



**POLITECHNIKA
BYDGOSKA**
im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

RADA NAUKOWA DYSZYPLINY INŻYNIERIA MECHANICZNA

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Sebastian Karolewski

**WPŁYW WYBRANYCH PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH
NA WYTRZYMAŁOŚĆ ZŁĄCZA KLEJONEGO
STOSOWANEGO W POŁĄCZENIACH ELEMENTÓW
O RÓŻNYCH WŁAŚCIWOŚCIACH MECHANICZNYCH**

***Influence of selected process parameters on the strength
of a bonded joint used to join components
with different mechanical properties***

DZIEDZINA: NAUKI INŻYNIERYJNO-TECHNICZNE
DYSZYPLINA: INŻYNIERIA MECHANICZNA

PROMOTOR

DR HAB. INŻ. ADAM LIPSKI

LABORATORIUM BADAŃ MATERIAŁÓW I KONSTRUKCJI

WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ

POLITECHNIKA BYDGOSKA IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH

PROMOTOR POMOCNICZY

DR INŻ. SYLWESTER BOROWSKI

KATEDRA MECHATRONIKI I MASZYN ROBOCZYCH

Bydgoszcz, 2024

SPIS TREŚCI

1.	WSTĘP.....	5
1.1.	Cel i zakres pracy	6
2.	ANALIZA LITERATURY	7
2.1.	Charakterystyka płyt meblowych	7
2.2.	Badania płyt drewnopochodnych	8
2.3.	Okucia meblowe	9
2.3.1.	Materiały na okucia	9
2.3.2.	Powłoki galwaniczne	9
2.4.	Połączenia klejone	10
2.4.1.	Proces klejenia	15
2.4.2.	Połączenia klejone w meblarstwie	17
2.4.3.	Kontrola jakości połączenia klejonego	20
2.4.4.	Rodzaje uszkodzeń połączeń klejonych	20
2.5.	Badania połączeń klejonych	21
2.6.	Podsumowanie	22
3.	BADANIA DOŚWIADCZALNE	23
3.1.	Obiekt badań	23
3.2.	Program badań	24
3.3.	Identyfikacja płyt drewnopochodnych	25
3.3.1.	Ogólna charakterystyka zastosowanych płyt	25
3.3.2.	Badanie wytrzymałości na rozciąganie płyt	27
3.3.2.1.	Próbki do badań	27
3.3.2.2.	Przebieg i wyniki badań	29
3.3.2.3.	Analiza wyników badań	35
3.3.3.	Badanie wytrzymałości na zginanie	40
3.3.3.1.	Próbki bez otworów	40
3.3.3.2.	Próbki z otworami	42
3.3.3.3.	Próbki z zawiasami	45
3.3.3.4.	Stanowisko do badań na zginanie	47
3.3.3.5.	Postać uszkodzeń próbek zginanych czteropunktowo	49
3.3.3.6.	Wyniki badań próbek bez otworów	49

3.3.3.7.	Wyniki badań próbek z otworami	49
3.3.3.8.	Wyniki badań próbek z otworami i zamocowanym zawiasem	49
3.3.3.9.	Analiza wyników badań – wpływ grubości płyty	51
3.3.3.10.	Analiza wyników badań – wpływ otworów i zawiasów	59
3.4.	Charakterystyka stali S235	60
3.5.	Charakterystyka klejów	62
3.6.	Podsumowanie.....	63
4.	BADANIA POŁĄCZEŃ KLEJONYCH	64
4.1.	Program badań.....	65
4.2.	Próbki do badań.....	66
4.3.	Przygotowanie próbek	67
4.3.1.	Chropowatość powierzchni łączonych elementów	68
4.3.2.	Grubość spoiny klejonej	70
4.4.	Stanowisko i przebieg prób ścinania próbek klejonych	71
4.5.	Wyniki badań.....	72
4.6.	Analiza wyników badań	76
4.6.1.	Wpływ grubości płyty drewnopochodnej CDF	77
4.6.1.1.	Połączenie stali i płyt o różnej grubości.....	77
4.6.1.2.	Wnioski z analizy	77
4.6.2.	Wpływ docisku łączonych elementów	78
4.6.2.1.	Połączenie stali nieszlifowanej	79
4.6.2.2.	Połączenie stali szlifowanej	79
4.6.2.3.	Połączenie stali nieszlifowanej i płyty nieszlifowanej	79
4.6.2.4.	Połączenie stali nieszlifowanej i płyty szlifowanej ..	81
4.6.2.5.	Połączenie stali szlifowanej i płyty szlifowanej.....	82
4.6.2.6.	Połączenie stali pokrytej galwanicznie	83
4.6.2.7.	Połączenie stali pokrytej galwanicznie i płyty drewnopodobnej	83
4.6.2.8.	Wnioski z analizy	84
4.6.3.	Wpływ przygotowania powierzchni łączonych elementów	85
4.6.3.1.	Połączenie stali ze stalą.....	85
4.6.3.2.	Połączenie stali i płyty drewnopochodnej	86

4.6.3.3.	Wnioski z analizy	87
4.6.4.	Wpływ powłoki galwanicznej	87
4.6.4.1.	Połączenie stali nieszlifowanej lub stali pokrytej galwanicznie	87
4.6.4.2.	Połączenie stali pokrytej galwanicznie	88
4.6.4.3.	Połączenie stali pokrytej galwanicznie i płyty drewnopochodnej	89
4.6.4.4.	Wnioski z analizy	89
4.7.	Podsumowanie.....	90
5.	BADANIA TRWAŁOŚCI POŁĄCZEŃ	92
5.1.	Obiekt badań.....	92
5.2.	Przygotowanie próbek	93
5.3.	Program badań.....	96
5.4.	Stanowisko do badań eksploatacyjnych	97
5.5.	Przebieg badań.....	99
5.6.	Wyniki badań.....	100
5.7.	Podsumowanie.....	101
6.	WNIOSKI	102
7.	LITERATURA.....	104
	STRESZCZENIE	111
	SUMMARY	112

