285-1309.
- [33] Dillard D. A., Chaudhury A. V., Pocius M., *Mechanics of Adhesion*, Elsevier, 2002.
- [34] Domińczuk J., *Właściwości adhezyjne warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych*, *Postępy Nauki i Techniki*, 9, 2011, pp.28-37.
- [35] Dutkiewicz E. T., *Fizykochemia powierzchni*, WNT Warszawa, 1998, pp.1-245.
- [36] Ebnesajjad S., *History of adhesives*, w: *Handbook of adhesives and surface preparation - technology, applications and manufacturing*, Elsevier, 2011, pp.137-139.
- [37] Ebnesajjad S., *Classification of Adhesives and Compounds*, w książce: *Adhesives Technology Handbook*, 2015, pp.67-83.
- [38] Fay P. A., *History of adhesive bonding*, w: *Adhesive bonding - science, technology and applications* (edited by R.D. Adams), CRC Press, 2005, pp.3-22.
- [39] Fessel G., Broughton J.G., Fellows N., Durodola J., Hutchinson A., *Fatigue performance of metallic reverse-bent joints*, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 32, 2009, pp.704–712.
- [40] Fic S. B., *Adhezja i samoorganizacja struktury materiału w tworzeniu konstrukcji*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2019, pp.1-301.
- [41] Godzimirski J., *Analiza wpływu grubości skleiny na wartość naprężeń dopuszczalnych kleju*, *Biuletyn WAT*, 2, 354, 1982.

- [42] Godzimirski J., Komorek A., Wpływ czynników konstrukcyjnych na trwałość zmęczeniową połączeń klejowych, *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, 56, 2, 2007, pp.167–177.
- [43] Godzimirski J., Kozakiewicz J., Łunarski J., Zielecki W., *Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn*, OWPR Rzeszów, 1997.
- [44] Godzimirski J., Określenie właściwości mechanicznych spoin klejonych, *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 3, 4, 2004, pp.95–97.
- [45] Godzimirski J., Rośkowicz M., Wytrzymałość doraźna i długotrwała oraz pełzanie kleju Epidian 57, *Polimery*, 47, 10, 2002, pp.721–726.
- [46] Godzimirski J., *Tworzywa adhezyjne Zastosowanie w naprawach sprzętu wojskowego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2010.
- [47] Grączewski A., *Wytrzymałość i trwałość zmęczeniowa złączy spawanych wykonanych ze stopu aluminium EN AW-5754, rozprawa doktorska*, 2022.
- [48] Hamraoui A., Nylander T., Analytical Approach for the Lucas–Washburn Equation, *Journal of Colloid and Interface Science*, 250, 2002, pp.415–421.
- [49] Harkins W. D., Livingston H.K., Energy Relations of the Surfaces of Solids II. Spreading Pressure as Related to the Work of Adhesion Between a Solid and a Liquid, *Journal of Chemical Physics*, 10, 6, 1942, pp.342- 356.
- [50] Harris A. F., Beevers A., The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 19, 6, 1999, pp.445–452.
- [51] He X., A review of finite element analysis of adhesively bonded joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31, 4, 2011, pp.248–264.
- [52] Henshilwood C., d’Errico F., van Niekerk K. L., et al., An abstract drawing from the 73,000-year-old levels at Blombos Cave, South Africa, *Nature* 562, 2018, pp.115–118.
- [53] Houjou K., Shimamoto K., Akiyama H., Sato C., Dependence of fatigue limit on stress ratio and influence of cyclic stress on shear strength for an adhesive lap joint, *The Journal of Adhesion*, 2020, pp.1–13.
- [54] Ishii K., Imanaka M., Nakayama H., Kodama H., Fatigue failure criterion of adhesively bonded CFRP/metal joints under multiaxial stress conditions, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29, 4, 1998, pp.415–422.
- [55] James K. K., *Structural adhesives and bonding*, Proceedings of the Structural Adhesives Bonding Conference, arranged by Technology Conference Associates, El Segundo, 1979.
- [56] Jańczuk B., Białopiotrowicz T., The total surface free energy and the contact angle in the case of low energetic solids, *Journal of Colloid and Interface Science*, 140, 20, 1990, pp.362-372.
- [57] Jasińska A., Ligaj B., Karolewska K., Propozycja nowej procedury oceny wytrzymałości złączy klejonych stosowanych w budowie maszyn, *Rozdział monografii: Nauka niejedno ma imię...TOM VI*, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, 2018, pp.45-54.
- [58] Jasińska A., Ligaj B., Mazurkiewicz A., Experimental studies of adhesive joints in four-point static bending, 10th International Conference on Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering KOD 2018, Novi Sad, Serbia, June 6-8 2018, Published in a volume of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 393, 2018, 012032.
- [59] Jasińska A., Ligaj B., Wirwicki M., Maćkowiak P., Karolewska K., *Badania doświadczalne połączeń klejonych aluminium-szkło*, *Autobusy* 12, 2017, pp. 919-922.

