



Anna Rudawska

Wybrane zagadnienia konstytuowania
połączeń adhezyjnych
jednorodnych i hybrydowych

Lublin 2013

Wybrane zagadnienia konstytuowania
połączeń adhezyjnych
jednorodnych i hybrydowych

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 LUBLIN

Anna Rudawska

Wybrane zagadnienia konstytuowania
połączeń adhezyjnych
jednorodnych i hybrydowych



Politechnika Lubelska
Lublin 2013

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Elżbieta Bociąga, Politechnika Częstochowska
prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski, Politechnika Lubelska

Redakcja i skład: Tomasz Piech

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2013

ISBN: 978-83-63569-26-6

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatop.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 100 egz.

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń i akronimów stosowanych w rozprawie	7
---	---

Rozdział 1. Konstytuowanie właściwości adhezyjnych

1.1. Wprowadzenie	11
1.2. Właściwości adhezyjne	13
1.2.1. Adhezja i kohezja	13
1.2.2. Podstawowe teorie adhezji	15
1.3. Ocena właściwości adhezyjnych	20
1.3.1. Zwilżanie i kąt zwilżania	20
1.3.2. Swobodna energia powierzchniowa	24
1.3.3. Metody określania swobodnej energii powierzchniowej.....	26
1.3.4. Wytrzymałość adhezyjna	29
1.4. Metody konstytuowania właściwości adhezyjnych	29
1.4.1. Przygotowanie powierzchni.....	30
1.4.2. Metody modyfikowania warstwy wierzchniej	34
1.5. Wytrzymałość połączeń adhezyjnych	35
1.5.1. Wprowadzenie	35
1.5.2. Czynniki wpływające na wytrzymałość połączeń klejowych	40
1.6. Ocena stanu zagadnienia, wnioski i ustalenia.....	45
1.7. Tezy badawcze i cele rozprawy.....	46

Rozdział 2. Konstytuowanie właściwości adhezyjnych powierzchni wybranych materiałów konstrukcyjnych

2.1. Metodyka badań	49
2.1.1. Charakterystyka sposobów przygotowania powierzchni	49
2.1.2. Opis metody określania swobodnej energii powierzchniowej.....	51
2.2. Charakterystyka materiałów	52
2.2.1. Blachy ze stopów aluminium.....	52
2.2.2. Blachy tytanowe.....	59
2.2.3. Kompozyty polimerowe	65
2.3. Badania wpływu sposobu przygotowania powierzchni na właściwości adhezyjne	70
2.3.1. Swobodna energia powierzchniowa	70
2.3.2. Analiza statystyczna uzyskanych wyników SEP.....	73
2.4. Wnioski i ustalenia	78

Rozdział 3. Wytrzymałość połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych

3.1. Metodyka badań	81
3.2. Wytrzymałość połączeń adhezyjnych jednorodnych	83
3.3. Wytrzymałość połączeń adhezyjnych hybrydowych	88
3.3.1. Stop aluminium – tytan.....	89

3.3.2. Kompozyt polimerowy – stop aluminium.....	90
3.3.3. Kompozyt polimerowy – tytan	92
3.4. Analiza statystyczna wyników badań wytrzymałości	94
3.5. Wnioski i ustalenia	100

Rozdział 4. Wpływ swobodnej energii powierzchniowej na wytrzymałość połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych

4.1. Połączenia jednorodne.....	102
4.1.1. Połączenia zakładkowe	102
4.1.2. Połączenia doczołowe.....	107
4.2. Połączenia hybrydowe.....	110
4.2.1. Stop aluminium – tytan	110
4.2.2. Kompozyt polimerowy – stop aluminium	111
4.2.3. Kompozyt polimerowy – tytan.....	113
4.3. Wnioski i ustalenia	114

Rozdział 5. Analiza MES połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych

5.1. Wprowadzenie.....	115
5.2. Cel i zakres analizy MES	117
5.3. Model numeryczny spoiny klejowej i połączenia klejowego	117
5.3.1. Rodzaj siatki MES i elementów skończonych.....	118
5.3.2. Dyskretyzacja spoiny klejowej.....	120
5.3.3. Kryterium zniszczenia	121
5.3.4. Model numeryczny połączenia klejowego.....	122
5.3.5. Modele materiałowe.....	124
5.3.6. Siły niszczące połączenia adhezyjne jednorodne i hybrydowe	125
5.4. Analiza wybranych zagadnień procesu niszczenia połączeń klejowych jednorodnych i hybrydowych.....	127
5.5. Rozkład naprężenia i stan odkształcenia połączeń klejowych.....	132
5.5.1. Rozkład naprężenia normalnego	132
5.5.2. Rozkład naprężenia zredukowanego (H-M-H) oraz stan odkształcenia.....	135
5.6. Wnioski i ustalenia	139

Rozdział 6. Podsumowanie i wnioski

6.1. Podsumowanie	141
6.2. Wnioski	142
Streszczenie	147
Literatura	149
Spis tabel	173
Spis rysunków	176
Abstract.....	181

Wykaz ważniejszych oznaczeń i akronimów stosowanych w rozprawie

Oznaczenia

- Θ – kąt zwilżania mierzony na badanej powierzchni rzeczywistej
- Θ_Y – równowagowy kąt zwilżania
- Θ_d – kąt zwilżania diiodometanem
- Θ_w – kąt zwilżania wodą
- α – współczynnik istotności
- γ_L – swobodna energia powierzchniowa cieczy pomiarowej
- γ_{LV} – energia powierzchniowa na granicy faz ciecz – gaz
- γ_S – swobodna energia powierzchniowa ciała stałego
- γ_{SL} – energia powierzchniowa na granicy faz ciało stałe – ciecz
- γ_{SV} – energia powierzchniowa na granicy faz ciało stałe – gaz
- γ_{Lk} – swobodna energia powierzchniowa kleju
- γ_d – swobodna energia powierzchniowa diiodometanu
- γ_d^d – składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej diiodometanu
- γ_d^p – składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej diiodometanu
- γ_s^d – składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej badanych materiałów
- γ_s^p – składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej badanych materiałów
- γ_w – swobodna energia powierzchniowa wody
- γ_w^d – składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej wody
- γ_w^p – składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej wody
- γ^{AB} – składowa związana z oddziaływaniem kwasowo – zasadowym
- γ^{LW} – składowa związana ze wszystkimi oddziaływaniami dalekiego zasięgu
- γ^+ – składowa γ^{AB} odpowiadająca swobodnej energii powierzchniowej kwasu Lewisa
- γ^- – składowa γ^{AB} odpowiadająca swobodnej energii powierzchniowej zasadzie Lewisa
- δ – przemieszczenie
- δ_f – wartość efektywnej separacji odpowiadająca całkowitej utracie sztywności elementu skończonego

- δ_{in} – przemieszczenie węzłów elementu skończonego odpowiadające momentowi inicjacji zniszczenia
- η – lepkość kleju
- σ_{LV} – napięcie powierzchniowe na granicy faz ciecz – gaz
- σ_{SL} – napięcie powierzchniowe na granicy faz ciało stałe – ciecz
- σ_{SV} – napięcie powierzchniowe na granicy faz ciało stałe – gaz
- σ_z – naprężenie zredukowane według hipotezy H-M-H
- τ – naprężenie styczne
- τ_n – naprężenie niszczące
- τ_{sr} – średnie naprężenie styczne
- A – stała odpychania
- A_o – pole powierzchni przekrojów ścinanych
- B – stała przyciągania
- b – szerokość elementów klejonych
- E – współczynnik sprężystości wzdłużnej elementów łączonych
- E_p – energia potencjalna
- G_k – współczynnik sprężystości postaciowej kleju
- g – grubość elementów klejonych
- g_k – grubość spoiny klejowej
- H – hipoteza
- h – głębokość wnikania kleju we wgłębienia materiału chropowatego
- I – współczynnik de Bruyna
- K_{df} – współczynnik wytrzymałości długotrwałej
- l – długość elementów klejonych
- l_{gr} – graniczna długość zakładki (spoiny klejowej)
- l_u – długość przedziału ufności
- n – liczność próby
- n_0 – minimalna liczba pomiarów
- P – siła niszcząca
- P_t – siła styczna powodująca ścinanie
- R_a – średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości
- R_e – granica plastyczności materiałów konstrukcyjnych
- R_p – wysokość najwyższego wzniesienia profilu wewnątrz odcinka elementarnego
- R_{pk} – zredukowana wysokość wzniesień
- R_t – wytrzymałość doraźna (na ścinanie)
- R_{vk} – wgłębienia profilu nierówności
- R_z – średnia arytmetyczna wysokość pięciu najwyższych wzniesień

ponad linię średnią, pomniejszona o średnią pięciu najniższych
względnie poniżej linii średniej

- R_{zg} – wytrzymałość na zginanie
- $R_{z\ max}$ – średnia maksymalna wysokość chropowatości
- r – promień wglębenia materiału
- r_{ja} – odległość między jądrami atomów
- S – odchylenie standardowe
- S^2 – wariancja
- S_m – średni odstęp chropowatości
- $S13$ – naprężenie ścinające
- $S33$ – naprężenie „oddzierające”, naprężenie normalne prostopadłe do powierzchni spoiny klejowej
- t – obciążenie
- t_w – czas wnikania kleju we wglębenia materiału
- u – wartość przeciętna
- W – zbiór krytyczny
- W_a – praca adhezji
- \bar{X} – średnia arytmetyczna

Akronimy

- H-M-H – hipoteza wytrzymałościowa Hubera-Misesa-Hencky'ego
- O-W – metoda Owensa-Wendta
- O-Ch-G – metoda van Ossa-Chaudhury'ego- Gooda
- SEP – swobodna energia powierzchniowa

Rozdział 1.

Konstituowanie właściwości adhezyjnych

1.1. Wprowadzenie

Na przestrzeni wieków łączenie materiałów odgrywało istotną rolę w różnych dziedzinach życia [180]. Opracowano różne metody wykonywania połączeń, a jednymi z ważniejszych są połączenia oraz złącza adhezyjne [270, 339]. Wśród wielu z nich można wyróżnić połączenia i złącza powstałe w procesie klejenia, uszczelniania, malowania, drukowania, laminowania, zdobienia, nakładania powłok ochronnych i dekoracyjnych [28, 68, 177, 206, 213, 263, 327] w różnych gałęziach przemysłu [34, 177, 263, 268], a także w innych dziedzinach, np. sporcie i medycynie [327].

Istotną rolę podczas wykonywania połączeń adhezyjnych odgrywają zjawiska powierzchniowe, wpływające m.in. na możliwość uzyskania połączenia oraz jego jakość, wśród których szczególne znaczenie mają: adhezja, kohezja oraz zwilżalność.

Właściwości adhezyjne są jednymi z istotnych wskaźników określających poprawność przygotowania warstwy wierzchniej [34, 42, 158, 159, 170] do wykonywania połączeń lub złącz adhezyjnych. Właściwości te są określane głównie za pomocą różnych wielkości fizycznych.

M. Żenkiewicz [339] opisuje ogólne zasady konstituowania połączeń adhezyjnych (zwłaszcza w odniesieniu do połączeń klejowych), do których należy zaliczyć kilka podstawowych grup operacji technologicznych. Pierwszą grupę stanowią operacje mające na celu właściwe przygotowanie powierzchni i częściowo warstwy wierzchniej materiałów poprzez usuwanie różnego rodzaju zanieczyszczeń [59, 95, 153, 181, 339]. Druga grupa operacji jest związana z czynnościami dotyczącymi ulepszenia warstwy wierzchniej różnymi metodami, zarówno fizycznymi, jak i chemicznymi [154, 272, 273, 337]. Wszelkie czynności prowadzące do utworzenia połączenia adhezyjnego stanowią kolejną grupę operacji. Rodzaj materiałów wchodzących w skład połączenia adhezyjnego ma istotny wpływ na wybór metod, ilość i rodzaj określonych operacji technologicznych [59, 95, 152, 169, 205, 268].

W analizie zagadnienia konstytuowania właściwości adhezyjnych niezwykle istotne są dwie pierwsze grupy operacji technologicznych, dotyczące przygotowania oraz uzyskania określonych właściwości powierzchni i warstwy wierzchniej materiałów łączonych. Pozwalają one m.in. na otrzymanie odpowiednich właściwości adhezyjnych i geometrycznych warstwy wierzchniej łączonych materiałów, które to czynniki istotnie wpływają na zjawisko adhezji. C. Spadaro, D. Dispenza oraz C. Sunseri [279] zamieszczają podział operacji przygotowania powierzchni, przedstawiając jednocześnie wyniki badań wpływu różnych sposobów przygotowania powierzchni na wytrzymałość połączeń klejowych stopów aluminium.

Podczas przygotowania powierzchni następuje m.in. [39, 88, 152, 157, 182, 272, 273, 337, 339]:

- usunięcie z powierzchni zanieczyszczeń będących m.in. pozostałościami procesów przetwórczych (np. tłoczenia, walcowania, kucia, obróbki skrawaniem) lub stanowiących ochronę przed korozją podczas magazynowania i transportowania oraz ochronę przed np. mikroorganizmami, a także, najczęściej w przypadku tworzyw polimerowych, usunięcie migrujących do warstwy wierzchniej składników dodatkowych,
- zmiana struktury geometrycznej powierzchni, poprzez np. zwiększenie jej chropowatości, dzięki czemu następuje powiększenie rzeczywistej powierzchni zwilżania (powierzchni kontaktu) np. przez klej, farbę,
- zmiana zakresu wysycenia sił międzycząsteczkowych [152], dzięki której następuje wzrost swobodnej energii powierzchniowej (również wpływającej na proces zwilżania).

Proces przygotowania powierzchni oraz warstwy wierzchniej może obejmować różnego typu operacje [59, 95, 152, 169] m.in.: oczyszczanie chemiczne (odtłuszczenie), obróbkę z zastosowaniem metod mechanicznych, chemicznych oraz elektrochemicznych, płukanie, suszenie, a także operacje specjalne związane z zastosowaniem promotorów adhezji [52, 251, 285, 339].

Wśród najbardziej rozpowszechnionych połączeń adhezyjnych są połączenia klejowe występujące w wielu różnorodnych konstrukcjach [95]. Jedną ze znaczących zalet technologii klejenia jest możliwość łączenia materiałów o zróżnicowanych właściwościach fizycznych lub chemicznych. W wielu przypadkach nie jest możliwe zastosowanie innej metody łączenia niż klejenie, ze względu na brak możliwości uzyskania prawidłowo wykonanego połączenia. Przykładowo, zróżnicowany skład chemiczny oraz właściwości fizyczne łączonych materiałów mogą utrudnić, w niektórych przypadkach, wykonanie połączeń np. zgrzewanych, skurczowych, spawanych i innych.

Połączenia adhezyjne hybrydowe, czyli połączenia składające się z materiałów o zróżnicowanych właściwościach, coraz częściej występują w konstrukcjach lotniczych, samochodowych, budowlanych, w przemyśle maszynowym, elektronicznym, w kosmonautyce i innych. Przykładem są połączenia elementów wykona-

nych ze stopów aluminium oraz stopów tytanu, stanowiących jeden z fragmentów samolotów. Także w przemyśle samochodowym występują połączenia różnych rodzajów materiałów. Innym rodzajem połączeń hybrydowych są połączenia stopów aluminium lub stopów tytanu z kompozytami polimerowymi. Wszystkie one wykonane są z wykorzystaniem technologii klejenia.

Istnieje kilka przyczyn wzrostu zastosowania połączeń hybrydowych. Jedną z nich jest możliwość wykonywania tego rodzaju połączeń za pomocą nowoczesnych klejów konstrukcyjnych. Niewątpliwie informacje dotyczące tendencji w rozwoju klejów są jedną z podstaw do prognozowania, iż modyfikacje klejów (mające na celu m.in. uzyskanie lepszych właściwości wytrzymałościowych spoin klejowych, przyspieszenie procesu utwardzania, lepszą aplikację klejów na powierzchnie o różnych kształtach) przyczyniają się do coraz szerszego ich stosowania w różnych warunkach, zwłaszcza w odniesieniu do materiałów o zróżnicowanych właściwościach fizycznych lub chemicznych.

Ponadto rozwój inżynierii materiałowej w dziedzinie konstruowania i wytwarzania nowoczesnych materiałów inżynierskich (np. różnego rodzaju kompozytów, materiałów z pamięcią kształtu) powoduje również wzrost zastosowań różnego rodzaju połączeń adhezyjnych. W niektórych przypadkach materiały te, ze względu na swoje właściwości lub strukturę, mogą być efektywnie łączone tylko za pomocą metod, które nie ingerują w ich strukturę, a przykładem takich metod jest klejenie.

Kolejną przyczyną stosowania połączeń adhezyjnych hybrydowych jest doskonalenie technologii klejenia, a w szczególności jej etapów. Doskonalenie to jest możliwe dzięki m.in. coraz lepszemu poznaniu zjawisk towarzyszących procesowi klejenia, wykorzystaniu odpowiedniego nowoczesnego i bardziej dostępnego oprzyrządowania, a także przestrzeganiu warunków technologicznych wykonania połączenia. Sprzyja temu również rozwój metod kontroli połączeń i zwiększenie dostępności do nowoczesnych urządzeń pozwalających na jakościową oraz ilościową ocenę połączeń klejowych.

W świetle przedstawionych rozważań jest istotne konstituowanie właściwości adhezyjnych powierzchni materiałów podczas wykonywania połączeń zarówno jednorodnych, jak i hybrydowych, w aspekcie uzyskania wymaganych właściwości połączeń.

1.2. Właściwości adhezyjne

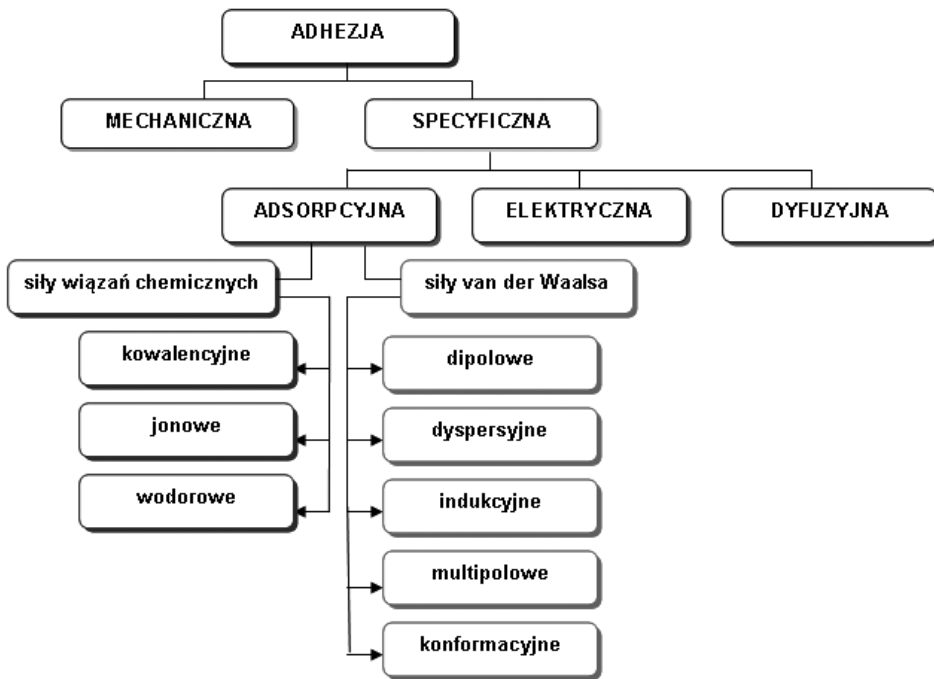
1.2.1. Adhezja i kohezja

W literaturze dotyczącej analizowanych zagadnień istnieją pewne sprzeczności terminologiczne w definiowaniu adhezji [20, 28, 107, 254]. Etymologicznie słowo to pochodzi z języka łacińskiego (*adhaesio*) i oznacza szepianie [152, 339].

R. Sikora [270] i J. Kuczmaszewski [152] określają adhezję jako zjawisko powierzchniowe, polegające na szczepianiu stykających się ciał wskutek oddziaływania między nimi pola sił. Z kolei K.L. DeVeries i D.O. Adams [73] określają adhezję jako zjawisko systemowe, które jest uzależnione od wielu czynników. K.L. Mittal [183] wyróżnia m.in. adhezję podstawową, definiowaną jako wytrzymałość międzyfazowego połączenia, która jest sumą międzycząsteczkowych i międzyatomowych interakcji, a także przedstawia w jednej ze swych prac [84] podział adhezji na trzy kategorie oraz rozważania na temat różnych jej znaczeń, podkreślając znaczenie adhezji jako zjawiska międzyfazowego. Według J. Gołębińskiego [107] adhezja w ujęciu jakościowym stanowi ogół oddziaływań zachodzących między cząsteczkami znajdującymi się w warstwach wierzchnich dwóch przylegających do siebie ciał. Natomiast w ujęciu ilościowym adhezja oznacza siłę lub pracę niezbędną do utworzenia jednostki powierzchni rozdziału dwóch przylegających do siebie ciał. Ilościowy wymiar adhezji może stanowić praca adhezji. W publikacji S. Grinera i R. Nowosielskiego [117] oraz w pracy pod redakcją R. Sikory [206] adhezja jest określona, jako przyczepność dwóch różnych materiałów doprowadzonych do bliskiego wzajemnego kontaktu lub też jako właściwość substancji do trwałego przywierania do powierzchni innego materiału. W pracy A. Sekulica i A. Curniera [254] przedstawiono m.in. prawa adhezji oraz pewne trudności w ich formułowaniu.

Istnieje wiele teorii adhezji i sił wiązań adhezyjnych [20, 73, 117, 145, 153], przedstawiających w różny sposób mechanizm powstawania połączeń klejowych, których klasyfikację przedstawiono na rys. 1.1. M. Soltani i G. Ahmadi [275] opisują modele adhezji, zaznaczając istotny udział siły van der Waalsa, jako sił adhezyjnych. A.M. Baney i C.-Y. Hui [21] także scharakteryzowali najważniejsze modele adhezji, których podstawą są różne teorie kontaktu, a w publikacji [86] J.F. Ganghoffer i J. Schulz zamieścili m.in. niektóre zagadnienia dotyczące mechanizmu adhezji.

Podczas tworzenia połączeń adhezyjnych występuje także kohezja [59, 95], którą definiuje się jako spójność wewnętrzną [59, 269] i określa jako działanie sił międzycząsteczkowych w materiale jednorodnym, przeciwstawiających się zmianom istniejącego stanu obciążenia. Źródłem kohezji są oddziaływania między cząsteczkami lub atomami materiałów [94, 330].



Rys. 1.1. Rodzaje adhezji i sił wiązań adhezyjnych (opracowanie na podstawie [339])

Jedną z przyjmowanych miar kohezji jest siła, która powoduje rozerwanie próbki materiału. Przypada ona na jednostkę powierzchni jej przekroju poprzecznego [59, 339].

1.2.2. Podstawowe teorie adhezji

Adsorpcyjna teoria adhezji, przedstawiona w 1963 r. przez L.H. Sharpe'a i H. Schornhorna [154, 339], opiera się na założeniu, że podstawę adsorpcji i adhezji stanowi różnica między stanem energetycznym cząsteczek na powierzchni cieczy lub ciał stałych i cząsteczek znajdujących się w głębi tych faz. Zgodnie z tym, na granicy faz cząsteczki zarówno kleju, jak i materiału klejonego oddziałują bezpośrednio na siebie. W przypadku istnienia oddziaływań polarnych następuje ponadto orientacja cząsteczek na granicy faz. Zachodzi wówczas adsorpcja fizyczna kleju na powierzchni klejonego materiału. Może zaistnieć także chemisorpcja cząsteczek kleju na powierzchni materiału, co powoduje zwiększenie wytrzymałości połączenia. Najczęściej w adsorpcyjnej teorii adhezji największe znaczenie

przypisuje się siłom van der Waalsa [20, 275]. Wśród sił międzycząsteczkowych można wyróżnić pięć głównych grup: siły dipolowe, indukcyjne, dyspersyjne, konformacyjne oraz multipolowe.

Równanie Lennarda-Jonesa [339] z którego można określić siły oddziaływań międzycząsteczkowych, przedstawia zależność energii potencjalnej E_p układu cząsteczek (atomów) od odległości ich jąder:

$$E_p = \frac{A}{r_{ja}^{12}} - \frac{B}{r_{ja}^6} \quad (1.1)$$

gdzie:

- A, B – stała odpychania i stała przyciągania, charakterystyczne dla danego rodzaju cząsteczek lub atomów,
- r_{ja} – odległość między jądrami atomów, nm.

Siły dipolowe (orientacyjne, siły Keesona) [59, 269] mają charakter elektrostatyczny i występują między cząsteczkami, które są dipolami trwałymi. Wysokowyttrzymałe połączenie między klejem a podłożem powstaje wówczas, gdy materiały te zawierają podobne dipole trwałe. Zasięg działania sił dipolowych wynosi $4 \div 5 \cdot 10^{-9}$ m [152], a moment dipolowy maleje proporcjonalnie do trzeciej potęgi odległości. Siły dipolowe maleją wraz ze wzrostem temperatury, ponieważ podwyższona temperatura wzmacnia ruchliwość cząstek.

Siły indukcyjne (siły Debye'a) [59, 202] występują przy oddziaływaniu dipol trwały – dipol indukowany. Siły indukcji są małe i ich znaczenie w adhezji jest nieduże, a zasięg ich działania wynosi $3,5 \div 4,5 \cdot 10^{-10}$ m [152].

Siły dyspersyjne (siły Londona) [20, 152, 168, 270] są wynikiem tworzenia dipoli elementarnych wskutek ruchu elektronów wokół jądra. Efekt działania tych sił istnieje zawsze. Jest niezależny od temperatury i maleje proporcjonalnie do szóstej potęgi odległości atomów. Z tego też względu skuteczność ich oddziaływań ujawnia się w przypadku jak największego zbliżenia powierzchni klejonego materiału i kleju.

Siły konformacyjne [339] to oddziaływanie międzycząsteczkowe, polegające na zmianie położenia (w polu elektrostatycznym) poszczególnych członów cząsteczki.

Siły multipolowe [339] wynikają z oddziaływań kwadrupoli i multipoli wyższego rzędu. Wiążą się ze zjawiskiem wewnętrznej kompensacji składowych dipoli atomów lub grup atomów w cząsteczce. Siły multipolowe są małe, ale występują powszechnie. Ich znaczenie w zjawiskach adhezji jest niewielkie.

W adsorpcyjnej teorii adhezji można wyróżnić także siły wiązań chemicznych, a efekt ich działania zależy od aktywności chemicznej cząstek adsorbowanych i stanu energetycznego powierzchni [20, 59, 339]. Wśród wiązań chemicznych można wyróżnić m.in.: wiązania kowalencyjne, wodorowe, jonowe (w tym także

kwasowo-zasadowe) [20]. Różnią się one przede wszystkim zmianą sposobu przebudowy struktury elektronowej łączących się atomów. Jest to przyczyną dużego zróżnicowania energii potencjalnej tych wiązań.

Siły wiązań wodorowych [59] są znacznie większe niż w zwykłych oddziaływaniach dipolowych i wykazują energię w granicach 15÷50 kJ/mol. Wiązania wodorowe odgrywają ważną rolę nie tylko w przypadku adhezji, lecz również kohezji. Zapewniają one szczególnie dużą wytrzymałość poliamidów, poliuretanów i naturalnych włókien celulozowych (wewnątrzcząsteczkowe wiązania wodorowe).

Wiązanie kowalencyjne [152] polega na uwspólnieniu elektronów pochodzących z obu łączonych atomów i utworzeniu pomiędzy atomami jednej, dwóch lub trzech par elektronów wiążących, czyli pary elektronów o wspólnym dla obu atomów orbitalu. Wiązania kowalencyjne charakteryzują się najwyższą energią zawierającą się w przedziale od 400 kJ/mol do 600 kJ/mol. Występują rzadko jako czynnik powodujący adhezję. Jedną z odmian wiązań kowalencyjnych są wiązania kwasowo-zasadowe [20, 339]. Wiązania te występują często w układach tworzywo-klej lub tworzywo-powłoka.

Wiązania jonowe [59] powstają między dwoma łączącymi się atomami o dużej różnicy w elektroujemności. Energia wiązań jonowych zawiera się w granicach 200÷400 kJ/mol. Wiązania jonowe najczęściej przyjmują formę wiązań jonowo-kowalencyjnych.

Dyfuzyjna teoria adhezji, opracowana przez S.S. Vojuckiego [151], przedstawia zjawisko adhezji, jako wzajemne przenikanie atomów kleju do podłoża i podłoża do kleju. Przyczyną dyfuzji jest różnica potencjałów termodynamicznych cząstek 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. Jednakże mało materiałów ma zdolność do tworzenia dyfuzyjnych połączeń adhezyjnych [339].

Zgodnie z *elektrostatyczną teorią adhezji* pomiędzy dwoma różnymi materiałami może nastąpić przepływ strumienia elektronów, jeżeli ciała te zostaną doprowadzone do bezpośredniego kontaktu. Podstawę adhezji stanowi przyciąganie elektrostatyczne podwójnej warstwy elektrycznej, zgodnie z hipotezą przedstawioną przez B.U. Dierjagina i N.A. Krotową (1948 r.) [59]. Siły przyciągania mają charakter sił opisanych *prawem Coulomba*. Przeciwdziałają one rozdzieleniu obu materiałów tworzących połączenia. Wartość tych sił, przypadająca na jednostkę powierzchni tak powstałego połączenia, zależy głównie od gęstości ładunku powierzchniowego w obu częściach podwójnej warstwy elektrycznej [152].

Teoria ta ma związek z teorią adsorpcyjną, gdyż przejścia elektronów wywołuje orientowana adsorpcja grup polarnych kleju na powierzchni materiałów łączonych, co związane jest z obecnością i ilością grup polarnych. Elektryczna teoria adhezji, choć nie ma znaczenia podstawowego, to jednak dobrze tłumaczy niektóre aspekty zjawisk adhezji.

Mechaniczna teoria adhezji, przedstawiona przez J.W. McBaina [20, 153, 270], była jedną z pierwszych teorii adhezji. Warunkiem sklejenia, według niej, jest konieczność wniknięcia kleju w mikropory elementów łączonych i utworzenia zakotwieczeń mechanicznych zdolnych do przenoszenia obciążeń. Adhezja mechaniczna odgrywa większą rolę podczas łączenia materiałów porowatych i tych o powierzchniach chropowatych.

Wpływ na zwiększenie wytrzymałości połączeń adhezyjnych w mechanicznej teorii adhezji [117, 229] mają różne czynniki. Jednym z nich jest to, że wraz ze zwiększaniem chropowatości powierzchni danego materiału, zwiększa się liczba jego wgłębień o nieregularnych kształtach, do których może wnikać klej. Wynika z tego, że wytrzymałość połączeń adhezyjnych materiałów o większej chropowatości powierzchni jest większa niż w przypadku materiałów o mniejszej chropowatości, z uwagi na większą powierzchnię kontaktu z klejem.

Penetracja kleju zależy głównie od jego lepkości, temperatury, ciśnienia, czasu wnikania, kształtu i głębokości tych wgłębień. Prawo Poiseulle'a i równanie ciśnienia kapilarnego opisuje proces wnikania kleju w pory i wgłębienia materiału łączonego [108, 339]. Zwiększenie średnicy wgłębień ułatwia penetrację, natomiast zwiększenie lepkości ją ogranicza.

Do opisu zjawisk wnikania kleju w pory i zagłębienia materiału łączonego (traktując je jako kapilary o określonym promieniu) można stosować równanie Lucasa-Washburn'a [12], określane także jako równanie Washburn'a [48, 108, 154, 257]. Głębokość wnikania kleju h jest opisana wzorem:

$$h = \left(\frac{r t_w \gamma_{Lk} \cos \Theta}{2\eta} \right)^{0,5} \quad (1.2)$$

gdzie:

h – głębokość wnikania kleju we wgłębienia materiału chropowatego,

r – promień wgłębienia materiału,

t_w – czas wnikania kleju we wgłębienia materiału,

η – lepkość kleju,

γ_{Lk} – swobodna energia powierzchniowa kleju,

Θ – kąt zwilżania, jaki tworzy klej z materiałem chropowatym.

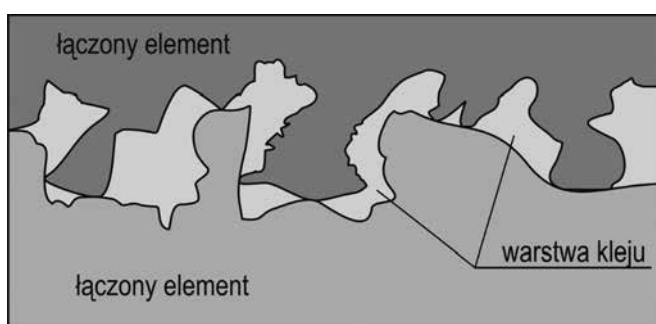
Równanie (1.3) umożliwia ocenę czasu niezbędnego do wypełnienia przez klej wgłębień materiału chropowatego [339]:

$$t = \frac{2\eta (h)^{0,5}}{r \gamma_{Lk} \cos \Theta} \quad (1.3)$$

Oznaczenie poszczególnych symboli przedstawiono w opisie równania (1.2).

K.M. Hay, M.I. Dragila oraz J. Liburdy [122] przedstawili wiele informacji dotyczących wpływu chropowatości powierzchni na jej zwilżalność oraz model teoretyczny zwilżania powierzchni chropowatych.

Zbyt duża liczba wąskich porów jest jednak przeszkodą w ich wypełnieniu przez klej, zwłaszcza przez klej o dużej lepkości i znacznym napięciu powierzchniowym (rys. 1.2). Osadza się on wówczas głównie na wierzchołkach nierówności. W głębi nich znajdują się zamknięte pęcherzyki powietrza, które tworzą tzw. warstwę graniczną, osłabiającą połączenie adhezyjne. Tak więc istnieje pewien stopień schropowacenia, przekroczenie którego stwarza niekorzystne warunki oddziaływania międzycząsteczkowego pomiędzy klejem a podłożem.



Rys. 1.2. Schemat połączenia adhezyjnego elementów o chropowatej powierzchni łączonych za pomocą kleju, ilustrujący mechaniczną teorię adhezji (opracowanie na podstawie [339])

Mechaniczna teoria adhezji zakłada, że połączenia utworzone przez klej z materiałem chropowatym nie ulegają dekohezji na granicy faz pod wpływem obciążeń zewnętrznych. Dekohezja następuje wewnątrz najsłabszego materiału połączenia, ponieważ na granicy faz uniemożliwia ją zestalony klej, zakotwiczony we wgłębieniach materiału mającego chropowatą powierzchnię. Zgodnie z tą teorią wytrzymałość połączenia jest uwarunkowana wytrzymałością kleju lub łączonych materiałów [330, 339].

Wśród innych teorii adhezji można wymienić m.in. teorię: słabej warstwy granicznej, utleniania, sieciowania [20, 117, 339].

Teoria słabej warstwy granicznej została opracowana przez J. Bikermana [32]. Podstawowe jej założenie dotyczy zależności adhezji dwóch materiałów od kształtu i rozmiarów tzw. słabej warstwy granicznej. Teoria słabej warstwy granicznej wyjaśnia przyczynę małej adhezji przez istnienie słabych warstw, w płaszczyźnie rozdziału faz lub w jej pobliżu, które uniemożliwiają dobre zwilżanie lub tworzą się podczas zwilżania [20, 117]. Warstwy graniczne mają bardzo małą kohezję (spójność) lub też słabo przylegają do obu faz albo jednej z nich i decydują o zmniejsze-

niu wytrzymałości połączenia adhezyjnego. Usunięcie słabych warstw granicznych z podłoża jest przyczyną znacznego wzrostu wytrzymałości połączenia adhezyjnego. B. Rånby w pracy [211] zauważył, iż w taki sposób można tłumaczyć m.in. znaczny wzrost adhezji po obróbce plazmowej, pomimo iż zwilżalność polimeru nie ulega zmianie.

Podsumowując dotychczasowe informacje zawarte w licznych publikacjach na temat adhezji oraz związanych z nią procesów i zjawisk można zauważyć, iż nadal brakuje jednolitej teorii tego zjawiska. Niewątpliwie głównym źródłem adhezji są przede wszystkim oddziaływania międzycząsteczkowe. Można zauważyć, że adsorpcyjna teoria adhezji (określana w niektórych publikacjach jako fizyczno-chemiczna teoria adhezji) w sposób najpełniejszy przedstawia to zjawisko. Wprawdzie inne teorie adhezji pomagają w wyjaśnieniu (bądź też w opisie) niektórych przypadków adhezji, jednak koncentrują się one raczej na wybranych aspektach tego zjawiska. Jest to przyczyną powstawiania niekiedy sprzecznych wniosków, stąd też teorie te nie mogą mieć charakteru uniwersalnego.

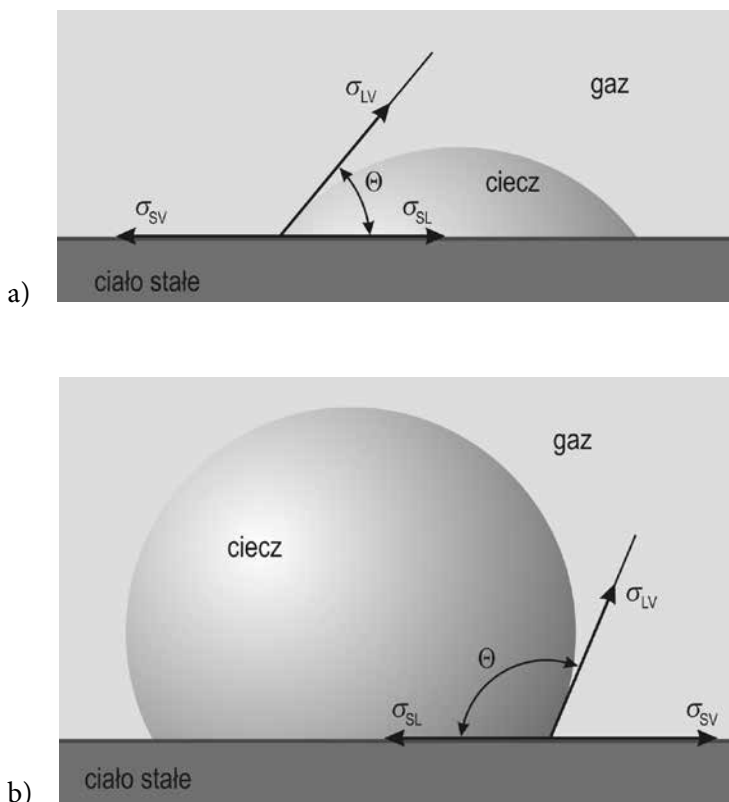
1.3. Ocena właściwości adhezyjnych

Osiągnięcie odpowiednich, z punktu widzenia technologii klejenia, właściwości adhezyjnych powierzchni może być oceniane przez wiele wskaźników. Wśród nich można wymienić głównie zwilżalność w określonych układach, wyrażoną poprzez wartość kąta zwilżania, pracę adhezji oraz swobodną energię powierzchniową SEP powierzchni materiałów przeznaczonych do procesów adhezyjnych. Kolejnym istotnym wskaźnikiem oceny uzyskania odpowiednich właściwości adhezyjnych jest osiągnięcie wymaganej wytrzymałości połączeń adhezyjnych, która często stanowi podstawowe kryterium oceny ich jakości [17, 20, 339, 351, 353]. Dlatego też niezwykle istotne jest określenie zależności pomiędzy właściwościami adhezyjnymi powierzchni a wytrzymałością połączeń adhezyjnych. Analiza wymienionych zagadnień wymaga znajomości wielu problemów szczegółowych, dotyczących wykonywanych połączeń, umożliwiając właściwy dobór czynników technologicznych i konstrukcyjnych uwzględniających m.in. rodzaj łączonego materiału, rodzaj połączenia, a także warunki eksploatacji.

1.3.1. Zwilżanie i kąt zwilżania

Zagadnienia zwilżania powierzchni różnych materiałów konstrukcyjnych oraz kąta zwilżania są przedstawiane w wielu publikacjach [22, 23, 33, 54, 111, 178, 190, 297]. Szczegółowo analizowane są zagadnienia zwilżania ciał stałych przez ciecze, m.in. w procesie konstytuowania właściwości adhezyjnych łączonych elementów.

R. Sikora [271] zauważa, że kąt zwilżania jest wskaźnikiem zdolności zwilżania – dobra zwilżalność występuje przy małym kącie zwilżania, a niedostateczna zwilżalność przy dużym kącie zwilżania (rys. 1.3).



Rys. 1.3. Ilustracja zwilżalności powierzchni ciała stałego przez ciecz w przypadku: a) dobrej zwilżalności $\Theta < 90^\circ$, b) niedostatecznej zwilżalności $\Theta > 90^\circ$ (opracowanie na podstawie [339])

Zdaniem J. Czaplickiego i innych badaczy [59], kąt zwilżania (kąt przylegania) można stosować jako kryterium zwilżalności lub rozprzysku, a według S.A. McCarthy'ego [177] rozprzysku się cieczy, chociaż niektórzy autorzy zauważają, że nie w każdym przypadku jest to właściwe kryterium ze względu na histerezę kąta zwilżania [59, 334]. S.A. McCarthy [177] wyróżnia cztery stopnie zwilżania: $\Theta = 0^\circ$, gdy występuje rozpościeranie się (rozpryskanie) cieczy na powierzchni ciała stałego, $\Theta = 0 \div 90^\circ$ (ciecz nie rozpryskuje się, ale występuje zwilżanie), $\Theta = 90 \div 180^\circ$ (niedostateczna zwilżalność) oraz $\Theta = 180^\circ$, przy którym jest niezwilżalność powierzchni.

W literaturze przedstawiane są różne wskazówki dotyczące zwilżalności powierzchni, uwzględniające różne wartości oraz zależności (odnoszące się do kąta zwilżania) [351, 359]. R. Sikora [270] oraz J. Czaplicki i inni [59] przedstawiają zasadę, że aby ciecz dobrze zwilżała powierzchnię ciała stałego, jej napięcie powierzchniowe powinno być mniejsze od napięcia powierzchniowego cieczy. Badacze rozważają zagadnienie zwilżalności w odniesieniu do pracy adhezji i pracy kohezji, a w konkluzji podkreślają, że zwilżanie występuje tylko wówczas, gdy praca adhezji jest większa niż połowa pracy kohezji cieczy, ponieważ tylko wtedy kąt zwilżania jest większy od zera [59, 270].

Kąt zwilżania może być wykorzystany także do określania krytycznego napięcia powierzchniowego [351], do ustalania swobodnej energii powierzchniowej [168, 245, 339] i pracy adhezji [20, 278], a także do badań zmian warstwy wierzchniej zachodzących podczas jej modyfikowania m.in. do badań ruchliwości cząsteczek (fragmentów łańcuchów) polimeru znajdującego się w warstwie wierzchniej różnych tworzyw [339].

Istnieje wiele czynników istotnie wpływających na kąt zwilżania oraz na prawidłowość przeprowadzania pomiarów kąta zwilżania, do których należą m.in. [47, 82, 177, 291, 296, 329, 338, 339]: współczynnik sprężystości wzdłużnej badanego materiału, chropowatość powierzchni, jednorodność warstwy wierzchniej pod względem fizycznym i chemicznym, zanieczyszczenia powierzchni, rodzaj cieczy pomiarowej, rozmiary kropli cieczy pomiarowych, wilgotność i inne.

Wpływ rozmiarów kropli pomiarowej na wartość kąta zwilżania nie jest jednoznaczny, ponieważ występuje brak ujednoczonych wniosków, ze względu na stosowanie podczas badań różnych metod pomiarów kąta zwilżania oraz stosowanie odmiennych modeli obliczeniowych. M. Żenkiewicz [339], M. Zielecka [329], X. Tang, J. Dong oraz X. Li [290], K. B. Borisenko i inni [36], B. Jańczuk i T. Białopiotrowicz [132] przedstawili wiele wyników badań dotyczących wpływu przyjmowanych rozmiarów kropli pomiarowej i metod pomiaru na wartość kąta zwilżania. W badaniach przeprowadzonych przez M. Żenkiewicza [343], Q. Bernarda, M. Foisa oraz M. Grisela [27] zastosowano różne ciecze pomiarowe (wodę destylowaną, glicerynę, formamid, dijdometan, α -bromonaftalen). W badaniach opisywanych w wielu pracach [126, 257, 260, 296, 344] objętość kropli pomiarowych różnych cieczy wynosiła $2\div 5\text{ mm}^3$. J. Shang i inni [257] stosowali mniejsze objętości kropli (2 mm^3) do wyznaczania statycznego kąta zwilżania, a większe wartości (5 mm^3) w przypadku pomiarów dynamicznego kąta zwilżania. Zgodnie z zebranymi informacjami przedstawionymi w literaturze [339] zakres objętości kropli powinien mieścić się w przedziale od 28 mm^3 od $0,5\text{ mm}^3$.

X. Tang, J. Dong oraz X. Li [290], opisując zjawisko zwilżania i kąt zwilżania przedstawiają również wyniki badań zależności czasu ekspozycji kropli cieczy pomiarowej na wartość kąta zwilżania w przypadku różnego stanu powierzchni (mokrego, suchego).

M. Żenkiewicz w swojej pracy [339] zamieścił informacje, że zmiany temperatury, w zakresie do ok. 80°C, w małym stopniu powodują zmiany swobodnej energii powierzchniowej, a naturalne oscylacje temperatury, jakie mogą występować podczas badań laboratoryjnych, nie mają istotnego wpływu na wynik pomiaru kąta zwilżania. N. Zouvelou, X. Mantzouris i P. Nikolopoulos [333] zaobserwowali w przeprowadzonych badaniach i porównaniach z danymi z literatury liniową zależność energii powierzchniowej oraz kąta zwilżania dla wybranych materiałów od temperatury (jednakże dotyczy to wysokich wartości temperatury np. ok. 800°C ÷ 1500°C).

M. Żenkiewicz, J. Gołębiowski i S. Lutomirski [338] podkreślili, że powierzchnia materiału, na której osadzone są krople cieczy pomiarowej musi być odpowiednio sztywna. W związku z tym jego współczynnik sprężystości wzdłużnej powinien mieć wartość większą niż 10 kPa, ponieważ zapobiega to odkształceniom kropli pod wpływem ciężaru kropli pomiarowej.

R.D. Hazlett [121] przedstawia poglądy innych naukowców dotyczące wpływu chropowatości powierzchni na histerezę kąta zwilżania konkludując, że wpływ chropowatości powierzchni podczas zwilżania jest bezdyskusyjny. Jednakże można przyjąć, że jeżeli $R_a < 0,5 \mu\text{m}$, to wpływ chropowatości na kąt zwilżania jest nieistotny [84, 339]. A.P. Serro, R. Colaço i B. Saramago [255] przedstawiają wyniki badań 2 próbek wykonanych z polietylenu o różnej chropowatości powierzchni, scharakteryzowanej parametrem R_a , wynoszącym 3,9 i 1,0 nm oraz odległością między wgłębieniami nierówności odpowiednio 6 nm i 23 nm. Zauważają, że zwilżalność w analizowanych przypadkach nie zależy od chropowatości powierzchni oraz, że uzyskano takie same wartości kątów zwilżania na tych powierzchniach dla wody i heksadekanu. J. Xian [312] zauważa, że zwilżalność i kąt zwilżania chropowatej powierzchni m.in. badanej stali i polimerów jest inny niż powierzchni o niewielkiej chropowatości.

Rozważając jednorodność powierzchni pod względem chemicznym i fizycznym [79], można zauważyć, w przypadku elementów z tworzyw polimerowych, wpływ migracji dodatkowych składników, zróżnicowanej struktury cząsteczkowej, a także niejednorodności powierzchni na skutek powstawania na niej grup funkcyjnych o różnych rozmiarach i odmiennym charakterze na wartość kąta zwilżania [339].

Jedną z przyczyn histerezy dynamicznej jest wnikanie cieczy pomiarowej w szczeliny znajdujące się w warstwie wierzchniej oraz w obszary międzycząsteczkowe tworzywa [339]. Istotna jest również objętość molowa cieczy pomiarowej – wraz ze zwiększaniem tej objętości procesy wnikania cieczy w strukturę ulegają spowolnieniu i ograniczeniu. Woda, ze względu na swoją małą objętość molową, łatwo wnika w strukturę niektórych tworzyw, stąd też istotny jest dobór odpowiedniej cieczy pomiarowej [339].

W wielu publikacjach zawarto informacje dotyczące aspektów rozprzestrzeniania się kropli cieczy, wraz z przedstawieniem modeli zjawisk zachodzących podczas określania kąta zwilżania [22, 69, 276, 296, 315, 318], różnych modeli

kontaktu cieczy [326], charakterystyki statycznego i dynamicznego kąta zwilżania [12, 276]. W niektórych z nich podkreślono znaczenie zwilżania i zdolności do zwilżania przez różnego rodzaju cieczy w wielu procesach, np. impregnacji [69].

Wymienione czynniki są przyczyną trudności w przeprowadzaniu pomiarów kąta zwilżania, utrudniają interpretację uzyskiwanych wyników oraz są przyczyną różnych stanów metastabilnych samej kropli. Efektem tych zjawisk jest histereza kąta zwilżania [75, 82, 297]. Pierwsze znaczące badania dotyczące histerezy kąta zwilżania prowadzone były m.in. przez R.J. Gooda [111], J.F. Joanny i P.G. de Gennes [137] od połowy lat siedemdziesiątych XX wieku. E. Chibowski i F. González-Caballero przedstawili w pracy [47] obszernie wiadomości teoretyczne opisujące histerezę kąta zwilżania i czynniki powodujące jej występowanie oraz wyjaśnienia histerezy kąta zwilżania, związanej z oddziaływaniami chemicznymi. C.W. Extrand scharakteryzował niektóre teoretyczne modele histerezy kąta zwilżania oraz zamieścił w pracy [82] termodynamiczny model histerezy kąta zwilżania w oparciu o badania wybranych tworzyw polimerowych. I.S. Bayer [25] i inni wykorzystali histerezę kąta zwilżania m.in. do oceny energii powierzchniowej różnych modeli powierzchni polimerów.

Istnieje wiele metod wyznaczania kąta zwilżania. Wśród najczęściej stosowanych można wymienić: metodę pęcherzyka powietrza, geometryczną, wzrostu kapilarnego cieczy na próbce badanego tworzywa (m.in. metoda Wilhelmy'ego) [72, 257] oraz metodę bezpośredniego pomiaru [196, 339].

Obecnie często stosowaną metodą wyznaczania kąta zwilżania jest pomiar bezpośredni za pomocą specjalnych urządzeń zwanych analizatorami kąta zwilżania lub goniometrami [27, 120, 257, 334]. Opis tej metody przedstawiono m.in. w publikacjach [27, 257, 339].

1.3.2. Swobodna energia powierzchniowa

Swobodna energia powierzchniowa (SEP) jest jedną z wielkości termodynamicznych opisującą stan równowagi atomów w warstwie wierzchniej materiałów [20, 339, 344, 346]. Odzwierciedla ona specyficzny stan nie zrównoważenia oddziaływań międzycząsteczkowych, jaki występuje na granicy faz dwóch różnych ośrodków.

Swobodna energia powierzchniowa materiałów zależy od wielu czynników, między innymi od struktury geometrycznej powierzchni [240, 241], niektórych cech fizycznych materiałów, a także od właściwości fazy fizysoptycznej na powierzchni ciała stałego, uzyskanej np. wskutek różnego rodzaju procesów wytwórczych [233] lub przygotowujących powierzchnie [242, 244].

Podstawą teorii dotyczących zagadnienia zwilżania oraz metod obliczania swobodnej energii powierzchniowej z wykorzystaniem wyników pomiarów kąta zwilżania jest równanie Younga, które łączy mierzalny parametr geometryczny,

jakim jest kąt zwilżania, z trzema termodynamicznymi wskaźnikami oraz pozwala wytłumaczyć właściwości oddziaływań w obszarach kontaktu stykających się faz [47, 162, 291, 296, 333, 338, 344]. Równanie to zostało wyprowadzone z warunku równowagi sił, które reprezentują napięcia powierzchniowe w miejscu styku trzech faz – ciała stałego, cieczy oraz gazu [168, 339]:

$$\sigma_{SV} = \sigma_{SL} + \sigma_{LV} \cos\Theta_Y \quad (1.4)$$

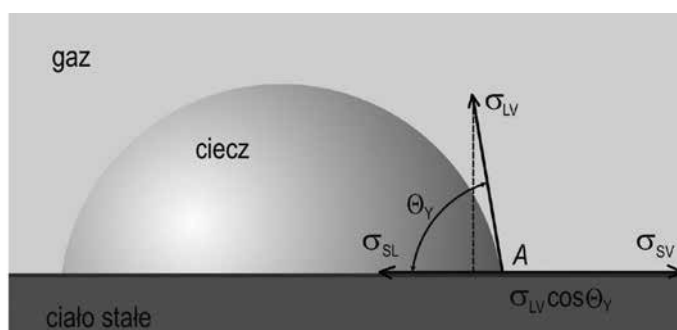
gdzie: σ_{SV} – napięcie powierzchniowe na granicy faz ciało stałe – gaz,
 σ_{SL} – napięcie powierzchniowe na granicy faz ciało stałe – ciecz,
 σ_{LV} – napięcie powierzchniowe na granicy faz ciecz – gaz,
 Θ_Y – równowagowy kąt zwilżania.

Równanie Younga (1.4) można wyprowadzić także z bilansu energetycznego równowagi trzech faz. Wówczas ma ono postać [162, 253, 333, 293, 320]:

$$\gamma_{LV} \cos\Theta_Y = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (1.5)$$

gdzie: γ_{LV} – energia powierzchniowa na granicy faz ciecz – gaz,
 γ_{SV} – energia powierzchniowa na granicy faz ciało stałe – gaz,
 γ_{SL} – energia powierzchniowa na granicy faz ciało stałe – ciecz,
 Θ_Y – równowagowy kąt zwilżania.

Interpretacja graficzna równania (1.5) została przedstawiona na rys. 1.4.



Rys. 1.4. Interpretacja równania Younga, A – punkt styku trzech faz [339]

X. Qin i W.V. Chang [209] wśród wielu zagadnień dotyczących pracy adhezji, swobodnej energii powierzchniowej w odniesieniu do różnych tworzyw polimerowych, przedstawili informację, iż mniejsza wartość γ_{SL} związana jest z większą wartością pracy adhezji i jest korzystna m.in. dla zwilżania.

Ze względu na przyjmowane założenia i uproszczenia równanie Younga można przedstawić w następującej postaci, która znajduje powszechne zastosowanie przy wyznaczaniu swobodnej energii powierzchniowej ciał stałych [339]:

$$\gamma_S = \gamma_{SL} + \gamma_L \cos\Theta \quad (1.6)$$

gdzie: γ_S – swobodna energia powierzchniowa ciała stałego,
 γ_{SL} – energia powierzchniowa na granicy faz ciało stałe – ciecz,
 γ_L – swobodna energia powierzchniowa cieczy pomiarowej,
 Θ – kąt zwilżania mierzony na badanej powierzchni rzeczywistej.

Równanie (1.6) zostało wyprowadzone przy założeniu, że faza stała i ciekła oraz strefa międzyfazowa są w stanie równowagi.

1.3.3. Metody określania swobodnej energii powierzchniowej

Istnieje wiele metod bezpośredniego wyznaczania swobodnej energii powierzchniowej cieczy. Dla ciał stałych brak jest bezpośrednich metod wyznaczania tej energii. W związku z tym wykorzystuje się różne metody pośrednie, do których zalicza się m.in. metody pomiarów kąta zwilżania oraz obliczania na tej podstawie swobodnej energii powierzchniowej [11, 47, 209, 256, 344]. Wykorzystuje się przy tym odpowiednie wzory teoretyczne i doświadczalne, zgodnie z przyjętą metodą pomiarową. Przedstawiają one zależności pomiędzy wartościami kątów zwilżania, wartościami swobodnej energii powierzchniowej stosowanych cieczy i wartościami swobodnej energii powierzchniowej materiałów badanych [108, 178]. Wśród tych metod można wyróżnić metodę Fowkesa, Owensa-Wendta, van Ossa-Chaudhury'ego-Gooda, Wu, Zismana i Neumanna. Metody te opisane są w licznych pracach [47, 64, 116, 133, 162, 175, 178, 209, 270, 335]. Na podstawie analizy literatury można uznać, że najczęściej wykorzystywanymi metodami określania wartości swobodnej energii powierzchniowej jest metoda Owensa-Wendta [168, 229, 256, 345] i van Ossa-Chaudhury'ego-Gooda [9, 31, 71, 109, 162, 194, 324].