1. WSTĘP

Nieustanny wzrost konsumpcji wpływa na zwiększenie popytu na dobra materialne, co w konsekwencji przekłada się na rozwój produkcji przemysłowej. W celu sprośnięcia zapotrzebowaniu wytwarza się duże ilości produktów, również takich, które charakteryzują się krótkim okresem eksploatacji. Sytuację taką można zaobserwować również w przypadku przetwórstwa płyt drewnopochodnych. W konsekwencji następuje nadmierne wykorzystanie surowców naturalnych, a także wytwarzanie dużej ilości odpadów, tj.: obrzynów powstających w wyniku odcinania obrzeży płyt wiórowych oraz ich frezowania, a także pyłu drzewnego wytwarzanego najczęściej na etapie szlifowania. Na szczególną uwagę zasługuje fakt występowania w obrzynach ok. 10% żywicy klejowej oraz materiału ściernego w pyłe drzewnym. Odpady te często wprowadzane są bezpośrednio lub pośrednio do środowiska [1].

Producenci mebli odsprzedają odpady drzewne pochodzące z produkcji z przeznaczeniem na spalanie. Postępowanie takie nie jest racjonalne i może powodować zagrożenie dla środowiska. Przetwarzanie odpadów z produkcji i ich ponowne wykorzystanie wydaje się znacznie bardziej korzystnym rozwiązaniem [2]. Z odpadów poprodukcyjnych mogą być wytwarzane najpopularniejsze płyty drewnopochodne, w tym płyty wiórowe, płyty o średniej gęstości (MDF – *medium density fibreboard*), płyty o wysokiej gęstości (HDF – *high density fibreboard*) czy płyty o orientowanych wiórach (OSB – *oriented strand board*).

Producenci mebli wytwarzają zazwyczaj fronty meblowe z płyt wiórowych lub MDF, które przeważnie charakteryzują się grubością 18 mm. Ze względu na stosunkowo wysoką masę wykonane w tej technologii fronty meblowe łączone są z zawiasami za pomocą połączeń śrubowych lub kołków rozporowych. Jednak taka metoda wytwarzania wymaga frezowania otworów montażowych, co wpływa na obniżenie wytrzymałości frontu meblowego i zwiększa stopień skomplikowania procesu produkcji, a także wiąże się z powstawaniem problematycznych odpadów.

Innowacyjnym rozwiązaniem na rynku płyt meblowych są laminowane płyty drewnopochodne o wysokiej gęstości, które mogą być wytwarzane z surowców pochodzących z recyklingu. W przeciwieństwie do płyt wiórowych i MDF są one dostępne w mniejszym zakresie grubości (od 6,4 mm), a ich zastosowanie w konstrukcji frontów meblowych niesie za sobą wiele korzyści. Jedną z nich jest zredukowanie masy samego frontu, co korzystnie wpływa na pracę zawisów poprzez wywieranie mniejszego obciążenia. Występujące w zawiasach siły tarcia są mniejsze, co pozytywnie wpływa na żywotność elementów, a także na ergonomię gotowego produktu. Redukcja surowca potrzebnego do produkcji cieńszych płyt wprowadza wiele oszczędności na etapie transportu, podczas samej produkcji, a także eksploatacji.

Ograniczenie masy poprzez zastosowanie cieńszych, a zarazem lżejszych płyt drewnopochodnych jest pożądane w wielu dziedzinach przemysłu. Tego

typu rozwiązania wdrażane są w konstrukcjach różnego rodzaju pojazdów, w tym samochodów, kamperów, łodzi czy pociągów, gdzie ograniczenie gabarytów, a przede wszystkim masy jest korzystne ze względów ekonomicznych i ekologicznych.

Jednakże ze względu na niewielką grubość płyt drewnopochodnych zastosowanie otworów lub wierceń pod zawiasy meblowe jest ograniczone, a w niektórych konfiguracjach wręcz niemożliwe do wykonania. Wywiercenie otworów montażowych wiąże się z ryzykiem osłabienia frontu meblowego podczas eksploatacji gotowego produktu lub już na etapie produkcji, gdzie głębokie frezowania mogą osiągnąć laminatu znajdującego się po przeciwnej stronie płyty i doprowadzić do jego uszkodzenia.

Brak możliwości zastosowania połączeń śrubowych, w szczególności dla płyt o najmniejszej grubości, tj. 6,4 mm, w połączeniu z licznymi zaletami płyt drewnopochodnych o wysokiej gęstości dały podstawę do poszukiwania innego sposobu wykonania trwałego połączenia frontu meblowego wykonanego pomiędzy wspomnianymi płytami i zawiasami meblowymi. W niniejszej pracy postanowiono przeanalizować możliwość zastosowania nowego rodzaju prefabrykatu, jakim są niewątpliwie płyty drewnopochodne o wysokiej gęstości, w konstrukcji frontu meblowego. Ze względu na wspomniane powyżej trudności w zastosowaniu klasycznego rozwiązania, jakim jest zastosowanie w konstrukcji frontu zawiasów łączonych za pomocą łączników śrubowych, postanowiono sprawdzić możliwość zastosowania w procesie montażu procesu klejenia, który nie ingeruje w strukturę łączonych elementów tak bardzo, jak połączenia śrubowe lub kołki rozporowe, a pozwala na łączenie materiałów o różnych właściwościach mechanicznych.