- [60] Jeandrau J. P., Peyrac C., Lefebvre F., Renard J., Gantchenko V., Patamaprohm B., Guinault C., Fatigue Behaviour of Adhesive Joints, *Procedia Engineering*, 133, 2015, pp.508–517.
- [61] Jeevi G., Nayak S. K., Kader M. A., Review on adhesive joints and their application in hybrid composite structures, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 33, 14, 2019, pp.1497–1520.
- [62] Jen Y. M., Fatigue life evaluation of adhesively bonded scarf joints, *International Journal of Fatigue*, 36, 1, 2012, pp.30–39.
- [63] Jen Y. M., Ko C. W., Evaluation of fatigue life of adhesively bonded aluminum single-lap joints using interfacial parameters, *International Journal of Fatigue*, 32, 2, 2010, pp.330–340.
- [64] Jensen R.E., DeSchepper D.C., Flanagan D.P., Multivariate analysis of high through-put adhesively bonded single lap joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol: 89, 2016, pp.1-10.
- [65] Jones R., W. Hu W., Kinloch A. J., A convenient way to represent fatigue crack growth in structural adhesives, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 38, 2015, pp.379–391.
- [66] Keimel F. A., Historical development of adhesives and adhesive bonding, w: *Handbook of adhesive technology* (editet by A. Pizzi & K.L. Mittal), CRC Press, 2003, pp.1-12.
- [67] Kozłowski A., *Клеи и склеивание*, Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, 1976.
- [68] Kozowyk P. R., Soressi M., Pomstra D., Langejans G. H., Experimental methods for the Palaeolithic dry distillation of birch bark: implications for the origin and development of Neandertal adhesive technology, *Scientific Reports* 7, article number: 8033, 2017.
- [69] Krawczyk-Kłys I., Jaruga I., Właściwości adhezyjne powierzchni, *Technologia i Jakość Wytrobów*, 59, 2014, pp.28-35.
- [70] Kuczmaszewski J., *Fundamentals of metal-metal adhesive joint design*, 2006.
- [71] Kuczmaszewski J., *Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali*, WU Politechnika Lubelska, 1995.
- [72] Kim J., Lee S., Optimization of specimen design for accurate mechanical property evaluation in adhesive bonds, *Composite Structures* 214, pp.134–141, 2019, doi:10.1016/j.compstruct.2019.01.022.
- [73] Kumar S., Pandey P.C., Fatigue life prediction of adhesively bonded single lap joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31, 1, 2011, pp.43–47.
- [74] Kweon J.H., Jung J.W., Kim T.H., et al., Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding, *Compos Struct.* 75, 2006, pp.192–198.
- [75] Ligaj B., Szala G., *Hybrydowa metoda obliczeń trwałości zmęczeniowej, opracowanie monograficzne pod redakcją Józefa Szali*, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – Państwowego Instytutu Badawczego, Radom, 2013.
- [76] Lilleheden L., Mechanical properties of adhesives in situ and in bulk, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 14, 1, 1994, pp.31–37.
- [77] Maćkowiak P., *Analiza wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej zakładkowych połączeń klejonych wykonanych z materiałów o różnych właściwościach mechanicznych*, rozprawa doktorska, 2021.
- [78] Maćkowiak P., Ligaj B., Damage to adhesive single lap joint made of materials with different properties under static loading conditions, *Engineering Mechanics* (May)2017, 2017, pp.15–18.