Metoda Owensa-Wendta

Metoda Owensa-Wendta (zwana niekiedy metodą Kaelble'a-Owensa-Wendta) jest stosowana powszechnie do wyznaczania swobodnej energii powierzchniowej materiałów m.in. tworzyw polimerowych [339]. Metoda ta polega na określaniu składowej dyspersyjnej i polarnej swobodnej energii powierzchniowej, opierając się na hipotezie Berthelota [339, 346], według której oddziaływania między cząsteczkami dwóch różnych ciał, znajdującymi się w ich warstwie wierzchniej, są równe średniej geometrycznej oddziaływań między cząsteczkami każdego z tych ciał.

W metodzie tej przyjmuje się, że swobodna energia powierzchniowa γ_S jest sumą dwóch składowych: dyspersyjnej γ_S^d i polarnej γ_S^p , oraz że istnieje zależność między wyżej wymienionymi wielkościami [11, 177, 339]:

$$\gamma_S = \gamma_S^d + \gamma_S^p \quad (1.7)$$

Pod pojęciem składowej polarnej rozumie się sumę składowych pochodzących od oddziaływań międzycząsteczkowych m.in. polarnych, wodorowych, indukcyjnych, kwasowo-zasadowych z wyjątkiem oddziaływań dyspersyjnych. Oddziaływanie dyspersyjne bowiem stanowią składową dyspersyjną swobodnej energii powierzchniowej.

Praca adhezji pomiędzy ciałem stałym i cieczą może być opisana przez równanie Duprégo [339]:

$$W_a = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \quad (1.8)$$

Łącząc równanie (1.5) z równaniem (1.8) powstaje równanie Younga-Dupré [20, 39, 64, 77, 258, 320, 324]:

$$W_a = \gamma_{LV} (1 + \cos\Theta) \quad (1.9)$$

Jednakże Owens i Wendt zaproponowali następującą postać równania opisującego pracę adhezji pomiędzy ciałem stałym a cieczą [256, 339]:

$$W_a = 2 (\gamma_S^d \gamma_{LV}^d)^{0,5} + 2(\gamma_S^p \gamma_{LV}^p)^{0,5} \quad (1.10)$$

Porównując równanie (1.9) i (1.10) można otrzymać następujące równanie, umożliwiające określenie swobodnej energii powierzchniowej ciała stałego i składowych SEP [11, 20, 256]:

$$\gamma_{LV} (1 + \cos\Theta) = 2 (\gamma_S^d \gamma_{LV}^d)^{0,5} + 2(\gamma_S^p \gamma_{LV}^p)^{0,5} \quad (1.11)$$

Aby wyznaczyć składowe polarną i dyspersyjną swobodnej energii powierzchniowej, należy przeprowadzić pomiary kąta zwilżania powierzchni badanych materiałów za pomocą dwóch cieczy pomiarowych. Do badań wykorzystuje się ciecze pomiarowe o znanych wartościach swobodnej energii powierzchniowej oraz ich składowych polarnej i dyspersyjnej. Jedna ciecz jest apolarna, druga bipolarna. W badaniach stosuje się najczęściej wodę destylowaną jako ciecz polarną i diiodometan jako apolarną.

Do obliczeń swobodnej energii powierzchniowej γ_S wykorzystuje się (po odpowiednich przekształceniach) zależności opisujące składową dyspersyjną swobodnej energii powierzchniowej [229, 240]:

$$(\gamma_s^d)^{1/2} = \frac{\gamma_d (\cos \Theta_d + 1) - \sqrt{\frac{\gamma_d^p}{\gamma_w^p}} \gamma_w (\cos \Theta_w + 1)}{2 \left(\sqrt{\gamma_d^d} - \sqrt{\gamma_d^p \frac{\gamma_w^d}{\gamma_w^p}} \right)} \quad (1.12)$$

oraz składową polarną swobodnej energii powierzchniowej

$$(\gamma_s^p)^{0,5} = \frac{\gamma_w (\cos \Theta_w + 1) - 2\sqrt{\gamma_s^d \gamma_w^d}}{2\sqrt{\gamma_w^p}} \quad (1.13)$$

gdzie: γ_s^d – składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej badanych materiałów, γ_s^p – składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej badanych materiałów, γ_d – swobodna energia powierzchniowa diiodometanu, γ_d^d – składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej diiodometanu, γ_d^p – składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej diiodometanu, γ_w – swobodna energia powierzchniowa wody, γ_w^d – składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej wody, γ_w^p – składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej wody, Θ_d – kąt zwilżania diiodometanem, Θ_w – kąt zwilżania wodą.

Metoda van Ossa-Chaudhury'ego-Gooda (O-C-G)

W metodzie van Ossa-Chaudhury'ego-Gooda swobodna energia powierzchniowa jest sumą dwóch składowych [9, 11, 83, 108, 161, 264]. Jedną z nich γ_i^{LW} jest związana z oddziaływaniami dalekiego zasięgu (oddziaływania dyspersyjne, polarne i indukcyjne określane, jako oddziaływania elektrodynamiczne Lifshitz-van der Waalsa [194, 324]), natomiast druga składowa γ_i^{AB} ujemuje oddziaływania kwasowo-zasadowe [83, 125, 131]:

$$\gamma_i = \gamma_i^{LW} + \gamma_i^{AB} \quad (1.14)$$

R.J. Good i C.J. van Oss [110] zaproponowali wyodrębnienie składowej kwasowej (elektron-akceptor: γ_L^+, γ_S^+) oraz zasadowej (elektron-donor: γ_L^-, γ_S^-) swobodnej energii powierzchniowej. Szczegółowy opis tej metody przedstawiono w publika-

cjach [11, 81, 83, 324], w których także wymieniono problemy związane m.in. z zależnością wyników badań od wykorzystanego zestawu cieczy pomiarowych. To zagadnienie zostało opisane, m.in. przez C. Della Volpe i S. Siboni [71] wraz z przedstawieniem teorii dotyczącej m.in. właściwości kwasów i zasad Lewisa.

1.3.4. Wytrzymałość adhezyjna

Wytrzymałość adhezyjna często jest przyjmowana jako jedno z podstawowych kryteriów oceny połączeń adhezyjnych [306, 339, 353]. Wytrzymałość adhezyjna (określana także, jako adhezja praktyczna) jest to doświadczalnie wyznaczona wartość określająca siłę, pracę, naprężenie itp., niezbędne do zniszczenia połączenia adhezyjnego [206]. Tak więc wytrzymałość adhezyjna może być mierzona siłą przeciwdziałania różnych faz połączenia adhezyjnego na zewnętrzne obciążenia, doprowadzające do zniszczenia połączenia. W odniesieniu do połączeń klejowych, według normy PN-EN ISO 10365 [365], zniszczenie adhezyjne (utrata adhezji) jest to zniszczenie połączenia klejowego, w którym nastąpiło widoczne rozdzielanie sklejonych elementów na granicy faz klej-materiał klejony.

Wśród czynników wpływających na nośność połączeń adhezyjnych należy wymienić: pracę adhezji oraz pracę związaną z pokonaniem innych rodzajów sił (np. elektrostatycznych), rozkład naprężeń w spoinie, właściwości mechaniczne łączonych elementów, pracę odkształcenia związaną z pokonywaniem oporów wynikających z wzajemnych oddziaływań nierówności analizowanych powierzchni i inne [28, 339]. Metody badań wytrzymałości adhezyjnej, wśród których można wymienić zarówno bezpośrednie, jak i pośrednie, przedstawiono m.in. w pracach [28, 31, 73, 203, 279, 306, 339, 353].

1.4. Metody konstituowania właściwości adhezyjnych

Analizując zagadnienia związane z konstituowaniem właściwości adhezyjnych powierzchni materiałów można zauważyć, że wszelkie działania dotyczące tego procesu skupiają się głównie wokół trzech obszarów: właściwego przygotowania powierzchni i warstwy wierzchniej poprzez różne metody ich obróbki, ulepszenia warstwy wierzchniej za pomocą metod fizycznych i chemicznych oraz zespołu czynności związanych z utworzeniem połączenia, stanowiących sposób wykonania określonego rodzaju połączenia adhezyjnego.

1.4.1. Przygotowanie powierzchni

Jedną z możliwości konstituowania właściwości adhezyjnych jest zastosowanie właściwego sposobu przygotowania powierzchni [59, 94, 152, 241, 242, 245]. W zależności od charakterystyki oraz potrzeb wykonywanych połączeń adhezyjnych można wpływać na zwiększenie lub też zmniejszenie ich adhezji. Wybór sposobu przygotowania powierzchni, w tym wybór odpowiednich operacji technologicznych, pozwalających na uzyskanie zarówno odpowiedniej struktury, jak i właściwości energetycznych, jest uzależniony od wielu czynników, z których niezwykle istotny jest rodzaj materiałów tworzących połączenie adhezyjne.

Oczyszczanie chemiczne powierzchni (określane często jako odtłuszczenie) stanowi najczęściej jedną z pierwszych operacji w procesie przygotowania powierzchni materiałów do łączenia [59, 95, 152]. Powierzchnie elementów przeznaczonych do łączenia pokrywa warstwa substancji smarujących, warstwy pyłów, odpadów pozostałych po różnych rodzajach obróbki, związków organicznych i nieorganicznych. Stąd też celem oczyszczania chemicznego jest usunięcie zanieczyszczeń z powierzchni łączonych elementów, które mogą przyczyniać się do osłabiania wiązań adhezyjnych w strefie kontaktu materiałów [80, 95]. Wybór metody oczyszczania chemicznego oraz środka odtłuszczającego zależy od wielu czynników, np. skuteczności oczyszczania chemicznego, rozmiarów elementów przeznaczonych do klejenia, rodzaju materiału, dostępności do oprzyrządowania technologicznego i innych [59, 95, 152]. Operacja ta może być realizowana za pomocą różnych środków odtłuszczających oraz przy użyciu odpowiedniego rodzaju oprzyrządowania [59, 152, 203]. Wśród najczęściej stosowanych środków odtłuszczających można wymienić: aceton, benzynę, benzen, etanol, trichloroetylen, tetrachloroetylen, toluen, keton metyloowoetylowy i inne [59, 95, 152]. Operacja oczyszczania chemicznego może być przeprowadzona w myjkach wannowych, komorowych, za pomocą tkanin [95].

Metody mechaniczne stosowane są zarówno do oczyszczania, jak i modyfikowania struktury geometrycznej powierzchni [171, 330, 367]. Kształt powierzchni zewnętrznej jest jej cechą związaną ze stopniem rozwinięcia powierzchni [217]. Zastosowanie obróbki mechanicznej umożliwia konstituowanie struktury geometrycznej powierzchni, zapewniającej jej rozwinięcie, jednak na ogół nie zapewnia dobrego uaktywnienia powierzchni. Wśród metod mechanicznych, stosowanych jako sposoby przygotowania powierzchni przeznaczonych do łączenia, można wymienić m.in.: obróbkę narzędziami ściernymi nasypowymi, obróbkę strumieniowo-ścierną, piaskowanie, śrutowanie, kulkowanie, szcztokowanie, skrobanie, szlifowanie [95, 203, 271]. W. Zielecki i J. Łunarski [330] w swoich badaniach, jako sposoby przygotowania powierzchni elementów przeznaczonych do klejenia, stosowali m.in. obróbkę strumieniowo-ścierną elektrokorundem w ośrodku sprężonego powietrza, śrutowanie śrutem stalowym w określonych warunkach obróbki.

J. Kuczmaszewski [152] zauważa, że w przypadku stopów magnezu, mechaniczna obróbka ich powierzchni najczęściej polega na obróbce strumieniowo-ściernej (np. piaskowaniu).

Podczas stosowania tych metod obróbki należy zwrócić szczególną uwagę na geometrię nierówności powierzchni [152, 367] oraz na to, aby obróbka ta nie ukonstytuowała w warstwie wierzchniej łączonych elementów nadmiernych naprężeń własnych, które w efekcie końcowym mogą powodować zmniejszenie wytrzymałości połączeń adhezyjnych [95]. L.F.M. da Silva i inni [63] podkreślają, że duża chropowatość powierzchni może powodować wzrost koncentracji naprężeń i w konsekwencji prowadzić do obniżenia wytrzymałości połączeń. J. Godzimirski [102] zauważa, że nadmierne schropowacenie powierzchni przeznaczonych do łączenia może wpływać na obniżenie wytrzymałości połączeń adhezyjnych (klejowych), jeżeli masa klejowa nie zwiłży wystarczająco wgłębien nierówności powierzchni. J. Kuczmaszewski [152, 154] przedstawia pogląd, że analizując geometrię powierzchni pod względem zwiłżania, najkorzystniejszy jest kształt nierówności w postaci wydłużonych występow (o małym kącie wierzchołkowym) oraz o znacznej częstotliwości ich występowania. R. Sikora [272, 273] zwraca uwagę na stan nierówności powierzchni, zwłaszcza w kontekście błędów wzajemnego położenia klejonych powierzchni, który nie zawsze jest zgodny z założeniami konstrukcyjnymi. J. Godzimirski i inni w pracy [95] podkreślili, że najlepsze właściwości wytrzymałościowe uzyskują połączenia, w których powierzchnia elementów charakteryzuje się chropowatością (zdefiniowaną maksymalną wysokością chropowatości) $R_m = 7 \div 25 \mu\text{m}$.

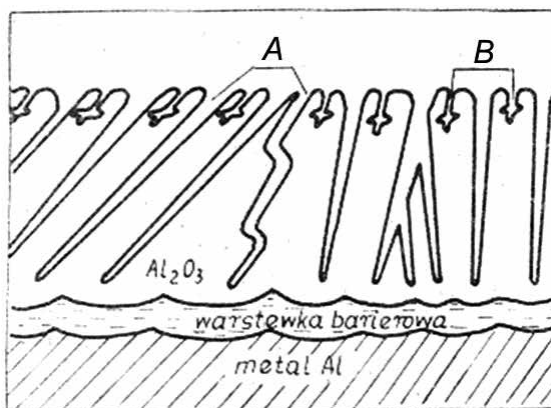
P. Jasiulek i A. Rawicz [134] informują, że stosowanie metod mechanicznych powoduje wprowadzenie nieosiowych nierównomiernych naprężeń ścinających, które powodują powstawanie mikrouszkodzeń strukturalnych, m.in. mikronaprężeń, dyslokacji, ostrych krawędzi, szczelin itp. Stwierdzono także, że obróbka mechaniczna może ukonstytuować w warstwie wierzchniej łączonych elementów nadmierne naprężenia ściskające, które wywołują odkształcenia części sklejaných. Jest to przyczyną wprowadzenia do spoiny dodatkowych naprężeń, które mogą spowodować zmniejszenie wytrzymałości połączeń klejowych nawet o 10 ÷ 50% [95].

Metody chemicznego przygotowania powierzchni z wykorzystaniem ciekłych związków chemicznych są stosowane w przypadkach powierzchni materiałów, mających zanieczyszczenia silnie związane z tą powierzchnią. Metody chemiczne pozwalają na odpowiednie rozwinięcie powierzchni i warstwy powierzchniowej o składzie chemicznym zapewniającym dużą aktywność fizykochemiczną powierzchni, w odniesieniu do stosowanej substancji łączącej (np. kleju), nakładanej lub pośredniczącej [95, 311].

W przypadku trawienia stopów aluminium wykazano [95], że skład kąpeli trawiącej w sposób istotny wpływa na wytrzymałość połączeń klejowych. Przykładowo, wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych stopów aluminium trawionych w 4% NaOH jest o 40% większa od trawionych w 20% HNO₃.

Jedną z często stosowanych obróbek elektrochemicznych, zwłaszcza w przypadku stopów aluminium oraz tytanu, jest anodowanie. Proces ten może być realizowany przy użyciu kąpeli o określonym składzie chemicznym [78, 138, 307]. Właściwości i wygląd powłoki tlenkowej zależą przede wszystkim od materiału wyjściowego (gatunek aluminium), sposobu jej wytworzenia i zastosowanego sposobu wstępnego przygotowania powierzchni, natomiast porowatość powłoki pozwala stosować różne techniki barwienia anodowanych powierzchni wytworów aluminiowych. Schemat struktury warstwy wierzchniej stopu aluminium po anodowaniu przedstawiono na rys. 1.5.

Charakterystykę struktury anodowej warstewki tlenkowej na stopie aluminium przedstawił m.in. Z. Wiącek w swoich pracach [307, 308, 309]. W badaniach, warstewki Al_2O_3 formowano stosując kwas siarkowy i kwas chromowy [306] oraz kilka wariantów warunków uszczelniania [308]. G.W. Critchlow i inni [54] stosowali w badaniach przygotowanie powierzchni aluminium, w celu wzrostu wytrzymałości połączeń, za pomocą procesu anodowania wykorzystując m.in. kwas borowy i kwas siarkowy.



Rys. 1.5. Schemat struktury warstwy wierzchniej stopu aluminium po anodowaniu: A - pory, B - rozwarstwienia [307]

W literaturze można spotkać różne synonimy określenia odnoszącego się do substancji (pro)adhezyjnych, takie jak np.: promotory adhezji [20, 95, 130, 285, 339], primery [130, 185, 339], aktywatory oraz grunty [95]. Określa się je jako substancje zwiększające adhezję powierzchni materiałów tworzących połączenie lub też powodujące przyspieszenie procesu sieciowania np. kleju. Środki te zwiększają udział wiązań chemicznych, głównie kowalencyjnych. Energia tych wiązań jest wielokrotnie większa niż podstawowych wiązań występujących w połączeniach adhezyjnych (np. sił van der Waalsa). W odniesieniu do technologii klejenia najczęściej przyjmuje się określenie: promotor adhezji i *primer*.

Z uwagi na to, że swobodna energia powierzchniowa promotorów adhezji w stanie stałym (po odparowaniu rozpuszczalnika) jest większa niż materiału, ułatwiają one procesy adhezyjne, takie jak: klejenie, drukowanie, laminowanie i inne. Struktura dobrego promotora adhezji powinna zapewniać oddziaływanie zarówno z łączonym materiałem, jak i z substancją pośredniczącą (np. klejem) [232, 339].

Można wyróżnić dwa rodzaje promotorów adhezji, jeden z nich nakładany jest na powierzchnie łączonych materiałów, drugi natomiast jest wprowadzany bezpośrednio do materiałów łączących [95]. W. Szlezyngier [286] analizował wpływ niektórych wielofunkcyjnych monomerów silanowych na przebieg procesów utwardzania i wytrzymałość spoin klejowych wybranych tworzyw epoksydowych. Wyniki badań wykazały m.in. korzystny wpływ modyfikacji klejowych polimerów epoksydowych, wielofunkcyjnymi monomerami silanowymi na wzrost adhezji spoiny klejowej do podłoża metalowego oraz istotny wzrost szybkości i gęstości sieciowania polimerów badanych.

A. Krysztalkiewicz [147] przedstawił charakterystykę wielu promotorów adhezji wskazując na korzystny wpływ, m.in. tytanianowych, silanowych i boranowych substancji proadhezyjnych na zjawisko adhezji. Przykładowo, jeżeli zadaniem promotora adhezji jest zwiększenie wytrzymałości adhezyjnej połączenia klejowego, promotor adhezji nakłada się na obie łączone powierzchnie [95]. Podczas łączenia się następuje jego dyfuzja w głąb powierzchni, na które został naniesiony, oraz powstają wiązania chemiczne promotora z cząsteczkami podłoża [198, 339].

Podczas stosowania promotorów adhezji należy uwzględnić rodzaj łączonych materiałów, a w szczególności układ łączony materiał – substancja łącząca (np. klej), warunki łączenia, postać promotora adhezji [95] oraz jego właściwości (np. zdolność do tworzenia połączenia, wrażliwość na wzrost temperatury, lotność i inne) [251]. Wśród używanych promotorów adhezji należy wymienić silany (najczęściej stosowane, zwłaszcza do klejenia metali i szkła), tytaniany i cyrkoniany metali [95, 130, 285, 339]. Jako promotory adhezji stosuje się także tworzywa fenolowo-formaldehydowe, kauczuki chlorowane (do klejenia polipropylenu), związki heterocykliczne zawierające azot (do klejenia miedzi), związki poliuretanowe, akrylowe, nitrocelulozowe [85, 185, 251].

Operacja płukania powierzchni materiałów łączonych występuje najczęściej po jej trawieniu w kąpeli kwaśnej lub alkalicznej a także po specjalnej obróbce. Płukanie można przeprowadzić z użyciem wody (np. po trawieniu chemicznym) lub rozpuszczalnikami stosowanymi do odtłuszczenia (po odpowiedniej obróbce mechanicznej). W literaturze [10, 59, 95] są przedstawione informacje dotyczące warunków technologicznych operacji płukania (rodzaj wody, temperatura wody, czas płukania) dla poszczególnych rodzajów materiałów.

A. Stępniewski i A. Szponar [283] na podstawie przeprowadzonych badań, dotyczących wpływu twardości wody na wytrzymałość połączeń klejowych blach aluminiowych i stalowych stwierdzili, że płukanie metalu wodą twardą w procesie

przygotowania powierzchni do klejenia wywołuje ujemny wpływ na wytrzymałość połączenia. W miarę powiększania się twardości wody można zauważyć tendencję pogarszania się wytrzymałości połączenia.

P.R. Underhill, A.N. Rider oraz D.L. DuQuesnay [294] stosowali w swoich badaniach, jako sposób przygotowania powierzchni stopów aluminium, płukanie w ciepłej wodzie destylowanej o temperaturze 40°C i 50°C, o rezystancji powyżej 4MΩ/cm, przy różnym czasie zanurzenia materiałów badanych. Zauważyli, że korzystniejsze jest zastosowanie płukania w wodzie o temperaturze 50°C niż w 40°C, oraz że płukanie ciepłą wodą prowadzi do poprawy trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych.

1.4.2. Metody modyfikowania warstwy wierzchniej

W zależności od rodzaju materiałów analizowanych może wystąpić konieczność zarówno usuwania różnego rodzaju zanieczyszczeń, jak również modyfikowania warstwy wierzchniej materiału. Proces tego modyfikowania w odniesieniu do tworzyw polimerowych polega m.in. na powstawaniu grup polarnych, które w znaczący sposób wpływają na wzrost wytrzymałości połączeń adhezyjnych [60, 339]. Ponadto, w wyniku procesów modyfikowania właściwości warstwy wierzchniej, może nastąpić zwiększenie chropowatości powierzchni, poprawa zwilżalności, zmiana struktury fizycznej i chemicznej warstwy wierzchniej [87, 95, 314] oraz zwiększenie swobodnej energii powierzchniowej [60, 260, 339]. Zmiany struktury warstwy wierzchniej polegają głównie na jej umocnieniu, wskutek procesów sieciowania oraz na powstawaniu grup funkcyjnych, które są zdolne do tworzenia silnych połączeń fizycznych i chemicznych z innymi materiałami (głównie grup polarnych stanowiących aktywne centra polarne) [339].

Wśród metod modyfikowania warstwy wierzchniej tworzyw polimerowych można wymienić m.in.:

- wyładowania koronowe (metoda wyładowań niezupełnych w powietrzu, aktywowanie) [56, 106, 159, 284, 336, 347],
- płomieniową [56, 70],
- plazmową [30, 139, 160, 192, 193, 216, 298, 323],
- chemiczną [127, 339],
- utlenianie za pomocą ozonu [45, 292],
- oddziaływanie na warstwę wierzchnią tworzyw różnego rodzaju cząstek [340, 341, 342] (za pomocą promieniowania [211]), w tym zastosowanie metody laserowej [26, 165].

Zauważono, że niektóre metody najczęściej stosowane do modyfikacji warstwy wierzchniej tworzyw polimerowych w celu zwiększenia właściwości adhezyjnych, znalazły zastosowanie także do innych materiałów konstrukcyjnych [212]. L. Sor-

rentino i L. Carrino zamieścili w pracy [277] informacje na temat wykorzystania metody plazmowej do oczyszczania oraz aktywacji powierzchni stopów aluminium jako alternatywnej metody w stosunku do tradycyjnych elektrochemicznych oraz chemicznych metod przygotowania powierzchni. E.G. Baburaj i inni [19] wykorzystali proces ablacji laserowej do modyfikacji powierzchni tytanu, dzięki któremu otrzymano korzystne właściwości powierzchni materiału, przejawiające się m.in. zwiększeniem powierzchni rzeczywistej oraz zmianą w składzie chemicznym powierzchni, a w konsekwencji poprawą zwilżalności oraz wzrostem adhezji. S. Bhowmik i inni [29] podali, że zastosowanie modyfikacji powierzchni tytanu poprzez anodowanie wodorotlenkiem sodu wpływa korzystnie na wzrost wytrzymałości połączeń klejowych tytanu, które poddano działaniu agresywnego środowiska chemicznego. Zagadnienie anodowania wodorotlenkiem sodu na wytrzymałość połączeń klejowych jest opisane również w wielu pracach [5, 129, 142].

W badaniach przeprowadzonych przez Y. Nakamura, Y. Suzuki i Y. Watanabe [188], dotyczących wpływu zastosowania trawienia plazmą tlenową, jako sposobu przygotowania powierzchni, na adhezję pomiędzy cienką warstwą poliamidu a metalem oraz na wytrzymałość adhezyjną tego układu materiałów wykazano, że na wytrzymałość adhezyjną pomiędzy warstwą poliamidu i metalem ma wpływ stan chemiczny powierzchni warstewki poliamidu. Utworzone podczas trawienia plazmą tlenową wiązania hydrofilowe, np. C-O, wpływają na adhezję pomiędzy cienką warstwą poliamidu a metalem.

C. Sperandio i inni [280] zastosowali przygotowanie powierzchni aluminium metodą plazmową w atmosferze mieszanki gazu składającej się z azotu i tlenu o różnej koncentracji. Zauważono, że wykorzystanie obróbki plazmą wpływa na wzrost adsorpcji łańcuchów polimerowych spowodowanej wzrostem polarności powierzchni, a skutkiem tego jest obserwowalne powiększanie się oddziaływań sił van der Waalsa pomiędzy substancją klejową a łączonym materiałem.

1.5. Wytrzymałość połączeń adhezyjnych

1.5.1. Wprowadzenie

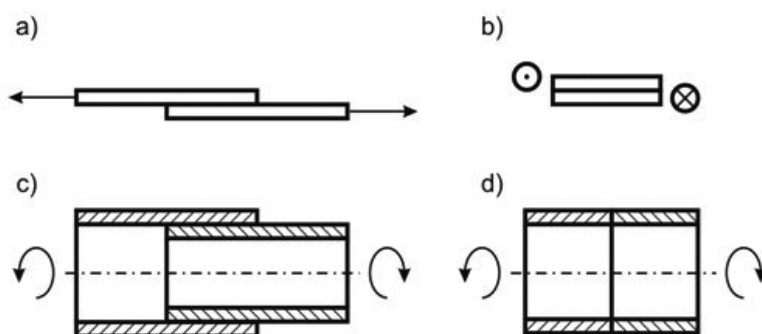
Zjawiska niszczenia połączeń adhezyjnych (w tym klejowych) były i są przedmiotem wielu badań [3, 59, 67, 95, 148, 195, 262, 287, 304, 305, 365]. Rozpatrując wytrzymałość połączeń klejowych, najczęściej uwzględnia się wytrzymałość statyczną [57, 59, 96, 104, 151, 200, 358]. Związane jest to z tym, iż jednym z podstawowych warunków, jakie powinno spełnić połączenie klejowe (adhezyjne), jest osiągnięcie założonej wytrzymałości statycznej. Wytrzymałość statyczna (doraźna, krótkotrwała), zwana umownie wytrzymałością, jest określona dla przyjętych czasów działania sił, jako wielkość rzędu od kilku do kilkudziesięciu sekund. Podczas

eksploatacji połączeń klejowych jest to niezwykle istotna informacja, pozwalająca m.in. na określenie wartości oraz rodzajów obciążeń, przy których połączenie może być eksploatowane.

Oprócz wytrzymałości statycznej, połączenia klejowe są badane w aspekcie wytrzymałości długotrwałej [96, 331], zmęczeniowej [51, 91, 92, 95, 113, 151, 204] i dynamicznej [317, 369]. R. Sikora i J. Kuczmaszewski [261] oraz J. Godzimirski i M. Rośkiewicz [96] porównywali wytrzymałość doraźną i długotrwałą połączeń adhezyjnych, do wykonania których zastosowano polimer epoksydowy. J. Zimniak [331] analizował wytrzymałość długotrwałą połączeń klejowych metal – laminat na oddzieranie obwodowe, zauważając, że wytrzymałość ta w odniesieniu do badanych połączeń jest zależna od docisku elementów łączonych i rodzaju kleju. L. Ciesielski i D. Ciesielska [50] badali zachowanie się spoin epoksydowych w warunkach długotrwałego obciążenia. Przeprowadzili próby pełzania, ustalając m.in., że dla klejów epoksydowych podczas pełzania odkształcenia połączeń są nieduże. R. Buchowiecki, T. Rodak i M. Szymanek [41] określali wytrzymałość zmęczeniową stalowych połączeń zakładkowych wykonanych przy użyciu 3 rodzajów klejów, określając liczbę cykli zmęczeniowych, prowadzących do zniszczenia badanych połączeń. W aspekcie wytrzymałości zmęczeniowej M. Porębska [201] rozpatrywała połączenia klejowe tulejowe. Także w pracy [304] M. Warszyński, B. Onyszko oraz M. Zych-Porębska przedstawili badania złączy tulejowych i stożkowych poddanych badaniom zmęczeniowym oraz badaniom pełzania.

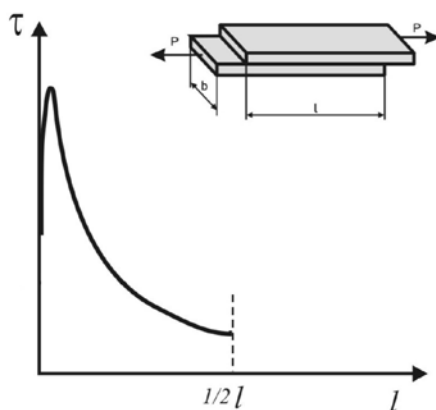
Podczas oceny wytrzymałości połączeń klejowych uwzględnia się kierunek i sposób działania sił zewnętrznych wywołujących naprężenia w połączeniach [38, 95, 118, 153, 172]. Stąd też rozpatruje się połączenia obciążone na zginanie, ścinanie, oddzieranie oraz odrywanie [352, 354, 355, 361, 364, 366, 368, 369], które charakteryzują się wytrzymałością uzależnioną od wielu czynników, a także różnym rozkładem naprężeń w spoinie klejowej [38, 59, 62, 95, 105, 153, 155].

W przypadku połączeń adhezyjnych najczęściej rozważa się połączenia obciążone na ścinanie ze względu na to, iż takie połączenia mogą przenosić duże obciążenia [95, 104, 118]. Z tego względu podczas projektowania połączeń klejowych dąży się, aby dominowały w nich obciążenia ścinające. Przykłady takich połączeń klejowych przedstawiono na rys. 1.6. W wielu publikacjach przedstawiono zagadnienia wytrzymałości połączeń klejowych w różnych aspektach. Ponadto najczęściej w pracach związanych z charakteryzowanym obszarem badawczym autorzy zamieszczają wyniki badań dotyczących połączeń klejowych jednozakładkowych (rys. 1.6.a) [4, 98, 114, 115, 172, 173], dwuzakładkowych [76, 93, 118], dwunakładkowych [49, 322] i inne [89, 115, 149].



Rys. 1.6. Modelowe połączenia klejowe obciążone na ścinanie: a) zakładkowe obciążone siłami, b) zakładkowe obciążone wydatkiem naprężeń stycznych, c) tulejowe obciążone momentem skręcającym, d) osiowo-symetryczne, czołowe obciążone momentem skręcającym [95]

Typowy rozkład naprężenia stycznego w spoinach klejowych połączeń obciążonych na ścinanie, wzdłuż długości zakładki, przedstawiono na rys. 1.7.



Rys. 1.7. Rozkład naprężenia stycznego w spoinach klejowych połączeń obciążonych na ścinanie wzdłuż długości zakładki: l – długość zakładki, b – szerokość łączonych elementów, P – siła działająca na połączenie, τ – naprężenie styczne, $l/2$ – połowa długości zakładki spoiny klejowej (opracowanie na podstawie [95])

Zależności opisujące rozkład naprężenia stycznego w spoinach klejowych analizowanych połączeń oraz wytrzymałość tych połączeń, chociaż zawierają konieczne założenia upraszczające, to jednak mogą służyć do oceny wpływu różnych czynników na wytrzymałość połączeń klejowych.

Zgodnie z zależnościami przedstawionymi w pracach [59, 62, 63, 95, 102, 123, 153, 210, 255, 256], wytrzymałość zakładkowego połączenia klejowego obciążonego na ścinanie zależy głównie od:

- 1) rodzaju i wartości obciążenia,
- 2) właściwości mechanicznych kleju, głównie wartości naprężeń niszczących i współczynnika sprężystości postaciowej;
- 3) wymiarów połączenia – szerokości, długości i grubości spoiny klejowej, grubości klejonych elementów;
- 4) właściwości fizycznych klejonych elementów, np. współczynnika sprężystości wzdłużnej,
- 5) czasu trwania obciążenia,
- 6) temperatury.

Siłę P niszczącą zakładkowe połączenie klejowe obciążone na ścinanie dla długości zakładki większej od granicznej można przedstawić w postaci [59, 95, 153]:

$$P = \tau_n b \sqrt{\frac{2gg_k E}{G_k}} \quad (1.15)$$

gdzie: τ_n – naprężenie niszczące,
 b – szerokość elementu klejonego,
 g – grubość elementu klejonego,
 g_k – grubość spoiny klejowej,
 E – współczynnik sprężystości wzdłużnej elementów łączonych,
 G_k – współczynnik sprężystości postaciowej kleju w stanie utwardzonym.

Przedstawiona zależność może być wykorzystywana m.in. do określania wpływu wymiarów połączenia klejowego, właściwości klejonych elementów i kleju na wytrzymałość połączenia.

Z analizy teoretycznej, badań niszczących i analizy modelowej metodą elementów skończonych przedstawionej w pracach [62, 63, 95, 123, 153] wynika, że współczynnik spiętrzenia naprężenia zależy przede wszystkim od sztywności kleju (określonej przez współczynnik sprężystości postaciowej lub wzdłużnej), sztywności na zginanie oraz sztywności na rozciąganie łączonych materiałów, grubości spoiny klejowej i warunków brzegowych związanych m.in. z rodzajem działających obciążeń.

Rozkład naprężenia stycznego w spoinie połączenia zakładkowego, wyznaczony przez Golanda i Reisnera i opisany w pracach [59, 63, 95, 123, 328] uwzględnia naprężenie pochodzące od zginania klejonych elementów, które jest wywołane mi-

mośrodowością obciążenia połączenia zakładkowego (czego nie uwzględnia teoria Volkersena [59, 63]). Jeżeli spoina klejowa nie jest obciążona momentem, wówczas wartość maksymalnego naprężenia stycznego obliczanego według teorii Golanda-Reisnera jest przeważnie mniejsza niż ta obliczona według teorii Volkersena [95].

Naprężenie styczne określone według teorii Bensona-Kesleya [95] charakteryzuje wartość naprężenia maksymalnego, podobna do obliczonej według teorii Volkersena. Jednakże nie występuje ono na krawędzi spoiny, tylko w jej pobliżu. Jest to zgodne z teorią wytrzymałości materiałów. Wynika z niej, że na swobodnych powierzchniach brzegowych nie może występować naprężenie styczne. Potwierdzeniem tego są wyniki analizy numerycznej zamieszczone w wielu pracach [59, 63, 143], w tym wyniki badań własnych [223 ÷ 226, 237, 246]. Ten sam rozkład naprężenia podany przez Adamsa [59, 63] uwzględnia poprzeczne odkształcenia elementów klejonych.

Analityczne metody określania rozkładu naprężenia w spoinach klejowych połączeń obciążonych na ścinanie są obarczone niedokładnością, wynikającą z przyjmowanych założeń upraszczających. W związku z tym żadna z tych metod nie umożliwia zadowalająco dokładnego określenia rozkładu naprężenia w spoinach klejowych tego typu połączeń.

W przypadku połączeń klejowych, w których działające na nie naprężenie powoduje powstanie w spoinach klejowych naprężenie normalne względem powierzchni elementów łączonych, pojawia się oddzieranie [95, 176, 364, 368, 261, 262, 265, 306]. Występuje wówczas duża nierównomierność rozkładu naprężenia oraz jego spiętrzenie przy obciążonej krawędzi połączenia [95, 264]. W wielu publikacjach, połączenia obciążone na oddzieranie są przedmiotem badań i analiz [114, 261], ze względu na ich występowanie w różnorodnych konstrukcjach.

Według niektórych autorów [59, 95] połączenia obciążone na zginanie są odmianą połączeń obciążonych na oddzieranie. Jest to związane z tym, że w połączeniach klejowych obciążonych na zginanie, występuje rozkład naprężeń normalnych podobny do występującego w spoinach typowych połączeń obciążonych na oddzieranie.

Innym rodzajem połączeń klejowych są połączenia obciążone na odrywanie, w których występuje złożony stan naprężenia, wynikający głównie z dużej różnicy współczynników sprężystości wzdłużnej łączonych elementów oraz kleju [95].

Występują także połączenia, w których może zachodzić nieosiowe ich obciążenie. Takie połączenia są określane jako połączenia obciążone na nierównomierne odrywanie. W praktyce inżynierskiej raczej unika się stosowania połączeń obciążonych na odrywanie lub eliminuje skutki nieosiowego obciążenia spoin np. poprzez zmiany konstrukcyjne [59, 95].

1.5.2. Czynniki wpływające na wytrzymałość połączeń klejowych

Otrzymanie stosownego połączenia klejowego pod względem uzyskanej wytrzymałości oraz powtarzalności wymiarowo-kształtowej, wymaga uwzględnienia zarówno czynników materiałowych, technologicznych, konstrukcyjnych, jak i czynników związanych z eksploatacją analizowanego połączenia. Wpływ wymienionych czynników na wytrzymałość połączeń klejowych opisano w licznych pracach [7, 15, 55, 59, 92, 135, 142, 153, 158, 288, 289], także autora [231, 234, 237, 238, 243, 244, 247], w odniesieniu do wielu materiałów konstrukcyjnych, w tym: tworzyw polimerowych [66, 118, 172, 241], stopów aluminium [4, 54, 169, 212, 221], tytanu [29, 142, 244], stali odpornej na korozję [247] oraz połączeń hybrydowych, np. stal-kompozyt [62], blacha ocynkowana- polietylen [197].

Czynnikiem materiałowym analizowanymi podczas wykonywania połączeń klejowych są przede wszystkim struktura powierzchni i właściwości, głównie fizyczne, łączonych materiałów [17, 59, 92, 95, 235, 236, 248]. Czynniki te warunkują wybór sposobu przygotowania powierzchni łączonych materiałów. Struktura powierzchni niezwykle istotnie wpływa na możliwość uzyskanie połączenia o określonej wytrzymałości. Jest to przede wszystkim związane z możliwością wnikania kleju w mikropory powierzchni i tworzenia zakotwiczeń mechanicznych [339]. Przygotowując powierzchnię do procesu klejenia przeprowadza się analizę struktury geometrycznej tej powierzchni, wpływając ewentualnie na jej korzystne rozwinięcie [59].

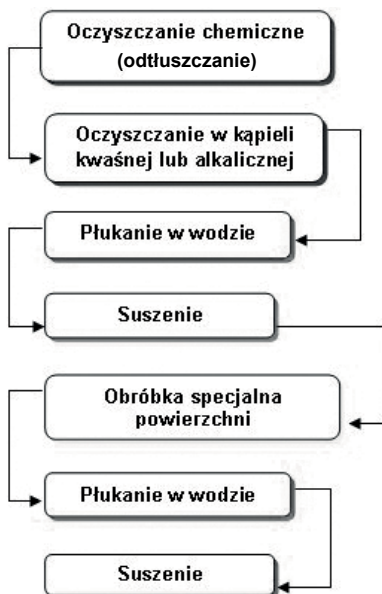
Czynniki technologiczne to: sposób przygotowania powierzchni materiałów przeznaczonych do klejenia [19, 103, 138, 221, 234], rodzaj kleju (skład chemiczny i właściwości kleju) [95, 203], sposób przygotowania i nakładania kleju [58, 152], czas przydatności jego użycia [37], warunki utwardzania spoiny klejowej (głównie docisk, czas, temperatura oraz katalizator procesu utwardzania) [90, 95, 220], jak również warunki wykonywania połączeń klejowych (np. temperatura, wilgotność, warunki sezonowania łączonych materiałów). Wpływ wymienionych czynników na wytrzymałość połączeń klejowych opisano w licznych pracach [6, 59, 95, 152, 203, 265, 282].

Odpowiednie przygotowanie powierzchni materiałów jest istotnym warunkiem uzyskania połączeń klejowych o założonych właściwościach [95, 152, 181, 247, 249]. W wyniku przygotowania powierzchni powinno wystąpić działanie wszystkich mechanizmów wiążących, zarówno natury fizycznej, w tym typowo mechanicznej, jak i chemicznej. Ten etap technologii klejenia powinien zapewnić uzyskanie jak najsilniejszych wiązań adhezyjnych w połączeniu klejowym. W tym celu należy m.in. [59, 95, 171]:

- usunąć zanieczyszczenia powierzchni łączonych elementów (m.in. pyły, tłuszcze, smary, mikroorganizmy, pęcherzyki gazów, luźno związane warstwy korozyjne),

- uzyskać właściwe rozwinięcie powierzchni materiałów łączonych,
- uzyskać dobre uaktywnienie powierzchni materiałów łączonych.

Zależnie od właściwości materiałów, warunków techniczno-technologicznych i innych, proces przygotowania powierzchni może być złożony z różnych operacji (rys. 1.8) [56, 95, 181].



Rys. 1.8. Schemat procesu przygotowania powierzchni (opracowanie na podstawie [221])

Istotny wpływ na właściwości połączenia klejowego ma budowa chemiczna podstawowego składnika każdego kleju (polimeru lub też monomeru) [95, 269, 362]. Związane jest to z tym, że zarówno adhezja, jak i kohezja oraz odporność na działanie czynników szkodliwych (np. ciepła, promieniowania UV, różnych czynników chemicznych, tlenu z powietrza), zależą od składu chemicznego substancji podstawowej kleju [95, 203, 208, 263, 269, 286].

W wielu publikacjach są przedstawiane zagadnienia związane z badaniem właściwości klejów, najczęściej w aspekcie zwiększania wytrzymałości połączeń klejowych [60, 204]. S.G. Prolongo i inni [207] przeprowadzili badania dotyczące analizy zdolności adhezyjnej i trwałości połączeń wykonanych z zastosowaniem klejów epoksydowych zauważając, że żywice epoksydowe utwardzane aminami aromatycznymi wykazały większą wytrzymałość niż utwardzane innymi aminami. W opracowaniach [219, 238] wykazano pozytywny wpływ zastosowania klejów epoksydowych na wytrzymałość połączeń klejowych poliamidu PA6 [219] oraz blach stalowych ocynkowanych [238]. W.C. Wake zamieścił w pracy [300] informacje o klejach wzmocnionych oraz modyfikowanych. B. Jurkowski, M. Uchman

i E. Lewandowska [140] przedstawiają wyniki badań dotyczące wpływu wybranych czynników technologicznych przygotowania kleju na właściwości i trwałość połączeń klejowych.

W zależności od budowy związku chemicznego, który wchodzi w skład kleju, podczas utwardzania powstają różne struktury klejów [59, 269]. Charakteryzują się one odmiennymi właściwościami fizycznymi i chemicznymi. Przykładowo, usieciowana struktura makrocząsteczek w porównaniu ze strukturami łańcuchowymi i rozgałęzionymi, zapewnia większą wytrzymałość, sztywność, odporność na pęcznienie, odporność w podwyższonej temperaturze i odporność chemiczną [209]. Wymienione właściwości polepszają się wraz ze zwiększaniem stopnia usieciowania. Kleje konstrukcyjne są polimerami utwardzalnymi o strukturze usieciowanej. A. Leistner i inni [163] przedstawiają badania związane z chemiczną modyfikacją tworzywa epoksydowego poprzez powstanie tzw. wzajemnie przenikających się sieci polimerowych IPN (*Interpenetrating Polymer Network*), które powstają na skutek jednoczesnej polimeryzacji dwu wielofunkcyjnych monomerów. Badania [163] wykazały, że kompozycje o wzajemnie przenikających się sieciach epoksydowej i bismetakrylanowej mogą korzystnie modyfikować właściwości klejów epoksydowych odpornych w podwyższonej temperaturze.

Kleje, oprócz podstawowych składników, mogą zawierać także inne związki, takie jak: rozpuszczalniki, napełniacze, plastyfikatory, koalescenty, środki zwiększające przyczepność, promotory adhezji, środki tiksotropujące, barwniki, środki powierzchniowo czynne, antyutleniacze [266, 267, 270]. Wymienione związki wpływają także na właściwości chemiczne i mechaniczne klejów.

Do czynników konstrukcyjnych wpływających na wytrzymałość połączeń klejowych zalicza się głównie [7, 15, 59, 62, 95, 153, 157, 231, 242, 243, 288, 289]:

1. grubość materiałów klejonych,
2. grubość spoiny klejowej,
3. długość zakładki połączenia,
4. sztywność materiałów klejonych,
5. kształt (rodzaj) połączenia.

W pewnym przedziale grubości spoin klejowych ($< 0,20$ mm), wartość naprężeń niszczących klejów jest funkcją grubości spoin, którą z przybliżeniem uznaje się za liniową. Z tego też względu w połączeniach głównie zakładkowych mogą być określone, zalecane pod względem optymalizacji wytrzymałości, grubości spoin klejowych, których wartość zależy od właściwości kleju, wartości sił adhezji oraz sposobu obciążenia połączenia. W połączeniach klejowych obciążonych na ścinanie stosuje się grubość spoin klejowych, różną dla różnych klejów, mieszczącą się na ogół w przedziale 0,05 do 0,15 mm [59, 162].

W połączeniach klejowych zakładkowych, jako jeden z czynników konstrukcyjnych uwzględnianych przy ich projektowaniu jest długość zakładki połączenia [95, 286]. W takich połączeniach istnieje tzw. graniczna długość zakładki, prze-

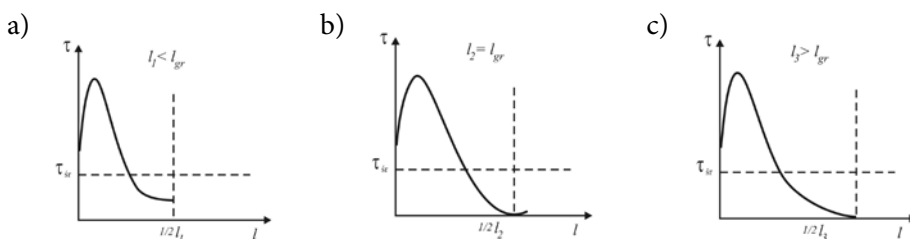
kroczenie której (zgodnie z teorią Volkersena) nie powinno powodować dalszego zwiększania wytrzymałości połączenia klejowego. Znajomość granicznej długości zakładki ma ważne znaczenie aplikacyjne. Pozwala na pośrednie obliczenie grubości łączonych elementów [95].

W przypadku klejenia jednakowych elementów graniczną długość zakładki można z dostateczną dokładnością określić zależnością [95]:

$$l_{gr} \geq 5 \sqrt{\frac{E g g_k}{2 G_k}} \quad (1.16)$$

gdzie: E – współczynnik sprężystości wzdłużnej elementów klejonych,
 g – grubość elementów klejonych,
 g_k – grubość spoiny klejowej,
 G_k – współczynnik sprężystości postaciowej kleju w stanie utwardzonym.

W połączeniach klejowych, w których długość zakładki jest mniejsza od granicznej, spoina klejowa jest obciążona na całej długości rosnącym nieliniowo od środka zakładki naprężeniem stycznym. Dla połączeń klejowych, w których długość zakładki jest większa od granicznej, naprężenie styczne na środkowej części zakładki ma wartość zbliżoną do zera (rys. 1.9). Graniczna długość zakładki spoiny klejowej l_{gr} , jest związana z rozkładem naprężenia wzdłuż długości zakładki i współczynnikiem spiętrzenia naprężenia [151].



Rys. 1.9. Rozkład naprężenia stycznego τ w spoinie klejowej połączeń obciążonych na ścinanie w zależności od długości zakładki l : a) długość zakładki mniejsza niż graniczna; b) długość zakładki równa długości zakładki, c) długość zakładki większa niż graniczna; gdzie τ – naprężenie styczne, τ_{sr} – średnie naprężenie styczne; l_1, l_2, l_3 – długość zakładki, l_{gr} – graniczna długość zakładki

Innym czynnikiem konstrukcyjnym jest grubość łączonych elementów. J. Kuczmaszewski [153] wykazał, że wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych zakładkowych wzrasta wraz ze wzrostem grubości łączonych elementów, niez-

leżnie od sztywności stosowanego kleju. W niektórych pracach jest prezentowana zależność wytrzymałości od grubości łączonych materiałów i długości zakładki określana przez współczynnik de Bruyna I [151, 153, 155]:

$$I = \frac{\sqrt{g}}{l} \quad (1.17)$$

gdzie: g – grubość łączonych elementów,
 l – długość zakładki spoiny klejowej.

Istnieje wiele czynników rozważanych podczas eksploatacji połączeń klejowych [55, 199, 204, 233]. Jednym z istotnych jest temperatura [6, 60, 357], w jakiej połączenie będzie eksploatowane. Z. Zaczek już w latach 70 rozpatrywał wytrzymałość złącz klejonych metal-laminat epoksydowo-szklany w podwyższonej temperaturze [321]. Także F. Romanów i R. Będziński w pracach [214, 215] badali wytrzymałość połączeń klejonych różnych metali w podwyższonej temperaturze, stosując klej epoksydowy ME-1. Stwierdzili, że połączenia klejowe, wykonane przy użyciu tego kleju mogą być eksploatowane tylko do temperatury 80°C. J. Godzimirski i W. Koltarz [94] analizowali wpływ podwyższonej temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych wykonanych z zastosowaniem kleju z polimeru epoksydowego Epidian 57 i utwardzacza Z1. Z przeprowadzonych badań wynika, że spadek wytrzymałości połączeń klejowych w podwyższonej temperaturze jest spowodowany przede wszystkim zmniejszaniem wartości naprężeń niszczących klejów oraz wartości ich współczynnika sprężystości. B. Gos, K. Jurkowska, M. Fichtel oraz A. Sierzyński [112] rozpatrywali wpływ ciepła i szybkości obciążania na wytrzymałość połączeń klejowych. Stwierdzono spadek wytrzymałości spoin klejowych (klejów polioctanowinyliowych) wraz ze wzrostem temperatury.

Ch. Xuan i L. Yulong [317] badali połączenia klejowe jednozakładkowe w temperaturze od -40°C do +80°C zauważając, że większe obniżenie wytrzymałości jest obserwowane podczas przechodzenia od temperatury pokojowej do wyższej temperatury niż do niższej od pokojowej. W pracy [302] J. Wang i inni rozpatrywali wytrzymałość połączeń klejowych kompozytów węglowych w zakresie temperatury aż od 1000°C do 1800°C.

Kolejnym czynnikiem, wpływającym zwłaszcza na wytrzymałość długotrwałą, jest czas eksploatacji połączenia klejowego, istotny ze względu na właściwości klejów, które podlegają określonym procesom starzenia, uzależnionym od warunków eksploatacyjnych. Wiele informacji dotyczących tego zagadnienia, zwłaszcza w odniesieniu do wytrzymałości długotrwałej, przedstawiono w pracach [35, 204].

M. Warszyński, B. Onyszko, J. Sienko i M. Zych-Porębska [303] przedstawili wpływ działania różnych ośrodków oraz zmian temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych wybranych tworzyw polimerowych. Badania prowadzono

w warunkach atmosferycznych, z zastosowaniem wody wodociągowej, nasyconego roztworu NaCl, pary wodnej i chłodzenia wodą wodociągową, przy cyklicznych zmianach temperatury.

1.6. Ocena stanu zagadnienia, wnioski i ustalenia

Analizując zagadnienia związane z konstytuowaniem właściwości adhezyjnych ustalono, że działania dotyczące tego procesu skupiają się głównie wokół trzech obszarów: właściwego przygotowania powierzchni i warstwy wierzchniej łączonych elementów poprzez różne metody ich obróbki, ulepszania warstwy wierzchniej za pomocą metod fizycznych i chemicznych oraz zespołu czynności związanych z utworzeniem połączenia. W wielu pracach [58, 59, 95, 129, 154, 188, 272, 277, 309, 339] przedstawia się różnorodne zagadnienia związane z ustalonymi obszarami badawczymi. Jednakże najczęściej badania dotyczą konkretnych rozwiązań, uwarunkowań, materiałów, czy też przyjętej metodyki badawczej. Z uwagi na specyfikę klejenia wydaje się, że jest konieczne systematyczne prowadzenie badań dotyczących różnych aspektów połączeń adhezyjnych [37, 55, 212, 260, 282, 288], gdyż ze względu na istotny wpływ wielu czynników technologicznych, konstrukcyjnych oraz materiałowych, można uzyskać niekiedy odmienne wyniki badań. Ponadto niedopełnienie niektórych warunków przeprowadzania pomiarów także może prowadzić do otrzymania rezultatów niepoprawnych.

Osiągnięcie odpowiednich właściwości adhezyjnych może być oceniane przez wiele wskaźników. Jednym z nich jest wymagana wytrzymałość i jej stałość w czasie użytkowania połączenia, która często stanowi podstawowe kryterium oceny jakości połączeń adhezyjnych [95, 266, 289]. Dlatego też jest istotne określenie zależności pomiędzy właściwościami adhezyjnymi a wytrzymałością połączeń adhezyjnych. Wprawdzie można sądzić, że zależność ta powinna być dość oczywista, jednakże zagadnienie to nie jest dostatecznie szczegółowo i wyczerpująco przedstawiane w literaturze. Wydaje się, że jedną z przyczyn jest to, że analiza rozważanej problematyki wymaga znajomości wielu zagadnień szczegółowych w odniesieniu do wykonywanych połączeń, dotyczących właściwego doboru czynników technologicznych, konstrukcyjnych, materiałowych oraz warunków użytkowania [95, 96, 313] uwzględniających rodzaj łączonego materiału [67, 106, 118, 142, 280], rodzaj połączenia [43, 105, 113, 124, 322], gatunek kleju [37, 84, 254], rodzaj i sposób obciążenia [44, 100, 114, 259, 289], kształt i wymiary połączenia [3, 14, 18, 89, 319], a także warunki eksploatacji [6, 35, 61, 200]. Oprócz tego jest konieczna głębsza znajomość zagadnień związanych ze zjawiskiem adhezji. W związku z tym, że istnieje możliwość klejenia różnorodnych materiałów, określenie i dobór wszystkich czynników wpływających na właściwości adhezyjne i wytrzymałość połączeń adhezyjnych, jest procesem dość złożonym.

Zauważono, że pierwszy etap klejenia, jakim jest przygotowanie powierzchni łączonych materiałów, niezwykle istotnie wpływa na wytrzymałość połączeń klejowych, przy spełnieniu pozostałych koniecznych warunków prawidłowego zaprojektowania oraz wykonania połączeń. Podczas procesu przygotowania powierzchni do klejenia, jest istotna analiza właściwości adhezyjnych powierzchni łączonych materiałów, ponieważ określają one przydatność tych powierzchni do łączenia adhezyjnego. Podczas wykonywania połączeń, w których ważną rolę odgrywa ich wytrzymałość, jest niezbędne stworzenie jak najlepszych warunków do powstania adhezji tak, aby była ona jak największa. Konstytuowanie określonych właściwości adhezyjnych powierzchni elementów łączonych powinno być zapewnione poprzez właściwe przygotowanie ich powierzchni.

Zagadnienia związane z procesem trwałego łączenia różnych grup materiałów konstrukcyjnych oraz bardziej szczegółowe opracowania połączeń hybrydowych znajdują się w literaturze krajowej i zagranicznej dopiero od niedawna [37, 280, 328] i są to nadal raczej dość nieliczne opracowania. Niewątpliwie do wzrastającego zainteresowania zagadnieniami połączeń hybrydowych przyczynił się rozwój możliwości pomiarowych, programów komputerowych i urządzeń pomiarowych, dzięki którym jest możliwa analiza właściwości adhezyjnych, określenia zachowania się połączeń podczas działania różnego rodzaju obciążeń i inne.

Połączenia różnych rodzajów materiałów występują w wielu konstrukcjach, ale nie zawsze były przedmiotem szczegółowych analiz. Brak jest opracowań lub są one niewystarczające, w odniesieniu do prognozowania lub określania wytrzymałości takich połączeń, uwzględniających właściwości adhezyjne powierzchni materiałów łączonych. Stąd staje się celowe prowadzenie takich badań, zwłaszcza w aspekcie coraz bardziej rozpowszechnionego ich występowania w wielu obszarach techniki.