1.1. Cel i zakres pracy

Celem naukowym niniejszej pracy jest zbadanie możliwości zastąpienia złącza śrubowego stosowanego do mocowania zawiasów meblowych złączem klejonym stosowanym do połączenia materiałów o różnych właściwościach wytrzymałościowych, tj. zawiasu stalowego z płytą drewnopochodną.

Zakres niniejszej pracy obejmuje trzy główne obszary:

1. Analizę literatury odnoszącą się do materiałów, metod łączenia i metod badawczych wykorzystanych w pracy.
2. Badania doświadczalne:
 - płyt drewnopochodnych CDF pod kątem określenia ich właściwości wytrzymałościowych,
 - połączeń klejonych obejmujących ocenę wpływu na nośność połączenia wybranych czynników związanych z ich przygotowaniem.
3. Badania trwałości połączeń zawiasów meblowych i elementów konstrukcyjnych przygotowanych na podstawie opracowanych w ramach pracy wytycznych.

2. ANALIZA LITERATURY

2.1. Charakterystyka płyt meblowych

Materiały drzewno-polimerowe w postaci kompozytów, które zawierają odpady z produkcji płyt drewnopochodnych posiadają dobre właściwości mechaniczne. Parametry te często porównywalne są z kompozytami zawierającymi mączkę drzewną. Generalnie kompozyty zawierające zmielone fragmenty obrzynów odznaczają się wyższymi właściwościami mechanicznymi aniżeli kompozyty zawierające dodatek pyłu drzewnego. Natomiast w przypadku parametru udarności zaobserwowano odmienną zależność [1]. Gozdecki i in. (2010) przeprowadzili badania wytrzymałości kompozytów drzewno-polimerowych zawierających odpadowy materiał drzewny z produkcji płyt wiórowych. W tym celu oznaczono ich wytrzymałość na zginanie i na rozciąganie, a także udarność bez karbu z wykorzystaniem metody Charpy'ego zgodnie z normami EN ISO 527, EN ISO 178-1 i EN ISO 179-2. W badaniach wykonano również oznaczenie nasiąkliwości próbek kompozytowych. Oznaczenie prowadzono przez okres 28 dni w wodzie o temperaturze 20 °C [1].

Obecnie meble produkowane są zazwyczaj z laminowanej płyty MDF [3]. Z płyt MDF wytwarzane są również fronty meblowe. Płyty te powstają w wyniku suchego prasowania włókien lignocelulozowych w obecności żywicy syntetycznej pod ciśnieniem i w odpowiedniej temperaturze. Surowcem wykorzystywanym w procesie produkcji są zazwyczaj włókna drewna lub inne włókna roślinne, np. wysuszone włókno trzciny cukrowej [4]. Ponadto w produkcji płyt wiórowych mogą być wykorzystywane również trociny [2]. Do najważniejszych zalet płyt wiórowych należy zaliczyć możliwość regulacji struktury gotowego produktu, odpowiednie właściwości mechaniczne, a także niską cenę. Struktura płyt MDF jest jednak mało odporna na działanie czynników zewnętrznych, w szczególności wilgoci, gdyż jest to materiał bardzo chłonny. Płyta narażona na kontakt z wodą pęcznieje i odkształca się, a w konsekwencji traci swoje właściwości. Źródła literaturowe podają, że 1 kilogram rozdrobnionej płyty MDF może pochłonąć do 2 dm³ wody [5]. W przypadku narażenia na działania otwartego ognia płyty szybko ulegają zwęgleniu. Płyty MDF mogą stwarzać wiele problemów eksploatacyjnych, a do głównych z nich należy zaliczyć uszkodzenia mechaniczne stosowanych powszechnie połączeń śrubowych. Badanie tego typu połączeń w płytach pilśniowych wykazało, że typowe zniszczenia płyt drewnopochodnych obejmuje rozwarstwienie płyty i wyrwanie łącznika bez wyłamania krawędzi płyty drewnopochodnej [6]. Jednak połączenia mogą również ulec zniszczeniu w wyniku wykruszenia krawędzi. Sytuację taką można spotkać w przypadku, gdy obciążenie przewyższy graniczną nośność [7]. Klasyczne płyty meblowe o większych grubościach w nieefektywny sposób zagospodarowują przestrzeń użytkową poprzez zmniejszenie kubatury konstrukcji meblowych.

W procesie produkcji mebli surowe płyty MDF muszą zostać oklejone laminatem w postaci folii. Jednak ze względu na charakter płyt w finalnym produkcie mogą występować liczne uszkodzenia np. w postaci odklejania laminatu. Za główne przyczyny powstawania tego typu niezgodności uważa się występujące w procesie produkcji zanieczyszczenia, dużą wilgotność materiału bazowego, a także niewłaściwe wykonanie połączenia płyty z laminatem [8].

2.2. Badania płyt drewnopochodnych

Badanie właściwości mechanicznych drewna polega przede wszystkim na wyznaczeniu jego wytrzymałości na zginanie, rozciągania, a także ściskanie, ścinanie, skręcanie, zmęczenie czy docisk miejscowy. Tego typu badania przeprowadza się w oparciu o znormalizowane próbki charakteryzujące się wilgotnością $12 \pm 3\%$. Na wytrzymałość drewna wpływają takie czynniki jak rodzaj drewna, odchylenie kierunku oddziaływania sił w odniesieniu do układu włókien, czas oddziaływania obciążeń, wilgotność, wady i uszkodzenia drewna, gęstość, temperatura drewna oraz wymiary próbki [9], [10], [11], [12].