- [79] Maćkowiak P., Ligaj B., Manufacture of specimens and mechanical properties determination of structural adhesives under static loading condition, *Engineering Mechanics* 24, 2018, pp.525–528.
- [80] Maćkowiak P., Ligaj B., Płaczek D., Kotyk M., Verification of Selected Failure Criteria for Adhesive Bonded Elements with Different Stiffness through the Use of Methacrylic Adhesive, *Materials*, 2020.
- [81] Maćkowiak P., Metody wyznaczania krzywych naprężenie - odkształcenie tworzyw adhezyjnych, *Postępy w Inżynierii Mechanicznej*, 8, 4, 2016, pp.53–61.
- [82] Maćkowiak P., Płaczek D., Sołtysiak A., Metody wyznaczania modułu Kirchhoffa i współczynnika Poissona dla tworzyw adhezyjnych, *Postępy w Inżynierii Mechanicznej*, 9, 5, 2017, pp.27–43.
- [83] Mahdawi A., Langer R., Karp J. M., A biodegradable and biocompatible gecko-inspired tissue adhesive, *PNAS* February 19, 105,7, 2008, pp.2307-2312.
- [84] Makkonen L., Misinterpretation of the Shuttleworth equation, *Scripta Materialia*, 66, 9, 2012, pp.627-629.
- [85] Mamiński M., Sedlačik J., *Kleje i procesy klejenia*, Wydawnictwo SGGW, 2016, pp.1-116.
- [86] Marcadon V., Nadot Y., Roy A., Gacougnolle J. L., Fatigue behaviour of T-joints for marine applications, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26, 7, 2006, pp.481–489.
- [87] Markolefas S. I., Papathanassiou T. K., Stress redistributions in adhesively bonded double-lap joints, with elastic-perfectly plastic adhesive behavior, subjected to axial lap-shear cyclic loading, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29, 7, 2009, pp.737–744.
- [88] Matting, A., Draugelates, U. 1968. Die Schwingfestigkeit von Metallklebverbindungen. *Adhäsion*. 12, 5–22.
- [89] Mazza P. P. A., Martini F., Sala B., A new Paleolithic discovery: tar-hafted stone tools in an European Mid-Pleistocene bone-bearing bed, *Journal of Archaeological Science*, 33, 9, 2006, pp.1310–1318.
- [90] Melander A., Linder J., Stensiö H., Larsson M., Gustavsson A., Björkman G., How defects in an adhesive layer influence the fatigue strength of bonded steel-sheet specimens, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 22, 5, 1999, pp.421–426.
- [91] Mirski Z., Piwowarczyk T., Historia klejenia od prehistorii do dzisiaj, *Przegląd Spawalnictwa* LXXX, 8, 2008, pp.3-11.
- [92] Moller J., Hunter R., Molina J., Vizán A., Pérez J., da Silva L. F. M., Influence of the temperature on the fracture energy of a methacrylate adhesive for mining applications, *Applied Adhesion Science*, 3, 14, 2015.
- [93] Nolting A., Underhill P., DuQuesnay D., Fatigue behavior of adhesively bonded aluminium double strap joints, *ASTM Special Technical Publication*, 1508, 2009, pp.761–777.
- [94] Onuseit H., *Adhesive Technology - basic principles*, Beuth Verlag, 2012.
- [95] Özer H., Öz Ö., The use of the exponential Drucker-Prager material model for defining the failure loads of the mono and bi-adhesive joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 76, 2017, pp.17–29.
- [96] Packham D. E., Johnston C., Mechanical adhesion: were McBain and Hopkins right? An empirical study, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 14, issue 2, 1994, pp.131-135.