1.7. Tezy badawcze i cele rozprawy

Analiza stanu zagadnienia pozwala na sformułowanie problematyki badawczej w obszarze zagadnień związanych z konstytuowaniem połączeń adhezyjnych jednorodnych (tzn. połączeń elementów z takich samych materiałów konstrukcyjnych) i hybrydowych, tzn. połączeń złożonych z materiałów konstrukcyjnych różniących się właściwościami m.in. mechanicznymi. W zagadnieniach tych można wyróżnić problemy, które w dotychczas opublikowanych pracach nie zostały jeszcze dostatecznie uwzględnione lub też jest brak wyczerpujących opracowań. Stanowiły one podstawę do przyjęcia następujących tez badawczych.

1. Właściwości adhezyjne powierzchni materiałów tworzących połączenie adhezyjne, charakteryzowane swobodną energią powierzchniową i jej składowymi: polarną i dyspersyjną, można konstytuować stosując różne technologie. Odpowiednia wartość swobodnej energii powierzchniowej

- jest warunkiem koniecznym uzyskania wysokiej wytrzymałości połączeń klejowych, zarówno jednorodnych, jak i hybrydowych.
2. Składowe swobodnej energii powierzchniowej: polarna i dyspersyjna w różny sposób wpływają na wytrzymałość połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych. Wytrzymałość doraźna połączeń adhezyjnych jest silniej skorelowana ze składową dyspersyjną swobodnej energii powierzchniowej niż składową polarną. Do prognozowania wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych hybrydowych można wykorzystać tylko wartość składowej dyspersyjnej swobodnej energii powierzchniowej.
 3. Wytrzymałość połączeń klejowych hybrydowych dwóch różnych materiałów jest inna niż połączeń klejowych jednorodnych wykonanych z tych materiałów, pomimo zastosowania takiego samego rodzaju kleju i technologii klejenia.
 4. Interpretację wyników badań doświadczalnych wytrzymałości połączeń klejowych (w których istotne są właściwości adhezyjne) ułatwia analiza numeryczna metodą elementów skończonych uwzględniająca także właściwości fizyczne łączonych materiałów.

Podstawowym celem przedstawionych zadań naukowych jest pogłębienie wiedzy, mającej istotne znaczenie podczas projektowania procesów technologicznych i wykonywania połączeń adhezyjnych jednorodnych oraz hybrydowych. Obszar prezentowanych badań obejmuje zagadnienia konstytuowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych. Zagadnienia te dotyczą konstytuowania właściwości adhezyjnych wybranych materiałów poprzez zastosowanie różnych metod przygotowania ich warstwy wierzchniej, a charakteryzowanych poprzez wartość swobodnej energii powierzchniowej i jej składowe oraz cechy geometryczne powierzchni. Do określenia wartości swobodnej energii powierzchniowej postanowiono wykorzystać jedną z wielu metod wyznaczania SEP ciał stałych. Badania wytrzymałościowe obejmowały określenie wytrzymałości połączeń klejowych jednozakładkowych obciążonych na ścinanie oraz doczołowych – stanowiących przykład połączeń adhezyjnych obciążonych na odrywanie.

Analiza metodą elementów skończonych połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych stanowi uzupełnienie przeprowadzonych badań doświadczalnych, uwzględniając inny aspekt oceny wytrzymałości połączeń klejowych – właściwości fizyczne łączonych materiałów. Opracowano model numeryczny spoiny klejowej oraz połączeń klejowych adekwatnych do rzeczywistych połączeń. Określono rozkład naprężenia w spoinach oraz elementach połączeń klejowych, zgodnie z przyjętymi hipotezami wytrzymałości. Analizowano stan odkształcenia połączeń klejowych oraz przedstawiono wybrane zagadnienia procesu niszczenia spoiny klejowej. Dzięki wskazaniu miejsc newralgicznych połączeń, ze względu na występowanie maksymalnych naprężeń, zachodzi możliwość przeciwdziałania niekorzystnym skutkom obciążeń połączenia, np. poprzez zmiany konstrukcyjne.

W ramach przedstawionych problemów wyodrębniono następujące zagadnienia szczegółowe:

- określenie wpływu sposobu przygotowania powierzchni na wartość swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowych: polarnej i dyspersyjnej przy wykorzystaniu metody Owensa-Wendta,
- określenie wpływu sposobu przygotowania powierzchni na strukturę geometryczną powierzchni badanych materiałów, poprzez określenie wybranych parametrów chropowatości powierzchni oraz wykonanie analizy mikroskopowej tych powierzchni,
- przeprowadzenie badań wytrzymałościowych połączeń klejowych jednorodnych i hybrydowych analizowanych materiałów, których powierzchnie zostały poddane różnym procesom przygotowawczym,
- przeprowadzenie analizy porównawczej wytrzymałości połączeń adhezyjnych jednorodnych oraz hybrydowych,
- określenie wpływu swobodnej energii powierzchniowej na wytrzymałość połączeń klejowych jednorodnych i hybrydowych odniesionych do poszczególnych rodzajów materiałów,
- opracowanie modelu numerycznego spoiny klejowej oraz połączeń klejowych adekwatnych do rzeczywistych połączeń z wykorzystaniem specjalnego rodzaju elementów *cohesive*,
- przeprowadzenie analizy numerycznej MES rozważanych połączeń adhezyjnych,
- określenie początku inicjacji zniszczenia połączeń oraz wizualizacja zniszczenia spoiny klejowej;
- porównanie wyników analizy numerycznej z badaniami doświadczalnymi.

Realizacja przedstawionych zadań badawczych wymagała przeprowadzenia rozległych badań doświadczalnych oraz wielu analiz, w tym numerycznych, poszczególnych rodzajów połączeń jednorodnych i hybrydowych. Wykorzystano do tego celu stosowne stanowiska i urządzenia badawcze oraz określone metody badawcze. Do oceny parametrów chropowatości powierzchni zastosowano profilometrię: Perthometr 2 oraz Surtronic 3+ oraz profilografometr 3D NanoFocus μ scan AF2. W celu zaprezentowania wyglądu powierzchni analizowanych materiałów użyto zarówno mikroskop skaningowy TESLA BS-340, jak i profilografometr 3D NanoFocus μ scan AF2. Podczas analizy właściwości adhezyjnych wykorzystano analizatory kąta zwilżania Phoenix 150 i PGX wraz z oprogramowaniem do komputerowej analizy obrazu *Surfaceware*, *PG* i *NIS-Elements D*. Do badań wytrzymałościowych użyto maszyn wytrzymałościowych Zwick Roell Z100 oraz Zwick Roell Z150 SN Allround-Line, wraz z oprogramowaniem *testXpert*[®]. Podczas analizy numerycznej połączeń klejowych wykorzystano program ABAQUS/Standard. Niektóre z wymienionych stanowisk i urządzeń opisano w pracach [218, 219, 221, 222, 227÷230, 236, 239, 245, 249].

Rozdział 2.

Konstituowanie właściwości adhezyjnych powierzchni wybranych materiałów konstrukcyjnych

2.1. Metodyka badań

2.1.1. Charakterystyka sposobów przygotowania powierzchni

Pośród sposobów przygotowania powierzchni wybranych materiałów konstrukcyjnych, w zależności od rodzaju materiału, przyjęto:

- 1) oczyszczanie chemiczne za pomocą środków odtłuszczających;
- 2) obróbkę mechaniczną – ściernymi narzędziami nasypowymi (o ziarnistości ustalonej w badaniach wstępnych),
- 3) anodowanie,
- 4) chromianowanie,
- 5) trawienie,
- 6) połączenia wybranych wymienionych metod.

Niektóre z przedstawionych sposobów przygotowania powierzchni do klejenia zostały wybrane ze względu na możliwość ich zastosowania w warunkach laboratoryjnych, bez konieczności stosowania specjalnego oprzyrządowania. Obróbki specjalne, takie jak: anodowanie, chromianowanie i trawienie, przeprowadzono z wykorzystaniem specjalnych urządzeń i oprzyrządowania.

Rozpatrując zagadnienia adhezji stwierdzono, że podczas oczyszczania chemicznego powierzchni materiałów są usuwane zanieczyszczenia, które nie sprzyjają dobrej adhezji. Do badań zastosowano środek odtłuszczający Loctite 7063 firmy Loctite, którego głównym składnikiem są węglowodory alifatyczne. Operacja oczyszczania chemicznego za pomocą środka Loctite 7063 polegała na kilkukrotnym (3-krotnym) nałożeniu odtłuszczacza metodą natryskową na łączone powierzchnie, przetarcia, a w końcowym etapie, po ostatecznym nałożeniu środka, pozostawieniu do odparowania. Oczyszczanie chemiczne przeprowadzono w temperaturze wynoszącej $20 \pm 2^\circ\text{C}$, przy wilgotności względnej powietrza $32 \div 40\%$.

Jednym ze sposobów obróbki mechanicznej jest zastosowanie obróbki za pomocą ściernych narzędzi nasypowych. Narzędzia te są najdogodniejszymi do obróbki materiałów przeznaczonych do klejenia. Decyduje o tym przede wszystkim ich skuteczność, mały koszt, dostępność, łatwość użycia, możliwość zastosowania w różnych warunkach. Ważna jest także łatwość w uzyskiwaniu bezkierunkowej struktury śladów obróbki.

Przy dobieraniu do obróbki ściernych narzędzi nasypowych ważnym zagadnieniem są rozmiary ziaren. Narzędzia o większym rozmiarze ziaren skuteczniej usuwają warstwę materiału, w tym warstwę fizysoptycznie związanych cząsteczek, jednak stopień rozwinięcia powierzchni jest mniejszy. Mniejsze ziarno lepiej rozwija powierzchnię, ale poniżej pewnej wartości obniża się skuteczność usuwania warstwy fizysoptycznej. W przeprowadzonych badaniach wstępnych zastosowano dla niektórych materiałów kilka ściernych narzędzi nasypowych, w postaci papierów ściernych, o różnej ziarnistości: P120, P320, P400, P500. Zauważono, iż najlepsze rezultaty pod względem uzyskiwanej wytrzymałości połączeń adhezyjnych można osiągnąć przy ziarnistości P320, przy czym uwzględniono także powtarzalność otrzymywanych wyników. Stąd też do badań doświadczalnych przyjęto ściernie narzędzie nasypowe, w postaci papieru ściernego o ziarnistości P320.

Przyjęte warunki obróbki ściernymi narzędziami nasypowymi zestawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Warunki obróbki ściernymi narzędziami nasypowymi

Lp.	Warunki obróbki	Wartości, opis
1	Ziarnistość ściernych narzędzi nasypowych	P320
2	Ilość przejść narzędzia	20x
3	Nacisk	0,018 MPa
4	Uzyskiwana struktura po obróbce mechanicznej	Struktura nieukierunkowana

Przy tym sposobie przygotowania powierzchni, oprócz obróbki za pomocą ściernych narzędzi nasypowych, stosowano usunięcie pozostałości powstałych podczas obróbki mechanicznej poprzez użycie środka odtłuszczającego Loctite 7063.

Jako jeden ze sposobów przygotowania powierzchni łączonych elementów, zastosowano anodowanie, podczas którego użyto kwasu siarkowego. Stężenie kwasu wynosiło 180÷200 g/l. Próbki zanurzano w kąpeli o temperaturze 10÷15°C przez 35 minut. Następnie zastosowano barwienie na żółto w roztworze $K_2Cr_2O_7$ w ilości 40÷55 g/l o pH 4,5÷6,2 w temperaturze 90÷95°C przez 35 minut.

Innym sposobem przygotowania powierzchni było chromianowanie, które zostało przeprowadzone przez 30 sekund w roztworze $Na_2Cr_2O_7$ w ilości 5,5 g/l; Na_2SO_4 w ilości 4 g/l; H_3BO_3 w ilości 4,5-5,5 g/l oraz HNO_3 w ilości 1,5 ml/l; o pH 1,4-1,6.

Zastosowano także trawienie w roztworze wodnym wodorotlenku sodu o stężeniu 40-60 g/l. Próbkę zanurzano w kąpeli trawiącej przez 3-4 minuty w temperaturze 45÷55°C, a następnie płukano w ciepłej bieżącej wodzie i pozostawiono do wyschnięcia.

W celach porównawczych, część próbek nie została poddana żadnej obróbce. Pozwoliło to na ustalenie, czy poszczególne sposoby przygotowania powierzchni wpływają na wzrost wartości swobodnej energii powierzchniowej, w porównaniu z powierzchniami, które nie były poddane obróbce przygotowawczej.

2.1.2. Opis metody określania swobodnej energii powierzchniowej

Do określenia swobodnej energii powierzchniowej (SEP) zastosowano metodę Owensa-Wendta (O-W), której charakterystykę przedstawiono w podrozdziale 1.3.3. Według tej metody swobodna energia powierzchniowa składa się z części polarnej i dyspersyjnej. Zależności (1.12) i (1.13) pozwalające na określenie poszczególnych składowych wartości SEP zamieszczono w podrozdziale 1.3.3.

Wartość SEP obliczono na podstawie pomiarów kąta zwilżania badanych powierzchni określonymi cieczami pomiarowymi. W badaniach wykorzystano dwie ciecze pomiarowe: wodę destylowaną i diiodometan. Niezbędną do wyznaczenia swobodnej energii powierzchniowej charakterystykę tych cieczy zestawiono w tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Wartości swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowych stosowanych cieczy pomiarowych [162, 339]

Lp.	Ciecz pomiarowa	Swobodna energia powierzchniowa i jej składowe, mJ/m ²		
		γ_L	γ_L^d	γ_L^p
1	Woda destylowana	72,8	21,8	51,0
2	Dijodometan	50,8	48,5	2,3

Zmierzono kąty zwilżania wodą Θ_w oraz diiodometanem Θ_d badanych powierzchni materiałów po różnych sposobach ich przygotowania, co było podstawą do rozwiązania układu równań (1.12) i (1.13). Następnie sumując składową dyspersyjną γ_S^d oraz składową polarną γ_S^p otrzymano wartość γ_S swobodnej energii powierzchniowej odniesionej do poszczególnych przypadków.

Kropki cieczy o objętości 2 mm³ [229, 236] osadzano na powierzchni badanych materiałów. Do wyznaczania kątów zwilżania zastosowano analizatory kąta zwilżania – goniometry Phoenix 150 i PGX wraz z oprogramowaniem do komputerowej analizy obrazu *Surfaceware*, *PGX* i *NIS-Elements D*.

2.2. Charakterystyka materiałów

W podrozdziale 2.2 przedstawiono charakterystykę materiałów, z których wykonano połączenia adhezyjne, szczególnie uwzględniając strukturę geometryczną powierzchni, istotną ze względu na proces klejenia. Charakterystyka ta dotyczy powierzchni, względem której zastosowano oczyszczanie chemiczne oraz poddanej obróbce mechanicznej. Na podstawie uzyskanych obrazów powierzchni za pomocą m.in. profilografometrów ustalono, że oczyszczanie chemiczne nie powoduje różnic w geometrii powierzchni materiałów. Występują natomiast znaczące zmiany struktury geometrycznej powierzchni po obróbce mechanicznej, chemicznej i elektrochemicznej. Z tego też względu, charakteryzując powierzchnię materiałów przedstawiono obrazy i profilogramy powierzchni po oczyszczaniu chemicznym oraz po obróbce mechanicznej. W przypadku blach ze stopów aluminium EN AW-2024 przedstawiono ilustrację powierzchni po anodowaniu, chromianowaniu i trawieniu, a dla blach tytanowych CP3 – po trawieniu. Zamieszczone w tabelach wyniki pomiarów parametrów chropowatości powierzchni, stanowią średnie wartości z 10÷12 powtórzeń pomiarów dla każdego przedstawionego parametru.

Zaprezentowane badania powierzchni pozwalają wskazać na zróżnicowanie struktury geometrycznej powierzchni materiałów analizowanych, mając na względzie aspekt adhezji mechanicznej. Struktura ta może decydować o wnikanii kleju w nierówności powierzchni oraz zwiększeniu udziału adhezji mechanicznej, a dzięki temu wpływać na wytrzymałość połączeń adhezyjnych.

2.2.1. Blachy ze stopów aluminium

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano dwa rodzaje blach ze stopów aluminium: blachy o oznaczeniu EN AW-2024 (wg EN AW-2024-AlCu4Mg1 [356]) oraz blachy oznaczone EN AW-7075 (wg EN AW-7075-ALZn5,5MgCu [356]) o różnych grubościach oraz różnych stanach utwardzenia powierzchni [350, 360, 363]. Dane dotyczące grubości oraz stanu utwardzania badanych blach zamieszczono w tabeli 2.3 i tabeli 2.4.

Tabela 2.3. Charakterystyka badanych blach ze stopu aluminium EN AW-2024

Lp.	Rodzaj materiału	Grubość blach g, mm	Stan utwardzenia
1	Blacha ze stopu aluminium EN AW-2024	0,64	T3
2	Blacha ze stopu aluminium EN AW-2024PL	0,64	T3
3.	Blacha ze stopu aluminium EN AW-2024PL	0,64	T0

Oznaczenia [350]:
0 – stan utwardzenia produktu, który osiąga w wyniku formowania na gorąco właściwości takie, jakie są wymagane po wyżarzaniu,
T3 – aluminium obrabione cieplnie, poddane obróbce plastycznej na zimno i starzone w sposób naturalny do uzyskania stanu stabilnego,
PL – stan platerowany.

Tabela 2.4. Charakterystyka badanych blach ze stopu aluminium EN AW-7075

Lp.	Rodzaj materiału	Grubość blach g, mm	Stan utwardzenia
1	Blacha ze stopu aluminium EN AW-7075PL	0,80	T0

Oznaczenia [350]:
0 – stan utwardzenia produktu, który osiąga w wyniku formowania na gorąco właściwości takie, jakie są wymagane po wyżarzaniu,
PL – stan platerowany.

W tabelach 2.5 oraz 2.6 przedstawiono charakterystyczne parametry profilu chropowatości powierzchni badanych stopów aluminium, tylko po operacji oczyszczania chemicznego.

Tabela 2.5. Parametry chropowatości powierzchni blach ze stopu aluminium EN AW-2024

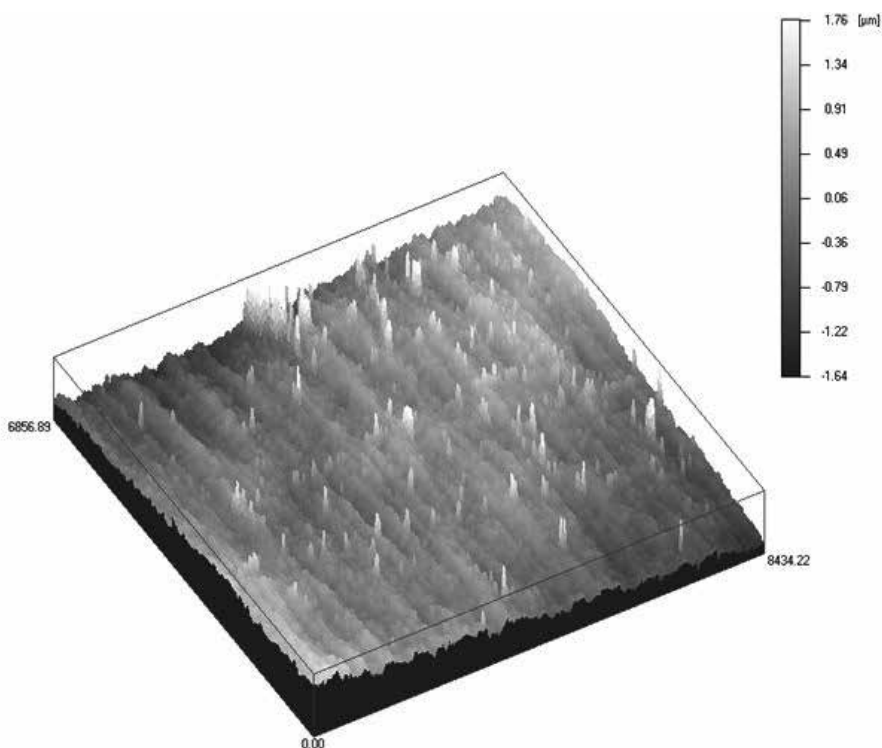
Lp.	Rodzaj blach ze stopów aluminium	Średnie wartości parametrów chropowatości powierzchni, μm						
		R_a	R_z	$R_{z\text{ max}}$	S_m	R_p	R_{pk}	R_{vk}
1	EN AW-2024T3; g = 0,64	0,28	2,10	2,50	70	0,90	0,34	0,37
2	EN AW-2024PLT3; g = 0,64	0,20	1,61	2,80	208	0,77	0,28	0,44
3	EN AW-2024PLT0; g = 0,64	0,60	4,10	5,30	70	2,56	1,04	0,65

Tabela 2.6. Parametry chropowatości powierzchni blach ze stopu aluminium EN AW-7075

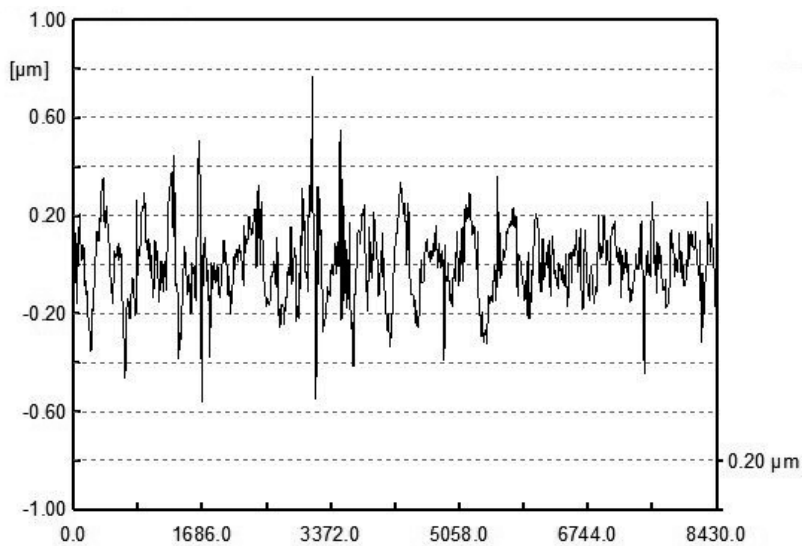
Lp.	Rodzaj blach ze stopów aluminium	Średnie wartości parametrów chropowatości powierzchni, μm						
		R_a	R_z	$R_{z\text{ max}}$	S_m	R_p	R_{pk}	R_{vk}
1	EN AW-7075PLT0; g = 0,80	0,15	1,12	2,06	203	0,54	0,22	0,41

Zauważono, że proces walcowania prawdopodobnie wpływa na uzyskiwane wielkości charakteryzujące chropowatość powierzchni. W przypadku blach ze stopu aluminium EN AW-2024, występujących w stanie 0 stwierdzono wzrost chropowatości powierzchni, w odniesieniu do blach ze stopu aluminium EN AW-7075 w stanie 0.

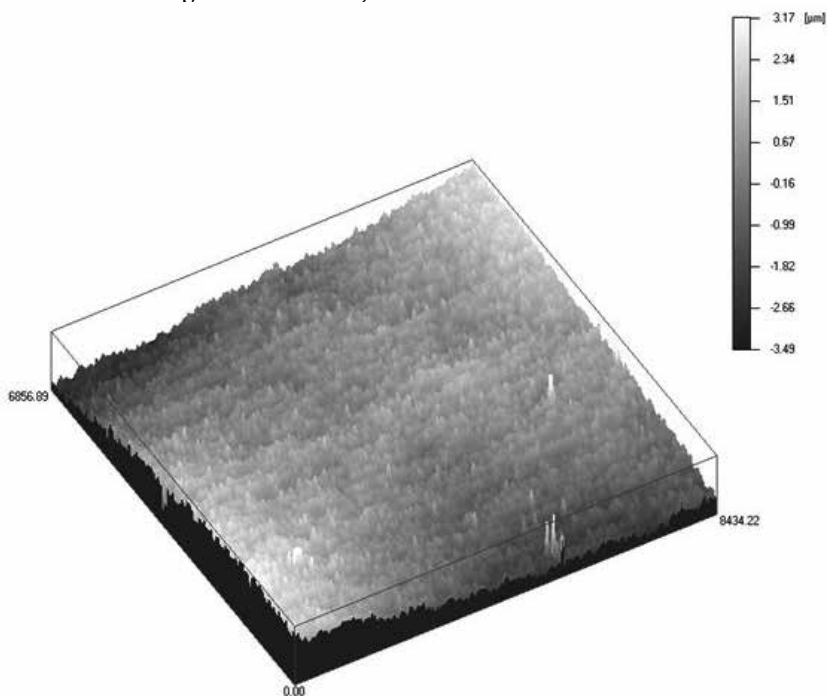
Odzwierciedleniem uzyskanych wyników parametrów chropowatości powierzchni badanych blach ze stopów aluminium (powierzchnia oczyszczona chemicznie) są obrazy struktury powierzchni i profilogramy, otrzymane bezpośrednio przy użyciu profilografometru 3D. Wybrano reprezentatywne przykłady blach o różnym stanie umocnienia, przedstawione na rys. 2.1 ÷ 2.6.



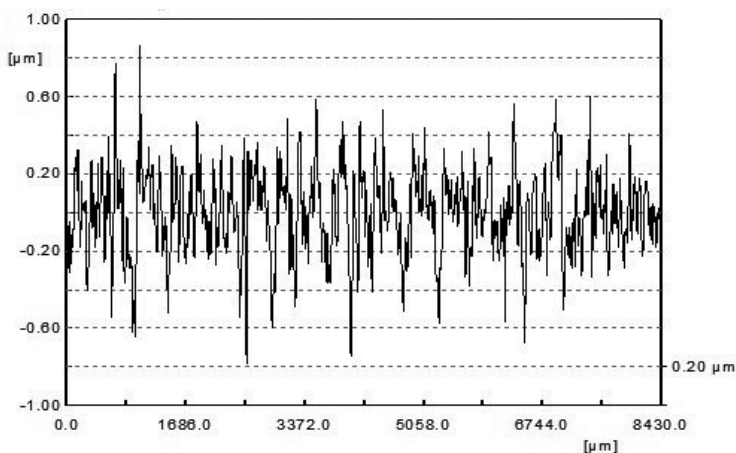
Rys. 2.1. Wygląd powierzchni blachy ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3; $g = 0,64$ mm; oczyszczanie chemiczne, profilografometr 3D



Rys. 2.2. Reprezentatywny profilogram powierzchni blachy ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3; $g = 0,64$ mm; oczyszczanie chemiczne



Rys. 2.3. Wygląd powierzchni blachy ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0; $g = 0,80$ mm; oczyszczanie chemiczne, profilografometr 3D



Rys. 2.4. Reprezentatywny profilogram powierzchni blachy ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0; $g = 0,80$ mm; oczyszczenie chemiczne

Analizując wygląd oraz profilogramy powierzchni można zauważyć, że prawdopodobnie różny proces walcowania badanych blach przyczynia się do uzyskania odmiennej struktury geometrycznej powierzchni.

Wyniki pomiarów chropowatości powierzchni blach ze stopów aluminium EN AW-2024 PLT3 i EN AW-7075PLT0, po różnych sposobach przygotowania powierzchni, przedstawiono w tabelach 2.7 oraz 2.8.

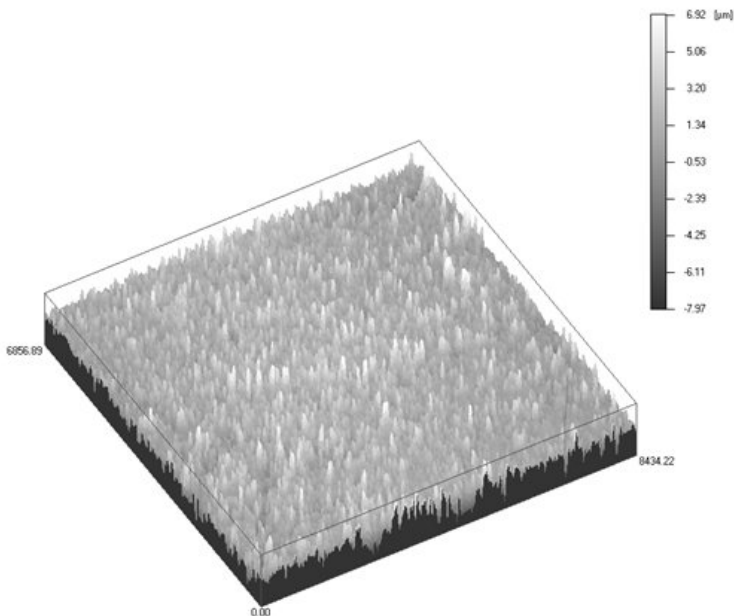
Tabela 2.7. Parametry chropowatości powierzchni blach ze stopów aluminium EN AW-2024PLT3 po różnych sposobach przygotowania powierzchni

Lp.	Sposób przygotowania powierzchni	Średnie wartości parametrów chropowatości powierzchni, μm						
		R_a	R_z	$R_{z\text{ max}}$	S_m	R_p	R_{pk}	R_{vk}
1	Oczyszczenie chemiczne	0,20	1,36	2,59	270	0,65	0,28	0,64
2	Obróbka mechaniczna	1,31	9,83	14,24	137	4,87	2,17	2,52
3	Obróbka mechaniczna i oczyszczenie chemiczne	1,40	9,58	12,46	125	4,44	2,00	2,73
4	Anodowanie	0,41	3,78	5,79	122	1,49	0,52	1,02
5	Chromianowanie	0,37	3,48	5,70	108	1,52	0,73	0,77
6	Trawienie	0,33	2,72	4,63	145	1,04	0,48	0,87

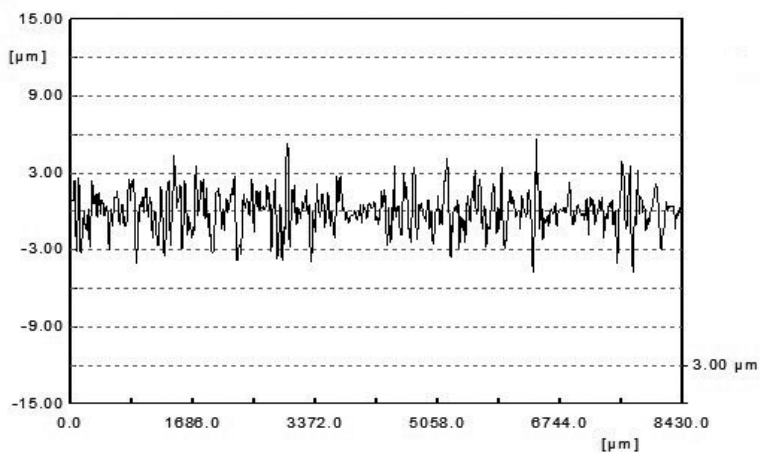
Tabela 2.8. Parametry chropowatości powierzchni blach ze stopów aluminium EN AW-7075PLT0 po różnych sposobach przygotowania powierzchni

Lp.	Sposób przygotowania powierzchni	Średnie wartości parametrów chropowatości powierzchni, μm						
		R_a	R_z	$R_{z\text{ max}}$	S_m	R_p	R_{pk}	R_{vk}
1	Oczyszczanie chemiczne	0,31	2,31	4,64	290	1,13	0,64	0,72
2	Obróbka mechaniczna	1,58	12,07	16,96	142	6,17	2,68	3,14
3	Obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne	1,28	9,16	12,12	113	4,41	1,79	2,53

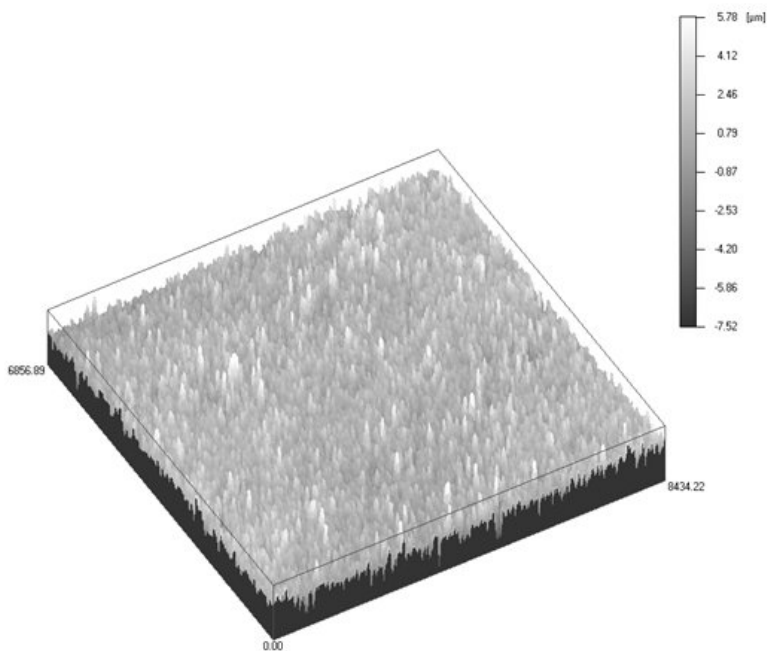
W wyniku obróbki mechanicznej uzyskano odmienną strukturę geometryczną powierzchni blach ze stopów aluminium, w porównaniu ze strukturą powierzchni blach po oczyszczeniu chemicznym. Parametry chropowatości powierzchni blachy ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 po obróbce mechanicznej i oczyszczeniu chemicznym są mniejsze niż po obróbce mechanicznej prawdopodobnie w skutek usunięcia pozostałości po obróbce mechanicznej. Przykładowe obrazy struktury oraz profile chropowatości powierzchni po tej obróbce zamieszczono na rys. 2.5 – 2.10.



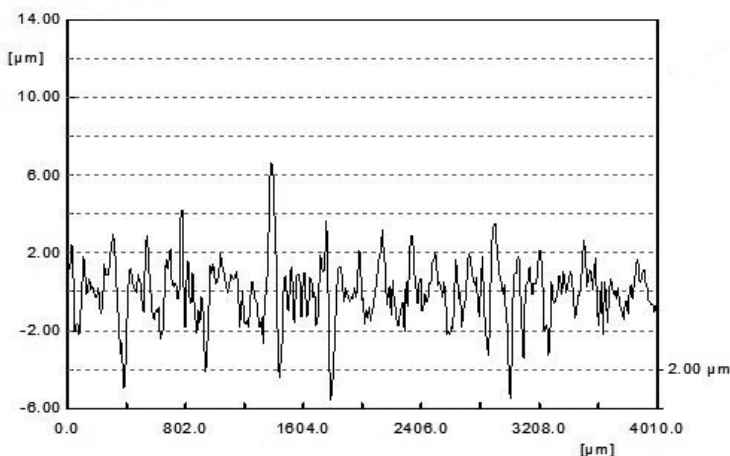
Rys. 2.5. Wygląd powierzchni blachy ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3; $g = 0,64\text{ mm}$; obróbka mechaniczna, profilografometr 3D



Rys. 2.6. Reprezentatywny profilogram powierzchni blachy ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3; $g = 0,64$; obróbka mechaniczna



Rys. 2.7. Wygląd powierzchni blachy ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0; $g = 0,80$ mm; obróbka mechaniczna, profilografometr 3D



Rys. 2.8. *Reprezentatywny profilogram powierzchni blachy ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0; g = 0,80 mm; obróbka mechaniczna*

Powierzchnia blach ze stopów aluminium EN AW-2024PLT3 i EN AW-7075PLT0 po obróbce mechanicznej charakteryzuje się znacznie większą ilością mikronierówności o dużym stopniu równomierności ich rozłożenia na powierzchni (rys. 2.5 i 2.7). Jednocześnie należy zauważyć, że uzyskano wzrost chropowatości powierzchni, w wyniku obróbki mechanicznej (4÷6)-krotny (tabela 2.7 i tabela 2.8), w porównaniu z większością pozostałych sposobów przygotowania powierzchni.

2.2.2. Blachy tytanowe

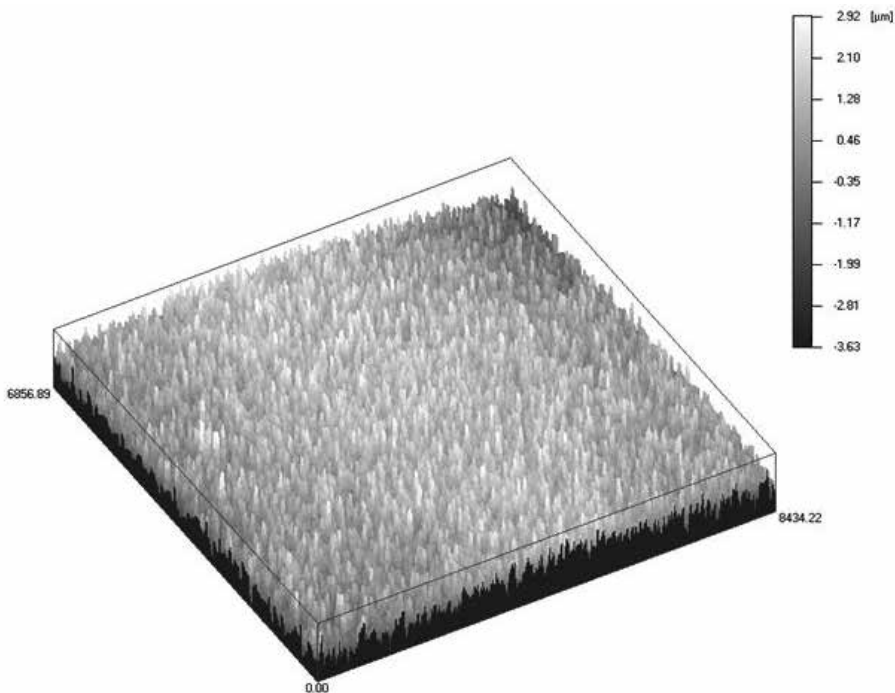
W badaniach wykorzystano dwa gatunki blach tytanowych o oznaczeniach:

- 1) CP1 (Grade 1 – według ASTM B265 [347]) i grubości $g = 0,40$ mm,
- 2) CP3 (Grade 3 – według ASTM B265 [347]) i grubości $g = 0,80$ mm.

Gatunki tych blach różnią się zarówno składem chemicznym, jak i właściwościami mechanicznymi [338]. Zwiększenie ilości zanieczyszczeń prowadzi do podwyższenia twardości i właściwości wytrzymałościowych, natomiast obniża właściwości plastyczne [8]. W tabeli 2.9 przedstawiono charakterystyczne parametry chropowatości powierzchni badanych blach tytanowych, których powierzchnia została poddana operacji oczyszczania chemicznego. Odzwierciedleniem uzyskanych parametrów chropowatości powierzchni analizowanych blach tytanowych są obrazy uzyskane przy użyciu profilografometru 3D oraz profilogramy, których przykłady przedstawiono na rys. 2.9 – 2.12.

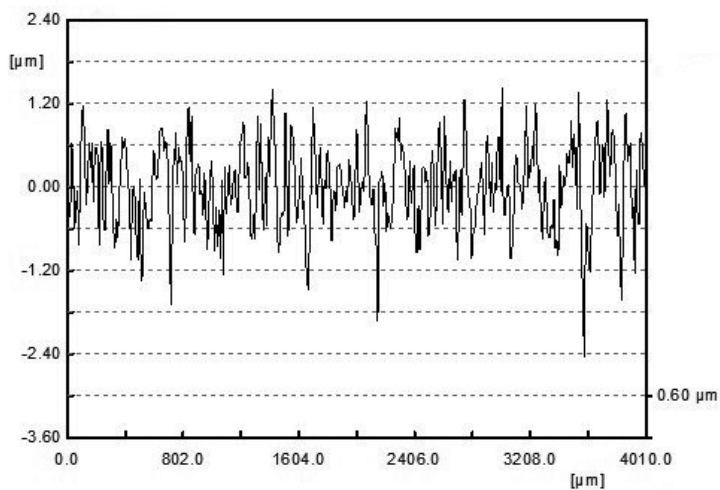
Tabela 2.9. Parametry chropowatości powierzchni blach tytanowych po oczyszczeniu chemicznym

Lp.	Gatunek blach tytanowych	Średnie wartości parametrów chropowatości powierzchni, μm						
		R_a	R_z	$R_{z\text{max}}$	S_m	R_p	R_{pk}	R_{vk}
1	CP1	0,59	4,00	4,69	59	1,81	0,61	0,95
2	CP3	0,33	2,48	4,41	70	1,26	0,36	0,56

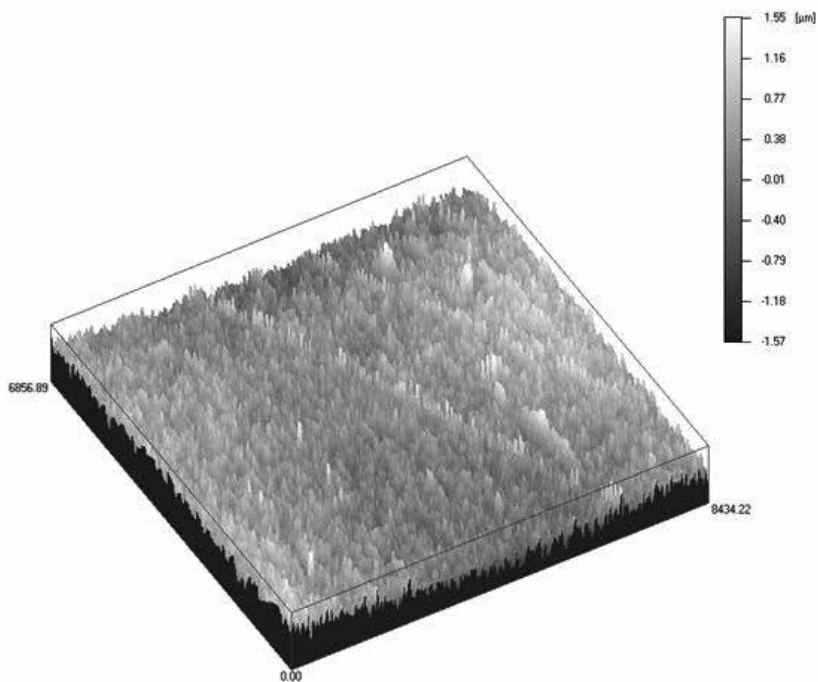


Rys. 2.9. Wygląd powierzchni blachy tytanowej CP1; $g = 0,40\text{ mm}$; oczyszczenie chemiczne, profilografometr 3D

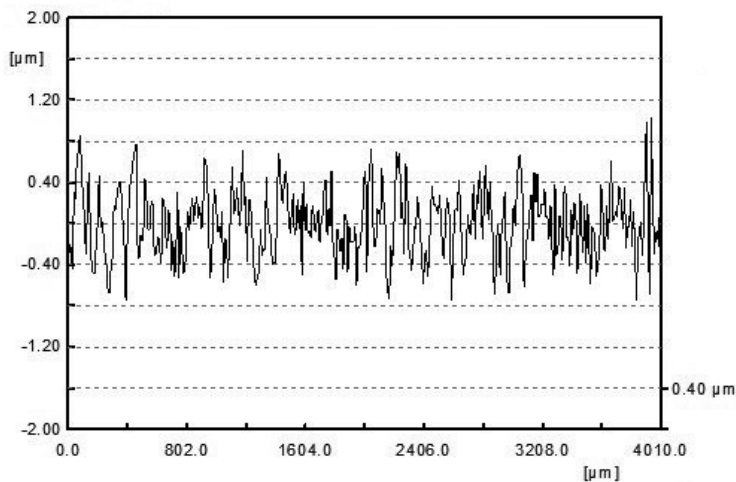
Przedstawione profilogramy stanowią odzwierciedlenie zarysu wybranego odcinka pomiarowego powierzchni badanych materiałów. Porównując profile powierzchni obu rodzajów blach, można zauważyć, iż powierzchnie blach CP1 charakteryzują się większym stopniem rozwinięcia niż powierzchnie blach CP3. Powierzchnie blach CP3 odznaczają się występowaniem pojedynczych wierzchołków nierówności, których wysokość znacznie odbiega od wartości średnich w przedziale odcinka elementarnego (parametr $R_{z\text{max}}$, tabela 2.9).



Rys. 2.10. Reprezentatywny profilogram powierzchni blachy tytanowej CP1; $g = 0,40 \text{ mm}$; oczyszczanie chemiczne



Rys. 2.11. Wygląd powierzchni blachy tytanowej CP3; $g = 0,80 \text{ mm}$; oczyszczanie chemiczne, profilografometr 3D



Rys. 2.12. Reprezentatywny profilogram powierzchni blachy tytanowej CP3; $g = 0,80 \text{ mm}$; oczyszczanie chemiczne

Dla powierzchni blach CP1 jest widoczna duża ilość wgłębień o różnej głębokości (rys. 2.9). Może to wpływać na rozmiary powierzchni wypełnionej przez klej, a tym samym, w pewnym stopniu, na wytrzymałość połączenia. Oczywiście jest to także zależne od rodzaju kleju, a zwłaszcza jego lepkości.

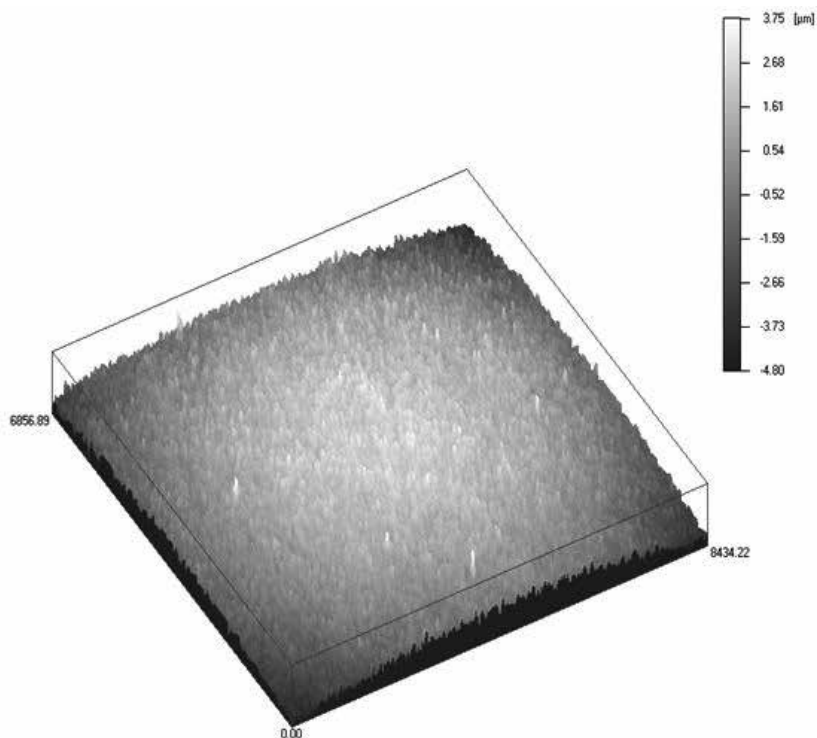
Otrzymane wyniki pomiarów chropowatości powierzchni po wybranych sposobach przygotowania powierzchni blach tytanowych CP1 oraz CP3 przedstawiono w tabelach 2.10 i 2.11. Wygląd powierzchni blachy tytanowej CP1 oraz charakterystyczny profilogram powierzchni po obróbce mechanicznej przedstawiono na rys. 2.13 i rys. 2.14.

Tabela 2.10. Parametry chropowatości powierzchni blach tytanowych CP1; $g = 0,40 \text{ mm}$; po wybranych sposobach przygotowania powierzchni

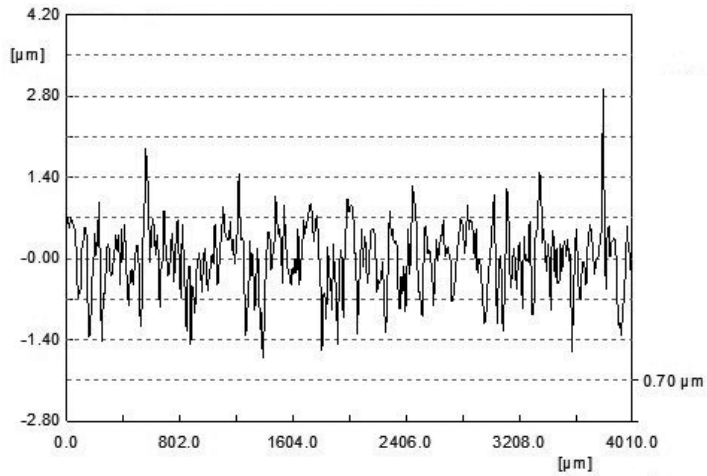
Lp.	Sposób przygotowania powierzchni	Średnie wartości parametrów chropowatości powierzchni, μm						
		R_a	R_z	$R_{z \max}$	S_m	R_p	R_{pk}	R_{vk}
1	Oczyszczanie chemiczne	0,73	4,82	5,31	74	2,25	0,85	1,15
2	Obróbka mechaniczna	0,65	4,38	5,38	117	1,84	0,63	1,31
3	Obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne	0,60	4,13	5,05	83,7	1,73	0,58	1,17

Tabela 2.11. Parametry chropowatości powierzchni blach tytanowych CP3; $g = 0,80 \text{ mm}$; po wybranych sposobach przygotowania powierzchni

Lp.	Sposób przygotowania powierzchni	Średnie wartości parametrów chropowatości powierzchni, μm						
		R_a	R_z	$R_{z \text{ max}}$	S_m	R_p	R_{pk}	R_{vk}
1	Oczyszczanie chemiczne	0,31	2,04	2,61	60	0,85	0,24	0,50
2	Obróbka mechaniczna	0,63	4,64	6,07	104	2,41	0,77	1,14
3	Obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne	0,45	3,51	4,55	63	1,72	0,57	0,79
4	Trawienie	0,95	6,01	6,88	65,64	2,68	0,88	1,25

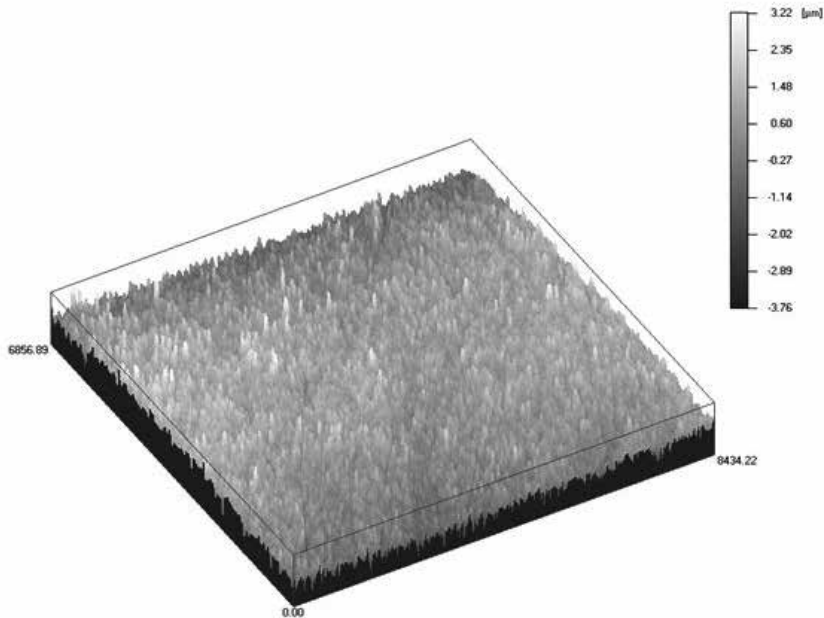


Rys. 2.13. Wygląd powierzchni blachy tytanowej CP1; $g = 0,40 \text{ mm}$; obróbka mechaniczna, profilografometr 3D

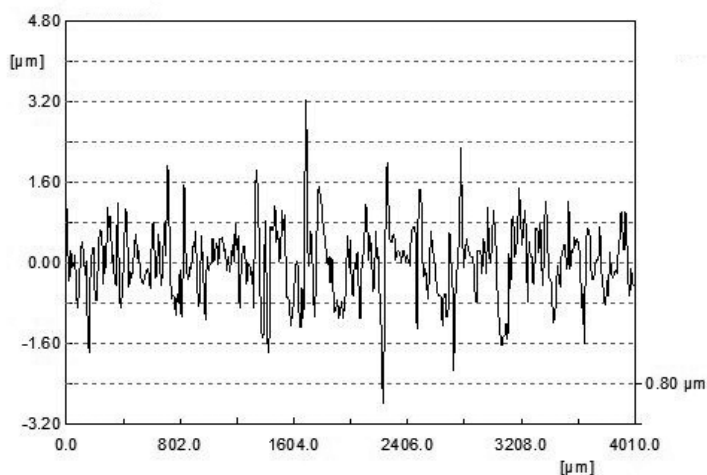


Rys. 2.14. Reprezentatywny profilogram powierzchni blachy tytanowej CP1; $g = 0,40 \text{ mm}$; obróbka mechaniczna

Wygląd powierzchni blachy tytanowej CP3 oraz charakterystyczny profilogram powierzchni po obróbce mechanicznej przedstawiono na rys. 2.15 i rys. 2.16.



Rys. 2.15. Wygląd powierzchni blachy tytanowej CP3; $g = 0,80 \text{ mm}$; obróbka mechaniczna, profilografometr 3D



Rys. 2.16. Reprezentatywny profilogram powierzchni blachy tytanowej CP3; $g = 0,80 \text{ mm}$; obróbka mechaniczna

Z analizy obrazów powierzchni oraz parametrów chropowatości powierzchni blachy tytanowej CP3 wynika, że w wyniku obróbki mechanicznej uzyskano ponad dwukrotny wzrost chropowatości powierzchni (m.in. parametry R_a oraz R_z). W przypadku blach tytanowych CP1, w wyniku obróbki mechanicznej uzyskano nieznaczne zmiany wartości parametrów chropowatości (tabela 2.10).

2.2.3. Kompozyty polimerowe

W badaniach wykorzystano różne rodzaje kompozytów polimerowo-epoksydowych: epoksydowo-szklany, epoksydowo-aramidowy oraz epoksydowo-grafitowy, których charakterystykę przedstawiono w tabeli 2.12. Trzy pierwsze kompozyty (o oznaczeniach: kompozyt nr 2, nr 4 oraz nr 6) składały się z dwóch warstw tkanin, które zostały ułożone względem siebie pod kątem 90° . Kompozyt epoksydowo-szklany o grubości 2,10 mm składał się z 8 warstw.

Poszczególne rodzaje kompozytów różnią się, oprócz właściwości fizycznych, w tym zwłaszcza mechanicznych, strukturą geometryczną powierzchni. Część z tych materiałów została wykorzystana w zagadnieniach konstytuowania właściwości adhezyjnych, niektóre podczas badań wytrzymałościowych, a wybrane kompozyty były uwzględnione w analizie numerycznej metodą elementów skończonych, połączeń klejowych zarówno jednorodnych, jak i hybrydowych.

Tabela 2.12. Charakterystyka badanych kompozytów polimerowych

Lp.	Nazwa materiału	Grubość jednej warstwy tkaniny, mm
1.	Kompozyt (2): tkanina szklana 3200-7781, osnowa – tworzywo epoksydowe, 2 warstwy, <i>układ warstw</i> : [0/90]	0,30
2.	Kompozyt (4): tkanina aramidowa KV-EP 285 199-46-002, osnowa – tworzywo epoksydowe, 2 warstwy, <i>układ warstw</i> : [0/90]	0,30
3.	Kompozyt (6): tkanina grafitowa GR-EP 199-45-003, osnowa – tworzywo epoksydowe, 2 warstwy, <i>układ warstw</i> : [0/90]	0,33
4.	Kompozyt (7): osnowa – tworzywo epoksydowe, 8 warstw, włókno szklane typu E, <i>splot tkaniny</i> : 8H Satin, <i>układ warstw</i> : [0/±45/90]	0,23

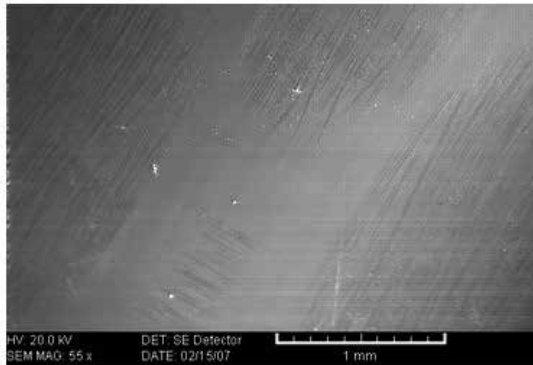
Wybrane parametry chropowatości powierzchni omawianych kompozytów, których powierzchnia została poddana operacji oczyszczania chemicznego zamieszczono w tabeli 2.13. Odzwierciedleniem uzyskanych wyników badań parametrów chropowatości powierzchni kompozytów są obrazy SEM tych powierzchni, których przykłady przedstawiono na rys. 2.17 ÷ 2.19. Wygląd powierzchni kompozytu epoksydowo-szklanego (7) zamieszczono na rys. 2.20, a przykładowy charakterystyczny profilogram powierzchni tego kompozytu – na rys. 2.21.