Jak podają źródła literaturowe w wyniku wzrostu wilgotności drewna następuje zmniejszenie jego wytrzymałości. Natomiast wzrost gęstości drewna przy ustalonej wilgotności powoduje liniowy przyrost jego wytrzymałości. Odwrotną sytuację można zaobserwować w przypadku wzrostu jego temperatury. Występujące w drewnie wady stanowią zaburzenia jego struktury, co w konsekwencji obniża jego wytrzymałość. Szczególnie wrażliwy na tego typu defekty jest pomiar wytrzymałości na rozciąganie wzdłuż włókien. Drewno charakteryzuje się większą wytrzymałością podczas występowania obciążeń stałych. Długotrwałe obciążanie drewna powoduje obniżenie jego wytrzymałości doraźnej. Spadek ten zazwyczaj wynosi od 50 do 60% [9], [13].

Znane są badania wytrzymałości płyt wiórowych wytworzonych z wiórów sosnowych i wiórów pozyskanych z odpadowego drewna jabłoni, które pozyskano z cięć pielęgnacyjnych. W tym przypadku do oceny wytrzymałości materiału wykorzystano statyczną próbę zginania i moduł sprężystości przy zginaniu, a także wytrzymałość na rozciąganie określoną w kierunku prostopadłym do płaszczyzny płyty [14], [15]. Oleńska i Biernacka (2021) dokonały pomiaru wytrzymałości trójwarstwowej płyty drewnopochodnej w zależności od jej wilgotności w oparciu o statyczną próbę zginania. W badaniach uwzględniono również standardowy pomiar gęstości próbek badawczych w oparciu o normę PN-EN 323:1999 [16], którą wyznacza się na podstawie stosunku masy próbki do jej objętości [17]. W pracy [18] przedstawiono badanie wytrzymałości płyt w warunkach trójpunktowego zginania wg normy ASTM D-7264. Próbki charakteryzowały się wymiarami: długością 100 mm, szerokością 5 mm oraz grubością 3,2 mm. W badaniu wykorzystano maszynę wytrzymałościową Enerpac o obciążeniu przyłożonym na środku próbki i narastającym z szybkością 1 mm/min. Rozstaw podpór wynosił 80 mm. Aicher i Klöck dokonali ilościowej oceny wybranych kryteriów

wytrzymałościowych płyt OSB, w tym wytrzymałości na rozciąganie poza ośią płyt [19]. Bekhta i in. (2003) przeprowadzili badanie wytrzymałości na zginanie płyt drewnopochodnych w warunkach krótkotrwałego wpływu temperatury. W tym celu wykorzystano płyty drewnopochodne MDF wiązane mocznikiem i formaldehydem (PB), oraz płyty o płaskich, ukierunkowanych włóknach (OSB – *Oriented Strand Boards*). Próbkę przebadano w zakresie temperatur od 20 °C do 140 °C. Stwierdzono, że wytrzymałość na zginanie zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury. Sytuacja taka miała miejsce w przypadku wszystkich badanych rodzajów płyt. Jednak najniższym spadkiem odznaczały się płyty OSB. Przyczyną takiego stanu rzeczy był wzrost temperatury powodujący uszkodzenie cząsteczek zarówno płyty, jak i samego kleju. Ponadto autorzy wykazali, że godzinna ekspozycja w najwyższej przebadanej temperaturze, tj. 140 °C obniżyła wytrzymałość na zginanie dla płyt MDF o 37%, dla płyt PB o 40%, a dla płyt OSB o 30% [20].

Do najpowszechniej stosowanych metod oceny właściwości mechanicznych drewna należą wytrzymałość na zginanie oraz wytrzymałości na rozciąganie. Z tego względu obie metody stanowiły podstawę identyfikacji materiału z płyty drewnopochodnej CDF użytego w niniejszej pracy.

2.3. Okucia meblowe

2.3.1. Materiały na okucia

Okucia stanowią grupę elementów uzupełniających stolarkę meblową lub budowlaną. Ze względu na złożoność konstrukcji, funkcjonalność oraz wygląd produktu okucia muszą spełniać szereg wymagań. Do najważniejszych z nich należy możliwość przenoszenia dużych obciążeń, trwałość, a także estetyka samego okucia. Z tego względu tego typu produkty muszą być wykonane z odpowiednich materiałów. Elementy okuć wykonywane są przede wszystkim ze stali, mosiądzu, aluminium czy tworzyw sztucznych [21]. Dla zabezpieczenia oraz nadania właściwych cech wizualnych elementy okuć poddawane są procesom galwanicznym.

2.3.2. Powłoki galwaniczne

W celu poprawy właściwości antykorozyjnych, dekoracyjnych oraz technologicznych powszechnie stosuje się w przemyśle meblarskim powłoki galwaniczne. Do najpopularniejszych metod powlekania okuć meblowych należą chromowanie oraz niklowanie. Dla uzyskania wysokiej jakości powłoki charakteryzującej się wysoką trwałością najczęściej okucia stalowe powleka się warstwą miedzi, a następnie niklu. Taka kombinacja stanowi bazę dla powłoki chromu [22], [23].