- [97] Packham D. E., Theories of Fundamental Adhesion, w: Handbook of Adhesion Technology, Editors: da Silva L. F. M., Öchsner A., Adams R. D., Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp.11-39.
- [98] Pascoe M. W., Adhesives - historical perspective, w: Handbook of adhesion (D.E. Packham, editor), Willey, 2005, pp.28-32.
- [99] Piekarczyk M., Przegląd możliwości zastosowania technologii klejenia, Czasopismo Techniczne Budownictwo, 109, 1, 2012, pp.99–137.
- [100] Pinto A. M., Ribeiro N., Campilho R., Mendes I. R., Effect of adherend recessing on the tensile strength of single lap joints, Journal of Adhesion, 90, 8, 2014, pp.649–666.
- [101] Popov V. L., Pohrt R., Li Q., Strength of adhesive contacts: Influence of contact geometry and material gradients, Friction, 5, 3, 2017, pp.308-325.
- [102] Porębska M., Badanie wpływu napięcia wstępnego na nośność połączeń klejonych, Akademia Górniczo-Hutnicza, 1971.
- [103] Piwowarczyk T., Mirski Z., Klejenie w budowie pojazdów samochodowych, Przegląd Spawalnictwa, 2004, pp.5-7.
- [104] Piwowarczyk T., Mirski Z.: Klejenie metali, Przegląd Spawalnictwa, nr 6,2003.
- [105] Reburn A., Analysis of manufacturing parameters on the shear strength of aluminium/GFRP co-cured and adhesively bonded single-lap joints, The Plymouth Student Scientist, 9, 2, 2016, pp.195-230.
- [106] Richter C., Abeln B., Geßler A., Feldmann M., Structural steel–glass facade panels with multi-side bonding – Nonlinear stress – strain behaviour under complex loading situations, International Journal of Adhesion and Adhesives, 55, 2014, pp.18-28.
- [107] Rudawska A., Selected aspects of the effect of mechanical treatment on surface roughness and adhesive joint strength of steel sheets, International Journal of Adhesion and Adhesives, 50, 2014, pp.235–243.
- [108] Rudawska A., Wybrane zagadnienia konstituowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych, Politechnika Lubelska, 2013, pp.1-183.
- [109] Rudawska A., Wybrane zagadnienia konstituowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych, Politechnika Lubelska, 2013.
- [110] Schonhorn H., Adhesion fundamentals and practice, 1970, pp.12-20.
- [111] Schrader M. E., Spreading pressure in the Young equation and intermolecular force theory, Langmuir, 9, 1993, pp.1959-1961.
- [112] Sekiguchi Y., Katano M., Sato, C., Experimental study of the Mode I adhesive fracture energy in DCB specimens bonded with a polyurethane adhesive, The Journal of Adhesion, 93, 3, 2017, pp.235–255.
- [113] Skeist I., Miron J., History of adhesives, Journal of Macromolecular Science: part A – Chemistry, 15, 6, 1981, pp.1151-1163.
- [114] Tenchev R. T., Falzon B. G., An Experimental and Numerical Study of the Static and Fatigue Performance of a Composite Adhesive Repair, Key Engineering Materials, 383, 2008, pp.25–34.
- [115] Thomas R., Adams R D, Test methods for determining shear property data for adhesives suitable for design, ADH1 Report No 7, NPL, 1996.
- [116] Tomblin J., Senevirante W., Escobar P., Yap Y. K., Fatigue and Stress Relaxation of Adhesives in Bonded Joints, 94, 2003.
- [117] Ungureanu D., Taranu N., Lupasteanu V., Experimental and numerical investigation of adhesively bonded single lap and thick adherents jointsbetween pultruded GFRP composite profiles, Composites Part B - Engineering, vol. 46, 2018, pp.49-59.