Tabela 2.13. Parametry chropowatości powierzchni kompozytów po oczyszczaniu chemicznym

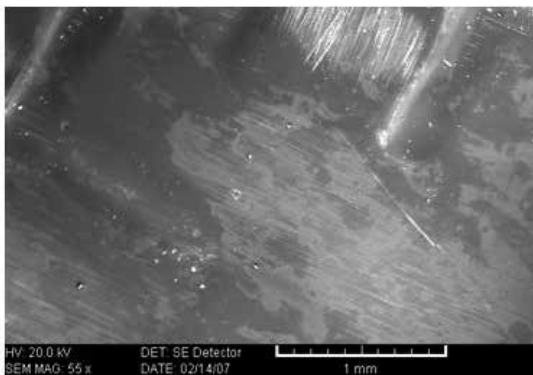
Lp.	Rodzaj kompozytu	Średnie wartości parametrów chropowatości powierzchni, μm						
		R_a	R_z	$R_{z\max}$	S_m	R_p	R_{pk}	R_{vk}
1	Kompozyt (2)	0,60	2,71	3,88	526	1,33	0,64	1,04
2	Kompozyt (4)	0,51	2,51	3,79	498	1,23	0,63	1,13
3	Kompozyt (6)	7,59	49,02	74,68	2278	13,04	3,63	35,43
4	Kompozyt (7)	0,82	4,09	5,95	387	2,09	1,11	1,31



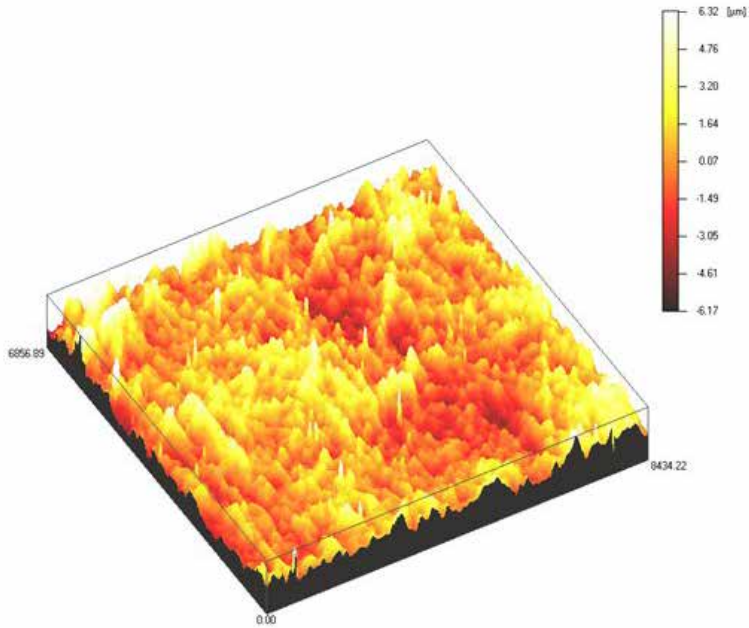
Rys. 2.17. Wygląd powierzchni kompozytu (2); $g = 0,60$ mm; oczyszczenie chemiczne, SEM, pow. 55



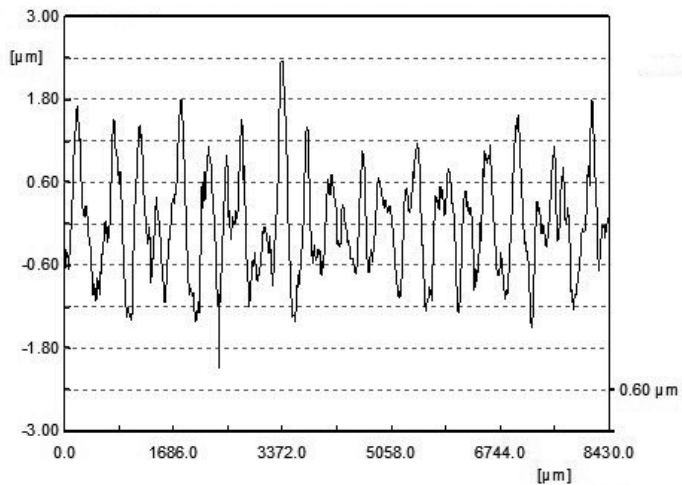
Rys. 2.18. Wygląd powierzchni kompozytu (4); $g = 0,60$ mm; oczyszczenie chemiczne, SEM, pow. 55



Rys. 2.19. Wygląd powierzchni kompozytu (6); $g = 0,66$ mm; oczyszczenie chemiczne, SEM, pow. 55



Rys. 2.20. Wygląd powierzchni kompozytu epoksydowo-szklanego (7); $g = 2,10 \text{ mm}$; oczyszczanie chemiczne, profilografometr 3D



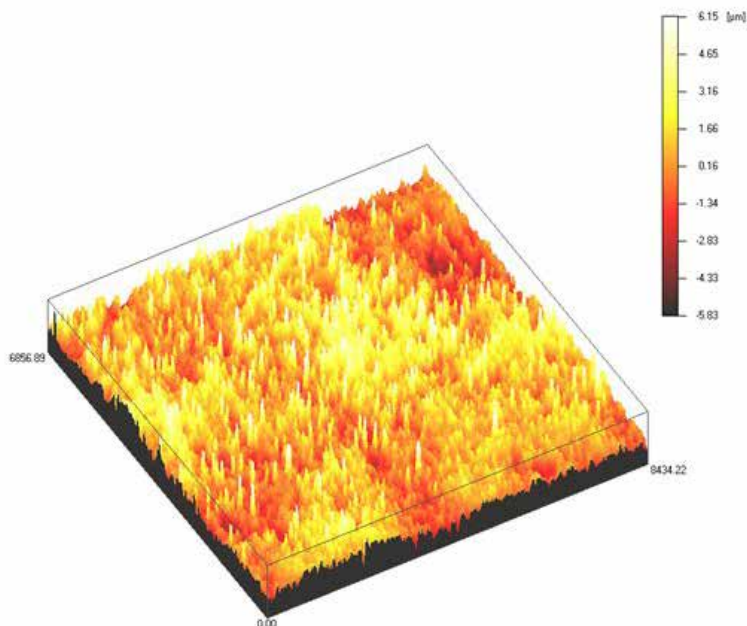
Rys. 2.21. Reprezentatywny profilogram powierzchni kompozytu epoksydowo-szklanego (7); $g = 2,10 \text{ mm}$; oczyszczanie chemiczne

W dalszej części pracy, w badaniach wytrzymałościowych, został uwzględniony kompozyt epoksydowo-szklany (7), stąd też powierzchnie tego kompozytu poddano wybranym sposobom przygotowania do klejenia. Otrzymane wyniki pomiarów chropowatości powierzchni kompozytu epoksydowo-szklanego (7) przedstawiono w tabeli 2.14.

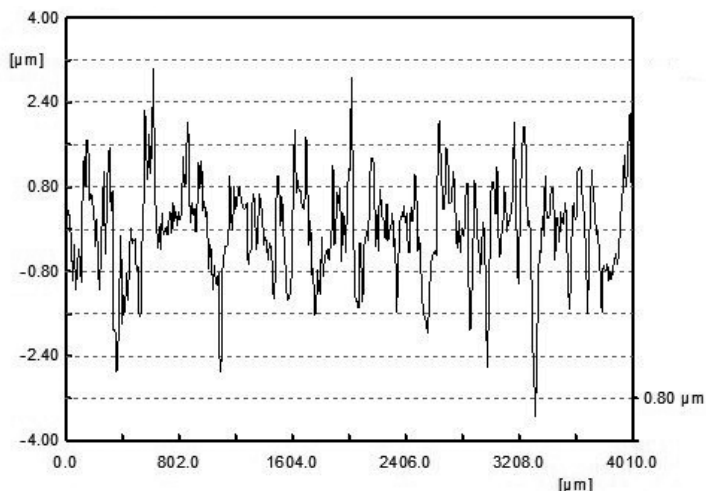
Tabela 2.14. Parametry chropowatości powierzchni kompozytu epoksydowo-szklanego (7); $g = 2,10 \text{ mm}$; po wybranych sposobach przygotowania powierzchni

Lp.	Sposób przygotowania powierzchni	Średnie wartości parametrów chropowatości powierzchni, μm						
		R_a	R_z	$R_{z \text{ max}}$	S_m	R_p	R_{pk}	R_{vk}
1	Oczyszczanie chemiczne	0,80	4,31	6,59	370	2,39	1,22	1,09
2	Obróbka mechaniczna	0,87	5,94	8,59	206	3,26	1,25	1,34
3	Obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne	0,82	6,13	8,54	147	2,49	0,78	1,82

Przykładowy wygląd oraz charakterystyczny profilogram powierzchni kompozytu epoksydowo-szklanego (7) po obróbce mechanicznej zamieszczono na rys. 2.22 oraz rys. 2.23.



Rys. 2.22. Wygląd powierzchni kompozytu epoksydowo-szklanego (7); $g = 2,10 \text{ mm}$; obróbka mechaniczna, profilografometr 3D



Rys. 2.23. Reprezentatywny profilogram powierzchni kompozytu epoksydowo-szklanego (7); $g = 2,10 \text{ mm}$; obróbka mechaniczna

W przypadku powierzchni kompozytu epoksydowo-szklanego (7) po obróbce mechanicznej ściernym narzędziem nasypowym P320 (rys. 2.22, rys. 2.23), zmiana struktury geometrycznej i parametrów chropowatości powierzchni jest nieznaczna (w porównaniu z powierzchnią po oczyszczaniu chemicznym – rys. 2.20, rys. 2.21, tabela 2.13).

2.3. Badania wpływu sposobu przygotowania powierzchni na właściwości adhezyjne

2.3.1. Swobodna energia powierzchniowa

Podczas wykonywania operacji przygotowawczych powierzchni do procesu klejenia uwzględniono to, iż nie wszystkie materiały można poddać obróbkom specyficznym, takim jak np. anodowanie, chromianowanie, czy też trawienie. Wszystkie wymienione sposoby przygotowania powierzchni zostały zastosowane w przypadku blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3. Pozostałe materiały poddano standardowym operacjom przygotowawczym, głównie oczyszczaniu chemicznym, obróbce mechanicznej oraz połączeniu obu operacji.

Wartości swobodnej energii powierzchniowej γ_S oraz jej składowych wybranych stopów aluminium, po różnych sposobach przygotowania powierzchni, ujęto w tabelach 2.15 i 2.16.

Tabela 2.15. Swobodna energia powierzchniowa blach ze stopu aluminium EN AW-2024 PLT3; $g = 0,64$ mm

Lp.	Sposób przygotowania powierzchni	Swobodna energia powierzchniowa, mJ/m ²		
		γ_s	γ_s^d	γ_s^p
1	Bez przygotowania	38,9	36,2	2,7
2	Oczyszczanie chemiczne	42,9	41,9	1,0
3	Obróbka mechaniczna	48,5	47,5	1,0
4	Obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne	44,7	44,4	0,3
5	Anodowanie	64,7	38,1	26,6
6	Chromianowanie	69,8	34,2	35,6
7	Trawienie	40,9	39,3	1,6

Tabela 2.16. Swobodna energia powierzchniowa blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0; $g = 0,80$ mm

Lp.	Sposób przygotowania powierzchni	Swobodna energia powierzchniowa, mJ/m ²		
		γ_s	γ_s^d	γ_s^p
1	Bez przygotowania	41,4	35,3	6,1
2	Oczyszczanie chemiczne	38,8	36,8	2,0
3	Obróbka mechaniczna	44,5	34,9	9,6
4	Obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne	41,1	35,3	5,8

Wartości swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowych odniesione do powierzchni blach tytanowych, po różnych sposobach przygotowania powierzchni, zamieszczono w tabelach 2.17 oraz 2.18.

Tabela 2.17. Swobodna energia powierzchniowa blach tytanowych CPI; $g = 0,40$ mm

Lp.	Sposób przygotowania powierzchni	Swobodna energia powierzchniowa, mJ/m ²		
		γ_s	γ_s^d	γ_s^p
1	Bez przygotowania	41,7	32,0	9,7
2	Oczyszczanie chemiczne	42,7	35,1	7,6
3	Obróbka mechaniczna	44,4	37,4	7,0
4	Obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne	45,7	34,5	11,2

Tabela 2.18. Swobodna energia powierzchniowa blach tytanowych CP3; $g = 0,80 \text{ mm}$

Lp.	Sposób przygotowania powierzchni	Swobodna energia powierzchniowa, mJ/m^2		
		γ_s	γ_s^d	γ_s^p
1	Bez przygotowania	42,2	30,9	11,3
2	Oczyszczanie chemiczne	44,8	32,9	11,9
3	Obróbka mechaniczna	38,3	33,5	4,8
4	Obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne	41,7	34,9	6,8

Wartości swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowych kompozytu epoksydowo-szklanego (7), po różnych sposobach przygotowania powierzchni, zamieszczono w tabeli 2.19.

Tabela 2.19. Swobodna energia powierzchniowa kompozytu epoksydowo-szklanego (7); $g = 2,10 \text{ mm}$

Lp.	Sposób przygotowania powierzchni	Swobodna energia powierzchniowa, mJ/m^2		
		γ_s	γ_s^d	γ_s^p
1	Bez przygotowania	37,3	28,0	9,3
2	Oczyszczanie chemiczne	41,0	34,4	6,6
3	Obróbka mechaniczna	50,7	47,7	3,0
4	Obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne	46,9	46,1	0,8

Analizując wyniki badań przedstawione w tabelach 2.15-2.19 można przyjąć, iż wartości swobodnej energii powierzchniowej są uzależnione od sposobów przygotowania powierzchni. Jednak w zależności od rodzaju materiałów ten sam sposób przygotowania powierzchni powoduje uzyskanie różnych wartości γ_s . Ponadto można spostrzec, że udziały poszczególnych składowych swobodnej energii powierzchniowej: dyspersyjnej γ_s^d i polarnej γ_s^p , wykazują zróżnicowanie nie tylko w zależności od rodzaju materiału, ale również w odniesieniu do tego samego sposobu przygotowania powierzchni. We wszystkich przypadkach γ_s^d (oprócz anodowania, tabela 2.15) stanowi zdecydowanie większy udział w ogólnej wartości γ_s , niż γ_s^p . Anodowanie pozwala jednak na uzyskanie większej wartości składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej, przy czym wartości składowych γ_s są ze sobą porównywalne.

W związku z tym, że otrzymane różnice wartości swobodnej energii powierzchniowej powierzchni materiałów, w odniesieniu do zastosowanych sposobów przygotowania powierzchni, są niekiedy nieznaczne, wyniki te poddano analizie statystycznej.

2.3.2. Analiza statystyczna uzyskanych wyników SEP

Otrzymane rezultaty badań opracowano statystycznie, wykorzystując algorytmy przedstawione m.in. w pracach [146, 237]. Zastosowano testy istotności służące do porównywania wartości średnich badanej cechy w dwóch populacjach generalnych. Testy te uwzględniają błąd pierwszego rodzaju, który zakłada odrzucenie testowanej hipotezy w przypadku, gdy jest ona prawdziwa. Błąd ten, określany poziomem istotności, został przyjęty na poziomie $\alpha = 0,05$. Ponadto przeprowadzone badania potraktowano jako małe próby ze względu na ich licznosc – do 30 elementów. Do weryfikacji statystycznej użyto: test t-Studenta, F-Snedecora-Fishera, C-Cochrana i Coxa oraz odpowiednie modele statystyczne. W przypadkach, gdy obie wariancje z prób były równe, stosowano test t-Studenta. Porównanie wartości średnich odniesionych do serii zbiorów wyników, dla których wartości wariancji różnią się w sposób statystycznie istotny, zostało przeprowadzone stosując test C-Cochrana i Coxa.

Model I

Badana cecha X ma w dwóch jednakowych populacjach generalnych rozkłady normalne $N(\bar{X}_1, S_1)$ i $N(\bar{X}_2, S_2)$ o nieznanym parametrach.

Została weryfikowana hipoteza o równości wariancji:

H_0 : przeciwko hipotezie alternatywnej,

H_1 : na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Do weryfikacji wykorzystano statystykę F – Snedecora – Fishera:

$$F = \frac{\frac{n_1}{n_1 - 1} S_1^2}{\frac{n_2}{n_2 - 1} S_2^2} \quad (2.1)$$

gdzie:

S^2 – wariancja, n – licznosc próby.

Statystyka ta, przy założeniu przeciwnosci hipotezy H_0 , ma rozkład F-Snedecora-Fishera o $n_1 - 1$, $n_2 - 1$ stopniach swobody. Weryfikacja przeprowadzana jest na podstawie wyników dwóch niezaleznych prób prostych o liczebnościach odpowiednio równych n_1 i n_2 pobranych z tych populacji.

Zbiór krytyczny ma postać:

$$W = \langle F_\alpha, +\infty \rangle \quad (2.2)$$

gdzie: $P[F \geq F_\alpha] = \alpha$

dla $n_1 - 1$ i $n_2 - 1$ stopni swobody (2.3)

Jeżeli wartość statystyki F obliczona dla próby należy do W, to hipoteza H_0 zostaje odrzucona na rzecz hipotezy H_1 . W przeciwnym przypadku jest brak podstaw do odrzucenia hipotezy o równości wariancji (H_0).

Model II

Badana cecha X ma w dwóch populacjach rozkłady normalne $N(\bar{X}_1, S_1)$ i $N(\bar{X}_2, S_2)$ o nieznanach, ale jednakowych odchyleniach standardowych $S_1=S_2$. W modelu tym zakłada się równość odchyłeń standardowych, dlatego każdorazowe użycie tego modelu poprzedzone było sprawdzeniem hipotezy o równości wariancji.

Do weryfikacji hipotezy o równości średnich $H_0: \bar{X}_1 = \bar{X}_2$, przy ustalonym poziomie istotności przeciwko hipotezie $H_1: \bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$ wykorzystano test oparty na statystyce t-Studenta:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}, \quad (2.4)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (2.5)$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(X_i - \bar{X} \right)^2 \quad (2.6)$$

gdzie: \bar{X} – średnia arytmetyczna,
 S^2 – wariancja.

Statystyka ta, przy założeniu prawdziwości hipotezy H_0 , ma rozkład t-Studenta o $n_1 + n_2 - 2$ stopniach swobody. Zbiór krytyczny testu jest sumą przedziałów:

$$W = (-\infty, t_\alpha) \cup (t_\alpha, +\infty) \quad (2.7)$$

Wartość t_α wyznacza się z tablic rozkładu t-Studenta dla $n_1 + n_2 - 2$ stopni swobody tak, aby:

$$P[|T| \geq t_\alpha] = \alpha \quad (2.8)$$

Jeżeli wartość statystyki t wyznaczona na podstawie próby należy do zbioru krytycznego W, to hipoteza H_0 zostaje odrzucona na rzecz hipotezy H_1 , w przeciwnym przypadku nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 .

Model III

Badana cecha X ma w dwóch populacjach rozkłady normalne $N(\bar{X}_1, S_1)$ i $N(\bar{X}_2, S_2)$ o nieznanymi odchyleniach standardowych $S_1=S_2$. Przy ustalonym poziomie istotności weryfikowano hipotezę:

$H_0: \bar{X}_1 = \bar{X}_2$ przeciwko hipotezie alternatywnej

$H_1: \bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$.

Wykorzystano test oparty na statystyce Cochran i Coxa:

$$C = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1 - 1} + \frac{S_2^2}{n_2 - 1}}}. \quad (2.9)$$

Zbiór krytyczny ma postać:

$$W = (-\infty; -c_{\alpha, n_1, n_2}) \cup (c_{\alpha, n_1, n_2}; +\infty), \quad (2.10)$$

gdzie:

$$c\left(1 - \frac{\alpha}{2}; n_1; n_2\right) \cong \left(\frac{S_1^2}{n_1 - 1} \cdot t(\alpha; n_1 - 1) + \frac{S_2^2}{n_2 - 1} \cdot (\alpha; n_2 - 1)\right) \div \left[\frac{S_1^2}{n_1 - 1} + \frac{S_2^2}{n_2 - 1}\right]. \quad (2.11)$$

Jeżeli wartość statystyki C wyznaczona na podstawie próby należy do zbioru krytycznego W, to hipoteza H_0 zostaje odrzucona na rzecz hipotezy H_1 . W przeciwnym przypadku nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 .

Wyniki testowania hipotezy o równości dwóch średnich z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta na poziomie istotności 0,05; w odniesieniu do wyników badań zamieszczonych w tabelach 2.15 ÷ 2.19, przedstawiono w tabelach 2.20 ÷ 2.24.

Tabela 2.20. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań (tab. 2.15), z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta oraz Cochran-Coxa; $\alpha = 0,05$

1	2	3	4	5	6	7
Nr tabeli	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna $F_{(\alpha; n_1-1, n_2-1)}$	Wniosek	Wartość statystyki t	Wartość krytyczna $t_{(\alpha; n+n_2-2)}$	Wniosek
Tab. 2.15: 2-3	1,52	2,53	$S_1^2 = S_2^2$	-7,3999	2,0518	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Tab. 2.15: 3-4	1,21	2,48	$S_1^2 = S_2^2$	4,6334	2,0484	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Tab. 2.15: 2-4	1,62	2,45	$S_1^2 = S_2^2$	-2,5871	2,0452	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Tab. 2.15: 5-6	1,02	2,46	$S_1^2 = S_2^2$	-8,1140	2,0452	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Tab. 2.15: 2-7	2,24	2,53	$S_1^2 = S_2^2$	3,7172	2,0518	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Nr tabeli	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna $F_{(\alpha; n_1-1, n_2-1)}$	Wniosek	Wartość statystyki C	Wartość krytyczna $c_{(\alpha; n_1; n_2)}$	Wniosek
Tab. 2.15: 1-2	2,61	2,46	$S_1^2 > S_2^2$	4,8546	2,1448	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$

Tabela 2.21. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań (tab. 2.16), z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta oraz Cochran-Coxa; $\alpha = 0,05$

1	2	3	4	5	6	7
Nr tabeli	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna $F_{(\alpha; n_1-1, n_2-1)}$	Wniosek	Wartość statystyki t	Wartość krytyczna $t_{(\alpha; n+n_2-2)}$	Wniosek
Tab. 2.16: 2-3	1,89	2,63	$S_1^2 = S_2^2$	-9,1673	2,0639	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Tab. 2.16: 3-4	1,12	2,79	$S_1^2 = S_2^2$	5,9261	2,0639	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Nr tabeli	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna $F_{(\alpha; n_1-1, n_2-1)}$	Wniosek	Wartość statystyki C	Wartość krytyczna $c_{(\alpha; n_1; n_2)}$	Wniosek
Tab. 2.16: 1-2	3,85	2,72	$S_1^2 > S_2^2$	3,1416	2,1476	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$

Tabela 2.22. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań (tab. 2.17), z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta oraz Cochрана-Coxa; $\alpha = 0,05$

1	2	3	4	5	6	7
Nr tabeli	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna $F_{(\alpha; n_1-1, n_2-1)}$	Wniosek	Wartość statystyki t	Wartość krytyczna $t_{(\alpha; n+n_2-2)}$	Wniosek
Tab. 2.17: 2-3	1,96	2,35	$S_1^2 = S_2^2$	-3,2892	2,0423	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Tab. 2.17: 3-4	1,44	2,23	$S_1^2 = S_2^2$	-1,9933	2,0423	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Nr tabeli	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna $F_{(\alpha; n_1-1, n_2-1)}$	Wniosek	Wartość statystyki C	Wartość krytyczna $c_{(\alpha; n_1; n_2)}$	Wniosek
Tab. 2.17: 1-2	4,60	2,35	$S_1^2 > S_2^2$	1,1379	2,1119	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$

Tabela 2.23. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań (tab. 2.18), z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta oraz Cochрана-Coxa; $\alpha = 0,05$

1	2	3	4	5	6	7
Nr tabeli	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna $F_{(\alpha; n_1-1, n_2-1)}$	Wniosek	Wartość statystyki t	Wartość krytyczna $t_{(\alpha; n+n_2-2)}$	Wniosek
Tab. 2.18: 1-2	1,51	2,60	$S_1^2 = S_2^2$	-3,1725	2,0555	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Tab. 2.18: 2-3	1,67	2,53	$S_1^2 = S_2^2$	6,2572	2,0518	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Nr tabeli	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna $F_{(\alpha; n_1-1, n_2-1)}$	Wniosek	Wartość statystyki C	Wartość krytyczna $c_{(\alpha; n_1; n_2)}$	Wniosek
Tab. 2.18: 3-4	4,22	2,53	$S_1^2 > S_2^2$	3,8603	2,1512	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$

Tabela 2.24. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań (tab. 2.19), z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta oraz Cochrań-Coxa; $\alpha = 0,05$

1	2	3	4	5	6	7
Nr tab.	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna $F_{(\alpha; n_1-1, n_2-1)}$	Wniosek	Wartość statystyki T	Wartość krytyczna $t_{(\alpha; n+n_2-2)}$	Wniosek
Tab. 2.19: 2-3	1,57	3,02	$S_1^2 = S_2^2$	9,4979	2,0739	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Tab. 2.19: 3-4	1,53	2,80	$S_1^2 = S_2^2$	-26,9369	2,1009	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Nr tab.	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna $F_{(\alpha; n_1-1, n_2-1)}$	Wniosek	Wartość statystyki C	Wartość krytyczna $C_{(\alpha; n_1; n_2)}$	Wniosek
Tab. 2.19: 1-2	4,77	3,01	$S_1^2 > S_2^2$	7,0283	2,1639	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$

Przeprowadzona analiza statystyczna wyników badań (tabele 2.20 ÷ 2.24) pozwoliła na stwierdzenie, iż w większości przypadków występuje statystycznie istotny wpływ sposobu przygotowania powierzchni na wartość swobodnej energii powierzchniowej (pomimo nieznacznych różnic wartości swobodnej energii powierzchniowej). Analiza ta stanowiła podstawę do sformułowania podsumowania badań.

2.4. Wnioski i ustalenia

Można zauważyć, że rozpatrywane materiały różnią się zarówno elementami geometrycznymi, jak i parametrami chropowatości powierzchni. Różnice występują nawet w obszarze tej samej grupy materiałowej (np. blach tytanowych). Różnice dotyczące np. cech geometrycznych powierzchni są następstwem głównie metod i warunków wytwarzania tych elementów.

Zastosowane sposoby przygotowania powierzchni modyfikują jej cechy geometryczne wraz z parametrami chropowatości, a przykładem takich obróbek są metody mechaniczne, chemiczne, czy też elektrochemiczne. Zauważono, iż zastosowanie operacji oczyszczania chemicznego w większości przypadków nie wpływa znacząco na zmiany cech geometrycznych powierzchni, zarówno w stosunku do powierzchni niepoddanej operacjom przygotowawczym, jak i po obróbce mechanicznej, chociaż w niektórych przypadkach jest zauważalna zmiana parametrów chropowatości powierzchni.

Zaobserwowano istotne zmiany struktury geometrycznej powierzchni badanych materiałów spowodowane obróbką mechaniczną. W przypadku niektórych materiałów obróbka ta przyczyniła się do wzrostu parametrów chropowatości

powierzchni, dotyczy to zwłaszcza blach ze stopu aluminium i blach tytanowych. W odniesieniu do kompozytu polimerowego parametry chropowatości powierzchni po obróbce mechanicznej osiągają nieznacznie większe wartości w porównaniu z parametrami uzyskanymi po operacji oczyszczania chemicznego.

Zastosowanie różnorodnych obróbek powierzchniowych badanych materiałów konstrukcyjnych pozwala na uzyskanie ich odmiennych właściwości adhezyjnych, określonych poprzez wartość swobodnej energii powierzchniowej. Analiza statystyczna pozwoliła na stwierdzenie, że w większości przypadków sposób przygotowania powierzchni wpływa istotnie na wartość swobodnej energii powierzchniowej. W niektórych rozpatrywanych wariantach, pomimo nieznacznych różnic wartości γ_s , są one statystycznie istotne na poziomie istotności 0,05.

Zauważono, że różne sposoby przygotowania powierzchni przyczyniają się nie tylko do uzyskania różnych wartości swobodnej energii powierzchniowej, ale także do uzyskania odmiennego udziału poszczególnych składowych SEP w ogólnej jej wartości. W większości przypadkach wariantów przygotowania powierzchni blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 składowa dyspersyjna stanowi 93-99% wartości swobodnej energii powierzchniowej. Po procesach elektrochemicznych (anodowanie i chromianowanie) otrzymano zdecydowanie inne wyniki. W przypadku chromianowania składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej jest większa od składowej dyspersyjnej, a po anodowaniu udział polarnej w ogólnej wartości SEP wynosi 41%. Można więc sądzić, że metody chemiczne przyczyniają się zarówno do wzrostu wartości swobodnej energii powierzchniowej, jak i do zrównoważenia udziału oddziaływań dyspersyjnych (określonych za pomocą składowej dyspersyjnej SEP) i oddziaływań polarnych (określonych składową polarną SEP). Udziały składowych swobodnej energii powierzchniowej w odniesieniu do innych materiałów są różne w zależności od technologii przygotowania powierzchni. Przykładowo, w przypadku blach tytanowych CP1 i CP3, udział składowej dyspersyjnej SEP stanowi od 73 do 87% wartości swobodnej energii powierzchniowej, a dla kompozytu od 75 do 98%.

Uwzględniając wartość swobodnej energii powierzchniowej w przypadku blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 najkorzystniejszym sposobem obróbki jest obróbka elektrochemiczna (chromianowanie i anodowanie). Spośród pozostałych – obróbka mechaniczna, która także jest korzystna w doniesieniu do powierzchni blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0, kompozytu epoksydowo-szklanego (7) oraz blach tytanowych CP1.

Odnosząc strukturę geometryczną i parametry chropowatości powierzchni badanych materiałów do wartości wyznaczonej swobodnej energii powierzchniowej zauważono, że rozwinięcie powierzchni nie zawsze wpływa na jej wzrost. Nie jest to zależność proporcjonalna. Kilkukrotne powiększanie parametrów chropowatości powierzchni nie powoduje kilkukrotnego wzrostu wartości swobodnej energii powierzchniowej.

Należy przyjąć, że w celu pełniejszego określenia przydatności danej powierzchni do procesów adhezyjnych, jest konieczna analiza zarówno struktury geometrycznej powierzchni, jak i właściwości adhezyjnych powierzchni badanych materiałów. Struktura geometryczna powierzchni może wpływać na adhezję mechaniczną, a swobodna energia powierzchniowa jest związana zarówno z adhezją mechaniczną, jak i z drugą składową adhezji – adhezją specyficzną (właściwą).

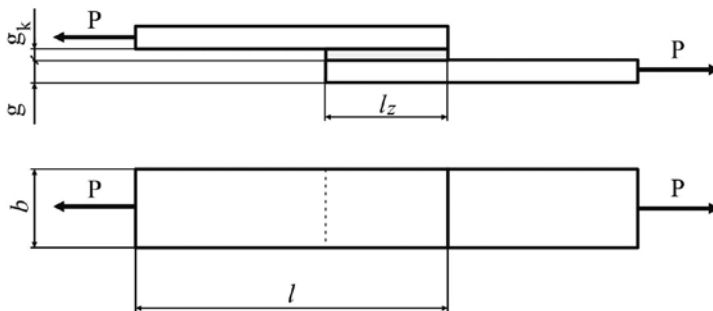
Rozdział 3.

Wytrzymałość połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych

3.1. Metodyka badań

Przedmiotem badań są połączenia klejowe jednozakładkowe obciążone na ścinanie wybranych materiałów konstrukcyjnych. Wiadomo, że pierwszy etap technologii klejenia, jakim jest przygotowanie powierzchni łączonych materiałów istotnie wpływa na wytrzymałość połączeń klejowych, przy spełnieniu pozostałych warunków prawidłowego zaprojektowania oraz wykonania połączeń. Podczas procesu przygotowania powierzchni do klejenia, niezwykle jest istotna analiza właściwości adhezyjnych powierzchni łączonych materiałów, ponieważ określają one przydatność tych powierzchni do procesów adhezyjnych. W trakcie wykonywania połączeń klejowych należy dążyć do uzyskania jak najlepszej adhezji.

Rozmiary próbek do badań przedstawiono na rys. 3.1. Długość elementów klejonych wynosiła $l = 100 \pm 0,4$ mm, szerokość elementów klejonych $b = 20 \pm 0,3$ mm, a grubość spoiny kleju: $g_k = 0,1 \pm 0,02$ mm.



Rys. 3.1. Schemat połączenia klejowego jednozakładkowego: b – szerokość elementów klejonych, g – grubość elementów klejonych, g_k – grubość spoiny klejowej, l – długość elementów klejonych, l_z – długość spoiny klejowej, P – siła przedstawiająca sposób i kierunek obciążenia połączenia

Grubość łączonych elementów g była uzależniona od rodzaju łączonego materiału, a długość zakładki spoiny klejowej l_z była większa od długości granicznej określonej z zależności (1.18). Rozmiary badanych połączeń klejowych jednorodnych, zamieszczono w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Rozmiary połączeń klejowych jednorodnych

Lp.	Rodzaj badanych materiałów	Grubość elementów klejonych g , mm	Długość zakładki spoiny klejowej l_z , mm
1	Błacha ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3	0,64	24
2	Błacha ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0	0,80	27
3	Błacha tytanowa CP1	0,40	8
4	Błacha tytanowa CP3	0,80	16
5	Kompozyt epoksydowo-szkłany (7)	2,10	15

W tabeli 3.2 zamieszczono grubość elementów oraz długość zakładki spoiny klejowej połączeń klejowych hybrydowych.

Tabela 3.2. Rozmiary połączeń klejowych hybrydowych

Lp.	Rodzaj badanych materiałów	Grubość elementów klejonych g , mm	Długość zakładki spoiny klejowej l_z , mm
1	Błacha ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 Błacha tytanowa CP3	0,80 0,80	21
2	Kompozyt epoksydowo-szkłany (7) Błacha ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3	2,10 0,64	22
3	Kompozyt epoksydowo-szkłany (7) Błacha ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0	2,10 0,80	21
4	Kompozyt epoksydowo-szkłany (7) Błacha tytanowa CP1	2,10 0,40	12

W dalszych oznaczeniach połączeń klejowych hybrydowych uproszczono oznaczenia blach ze stopu aluminium, podając jedynie rodzaj blach.

Opis metodyki przeprowadzania operacji przygotowania powierzchni wraz z charakterystyką niektórych operacji zamieszczono w rozdziale 2. Podczas wykonywania połączeń zostały zachowane następujące warunki:

- temperatura utwardzania $20 \pm 2^\circ\text{C}$,
- wilgotność względna powietrza $32 \div 40\%$,
- nacisk w procesie utwardzania $0,02 \text{ MPa}$;
- czas sezonowania 48 godzin w temperaturze otoczenia $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Do wykonania połączeń zastosowano odpowiedni do klejenia badanych materiałów, klej epoksydowy dwuskładnikowy Loctite 3430 [246], charakteryzujący się krótkim czasem utwardzania w temperaturze pokojowej. Klej ten został przygotowany z wykorzystaniem mieszała statycznego oraz aplikowany na jedną z łączonych powierzchni, zgodnie z zaleceniami producenta kleju. Sposób uzyskania równomiernej grubości kleju określono w badaniach wstępnych, stosując m.in. odpowiednią ilość kleju oraz nacisk w procesie utwardzania.

Badania wytrzymałości połączeń klejowych na ścinanie z rozciąganiem przeprowadzono wykorzystując normę EN DIN 1465 [349], przy użyciu maszyn wytrzymałościowych Zwick/Roell Z100 oraz Zwick/Roell Z150. Prędkość rozciągania wynosiła 5 mm/min.

Do określenia minimalnej liczby pomiarów n_0 wykorzystano model obliczeniowy przedstawiony w pracach [146, 237] oraz zależność:

$$n_0 = \left[\left(\frac{u \left(1 - \frac{1}{2} \alpha \right) S}{l_u} \right)^2 \right] + 1 \quad (3.1)$$

gdzie: $u \left(1 - \frac{1}{2} \alpha \right)$ – kwantyl rzędu $1 - \frac{1}{2} \alpha$ rozkładu $N(0,1)$;

u – wartość przeciętna,

$1 - \alpha$ – poziom ufności,

S – odchylenie standardowe,

l_u – długość przedziału ufności.

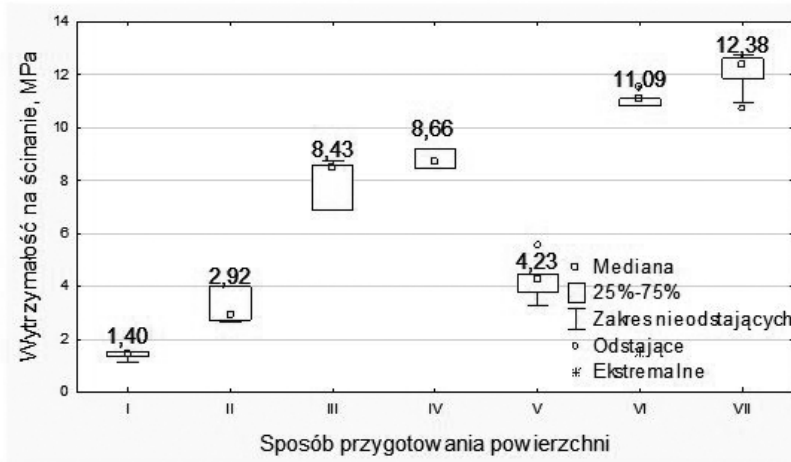
Na podstawie obliczeń przyjęto w większości przypadków liczbę powtórzeń pomiarów wynoszącą od 8 do 12.

3.2. Wytrzymałość połączeń adhezyjnych jednorodnych

Rezultaty badań wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 zamieszczono na rys. 3.2. Wyniki zaprezentowane na rysunkach w podrozdziale 3.2. stanowią średnie wartości z 8÷12 pomiarów dla każdego wariantu przygotowania powierzchni.

Zastosowanie operacji anodowania oraz chromianowania, jako sposobu przygotowania powierzchni blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3, pozwoliło

na uzyskanie połączeń o największych wartościach wytrzymałości na ścinanie, odpowiednio: 11,09 MPa i 12,39 MPa. Dużą wytrzymałością charakteryzują się również połączenia blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 poddane obróbce mechanicznej wraz z oczyszczaniem chemicznym oraz tylko obróbce mechanicznej, dla których wytrzymałość wynosiła 8,43 MPa i 8,66 MPa, a więc była 6-krotnie większa niż wówczas, gdy nie zastosowano operacji przygotowania powierzchni.

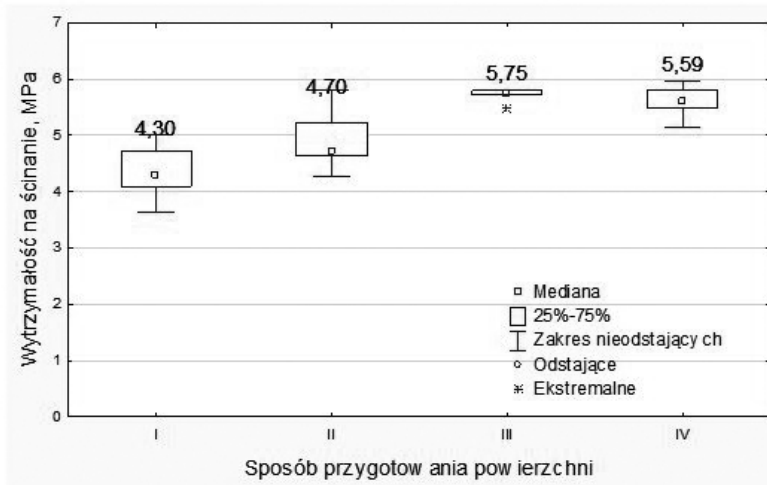


Rys. 3.2. Wytrzymałość na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-2024 PLT3 ($l_z = 24$ mm; $g = 0,64$ mm) po różnych sposobach przygotowania powierzchni: I – bez przygotowania powierzchni, II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne, V – trawienie, VI – anodowanie, VII – chromianowanie

W przypadku połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3, po zniszczeniu, obserwowalny jest charakterystyczny oraz powtarzalny kształt elementów zniszczonych. Następuje odkształcenie łączonych elementów, które jest spowodowane występowaniem oprócz naprężeń stycznych, także naprężeń powodujących zginanie. Potwierdzeniem takiego zachowania się połączeń klejowych są wyniki analizy numerycznej przedstawione w rozdziale 5.

Wyniki badań wytrzymałości jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 po różnym przygotowaniu powierzchni zostały przedstawione na rys. 3.3. Do wykonania połączeń klejowych wykorzystano próbki z blachy o grubości 0,80 mm. Największą wytrzymałość połączeń klejowych blach (rys. 3.3) otrzymano po zastosowaniu obróbki mechanicznej (5,75 MPa), najmniejszą zaś w przypadku braku obróbki powierzchniowej elementów łączonych

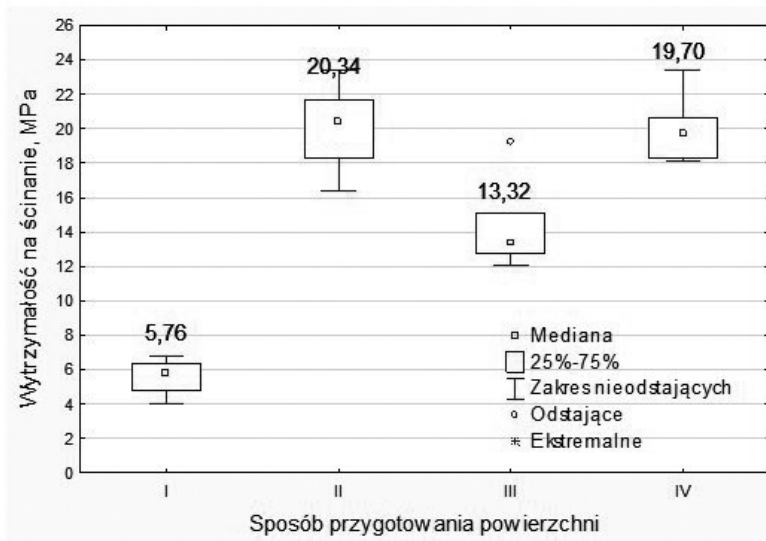
(4,30 MPa). W tym przypadku (III wariant) obserwuje się wzrost wytrzymałości połączeń klejowych o 25% w odniesieniu do I wariantu (braku przygotowania powierzchni). Analizując wpływ oczyszczania chemicznego można zauważyć, że zastosowanie tej operacji wpływa korzystnie na wytrzymałość. Obserwuje się pozytywny wpływ oczyszczania chemicznego w odniesieniu do wyników otrzymanych dla wariantu bez oczyszczania chemicznego (o około 9%).



Rys. 3.3. Wytrzymałość na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 ($l_z = 27\text{mm}$; $g = 0,80\text{ mm}$) po różnych sposobach przygotowania powierzchni: I – bez przygotowania powierzchni, II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne

Zauważono, że w każdym przypadku przygotowania powierzchni elementów do klejenia uzyskuje się większą wytrzymałość połączeń klejowych w odniesieniu do I wariantu – braku obróbki przygotowawczej.

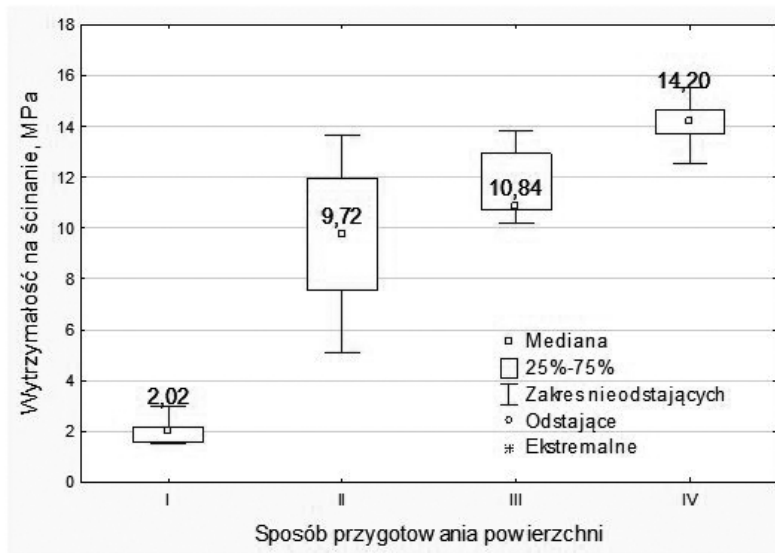
Badania wytrzymałości połączeń klejowych zostały także zrealizowane dla dwóch rodzajów blach tytanowych: CP1 ($g = 0,40\text{ mm}$) oraz CP3 ($g = 0,80\text{ mm}$). Wyniki badań wytrzymałości połączeń klejowych blach tytanowych CP1, po wybranych sposobach przygotowania powierzchni zaprezentowano na rys. 3.4. W przypadku połączeń klejowych blach tytanowych CP1 największą wytrzymałość uzyskano po zastosowaniu oczyszczania chemicznego oraz obróbki mechanicznej połączonej z oczyszczaniem chemicznym. Wytrzymałość na ścinanie tych połączeń była prawie 4-krotnie większa niż wytrzymałość połączeń blach bez obróbki powierzchniowej. Zastosowanie tylko obróbki mechanicznej, bez oczyszczania chemicznego było mniej efektywne. Wytrzymałość na ścinanie w tym przypadku była o około 7 MPa mniejsza niż w przypadku oczyszczania chemicznego (wariant II).



Rys. 3.4. Wytrzymałość na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach tytanowych CP1 ($l_z = 8 \text{ mm}$; $g = 0,40 \text{ mm}$) po różnych sposobach przygotowania powierzchni: I – bez przygotowania powierzchni, II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne

Wyniki badań wytrzymałościowych połączeń klejowych blach tytanowych CP3 po różnych sposobach przygotowania powierzchni przedstawiono na rys. 3.5.

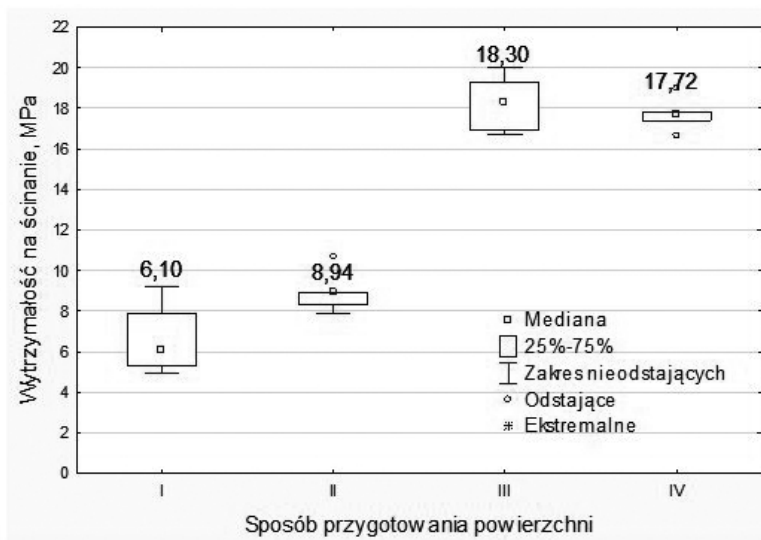
Zastosowanie obróbki mechanicznej i oczyszczania chemicznego, jako przygotowania powierzchni blach tytanowych CP3, pozwoliło na uzyskanie największej wartości wytrzymałości (14, 20 MPa). Wytrzymałość na ścinanie tych połączeń była prawie 7-krotnie większa niż wytrzymałość połączeń blach tytanowych CP3 bez obróbki przygotowawczej. Zastosowanie tylko obróbki mechanicznej bez oczyszczania chemicznego i samego oczyszczania chemicznego było mniej efektywne. Wytrzymałość na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach tytanowych CP3 po oczyszczeniu chemicznym stanowiła 68% wytrzymałości połączeń po zastosowaniu IV wariantu przygotowania, a 76% – III wariantu (obróbki mechanicznej).



Rys. 3.5. Wytrzymałość na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach tytanowych CP3 ($l_z = 16 \text{ mm}$; $g = 0,80 \text{ mm}$) po różnych sposobach przygotowania powierzchni: I – bez przygotowania powierzchni, II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne

W badaniach wytrzymałości połączeń klejowych wykorzystano kompozyt epoksydowo-szklany (7), o grubości 2,10 mm, którego powierzchnia została poddana takiej samej obróbce przygotowawczej, jak w przypadku blach ze stopu aluminium oraz blach tytanowych. Wyniki badań wytrzymałości tych połączeń, po różnych sposobach przygotowania powierzchni, ujęto na rys. 3.6. Zauważono, że największą wytrzymałość uzyskano po obróbce mechanicznej (18,30 MPa) oraz obróbce mechanicznej i oczyszczaniu chemicznym (17,72 MPa).

Wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych jednorodnych kompozytu była prawie 3-krotnie większa niż wytrzymałość tych połączeń bez obróbki przygotowawczej (I wariant). Natomiast wytrzymałość po oczyszczaniu chemicznym była o 50% mniejsza niż po obróbce mechanicznej. Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono, że operacje przygotowawcze mogą w różnym stopniu wpływać na uzyskiwaną wytrzymałość połączeń klejowych badanych materiałów konstrukcyjnych. Najmniejszą wytrzymałość otrzymano w przypadku połączeń, w których powierzchnia próbek tworzących połączenia, nie była poddana obróbce przygotowawczej.



Rys. 3.6. Wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych jednorodnych kompozytu epoksydowo-szklanego (7) ($l_z = 15 \text{ mm}$; $g = 2,10 \text{ mm}$) po różnych sposobach przygotowania powierzchni: I - bez przygotowania powierzchni, II - oczyszczanie chemiczne, III - obróbka mechaniczna, IV - obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne

W przypadku wielu połączeń klejowych zastosowanie operacji oczyszczania chemicznego po obróbce mechanicznej pozwala na uzyskanie większej wytrzymałości w stosunku do wytrzymałości połączeń, w których powierzchnia materiałów została poddana tylko obróbce mechanicznej. Takie wyniki otrzymano w odniesieniu do połączeń klejowych blach tytanowych CP1 oraz CP3. W przypadku połączeń klejowych blach ze stopów aluminium EN AW-2024PLT3 i EN AW-7075PLT0 wzrost ten był nieznaczny. Jednak należy zauważyć, że po oczyszczaniu chemicznym otrzymano największy rozrzut wartości wytrzymałości połączeń materiałów, w odniesieniu do pozostałych sposobów przygotowania powierzchni. Może to świadczyć o większej nierównomierności właściwości adhezyjnych uzyskiwanych w tym przypadku, co skutkuje dużym rozrzutem wartości wytrzymałości połączeń. Potwierdzają to analizy wartości SEP po oczyszczaniu chemicznym np. blach tytanowych CP1 (rys. 3.4) oraz CP3 (rys. 3.5).

3.3. Wytrzymałość połączeń adhezyjnych hybrydowych

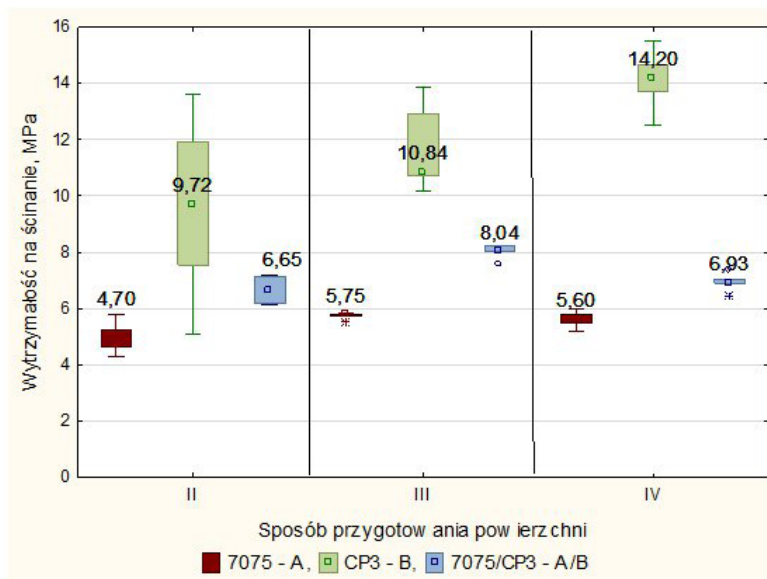
Wytrzymałość połączeń adhezyjnych hybrydowych, po zastosowaniu wybranych sposobów przygotowania powierzchni, rozpatrywano w następujących wariantach:

- a) stop aluminium – tytan,
- b) kompozyt polimerowy – stop aluminium,
- c) kompozyt polimerowy – tytan.

Analizie poddano wybrane sposoby przygotowania powierzchni, takie jak: oczyszczanie chemiczne, obróbka mechaniczna oraz obróbka mechaniczna wraz z oczyszczaniem chemicznym, aby zachować takie same sposoby przygotowania powierzchni, jak w połączeniach jednorodnych. Wprawdzie w przypadku połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 otrzymano lepsze rezultaty wytrzymałości po zastosowaniu innych operacji przygotowawczych, takich jak: anodowanie i chromianowanie, jednak sposobów tych nie można stosować do kompozytów polimerowych.

3.3.1. Stop aluminium – tytan

Połączenia klejowe hybrydowe zostały wykonane z blachy ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 i blachy tytanowej CP3 (7075/CP3). Grubość łączonych elementów obu materiałów wynosiła 0,80 mm. Wyniki badań wytrzymałości tego rodzaju połączenia zamieszczono na rys. 3.7.



Rys. 3.7. Wytrzymałość na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0, blach tytanowych CP3 oraz połączeń klejowych hybrydowych 7075/CP3 po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne

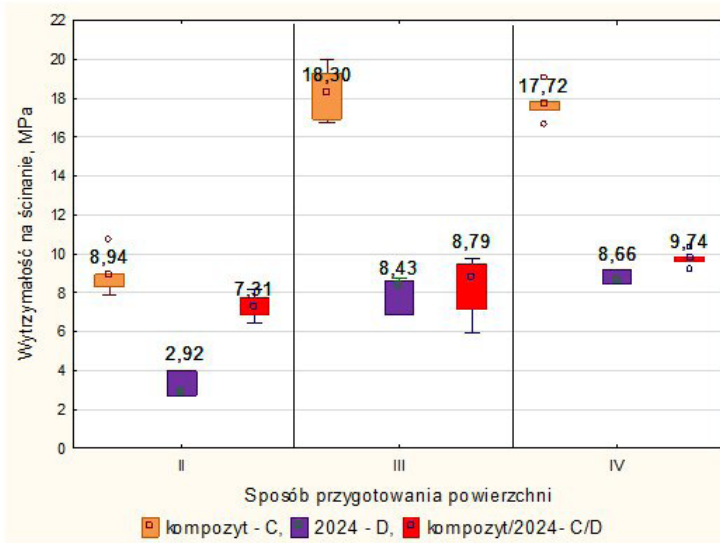
Można zauważyć, że połączenia hybrydowe składające się z blachy ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 oraz blachy tytanowej CP3 oraz uzyskały większą wytrzymałość niż jednorodne połączenia klejowe blachy ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0, ale mniejszą niż jednorodne połączenia klejowe blach tytanowych CP3.

Analizując warianty przygotowania powierzchni i porównując wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych hybrydowych 7075/CP3 oraz jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 można zauważyć następujące różnice w uzyskanych wartościach wytrzymałości: po oczyszczeniu chemicznym – wzrost o 26%, po obróbce mechanicznej – wzrost o 28%, po obróbce mechanicznej i oczyszczeniu chemicznym – wzrost o 19%, przy czym w przypadku obróbki mechanicznej otrzymano największą wytrzymałość w obu przypadkach połączeń. Porównując wytrzymałość połączeń hybrydowych z wytrzymałością jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0, zauważa się korzystny wpływ łączenia blach tytanowych i blach ze stopu aluminium w stosunku do jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium.

Porównując natomiast wyniki jednorodnych połączeń klejowych blach tytanowych CP3 oraz połączeń hybrydowych 7075/CP3 zaobserwowano spadek wytrzymałości połączeń hybrydowych o około 30% po oczyszczeniu chemicznym, a po obróbce mechanicznej i oczyszczeniu chemicznym – ponad dwukrotny.

3.3.2. Kompozyt polimerowy – stop aluminium

W przypadku połączeń klejowych hybrydowych kompozytu epoksydowo-szklanego (7) i blach ze stopu aluminium, analizie poddano połączenia klejowe elementów wykonane z kompozytu epoksydowo-szklanego (7) o grubości 2,10 mm oraz z blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 o grubości 0,64 mm i stopu aluminium EN AW-7075PLT0 o grubości 0,80 mm. Wyniki badań wytrzymałości dwóch rodzajów połączeń klejowych jednorodnych: blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 i kompozytu epoksydowo-szklanego (7) oraz połączeń klejowych hybrydowych kompozytu epoksydowo-szklanego (7) i blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 (kompozyt/2024) przedstawiono na rys. 3.8. Z wyników badań wynika, że wytrzymałość połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/2024 jest mniejsza niż wytrzymałość połączeń klejowych jednorodnych kompozytu polimerowego, a większa od wytrzymałości jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3.