Zgodnie z normą PN-EN 12540:2002 [24] wewnątrz pomieszczeń, w których może pojawić się wilgoć, minimalna grubość powłoki błyszczącego niklu wynosi 10 µm, a nakładany na nią chrom powinien odznaczać się warstwą

o minimalnej grubości 0,3 μm . Uzyskiwane w procesach galwanizacji powłoki odznaczają się zazwyczaj grubością warstwy rzędu 8-10 μm [25], [26]. Jednakże powłoki galwaniczne mogą charakteryzować się również większymi grubościami. Kukla i in. (2018) opublikowali wyniki pomiarów grubości warstwy chromu na próbkach stali niskostopowej 15HM oraz próbkach ze staliwa węglowego L-200. W tych przypadkach grubości warstw na próbkach poddanych chromowaniu technicznemu wynosiły odpowiednio 15, 30 oraz 45 μm [27].

Przeprowadzone badania wykazały, że stalowe sworznie pokryte warstwą chromu ograniczają tarcie, przez co wykazują mniejszą ścieralność [28]. Podobne rezultaty uzyskano podczas eksperymentalnej oceny wpływu niklowania na zwiększenie nośności pasowań wciskowych pomiędzy próbkami wykonanymi ze stali oraz mosiądzu. Badanie siły osiowej wykazało zwiększenie nośności o maksymalnie 20% na korzyść pasowań platerowanych [29]. Galwaniczne powłoki chromowe, w przeciwieństwie do powłok niklowych, charakteryzują się mimo wszystko lepszymi właściwościami mechanicznymi i są bardziej odporne na korozję. Podwyższone właściwości powłok chromowych wiążą się jednak z wyższą ceną.

Ze względu na liczne zalety oraz estetykę gotowych produktów powłoki galwaniczne powszechnie stosowane są jako końcowy etap wykończenia okuć meblowych.

2.4. Połączenia klejone

Obecnie niemal w każdej dziedzinie gospodarki spotykane są połączenia klejone. Posiadają one wiele zalet. Do najważniejszych należy zaliczyć możliwość łączenia materiałów o różnych właściwościach chemicznych, fizycznych oraz mechanicznych. Stosowanie różnych materiałów pozwala zoptymalizować konstrukcję pod względem jej masy i wymiarów. W przypadku elementów budowlanych wykorzystanie połączeń klejonych pozwala na dostarczenie do miejsca docelowego mniejszych komponentów, gdzie następuje ich łączenie [30]. Wiele gałęzi przemysłu coraz częściej stosuje nowe materiały, w tym materiały kompozytowe, które zastępują dotychczas wykorzystywane surowce. Sytuacja taka spotykana jest w przemyśle lotniczym, gdzie tradycyjne połączenia nitowane zastępowane są nowoczesnymi połączeniami klejowymi. Sytuacja taka wynika z faktu, że coraz więcej elementów konstrukcji lotniczych wytwarza się z materiałów kompozytowych. Łączenie tego typu materiałów z elementami konstrukcyjnymi wykonanymi ze stopów aluminium jest utrudnione. Z tego też względu stosuje się łączenie wspomnianych elementów przy użyciu innowacyjnych połączeń klejonych, które często charakteryzują się większą wytrzymałością niż tradycyjne połączenia nitowane. Obok przemysłu lotniczego podobne trendy zauważyć można w przemyśle motoryzacyjnym czy kolejowym. W tym przypadku połączenia klejone wykorzystywane są w łączeniu elementów kompozytowych z innymi materiałami, np. w łączeniu owiewek samochodów ciężarowych z ich kabinami,

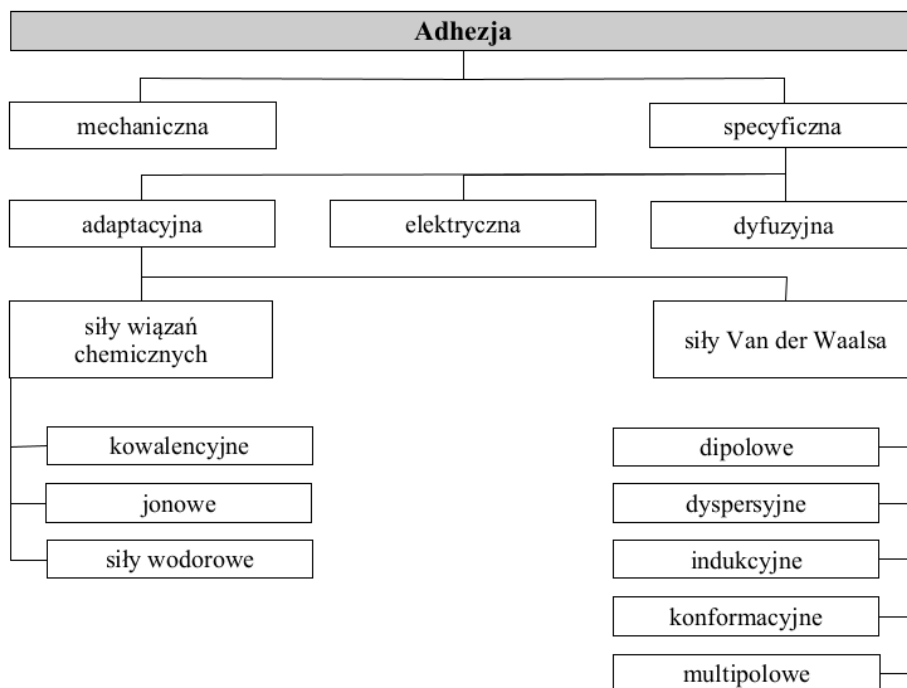
w mocowaniu kompozytowych paneli karoserii czy poszyć autobusów, a także pojazdów szynowych. Wykorzystanie połączeń klejonych wiąże się z redukcją masy pojazdów, co jest istotne z punktu widzenia ekonomii produkcji i ekologii, zarówno na etapie produkcji, eksploatacji, jak również utylizacji pojazdu. Ponadto w przeciwieństwie do połączeń klejonych, połączenia wykonywane metodą spawania łukowego stwarzają wiele problemów, przede wszystkim w przypadku elementów o małej grubości, elementów aluminiowych czy wykonanych ze stali nierdzewnej. W tych przypadkach może dochodzić do odkształcania się spajanych elementów, przywierania odprysków i obniżenia wytrzymałości materiału. Procesy klejenia z powodzeniem wykorzystywane są w przemyśle stoczniowym. Wiele elementów we współczesnych jachtach i łodziach montowanych jest z wykorzystaniem kleju. Rozwiązanie takie jest łatwe w wykonaniu, gdyż ogranicza liczbę zbędnych operacji w procesie produkcyjnym, takich jak wiercenie, gwintowanie, czy uszczelnianie.