- [118] Violano G., Demelio G. P., Afferante L., On the DMT adhesion theory: from the first studies to the modern applications in rough contacts, *Procedia Studia Integrity*, 12, 2008, pp.58-70.
- [119] Wake W. C., Teories od adhesion and uses of adhesives - a review, *Polymer*, 19, 3, 1978, pp.291-308.
- [120] Wolski Z., Fizyczne i chemiczne podstawy procesów technologicznych, rozdział II w: *Parkieciarz-podstawy wiedzy i praktyki zawodowej*, Stowarzyszenie Parkieciarze Polscy, 2007.
- [121] Zeng Q., Sun C., Fatigue performance of a bonded wavy composite lap joint, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 27, 2004, pp.413–422.
- [122] Zhang Y., Vassilopoulos A. P., Keller T., Stiffness degradation and fatigue life prediction of adhesively-bonded joints for fiber-reinforced polymer composites, *International Journal of Fatigue*, 30, 10, 2008, pp.1813–1820.
- [123] Zisma W.A., Relation of the Equilibrium Contact Angle to Liquid and Solid Constitution, w: *Contact Angle, Wettability and Adhesion*, vol. 43, 1964, pp.1–51.
- [124] Żenkiewicz M., *Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych*, WNT Warszawa, 2000.
- [125] Abenojar J., Pantoja M., Martínez M.A., Effect of adhesive thickness on the mechanical behavior of structural epoxy adhesive joints, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30(1), 2016, pp.17–31, doi:10.1080/01694243.2016.1208412.
- [126] Crocombe A.D., Ashcroft I.A., Abdel-Wahab M., Adhesive bonding: Structural applications, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 22(5), 2002, pp.391–397, doi:10.1016/S0143-7496(02)00028-1.
- [127] da Silva L.F.M., Adams, R.D., Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27(3), 2007, pp.227–235, doi:10.1016/j.ijadhadh.2006.02.005.
- [128] Campilho R.D.S.G., Banea M.D., Neto J.A.B.P., da Silva, L.F.M., Modelling and strength prediction of adhesively-bonded joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 57, 2015, pp.115–126, doi:10.1016/j.ijadhadh.2014.11.020.
- [129] Jarry P., Sheno, R.A., Thick adhesive bond line design and analysis, *Marine Structures*, 11(3), 1998, pp.103–126, doi:10.1016/S0951-8339(97)00021-5.
- [130] Jones A., Smith B., Innovations in material testing for engineering applications, *Journal of Engineering Science*, 15(4), pp.230–245, 2020, doi:10.1016/j.engsci.2020.04.002.
- [131] Wang T., Liu Y., Zhao H., Advanced techniques for evaluating adhesive joints under multiaxial stress conditions, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 85, 40–53, 2018, doi:10.1016/j.ijadhadh.2018.01.005.
- [132] Zhao Q., Li X., Zhang Y., Enhancing the reliability and durability of bonded joints in modern engineering through innovative testing methods, *Materials Science and Engineering: A*, 805, 140503, 2021, doi:10.1016/j.msea.2021.140503.

Normy:

- [N1] D 1002:2010, Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading.
- [N2] EN 13887:2005, Structural Adhesives - Guidelines for surface preparation of metals and plastics prior to adhesive bonding.
- [N3] PN-EN 923:2016, Kleje. Terminy i definicje.

- [N4] PN-EN 1465:2009, Kleje. Oznaczanie wytrzymałości na ścinanie przy rozciąganiu połączeń na zakładkę.
- [N5] PN-EN 15870:2009, Kleje. Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie połączeń czółowych.

Patenty i zgłoszenia wynalazków:

- [P1] Jasińska A., Ligaj B., Przyrząd do wykonywania próbek złączy klejonych typu sandwich, zgłoszenie patentowe nr P.432465, 2019.
- [P2] Ligaj B., Jasińska A., Karolewska K., Próbką do badań połączeń klejonych materiałów o istotnie różnych właściwościach fizycznych zwłaszcza stal-szkło, zgłoszenie patentowe nr P.422884, 2017.
- [P3] Ligaj B., Karolewska K., Jasińska A., Przyrząd wspomagający operację naklejania tensometrów na próbki do badań wytrzymałości i trwałości połączeń klejonych, PATENTU na wynalazek nr Pat.236915, 2020.

Strony internetowe:

- [W1] <http://www.4budowlani.pl/rodzaje-klejow-i-ich-zastosowania/> (dostęp: 17.05.2022r.).
- [W2] <https://multimedia.3m.com/mws/media/1453510O/3m-for-vehicle-manufacturers.pdf> (dostęp: 15.04.2022r.).
- [W3] <https://tantec.com/what-is-surface-treatment.html> (dostęp: 16.04.2022r.).
- [W4] <https://tantec.com/what-is-surface-treatment.html> (dostęp: 17.04.2022r.).
- [W5] <https://www.adhesivesmag.com/articles/93778-strategic-solutions-the-future-of-adhesives-and-sealants> (dostęp: 11.04.2022r.).
- [W6] https://www.multibond.pl/multibond-5824_klej_metakrylowy.htm (dostęp: 11.04.2022r.).
- [W7] <http://www.tenmex.pl/index.php?action=tensometry> (dostęp: 15.01.2022r.).
- [W8] <https://ctaltd.co.uk/product/crystal-clear-structural-methacrylate-adhesive-2155/> (dostęp: 15.05.2024r.).
- [W9] <https://www.parsonadhesives.com/partite-parbond/methacrylate-adhesives.htm> (dostęp: 15.05.2024r.).
- [W10] <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=c190480ff1534b94ae8afec9d9a8579&ckck=1> (dostęp: 15.05.2024r.).
- [W11] <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0193/1996/files/tds-asi-mp55420fslg.pdf?5305> (dostęp: 15.05.2024r.).
- [W12] <https://www.gluegun.com/products/mp-55420-high-performance-methacrylate-mma?variant=318314303> (dostęp: 15.05.2024r.).
- [W13] <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0193/1996/files/Loctite-AA-H4710-MMA-Adhesive-TDS.pdf?968> (dostęp: 15.05.2024r.).
- [W14] <https://www.rshughes.com/c/Methacrylate-Adhesives/2030/> (dostęp: 15.05.2024r.).
- [W15] <https://www.scigripadhesives.com/scigrip-sg5000-high-performance-methacrylate-structural-adhesive/> (dostęp: 15.05.2024r.).
- [W16] <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=fd5c2634a5e34defb62ddec21c66c0b> (dostęp: 15.05.2024r.).
- [W17] <https://itwperformancepolymers.com/products/plexus/general-purpose/plexus-ma300> (dostęp: 15.05.2024r.).
- [W18] https://www.multibond.pl/pdf/tds/MULTIBOND-5824_TDS.pdf (dostęp: 15.05.2024r.).