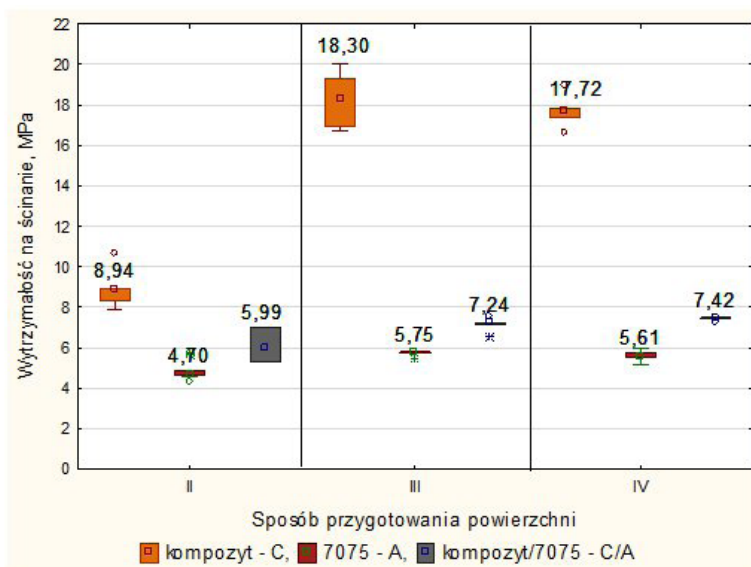
Rys. 3.8. Wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych jednorodnych kompozytu epoksydowo-szklanego (7) i blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 oraz połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/2024 po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne

Wytrzymałość jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 jest około 60% mniejsza niż wytrzymałość połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/2024 po oczyszczeniu chemicznym, natomiast po III i IV wariacie przygotowania powierzchni o 4% i 10%. Wytrzymałość połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/2024 jest o około 24% mniejsza niż wytrzymałość połączeń klejowych jednorodnych kompozytu po oczyszczeniu chemicznym, natomiast po obróbce mechanicznej stanowi ona około 48% wytrzymałości połączeń klejowych jednorodnych kompozytu.

Wyniki badań wytrzymałości dwóch rodzajów połączeń klejowych jednorodnych: blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 i kompozytu epoksydowo-szklanego (7) oraz połączeń klejowych hybrydowych kompozytu epoksydowo-szklanego (7) i blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 (kompozyt/7075) przedstawiono na rys. 3.9.

Na podstawie wyników badań (rys. 3.9) ustalono, że wytrzymałość połączeń klejowych hybrydowych jest mniejsza niż wytrzymałość połączeń jednorodnych kompozytu epoksydowo-szklanego (7) (będącą największą wartością wytrzymałości spośród analizowanych przypadków), a większa niż wytrzymałość jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0. Wytrzymałość

jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 jest o około 20% mniejsza niż wytrzymałość połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/7075 we wszystkich wariantach przygotowania powierzchni.

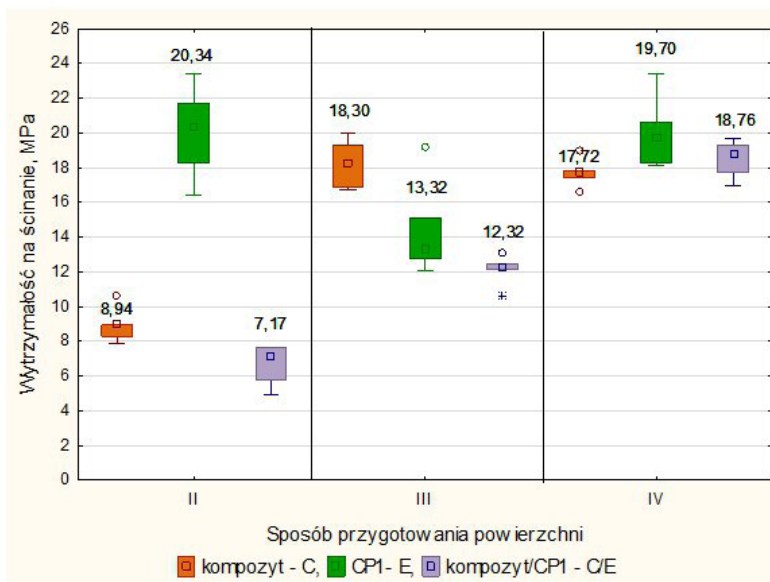


Rys. 3.9. Wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych jednorodnych kompozytu epoksydowo-szklanego (7) i blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 oraz połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/7075 po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne

Można ponadto spostrzec znacznie mniejszą wytrzymałość połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/7075 w stosunku do wytrzymałości połączeń klejowych jednorodnych kompozytu. W przypadku zastosowania obróbki mechanicznej oraz wariantu obróbki mechanicznej i oczyszczania chemicznego zaobserwowano ponad 2,5-krotnie mniejszą wytrzymałość połączeń klejowych hybrydowych w odniesieniu do połączeń klejowych jednorodnych kompozytu.

3.3.3. Kompozyt polimerowy – tytan

W przypadku połączenia adhezyjnego elementów wykonanych z kompozytu polimerowego i blach tytanowych, zastosowano kompozyt epoksydowo-szklany (7) o grubości 2,10 mm oraz blachy tytanowe CP1 o grubości 0,40 mm. Uzyskane wyniki badań wytrzymałości na ścinanie zamieszczono na rys. 3.10.



Rys. 3.10. Wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych jednorodnych kompozytu epoksydowo-szklanego (7), blach tytanowych CP1 oraz połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/CP1 po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne

Analiza wyników badań wytrzymałości rozpatrywanych połączeń klejowych wskazuje na mniejszą wytrzymałość połączeń hybrydowych kompozyt/CP1 w stosunku do wytrzymałości jednorodnych połączeń klejowych blach tytanowych CP1. Relacja ta dotyczy zwłaszcza wariantu zastosowania oczyszczania chemicznego powierzchni, gdzie obserwuje się prawie dwukrotnie mniejszą wytrzymałość. W przypadku obróbki mechanicznej różnica ta wynosi 17%, a w przypadku wariantu obróbki mechanicznej i oczyszczania chemicznego, 8%. Nieco inaczej sytuacja kształtuje się w przypadku porównania wytrzymałości połączeń klejowych hybrydowych i jednorodnych kompozytu polimerowego. Przy zastosowaniu obróbki mechanicznej wytrzymałość połączenia hybrydowego jest o około 50% mniejsza niż połączenia jednorodnego, natomiast po oczyszczeniu chemicznym wytrzymałość o około 20%, a po obróbce mechanicznej i oczyszczeniu chemicznym o 7%.

3.4. Analiza statystyczna wyników badań wytrzymałości

Do weryfikacji statystycznej otrzymanych wyników badań wytrzymałości wykorzystano stosowne hipotezy oraz testy statystyczne. Wyniki testowania hipotezy o równości wariancji oraz równości wartości średnich przy dwóch zbiorach wyników w przypadku wariantów połączeń klejowych jednorodnych (rys. 3.2 – 3.6) przedstawiono w tabelach 3.8. i 3.9.

Tabela 3.8. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań wytrzymałości z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta; $\alpha = 0,05$

1	2	3	4	5	6	7
Numer rysunku	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna $F_{(\alpha; n_1-1, n_2-1)}$	Wniosek	Wartość statystyki t	Wartość krytyczna $t_{(\alpha; n + n_2 - 2)}$	Wniosek
Rys. 3.2: I-II	1,06	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	-3,2560	2,7765	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.2: II-III	1,65	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	-5,7592	2,7765	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.2: III-IV	5,38	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	-1,0910	2,7765	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2$
Rys. 3.3: I-II	1,63	3,68	$S_1^2 = S_2^2$	-2,2530	2,1199	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.3: III-IV	1,23	3,01	$S_1^2 = S_2^2$	1,3439	2,1009	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2$
Rys. 3.4: I-II	1,32	3,49	$S_1^2 = S_2^2$	-9,0109	2,1315	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.4: II-III	1,69	4,68	$S_1^2 = S_2^2$	4,5634	2,1098	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.4: III-IV	1,42	6,26	$S_1^2 = S_2^2$	-3,5149	2,2622	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.4: II-IV	1,98	5,91	$S_1^2 = S_2^2$	-0,0125	2,1199	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2$
Rys. 3.5: II-III	3,11	4,70	$S_1^2 = S_2^2$	-1,4360	2,1199	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2$
Rys. 3.5: III-IV	2,31	3,97	$S_1^2 = S_2^2$	-3,5693	2,5706	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.6: I-II	3,88	9,55	$S_1^2 = S_2^2$	-0,9085	2,5703	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2$

1	2	3	4	5	6	7
Numer rysunku	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna $F_{(\alpha; n_1-1, n_2-1)}$	Wniosek	Wartość statystyki t	Wartość krytyczna $t_{(\alpha; n_1 + n_2 - 2)}$	Wniosek
Rys. 3.6: II-III	1,65	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	-6,9840	2,4469	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.6: III-IV	2,42	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	0,2950	2,4469	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2$
Oznaczenia sposobów przygotowania powierzchni: I – bez przygotowania powierzchni, II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.						

Tabela 3.9. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań wytrzymałości z wykorzystaniem modelu statystycznego Cochran-Coxa; $\alpha = 0,05$

1	2	3	4	5	6	7
Numer rysunku	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna $F_{(\alpha; n_1-1, n_2-1)}$	Wniosek	Wartość statystyki C	Wartość krytyczna $C_{(\alpha; n_1; n_2)}$	Wniosek
Rys. 3.3: II-III	5,21	3,79	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	-4,0617	2,3645	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.3: II-IV	5,89	3,01	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	-3,3579	2,3001	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.4: II-IV	7,18	3,60	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	-4,8038	2,2293	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Oznaczenia sposobów przygotowania powierzchni: I – bez przygotowania powierzchni, II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.						

Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej rezultatów badań wytrzymałości połączeń klejowych jednorodnych można ująć, że w niektórych przypadkach jest brak statystycznie istotnych podstaw do odrzucenia hipotezy o równości średnich. Oznacza to, że zastosowanie różnych sposobów przygotowania powierzchni pozwala na otrzymanie takiej samej wartości wytrzymałości średniej. Należy nadmienić, iż wspomniana sytuacja występuje najczęściej podczas porównywania wariantu obróbki powierzchni III i IV. Ponadto jest zauważalny brak statystycznie istotnych różnic w średnich wartościach wytrzymałości po oczyszczeniu chemicznym oraz obróbce mechanicznej połączonej z oczyszczaniem chemicznym.

Wyniki testowania hipotezy o równości wariancji oraz wartości średnich dla dwóch zbiorów wyników w przypadku wariantów połączeń klejowych hybrydowych (rys. 3.7 – 3.10) przedstawiono w tabelach 3.10 – 3.16.

Tabela 3.10. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań wytrzymałości (rys. 3.7), z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta; $\alpha = 0,05$

1	2	3	4	5	6	7
Numer rysunku	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna $F_{(\alpha; n_1-1, n_2-1)}$	Wniosek	Wartość statystyki t	Wartość krytyczna $t_{(\alpha; n+n_2-2)}$	Wniosek
Rys. 3.7: A/B: II-III	1,37	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	-6,7198	1,9432	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.7: A/B: III-IV	1,65	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	3,7748	1,9432	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.7: A/B: II-IV	1,24	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	-1,1615	1,9432	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2$
Rys. 3.7: B II – A/B II	7,20	8,89	$S_1^2 = S_2^2$	-5,8539	1,8125	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.7: B III-A/B III	1,10	8,89	$S_1^2 = S_2^2$	-17,5479	1,8125	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.7: A IV-A/B IV	5,98	8,89	$S_1^2 = S_2^2$	12,7526	1,8125	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.7: B IV-A/B IV	1,29	8,76	$S_1^2 = S_2^2$	-7,9319	1,7613	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Oznaczenia połączeń: A/B – połączenie hybrydowe 7075/CP3, A – połączenie jednorodne 7075, B – połączenie jednorodne CP3. Oznaczenia sposobów przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.						

Tabela 3.11. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań wytrzymałościowych (rys. 3.7), z wykorzystaniem modelu statystycznego Cochran-Coxa; $\alpha = 0,05$

1	2	3	4	5	6	7
Numer rysunku	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna $F_{(\alpha; n_1-1, n_2-1)}$	Wniosek	Wartość statystyki C	Wartość krytyczna $C_{(\alpha; n_1; n_2)}$	Wniosek
Rys. 3.7: A II-A/B II	10,72	8,79	$S_1^2 > S_2^2$	3,7506	1,9353	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.7: A III-A/B III	11,32	9,01	$S_1^2 > S_2^2$	5,2042	2,6108	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Oznaczenia połączeń: A/B – połączenie hybrydowe 7075/CP3, B – połączenie jednorodne CP3. Oznaczenia sposobów przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna.						

Tabela 3.12. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań wytrzymałościowych (rys. 3.8), z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta; $\alpha = 0,05$

1	2	3	4	5	6	7
Numer rysunku	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna $F_{(\alpha; n_1-1, n_2-1)}$	Wniosek	Wartość statystyki t	Wartość krytyczna $t_{(\alpha; n+n_2-2)}$	Wniosek
Rys. 3.8: C/D: II-III	1,13	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	-0,7475	2,0150	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2$
Rys. 3.8: C/D: II-IV	2,58	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	-4,4640	1,9432	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.8: D II-C/D II	1,97	9,55	$S_1^2 = S_2^2$	-5,9644	2,150	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.8: C II-C/D II	2,40	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	1,9125	1,8945	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.8: D III-C/D III	1,20	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	-0,2125	2,1318	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2$
Rys. 3.8: C III-C/D III	1,50	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	6,0419	2,0150	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.8: D IV-C/D IV	1,72	9,55	$S_1^2 = S_2^2$	-2,3850	2,0150	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.8: C IV-C/D IV	3,95	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	12,4610	1,9432	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Oznaczenia połączeń: C/D – połączenie hybrydowe kompozyt/2024, C – połączenie jednorodne kompozytu, D – połączenie jednorodne 2024. Oznaczenia sposobów przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.						

Tabela 3.13. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań wytrzymałościowych (rys. 3.8), z wykorzystaniem modelu statystycznego Cochran-Coxa; $\alpha = 0,05$

1	2	3	4	5	6	7
Numer rysunku	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna F_α	Wniosek	Wartość statystyki C	Wartość krytyczna $c_{(\alpha; n_1; n_2)}$	Wniosek
Rys. 3.8: C/D: III-IV	10,27	9,55	$S_1^2 > S_2^2$	-0,9614	4,3027	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2$
Oznaczenia połączeń: C/D – połączenie hybrydowe kompozyt/2024. Oznaczenia sposobów przygotowania powierzchni: III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie mechaniczne.						

Tabela 3.14. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań wytrzymałościowych (rys. 3.9), z wykorzystaniem modelu statystycznego *t*-Studenta; $\alpha = 0,05$

1	2	3	4	5	6	7
Numer rysunku	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna $F_{(\alpha; n_1-1, n_2-1)}$	Wniosek	Wartość statystyki t	Wartość krytyczna $t_{(\alpha; n+n_2-2)}$	Wniosek
Rys. 3.9: C/A: II-III	3,41	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	-2,0334	1,9432	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.9: C/A: III-IV	1,94	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	-1,0723	1,9432	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2$
Rys. 3.9: A II-C/A II	1,38	8,89	$S_1^2 = S_2^2$	-2,7898	1,8125	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.9: C II-C/A II	2,44	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	3,3633	1,9432	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.9: A III-C/A III	1,05	8,89	$S_1^2 = S_2^2$	-7,9990	1,8125	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.9: A IV-C/A IV	2,09	8,76	$S_1^2 = S_2^2$	-14,2469	1,7613	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Oznaczenia połączeń: C/A – połączenie hybrydowe kompozyt/7075, C – połączenie jednorodne kompozytu, A – połączenie jednorodne 7075. Oznaczenia sposobów przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.						

Tabela 3.15. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań wytrzymałościowych (rys. 3.9), z wykorzystaniem modelu statystycznego Cochran-Coxa; $\alpha = 0,05$

1	2	3	4	5	6	7
Numer rysunku	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna F_α	Wniosek	Wartość statystyki C	Wartość krytyczna $C_{(\alpha; n_1; n_2)}$	Wniosek
Rys. 3.9: C III-C/A III	12,85	9,28	$S_1^2 > S_2^2$	11,8125	3,1824	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.9: C IV-C/A IV	10,16	9,28	$S_1^2 > S_2^2$	17,8286	3,1824	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Oznaczenia połączeń: C/A – połączenie hybrydowe kompozyt/7075, C – połączenie jednorodne kompozytu. Oznaczenia sposobów przygotowania powierzchni: III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.						

Tabela 3.16. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań wytrzymałości (rys. 3.10), z wykorzystaniem modelu statystycznego *t*-Studenta; $\alpha = 0,05$

1	2	3	4	5	6	7
Numer rysunku	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna $F_{(\alpha; n_1-1, n_2-1)}$	Wniosek	Wartość statystyki t	Wartość krytyczna $t_{(\alpha; n+n_2-2)}$	Wniosek
Rys. 3.10: C/E II-III	2,65	9,55	$S_1^2 = S_2^2$	-4,6131	2,0150	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.10: C/E III-IV	1,58	9,55	$S_1^2 = S_2^2$	-6,1880	2,0150	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.10: E II-C/E II	1,52	19,4	$S_1^2 = S_2^2$	6,9863	1,7613	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.10: C II-C/E II	1,55	19,2	$S_1^2 = S_2^2$	1,7573	2,0150	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2$
Rys. 3.10: E III-C/E III	5,85	9,01	$S_1^2 = S_2^2$	1,4104	1,8595	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2$
Rys. 3.10: C III-C/E III	2,23	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	5,5280	1,9432	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$
Rys. 3.10: C IV-C/E IV	2,39	9,12	$S_1^2 = S_2^2$	0,9393	1,9432	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2$
Rys. 3.10: C IV-C/E IV	1,53	9,12	$S_1^2 = S_2^2$	-0,8079	2,0150	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2$
Oznaczenia połączeń: C/E – połączenie hybrydowe kompozyt/CP1, C – połączenie jednorodnego kompozytu, D – połączenie jednorodnego CP1. Oznaczenia sposobów przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.						

Kolumny 2, 3 oraz 4 przedstawione w tabelach 3.8 – 3.16, dotyczą testowania hipotezy o równości wariancji i zakończone są wnioskiem o braku podstaw do odrzucenia hipotezy $S_1^2 = S_2^2$ lub też wnioskiem o odrzucenie tej hipotezy. Kolumny 5, 6 oraz 7 dotyczą testowania hipotezy o równości średnich; stwierdzenie oznacza brak podstaw do odrzucenia hipotezy o ich równości.

Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej wyników badań wytrzymałości można przyjąć, iż w niektórych przypadkach jest brak statystycznie istotnych różnic w uzyskanych wartościach wytrzymałości połączeń klejowych po zastosowaniu różnych sposobów przygotowania powierzchni. Należy nadmienić, że najczęściej występuje brak statystycznie istotnych różnic średniej wartości wytrzymałości połączeń klejowych podczas porównywania średnich pomiędzy połączeniami w układach hybrydowych a połączeniami jednakowych materiałów

w odniesieniu do dwóch wariantów przygotowania powierzchni: oczyszczania chemicznego (wariant II) oraz obróbki mechanicznej (wariant III). Z analizy układów hybrydowych wynika, że najczęściej przypadków braku statystycznie istotnych różnic wartości średnich wytrzymałości połączeń klejowych, po różnych sposobach przygotowania powierzchni, występuje przy połączeniach blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 i kompozytu epoksydowo-szklanego (7).

3.5. Wnioski i ustalenia

Na podstawie wyników badań wytrzymałości połączeń klejowych jednakowych oraz różnych materiałów konstrukcyjnych można przyjąć, że sposób przygotowania powierzchni wpływa istotnie na wytrzymałość rozpatrywanych połączeń. Zastosowanie tego samego sposobu przygotowania powierzchni różnych materiałów konstrukcyjnych pozwala na osiągnięcie różnych wartości wytrzymałości.

Z badań wynika, że podczas łączenia materiałów konstrukcyjnych największą wytrzymałość, w wielu przypadkach, otrzymano po zastosowaniu obróbki mechanicznej lub tej obróbki połączonej z oczyszczaniem chemicznym. Analiza statystyczna wyników badań wytrzymałości połączeń klejowych jednakowych materiałów wykazała, że w niektórych przypadkach, dla wspomnianych sposobów przygotowania powierzchni, jest brak statystycznie istotnych różnic w otrzymanych średnich wartościach wytrzymałości. Można przyjąć, że zastosowanie oczyszczania chemicznego po obróbce mechanicznej nie wpływa znacząco na wzrost wytrzymałości.

W niektórych połączeniach (np. blach tytanowych CP1), wykorzystanie tylko operacji oczyszczania chemicznego także pozwala na uzyskanie relatywnie dużej wytrzymałości. Ponadto porównanie zastosowania oczyszczania chemicznego oraz obróbki mechanicznej wraz z oczyszczaniem chemicznym wykazało w niektórych przypadkach brak różnic statystycznie istotnych. Zauważono także, że zastosowanie obróbki mechanicznej powoduje otrzymanie połączeń o znacznej wytrzymałości (np. połączeń klejowych jednorodnych kompozytu, blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0).

Przedstawiony aspekt badań dotyczył wpływu sposobu przygotowania powierzchni do klejenia na wytrzymałość połączeń klejowych, jednak wydaje się, że nie należy pominąć także innego czynnika technologicznego, jakim jest rodzaj kleju. Ze względów porównawczych zastosowano jeden rodzaj kleju, który jest odpowiedni do klejenia wszystkich badanych materiałów. W niektórych przypadkach połączeń mógł wystąpić efekt synergiczny: sposobu przygotowania powierzchni i rodzaju kleju, który wpłynął na otrzymane rezultaty. Można sądzić, iż występują lepsze oddziaływania między klejem a blachą tytanową niż blachą ze stopu aluminium. Jednak wymaga to dalszych badań dotyczących tego zagadnienia.

Fakt coraz liczniejszego wykorzystywania jednej z zalet klejenia, a mianowicie możliwości łączenia różnorodnych materiałów konstrukcyjnych o odmiennych właściwościach fizycznych (często o znacznych różnicach geometrycznych – np. grubości łączonych elementów), przyczynia się do wzrostu zainteresowania tym zagadnieniem. Z tego też względu można przyjąć, że występuje potrzeba badania wpływu sposobu przygotowania powierzchni różnych materiałów konstrukcyjnych na wytrzymałość ich połączeń klejowych.

Połączenia klejowe hybrydowe kompozytu polimerowego i blach ze stopu aluminium charakteryzują się większą wytrzymałością niż połączenia klejowe jednorodne tych materiałów. Natomiast połączenia klejowe hybrydowe, w skład których wchodzi blacha tytanowa, wykazują mniejszą wytrzymałość niż jednorodne połączenia klejowe blach tytanowych, niezależnie od sposobu przygotowania powierzchni do klejenia.

Stąd też można przyjąć, że istnieją dwa aspekty wytrzymałości połączeń klejowych hybrydowych. W przypadku materiałów, których połączenia klejowe wykazują mniejszą wytrzymałość w porównaniu z połączeniami innych materiałów jest korzystne łączenie tego pierwszego materiału z innym, ponieważ zachodzi możliwość uzyskania dzięki temu większej wytrzymałości. Jeżeli natomiast materiał (którego połączenia klejowe jednorodne wykazują większą wytrzymałość) zostanie połączony z materiałem o mniejszej wytrzymałości wykonanych z niego połączeń jednorodnych, to powstałe z tych materiałów połączenie klejowe będzie wykazywało mniejszą wytrzymałość.

Otrzymane rezultaty można tłumaczyć zarówno odmiennymi właściwościami fizycznymi łączonych materiałów, jak również innym rozkładem naprężenia w połączeniach klejowych hybrydowych w porównaniu z połączeniami klejowymi jednorodnymi oraz innym przebiegiem zachowania się połączenia podczas niszczenia, uzależnionego m.in. od charakterystyki niszczenia, właściwości fizycznych łączonych materiałów i innych cech. W celu potwierdzenia tego zostanie przeprowadzona analiza numeryczna niektórych aspektów rozpatrywanych połączeń klejowych za pomocą metody elementów skończonych.

Rozdział 4.

Wpływ swobodnej energii powierzchniowej na wytrzymałość połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych

4.1. Połączenia jednorodne

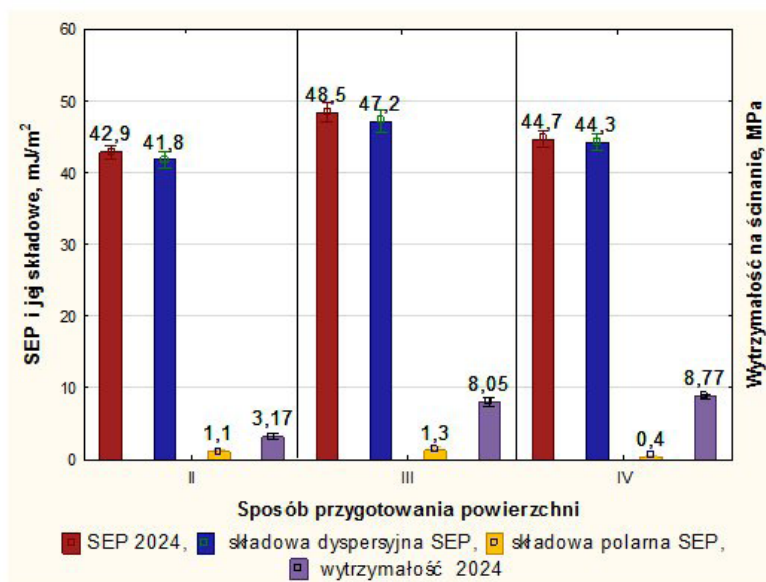
Badania wpływu właściwości adhezyjnych na wytrzymałość połączeń klejowych zostały wykonane dwuetapowo, uwzględniając przyjęte sposoby przygotowania powierzchni. W pierwszym etapie badano połączenia zakładkowe, w drugim – połączenia doczołowe. Połączenia doczołowe wykorzystano w celu weryfikacji przeprowadzonej analizy porównawczej właściwości adhezyjnych i wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych jednozakładkowych. W połączeniach doczołowych poddanych odrywaniu, zjawisko adhezji ma większy wpływ na wytrzymałość niż w połączeniach jednozakładkowych obciążonych na ścinanie. Jednak w tego rodzaju połączeniach nie zawsze można w pełni poprawnie ocenić właściwości adhezyjne powierzchni łączonych materiałów z wielu względów, m.in. z uwagi na rozmiary i kształt łączonych elementów, a także trudności z wykonaniem wielu stosowanych obróbek powierzchniowych.

Do przedstawionej analizy porównawczej wykorzystano swobodną energię powierzchniową γ_s oraz jej części składowe: dyspersyjną γ_s^d oraz polarną γ_s^p . Dokonano także oceny związku pomiędzy wartościami swobodnej energii powierzchniowej, a w niektórych przypadkach jej składowymi, a wytrzymałością na ścinanie połączeń klejowych jednorodnych i hybrydowych, wyrażoną poprzez współczynnik korelacji.

4.1.1. Połączenia zakładkowe

Zestawienie wyników wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych jednorodnych oraz wartości γ_s i jej składowych odniesionych do powierzchni blach ze stopu aluminium 2024 zamieszczono na rys. 4.1. Z porównania wyników badań wynika, że najwyższą wartość swobodnej energii powierzchniowej ($48,5 \text{ mJ/m}^2$) otrzymano dla próbek, których powierzchnie przygotowano za pomocą obróbki mechanicznej. Dla tego przypadku otrzymano także największą wartość γ_s^d oraz γ_s^p . Zauważono

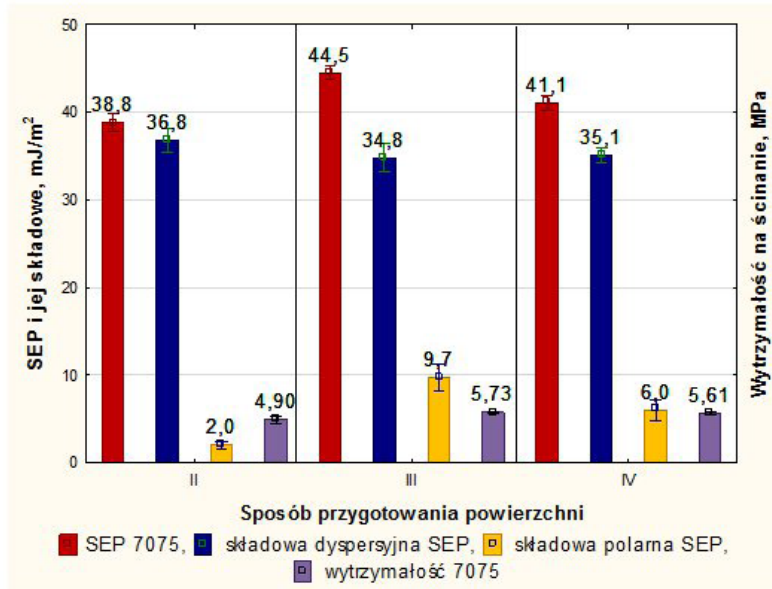
zależność zarówno pomiędzy SEP, jak i jej składową dyspersyjną. Współczynnik korelacji pomiędzy swobodną energią powierzchniową i wytrzymałością na ścinanie wynosi 0,66; a pomiędzy γ_S^d i wytrzymałością na ścinanie 0,77.



Rys. 4.1. Swobodna energia powierzchniowa i jej składowe oraz wytrzymałość na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-2024 PLT3; $g = 0,64$ mm po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne

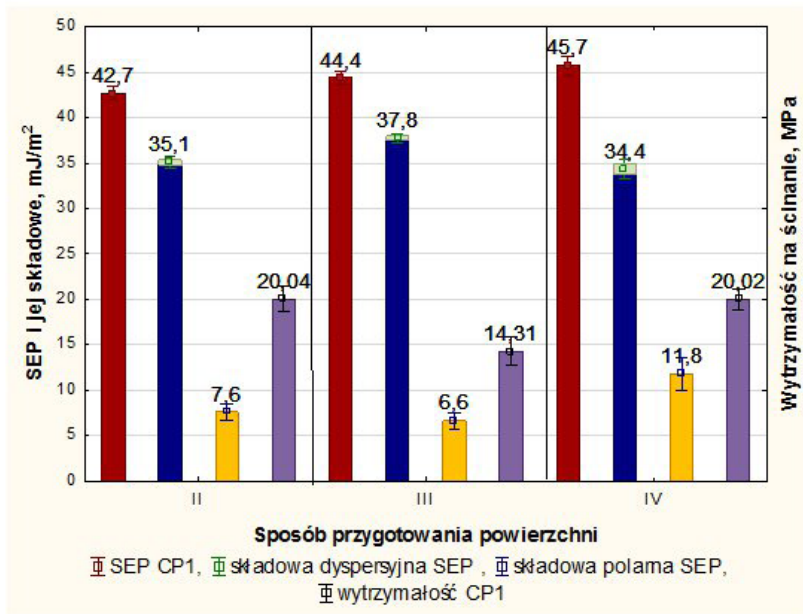
Po obróbce mechanicznej i oczyszczaniu chemicznym (wariant IV) otrzymano największą wytrzymałość połączeń oraz największy udział γ_S^d w ogólnej wartości SEP.

Na rys. 4.2 zaprezentowano wyniki badań wytrzymałości jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 oraz wartości swobodnej energii powierzchniowej, uzyskane po różnych sposobach przygotowania powierzchni. Zaobserwowano zależność pomiędzy γ_S oraz γ_S^d a wytrzymałością połączeń. Wraz ze wzrostem wartości SEP oraz γ_S^d (przy jednoczesnym zmniejszaniu się udziału γ_S^d w wartości γ_S) powiększa się także wytrzymałość, przy czym największe wymienione wartości uzyskały połączenia blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0, których powierzchnię poddano obróbce mechanicznej. Współczynnik korelacji w tym przypadku odniesiony do γ_S oraz R_t wynosi 0,88; natomiast do γ_S^d , jak również do R_t równa się – 0,94. Różnice składowej dyspersyjnej w odniesieniu do najmniejszej wartości wynoszą: 3,5% oraz 8% i odpowiednio dla wytrzymałości: 14% oraz 7%, co może obrazować wpływ poszczególnych sposobów przygotowania powierzchni na badane wartości.



Rys. 4.2. Swobodna energia powierzchniowa i jej składowe oraz wytrzymałość na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0; $g = 0,80$ mm po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne

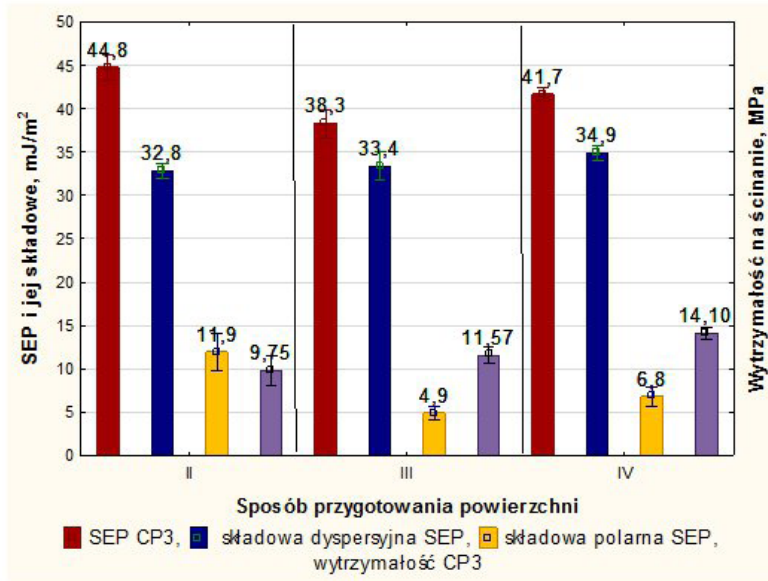
Wartości swobodnej energii powierzchniowej i składowe swobodnej energii powierzchniowej, jak również wytrzymałość na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach tytanowych CP1, uzyskane po zastosowaniu wybranych sposobów przygotowania powierzchni przedstawiono na rys. 4.3. Największą wartość SEP ($45,7$ mJ/m²) otrzymano po zastosowaniu obróbki mechanicznej i oczyszczania chemicznego, przy czym połączenia te charakteryzowały się jedną z największych wartości wytrzymałości ($20,02$ MPa). W tym przypadku γ_s^p stanowi 24% wartości SEP. Dla rozpatrywanych materiałów najmniejszej wartości wytrzymałości odpowiada największa wartość składowej dyspersyjnej SEP ($37,8$ mJ/m²) oraz najmniejsza wartość składowej polarnej SEP ($6,6$ mJ/m²).



Rys. 4.3. Swobodna energia powierzchniowa i jej składowe oraz wytrzymałość na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach tytanowych CP1; $g = 0,40$ mm po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne

Współczynnik korelacji w przypadku tego układu jednorodnego pomiędzy wytrzymałością a składową dyspersyjną swobodnej energii powierzchniowej jest ujemny i wynosi $-0,98$.

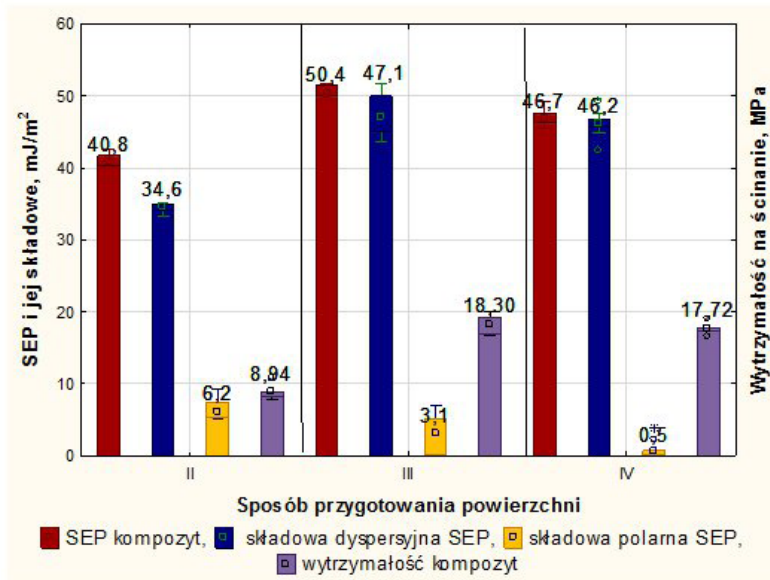
Porównanie wytrzymałości na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach tytanowych CP3 oraz wartości swobodnej energii powierzchniowej i jej składowych powierzchni tego materiału zamieszczono na rys. 4.4. Największą wartość swobodnej energii powierzchniowej otrzymano w przypadku powierzchni poddanej operacji oczyszczania chemicznego ($44,8$ mJ/m²), najmniejszą zaś po obróbce mechanicznej ($38,3$ mJ/m²). Zauważono, że wraz ze wzrostem wartości γ_S^d powiększa się także wytrzymałość. Współczynnik korelacji pomiędzy częścią dyspersyjną SEP a wytrzymałością połączeń CP3, po zastosowanych sposobach przygotowania powierzchni wyniósł $0,99$. Brak jest natomiast zależności pomiędzy γ_S oraz γ_S^p , a wytrzymałością dla tego rodzaju materiału.



Rys. 4.4. Swobodna energia powierzchniowa i jej składowe oraz wytrzymałość na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach tytanowych CP3; $g = 0,80$ mm po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne

W przypadku połączeń klejowych o największej wytrzymałości na ścinanie (14,10 MPa), udział procentowy składowych SEP wynosi: 84% – γ_S^d i 16% – γ_S^p .

Porównanie wyników wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych jednorodnych kompozytu epoksydowo-szklanego oraz wartości swobodnej energii powierzchniowej, uzyskanych po wybranych sposobach przygotowania powierzchni, zamieszczono na rys. 4.5. Można zauważyć, iż wraz ze wzrostem wartości γ_S^d zwiększa się także wytrzymałość połączeń. Współczynnik korelacji pomiędzy tymi wielkościami wynosi 0,93. Podobna zależność występuje pomiędzy swobodną energią powierzchniową a wytrzymałością połączeń: większej wartości SEP odpowiada większa wytrzymałość.



Rys. 4.5. Swobodna energia powierzchniowa i jej składowe oraz wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych jednorodnych kompozytu epoksydowo-szklanego (7); $g = 2,10 \text{ mm}$ po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne

Przedstawione wyniki badań wskazują, że najbardziej miarodajną wielkością pozwalającą określić zależność pomiędzy właściwościami adhezyjnymi a wytrzymałością połączeń jest składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej. Jednakże zależność ta nie jest jednoznaczna we wszystkich analizowanych przypadkach, ponieważ w niektórych zauważono zależność odwrotną. Z tego względu zostały przeprowadzone dodatkowe badania porównawcze połączeń klejowych z zastosowaniem połączeń doczołowych.

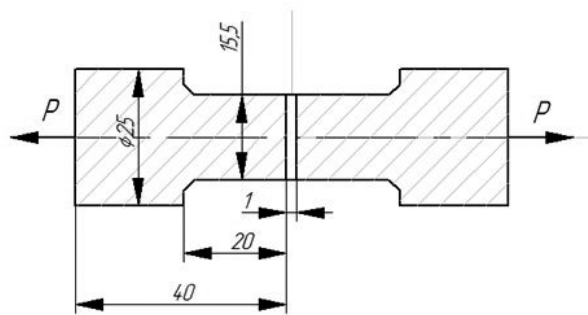
4.1.2. Połączenia doczołowe

Badania połączeń doczołowych (rys. 4.6) mają na celu potwierdzenia zależności wytrzymałości badanych połączeń adhezyjnych od składowej dyspersyjnej swobodnej energii powierzchniowej.

Badania przeprowadzono dla następujących sposobów przygotowania powierzchni:

- 1) natłuszczenie olejem i wytarcie do sucha,
- 2) oczyszczanie chemiczne,

- 3) obróbka mechaniczna ściernym narzędziem nasypowym P120 i oczyszczanie chemiczne,
- 4) obróbka mechaniczna ściernym narzędziem nasypowym P320 i oczyszczanie chemiczne,
- 5) obróbka mechaniczna ściernym narzędziem nasypowym P500 i oczyszczanie chemiczne.



Rys. 4.6. Schemat i rozmiary połączenia klejowego doczołowego: P – siła przedstawiająca sposób i kierunek obciążenia połączenia

Obróbka mechaniczna została przeprowadzona za pomocą ściernych narzędzi nasypowych o różnej ziarnistości (w postaci papierów ściernych), a oczyszczanie chemiczne za pomocą środka odtłuszczającego Loctite 7063, opisanego w rozdziale 2. Połączenia wykonano za pomocą dwóch rodzajów klejów epoksydowych dwuskładnikowych: Loctite 3430 i Loctite 9466.

Porównanie wartości swobodnej energii powierzchniowej i jej składowych z wytrzymałością połączeń, wykonanych za pomocą wymienionych klejów epoksydowych, przedstawiono w tabeli 4.1 oraz 4.2.

Tabela 4.1. Swobodna energia powierzchniowa i jej składowe oraz wytrzymałość na odrywanie połączeń klejowych doczołowych, wykonanych za pomocą kleju Loctite 3430

Lp.	Sposób przygotowania powierzchni	Swobodna energia powierzchniowa γ_s , mJ/m^2			Wytrzymałość na odrywanie, MPa
		γ_s	γ_s^d	γ_s^p	
1	Natłuszczenie olejem i wytarcie do sucha	47,9	35,1	12,8	5,37
2	Oczyszczanie chemiczne	45,7	35,9	9,8	5,83
3	Obróbka mechaniczna P320 i oczyszczanie chemiczne	47,4	36,7	10,8	6,84

Lp.	Sposób przygotowania powierzchni	Swobodna energia powierzchniowa γ_s , mJ/m ²			Wytrzymałość na odrywanie, MPa
		γ_s	γ_s^d	γ_s^p	
4	Obróbka mechaniczna P500 i oczyszczanie chemiczne	41,5	37,5	4,0	11,13
5	Obróbka mechaniczna P120 i oczyszczanie chemiczne	45,5	39,5	6,0	13,14

Tabela 4.2. Swobodna energia powierzchniowa i jej składowe oraz wytrzymałość na odrywanie połączeń klejowych doczołowych, wykonanych za pomocą kleju Loctite 9466

Lp.	Sposób przygotowania powierzchni	Swobodna energia powierzchniowa γ_s , mJ/m ²			Wytrzymałość na odrywanie, MPa
		γ_s	γ_s^d	γ_s^p	
1	Natłuszczenie olejem i wytarcie do sucha	47,9	35,1	12,8	9,70
2	Oczyszczanie chemiczne	45,7	35,9	9,8	14,94
3	Obróbka mechaniczna P320 i oczyszczanie chemiczne	47,4	36,7	10,8	15,53
4	Obróbka mechaniczna P500 i oczyszczanie chemiczne	41,5	37,5	4,0	12,56
5	Obróbka mechaniczna P120 i oczyszczanie chemiczne	45,5	39,5	6,0	16,43

Z analizy wyników badań zamieszczonych w tabeli 4.1 wynika, iż istnieje zależność pomiędzy wartością γ_s^d a wytrzymałością na odrywanie połączeń doczołowych wykonanych za pomocą kleju Loctite 3430. Współczynnik korelacji w tym przypadku wynosi 0,95.

Na podstawie wyników badań zamieszczonych w tabeli 4.2, określono, że pomiędzy γ_s^d a wytrzymałością na odrywanie połączeń próbek doczołowych istnieje pewna zależność. Współczynnik korelacji wynosi 0,65. Nie stwierdzono natomiast korelacji pomiędzy γ_s oraz γ_s^p a wytrzymałością na odrywanie.

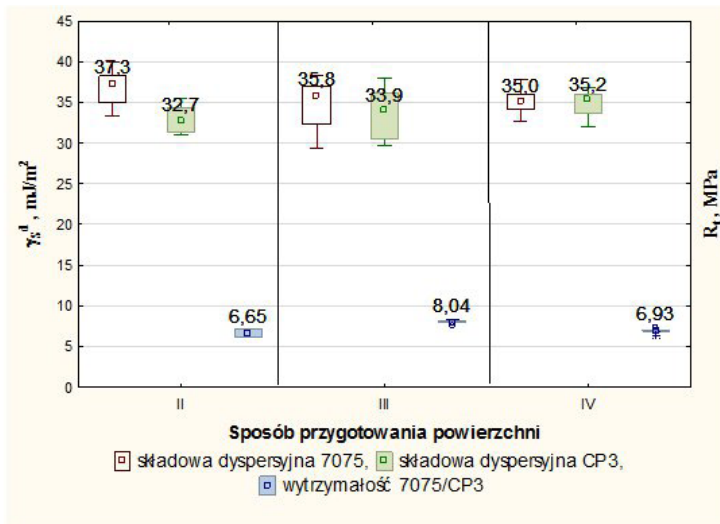
Badania przeprowadzone z wykorzystaniem próbek czołowych potwierdziły występującą zależność pomiędzy składową dyspersyjną SEP a wytrzymałością tych połączeń. Większej wartości składowej dyspersyjnej odpowiada także większa wytrzymałość na odrywanie.

4.2. Połączenia hybrydowe

Ocenę właściwości adhezyjnych w odniesieniu do wytrzymałości połączeń klejowych hybrydowych przeprowadzono uwzględniając wyniki badań zamieszczone w punkcie 4.1. Z tego względu w rozważaniach tych uwzględniono składową dyspersyjną SEP. Analizę wartości γ_s^d oraz wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych hybrydowych (R_t) wykonano na podstawie wyników badań zamieszczonych w rozdziale 2. oraz 3. Przedmiotem analiz są następujące połączenia hybrydowe: stop aluminium – tytan, kompozyt polimerowy – stop aluminium, kompozyt polimerowy – tytan.

4.2.1. Stop aluminium – tytan

Wyniki badań wartości γ_s^d powierzchni blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 i blach tytanowych oraz wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych hybrydowych tych materiałów przedstawiono na rys. 4.7. W rozpatrywanym układzie hybrydowym, większe wartości γ_s^d uzyskano dla powierzchni blach tytanowych. Zauważono nieznaczną tendencję wzrostu wytrzymałości wraz z powiększaniem się składowej dyspersyjnej SEP blach CP3 a wytrzymałością układu hybrydowego. Współczynnik korelacji ma wartość 0,17.

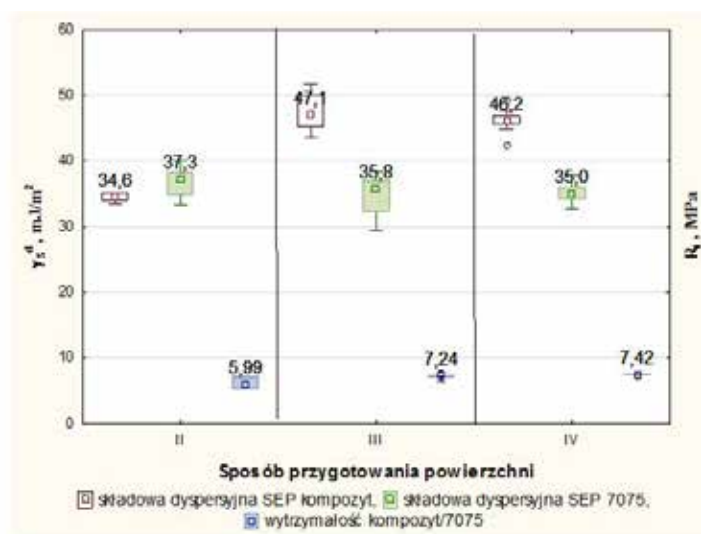


Rys. 4.7. Składowa dyspersyjna SEP oraz wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych hybrydowych 7075/CP3 po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – czyszczenie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i czyszczenie chemiczne

Wytrzymałość jednorodnych połączeń klejowych blach tytanowych CP3 jest większa od wytrzymałości jednorodnych połączeń blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0. Tak więc można przyjąć, że podczas analizy właściwości adhezyjnych i wytrzymałości połączeń klejowych należy uwzględnić γ_s^d materiału, który charakteryzuje się większą wartością składowej dyspersyjnej SEP.

4.2.2. Kompozyt polimerowy – stop aluminium

Zestawienie wyników składowej dyspersyjnej swobodnej energii powierzchniowej powierzchni kompozytu epoksydowo-szklanego (7) i blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 oraz wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/2024 zamieszczono na rys. 4.8.

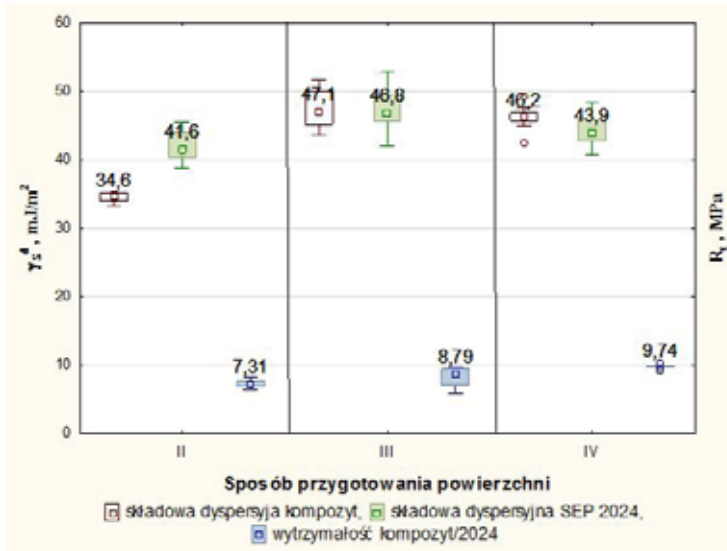


Rys. 4.8. Składowa dyspersyjna SEP oraz wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/2024 po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne

Zaprezentowane wyniki badań wskazują, że w dwóch na trzy warianty przygotowania powierzchni większe wartości γ_s^d otrzymano w przypadku kompozytu. Po operacji oczyszczania chemicznego większą wartość γ_s^d uzyskały powierzchnie blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3.

Współczynnik korelacji pomiędzy R_t połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/2024 a γ_s^d kompozytu wynosi 0,89; natomiast pomiędzy wytrzymałością a γ_s^d stopu aluminium EN WA-2024PLT3 – 0,55.

Wyniki badań składowej dyspersyjnej swobodnej energii powierzchniowej powierzchni kompozytu epoksydowo-szklanego (7) i blach ze stopu aluminium EN AW -7075PLT0 oraz wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/7075 zamieszczono na rys. 4.9.



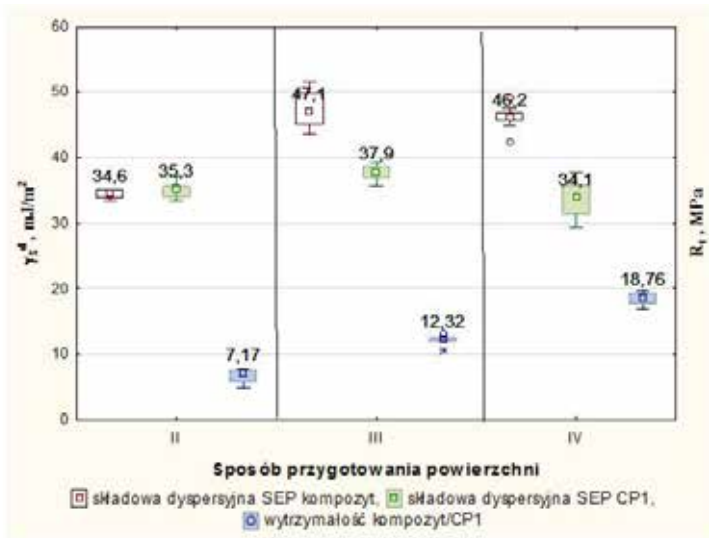
Rys. 4.9. Składowa dyspersyjna SEP oraz wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/7075 po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne

Wyniki badań wskazują na lepsze właściwości adhezyjne powierzchni kompozytu epoksydowo-szklanego (7) niż blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 po operacji obróbki mechanicznej oraz obróbki tej, po której nastąpiło oczyszczanie chemiczne. Jedynie w przypadku oczyszczania chemicznego wartość γ_s^d powierzchni blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 jest większa. Taka sytuacja zaistniała także przy rozpatrywaniu połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/2024.

W przypadku tego układu materiału zaobserwowano wzrost wytrzymałości wraz ze wzrostem wartości γ_s^d kompozytu, a współczynnik korelacji wyniósł 0,98. Natomiast rozpatrując kolejny materiał tworzący układ hybrydowy, zauważa się tendencję odwrotną – zwiększaniu się wytrzymałości połączenia towarzyszy zmniejszanie się wartości składowej dyspersyjnej γ_s blachy ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0.

4.2.3. Kompozyt polimerowy-tytan

Wartości γ_s^d swobodnej energii powierzchniowej kompozytu epoksydowo-szklanego (7) i blach tytanowych CP1 oraz wytrzymałość na ścinanie połączeń hybrydowych kompozyt/CP1 zaprezentowano na rys. 4.10. Można zauważyć, że większe wartości γ_s^d uzyskały powierzchnie kompozytu polimerowego. Występuje również zależność pomiędzy wartościami γ_s^d tego materiału, a wytrzymałością połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/CP1. Współczynnik korelacji pomiędzy tymi wielkościami wynosi 0,81. Zatem wraz ze wzrostem wartości γ_s^d kompozytu powiększa się także wytrzymałość połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/CP1.



Rys. 4.10. Składowa dyspersyjna SEP oraz wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/CP1 po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne

W zależności od przyjętego sposobu przygotowania powierzchni jest zauważalna różna intensywność zwiększania się wartości γ_s^d oraz wytrzymałości połączeń hybrydowych kompozyt/CP1. Zaobserwowano, że w przypadku małych różnic wartości γ_s^d materiałów tworzących układ hybrydowy uzyskuje się mniejszą wytrzymałość, niż w przypadku znacznych różnic pomiędzy wartością γ_s^d obu materiałów.

4.3. Wnioski i ustalenia

Przedstawione badania i ich analiza pozwalają na ustalenie, że najbardziej miarodajną wielkością, pozwalającą określić zależność pomiędzy właściwościami adhezyjnymi a wytrzymałością połączeń jednorodnych, jest składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej. Większej wartości wytrzymałości odpowiada większa wartość składowej dyspersyjnej, przy czym zauważono, że wpływ sposobu przygotowania powierzchni determinuje zarówno wytrzymałość układów jednorodnych, jak i wartość γ_S^d .

Na podstawie analizy zależności pomiędzy γ_S^d i wytrzymałością połączeń klejowych jednorodnych ustalono, że nie we wszystkich wariantach połączeń relacja ta była w pełni jednoznaczna. W większości przypadków wraz ze wzrostem γ_S^d powiększa się także wytrzymałość, ale dla niektórych połączeń zauważono jednak zależność odwrotną. Z tego też względu przeprowadzono badania z wykorzystaniem połączeń doczołowych, które potwierdziły występującą zależność pomiędzy γ_S^d a wytrzymałością połączeń.

Wpływ właściwości adhezyjnych na wytrzymałość na ścinanie połączeń hybrydowych rozważano uwzględniając tylko zmiany γ_S^d i wytrzymałości w aspekcie wybranych sposobów przygotowania powierzchni. Ustalono, że w większości przypadków połączeń hybrydowych występuje zwiększenie wytrzymałości połączeń wraz z powiększaniem się wartości γ_S^d , najczęściej materiału o większej wartości γ_S^d , tworzącego połączenie hybrydowe. Współczynnik korelacji pomiędzy wartościami γ_S^d a R_t wynosi od 0,81 do 0,98. Stąd też można wnioskować, że wartość γ_S^d może stanowić wskaźnik właściwości adhezyjnych, pozwalający na przewidywanie trendu w uzyskiwaniu wytrzymałości połączeń klejowych.

Występują również pewne prawidłowości związane z zastosowanymi sposobami przygotowania powierzchni. W większości przypadków zachodzi pozytywny wpływ ponownego oczyszczenia chemicznego po obróbce mechanicznej, na wartość γ_S^d oraz na wytrzymałość połączeń klejowych jednorodnych i hybrydowych. Jednak w innych, zwłaszcza po obróbce mechanicznej bez oczyszczenia chemicznego, obserwuje się zwiększenie lub zmniejszenie wytrzymałości połączeń jednorodnych i hybrydowych różnych materiałów. Dlatego też stosując tylko obróbkę mechaniczną należy zwrócić uwagę na możliwość uzyskania dużych rozrzutów rezultatów badań.

Rozdział 5.