Procesy klejenia mogą być stosowane również do łączenia elementów mebli, takich jak szafki kuchenne czy szafki ubraniowe na basenach. Ograniczenie w konstrukcji nowoczesnych mebli ilości materiału poprzez stosowanie lżejszych płyt meblowych o mniejszej grubości pozwala na obniżenie kosztów produkcji. Ponadto rozwiązanie takie umożliwia efektywniejsze zagospodarowywanie przestrzeni użytkowej pomieszczeń. Niższa masa frontów meblowych to również mniejsze obciążenie zawiasów. Z tego też względu również same zawiasy mogą być mniejsze i wytwarzane z mniejszej ilości materiału. Powiązane jest to z wykorzystaniem mniejszej ilości surowców w procesie produkcji, co w konsekwencji wpływa na ograniczenie oddziaływania na środowisko od etapu pozyskiwania surowca, poprzez mniejsze zużycie energii, aż po redukcję odpadów i ograniczenie emisji szkodliwych gazów. Jednak ograniczona grubość płyt meblowych eliminuje możliwość zastosowania tradycyjnych połączeń kształtowych lub śrubowych, gdyż wykonanie przelotowych otworów montażowych we frontach meblowych jest nieestetyczne i w istotny sposób może osłabić ich wytrzymałość. Dlatego takie rozwiązanie jest niezalecane we współczesnych konstrukcjach meblowych. W związku z tym rozwiązaniem tego problemu wydaje się być łączenie mocowań z płytą meblową przy pomocy połączeń klejonych.

Rozwój technologii klejenia stawia przed producentami klejów nowe, coraz większe wymagania. Nadanie nowych właściwości produktom i dostosowanie ich do aktualnych potrzeb odbiorców wymaga nieustannej pracy laboratoriów badawczych. Wykonywanie połączeń klejonych jest złożonym procesem, dlatego też wymaga integracji inżynierii powierzchni, inżynierii materiałowej, a także mechaniki [30].

Z procesem klejenia ściśle wiąże się pojęcie adhezji. Dotyczy ono zjawisk powierzchniowych, które polegają na łączeniu się obiektów poprzez oddziaływanie wytwarzanego przez ładunki atomów pola sił. Warunkiem koniecznym wystąpienia adhezji jest niewielka odległości pomiędzy łączonymi powierzchniami rzędu $1\div 10$ nm [30].

Na Rys. 2.1 przedstawiono podział adhezji oraz sił wiązań adhezyjnych występującej w połączeniach klejonych.



Rys. 2.1. Podział rodzajów adhezji oraz sił wiązań adhezyjnych [31]

W połączeniach klejonych występuje przede wszystkim adhezja specyficzna oraz adhezja mechaniczną. W teorii mechanicznej zakłada się, że powstanie połączenia klejonego następuje w wyniku wnikięcia frakcji kleju w pory występujące w powierzchniach łączonych materiałów. W wyniku tego procesu powstają zakotwiczenia mechaniczne, dzięki którym możliwe jest przenoszenie obciążeń. Teoria ta uwzględnia szereg czynników, które mogą przyczynić się do większej wytrzymałości połączeń klejonych. Wśród nich należy wyróżnić: zwilżalność powierzchni łączonych materiałów, zdolność wnikania kleju, a także jego lepkość. Warunkiem wystąpienia silnego zjawiska adhezji jest możliwie jak największe wypełnienie porów w powierzchniach klejonych materiałów. Niekorzystnym jest występowanie wąskich przestrzeni w łączonych powierzchniach, w szczególności w przypadku stosowania klejów o wysokiej lepkości. W tym przypadku penetracja w głąb porów jest utrudniona, a klej przylega jedynie do zewnętrznych części powierzchni, natomiast w głębi przestrzenie te pozostają wypełnione powietrzem. Z tego też względu konieczne jest wykonywanie połączeń klejonych materiałów, które charakteryzują się odpowiednim poziomem chropowatości, a stosowany klej powinien odznaczać

się niewielką lepkością. W wyniku zwiększenia obciążenia połączenia klejonego materiałów porowatych, w przeciwieństwie do połączeń elementów o niewielkiej chropowatości, występują zdecydowanie większe odkształcenia spoiny. W takiej sytuacji powstawaniu odkształceń towarzyszy dużo większa absorpcja energii, przez co zaistnienie dekohezji wymaga również dostarczenia większej energii. W związku z tym, zgodnie z teorią adhezji mechanicznej, podczas wystąpienia obciążeń zewnętrznych nie następuje dekohezja na granicy faz spoin powstałych pomiędzy frakcją kleju a materiałem porowatym. Utwardzony na granicy faz klej, który wypełnił pory łączonych elementów, uniemożliwia wystąpienie dekohezji w tym miejscu. Teoria adhezji mechanicznej zakłada, że wytrzymałość spoiny nie jest determinowana przez występujące na granicy zjawiska międzyfazowe, lecz poprzez wytrzymałość kleju bądź spajanych elementów [30].