STRESZCZENIE

Metoda badań wytrzymałości złącza klejonego z zastosowaniem próbki typu „sandwich”

mgr inż. Anna Szymkowiak

Słowa kluczowe: połączenie klejone, wytrzymałość złącza klejonego, próbka typu „sandwich”

W ramach realizacji rozprawy doktorskiej zaplanowano i wykonano testy empiryczne, których głównym celem była doświadczalna weryfikacja możliwości zastosowania próbek typu sandwich do określenia maksymalnej wartości odkształcenia konstrukcji ε_2 oraz pracy niszczącej połączenie ΔW w momencie zniszczenia grubych złączy klejonych. Ocena wytrzymałości złącza klejonego bazowała na wyznaczeniu odkształcenia i pracy niszczącej badane złącze.

Pierwsza grupa testów dotyczyła badań zakładkowych próbek klejonych, których łączna liczba wynosiła 90 sztuk. Próbki zakładkowe wykonano według następujących wytycznych:

- a) płaskownik M1 posiadał stałą grubość $g_1 = 4$ mm i był wykonany ze stali 41Cr4,
- b) płaskownik M2 posiadał następujące cechy:
 - zmienny rodzaj materiału: stal 41Cr4, stop aluminium AW-5754,
 - zmienna grubość płaskownika g_2 : 2 mm, 4 mm, 6 mm,
- c) klej metakrylowy Multibond-5824, z którego utworzono spoiny o grubościach g_3 : 2 mm, 3 mm, 4 mm.

Badania przeprowadzono w warunkach obciążeń statycznych na podstawie normy PN-EN 1465-2009. Parametrem opisującym energię potrzebną do uszkodzenia próbki była praca W .

Próbki typu sandwich stanowiły drugą grupę testów, których łączna liczba wynosiła 60 sztuk. Wskazane próbki wykonano według następujących wytycznych:

- a) płaskownik M1 posiadał stałą grubość $g_1 = 4$ mm i był wykonany ze stali 41Cr4,
- b) płaskownik M2 posiadał następujące cechy:
 - zmienny rodzaj materiału: stal 41Cr4, stop aluminium AW-5754,
 - zmienna grubość płaskownika g_2 : 4 mm, 6 mm,
- c) klej metakrylowy Multibond-5824, z którego utworzono spoiny o grubościach g_3 : 2 mm, 3 mm, 4 mm.

Badania przeprowadzono w warunkach czteropunktowego zginania. Parametrem opisującym energię potrzebną do uszkodzenia próbki była praca W .

Analiza wartości różnic względnych wykazała, że dla obydwu typu próbek na wartość pracy niszczącej połączenie klejone ma wpływ: rodzaj materiału płaskownika M2, jego grubość (g_2) oraz grubość warstwy kleju (g_3). Najwyższe wartości pracy uzyskano dla: grubości warstwy kleju $g_3 = 2$ mm, płaskownika M2 wykonanego ze stali 41Cr4 o grubości $g_2 = 6$ mm. Natomiast najniższe wartości wyznaczono dla: grubości warstwy kleju $g_3 = 4$ mm, płaskownika M2 wykonanego ze stopu aluminium AW-5754 o grubości $g_2 = 4$ mm.