Analiza MES połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych

Badania związane z prognozowaniem wytrzymałości połączeń klejowych jednorodnych i hybrydowych prowadzono również w innym aspekcie, uwzględniając inne kryteria oceny połączeń, ponieważ wytrzymałość połączeń adhezyjnych jest funkcją nie tylko właściwości adhezyjnych, ale także właściwości fizycznych (np. sztywności łączonych materiałów).

Badania oparto na analizie stanu wyężenia materiału kleju z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Analiza ta pozwala w sposób niezależny od przeprowadzonych wcześniej badań właściwości adhezyjnych prognozować wytrzymałość badanych typów połączeń, uwzględniając także właściwości fizyczne łączonych materiałów, szczególnie istotne podczas wykonywania połączeń adhezyjnych hybrydowych. Stanowi to, ważne dla realizacji celów rozprawy, rozszerzenie przedstawionego dotychczas zakresu badań, o metodę powszechnie stosowaną do analizy połączeń klejowych, czego przejawem jest wiele publikacji w tym obszarze [2, 13, 24, 89, 93, 97, 100, 114, 128, 143, 187, 246, 289, 295, 316, 325].

5.1. Wprowadzenie

Współczesną metodą obliczeniową, stanowiącą uzupełnienie analizy stanu wyężenia połączeń klejowych jest metoda elementów skończonych (MES) [66, 74, 99, 100, 104, 319]. W 1971 r. G.R. Wooley i D.R. Carver [313], jako jedni z pierwszych, przedstawili zastosowanie metody elementów skończonych do analizy rozkładu naprężenia w spoinie jednozakładowego połączenia klejowego, zakładając płaski stan naprężenia. Publikacja ta zainicjowała analizy połączeń klejowych z wykorzystaniem MES, co jest podkreślane m.in. w pracach [136, 191].

Brak dotychczas ścisłych analitycznych metod obliczeniowych wytrzymałości połączeń klejowych powoduje, że ocena ich wytrzymałości wymaga ciągłego przeprowadzania rozpoznawczych niszczących badań doświadczalnych. Podczas projektowania wysokowytrzymałych połączeń klejowych występują trudności związane z prognozą wytrzymałości tych połączeń, która zależy od wielu czynników (m.in. materiałowych, technologicznych, konstrukcyjnych, eksploatacyjnych).

Stosowane obecnie metody projektowania połączeń klejowych są oparte na wyznaczonych doświadczalnie, na podstawie znormalizowanych badań wytrzymałości klejów na ścinanie, odrywanie, zginanie i oddzieranie, średnich wartościach naprężenia niszczącego spoin klejowych. Pozwala to, w pewnym stopniu, porównywać różne kleje. Jednak na podstawie uzyskanych wyników z tych prób nie można w sposób satysfakcjonujący prognozować wytrzymałości połączeń klejowych. Opracowane analityczne metody określania naprężenia w spoinach połączeń są niestety obciążone pewnymi błędami wynikającymi z konieczności przyjmowania założeń upraszczających.

Obliczenia numeryczne z wykorzystaniem MES [44, 250] umożliwiają m.in. określenie korzystnych cech geometrycznych połączeń [95, 103, 119, 328], zapewniających wymaganą wytrzymałość [93, 133] już na etapie ich projektowania [7]. Ponadto zastosowanie symulacji numerycznych umożliwia identyfikację miejsc newralgicznych konstrukcji, w których występują niepożądane koncentracje naprężenia, będące często miejscem inicjacji procesu zniszczenia połączeń klejowych.

W obliczeniach numerycznych uwzględniane są przy tym różne czynniki działające na połączenia. L.F.M. da Silva i R.D. Adams w pracy [61] analizowali wpływ temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych tytanu, stosując różne kleje oraz zmieniając temperaturę ekspozycji połączeń od -50°C do $+200^{\circ}\text{C}$. F. Nakagawa i inni [187] stosowali metodę elementów skończonych do określenia oddziaływań temperatury na połączenia klejowe. J. Godzimirski i M. Rośkowicz [97] wykorzystywali MES do oceny wytrzymałości połączeń klejowych. R.D. Adams i J.A. Harris [7] stosowali metodę elementów skończonych do badań wpływu czynników geometrycznych na wytrzymałość połączeń klejowych.

Analiza numeryczna pozwala na przedstawienie w sposób bardziej dokładny odkształceń połączeń klejowych, uwzględniając rozkład naprężenia w spoinie klejowej [67]. Ponadto przedmiotem wielu analiz numerycznych są zagadnienia związane z wytrzymałością oraz zachowaniem się połączeń klejowych pod wpływem określonych obciążeń, prowadzące do ustalenia miejsca uszkodzenia [2, 12, 123].

Obliczenia numeryczne mogą dotyczyć różnych rodzajów połączeń [3, 24, 40, 89, 167, 325], w tym najczęściej stosowanych: jednozakładkowych [2, 64, 123, 165, 171, 172, 174, 300, 327], czy dwuzakładkowych [61, 100, 119], z jednoczesnym uwzględnieniem różnorodnych materiałów konstrukcyjnych, m.in.: polimerów [316], kompozytów [141, 143, 191], metali i stopów metali [225, 226, 319].

Przeprowadzane są symulacje zarówno modeli połączeń dwuwymiarowych (2D) [46, 65, 274], jak również modeli trójwymiarowych (3D) [128, 259]. Do najczęściej spotykanych w literaturze programów numerycznych wykorzystujących MES w ocenie wytrzymałości połączeń klejowych należą m.in. programy ABAQUS [43, 55, 65, 67, 89, 172, 274], ANSYS [16, 18, 143, 289, 295, 301], MSc Marc Mentat 2001r3 [259], NASTRAN [100] i inne [93, 101, 174, 176].

Podczas opracowywania modelu MES połączeń klejowych istnieje wiele zagadnień dotyczących m.in. zastosowania ilości warstw elementów skończonych wzdłuż grubości spoiny, przyjęcia koniecznych założeń upraszczających do wymiarów geometrycznych połączenia, wyboru odpowiednich charakterystyk materiałowych łączonych elementów i kleju [95, 143, 144, 164, 186]. Na dokładność obliczeń ma wpływ zarówno rodzaj siatki elementów skończonych, rodzaj zastosowanego elementu skończonego oraz opis warunków dotyczących zagadnień związanych z niszczeniem połączeń.

5.2. Cel i zakres analizy MES

Podczas analizy metodą elementów skończonych zastosowano program ABAQUS/Standard [1]. Obliczenia numeryczne prowadzono z uwzględnieniem mechanizmu zniszczenia spoiny klejowej [186, 225, 246, 322], weryfikując otrzymane wyniki z rezultatami badań doświadczalnych.

Wyodrębniono następujące cele szczegółowe analizy numerycznej.

Pierwszym celem było opracowanie metodyki doboru modelu kohezyjnego kleju, który został zastosowany w badaniach doświadczalnych. Realizacja tego celu polegała na doborze odpowiedniego elementu typu *cohesive*, odwzorowującego właściwości kleju użytego do wykonania połączeń.

Drugim celem było przedstawienie wybranych zagadnień procesu zniszczenia połączenia klejowego, możliwe ze względu na zastosowanie w modelu połączenia elementów typu *cohesive* [1]. Dzięki temu określono wartości obciążenia inicjującego proces zniszczenia spoiny, jak również wartość obciążenia krytycznego, przy której nastąpiło zniszczenie połączenia.

Trzeci cel szczegółowy stanowiła weryfikacja wyników badań doświadczalnych dotyczących wytrzymałości połączeń klejowych układów jednorodnych i hybrydowych na podstawie analizy numerycznej. Weryfikacja ta miała na celu określenie udziału składowych naprężeń w spoinach klejowych połączeń jednorodnych i hybrydowych w stopniu wyężenia spoin, potwierdzenie charakteru zniszczenia połączeń, a także ocenę poprawności przeprowadzenia eksperymentu.

Wykonane obliczenia numeryczne stanowiły zagadnienie geometryczne i fizyczne nieliniowe. Umożliwiły uzyskanie wielu wiadomości mogących mieć istotne znaczenie przy projektowaniu połączeń klejowych.

5.3. Model numeryczny spoiny klejowej i połączenia klejowego

Jednym z zadań analizy numerycznej połączeń klejowych jednorodnych i hybrydowych było opracowanie modelu numerycznego spoiny klejowej. Przeprowadzono wiele prób związanych z modelowaniem spoiny klejowej oraz połączenia,

w których weryfikowano opracowywane modele z wynikami eksperymentu, a końcowym efektem było otrzymanie modelu numerycznego adekwatnego do badanych połączeń rzeczywistych. Opracowanie metodyki przygotowywania modelu numerycznego spoiny klejowej i połączenia przebiegało w kilku etapach, przy czym wykorzystanie wyników badań doświadczalnych poprzedzone zostało analizą literatury dotyczącą poszczególnych etapów modelowania.

W pierwszym etapie rozważaniom poddano rodzaj siatki MES i elementów skończonych, wykorzystanych zarówno do modelowania materiałów łączonych, jak i spoiny klejowej. Nie mniej istotna była ilość warstw elementów skończonych wzdłuż grubości poszczególnych elementów połączenia klejowego. Etap ten zawierał także dobór rodzaju elementów przyjętych do modelowania spoiny klejowej. W drugim etapie opracowano modele dyskretne połączeń klejowych wraz z przyjętymi warunkami brzegowymi dotyczącymi utwierdzenia oraz obciążenia połączenia. Trzeci etap polegał na wyborze odpowiednich modeli materiałowych zarówno kleju, jak i materiałów łączonych. Czwartym etapem była weryfikacja wyników analizy numerycznej z wynikami badań doświadczalnych, na podstawie której stwierdzono, czy opracowany model numeryczny jest adekwatny do modelu rzeczywistego. Siły niszczące połączenia klejowe uzyskane na podstawie eksperymentu stanowiły kryterium tej weryfikacji. Otrzymane wyniki stanowiły podstawę do zmieniania parametrów modelu numerycznego, poddanego dalszej weryfikacji.

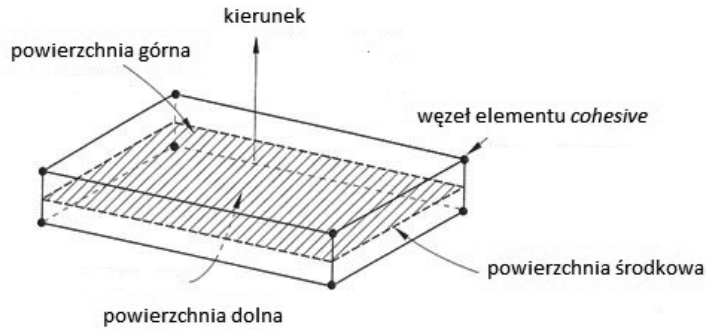
Zastosowanie przedstawionej metodyki badań symulacyjnych umożliwiło przygotowanie modelu numerycznego spoiny klejowej, wykonanej z wykorzystaniem kleju użytego w badaniach doświadczalnych, oraz opracowanie modelu całego połączenia klejowego wraz z odpowiednimi warunkami brzegowymi i z uwzględnieniem charakterystyk materiałowych kleju oraz materiałów łączonych.

5.3.1. Rodzaj siatki MES i elementów skończonych

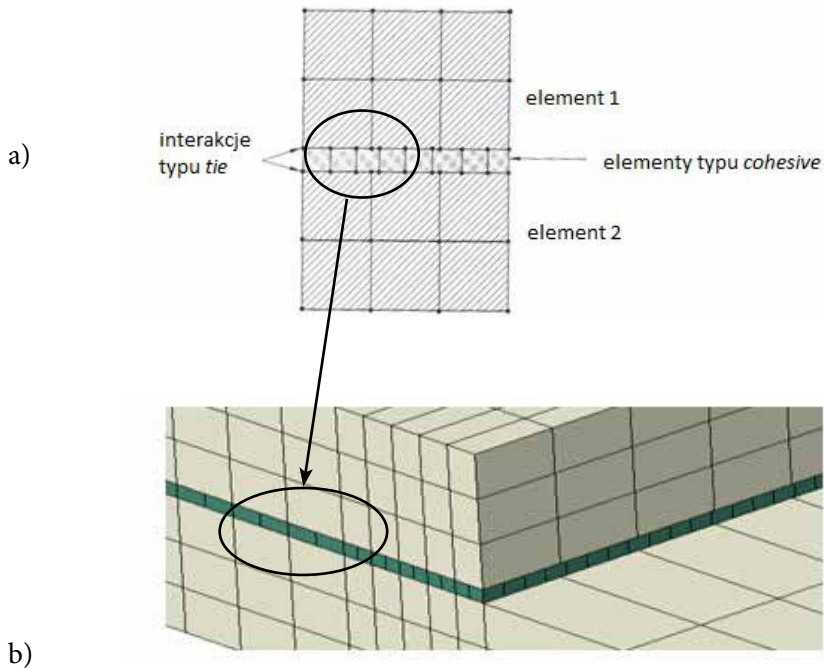
Analiza numeryczna, z wykorzystaniem metody elementów skończonych, została przeprowadzona w oparciu o przestrzenne modele dyskretne połączeń klejowych, przy zastosowaniu procedur przyrostowo-iteracyjnych. W procesie dyskretyzacji połączenia klejowego zastosowano heksagonalną siatkę elementów skończonych z wykorzystaniem różnych rodzajów elementów [1]. Ich liczba w opracowanych modelach numerycznych wynosiła 13700÷15000 i była uzależniona od wymiarów połączeń.

W przypadku modelowania materiałów łączonych zastosowano ośmiowęzłowe elementy objętościowe typu *solid*, mające po trzy translacyjne stopnie swobody w węźle elementu. Spoinę klejową, w każdym wariantcie połączeń analizowanych, odwzorowywano przy wykorzystaniu elementów skończonych COH3D8 typu

cohesive [1], umożliwiającą opis mechanizmu zniszczenia spoiny w procesie obciążania połączenia klejowego. Elementy te są wykorzystywane do trójwymiarowej analizy w programie ABAQUS, w której grubość oraz orientacja elementu skończonego jest określana zgodnie z opisem zamieszczonym na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Opis elementów typu cohesive COH3D8 [1]



Rys. 5.2. Model połączenia siatki elementów skończonych z wykorzystaniem interakcji typu tie: a) schemat poglądowy połączenia siatki MES [1], b) opracowany model

Łączenie elementów typu *cohesive* z elementami typu *solid* zostało zrealizowane poprzez zastosowanie interakcji typu *tie* (*surface-base tie constraints*) umożliwiających łączenie siatek elementów skończonych poszczególnych składników modelu na powierzchniach ich styku. Zastosowaną metodę połączenia spoiny klejowej z łączonymi elementami przedstawiono na rys. 5.2. Niektóre wiadomości dotyczące modelowania spoiny klejowej elementami typu *cohesive* są rozwinięte w pracach [43, 55, 322].

5.3.2. Dyskretyzacja spoiny klejowej

W niniejszej pracy, wykorzystując do budowy modelu spoiny klejowej przedstawione elementy typu *cohesive*, zastosowano jedną warstwę elementów skończonych wzdłuż grubości warstwy kleju. Widoczne na rys. 5.2.a zagęszczenie siatki elementów skończonych spowodowane jest dyskretyzacją spoiny w miejscu koncentracji naprężenia na końcach zakładki. Dla rozpatrywanego modelu zagęszczono siatkę elementów skończonych na długości 1mm od krawędzi zakładki spoiny klejowej.

W literaturze przedmiotowej można spotkać wiele (często sprzecznych) informacji dotyczących obszaru zagęszczenia siatki elementów skończonych oraz przyjmowanej ilości elementów wzdłuż grubości spoiny klejowej [93, 95, 332]. Przykładowo, A. Öchsner i J. Gegner [190] stosują bardzo duże zagęszczenie siatki elementów skończonych w miejscu koncentracji naprężeń na końcu zakładki połączenia klejowego jednozakładkowego, w którym gęstość siatki na końcach zakładki wynosiła nawet do 10000 elementów skończonych na jeden milimetr długości. W publikacji B. Kilic i inni [144] przedstawili wyniki analiz wskazujące, że zagęszczenie siatki elementów skończonych na końcu zakładki spoiny klejowej, nie zapewnia poprawnego obliczenia wartości naprężenia ze względu na to, że skokowa zmiana wymiarów geometrycznych prowadzi do otrzymania osobliwego rozwiązania.

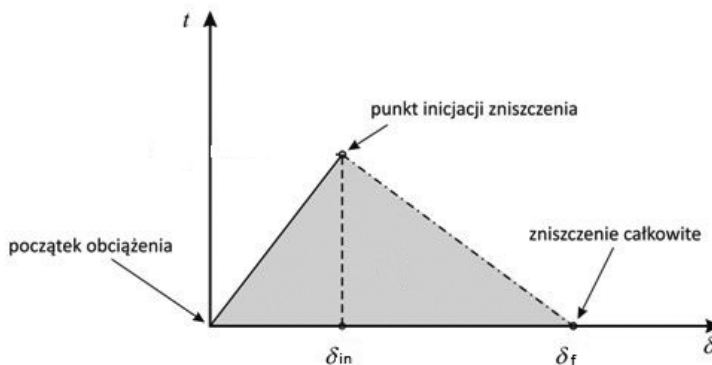
J. Godzimirski [101, 103] zaleca zastosowanie minimum dwóch warstw elementów skończonych wzdłuż grubości spoiny klejowej oraz zagęszczenie siatki w pobliżu końca zakładki, w celu poprawnego określenia wyężenia materiału. W pracy [91] jest zaznaczona konieczność modelowania grubości spoiny co najmniej trzema warstwami. A. Marciniak i W. Zielecki [176] zastosowali czterowarstwowy model spoiny klejowej do analizy połączenia klejowego obciążonego na oddzieranie oraz zagęszczenie siatki w pobliżu końca spoiny klejowej. T. Sawa i H. Suga [252] badali warianty połączeń klejowych jedno- i dwuzakładkowych, w których spoina klejowa zawierała od 3 do 13 warstw elementów skończonych. Także w innych pracach, np. [136, 301] autorzy zagęszczali siatki elementów skończonych w pobliżu końca zakładki spoiny klejowej. R.H. Andruet i inni [13]

opracowali element skończony (dwu- i trójwymiarowy), który można wykorzystać do określenia stanu naprężenia w połączeniach klejowych, przy zastosowaniu tylko jednej warstwy elementów skończonych wzdłuż grubości spoiny klejowej. Ponadto M.D. Fitton i J.D. Broughton [84] przedstawili modelowanie poszczególnych obszarów spoiny klejowej, przyjmując różne charakterystyki materiałowe warstwy kleju.

W obliczeniach prowadzonych z uwzględnieniem elementów typu *cohesive* istnieje możliwość zastosowania tylko jednego elementu wzdłuż grubości spoiny klejowej. Większa ilość elementów nie zapewnia zbieżności rozwiązania numerycznego.

5.3.3. Kryterium zniszczenia

Modelowanie połączeń klejowych z wykorzystaniem elementów typu *cohesive* wymaga definiowania właściwości materiału, umożliwiających opis mechanizmu zniszczenia. Do obliczeń został zastosowany model materiału, którego charakterystyka zawiera opis inicjacji i ewolucji zniszczenia do utraty całkowitej sztywności. Podstawowym prawem konstytutywnym opisującym elementy typu *cohesive* jest kryterium zniszczenia *Traction-Separation* (siła rozrywająca – graniczna wartość separacji) [1, 43, 322], w którym są uwzględnione zarówno oddziaływania w kierunku normalnym (rozrywające), jak i efekty związane ze zniszczeniem spowodowanym oddziaływaniem stycznym (rys. 5.3).

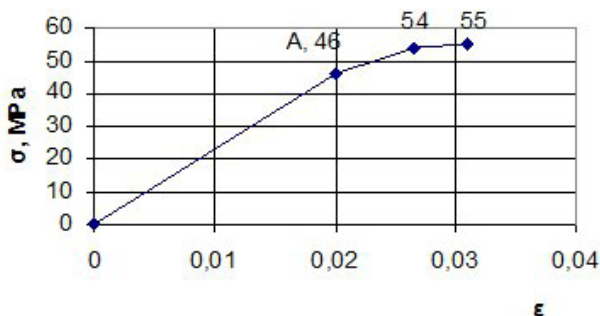


Rys. 5.3. Kryterium zniszczenia *traction-separation* zastosowane do opisu spoiny klejowej [225, 322]: t – obciążenie, δ – przemieszczenie, δ_{in} – przemieszczenie węzłów elementu skończonego odpowiadające momentowi inicjacji zniszczenia, δ_f – wartość efektywnej separacji odpowiadająca całkowitej utracie sztywności elementu skończonego

Prawo *traction-separation*, wykorzystywane w modelu strefy kohezijnej (*cohesive zone model*), może być traktowane jako charakterystyka fenomenologiczna strefy, w której separacja będzie występować wzdłuż strefy międzyfazowej. W pracy [66] model strefy kohezijnej jest wykorzystywany do modelowania progresji zniszczenia międzyfazowego połączenia klejowego podlegającego degradacji. Ponadto istnieje wiele modeli kryterium zniszczenia *traction-separation*, które zostały opisane w pracach [43, 66, 322].

Wartość separacji, określającej przemieszczenie węzłów elementu od chwili inicjacji zniszczenia do całkowitej utraty sztywności elementu skończonego, przyjęto jako 0,035 mm (δ_f), co stanowiło korektę do wartości średniej 0,05 mm zalecanej w instrukcji oprogramowania ABAQUS. Wprowadzenie korekty separacji było spowodowane koniecznością kalibracji modelu numerycznego do wyników badań doświadczalnych (porównywano wartości siły niszczącej).

Model kleju stanowił materiał sprężysty typu *Elastic-Traction* [1] zawierający opis zniszczenia elementów typu *cohesive*, przedstawiony w punkcie 5.3.1. Charakterystykę materiałową kleju zamieszczono na rys. 5.4.

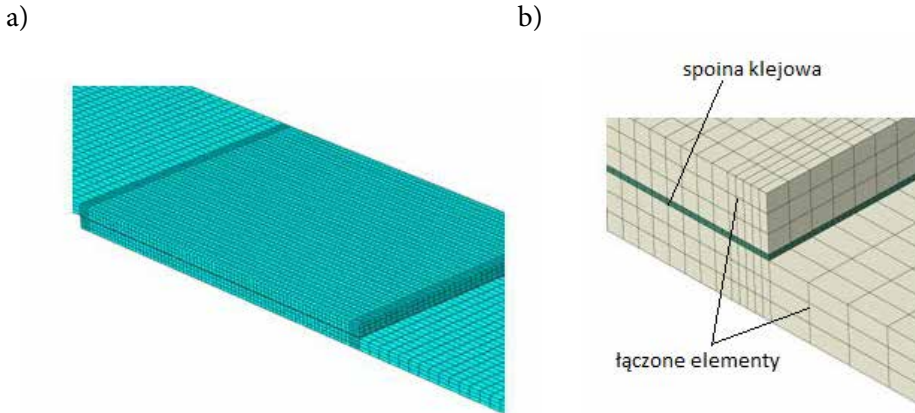


Rys. 5.4. Model materiałowy kleju (na podstawie [103])

Punkt A charakterystyki materiałowej kleju odpowiada punktowi inicjacji zniszczenia przedstawionemu na rys. 5.3.

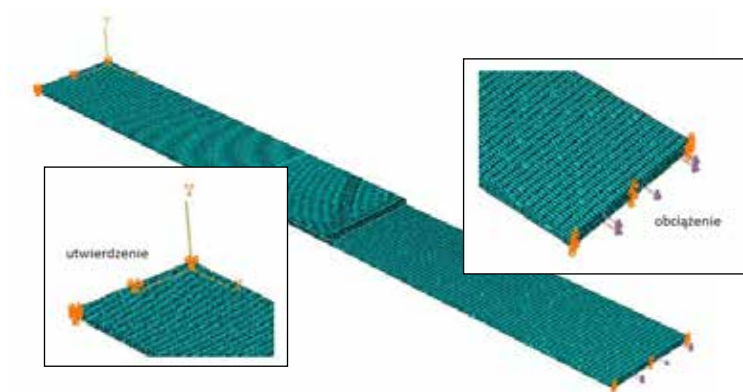
5.3.4. Model numeryczny połączenia klejowego

Schemat jednego z modeli numerycznych rozpatrywanych połączeń klejowych przedstawiono na rys. 5.5. Grubość łączonych elementów oraz długość zakładki była zależna od rodzaju rozpatrywanego połączenia klejowego. Rozmiary połączeń zastosowane w badaniach doświadczalnych oraz przyjęte do analizy numerycznej przedstawiono w tabeli 3.1.



Rys. 5.5. Model numeryczny jednozakładkowego połączenia klejowego: a) widok strefy spoiny klejowej, b) widok szczegółowy [220, 240]

Warunki brzegowe opracowanych modeli numerycznych zdefiniowano poprzez zablokowanie translacyjnych stopni swobody węzłów, znajdujących się na czołowej powierzchni blachy górnej oraz pozostawienie możliwości przemieszczeń czołowej powierzchni blachy dolnej, tylko w kierunku realizacji obciążenia. Obciążenie modelu numerycznego wykonano poprzez równomierne obciążenie czołowej powierzchni blachy dolnej na kierunku osi X globalnego układu współrzędnych modelu (rys. 5.6).

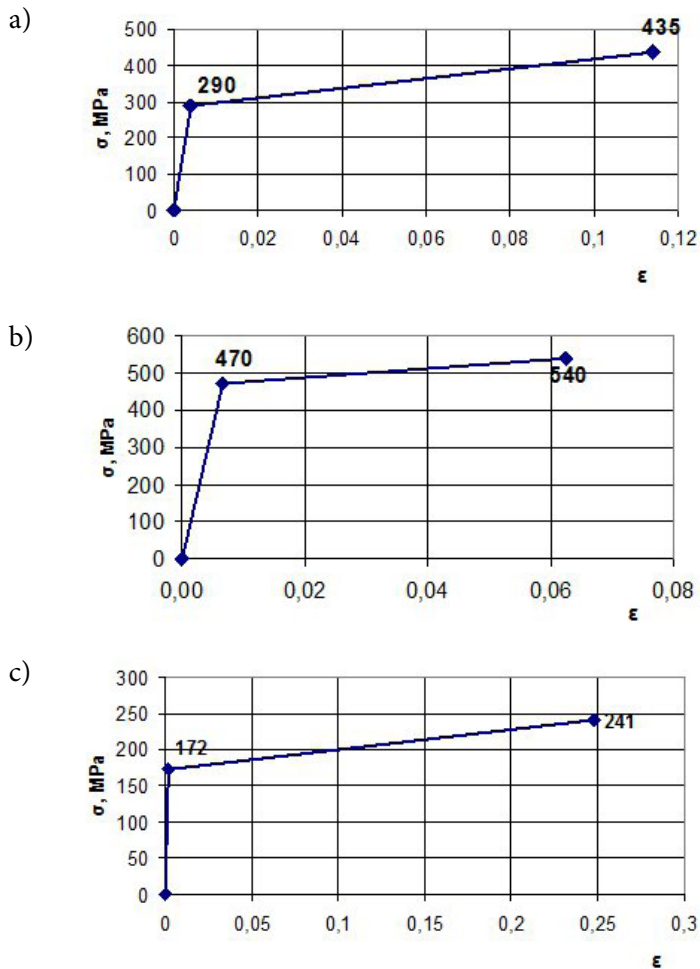


Rys. 5.6. Warunki brzegowe i obciążenie przyjęte w modelu numerycznym jednozakładkowego połączenia klejowego [240]

Obciążenie zastosowane w modelach numerycznych stanowiły siły, zwiększające się do sił niszczących połączenia, których wartości wyznaczono w badaniach doświadczalnych.

5.3.5. Modele materiałowe

Do opisu właściwości materiałowych elementów łączonych wykonanych z blach ze stopu aluminium oraz blachy tytanowej [225, 348, 350, 360] zastosowano model materiału sprężysto-plastycznego. Dla kompozytów przyjęto charakterystyki liniowo-sprężyste. Bilinearną charakterystykę materiałów wykorzystanych w badaniach zamieszczono na rys. 5.7.



Rys. 5.7. Zależność $\sigma = f(\epsilon)$ przyjętych modeli materiałowych: a) EN-AW2024, b) EN AW-7075, c) CPI

Opracowane modele materiałowe o charakterystykach sprężysto-plastycznych definiowały zagadnienie fizycznie nieliniowe w procesie obliczeń numerycznych.

5.3.6. Siły niszczące połączenia adhezyjne jednorodne i hybrydowe

Przeprowadzone badania doświadczalne umożliwiły wyznaczenie wartości sił niszczących, które przyjęto jako podstawę do oceny poprawności obliczeń numerycznych. W tabeli 5.1 zestawiono wartości sił niszczących połączenia klejowe blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 oraz EN AW-7075PLT0, uzyskane w badaniach doświadczalnych oraz na podstawie analizy numerycznej.

Tabela 5.1. Wartości siły niszczącej uzyskanej w badaniach doświadczalnych oraz na podstawie analizy numerycznej jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 i EN AW-7075PLT0

Lp.	Rodzaj jednorodnego połączenia klejowego blach ze stopów aluminium	Wartość siły niszczącej, N	
		badania doświadczalne	analiza numeryczna
1	EN AW-2024PLT3; g = 0,64 mm	3971	3955
2	EN AW-2024PLT3; g = 1,00 mm	4093	4081
3	EN AW-7075PLT0; g = 0,80 mm	2568	2672
4	EN AW-7075PLT0; g = 1,00 mm	2724	3200

Porównując zamieszczone w tabeli 5.1 wyniki badań wykazano zbliżone wartości sił niszczących wyznaczonych w badaniach eksperymentalnych z wynikami obliczeń numerycznych. Dotyczy to przede wszystkim trzech pierwszych przypadków, dla których uzyskano zgodność w przedziale 98-99%. W ostatnim wariancie połączenia otrzymano różnicę wyników wynoszącą 18%.

Wartości siły niszczącej połączenia klejowe blach tytanowych CP1 uzyskanej w badaniach doświadczalnych oraz na podstawie analizy numerycznej przedstawiono w tabeli 5.2.

Tabela 5.2. Wartości siły niszczącej uzyskanej w badaniach doświadczalnych jednorodnych połączeń klejowych blach tytanowych CP1 oraz na podstawie analizy numerycznej

Lp.	Rodzaj jednorodnego połączenia klejowego blachy tytanowej	Wartość siły niszczącej, N	
		badania doświadczalne	analiza numeryczna
1	CP1; g = 0,40 mm	3210	2673

W przypadku połączeń klejowych blach tytanowych CP1 różnica pomiędzy wartością obciążenia niszczącego uzyskanego w wyniku eksperymentu i na podstawie analizy numerycznej wynosi 19%.

Wartości sił niszczących połączenia klejowe kompozytów polimerowych: epoksydowo-szklanego, epoksydowo-aramidowego oraz epoksydowo-grafitowego, uzyskane podczas badań doświadczalnych oraz na podstawie analizy numerycznej, zamieszczono w tabeli 5.3.

Tabela 5.3. Wartości siły niszczącej uzyskanej w badaniach doświadczalnych oraz na podstawie analizy numerycznej jednorodnych połączeń klejowych kompozytów polimerowych

Lp.	Rodzaj jednorodnego połączenia klejowego kompozytu	Wartość siły niszczącej, N	
		badania doświadczalne	analiza numeryczna
1	Epoksydowo-szklany; g = 0,60 mm (2)	1838	1796
2	Epoksydowo-aramidowy; g = 0,60 mm (4)	2557	2440
3	Epoksydowo-grafitowy; g = 0,66 mm (6)	2875	2555

Porównując wyniki zamieszczone w tabeli 5.3, dotyczące wybranych kompozytów polimerowych zauważono dość dużą zgodność wyników badań doświadczalnych i numerycznych. W pierwszym i drugim wariancie połączenia otrzymano zgodność wyników w przedziale 98-99%, w trzecim przypadku natomiast różnica wyników wynosiła 11%.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych i porównaniu ich wyników z rezultatami eksperymentów można przyjąć, iż istnieje zadowalająca zgodność modelu numerycznego z połączeniem rzeczywistym, przy uwzględnieniu założeń upraszczających przybliżonego charakteru zastosowanej metody numerycznej, jak również przedziałów ufności wyników badań eksperymentalnych. Im większa sztywność na rozciąganie łączonych materiałów, tym jest większa wartość siły niszczącej połączenie, co jest zgodne z teorią Volkersena.

Prowadzono również obliczenia hybrydowych połączeń klejowych w różnych układach materiałów: blacha ze stopu aluminium-blacha tytanowa, kompozyt-blacha ze stopu aluminium, kompozyt-blacha tytanowa, kompozyt-kompozyt. W tabeli 5.4 przedstawiono wartości siły niszczącej uzyskanej w badaniach doświadczalnych oraz na podstawie obliczeń numerycznych wybranych połączeń hybrydowych. We wszystkich przypadkach występuje zgodność wyników powyżej 90%.

Tabela 5.4. Wartości siły niszczącej uzyskanej w badaniach doświadczalnych oraz na podstawie analizy numerycznej połączeń klejowych hybrydowych

Lp.	Rodzaj połączenia klejowego hybrydowego	Wartość siły niszczącej, N	
		badania doświadczalne	analiza numeryczna
1	Kompozyt epoksydowo-szklany (2); g = 0,60 mm/ Kompozyt epoksydowo-aramidowy (4); g = 0,60 mm	2511	2261
2	Kompozyt epoksydowo-aramidowy (4); g = 0,60 mm/ Blacha ze stopu aluminium EN AW-2024PLT0; g = 0,64 mm	2004	2000
3	Kompozyt epoksydowo-aramidowy (4) ; g = 0,60 mm/ Blacha tytanowa CP1; g = 0,40 mm/	2860	2673
4	Blacha ze stopu aluminium EN AW-2024PLT0; g = 0,80 mm/ Blacha tytanowa CP3; g = 0,80 mm	2859	2961

Podsumowując przedstawione wyniki analiz połączeń jednorodnych oraz hybrydowych, można stwierdzić, że opracowane modele numeryczne rozważanych połączeń wraz z odpowiednim modelem spoiny klejowej wykazują zgodność, wynoszącą w większości przypadków więcej niż 90%. Potwierdza to w pełni osiągnięcie stawianych celów w zakresie opracowania poprawnych modeli dyskretnych analizowanych połączeń klejowych.

5.4. Analiza wybranych zagadnień procesu niszczenia połączeń klejowych jednorodnych i hybrydowych

Zagadnienie procesu niszczenia połączeń klejowych jest niezwykle istotne, ponieważ pozwala lokalizować miejsca inicjacji zniszczenia oraz przebieg jego propagacji, co należy uwzględnić w projektowaniu połączeń klejowych. P.T. Cheuk i inni [46] przedstawiają porównanie analitycznych modeli pęknięcia połączeń klejowych, z podwójną zakładką, z analizą numeryczną badanych połączeń, wskazując na zmniejszanie się szybkości uwalniania energii dla określonych długości pęknięcia. Także w pracy [13] zamieszczono obszerne wyniki analiz numerycznych dotyczące określenia inicjacji oraz propagacji obszaru zniszczenia w połączeniach klejowych.

W niniejszej pracy skupiono się głównie na określeniu wartości obciążenia inicjującego proces zniszczenia spoiny oraz wartości obciążenia krytycznego, przy której nastąpiło całkowite zniszczenie połączenia.

Wartość siły inicjującej zniszczenie określano analizując stan odkształcenia warstwy kleju, przyjmując jako początek zniszczenia utratę sztywności elementów znajdujących się w narożach spoiny klejowej. W rozważaniach przyjęto początek procesu zniszczenia o wartości $(60-70\%) \div 80\%$ utraty sztywności elementów skończonych w warunkach złożonych obciążeń zewnętrznych. Macierz utraty sztywności elementów skończonych przedstawiana jest w skali 0 – 1, gdzie 1 oznacza 100% utraty sztywności elementu skończonego, a tym samym wyeliminowaniu go z przenoszenia obciążeń w modelu numerycznym [1].

Wartości siły inicjującej proces zniszczenia spoiny klejowej oraz siły niszczącej przy wybranych wariantach połączeń klejowych jednorodnych, uzyskane na podstawie analizy numerycznej, zestawiono w tabeli 5.5.

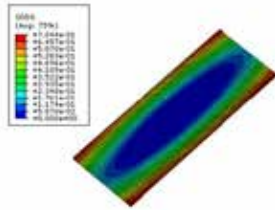
Tabela 5.5. Wartości siły inicjującej zniszczenie oraz siły niszczącej określonej na podstawie analizy numerycznej połączeń klejowych jednorodnych

Lp.	Rodzaj połączenia klejowego jednorodnego	Wartość siły, N	
		siła inicjująca zniszczenie	siła niszcząca
1	Kompozyt epoksydowo-aramidowy (4); g = 0,60 mm	2437,5	2440,2
2	EN AW-2024PLT3; g = 0,64 mm	3812,6	3955,0
3	EN AW-2024PLT3; g = 1,00 mm	4052,1	4081,0
4	EN AW-7075PLT0; g = 0,80 mm	2440,0	2672,0
5	EN AW-7075PLT0; g = 1,00 mm	3040,0	3200,0
6	CP1; g = 0,40 mm	2640,0	2673,0

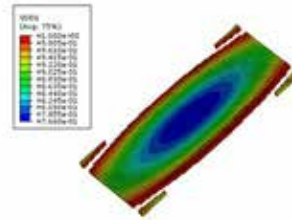
W rozpatrywanych przypadkach początek procesu zniszczenia spoiny klejowej następował przy sile obciążającej równej 91÷99 % wartości siły niszczącej.

Wizualizację procesu utraty sztywności elementów skończonych spoiny klejowej w połączeniach klejowych kompozytu epoksydowo-aramidowego (4), na poziomie 70% oraz 100%, przedstawiono na rys. 5.8. Na rys 5.9 zaprezentowano dwa etapy procesu utraty sztywności elementów skończonych spoiny klejowej w jednorodnych połączeniach klejowych stopu aluminium EN AW-7075PLT0 (g = 0,80 mm), na poziomie 60% oraz 100%.

a)

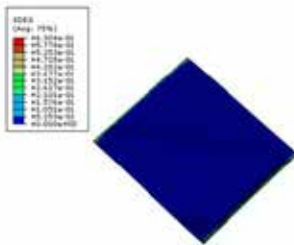


b)

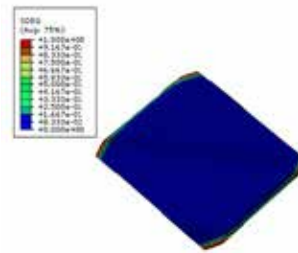


Rys. 5.8. Utrata sztywności elementów skończonych spoiny klejowej w jednorodnym połączeniu klejowym kompozytu epoksydowo-aramidowego (4) ($g = 0,60$ mm) na poziomie: a) 70%, b) 100%

a)



b)



Rys. 5.9. Utrata sztywności elementów skończonych spoiny klejowej w jednorodnym połączeniu klejowym blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 ($g = 0,80$ mm) na poziomie: a) 60%, b) 100%

W przypadku materiałów o dużej wartości współczynnika sprężystości wzdłużnej, proces niszczenia spoiny klejowej przebiega wcześniej, przy mniejszej różnicy między siłą inicjującą zniszczenie i siłą niszczącą (np. kompozyt polimerowy – tab. 5.5, poz. 1) niż dla materiałów mniej sztywnych (np. stop aluminium, tab. 5.5, poz. 2,4). Wyniki te stanowią potwierdzenie rozważań teoretycznych [148], ale przewagą ich jest możliwość określania miejsc inicjacji zniszczenia oraz określenie „czasu” trwania tego procesu.

W tabeli 5.6 zamieszczono wartości siły inicjującej proces zniszczenia spoiny klejowej oraz siły niszczącej wybranych połączeń klejowych hybrydowych.

Tabela 5.6. Wartości siły inicjującej zniszczenie oraz siły niszczącej określonej na podstawie analizy numerycznej wybranych połączeń klejowych hybrydowych

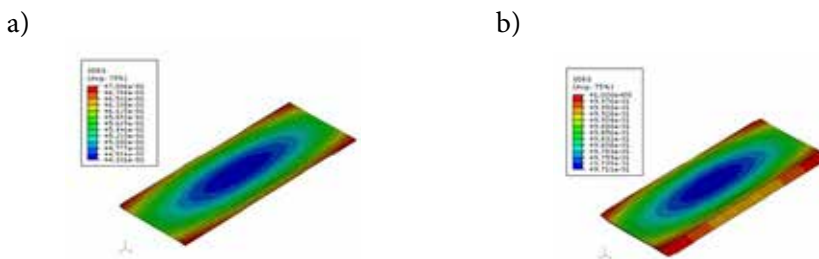
Lp.	Rodzaj połączenia klejowego hybrydowego	Wartość siły, N	
		inicjującej zniszczenie	niszczącej
1	Kompozyt epoksydowo-szkłany (2); g = 0,60 mm/ Kompozyt epoksydowo-aramidowy (4); g = 0,60 mm	2258	2261
2	Kompozyt epoksydowo-aramidowy (4); g = 0,60 mm/ CP1; g = 0,40 mm	2667	2671
3	EN AW-2024PLT0; g = 0,80 mm/ CP3; g = 0,80 mm	2905	2943

Analizując wyniki badań zamieszczone tabeli 5.6 można zauważyć, iż w przypadku połączeń klejowych kompozytu epoksydowo-aramidowego (4) i blachy tytanowej CP1 oraz połączeń kompozytu epoksydowo-szkłanego i epoksydowo-aramidowego (4), wartość siły początkującej zniszczenie jest prawie taka sama jak wartość siły niszczącej. Inicjacja zniszczenia oraz całkowite zniszczenie spoiny następują w bardzo zbliżonym zakresie obciążenia.

Wizualizację degradacji sztywności elementów skończonych spoiny klejowej w połączeniu klejowym hybrydowym: kompozyt epoksydowo-aramidowy (4) i blacha tytanowa CP1, na poziomie 70% oraz 100%, przedstawiono na rys. 5.10.

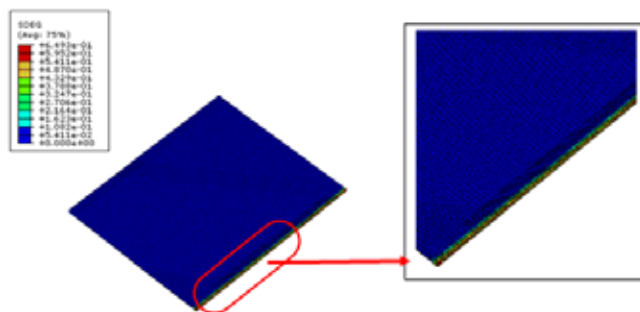
Poziom 70% utraty sztywności uzyskano przy sile 2667 N (tab. 5.6 poz. 2), 100% utraty sztywności natomiast oznacza zniszczenie połączenia i występuje przy wartości obciążenia 2671 N. W zależności od rodzaju materiałów tworzących połączenie klejowe hybrydowe, można zauważyć istotne różnice w rozkładzie naprężenia w spoinie klejowej podczas niszczenia.

Przykład degradacji sztywności elementów skończonych spoiny klejowej połączenia klejowego blachy ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 oraz blachy tytanowej CP3, na poziomie 65% i 100%, zamieszczono na rys. 5.11.

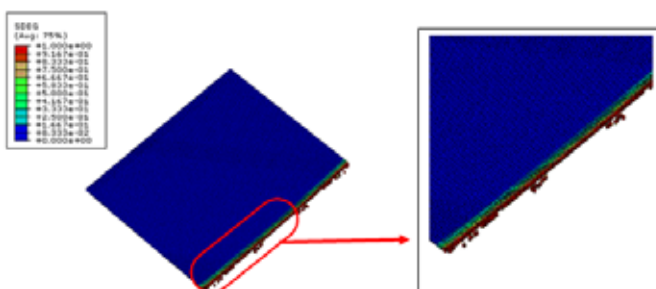


Rys. 5.10. Utrata sztywności elementów skończonych spoiny klejowej w połączeniu klejowym hybrydowym: kompozyt epoksydowo-aramidowy (4) i blacha tytanowa CP1, na poziomie: a) 70%, b) 100%

a)



b)



Rys. 5.11. Utrata sztywności elementów skończonych spoiny klejowej w połączeniu klejowym hybrydowym: blacha ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 i blacha tytanowa CP3, na poziomie: a) 65%, b) 100%

Porównując wizualizacje wyników utraty sztywności elementów skończonych spoiny klejowej (rys. 5.9 i rys. 5.11) można zauważyć znaczną różnicę związaną z charakterem rozkładu naprężenia w spoinie klejowej. Zmiana rozkładu naprężenia w takich układach wynika przede wszystkim z różnicy właściwości mechanicznych materiałów. W przypadku połączeń jednorodnych (rys. 5.8, rys. 5.9) utrata sztywności występuje na całej krawędzi spoiny klejowej, wzdłuż jej szerokości. Natomiast w połączeniach hybrydowych, pokazanych na rys. 5.11 b, przedstawiono elementy, które utraciły już sztywność i są wyeliminowane z dalszych obliczeń.

Na podstawie analizy wyników badań dotyczących procesu niszczenia spoiny klejowej (połączenia klejowego) stwierdzono, że proces ten jest rozciągnięty w czasie. Przy czym zaobserwowano, że początek inicjacji zniszczenia oraz „czas” trwania tego procesu jest uzależniony od wielu czynników, m.in. rodzaju połączenia oraz właściwości łączonych materiałów. Jednakże zapas wytrzymałości po zainicjowaniu zniszczenia jest niewielki, a więc nieistotny dla wytrzymałości doraźnej.

5.5. Rozkład naprężenia i stan odkształcenia połączeń klejowych

Kolejnym celem szczegółowym analizy numerycznej jest określenie udziału składowych naprężenia w spoinach połączeń klejowych jednorodnych i hybrydowych w stopniu ich wyężenia, charakterystyka zniszczenia połączeń, a także ocena poprawności przeprowadzenia eksperymentu. Istotnym elementem tej analizy jest ustalenie hipotezy wyężenia materiału do określania naprężenia zastępczego w spoinach klejowych, w których występuje złożony stan naprężenia.

5.5.1. Rozkład naprężenia normalnego

Zdaniem niektórych autorów (np. J. Kubissa [148, 149] oraz J. Godzimirski [101]) do określenia stopnia wyężenia spoiny klejowej jest korzystne zastosowanie hipotezy największego naprężenia normalnego dodatniego (rozciągającego). J. Godzimirski [95], analizując określone połączenia klejowe zakładkowe obciążone na zginanie oraz dwuzakładkowe obciążone na ścinanie zauważa, że przyjmując hipotezę największego naprężenia normalnego, stosunek wytrzymałości połączeń obciążonych na ścinanie do wytrzymałości połączeń na zginanie (R_t/R_{zg}) powinien wynosić 9,9. Natomiast zakładając hipotezę Hubera, stosunek ten powinien wynosić 28. Na podstawie badań eksperymentalnych uzyskano wartość tego stosunku od 10,5 do 11,1 (w zależności od wariantu przygotowania powierzchni), czyli znacznie bliższą wartości wynikającej z przyjęcia hipotezy największego naprężenia normalnego.

W pracy rozważaniom poddano naprężenie maksymalne główne oraz składowe naprężenia normalnego S33 oraz S13, które określają odpowiednio: naprężenie oddzierające oraz naprężenie ścinające. Naprężenie normalne, prostopadłe do powierzchni spoiny klejowej, jest określane w literaturze anglojęzycznej *peel stress* [16, 18, 43, 89, 105, 143, 172, 295, 301], a więc naprężenie oddzierające. Naprężenie to wyznaczono przy obciążeniu przed procesem zniszczenia, w którym żaden element nie utracił jeszcze sztywności. Określono także udział poszczególnych składowych naprężenia w ogólnym stopniu wyężenia spoin.

Otrzymane wyniki połączeń jednorodnych zamieszczono w tabeli 5.7 i tabeli 5.8. Można zauważyć, że wartość naprężenia maksymalnego głównego w spoinie klejowej wynosi od 21,57 do 29,74 MPa. Jest to zbliżona wartość naprężenia we wszystkich rozważanych modelach spoiny klejowej, która może świadczyć o poprawności przeprowadzenia eksperymentu, jak również o poprawności przyjętego modelu numerycznego spoiny kleju zastosowanego w badaniach doświadczalnych.

Tabela 5.7. Wartość naprężenia w spoinie klejowej jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopów aluminium i blach tytanowych, uzyskane na podstawie analizy numerycznej

Lp.	Rodzaj połączenia klejowego jednorodnego	Rodzaj naprężenia		
		Maksymalne główne, MPa	S33, MPa	S13, MPa
1	EN AW-2024PLT3; g = 0,64 mm	24,85	14,06	16,71
2	EN AW-2024PLT3; g = 1,00 mm	26,98	16,80	16,47
3	EN AW-7075PLT0; g = 0,80 mm	21,57	12,20	16,69
4	EN AW-7075PLT0; g = 1,00 mm	24,68	14,82	16,82
5	CPL1; g = 0,40 mm	27,00	16,13	16,98

Tabela 5.8. Wartość naprężenia w spoinie klejowej połączeń klejowych jednorodnych kompozytów polimerowych, uzyskane na podstawie analizy numerycznej

Lp.	Rodzaj połączenia klejowego jednorodnego	Rodzaj naprężenia		
		Maksymalne główne, MPa	S33, MPa	S13, MPa
1	Epoksydowo-szklany (2); g = 0,60 mm	29,74	20,19	16,93
2	Epoksydowo-aramidowy (4); g = 0,60 mm	28,28	18,33	16,89
3	Epoksydowo-grafitowy (6); g = 0,66 mm	26,63	17,10	16,94

W przypadku łączenia blach ze stopu aluminium (tabela 5.7 poz. 1-4) w większości przypadków nieznacznie większa jest wartość naprężenia stycznego (S13) w odniesieniu do naprężenia odzierającego. Może to świadczyć o większym udziale naprężenia stycznego w procesie niszczenia spoiny klejowej niż naprężenia powodującego oddzieranie (S33). Natomiast w przypadku kompozytów zaobserwowano większy udział naprężenia prostopadłego do powierzchni spoiny (S33) niż naprężenia stycznego (S13). Udział tego naprężenia może charakteryzować sposób zniszczenia połączeń jednorodnych kompozytów. Podczas eksperymentalnych badań niszczących zaobserwowano adhezyjno-kohezyjne zniszczenia spoiny klejowej. Może to wynikać ze zbliżonych wartości naprężenia stycznego i naprężenia odzierającego.

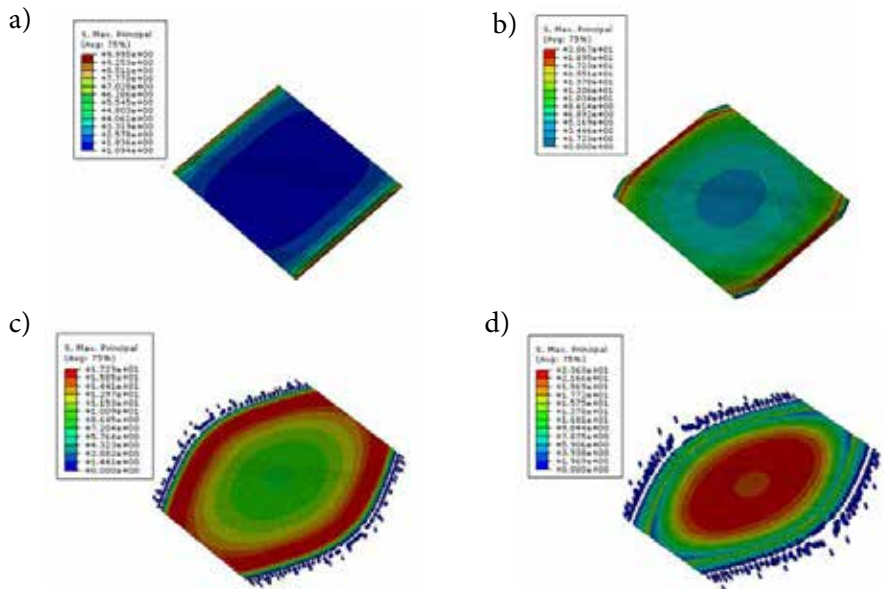
Rezultaty analizy MES naprężenia normalnego wybranych połączeń hybrydowych zamieszczono w tabeli 5.9.

Tabela 5.9. Wartość naprężenia w spoinie klejowej połączeń klejowych hybrydowych, uzyskane na podstawie analizy numerycznej

Lp.	Rodzaj połączenia klejowego hybrydowego	Rodzaj naprężenia		
		Maksymalne główne, MPa	S33, MPa	S13, MPa
1	Kompozyt epoksydowo-szklany (2) g = 0,60 mm/ Kompozyt epoksydowo-aramidowy (4); g = 0,60 mm	28,19	18,37	16,94
2	Kompozyt epoksydowo-aramidowy (4); g = 0,60 mm/ EN AW- 2024PLT3; g = 0,64 mm	26,64	15,73	17,00
3	EN AW-2024PLT3; g = 0,80 mm/CP3 g = 0,80 mm	27,54	16,89	17,00

Z rozpatrywania rozkładu naprężenia w spoinie klejowej połączeń hybrydowych (tabela 5.9) wynika, że w przypadku połączenia dwóch kompozytów (tab. 5.9, poz. 1) otrzymano większe wartości naprężenia oddzierającego niż naprężenia stycznego (podobnie jak przy połączeniach jednorodnych kompozytów).

Poszczególne etapy zniszczenia spoiny klejowej przykładowych jednorodnych połączeń klejowych blach aluminiowych EN AW-2024PLT3 o grubości g = 0,64 mm; przedstawiono na rys. 5.12.



Rys. 5.12. Etapy wyłączenia spoiny klejowej jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 (g = 0,64 mm): a) rozkład maksymalnego naprężenia głównego w zakresie sprężystym, b) inicjacja zniszczenia spoiny klejowej, c) oraz d) utrata sztywności elementów spoiny klejowej w kolejnych etapach obciążenia [225]

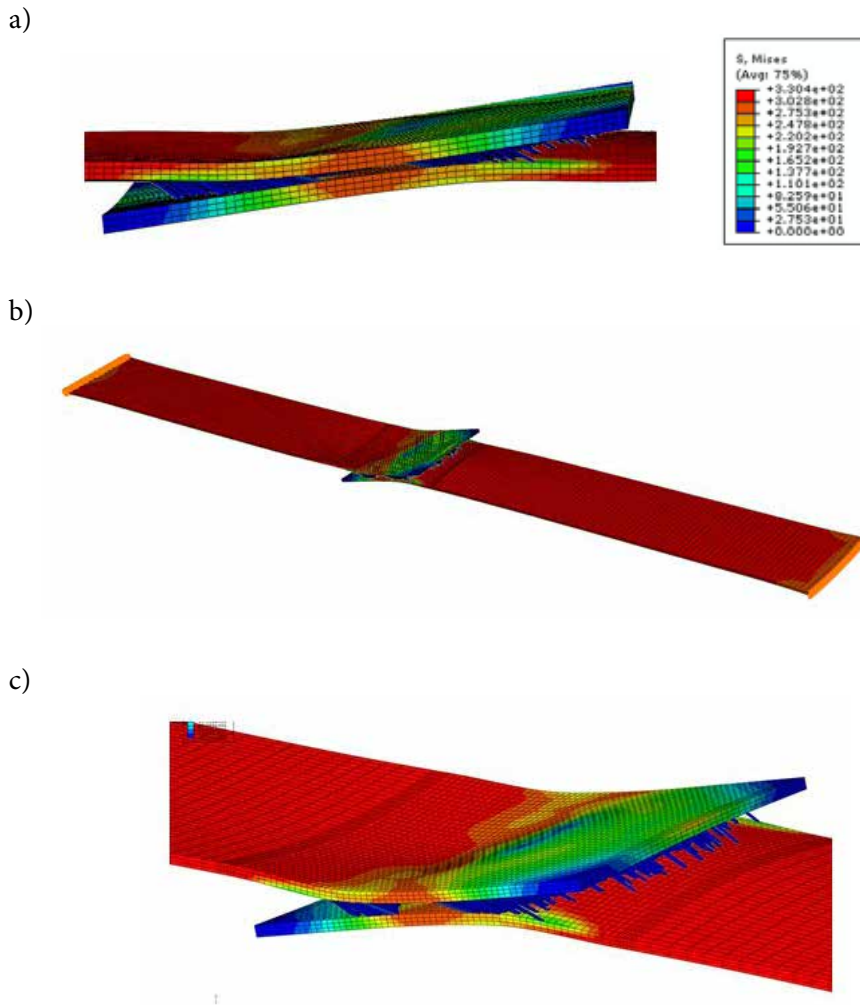
Według teorii Golanda-Reisnera [63, 95, 123] wartość maksymalnego naprężenia normalnego w spoinie klejowej połączenia zakładkowego występuje na krawędziach spoiny i można ją określić z zależności zamieszczonej m.in. w pracach [59, 95]. Przedstawione na rys. 5.12 rozkłady maksymalnego naprężenia normalnego w poszczególnych etapach obciążenia spoiny klejowej potwierdzają wyniki badań wcześniejszych [74, 95, 99, 105, 150, 224], dotyczących charakteru rozkładu naprężenia w połączeniu klejowym. Występowanie maksymalnego naprężenia normalnego wzdłuż krawędzi spoiny oraz bardzo małe jego wartości w obszarze środkowym zakładki klejowej (rys. 5.12.a) świadczą o występowaniu koncentracji naprężenia na końcach spoiny, co uwzględniono na etapie budowy modelu numerycznego, poprzez zagęszczenie siatki elementów skończonych w pobliżu krawędzi zakładki.