Podstawą adsorpcyjnej teorii adhezji jest wystąpienie oddziaływań międzycząsteczkowych na granicy faz, co w konsekwencji powoduje, że zbliżone na odpowiednią odległość ciała stałe i ciecz przylegają do siebie z określoną siłą. Dla zapewnienia wysokiej siły adhezji niezbędna jest bardzo dobra zwilżalność powierzchni [30].

W teorii adsorpcyjnej największe znaczenie odgrywają siły Van der Waalsa. Siły te oddziałują z największą siłą w kryształach, a także cieczach, zaś w gazach najslabiej [32], [33], [34]. Siła oddziaływań jest zależna od odległości międzycząsteczkowych, wśród których wyróżnia się następujące siły:

- dipolowe,
- dyspersyjne,
- konformacyjne,
- indukcyjne,
- multipolowe.

Obok sił Van der Waalsa należy wymienić siły wiązań chemicznych. Powstają one w efekcie reorganizacji układu elektronów walencyjnych w atomach ciał, które ze sobą sąsiadują. Zarówno stan energetyczny powierzchni, jak również aktywność chemiczna zaadsorbowanych cząstek wpływają na rezultat oddziaływania sił tych wiązań [35], [36]. Do wiązań chemicznych zalicza się:

- wiązania kowalencyjne,
- wiązania jonowe,
- wiązania sił wodorowych.

Podstawą elektrycznej teorii adhezji jest przepływ strumienia elektronów sąsiadujących ciał wykonanych z różnych materiałów. Odległość pomiędzy ciałami oraz różnica prac wyjścia elektronów wpływają na natężenie oraz czas wymiany elektronów. Wzrost elektroujemności oddziałujących ciał zwiększa ich wymianę. W wyniku tego procesu na zewnętrznej warstwie jednego ciała powstają nadmiarowe ładunki dodatnie, natomiast nadmiarowe ładunki ujemne powstają na zewnętrznej warstwie ciała bardziej ujemnego. Konsekwencją wymiany elektronów jest wytworzenie podwójnej warstwy elektrycznej i przyciąganie ciał [30].

Dyfuzyjna teoria adhezji zakłada wzajemne przenikanie się atomów kleju z atomami podłoża. Obydwa materiały charakteryzuje różnica potencjałów termodynamicznych cząstek, co umożliwia zachodzenie dyfuzji pomiędzy ciałami. Wymiana atomów w obszarze międzyfazowym doprowadza do ich wyrównania i równowagi termodynamicznej całego układu.

Rodzaj materiałów, temperatura, a także ciśnienie determinują proces dyfuzji. Za zalety połączeń dyfuzyjnych uznaje się zminimalizowanie naprężeń własnych na granicy faz oraz łagodną zmianę właściwości fizycznych w przejściu międzyfazowym. Wadą tego typu połączeń jest ograniczona dostępność materiałów pozwalających na wykonywanie dyfuzyjnych połączeń klejonych [36]. Teoria ta pozwala na analizę zjawiska w spoinach wykonanych z materiałów o zbliżonej rozpuszczalności. Postępująca dyfuzja powoduje, że cząstki materiałów dyfundują, a granica faz zanika na rzecz strefy międzyfazowej, która nie może zostać uznana za płaszczyznę przenoszącą naprężenia. Poprawne wykonanie dyfuzyjnych połączeń adhezyjnych wymaga:

- wysokiego stopnia powinowactwa kleju do podłoża w ujęciu zarówno chemicznym, strukturalnym, jak i geometrycznym,
- zastosowania odpowiedniego rozpuszczalnika,
- ciężaru cząsteczkowego kleju < 3000 daltonów (Da).

Drugim zjawiskiem, które określa mechanizm połączenia klejonego, jest kohezja. Pojęcie to opisuje powstałą w wyniku oddziaływania cząsteczek kleju wytrzymałość mechaniczną spoiny. Siły kohezji determinowane są przez defekty strukturalne materiałów, w tym mikropełnienia. Kolejnym czynnikiem wpływającym na wspomniane siły jest temperatura. W materiale, w którym zostanie osiągnięta wartość krytyczną tego parametru, może dochodzić do ograniczenia sił spójności. W konsekwencji zachodzi zjawisko dekohezji, czyli defragmentacji materiału [37][38]. Siły dyspersyjne w dużym stopniu wpływają na wartość kohezji i zależą od masy cząsteczkowej, a de facto od długości łańcuchów makrocząsteczek. Dodatek sypkich napełniaczy wpływa na wzrost wytrzymałości kohezyjnej spoiny [39].