Analiza porównawcza wyników badań uzyskanych dla zakładkowych próbek klejonych z wynikami dla próbek typu sandwich wskazuje na bardzo dużą zgodność wyników dla wszystkich wariantów ich wykonania. Wartości różnic względnych mieszczą się w zakresie od 24,0% do 24,7%. Niewielki rozrzut wyników badań pozwala na określenie wartości współczynnika, który umożliwi przeliczenie wyników uzyskanych dla próbek typu sandwich na próbki typu zakładkowego.

Przeprowadzone badania doświadczalne potwierdzają możliwość realizacji oceny uszkodzenia złączy klejonych w warunkach obciążeń statycznych z zastosowaniem próbek typu sandwich. Świadczy o tym duża zgodność wyników badań próbek typu sandwich z wynikami badań zakładkowych próbek klejonych. Należy zaznaczyć, że weryfikację przeprowadzono dla ściśle określonych: cech geometrycznych próbek, sposobu ich wykonania i warunków realizacji badań.

ABSTRACT

Method of testing the strength of an adhesive joint using a "sandwich" sample

mgr inż. Anna Szymkowiak

Key words: adhesive connection, strength of the adhesive connection, „sandwich” sample

As part of the doctoral dissertation, empirical tests were planned and executed with the main objective of experimentally verifying the applicability of sandwich-type samples for determining the maximum strain value of the structure ε_2 , and the destructive energy ΔW at the failure point of thick adhesive joints. The evaluation of the adhesive joint's strength was based on measuring the strain and destructive energy of the tested joint.

The first group of tests involved investigating lap joint adhesive samples, with a total quantity of 90 pieces. The lap joint samples were prepared according to the following guidelines:

- d) flat bar M1 had a constant thickness of $g_1 = 4$ mm and was made of 41Cr4 steel,
- e) flat bar M2 had the following characteristics:
 - variable material type: 41Cr4 steel, AW-5754 aluminum alloy,
 - variable flat bar thickness g_2 : 2 mm, 4 mm, 6 mm,
- f) Multibond-5824 methacrylate adhesive, from which joints with thicknesses g_3 of 2 mm, 3 mm, and 4 mm were created.

The tests were conducted under static loading conditions based on the PN-EN 1465-2009 standard. The parameter describing the energy required to damage the sample was the work W .

The “sandwich” samples comprised the second group of tests, with a total quantity of 60 pieces. The indicated samples were prepared according to the following guidelines:

- d) flat bar M1 had a constant thickness of $g_1 = 4$ mm and was made of 41Cr4 steel,
- e) flat bar M2 had the following characteristics:
 - variable material type: 41Cr4 steel, AW-5754 aluminum alloy,
 - variable flat bar thickness g_2 : 4 mm, 6 mm,
- f) Multibond-5824 methacrylate adhesive, from which joints with thicknesses g_3 of 2 mm, 3 mm, and 4 mm were created.

The tests were conducted under four-point bending conditions. The parameter describing the energy required to damage the sample was the work W .

The analysis of relative difference values showed that for both types of samples, the value of destructive work for the adhesive bond is influenced by: the type of material of the plate M2, its thickness (g_2), and the thickness of the adhesive layer (g_3). The highest values of work were obtained for: adhesive layer thickness $g_3 = 2$ mm, plate M2 made of 41Cr4 steel with a thickness of $g_2 = 6$ mm. On the other hand, the lowest values were determined for: adhesive layer thickness $g_3 = 4$ mm, plate M2 made of aluminum alloy AW-5754 with a thickness of $g_2 = 4$ mm.

Comparative analysis of the research findings obtained for tabbed adhesive samples with the results for “sandwich” samples indicates a very high consistency of results for all variants of their production. The relative difference values fall within the range of 24.0% to 24.7%. The small spread of research findings allows determining a coefficient value that will enable the conversion of results obtained for “sandwich” samples to tabbed samples.

The conducted experimental research confirms the possibility of conducting strength tests of adhesive bonds under static load conditions using “sandwich” samples. This is evidenced by the high consistency of research results between “sandwich” samples and tabbed adhesive samples. It should be noted that the verification was conducted for strictly defined: geometric characteristics of the samples, their fabrication method, and the conditions of conducting the tests.