W wielu pracach [55, 74, 135, 143, 295] przeprowadzono analizę rozkładu naprężenia wzdłuż szerokości zakładki, która wykazała występowanie koncentracji maksymalnych naprężenia zredukowanego w narożach spoiny klejowej. Potwierdzają to wyniki zaprezentowane np. na rys. 5.12.b, gdzie początek procesu niszczenia kleju następuje właśnie w narożach spoiny klejowej. Na rys. 5.12.c oraz d zaprezentowano przebieg zniszczenia spoiny klejowej w dalszych etapach obciążania, aż do osiągnięcia wartości siły niszczącej.

5.5.2. Rozkład naprężenia zredukowanego (H-M-H) oraz stan odkształcenia

Do określenia rozkładów naprężenia w łączonych elementach blach tytanowych i blach ze stopu aluminium połączeń klejowych wykorzystano hipotezę wytrzymałościową Hubera-Misesa-Hencky'ego (H-M-H), na podstawie której określa się naprężenie zredukowane. Wyniki badań odniesiono do wybranych rodzajów materiałów występujących w połączeniach zarówno jednorodnych, jak i hybrydowych. Analiza numeryczna umożliwiła przedstawienie stanu odkształcenia elementów blach połączenia klejowego w warunkach działania obciążenia niszczącego.

Na rys. 5.13 zaprezentowano przykładowy stan odkształcenia elementów połączenia klejowego w warunkach zniszczenia spoiny klejowej oraz rozkład naprężenia zredukowanego w łączonych elementach blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 o grubości 0,64 mm. W rozważanym przypadku połączenia klejowego, zauważono osiągnięcie w elementach blach aluminiowych wartości naprężenia zredukowanego H-M-H wynoszącego $\sigma_z = 330$ MPa, przekraczającego wartość granicy plastyczności $R_e = 290$ MPa – rys. 5.7.a. Oznacza to, że w warunkach zniszczenia spoiny klejowej występują również odkształcenia plastyczne samych blach ze stopu aluminium, co potwierdzają również wyniki otrzymanych badań eksperymentalnych.



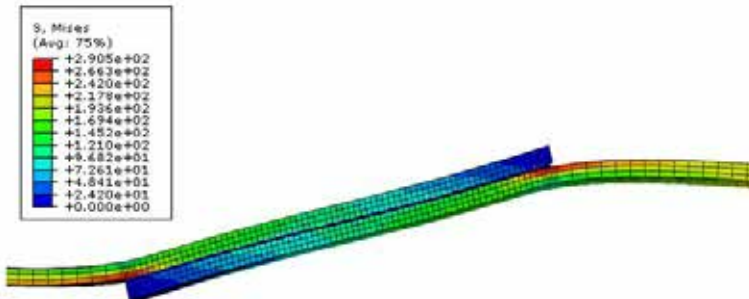
Rys. 5.13. Przykładowy stan odkształcenia elementów połączenia klejowego blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 o grubości 0,64 mm: a, b, c) rozkład naprężenia zredukowanego H-M-H

Porównanie stanu odkształcenia jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 i EN AW-2024PLT3 o grubości 1 mm zamieszczono na rys. 5.14.

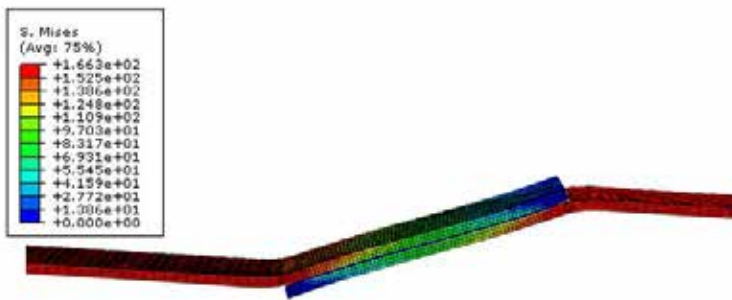
Na podstawie przedstawionych wyników stanu odkształcenia połączeń klejowych analizowanych materiałów można zauważyć pewne różnice odkształcenia klejonych elementów. Sposób odkształcenia połączenia klejowego blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 świadczy o występowaniu odkształceń sprężystych

(rys. 5.14.a). Natomiast w przypadku jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 (rys. 5.14.b) jest zauważalne odkształcenie plastyczne blach. Uzyskane rozkłady odkształcenia są zgodne z wynikami innych autorów [16, 98, 259, 289, 328].

a)



b)

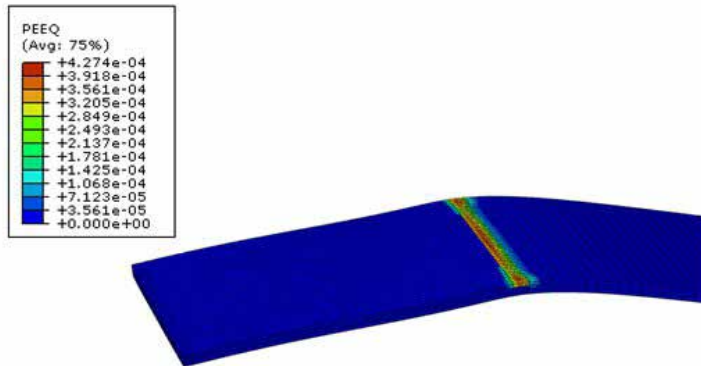


Rys. 5.14. Stan odkształcenia połączeń jednorodnych blach ze stopów aluminium: a) EN AW-7075PLT0, $g = 1 \text{ mm}$, b) EN AW-2024PLT3, $g = 1 \text{ mm}$; rozkład naprężenia zredukowanego H-M-H

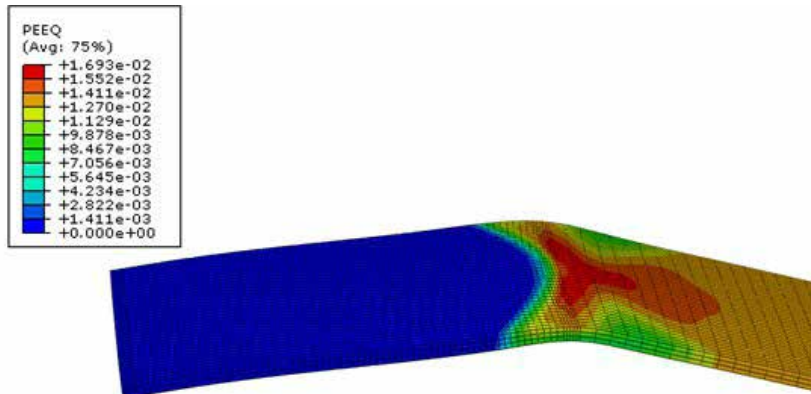
Z danych zamieszczonych w tabeli 5.1 wynika, że wartość siły niszczącej połączenia klejowe blach z stopu aluminium EN AW-2024PLT3 jest znacznie większa niż ze stopu EN AW-7075PLT0, a ponadto wartości naprężenia zredukowanego w przypadku stopu EN AW-2024PLT3 przekraczają granicę plastyczności (rys. 5.13), co może być przyczyną znacznych odkształceń plastycznych, przyczyniających się do zmniejszenia tzw. wtórnego momentu gnącego, powodującego oddzieranie spoiny klejowej. W efekcie tego wytrzymałość jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 jest większa niż blach ze stopu EN AW-7075PLT0.

Na rys. 5.15 zaprezentowano odkształcenia analizowanych połączeń.

a)



b)



Rys. 5.15. Odształcenia jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopów aluminium: a) EN AW-7075PLT0, $g = 1 \text{ mm}$ ($\epsilon = 0,0004$); b) EN AW-2024PLT3, $g = 1 \text{ mm}$ ($\epsilon = 0,0169$)

Przy obciążeniu niszczącym jednorodne połączenia klejowe blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 (rys. 5.15.b) występuje znaczne odkształcenie plastyczne blach łączonych. Natomiast odkształcenie w przypadku jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 (rys. 5.15.a) jest niewielkie.

5.6. Wnioski i ustalenia

Przeprowadzona analiza numeryczna połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych, metodą elementów skończonych, stanowiła uzupełnienie i rozwinięcie badań eksperymentalnych. Wśród celów tej analizy należy wymienić opracowanie modelu numerycznego spoiny klejowej oraz połączeń klejowych adekwatnych do rzeczywistych połączeń, określenie rozkładu naprężenia w spoinach oraz elementach połączeń klejowych, zgodnie z przyjętymi hipotezami wytrzymałościowymi, analizę stanu odkształcenia połączeń oraz przedstawienie wybranych zagadnień procesu niszczenia spoiny klejowej.

Jednym z celów przeprowadzonej analizy numerycznej było opracowanie, zgodnie z przyjętą metodyką, modelu numerycznego spoiny klejowej, odniesionego do kleju stosowanego w badaniach doświadczalnych. Realizacja tego zadania polegała na przeprowadzeniu wielu prób modelowania spoiny klejowej oraz połączenia, podczas których weryfikowano opracowywane modele z wynikami eksperymentu, a końcowym efektem było otrzymanie modelu numerycznego spoiny klejowej odniesionej do kleju oraz połączeń rzeczywistych poddanych badaniom eksperymentalnym. Porównanie wartości sił niszczących połączenia klejowe, uzyskanych w badaniach doświadczalnych oraz w wyniku analizy numerycznej, wykazało w większości przypadków, dużą zgodność wyników. Występujące w niektórych przypadkach różnice pomiędzy wartościami sił niszczących (maksymalnie od 10% do 20%) mogą być wynikiem m.in. przyjmowania pewnych założeń upraszczających, jak również rozrzutów wyników badań doświadczalnych. Otrzymane wyniki, zarówno analizy numerycznej, jak i eksperymentu, są zgodne jakościowo z teorią Volkersena. Potwierdza to zarówno poprawność przygotowanego modelu połączenia klejowego, jak i poprawność wykonanych badań.

Zastosowanie w opracowanych modelach numerycznych spoiny klejowej elementów typu *cohesive* umożliwiło przedstawienie początku niszczenia spoiny klejowej. Zdaniem niektórych autorów początek niszczenia spoiny klejowej powinien być przyjmowany jako nośność całego połączenia. Zaprezentowany sposób modelowania połączenia klejowego umożliwia przedstawienie poszczególnych etapów niszczenia spoiny klejowej głównie na skutek utraty sztywności poprzez kolejne elementy spoiny, które następnie są eliminowane z dalszych obliczeń. Pozwala to również na wizualizację przebiegu zniszczenia spoiny, polegającego na utracie sztywności kolejnych elementów kleju. Ponadto potwierdzono rezultaty niektórych badań, że proces niszczenia nie zachodzi raptownie, a jest rozciągnięty w czasie.

W większości przypadków obciążenie inicjujące zniszczenie jest bliskie obciążeniu niszczącemu dla przyjętej wartości procentowej początku inicjacji zniszczenia określonej 70%-80% utratą sztywności elementów skończonych. Inicjacja zniszczenia oraz początek całkowitego zniszczenia połączenia następują przy bar-

dzo zbliżonej wartości siły obciążającej. Może być to spowodowane m.in. właściwościami kleju stosowanego w badaniach. Można przypuszczać, że w przypadku kleju elastycznego czas, od chwili inicjacji do całkowitego zniszczenia połączenia, będzie znaczenie dłuższy. Umiejętność określenia początku inicjacji zniszczenia jest przydatna zarówno podczas projektowania połączenia, jak również w czasie użytkowania.

Wyniki analiz numerycznych wybranych połączeń jednorodnych wykazały wpływ odkształceń plastycznych klejonych elementów na proces niszczenia spoiny klejowej. W połączeniach, w których elementy klejone ulegają odkształceniom plastycznym można zauważyć wzrost siły niszczącej (wzrost wytrzymałości) na skutek zmniejszenia się naprężenia oddzierającego spowodowanego działaniem momentów wtórnych. Identyczne wymiarowo połączenia, w których nie wystąpiły odkształcenia plastyczne cechowała mniejsza wytrzymałość.

Analiza numeryczna w przedstawionym zakresie może stanowić znaczące uzupełnienie badań doświadczalnych, pozwalając także na wizualizację zachowania się połączenia klejowego podczas niszczenia, co w przypadku badań doświadczalnych, z zastosowaniem metod eksperymentalnych, zwłaszcza standardowych, w wielu przypadkach jest niemożliwe. Funkcja obrazowania rozkładu naprężenia w elementach połączenia pozwala na wskazanie miejsc newralgicznych połączeń ze względu na występowanie naprężenia maksymalnego. Dzięki temu istnieje możliwość przeciwdziałania niekorzystnym skutkom obciążeń połączenia, np. poprzez zmiany konstrukcyjne lub zmiany rodzaju obciążeń, przy czym jest możliwa szybka weryfikacja zaprojektowanego połączenia MES.

Wykorzystując metodę elementów skończonych do analizy połączeń klejowych należy uwzględnić problemy modelowania połączeń klejowych, wpływające na dokładność obliczeń, a wynikające m.in. z konieczności posiadania dokładnych danych materiałowych, zwłaszcza ich zmienności w czasie spowodowanych starzeniem. Powoduje to konieczność przyjmowania określonych założeń upraszczających, a także kalibrację [273] modelu numerycznego z modelem rzeczywistym.

Rozdział 6.

Podsumowanie i wnioski

6.1. Podsumowanie

Podstawowym zadaniem przeprowadzonych badań oraz analiz było pozyskanie i pogłębienie wiedzy mającej istotne znaczenie podczas projektowania procesu technologicznego wykonywania połączeń adhezyjnych jednorodnych (tzn. wykonanych z takich samych materiałów konstrukcyjnych) i hybrydowych (czyli połączenia materiałów o różnych właściwościach i strukturach), coraz częściej występujących w wielu różnorodnych konstrukcjach. W tym celu zrealizowano wiele badań doświadczalnych związanych zarówno z określeniem charakterystyki powierzchni badanych materiałów konstrukcyjnych, jak i z określeniem wytrzymałości połączeń klejowych, rozszerzonych o analizę numeryczną połączeń jednorodnych i hybrydowych.

Zagadnienia wytwarzania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych zawierały ocenę możliwości konstytuowania właściwości adhezyjnych powierzchni łączonych elementów decydujących o wytrzymałości połączeń. W badaniach przyjęto jedną z podstawowych możliwości wpływania na zmiany tych właściwości, a mianowicie zastosowanie różnych sposobów przygotowania powierzchni rozpatrywanych materiałów.

Powierzchnia łączonych materiałów została scharakteryzowana przez strukturę geometryczną oraz jej właściwości adhezyjne. Właściwości te określono za pomocą swobodnej energii powierzchniowej, wyznaczonej metodą Owensa-Wendta, jednej z częściej stosowanych metod w odniesieniu do ciał stałych.

Badania wytrzymałości oraz analiza numeryczna zostały przeprowadzone dwuetapowo. W pierwszym etapie przedmiotem badań i analiz były połączenia klejowe jednorodne, w drugim natomiast, połączenia hybrydowe. Wybór niektórych połączeń materiałów wynikał z ich stosowania w rzeczywistych konstrukcjach lub możliwości zastosowania w konstrukcjach przyszłościowych. W przypadku oceny właściwości adhezyjnych przedmiotem badań były powierzchnie kompozytów polimerowych oraz blach ze stopu aluminium i blach tytanowych. W badaniach wytrzymałości połączeń jednorodnych uwzględniono połączenia wykonane z wymienionych materiałów, natomiast badania połączeń klejowych hybrydowych zostały przeprowadzone w odniesieniu do następujących połączeń materiałów: blacha ze stopu aluminium-blacha tytanowa, kompozyt polimerowy-blacha ze stopu aluminium, kompozyt polimerowy-blacha tytanowa.

6.2. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych właściwości adhezyjnych materiałów łączonych wykazano, że wykorzystane sposoby przygotowania powierzchni modyfikują jej cechy geometryczne, określone poprzez parametry chropowatości oraz wpływają na wartość swobodnej energii powierzchniowej, będącej sumą składowej dyspersyjnej oraz polarnej.

Zastosowanie operacji oczyszczania chemicznego nie wpływa istotnie na zmiany cech geometrycznych powierzchni.

Obserwowano znaczne zmiany cech geometrycznych powierzchni badanych materiałów po obróbce mechanicznej, przy czym jest to uzależnione od rodzaju materiału. W przypadku blach z stopu aluminium oraz blach tytanowych obróbka ta przyczyniła się do wzrostu parametrów chropowatości powierzchni. W odniesieniu do kompozytu, parametry chropowatości powierzchni po obróbce mechanicznej mają nieznacznie większe wartości niż powierzchnie niepoddane takiej obróbce.

W większości przypadków sposób przygotowania powierzchni wpływa istotnie na wartość swobodnej energii powierzchniowej oraz na różny udział składowej dyspersyjnej i składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej.

Operacja oczyszczania chemicznego wpływa korzystnie na wzrost wartości swobodnej energii powierzchniowej materiałów. Jednakże zastosowanie operacji oczyszczania chemicznego po obróbce mechanicznej, w wielu przypadkach zmniejsza wartość swobodnej energii powierzchniowej w porównaniu z jej wartością określoną po zastosowaniu tylko obróbki mechanicznej.

Obróbka mechaniczna powoduje zwiększanie wartości swobodnej energii powierzchniowej w porównaniu z wartością uzyskaną tylko po oczyszczeniu chemicznym lub też z powierzchnią bez obróbki przygotowawczej. W wielu przypadkach powierzchnie materiałów po obróbce mechanicznej charakteryzują się największą wartością swobodnej energii powierzchniowej.

Specjalne rodzaje obróbek przygotowawczych, tj. głównie anodowanie, chromianowanie oraz trawienie, umożliwiają uzyskanie bardzo dobrych właściwości adhezyjnych, charakteryzowanych dużą wartością swobodnej energii powierzchniowej. Jednak przy ocenie możliwości zastosowania wymienionych sposobów przygotowania powierzchni jest konieczna analiza zagadnień technologicznych tych obróbek oraz właściwości uzyskanych warstewek.

Rozwinięcie powierzchni w wyniku stosowania różnych metod przygotowania powierzchni, nie zawsze wpływa na wzrost właściwości adhezyjnych. Kilkukrotne zwiększenie wartości parametrów chropowatości powierzchni nie powoduje proporcjonalnego zwiększenia wartości swobodnej energii powierzchniowej. W celu pełniejszego określenia przydatności danej powierzchni do wykonywania

połączeń adhezyjnych jest konieczne przeprowadzenie analizy zarówno struktury geometrycznej powierzchni, jak i właściwości adhezyjnych powierzchni badanych materiałów. Wynika to z faktu, że struktura geometryczna powierzchni może wpływać na adhezję mechaniczną (będącą jedną ze składowych adhezji), a swobodna energia powierzchniowa jest związana zarówno z adhezją mechaniczną, jak i z drugą składową zjawiska adhezji – adhezją specyficzną (właściwą).

Z badań wytrzymałościowych połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych wynikają następujące wnioski.

Operacja oczyszczania chemicznego ma znaczący wpływ na zwiększenie wytrzymałości połączeń adhezyjnych. Wytrzymałość połączeń wzrosła od około 10% (jednorodne połączenia klejowe blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0) do 70÷80% (jednorodne połączenia klejowe blach tytanowych).

Zastosowanie obróbki mechanicznej w wielu przypadkach może być wystarczającym sposobem na uzyskanie wymaganej wytrzymałości połączeń adhezyjnych.

Wpływ oczyszczania chemicznego po obróbce mechanicznej na wytrzymałość połączeń klejowych uzależniony jest od rodzaju materiału. Wytrzymałość jednorodnych połączeń klejowych blach tytanowych po obróbce mechanicznej stanowi od 66% do 82% wartości wytrzymałości połączeń po obróbce mechanicznej połączonej z oczyszczaniem chemicznym. Natomiast w przypadku jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium otrzymano niewielki wzrost wytrzymałości tych połączeń po zastosowaniu oczyszczania chemicznego po obróbce mechanicznej.

Specjalne metody przygotowania powierzchni stopów aluminium, takie jak np. anodowanie lub chromianowanie, umożliwiają otrzymanie dużej wytrzymałości połączeń adhezyjnej.

Połączenia klejowe hybrydowe utworzone z materiałów o różnych właściwościach fizycznych uzyskują często większą wytrzymałość niż połączenia klejowe jednorodne materiałów, których wytrzymałość jest mniejsza.

Na podstawie badań wpływu swobodnej energii powierzchniowej na wytrzymałość połączeń jednorodnych oraz hybrydowych, można sformułować następujące wnioski.

Bardziej reprezentatywną wielkością pozwalającą określić wpływ właściwości adhezyjnych na wytrzymałość połączeń klejowych jest składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej. W zdecydowanej większości przypadków połączeń jednorodnych oraz hybrydowych istnieje korelacja pomiędzy wartością składowej dyspersyjnej swobodnej energii powierzchniowej a wytrzymałością. Większe wartości tej wielkości zazwyczaj przyczyniają się do wzrostu wytrzymałości połączeń klejowych jednorodnych i hybrydowych.

W przypadku połączeń hybrydowych zmiany wytrzymałości zależą głównie od zmiany wartości składowej dyspersyjnej swobodnej energii powierzchniowej materiału o większej wartości tej składowej.

Występuje różna intensywność zmian wytrzymałości w odniesieniu do zmian składowej dyspersyjnej swobodnej energii powierzchniowej materiałów połączeń klejowych hybrydowych, a mianowicie im mniejsza jest różnica pomiędzy wartościami swobodnej energii powierzchniowej materiałów tworzących układ hybrydowy, tym mniejsza jest wytrzymałość tych połączeń.

W przypadku zastosowania obróbki mechanicznej, jako sposobu przygotowania powierzchni do klejenia, występują największe rozrzuty wartości składowej dyspersyjnej swobodnej energii powierzchniowej, co może wskazywać na nierównomierność uzyskiwanych właściwości adhezyjnych.

Na podstawie analizy numerycznej połączeń klejowych jednorodnych i hybrydowych, za pomocą metody elementów skończonych (MES), sformułowano ważniejsze wnioski:

Zastosowanie metody elementów skończonych pozwala na określenie udziału poszczególnych składowych stanu naprężenia w wyężeniu spoin i łączonych elementów, zgodnie z przyjętymi hipotezami wytrzymałości.

We wszystkich przypadkach połączeń jednorodnych i hybrydowych na podstawie wyników analiz numerycznych, wnioskowano o adhezyjno-kohezyjnym charakterze zniszczenia spoiny klejowej, co potwierdziły także badania doświadczalne, w związku z czym można przyjąć, że zaproponowany model numeryczny spoiny klejowej został poprawnie opracowany, uwzględniając właściwości kleju zastosowanego do wykonania połączeń klejowych.

Wyniki analiz numerycznych dla wybranych połączeń jednorodnych pozwoliły na potwierdzenie udziału odkształceń plastycznych klejonych elementów w procesie niszczenia spoiny klejowej. W połączeniach, w których łączone elementy ulegają odkształceniom plastycznym uzyskuje się większą wytrzymałość, na skutek zmniejszenia się naprężeń oddzierających. W połączeniach, w których występują odkształcenia sprężyste, uzyskano mniejszą wytrzymałość.

Zaprezentowany sposób modelowania połączenia klejowego, w którym zastosowano elementy typu *cohesive*, pozwolił na wizualizację poszczególnych etapów niszczenia spoiny klejowej. W połączeniach klejowych jednorodnych początek procesu zniszczenia spoiny klejowej następował w przedziale 91÷99 % wartości siły niszczącej. W przypadku połączeń hybrydowych wartość siły inicjującej zniszczenie jest prawie taka sama jak wartość siły niszczącej.

Porównanie wyników badań doświadczalnych oraz przeprowadzonych analiz numerycznych w niniejszej rozprawie z jej tezami badawczymi i celami stanowi podstawę do stwierdzenia, że tezy badawcze zostały zweryfikowane metodami naukowymi, a cele rozprawy osiągnięte. Wykazano bowiem, że:

- właściwości adhezyjne powierzchni materiałów tworzących połączenie adhezyjne charakteryzowane swobodną energią powierzchniową i jej składowymi: polarną i dyspersyjną można konstituować, stosując różne technologie przygotowania powierzchni,
- składowe swobodnej energii powierzchniowej (polarna i dyspersyjna) w różny sposób wpływają na wytrzymałość połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych, przy czym wytrzymałość doraźna połączeń adhezyjnych jest silniej skorelowana ze składową dyspersyjną swobodnej energii powierzchniowej niż składową polarną; składową dyspersyjną można wykorzystać do prognozowania wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych hybrydowych;
- wytrzymałość połączeń klejowych hybrydowych dwóch różnych materiałów jest inna niż połączeń klejowych jednorodnych wykonanych z tych materiałów, pomimo zastosowania takiego samego rodzaju kleju i technologii klejenia,
- analiza numeryczna metodą elementów skończonych połączeń klejowych hybrydowych ułatwia interpretację wyników badań doświadczalnych wytrzymałości połączeń klejowych (w których istotna była analiza właściwości adhezyjnych) poprzez uwzględnienie właściwości fizycznych łączonych materiałów.

Przeprowadzone prace studialne, badania oraz analizy stanowią istotny wkład w poznanie, pogłębienie i uzupełnienie zagadnień konstituowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych, w zakresie:

- przedstawienia możliwości konstituowania właściwości adhezyjnych powierzchni materiałów tworzących połączenia za pomocą różnych technologii;
- zaprezentowania zróżnicowanego wpływu składowych swobodnej energii powierzchniowej na wytrzymałość doraźną połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych;
- określenia wielkości fizycznej (składowej dyspersyjnej swobodnej energii powierzchniowej), która może zostać wykorzystana do prognozowania wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych hybrydowych;
- przedstawienia zależności pomiędzy wytrzymałością połączeń adhezyjnych jednorodnych a wytrzymałością połączeń hybrydowych,
- opracowania modelu numerycznego spoiny klejowej i połączeń klejowych z wykorzystaniem specjalnego rodzaju elementów *cohesive*,
- określenia początku inicjacji zniszczenia połączeń klejowych jednorodnych i hybrydowych,
- potwierdzenia udziału odkształceń plastycznych klejonych elementów w procesie niszczenia spoiny klejowej.

Wnioski i spostrzeżenia wynikające z przeprowadzonych badań wskazują na potrzebę intensyfikacji prac badawczych, zwłaszcza w obszarze badań właściwości chemicznych powierzchni łączonych materiałów w układach hybrydowych, po specyficznych sposobach przygotowania ich powierzchni. Połączenia klejowe hybrydowe stanowią ciągle niedostatecznie poznany obszar badań wymagający dalszych pogłębionych analiz.

Wybrane zagadnienia konstituowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych

Streszczenie

Przedmiotem monografii jest przedstawienie wybranych zagadnień związanych z konstituowaniem połączeń adhezyjnych jednorodnych (połączeń elementów z takich samych materiałów konstrukcyjnych) i hybrydowych, złożonych z materiałów konstrukcyjnych różniących się właściwościami m.in. mechanicznymi. Podstawowym zadaniem przeprowadzonych badań oraz analiz było pozyskanie i pogłębienie wiedzy mającej istotne znaczenie podczas projektowania procesu technologicznego wykonywania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych. W tym celu zrealizowano badania doświadczalne związane zarówno z określeniem charakterystyki powierzchni badanych materiałów konstrukcyjnych, jak i z określeniem wytrzymałości połączeń klejowych, rozszerzone o analizę numeryczną połączeń jednorodnych i hybrydowych. Zagadnienia wytwarzania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych zawierały ocenę możliwości konstituowania właściwości adhezyjnych powierzchni łączonych elementów decydujących o wytrzymałości połączeń. W badaniach przyjęto jedną z podstawowych możliwości wpływania na zmiany tych właściwości, a mianowicie zastosowanie różnych sposobów przygotowania powierzchni rozpatrywanych materiałów. Wykazano, że właściwości adhezyjne powierzchni materiałów tworzących połączenie adhezyjne, charakteryzowane swobodną energią powierzchniową i jej składowymi: polarną i dyspersyjną, można konstituować stosując różne technologie przygotowania powierzchni, oraz że wytrzymałość doraźna połączeń adhezyjnych jest silniej skorelowana ze składową dyspersyjną swobodnej energii powierzchniowej niż składową polarną. Ponadto stosując taką samą technologię klejenia i ten sam rodzaj kleju otrzymano inną (w wielu przypadkach większą) wytrzymałość połączeń klejowych hybrydowych niż wytrzymałość połączeń jednorodnych wykonanych z tych materiałów. Zauważono, że operacja oczyszczania chemicznego ma znaczący wpływ na zwiększenie wytrzymałości połączeń adhezyjnych. Analiza numeryczna metodą elementów skończonych połączeń klejowych hybrydowych umożliwia poszerzenie interpretacji wyników badań doświadczalnych wytrzymałości połączeń klejowych (w których istotna była ocena właściwości adhezyjnych), poprzez uwzględnienie właściwości fizycznych łączonych materiałów. Monografię zakończono podsumowaniem oraz wnioskami o charakterze poznawczym i utylitarnym.

Literatura

1. *Abaqus/Standard User's Manual version 6.5*, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. 2005.
2. Abdel Wahab M.M., Ashcroft I.A., Crocombe A.D., Smith P.A.: *Finite element prediction of fatigue crack propagation lifetime in composite bonded joints. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2004, 35, 213-222.
3. Abdel Wahab M.M., Hilmy M.M., Ashcroft I.A., Crocombe A.D.: *Evaluation of fatigue damage in adhesive bonding: Part 2: Single lap joint*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2010, 24, 325-345.
4. Abdo Z., Aglan H.: *Analysis of aircraft adhesive joints under combined thermal and mechanical cyclic loadings*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 1997, 11, 941-956.
5. Acar A., İnan Ö., Halkacı S.: *Effects of airborne-particle abrasion, sodium hydroxide anodization, and electrical discharge machining on porcelain adherence to cast commercially pure titanium*. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 2007, vol. 82B, 267-274.
6. Adams R.D., Coppendale J., Mallick V., Al.-Hamdan H.: *The effect of temperature on the strength of adhesive joint*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1992, 12, 2185-190.
7. Adams R.D., Harris J.A.: *The influence of local geometry on the strength of adhesive joints*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1987, 7, 69-75.
8. Adamus J.: *Wybrane problemy kształtowania blach tytanowych*. *Obróbka Plastyczna Metali*, 2008, 3, 29-36.
9. Adão M.H.V.C., Saramago B.J., Fernandes A.C.: *Estimation of the surface properties of styrene-acrylonitrile random copolymers from contact angle measurements*. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1999, 217, 319-328.
10. Ageorges C., Ye L.: *Fusion Bonding of Polymer Composites*. Springer, Great Britain, 2002.
11. Ahadian S., Mohseni M., Morawian S.: *Ranking proposed models for attaining surface free energy of powders using contact angle measurements*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2009, 29, 458-469.

12. Ajaev V.S., Gambaryan-Roisman T., Stephan P.: *Static and dynamic contact angles of evaporating liquids on heated surfaces*. Journal of Colloid and Interface Science, 2010, 342, 550-558.
13. Andruet R.H., Bilard D.A., Holzer S.M.: *Two- and three dimensional geometrical nonlinear finite elements for analysis of adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2001, 21, 17-34.
14. Apalak M.K., Engin A.: *Effect of adhesive free-end geometry on the initiation and propagation of damaged zones in adhesively bonded lap joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004, 18, 529-559.
15. Arenas J.M., Narbón J.J., Alía C.: *Optimum adhesive thickness in the structural adhesives joint using statistical techniques based on Weibull distribution*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010, 30, 160-165.
16. Ávila A., de O. Bueno P.: *Stress analysis on a wavy-lap bonded joint for composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2004; 24, 407-414.
17. Awaja F., Gilbert M., Kelly G., Fox B., Pigram P.J.: *Adhesion of polymers*. Progress in Polymer Science, 2009, 34, 948-968.
18. Aydin M.D., Özel A., Temiz Ş.: *Non-linear stress and failure analyses of adhesively-bonded joints subjected to a bending moment*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004, 18, 1589-1602.
19. Babraj E.G., Starikov D., Evans J., Shafeev G.A., Bensaoula A.: *Enhancement of adhesive joint strength by laser surface modification*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007, 27, 268-276.
20. Baldan A.: *Adhesion phenomena in bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012, 38, 95-116.
21. Baney A.M., Hui C.-Y.: *A cohesive zone model for adhesion of cylinders*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1997, 11, 393-406.
22. Barberis F., Capurro M.: *Wetting in the nanoscale: A continuum mechanics approach*. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 326, 201-210.
23. Baroud Ch.N., Wang X.C., Masson J.-B.: *Collective behavior during the exit of a wetting liquid through a network of channels*. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 326, 445-450.
24. Bay F., Bouchard P.O., Darque-Ceretti E., Felder E., Scotto-Sheriff S.: *Numerical and experimental analyses of fracture mechanics test for adhesively bonded joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1999, 13, 931-957.
25. Bayer I.S., Megaridis C.M., Hang J., Gamota D., Biswas A.: *Analysis and surface energy estimation of various model polymeric surfaces using contact angle hysteresis*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007, 29, 1439-1467.
26. Bénard Q., Fois M., Grisel M., Laurens P.: *Surface treatment of carbon/epoxy composites with an excimer laser beam*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006, 26, 534-549.

27. Bernard Q., Fois M., Grisel M.: *Influence of fibre reinforcement and peel ply surface treatment towards adhesion of composite surface*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2005, 25, 404-409.
28. Berndt C.C., Lin C.K.: *Measurement of adhesion for thermally sprayed materials*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1993, 7, 1235-1264.
29. Bhowmik S., Bonin H.W., Bui V.T., Weir R.D.: *Durability of adhesive bonding of titanium in radiation and aerospace environments*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006, 26, 400-405.
30. Bhowmik S., Ghosh P.K., Ray S., Barthwal K.: *Surface modification of high density polyethylene and polypropylene by DC glow discharge and adhesive bonding to steel*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1998, 12, 1181-1204.
31. Białopiotrowicz T.: *Influence of erroneous data on the results of calculations from acid-base surface free energy theories. I. Simulations for a small input data set*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007, 21, 1539-1556.
32. Bikerman J.: *The Science of Adhesive Joints*. New York, Academic Press 1968.
33. Birdi K.S., Vu D.T.: *Wettability and evaporating rate of fluids from solid surfaces*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1993, 7, 485-493.
34. Bociąga E., Sikora R.: *Constitution of the Top Layer of Plastics*. Conference Materiale. The Polymer Processing Society, Europe/Africa Region Meeting, Gothenburg, Sweden 1997, 4-11.
35. Bordes M., Davies P., Cognard J.-Y., Sohier L., Sauvart-Moynot V., Galy J.: *Prediction of long term strength of adhesively bonded steel/epoxy joints in sea water*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29, 595-608.
36. Borisenko K.B., Evangelou E.A., Zhao Q., Abel E.W.: *Contact angle of diiodomethane on silicon-doped diamond-like carbon coatings in electrolyte solutions*. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 326, 329-332.
37. Borsalino C., Calabrese L., Di Bella G., Valenza A.: *Comparisons of processing and strength properties of two adhesive systems for composite joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007, 27, 446-457.
38. Brockmann W., Geiß P.L., Klingen J., Schröder B.: *Adhesive bonding. Materials, Applications and Technology*. Wiley-Vch Press, Weinheim, Niemcy 2009.
39. Brown S.D.: *Adherence failure and measurement: some troubling question*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1994, 8, 687-711.
40. Buchman A., Weinstein F., Hönigsberg I., Holdengraber Y., Dodiuk H.: *Stress analysis and testing of parallel and tapered adhesive butt joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1993, 7, 385-397.
41. Buchowiecki R., Rodak T., Szymanek M.: *Wytrzymałość zmęczeniowa połączeń klejonych*. Przegląd Mechaniczny, 1981, 13, 11-13.
42. Burakowski T., Wierzchoń T.: *Inżynieria powierzchni metali*. WNT, Warszawa 1995.

43. Camilho R.D.S.G., de Moura M.F.S.F., Ramantani D.A., Morais J.J.L., Domingues J.J.M.S.: *Tensile behaviour of tree-dimensional carbon-epoxy adhesively bonded single- and double-strap repairs*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29, 678-686.
44. Castagnetti D., Dragoni E.: *Standard finite element techniques for efficient stress analysis of adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29, 125-135.
45. Cheney G., Markgraf D.A., Benson M.: *Statistical analysis of the effects of ozone on adhesion in the extrusion coating process*. Dostępny na stronach: <http://www.enerconind.com> (luty 2010).
46. Cheuk P.T., Tong L., Rider A.N., Wang J.: *Analysis of energy release for fatigue cracked metal-to-metal double-lap shear joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives 2005, 56, 181-191.
47. Chibowski E., González-Caballero F.: *Interpretation of contact angle hysteresis*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1993, 7, 1195-1209.
48. Chibowski E., Holysz L.: *On the use of Washburn's equation for contact angle determination*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1997, 11, 1289-1301.
49. Choupani N.: *Characterization of fracture in adhesively bonded double-lap joint*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29, 761-773.
50. Ciesielski L., Ciesielska D.: *Zachowanie się sklejin epoksydowych w warunkach długotrwałego obciążenia*. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Mechanika, 1975, 17, 75-83.
51. Cisek Z., Zielecki W.: *Wyznaczanie maksymalnych naprężeń w połączeniach klejowych w warunkach oddzierania*. Technologia i Automatyzacja Montażu, 1994, 2, 19-22.
52. Cohen L.B.: *Zirconium aluminate adhesion promoters*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1991, 5, 439-448.
53. Comyn J.: *Contact angles and adhesive bonding*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1992, 12, 145-149.
54. Critchlow G.W., Yendall K.A., Bahrani D., Quinn A., Andrews F.: *Strategies for the replacement of chromic acid anodizing for the structural bonding of aluminium alloys*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006, 26, 419-453.
55. Crocombe A.D., Hua Y.X., Loh W.K., Wahab M.A., Ashcroft I.A.: *Predicting the residual strength for environmentally degraded adhesive lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006, 26, 325-336.
56. Custódio J., Broughton J., Cruz H., Winfield P.: *Activation of timber surface by flame and corona treatments to improve adhesion*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29, 167-172.

57. Czaplicki J.: *Wytrzymałość krótkotrwała połączeń klejonych duralu z laminatem epoksydowo-szklanym w podwyższonych i obniżonych temperaturach*. Naukowe problemy konstrukcji i technicznej eksploatacji sprzętu lotniczego. Warszawa 1977, 209-2212.
58. Czaplicki J.: *Wpływ sposobu przygotowania, przetrzymywania i pobierania spoiw epoksydowych do wykonywania połączeń klejonych duralu z laminatem epoksydowo-szklanym na wytrzymałość tych złącz*. Naukowe problemy konstrukcji i technicznej eksploatacji sprzętu lotniczego. Warszawa 1979, 201-206.
59. Czaplicki J., Ćwikliński J., Godzimirski J., Konar P.: *Klejenie tworzyw konstrukcyjnych*, WKiŁ, Warszawa 1987.
60. Czub P. Bończa-Tomaszewski Z., Penczek P., Pieluchowski J.: *Chemia i technologia żywic epoksydowych*. WNT, Warszawa 2002.
61. da Silva L.F.M., Adams R.D.: *Adhesive joint at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007, 27, 216-226.
62. 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, 2007, 27, 227-235.
63. da Silva L.F.M., das Neves P.J.C., Adams R.D., Wang A., Spelt J.K.: *Analytical models of adhesively bonded joints Part II: Comparative study*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29, 331-341.
64. Dalet P., Papon E., Villenave J.-J.: *Surface free energy of polymeric materials: relevancy of conventional contact angle data analyses*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1999, 13, 857-870.
65. de Morais A.B., Pereira A.B., Teixeira J.P., Cavaleiro N.C.: *Strength of epoxy adhesive-bonded stainless-steel joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007, 27, 679-686.
66. de Moura M.F.S.F., Daniaud R., Magalhaes A.G.: *Simulation of mechanical behaviour of composite bonded joints containing strip defects*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006, 26, 464-473.
67. Dean G., Crocker L., Read B., Wright L.: *Prediction of deformation and failure of rubber-toughened adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2004, 24, 295-306.
68. Deflorian F., Fedrizzi L.: *Adhesion characterization of protective organic coatings by electrochemical impedance spectroscopy*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1999, 13, 629-645.
69. Delbos A., Lorenceau E., Pitois O.: *Forced impregnation of a capillary tube with drop impact*. Journal of Colloid and Interface Science, 341, 2010, 171-177.
70. Della Volpe C., Deimichei A., Riccò T.: *A multiliquid approach to the surface free energy determination of flame-treated surfaces of rubber-toughened polypropylene*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1998, 12, 1141-1180.

71. Della Volpe C., Siboni S.: *Some reflections on acid-base solid surface free energy theories*. Journal of Colloid and Interface Science, 1997, 195, 121-136.
72. Della Volpe C., Siboni S.: *Analysis of dynamic contact angle on discoidal samples measured by the Wilhelmy method*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1998, 12, 197-224.
73. DeVries K.L., Adams D.O.: *Mechanical testing of adhesive joints. Chapter 6 in: The mechanics of adhesion*. Adhesion Science and Engineering-1, Edited by D.A. Dillard and A.V. Pocius Amsterdam, Elsevier Science B.V 2002.
74. Dębski H., Rudawska A.: *Analiza rozkładów naprężeń jednozaktadkowym połączeniu klejowym*. Rozdział nr 18 w monografii: „Analizy numeryczne wybranych zagadnień mechaniki” pod red. T. Niezgody. Warszawa: Redakcja Wydawnictw WAT, 2007.
75. Diaz M.E., Fuentes J., Cerro R.L., Savage M.D.: *Hysteresis during contact angles measurement*. Journal of Colloid and Interface Science, 2010, 343, 574-583.
76. Diaz Diaz A., Hadj-Ahmed R., Foret G., Ehrlacher A.: *Stress analysis in a classical double lap, adhesively bonded joint with a layerwise model*. International Journal of Adhesion and Adhesives 2009, 29, 67-76.
77. Didier F., Jupille J.: *Contribution of the van der Waals forces to the work of adhesion at metal/oxide interfaces*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1996, 10, 373-382.
78. Domingues L., Fernandes J.C.S., Da Cunha Belo M., Ferreira M.G.S., Guerra-Rosa L.: *Anodising of Al 2024-T3 in a modified sulphuric acid/boric acid bath for aeronautical applications*. Corrosion Science, 2003, 45, 149-160.
79. Dutkiewicz E.T.: *Fizykochemia powierzchni*. WNT, Warszawa 1998.
80. Ebnesajjad S.: *Adhesives technology handbook*. 2nd ed. William Andrew Inc. Norwich, NY, USA 2008.
81. Elftonson J.E., Ström G., Holmberg K., Olsson J.: *Adhesion of Streptococcus Sanguis to porous and non-porous substrates with well-defined surface energies*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1996, 10, 761-770.
82. Extrand C.W.: *A thermodynamic model for contacts angle hysteresis*. Journal of Colloid and Interface Science, 1998, 207, 11-19.
83. Faibish R.S., Yoshida W., Cohen Y.: *Contact angle study on polymer-grafted silicon wafers*. Journal of Colloid and Interface Science, 2002, 256, 341-350.
84. Fitton M.D., Broughton J.G.: *Variable modulus adhesives: an approach to optimized joint performance*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2005, 25, 329-336.
85. Gähde J., Mix R., Goering H., Schulz G., Funke W., Hermann U.: *Increase in coating wet adhesion stability by highly-ordered polymers*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1997, 11, 861-875.
86. Ganghoffer J.F., Schulz J.: *Relevance of perturbation methods in the mechanics of adhesion*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1996, 10, 775-806.

87. Gancarz I., Pigłowski J.: *Badanie adhezji między poliamidem 6 i polipropylenem modyfikowanym plazmą mikrofalową*. Polimery 2001, 46, 622-630.
88. Garbacz T.: *Wpływ wybranych środków pomocniczych na właściwości warstwy wierzchniej wytłaczanego polietylenu*. Polimery, 2004, 49, 23-28.
89. Gcoin A., Lestriez P., Assih J., Objois A., Delmas Y.: *Comparison between experimental and numerical study of the adhesively bonded scarf joint and double scarf joint: Influence of internal singularity created by geometry of the double scarf joint on the damage evolution*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29, 572-579.
90. Godzimirski J., Cichosz E., Czaplicki J.: *Ocena możliwości przyspieszonego utwardzania spoin klejonych w latach pokrycia samolotów naprawianych w systemie remontu polowego*. Naukowe problemy konstrukcji i technicznej eksploatacji sprzętu lotniczego. Warszawa 1979, 215-218.
91. Godzimirski J., Komorek A., Rośkowicz M.: *Trwałość zmęczeniowa tworzywa „Epidian 57”*. Polimery, 2008, 53, 737-742.
92. Godzimirski J., Komorek A.: *Trwałość zmęczeniowa połączeń klejowych*. Przegląd Spawalnictwa, 2008, 8, 38-43.
93. Godzimirski J., Kotlarz W.: *Dobór modle siatki elementów skończonych do obliczeń połączenia klejowego*. Technologia i Automatyzacja Montażu, 1994, 2, 23-25.
94. Godzimirski J., Kotlarz W.: *Badanie wpływu podwyższonej temperatury na wytrzymałość Epidianu 57*. Biuletyn WAT, 1996, 2, 107-116.
95. Godzimirski J., Kozakiewicz J., Łunarski J., Zielecki W.: *Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1997.
96. Godzimirski J., Rośkowicz M.: *Wytrzymałość doraźna i długotrwała oraz pełzanie kleju „Epidian 57”*. Polimery, 2002, 47, 721-726.
97. Godzimirski J., Rośkowicz M.: *Analiza MES połączeń klejowych obciążonych długotrwanie*. Przegląd Mechaniczny, 2005, 12, 33-38.
98. Godzimirski J., Tkaczuk S.: *Ocena metody oznaczania wytrzymałości na ścinanie klejów do metali (PN-69/C89300)*. Biuletyn WAT, 1997, 6, 71-77.
99. Godzimirski J., Tkaczuk S.: *Możliwości wykorzystywania MES do obliczania wytrzymałości połączeń klejowych*. Technologia i Automatyzacja Montażu 2001, 2, 43-46.
100. Godzimirski J., Tkaczuk S.: *Numeryczne modelowanie adhezji połączeń klejowych*. Przegląd Mechaniczny, 2005, 9, 32-34.
101. Godzimirski J.: *Określenie naprężeń w spoinach klejowych metodą elementów skończonych*. Biuletyn WAT, 1985, 11, 77-81.
102. Godzimirski J.: *Czynniki kształtujące wytrzymałość połączeń klejowych*. Technologia i Automatyzacja Montażu, 1994, 4, 61-64.
103. Godzimirski J.: *Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych*. WNT, Warszawa 2002.

104. Godzimirski J.: *Wpływ czynników konstrukcyjnych i technologicznych na wytrzymałość połączeń klejowych*. Przegląd Mechaniczny, 2003, 13, 18-22.
105. Golio L., Rossetto M, Dragoni E.: *Design of adhesive joint based on peak elastic stresses*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008, 28, 427-435.
106. Gołębiewski J., Żenkiewicz M.: *Influence of corona treatment energy and storage time on the changes of the contact angle of activated polystyrene film*. Polimery, 2003, 48, 134-137.
107. Gołębiewski J.: *Ocena metod badania wytrzymałości złączy adhezyjnych zawierających folię polimerową*. Polimery, 1998, 43, 590-600.
108. Gonzáles-Martín M., Jańczuk B., Labajos-Broncano L., Bruque J.M., Gonzáles-García C.M.: *Analysis of the silica surface free energy by the inhibition technique*. Journal of Colloid and Interface Science, 2001, 240, 467-472.
109. Gonzáles-Martín M., Labajos-Broncano L., Jańczuk B., Bruque J.M.: *Wettability and surface free energy of zirconia ceramics and their constituents*. Journal of Materials Science, 1999, 34, 5923-5926.
110. Good R. J., van Oss C.J., in: *Modern Approaches to Wettability*, M.E. Schrader and G. Loeb (Eds), pp 1-27, Plenum Press, New York 1992.
111. Good R.J., in: *Surface and Colloid Science*, R.J. Good, R.R. Stromberg (Eds.), vol.11. Plenum Press, New York 1979.
112. Gos B., Jurkowska K., Fichtel M., Sierzyński A.: *Wpływ podwyższonej temperatury i szybkości obciążania na wytrzymałość połączeń klejowych*. Przemysł Drzewny 1993, 44, 13-14.
113. Graner S.A., Crocombe A.D., Wahab A.D., Abdel M.M., Ashcroft I.A.: *Fatigue initiation in adhesively-bonded single-lap joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007, 21, 1343-1357.
114. Grant L.D.R., Adams R.D., da Silva L.F.M.: *Experimental and numerical analysis of T-peel joint for the automotive industry*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2009, 23, 317-338.
115. Grant L.D.R., Adams R.D., da Silva L.F.M.: *Effect of the temperature on the strength of adhesively bonded single lap and T joints for the automotive industry*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29, 535-524.
116. Greiveldinger M., Shanahan E.R.: *A critique of the mathematical coherence of acid/base interfacial free energy theory*. Journal of Colloid and Interface Science, 1999, 215, 170-178.
117. Griner S., Nowosielski R.: *Wytrzymałość adhezyjna połączeń szkieł metalicznych z polimerami*. Inżynieria Materiałowa, 1996, 4, 106-110.
118. Guedes Pinto A.M., Magalhães A.G., Gomes da Silva F., Monteiro Baptista A.P.: *Shear strength of adhesively bonded polyolefins with minimal surface preparation*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008, 28, 452-456.

119. Gustafson P.A., Waas A.M.: *A bonded joint finite element for a symmetric double lap joint subjected to mechanical and thermal loads*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2009, 79, 94-126.
120. Harding H., Berg J.C.: *The role of adhesion in the mechanical properties of filled polymer composites*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1997, 12, 471-493.
121. Hazlett R.D.: *On surface roughness effects in wetting phenomena*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1992, 6, 625-633.
122. Hay K.M., Dragila M.I., Liburdy J.: *Theoretical model for the wetting of a rough surface*. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 325, 472-477.
123. He X.: *A review of finite element analysis of adhesively bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011, 31, 248-264.
124. Hoang-Ngoc C.-T., Paroissien E.: *Simulation of single-lap bonded and hybrid (bolted/bonded) joints with flexible adhesive*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010, 30, 117-129.
125. Holysz L.: *Surface free energy components of silica gel determined by the thin layer wicking method for different layer thicknesses of gel*. Journal of Materials Science, 1998, 33, 445-452.
126. Holysz L.: *Investigation of the effect of substrata on the surface free energy components of silica gel determined by layer wicking method*. Journal of Material Science, 2000, 35, 6081-6091.
127. Hsieh Y.-L., Xu S., Hartzell M.: *Effects of acid oxidation on wetting and adhesion properties of ultra-high modulus and molecular weight polyethylene (UHMW-PE) fibers*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1991, 5, 1023-1039.
128. Ichikawa K., Shin Y., Sawa T.: *A three-dimensional finite-element stress analysis and strength evaluation of stepped-lap adhesive joints subjected to static tensile loadings*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008, 28, 464-470.
129. Ingram C., Ramani K.: *The effect of sodium hydroxide anodization on the durability of poly(etherketoneetherketoneketone) adhesive bonding of titanium*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1997, 17, 39-45.
130. Jang J., Jang I., Kim H.: *Effect of the mole ratios of silane-modified polyvinylimidazoles on adhesion promotion of the polyimide/copper system*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1998, 12, 323-337.
131. Jansen W.B.: *Overview Lecture. The Lewis acid-base concepts: recent results and prospects for the future*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1991, 5, 1-21.
132. Jańczuk B., Białopiotrowicz T.: *Swobodna energia powierzchniowa niektórych polimerów*. Polimery 1987, 7, 269-271.
133. Jańczuk B., Białopiotrowicz T., Zdziennicka A.: *Some remarks on the components of the liquid surface free energy*. Journal of Colloid and Interface Science, 1999, 211, 96-103.

134. Jasiulek P., Rawicz A.: *Wpływ stanu przygotowania powierzchni metali na wytrzymałość połączeń klejonych*. Przegląd Spawalnictwa, 1979, 7, 11-14.
135. Jeandrau J.P.: *Analysis and design data for adhesively bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991, 11, 71-79.
136. Jialanella G.L., Shaffer II E.O.: *The effect of adhesive modulus on the performance of SMC lap shear joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1993, 7, 1171-1181.
137. Joanny J.F., de Gennes P.G.: *A model for contact angle hysteresis*. The Journal of Chemical Physics, 1984, 81, 552-562.
138. Johnsen B.B., Lapique F., Bjørgum A.: *The durability of bonded aluminium joints: a comparison of AC and DC anodizing pretreatments*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2004, 24, 153-161.
139. Jung M.-H., Choi H.-S.: *Surface treatment and characterization of ITO thin films using atmospheric pressure plasma for organic light emitting diodes*. Journal of Colloid and Interface Science, 2007, 310, 550-558.
140. Jurkowski B., Uchman M., Lewandowska E.: *Wybrane problemy technologii sporządzania klejów*. Polimery, 1982, 3, 109-113.
141. Kaye R., Heller M.: *Finite element-based three-dimensional stress analysis of composite bonded repairs to metallic aircraft structure*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006, 26, 261-273.
142. Kennedy A.C., Kohler R., Poole P.: *A sodium hydroxide anodize surface pretreatment for the adhesive bonding of titanium alloys*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1983, 3, 133-139.
143. Khalili S.M.R., Khalili S., Pirouzhshemi M.R., Shokuhfar A., Mittal R.K.: *Numerical study of lap joints with composite adhesives and composite adherends subjected to in-plane and transverse loads*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008, 28, 411-418.
144. Kilic B., Madenci E., Ambur D.R.: *Global-local finite element analysis of bonded single-lap joint*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004, 1-13.
145. Krishnan S., Busnaina A.A., Rimai D.S., Demejo P.: *The adhesion-induced deformation and the removal of submicrometer particles*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1994, 8, 1357-1370.
146. Krysicki W. i in.: *Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach. Cz. II. Statystyka matematyczna*. PWN, Warszawa 1999.
147. Kryszałkiewicz A.: *Czynniki poprawiające adhezję w układzie napętniacz-polimer*. Chemia Stosowana, 1989, 4, 561-584.
148. Kubissa J., Strzelczyk M.: *Mechanizm zniszczenia płaskich połączeń klejonych stopów aluminium*. Archiwum Inżynierii Lądowej, 1979, 4-8.
149. Kubissa J.: *Problemy wyznaczania nośności połączeń klejowych metali*. Inżynieria i Budownictwo, 1982, 8-9, 169-171.

150. Kuczmaszewski J., Rudawska A.: *Analiza naprężenia w połączeniach klejowych blach ocynkowanych*. Tworzywa Sztuczne w Budowie Maszyn, Kraków 2003, 227-232.
151. Kuczmaszewski J.: *Prognozowanie wytrzymałości statycznej wybranych połączeń adhezyjnych*. Polimery, 1988, 7-8, 299-302.
152. Kuczmaszewski J.: *Technologia śmigłowców. Teoria i technika klejenia*. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1990.
153. Kuczmaszewski J.: *Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali*. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1995.
154. Kuczmaszewski J.: *Konstituowanie właściwości adhezyjnych warstwy wierzchniej*. Folia Societatis Scientiarum Lublinesis, 1996, 5, 5-14.
155. Kuczmaszewski J.: *O pewnych problemach podobieństwa w zakładkowych i doczołowych połączeniach adhezyjnych*. Tworzywa sztuczne w budowie maszyn. Kraków 1998, 105-110.
156. Kuczmaszewski J.: *Niektóre problemy metodologiczne oceny właściwości adhezyjnych warstwy wierzchniej tworzyw*. Polimery, 2001, 46, 792-798.
157. Kuczmaszewski J.: *Fundamentals od metal-metal adhesive joint design*. Polish Academy of Science, Lubin Branch, Lublin 2006.
158. Kuczmaszewski J.: *Czynniki niepewności prognozy wytrzymałości połączeń klejowych połączeń metali*. Przegląd Spawalnictwa, 2008, 8, 22-26.
159. Kula P.: *Inżynieria warstwy wierzchniej*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2000.
160. Kusano Y., Mortensen H., Stenum B. Goutianos S., Mitra S. i inni: *Atmospheric pressure plasma treatment of glassy carbon for adhesion improvement*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007, 27, 402-408.
161. Kuusipalo J., Savolainen A.: *Adhesion phenomena in (co)extrusion coating of paper and paperboard*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1997, 11, 1119-1135.
162. Lee L.H.: *Roles of molecular interactions in adhesion, adsorption, contact angle and wettability*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1993, 7, 538-634.
163. Leistner A., Fabrycy E., Wagner J., Leistner J. Łędzki A.: *Termoodporne kleje na podstawie wzajemnie przenikających się sieci epoksydowych i bismetakrylanowych*. Polimery, 1998, 43, 691-695.
164. Li S., Thouless M.D., Waas A.M., Schroeder J.A., Zavattieri P.D.: *Competing failure mechanisms in mixed-mode fracture of an adhesively bonded polymer-matrix composite*. International Journal of Adhesion and Adhesives 2006, 26, 609-616.
165. Litchfield R.E., Critchlow G.W., Wilson S.: *Surface clearing technologies for removal of crosslinked epoxide resin*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006, 26, 295-303.

166. Liu J., Sawa T., Toratani H.: *A two-dimensional stress analysis of single-lap adhesive joint subjected to external bending moments*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1998, 12, 795-812.
167. Liu J., Sawa T.: *Stress analysis and strength evaluation of single-lap band adhesive joints subjected to external bending moments*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1999, 13, 729-749.
168. Lugscheider E., Bobin K.: *The influence on surface free energy of PVD-coatings*. Surface Coatings Technology, 2001, 142-144, 755-760.
169. Lunder O., Lapique F., Johnsen B., Nisancioglu K.: *Effect of pre-treatment on the durability of epoxy-bonded AA6060 aluminium joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2004, 24, 107-117.
170. Łaskawiec J.: *Fizykochemia powierzchni ciała stałego*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
171. Łunarski J., Zielecki W.: *Wpływ struktury geometrycznej powierzchni na wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych*. Technologia i Automatyzacji Montażu, 1994, 2, 3-16.
172. Magalhães A.G., de Moura M.F.S.F., Gonçalves J.P.M.: *Evaluation of stress concentration effects in single-lap bonded joints of laminate composite materials*. Journal of Adhesion and Adhesives, 2005, 25, 313-319.
173. Majda P.: *Uproszczony model zakładkowego połączenia klejowego*. Modelowanie Inżynierskie, Gliwice 2007, 34, 93-98.
174. Majda P.: *Metoda elementów skończonych w analizie zakładkowych połączeń klejonych*. Przegląd Mechaniczny, 2008, 1, 14-19.
175. Mangipudi V., Tirrell M., Pocius A.V.: *Direct measurement of molecular level adhesion between poly(ethylene terephthalate) and polyethylene films: determination of surface and interfacial energies*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1994, 8, 1251-1270.
176. Marciniec A., Zielecki W.: *Analiza stanu naprężeń w spoinie klejowej połączenia pracującego na oddzieranie*. Technologia i Automatyzacja Montażu, 1997, 4, 47-49.
177. McCarthy S.A.: *Dynamic contact angle analysis and its application to paste PVC product*. Polimery, 1998, 43, 314-319.
178. Michalski M.-C., Hardy J., Saramago J.V.: *On the surface free energy of PVC/EVA polymer blends: comparison of different calculation methods*. Journal of Colloid and Interface Science, 1998, 208, 319-328.
179. Mirabedini S.M., Scantlebury J.D., Thompson G.E., Moradian S.: *Adhesive strength of powder coated aluminium substrates*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2005, 25, 484-494.
180. Mirski Z., Piwowarczyk T.: *Historia klejenia – od prehistorii do dzisiaj*. Przegląd Spawalnictwa, 2008, 8, 3-11.
181. Mirski Z., Piwowarczyk T.: *Podstawy klejenia, kleje i ich właściwości*. Przegląd Spawalnictwa, 2008, 8, 12-21.

182. Missol W.: *Energia powierzchni rozdziału faz w metalach*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1975.
183. Mittal K.L., (Ed.) in *Adhesion Measurement of Thin Films, Thick Films, and Bulk Coatings*, ASTM STP640, 5-17, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1978.
184. Mittal K.L.: *Interfacial chemistry and adhesion: recent developments and prospects*. Pure and Applied Chemistry, 1980, 52, 1295-1305.
185. Mohseni M., Mirabedini M., Hashemi M., Thompson G.E.: *Adhesion performance of an epoxy clear coat on aluminum alloy in the presence of vinyl and amino-silane primers*. Progress in Organic Coatings, 2006, 57, 307-313.
186. Moura M.F.S.F., Concalves J.P.M., Chousal J.A.G., Campilho R.D.S.G.: *Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behavior of bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008, 28, 419-426.
187. Nakagawa F., Sawa T., Nakano Y., Katsuo M.: *A two-dimensional finite element thermal stress analysis of adhesive butt joint containing some hole defects*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1999, 13, 309-323.
188. Nakamura Y., Suzuki Y., Watanabe Y.: *Effect of oxygen plasma etching on adhesion between polyimide films and metal*. Thin Solid Films, 1996, 290-291, 367-369.
189. Norton M.G.: *The influence of contact angle, wettability, and reactivity on the development of indirect-bonded metallizations for aluminum nitride*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1992, 6, 635-651.
190. Öchsner A., Gegner J.: *Critical analysis of the substrate deformation correction in the thick-adherend tensile-shear test*. International J. Adhesion Adhesives, 2004, 24, 37-41.
191. Odi R.A., Friend C.M.: *An improved 2D model for bonded composite joint*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2004, 24, 389-405.
192. Oehrlein G.S., Kurogi Y.: *Sidewall surface chemistry in directional etching processes*. Materials Science and Engineering, 1998, 24, 153-183.
193. Oehrlein G.S.: *Surface processes in low pressure plasmas*. Surface Science, 1997, 386, 222-230.
194. Ontiveros A., Durán J.D.G., González-Caballero F., Chibowski E.: *Adhesion of colloidal ZnS on silikon. Effects of ionic strength and radio frequency electric field*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1996, 10, 999-1019.
195. Onyszko B.: *Próba interpretacji mechanizm niszczenia połączenia klejonego. Problemy wytrzymałości konstrukcji klejonych*. Szczecin 1972, 117-126.
196. Parsons G.E., Buckton G. Chacham S.M.: *Comparison of measured wetting behaviour of materiale with identical surface energy, presented as particles and plater*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1993, 7, 95-104.

197. Pax G.M., Bouchet J., Bulliard X., Michaud V., Manson J.-A.E.: *Effect of HBP modified g-APS on the coating toughness and practical adhesion between galvanized steel and polyethylene*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007, 27, 539-603.
198. Podhajny R.M.: *Comparing surface treatments*. *Converting*, 1990, 8, 46-52.
199. Popineau S., Shanahan M.E.R.: *Simple model to estimate adhesion of structural bonding during humid ageing*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006, 26, 363-370.
200. Porębska M.: *Badania statyczne klejonych złącz pierścieniowych pracujących w złożonym stanie naprężeń*. Tworzywa sztuczne w budowie maszyn. Kraków 1998, 161-166.
201. Porębska M.: *Badanie wytrzymałości zmęczeniowej złącz klejonych napiętych*. Tworzywa sztuczne w budowie maszyn. Kraków 1998, 157-161.
202. Praca zbiorowa pod redakcją I. Baranowskiej: *Wybrane działy chemii ogólnej i metod eksperymentalnych*. Skrypty Uczelniane Politechniki Śląskiej, Gliwice 1993.
203. Praca zbiorowa pod red. Ch. V. Cagle'a: *Kleje i klejenie. Poradnik inżyniera i technika*. WNT, Warszawa, 1977.
204. Praca zbiorowa pod redakcją J. Godzimirskiego: *Tworzywa adhezyjne. Zastosowanie w naprawach sprzętu technicznego*. WNT, Warszawa 2010.
205. Praca zbiorowa pod redakcją R. Sikory: *Przetwórstwo tworzyw polimerowych*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.
206. Praca zbiorowa pod redakcją S. Tkaczyka: *Powłoki ochronne*. Politechnika Śląska, nr 1778, Gliwice 1994.
207. Prolongo S.G., del Rosario G., Ureña A.: *Comparative study on the adhesive properties of different epoxy resins*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006, 26, 125-132.
208. Przygocki W., Włochowicz A.: *Fizyka polimerów*. PWN, Warszawa 2001.
209. Qin X., Chang W.V.: *The role of interfacial free energy in wettability, solubility, and solvent crazing of some polymeric solids*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1996, 10, 963-987.
210. Ranatowski E.: *Ocena wytrzymałości połączeń klejonych*. Przegląd Mechaniczny, 1979, 5, 18-22.
211. Rånby B.: *'Surface photografting' onto polymers – a new method for adhesion control*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1995, 9, 599-613.
212. Rechner R., Jansen I., Beyer E.: *Influence on the strength and aging resistance of aluminium joints by laser pre-treatment and surface modification*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010, 30, 595-601.
213. Rimal D.S., Demejo L.P., Bowen R.C.: *Mechanics of particle adhesion*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1994, 8, 1333-1355.
214. Romanów F., Będziński R.: *Wytrzymałość połączeń klejonych w podwyższonych temperaturach*. Przegląd Mechaniczny, 1970, 15, 451-453.

215. Romanów F., Będziński R.: *Wytrzymałość połączeń klejonych w podwyższonych temperaturach*. Przegląd Mechaniczny, 1971, 20, 625-625.
216. Rozovskis G., Vinkevičius J.: *Plasma surface modification of polyimide for improving adhesion to electroless copper coatings*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1996, 10, 399-406.
217. Roźniatowski K., Kurzydłowski K.J., Wierzchnoń T.: *Geometryczny opis cech mikrostrukturalnych warstwy powierzchniowej*. Inżynieria Materiałowa, 1994, 5, 141-149.
218. Rudawska A., Błaziak M.: *Analiza porównawcza siły niszczącej połączenia klejowe, klejowo-nitowe oraz nitowe stopu tytanu*. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 279, 2011, 83, 147-155.
219. Rudawska A., Cimek E.: *Wpływ rodzaju kleju na wytrzymałość połączeń klejowych poliamidu PA6*. Przetwórstwo Tworzyw 2011, 141, 198-202.
220. Rudawska A., Cimek E., Kowalska B.: *Wybrane aspekty utwardzania kompozycji klejowych epoksydowych*. Przetwórstwo Tworzyw 2012, 5, 495-499.
221. Rudawska A., Chruściel M.: *Wpływ sposobu przygotowania powierzchni na wytrzymałość połączeń klejowych lotniczego stopu aluminium*. Technologia i Automatyzacja Montażu 2011, 2, 42-46.
222. Rudawska A., Czarnota M.: *Wpływ operacji odluszczenia na właściwości adhezyjne warstwy wierzchniej oraz wytrzymałość połączeń klejowych blach miedzianych*. Postępy Nauki i Techniki – Advances in Science and Technology, 2011, 8, 137-147.
223. Rudawska A., Dębski H.: *Numeryczna analiza wpływu powłoki cynkowej na rozkład naprężeń w połączeniach klejowych blach ocynkowanych*. Programy MES we wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania, Kazimierz Dolny 2007, 115-116.
224. Rudawska A., Dębski H.: *Numeryczna analiza wpływu powłoki cynkowej na rozkład naprężeń w połączeniach klejowych blach ocynkowanych*. Przegląd Mechaniczny, 2008, 5, 18-24.
225. Rudawska A., Dębski H.: *Modelowanie procesu zniszczenia spoiny klejowej w jednozakładkowym połączeniu klejowym blach aluminiowych*. Mechanik, 2010, 2, 118-121.
226. Rudawska A., Dębski H.: *Ocena wytrzymałości połączeń klejowych blach ze stopu aluminium z wykorzystaniem analizy numerycznej MES*. Eksploatacja i Niezawodność, 2011, 1, 4-10.
227. Rudawska A., Dunia Ł.: *Wytrzymałość statyczna i długotrwała połączeń klejowych blach ocynkowanych*. Technologia i Automatyzacja Montażu, 2008, 3, 31-34.
228. Rudawska A., Garbacz T.: *Graphitic-epoxy composite bonding joints strength*. PPS-24, The Polymer processing Society 24 th Annual Meeting- June 15-19 Salerno- Italy 2008, 246.

229. Rudawska A., Jacniacka E.: *Analysis of Determining Surface Free Energy Uncertainty with the Owens-Wendt method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29, 451-457.
230. Rudawska A., Kuczmaszewski J.: *Właściwości energetyczne warstwy wierzchniej wybranych materiałów stosowanych na formy odlewnicze*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, vol. 24, nr 1, Politechnika Poznańska, Poznań 2004, 189-195.
231. Rudawska A., Kuczmaszewski J.: *Klejenie blach ocynkowanych*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005.
232. Rudawska A., Kuczmaszewski J.: *Primery w technologii klejenia blach ocynkowanych*. Czasopismo Techniczne. Mechanika. Zeszyt 6. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006, 419-422.
233. Rudawska A., Kuczmaszewski J.: *Surface free energy of zinc coating after finishing treatment*. Material Science-Poland, 2006, 24, 975-981.
234. Rudawska A., Łukasiewicz M.: *Wpływ obróbki mechanicznej na wytrzymałość połączeń klejowych wybranych materiałów konstrukcyjnych*. Przegląd Spawalniczy, 2008, 8, 27-30.
235. Rudawska A., Pałka K.: *Rozważania na temat zjawiska adhezji w procesie wymiany ciepła*. Przegląd Mechaniczny, 2006, 12, 131-134.
236. Rudawska A., Zajchowski S.: *Swobodna energia powierzchniowa kompozytów polimerowo-drzewnych*. Polimery, 2007, 52, 453-455.
237. Rudawska A.: *Wpływ czynników konstrukcyjnych i technologicznych na wytrzymałość połączeń klejowych blach ocynkowanych*. Rozprawa doktorska, Lublin, 2003.
238. Rudawska A.: *Dobór rodzaju kleju w aspekcie wytrzymałości połączeń klejowych blach ocynkowanych*. Technologia i Automatykacja Montażu 2005, 1, 28-31.
239. Rudawska A.: *Swobodna energia powierzchniowa kompozytów szklano-epoksydowych*. Zeszyty Naukowe Instytutu Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych „Metalchem”, Toruń 2007, 191-194.
240. Rudawska A.: *Swobodna energia powierzchniowa i struktura geometryczna powierzchni wybranych kompozytów epoksydowych*. Polimery, 2008, 53, 452-456.
241. Rudawska A.: *Adhesive properties of polymer composites after selected surface treatment*. The 13th bi-annual conference on Polymeric Materials 2008, 24.-26. September 2008, Halle/Saale w Saxony-Anhalt, Niemcy.
242. Rudawska A.: *Właściwości adhezyjne kompozytów szklano-epoksydowych po różnych sposobach przygotowania powierzchni*. Rozdział w monografii pod red. G. Wróbla: *Polimery i kompozyty konstrukcyjne*. Cieszyn 2009, 97-105.
243. Rudawska A.: *Wytrzymałość połączeń klejowych blach aluminiowych w aspekcie montażu połączeń nierozłącznych*. Technologia i Automatykacja Montażu, 2009, 2, 35-38.

244. Rudawska A.: *Wytrzymałość połączeń klejowych blach tytanowych po różnych sposobach przygotowania powierzchni*. Inżyniera Materiałowa, 2009, 5, 341-345.
245. Rudawska A.: *Właściwości adhezyjne i wytrzymałość połączeń adhezyjnych wybranych kompozytów polimerowych*. Przetwórstwo Tworzyw, 2010, 4, 195-197.
246. Rudawska A.: *Adhesive joint strength of hybrid assemblies. Titanium sheet-composites and aluminium sheet-composites – Experimental and numerical verification* International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010, 30, 574-482.
247. Rudawska A.: *Wpływ sposobu przygotowania powierzchni na wytrzymałość połączeń klejowych blach ze stali odpornej na korozję*. Technologia i Automatykacja Montażu, 2010, 3, 36-39.
248. Rudawska A.: *Adhesive properties*, Chapter 7 in: Scanning Elektron Microscope”, Ed. Viacheslav Kazmiruk, Publisher: InTech, 2012, 101-126.
249. Rudawska A.: *Surface Free Energy and 7075 Aluminium Bonded Joint Strength Following Degreasing Only and Without Any Prior Treatment*. Journal Adhesion Science and Technology, 2012, 26, 1233-1247.
250. Rusiński E., Czmochoński J., Smolnicki T.: *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
251. Rzymiski W.M., Włóka M., Grzeźółkowska-Rosiak T.: *Łączenie elastomerów z metalami*. Polimery, 2005, 50, 530-536.
252. Sawa T., Suga H.: *Finte-element stress analysis of double-lap adhesive joint*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1996, 10, 1255-1271.
253. Schneider R.P.: *Comparative analysis of thermodynamic approaches and diagnostic liquids for determination of contact angle-derived physicochemical parameters of solids coated with conditioning films. A practitioner's perspective*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1997, 11, 65-93.
254. Sekulic A., Curnier A.: *Experimentation on adhesion of epoxy*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010, 30, 89-104.
255. Serro A.P., Colaço R., Saramago B.: *Adhesion forces in liquid media: Effect of surface topography and wettability*. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 325, 573-579.
256. Shalel-Levanon S., Marmur A.: *Validity and accuracy in evaluating surface tension of solids by additive approaches*. Journal of Colloid and Interface Science, 2003, 362, 489-499.
257. Shang J., Flury M., Harsh J.B., Zollars R.L.: *Comparison of different methods to measure contact angles of soil colloids*. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 328, 299-307.
258. Shen W., Sheng Y.J., Parker I.H.: *Comparison of the surface energetic data of eucalypt fibers and some polymers obtained by contact angle and inverse gas chromatography methods*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1999, 13, 887-901.

259. Shenoy V., Ashcroft I.A., Critchlow G.W., Crocombe A.D., Wahab M.M.A.: *An investigation into the crack initiation and propagation behaviour of bonded single-lap joints using backface strain*. International Journal of Adhesion and Adhesives 2009, 29, 361-371.
260. Sheu G.S., Shyu S.S.: *Surface modification of Kevlar 149 fibers by gas plasma treatment. Part II. Improved interfacial adhesion to epoxy resin*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1994, 8, 1027-1042.
261. Sikora R., Kuczmazewski J.: *Nowe metody i niektóre wyniki badań połączeń adhezyjnych: metal-tworzywo epoksydowe. Problemy wytrzymałości konstrukcji klejonych*. Szczecin 1972.
262. Sikora R., Kuczmazewski J.: *Badania wytrzymałości długotrwałej statycznej niektórych konstrukcyjnych połączeń adhezyjnych*. Polimery, 1986, 351-354.
263. Sikora R.: *Klejenie i kitowanie żywicami epoksydowymi w naprawach maszyn rolniczych*. Ministerstwo Rolnictwa – Departament Mechanizacji. Warszawa 1968.
264. Sikora R.: *Nowa metoda badań połączeń klejonych*. Przegląd Mechaniczny, 1970, 23, 700-702.
265. Sikora R.: *Ein neues Prüfverfahren für Klebverbindungen*. Adhäsion, 1971, 8, 275-278.
266. Sikora R.: *Technologiczne aspekty kierowania jakością klejenia*. Problemy wytrzymałości konstrukcji klejonych. Szczecin 1972, 357-369.
267. Sikora R.: *Technologiczne aspekty kierowania jakością klejenia. Nowe technologie i zastosowania żywic epoksydowych i poliestrowych*. Lublin 1979, 357-369.
268. Sikora R.: *Nowe ujęcie przemian fizycznych występujących w przetwórstwie. Naukowe problemy konstrukcji, technologii i eksploatacji maszyn*. Akademia Techniczno-Rolnicza. Bydgoszcz 1987.
269. Sikora R.: *Tworzywa wielkocząsteczkowe. Rodzaje, właściwości i struktura*. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin, 1991.
270. Sikora R.: *Podstawy przetwórstwa tworzyw wielkocząsteczkowych*. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin, 1992.
271. Sikora R.: *Obróbka tworzyw wielkocząsteczkowych*. Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1995.
272. Sikora R.: *Konstytuowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych*. Inżynieria Materiałowa 1997, 4, 160-164.
273. Sikora R.: *Warstwa wierzchnia tworzyw wielkocząsteczkowych*. Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne, Ustroń, 1998, 96-113.
274. Solana A.G., Crocombe A.D., Ashcroft I.A.: *Fatigue life and backface strain predictions in adhesively bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010, 30, 36-42.
275. Soltani M., Ahmadi G.: *On particle adhesion and removal mechanisms in turbulent flows*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1994, 8, 763-785.

276. Sommers A.D., Jacobi A.M.: *Wetting phenomena on micro-grooved aluminium surfaces and modeling of the critical droplet size*. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 328, 402-411.
277. Sorrentino L., Carrino L.: *Influence of process parameters of oxygen cold plasma treatment on wettability ageing time of 2024 aluminium alloy*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29, 136-143.
278. Sotiropoulou D., Agathopoulos S., Niklopoulos P.: *Work of adhesion in ceramic oxide/liquid metal system*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1996, 10, 989-998.
279. Spadaro C., Dispenza C., Sunseri C.: *The influence of the nature of the surface oxide on the adhesive fracture energy of aluminium-bonded joint as measured by T-peel tests*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008, 28, 211-221.
280. Sperandio C., Bardon J., Laachachi A., Aubiert H., Ruch D.: *Influence of plasma surface treatment on bond strength behaviour of an adhesively bonded aluminium-epoxy system*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010, 30, 720-728.
281. States D.N., deVries K.L.: *Geometric factors impacting adhesive lap joint strength and design*. International Journal of Adhesion and Adhesives 2012, 26, 89-107.
282. Stewart I., Chambers A., Gordon T.: *The cohesive mechanical properties of a toughened epoxy adhesive as a function of cure level*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007, 27, 277-287.
283. Stępniewski A., Szpunar A.: *Wpływ twardości wody na wytrzymałość połączeń klejowych*. Mechanik, 1972, 9, 489-491.
284. Strobel J.M., Strobel M., Lyons Ch.S., Dunatov Ch., Perron S.J.: *Aging of air-corona-treated polypropylene film*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1991, 5, 119-130.
285. Szalińska H., Miszczyk A.: *Próba oceny wpływu promotora adhezji na właściwości barierowe powłoki epoksydowej z płatkami szklanymi*. Polimery, 1996, 41, 232-236.
286. Szlezyngier W.: *Właściwości modyfikowanych klejowych żywic epoksydowych*. Technologia i Automatyzacja Montażu, 1994, 3, 35-36.
287. Śliwa W.: *Wytrzymałość mechaniczna i rezystancja połączeń klejowych*. Polimery, 1988, 305-308.
288. Taib A.A., Boukhili R., Achiou S., Gordon S., Boukehili H.: *Bonded joints with composite adherends. Part I. Effect of specimen configuration, adhesive thickness, spew fillet and adherend stiffness on fracture*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006, 26, 226-236.
289. Taib A.A., Boukhili R., Achiou S., Boukehili H.: *Bonded joints with composite adherends. Part II. Finite element analysis of joggle lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006, 26, 237-248.

290. Tang X., Dong J., Li X.: *A comparison of spreading behaviors Silwet L-77 on dry and wet lotus leaves*. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 325, 223-227.
291. Thompson P.A., Brinckerhoff W.B., Robbins M.O.: *Microscopic studies of static and dynamic contact angles*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1993, 7, 535- 554.
292. Tietje A.: *Fifteen Years of Ozone Treatment in Extrusion Coating*, 1987 Polymers, Lamination, and Coatings Conference, TAPPI PRESS, Atlanta, p. 221-224. Volume 82B, Issue 1, pages 267-274, July 2007.
293. Toussaint A.F., Luner P.: *The wetting properties of grafted cellulose films*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1993, 7, 635-648.
294. Underhill P.R., Rider A.N., DuQuesnay D.L.: *The effect of warm surface treatments on the fatigue life in shear of aluminium joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006, 26, 199-205.
295. Vaidya U.K., Gautam A.R.S., Hosur M., Dutta P.: *Experimental-numerical studies of transverse impact response of adhesively bonded lap joints in composite structures*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006, 26, 184-198.
296. Vedantam S., Panchagnula M.V.: *Constitutive modeling of contact angle hysteresis*. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 321, 393-400.
297. Volpe C.D., Siboni S.: *Analysis of dynamic contact angle on discoidal samples measured by the Wilhelmy method*. Journal of Adhesion Science and Technology 1998, 12, 197-224.
298. Wade G.A., Cantwell W.J., Pond R.C.: *Plasma surface modification of glass fibre-reinforced Nylon-6,6 thermoplastic composites for improved adhesive bonding*. Interface Science, 2000, 8, 363-373.
299. Wade G.A., Cantwell W.J.: *Adhesive bonding and wettability of plasma treated, glass fiber-reinforced nylon-6,6 composites*. Journal of Material Science Letters, 2000, 19, 1829-1832.
300. Wake W.C.: *Przyszłość klejów konstrukcyjnych*. Polimery, 1988, 9, 321-325.
301. Wang J., Hang Ch.: *Three-parameter, elastic foundation model for analysis of adhesively bonded joint*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29, 495-502.
302. Wang J., Jiang H., Guo Q., Liu L., Song J., Bai S., Qiao S.: *High-temperature joining of carbon/carbon composites by an organic resin adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2009, 23, 115-123.
303. Warszyński M., Onyszko B., Sienko J., Zych-Porębska M.: *Klejenie tworzyw sztucznych*. Przegląd Mechaniczny, 1970, 24, 734-736.
304. Warszyński M., Onyszko B., Zych-Porębska M.: *Optymalizacja złącz klejonych*. Mat. Konferencyjne. Problemy wytrzymałości konstrukcji klejonych. Szczecin 1972, 127.

305. Warszyński M., Onyszko B., Zych-Porębska M.: *Optymalne konstrukcje połączeń klejonych*. Przegląd Mechaniczny, 1970, 17, 507-509.
306. Wiącek Z.: *Dynamiczna metoda oznaczania adhezyjnych właściwości powierzchni metali. Charakterystyka metody*. Polimery 1991, 10, 387-389.
307. Wiącek Z.: *Struktura warstewek tlenkowych na Al i jej wpływ na wytrzymałość połączeń klejowych. Cz. I. Wpływ warunków formowania warstewek tlenkowych na ich właściwości adhezyjne*. Polimery, 1977, 2, 61-65.
308. Wiącek Z.: *Struktura warstewek tlenkowych na Al i jej wpływ na wytrzymałość połączeń klejowych. Cz. II. Wpływ uszczelniania anodowych warstewek tlenkowych na ich właściwości adhezyjne*. Polimery, 1977, 3, 97-98.
309. Wiącek Z.: *Wpływ struktury powierzchni stopów Al na wytrzymałość połączeń klejowych*. Polimery, 1987, 9, 368-372.
310. Wingfield J.R.J.: *Treatment of composite surfaces for adhesive bonding*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1993, 13, 151-156.
311. Wirbilis S.: *Chemiczne przygotowanie powierzchni metali przed obróbką galwaniczną*. Mechanik, 1985, 9, 473-480.
312. Xian J.: *Wettability of rough polymer, metal and oxide surfaces as well as of composite surface*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2008, 22, 1893-1905.
313. Wooley G.R., Carver D.R.: *Stress concentration factors for bonded lap joint*. Journal of Aircraft, 1971, 8, 17-20.
314. Xiao G.Z.: *Effects of solvent on the surface properties of oxygen plasma-treatment polyethylene and polypropylene films*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1997, 11, 655-663.
315. Xu L., Fan H., Yang Ch., Huang W.M.: *Contact line mobility in liquid droplet spreading on rough surface*. Journal of Colloid Interface Science, 2008, 323, 126-132.
316. Xu L.R., Sengupta S., Kuai H.: *An experimental and numerical investigation of adhesive bonding strengths of polymer materials*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2004, 24, 455-460.
317. Xuan Ch., Yulong L.: *An experimental technique on the dynamic strength of adhesively bonded single lap joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2010, 24, 291-304.
318. Yamamoto K., Ogata S.: *3-D thermodynamic analysis of superhydrophobic surface*. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 326, 471-477.
319. You M., Yan Z.-M., Zheng X.-L., Yu H.-Z., Li Z.: *A numerical and experimental study of gap length on adhesively bonded aluminum double-lap joint*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007, 27, 696-702.
320. You Z.Z., Dong J.Y.: *Effect of oxygen plasma treatment on the surface properties often-doped indium oxide substrates for polymer LEDs*. Journal of Colloid and Interface Science, 2006, 300, 697-703.

321. Zaczek Z.: *Badania wytrzymałości złączy klejonych metal-laminat epoksydowo-szkłany w podwyższonych temperaturach*. Zbiór prac WSMW, nr 31, Gdynia 1970, 23-57.
322. Zadpoor A. A., Sinke J., Benedictus R.: *The mechanical behavior of adhesively bonded tailor-made blanks*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29, 558-571.
323. Zanini S., Massini P., Mietta M., Grimoldi E., Riccardi C.: *Plasma treatments of PET meshes for fuel-water separation applications*. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 322, 566-571.
324. Zdziennicka A., Szymczyk K., Jańczuk B.: *Correlation between surface free energy of quartz and its wettability by aqueous solutions of nonionic, anionic and cationic surfactants*. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, 340, 243-248.
325. Zgoul M., Crocombe A.D.: *Numerical modeling of lap joints bonded with a rate-dependent adhesive*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2004, 24, 355-366.
326. Zhang Y.: *Transitions between different contact models*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2008, 22, 699-715.
327. Zhao Q., Wang C., Liu Y., Wang S.: *Bacterial adhesion on the metal-polymer composite coatings*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007, 27, 85-91.
328. Zhao X., Adams R.D., da Silva L.F.M.: *A new method for determination of bending moments in single lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010, 30, 63-71.
329. Zielecka M.: *Methods of contact angle measurement as a tool for characterization of wettability of polymers*. Polimery, 2004, 49, 327-332.
330. Zielecki W., Łunarski J.: *Wytrzymałość zmęczeniowa na oddzieranie połączeń klejowych*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 1995, 29, 59-66.
331. Zimniak J.: *Badania wytrzymałości długotrwałej na oddzieranie połączeń klejowych metal-laminat*. Polimery, 1998, 303-305.
332. Zou G.P., Shahin K., Taheri F.: *An analytical solution for the analysis of symmetric composite adhesively bonded joints*. Composite Structures, 2004, 65, 499-510.
333. Zouvelou N., Mantzouris X., Nikolopoulos P.: *Interfacial energies in oxide/liquid metal systems with limited solubility*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007, 27, 380-386.
334. Żenkiewicz M., Rytlewski P., Czupryńska J., Polański J., Karasiewicz T., Engelgard W.: *Contact angle and surface free energy of electron-beam irradiated polymer coposites*. Polimery, 2008, 53, 446-451.
335. Żenkiewicz M.: *Porównawcza ocena niektórych metod obliczania swobodnej energii powierzchniowej aktywowanej folii polietylenowej*. Polimery, 1988, 3, 328-331.

336. Żenkiewicz M.: *Zmiany warstwy wierzchniej folii polietylenowej pod wpływem wyładowań niezupełnych*. Polimery, 1989, 1, 15-19.
337. Żenkiewicz M.: *Adhezja folii polietylenowej i kleju epoksydowego*. Polimery, 1991, 139-142.
338. Żenkiewicz M., Gołębiowski J., Lutomirski S.: *Doświadczalna weryfikacja niektórych elementów metody van Ossa-Gooda*. Polimery, 1999, 44, 212-217.
339. Żenkiewicz M.: *Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych*. WNT, Warszawa 2000.
340. Żenkiewicz M.: *Effect of electron radiation dose on oxidation of surface layers of polyethylene, polypropylene and poly(ethylene terephthalate) films*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004, 18, 607-616.
341. Żenkiewicz M.: *Wpływ dawki promieniowania elektronowego na zwilżalność i swobodną energię powierzchniową folii poli(tereftalanu etylenu)*. Polimery, 2004, 49, 94-100.
342. Żenkiewicz M.: *Wybrane zagadnienia modyfikowania materiałów polimerowych za pomocą promieniowania elektronowego o dużej energii*. Polimery, 2005, 50, 4-9.
343. Żenkiewicz M.: *Wettability and surface free energy of a radiation-modified polyethylene film*. Polimery, 2005, 50, 365-370.
344. Żenkiewicz M.: *Analiza głównych uwarunkowań metody van Osa-Chaunhury'ego-Gooda w badaniach warstwy wierzchniej materiałów polimerowych*. Polimery, 2006, 51, 169-176.
345. Żenkiewicz M.: *New method of analysis of the surface free energy of polymeric materials calculated with Owens-Wendt and Neumann methods*. Polimery 2006, 51, 584-587.
346. Żenkiewicz M.: *Analiza głównych metod badania swobodnej energii powierzchniowej materiałów polimerowych*. Polimery, 2007, 52, 760-767.
347. Żenkiewicz M.: *Wyładowania koronowe w powietrzu jako metoda modyfikowania warstwy wierzchniej materiałów polimerowych*. Polimery, 2008, 53, 3-13.

Normy i standardy

348. ASTM B265 – Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Strip, Sheet, and Plate.
349. DIN EN 1465 Adhesives – Determination of tensile lap-shear strength of bonded assemblies.
350. PN-EN 515:1996 – Aluminium i stopy aluminium. Wyroby przerobione plastycznie. Oznaczenia stanów.
351. PN-EN 828:2000 – Kleje. Oznaczanie zwilżalności poprzez pomiar kąta zwilżania i krytycznego napięcia powierzchniowego ciała stałego.

352. PN-EN ISO 9664:2000 – Kleje. Metody badań właściwości zmęczeniowych klejów do połączeń konstrukcyjnych przy rozciąganiu ścinającym.
353. PN-EN 1943:2004 – Taśmy samoprzylepne. Pomiar adhezji przy statycznym ścinaniu.
354. PN-EN 14869-1:2005 – Kleje do połączeń konstrukcyjnych. Oznaczanie ścinania konstrukcyjnych połączeń klejowych. Część 1: Badanie metodą skręcania z zastosowaniem wydrążonych cylindrów połączonych na styk.
355. PN-EN 14869-2:2005 – Kleje do połączeń konstrukcyjnych. Oznaczanie ścinania konstrukcyjnych połączeń klejowych. Część 2: Badanie metodą ścinania z zastosowaniem grubych elementów.
356. PN-EN 573-1:2006 – Aluminium i stopy aluminium. Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie. Część 1: System oznaczeń numerycznych.
357. PN-EN 14258:2007 – Kleje do połączeń konstrukcyjnych. Właściwości mechaniczne połączeń klejowych poddanych krótkotrwałemu i długotrwałemu działaniu określonych warunków temperatury.
358. PN-EN 15336:2007 – Kleje. Oznaczanie czasu do zniszczenia połączeń klejowych pod obciążeniem statycznym.
359. PN-EN 1347:2008 – Oznaczanie zwilżalności.
360. PN-EN 485-2:2009 - Aluminium i stopy aluminium. Blachy, taśmy i płyty. Część 2: Własności mechaniczne.
361. PN-EN 1465:2009 – Kleje. Oznaczanie wytrzymałości na ścinanie przy rozciąganiu połączeń na zakładkę.
362. PN-EN 15274:2009 – Kleje ogólnego przeznaczenia do połączeń konstrukcyjnych. Wymagania i metody badań.
363. PN-EN 573-3:2010 – Aluminium i stopy aluminium. Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie. Część 3: Skład chemiczny i rodzaje wyrobów.
364. PN-EN 1464:2010 – Kleje. Oznaczanie wytrzymałości na oddzieranie połączeń klejowych o wysokiej wytrzymałości. Metoda rolki pływającej.
365. PN-EN ISO 10365:1998 – Kleje. Oznaczenie głównych wzorców zniszczenia połączeń klejowych.
366. PN-ISO 15108:2002 – Kleje. Oznaczanie wytrzymałości połączeń klejowych metodą zginania ze ścinaniem.
367. PN-EN ISO 4287:1999/A1:2010 – Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
368. PN-EN ISO 11339:2010 – Kleje. Oznaczanie wytrzymałości na oddzieranie, metodą T, połączeń materiału giętkiego z giętkim.
369. PN-EN ISO 9653:2011 – Kleje. Metoda badania wytrzymałości na ścinanie udarowe połączeń klejowych.

Spis tabel

Tabela 2.1. Warunki obróbki ściernymi narzędziami nasypowymi.....	50
Tabela 2.2. Wartości swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowych stosowanych cieczy pomiarowych [162, 339].....	51
Tabela 2.3. Charakterystyka badanych blach ze stopu aluminium EN AW-2024.....	53
Tabela 2.4. Charakterystyka badanych blach ze stopu aluminium EN AW-7075.....	53
Tabela 2.5. Parametry chropowatości powierzchni blach ze stopu aluminium EN AW-2024.....	53
Tabela 2.6. Parametry chropowatości powierzchni blach ze stopu aluminium EN AW-7075.....	53
Tabela 2.7. Parametry chropowatości powierzchni blach ze stopów aluminium EN AW-2024PLT3 po różnych sposobach przygotowania powierzchni.....	56
Tabela 2.8. Parametry chropowatości powierzchni blach ze stopów aluminium EN AW-7075PLT0 po różnych sposobach przygotowania powierzchni.....	57
Tabela 2.9. Parametry chropowatości powierzchni blach tytanowych po oczyszczeniu chemicznym.....	60
Tabela 2.10. Parametry chropowatości powierzchni blach tytanowych CPI; $g = 0,40$ mm; po wybranych sposobach przygotowania powierzchni	62
Tabela 2.11. Parametry chropowatości powierzchni blach tytanowych CP3; $g = 0,80$ mm; po wybranych sposobach przygotowania powierzchni	63
Tabela 2.12. Charakterystyka badanych kompozytów polimerowych	66
Tabela 2.13. Parametry chropowatości powierzchni kompozytów po oczyszczeniu chemicznym.....	66
Tabela 2.14. Parametry chropowatości powierzchni kompozytu epoksydowo-szklanego (7); $g = 2,10$ mm; o wybranych sposobach przygotowania powierzchni.....	69
Tabela 2.15. Swobodna energia powierzchniowa blach ze stopu aluminium EN AW-2024 PLT3; $g = 0,64$ mm.....	71
Tabela 2.16. Swobodna energia powierzchniowa blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0; $g = 0,80$ mm.....	71
Tabela 2.17. Swobodna energia powierzchniowa blach tytanowych CPI; $g = 0,40$ mm	71
Tabela 2.18. Swobodna energia powierzchniowa blach tytanowych CP3; $g = 0,80$ mm	72
Tabela 2.19. Swobodna energia powierzchniowa kompozytu epoksydowo-szklanego (7); $g = 2,10$ mm.....	72
Tabela 2.20. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań (tab. 2.15), z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta oraz Cochran-Coxa; $\alpha = 0,05$...	76

Tabela 2.21. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań (tab. 2.16), z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta oraz Cochрана-Coxa; $\alpha = 0,05$...	76
Tabela 2.22. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań (tab. 2.17), z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta oraz Cochрана-Coxa; $\alpha = 0,05$...	77
Tabela 2.23. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań (tab. 2.18), z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta oraz Cochрана-Coxa; $\alpha = 0,05$...	77
Tabela 2.24. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań (tab. 2.19), z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta oraz Cochрана-Coxa; $\alpha = 0,05$...	78
Tabela 3.1. Rozmiary połączeń klejowych jednorodnych	82
Tabela 3.2. Rozmiary połączeń klejowych hybrydowych.....	82
Tabela 3.8. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań wytrzymałości z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta; $\alpha = 0,05$	94
Tabela 3.9. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań wytrzymałości z wykorzystaniem modelu statystycznego Cochрана-Coxa; $\alpha = 0,05$	95
Tabela 3.10. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań wytrzymałości (rys. 3.7), z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta; $\alpha = 0,05$	96
Tabela 3.11. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań wytrzymałościowych (rys. 3.7), z wykorzystaniem modelu statystycznego Cochрана-Coxa; $\alpha = 0,05$	96
Tabela 3.12. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań wytrzymałościowych (rys. 3.8), z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta; $\alpha = 0,05$	97
Tabela 3.13. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań wytrzymałościowych (rys. 3.8), z wykorzystaniem modelu statystycznego Cochрана-Coxa; $\alpha = 0,05$	97
Tabela 3.14. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań wytrzymałościowych (rys. 3.9), z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta; $\alpha = 0,05$	98
Tabela 3.15. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań wytrzymałościowych (rys. 3.9), z wykorzystaniem modelu statystycznego Cochрана-Coxa; $\alpha = 0,05$	98
Tabela 3.16. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań wytrzymałości (rys. 3.10), z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta; $\alpha = 0,05$	99
Tabela 4.1. Swobodna energia powierzchniowa i jej składowe oraz wytrzymałość na odrywanie połączeń klejowych doczołowych, wykonanych za pomocą kleju Loctite 3430	108
Tabela 4.2. Swobodna energia powierzchniowa i jej składowe oraz wytrzymałość na odrywanie połączeń klejowych doczołowych, wykonanych za pomocą kleju Loctite 9466	109
Tabela 5.1. Wartości siły niszczącej uzyskanej w badaniach doświadczalnych oraz na podstawie analizy numerycznej jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 i EN AW-7075PL T0	125
Tabela 5.2. Wartości siły niszczącej uzyskanej w badaniach doświadczalnych jednorodnych połączeń klejowych blach tytanowych CP1 oraz na podstawie analizy numerycznej	125

Tabela 5.3. Wartości siły niszczącej uzyskanej w badaniach doświadczalnych oraz na podstawie analizy numerycznej jednorodnych połączeń klejowych kompozytów polimerowych	126
Tabela 5.4. Wartości siły niszczącej uzyskanej w badaniach doświadczalnych oraz na podstawie analizy numerycznej połączeń klejowych hybrydowych	127
Tabela 5.5. Wartości siły inicjującej zniszczenie oraz siły niszczącej określonej na podstawie analizy numerycznej połączeń klejowych jednorodnych	128
Tabela 5.6. Wartości siły inicjującej zniszczenie oraz siły niszczącej określonej na podstawie analizy numerycznej wybranych połączeń klejowych hybrydowych	130
Tabela 5.7. Wartość naprężenia w spoinie klejowej jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopów aluminium i blach tytanowych, uzyskane na podstawie analizy numerycznej	133
Tabela 5.8. Wartość naprężenia w spoinie klejowej połączeń klejowych jednorodnych kompozytów polimerowych, uzyskane na podstawie analizy numerycznej	133
Tabela 5.9. Wartość naprężenia w spoinie klejowej połączeń klejowych hybrydowych, uzyskane na podstawie analizy numerycznej	134

Spis rysunków

Rys. 1.1. Rodzaje adhezji i sił wiązań adhezyjnych (opracowanie na podstawie [339])	15
Rys. 1.2. Schemat połączenia adhezyjnego elementów o chropowatej powierzchni łączonych za pomocą kleju, ilustrujący mechaniczną teorię adhezji (opracowanie na podstawie [339])	19
Rys. 1.3. Ilustracja zwilżalności powierzchni ciała stałego przez ciecz w przypadku: a) dobrej zwilżalności $\Theta < 90^\circ$ i niedostatecznej zwilżalności $\Theta > 90^\circ$ (opracowanie na podstawie [339])	21
Rys. 1.4. Interpretacja równania Younga, A – punkt styku trzech faz [339]	25
Rys. 1.5. Schemat struktury warstwy wierzchniej stopu aluminium po anodowaniu:	32
Rys. 1.6. Modelowe połączenia klejowe obciążone na ścinanie: a) zakładkowe obciążone siłami, b) zakładkowe obciążone wydatkiem naprężeń stycznych, c) tulejowe obciążone momentem skręcającym, d) osiowo-symetryczne, czołowe obciążone momentem skręcającym [95]	37
Rys. 1.7. Rozkład naprężenia stycznego w spoinach klejowych połączeń obciążonych na ścinanie wzdłuż długości zakładki: l – długość zakładki, b – szerokość łączonych elementów, P – siła działająca na połączenie, τ – naprężenie styczne, l/2 – połowa długości zakładki spoiny klejowej (opracowanie na podstawie [95])	37
Rys. 1.8. Schemat procesu przygotowania powierzchni (opracowanie na podstawie [221])	41
Rys. 1.9. Rozkład naprężenia stycznego t w spoinie klejowej połączeń obciążonych na ścinanie w zależności od długości zakładki l: a) długość zakładki mniejsza niż graniczna; b) długość zakładki równa długości zakładki, c) długość zakładki większa niż graniczna; gdzie τ – naprężenie styczne, τ_{sr} – średnie naprężenia styczne; l_1, l_2, l_3 – długość zakładki, l_{gr} – graniczna długość zakładki	43
Rys. 2.1. Wygląd powierzchni blachy ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3; g = 0,64 mm; oczyszczanie chemiczne, profilografometr 3D	54
Rys. 2.2. Reprezentatywny profilogram powierzchni blachy ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3; g = 0,64 mm; oczyszczanie chemiczne	55
Rys. 2.3. Wygląd powierzchni blachy ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0; g = 0,80 mm; oczyszczanie chemiczne, profilografometr 3D	55
Rys. 2.4. Reprezentatywny profilogram powierzchni blachy ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0; g = 0,80 mm; oczyszczanie chemiczne	56
Rys. 2.5. Wygląd powierzchni blachy ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3; g = 0,64 mm; obróbka mechaniczna, profilografometr 3D	57

Rys. 2.6. Reprezentatywny profilogram powierzchni blachy ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3; $g = 0,64$; obróbka mechaniczna.	58
Rys. 2.7. Wygląd powierzchni blachy ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0; $g = 0,80$ mm; obróbka mechaniczna, profilografometr 3D.....	58
Rys. 2.8. Reprezentatywny profilogram powierzchni blachy ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0; $g = 0,80$ mm; obróbka mechaniczna.....	59
Rys. 2.9. Wygląd powierzchni blachy tytanowej CP1; $g = 0,40$ mm; oczyszczanie chemiczne, profilografometr 3D.....	60
Rys. 2.10. Reprezentatywny profilogram powierzchni blachy tytanowej CP1; $g = 0,40$ mm; oczyszczanie chemiczne.....	61
Rys. 2.11. Wygląd powierzchni blachy tytanowej CP3; $g = 0,80$ mm; oczyszczanie chemiczne, profilografometr 3D.....	61
Rys. 2.12. Reprezentatywny profilogram powierzchni blachy tytanowej CP3; $g = 0,80$ mm; oczyszczanie chemiczne.....	62
Rys. 2.13. Wygląd powierzchni blachy tytanowej CP1; $g = 0,40$ mm; obróbka mechaniczna, profilografometr 3D.....	63
Rys. 2.14. Reprezentatywny profilogram powierzchni blachy tytanowej CP1; $g = 0,40$ mm; obróbka mechaniczna.	64
Rys. 2.15. Wygląd powierzchni blachy tytanowej CP3; $g = 0,80$ mm; obróbka mechaniczna, profilografometr 3D.....	64
Rys. 2.16. Reprezentatywny profilogram powierzchni blachy tytanowej CP3; $g = 0,80$ mm; obróbka mechaniczna	65
Rys. 2.17. Wygląd powierzchni kompozytu (2); $g = 0,60$ mm; oczyszczanie chemiczne, SEM, pow. 55.....	67
Rys. 2.18. Wygląd powierzchni kompozytu (4); $g = 0,60$ mm; oczyszczanie chemiczne, SEM, pow. 55.....	67
Rys. 2.19. Wygląd powierzchni kompozytu (6); $g = 0,66$ mm; oczyszczanie chemiczne, SEM, pow. 55.....	67
Rys. 2.20. Wygląd powierzchni kompozytu epoksydowo-szklanego (7); $g = 2,10$ mm; oczyszczanie chemiczne, profilografometr 3D.....	68
Rys. 2.21. Reprezentatywny profilogram powierzchni kompozytu epoksydowo-szklanego (7); $g = 2,10$ mm; oczyszczanie chemiczne.....	68
Rys. 2.22. Wygląd powierzchni kompozytu epoksydowo-szklanego (7); $g = 2,10$ mm; obróbka mechaniczna, profilografometr 3D.	69
Rys. 2.23. Reprezentatywny profilogram powierzchni kompozytu epoksydowo-szklanego (7); $g = 2,10$ mm; obróbka mechaniczna.	70
Rys. 3.1. Schemat połączenia klejowego jednozakładkowego: b – szerokość elementów klejonych, g – grubość elementów klejonych, g_k – grubość spoiny klejowej, l – długość elementów klejonych, l_z – długość spoiny klejowej, P – siła przedstawiająca sposób i kierunek obciążenia połączenia.	81

Rys. 3.2. Wytrzymałość na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-2024 PLT3 ($l_z = 24$ mm; $g = 0,64$ mm) po różnych sposobach przygotowania powierzchni: I – bez przygotowania powierzchni, II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne, V – trawienie, VI – anodowanie, VII – chromianowanie.....	84
Rys. 3.3. Wytrzymałość na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 ($l_z = 27$ mm; $g = 0,80$ mm) po różnych sposobach przygotowania powierzchni: I – bez przygotowania powierzchni, II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.	85
Rys. 3.4. Wytrzymałość na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach tytanowych CP1 ($l_z = 8$ mm; $g = 0,40$ mm) po różnych sposobach przygotowania powierzchni: I – bez przygotowania powierzchni, II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.....	86
Rys. 3.5. Wytrzymałość na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach tytanowych CP3 ($l_z = 16$ mm; $g = 0,80$ mm) po różnych sposobach przygotowania powierzchni: I – bez przygotowania powierzchni, II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.....	87
Rys. 3.6. Wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych jednorodnych kompozytu epoksydowo-szklanego (7) ($l_z = 15$ mm; $g = 2,10$ mm) po różnych sposobach przygotowania powierzchni: I – bez przygotowania powierzchni, II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne	88
Rys. 3.7. Wytrzymałość na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0, blach tytanowych CP3 oraz połączeń klejowych hybrydowych 7075/CP3 po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.....	89
Rys. 3.8. Wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych jednorodnych kompozytu epoksydowo-szklanego (7) i blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 oraz połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/2024 po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.....	91
Rys. 3.9. Wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych jednorodnych kompozytu epoksydowo-szklanego (7) i blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 oraz połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/7075 po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.....	92
Rys. 3.10. Wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych jednorodnych kompozytu epoksydowo-szklanego (7), blach tytanowych CP1 oraz połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/CP1 po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.....	93

Rys. 4.1. Swobodna energia powierzchniowa i jej składowe oraz wytrzymałość na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-2024 PLT3; $g = 0,64$ mm po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.	103
Rys. 4.2. Swobodna energia powierzchniowa i jej składowe oraz wytrzymałość na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0; $g = 0,80$ mm po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.	104
Rys. 4.3. Swobodna energia powierzchniowa i jej składowe oraz wytrzymałość na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach tytanowych CP1; $g = 0,40$ mm po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.	105
Rys. 4.4. Swobodna energia powierzchniowa i jej składowe oraz wytrzymałość na ścinanie jednorodnych połączeń klejowych blach tytanowych CP3; $g = 0,80$ mm po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.	106
Rys. 4.5. Swobodna energia powierzchniowa i jej składowe oraz wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych jednorodnych kompozytu epoksydowo-szklanego (7); $g = 2,10$ mm po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.	107
Rys. 4.6. Schemat i rozmiary połączenia klejowego doczołowego: P – siła przedstawiająca sposób i kierunek obciążenia połączenia.....	108
Rys. 4.7. Składowa dyspersyjna SEP oraz wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych hybrydowych 7075/CP3 po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.	110
Rys. 4.8. Składowa dyspersyjna SEP oraz wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/2024 po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.	111
Rys. 4.9. Składowa dyspersyjna SEP oraz wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/7075 po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.	112
Rys. 4.10. Składowa dyspersyjna SEP oraz wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych hybrydowych kompozyt/CP1 po różnych sposobach przygotowania powierzchni: II – oczyszczanie chemiczne, III – obróbka mechaniczna, IV – obróbka mechaniczna i oczyszczanie chemiczne.	113
Rys. 5.1. Opis elementów typu cohesive COH3D8 [1].	119

Rys. 5.2. Model połączenia siatki elementów skończonych z wykorzystaniem interakcji typu tie: a) schemat poglądowy połączenia siatki MES [1], b) opracowany model.	119
Rys. 5.3. Kryterium zniszczenia traction-separation zastosowane do opisu spoiny klejowej [225, 322]: t – obciążenie, δ – przemieszczenie, δ_{in} – przemieszczenie węzłów elementu skończonego odpowiadające momentowi inicjacji zniszczenia, δ_f – wartość efektywnej separacji odpowiadająca całkowitej utracie sztywności elementu skończonego.	121
Rys. 5.4. Model materiałowy kleju (na podstawie [103]).....	122
Rys. 5.5. Model numeryczny jednozakładkowego połączenia klejowego: a) widok strefy spoiny klejowej, b) widok szczegółowy [220, 240].	123
Rys. 5.6. Warunki brzegowe i obciążenie przyjęte w modelu numerycznym jednozakładkowego połączenia klejowego [240].	123
Rys. 5.7. Zależność $s = f(\epsilon)$ przyjętych modeli materiałowych: a) EN-AW2024, b) EN AW-7075, c) CP1.....	124
Rys. 5.8. Utrata sztywności elementów skończonych spoiny klejowej w jednorodnym połączeniu klejowym kompozytu epoksydowo-aramidowego (4) ($g = 0,60$ mm) na poziomie: a) 70%, b) 100%.....	129
Rys. 5.9. Utrata sztywności elementów skończonych spoiny klejowej w jednorodnym połączeniu klejowym blach ze stopu aluminium EN AW-7075PLT0 ($g = 0,80$ mm) na poziomie: a) 60%, b) 100%.....	129
Rys. 5.10. Utrata sztywności elementów skończonych spoiny klejowej w połączeniu klejowym hybrydowym: kompozyt epoksydowo-aramidowy (4) i blacha tytanowa CP1, na poziomie: a) 70%, b) 100%.....	130
Rys. 5.11. Utrata sztywności elementów skończonych spoiny klejowej w połączeniu klejowym hybrydowym: blacha ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 i blacha tytanowa CP3, na poziomie: a) 65%, b) 100%.	131
Rys. 5.12. Etapy wyężenia spoiny klejowej jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 ($g = 0,64$ mm): a) rozkład maksymalnego naprężenia głównego w zakresie sprężystym, b) inicjacja zniszczenia spoiny klejowej, c) oraz d) utrata sztywności elementów spoiny klejowej w kolejnych etapach obciążenia [225].....	134
Rys. 5.13. Przykładowy stan odkształcenia elementów połączenia klejowego blach ze stopu aluminium EN AW-2024PLT3 o grubości 0,64 mm: a, b, c) rozkład naprężenia zredukowanego H-M-H.....	136
Rys. 5.14. Stan odkształcenia połączeń jednorodnych blach ze stopów aluminium: a) EN AW-7075PLT0, $g = 1$ mm, b) EN AW-2024PLT3, $g = 1$ mm; rozkład naprężenia zredukowanego H-M-H.....	137
Rys. 5.15. Odkształcenia jednorodnych połączeń klejowych blach ze stopów aluminium: a) EN AW-7075PLT0, $g = 1$ mm ($\epsilon = 0,0004$); b) EN AW-2024PLT3, $g = 1$ mm ($\epsilon = 0,0169$).	138

Selected issues in constituting homogeneous and hybrid adhesive joints

Abstract

This monograph is an attempt to present selected problems regarding constitution of homogeneous and hybrid adhesive joints, the former formed on adherends of the same structural material, the latter on hybrid structural materials in terms of e.g. mechanical properties. The tests and analyses were conducted with a view to acquiring and broadening the knowledge of vital importance at the adhesive joining technological process designing stage, whether homogeneous or hybrid joints. Hence experimental tests conducted in research included operations connected with determining both characteristics of the surface of tested structural materials as well as adhesive joint strength, including numerical analysis of homogeneous and hybrid joints. The discussion of homogeneous and hybrid adhesive joints formation problems includes the evaluation of constitution of adhesive properties of adhered materials surface, which is crucial to joint strength. The method of modification and adjustment of the properties in questions selected in tests was simultaneously one of basic methods, namely surface treatment of analysed test material. It was proved that adhesive properties of bonded materials, characterised by the surface free energy and its polar and dispersive components can be constituted by the application of different surface treatment technologies. Moreover, it was established that this is the dispersive component, and not the polar one, which correlates more strongly with static strength. Furthermore, when identical adhesive bonding technology and adhesive were applied, different (usually higher) joint strength was obtained in hybrid joints as compared to homogeneous joints of identical materials. It was noticed that chemical methods of surface preparation are of considerable influence on strength of adhesive joints. Numerical analysis of a finite element method of hybrid adhesive joints enabled to broaden the interpretation of adhesive joint strength test results (focused predominantly on adhesive properties evaluation) by including physical properties of adherends. The final part of the monograph comprises summary and conclusions of a cognitive and functional character.