Klejenie jest procesem trwałego łączenia elementów z wykorzystaniem warstwy kleju zaaplikowanej między nimi. Spajanie obiektów jest możliwe dzięki oddziaływaniom międzycząsteczkowym, tj. wspomnianej wyżej adhezji oraz kohezji. W wyniku procesu klejenia klej wnika w nierówności struktur wierzchnich łączonych materiałów i spaja obie struktury. Zaletą połączeń wykonywanych z użyciem kleju jest ich większa sztywność, możliwość przenoszenia większych obciążeń przez spoinę, a także równomierny rozkład naprężeń. W przeciwieństwie do połączeń kształtowych, głównie nitowych i śrubowych, eliminowane są karby, które stanowią obszary koncentracji naprężeń. Proces klejenia w znacznym stopniu wpływa na redukcję masy konstrukcji, a w konsekwencji na obniżenie kosztów jej wytworzenia [31][40]. Klejenie umożliwia łączenie różnych materiałów [37], których nie można zespolić za pomocą innych metod, jak również oddziaływania cieplne, które towarzyszą procesom spawania lub lutowania ograniczając jednocześnie

możliwość wystąpienia związanych z tymi technologiami defektów powierzchni. Niewątpliwą zaletą połączeń klejonych jest ich zdolność izolacyjna. Spoiny chronią łączone materiały przed oddziaływaniami cieplnymi, elektrycznymi oraz korozją elektrochemiczną, co jest szczególnie istotny w klejeniu elementów metalowych [30]. Za połączeniami klejonymi przemawia również możliwość klejenia materiałów o różnych wymiarach i kształtach oraz ich zastosowanie w przypadku, gdy estetyka połączeń jest szczególnie istotna, a której nie można osiągnąć stosując termiczne procesy spajania, które mogą powodować odbarwienia elementów [35], [41].

Pomimo wielu zalet wykonywanie połączeń klejonych wiąże się z kilkoma dość istotnymi problemami. Poprawne wykonanie połączeń klejonych wymaga właściwego przygotowania powierzchni, zachowania odpowiedniej technologii, jak również oceny otrzymanej spoiny. Ponadto połączenia klejone obarczone są możliwością występowania licznych defektów [30]. Zalicza się do nich [42], [43]:

- pęknięcia spoiny,
- wtrącenia,
- puste przestrzenie w warstwie kleju,
- delaminację,
- porowatości występujące w spoinie,
- niedoklejenia jakościowe i ilościowe,
- niewłaściwe utwardzenie spoiny.

Dla zapewnienie odpowiednich właściwości kleju konieczne jest również zachowanie odpowiednich warunków przechowywania produktów. Dlatego dokonując wyboru kleju należy zwrócić uwagę na ograniczenia produktu, które są często podawane w kartach produktów lub na stronach internetowych. Jednak producenci wprowadzają nowe materiały klejące, w których wyeliminowano niektóre ograniczenia. Tym samym produkty te pozwalają na łączenie elementów z większymi siłami adhezji i kohezji [44].

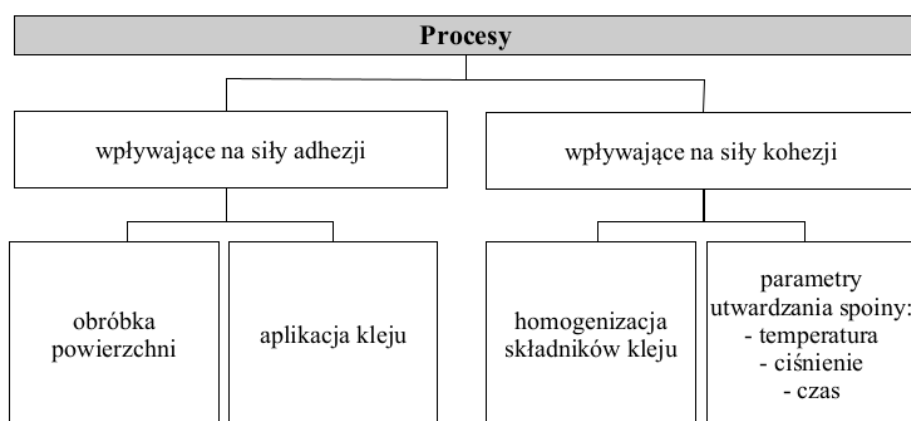
2.4.1. Proces klejenia

Podział czynników technologicznych, które w istotny sposób wpływają na wytrzymałość połączeń klejonych przedstawiono na Rys. 2.2.

Wśród najważniejszych czynników, które mogą wpływać na wytrzymałość połączeń klejonych należy wymienić: właściwą obróbkę klejonych powierzchni, metodę przygotowania i aplikacji kleju, planowaną technologię klejenia zawierającą określenie warunków obciążania spoiny oraz jej utwardzania, a ponadto zmiany fizyczne połączenia [30].

Właściwy sposób obróbki klejonej powierzchni, a także rodzaj spajanych materiałów w istotny sposób wpływają na wytrzymałość połączeń klejonych [40]. Przygotowanie powierzchni można realizować w zależności od dobranych materiałów na wiele sposobów. Proces ten może być prowadzony metodą mechaniczną lub chemiczną. Pierwsza z nich obejmuje: zmatowienie zewnętrznej powłoki klejonych materiałów z wykorzystaniem papieru lub mat

ściernych, śrutowanie, piaskowanie, itp. Niektóre materiały można poddawać trawieniu chemicznemu z wykorzystaniem roztworów różnych kwasów. Przygotowana powierzchnia często poddawana jest procesowi odtłuszczenia. W tym celu wykorzystuje się się aceton bądź alkohol izopropylowy. Dodatkowo dla zapewnienia większej przyczepności kleju do podłoża wykorzystywane są środki poprawiające adhezję.



Rys. 2.2. Podział czynników technologicznych mających wpływ na wytrzymałość połączeń klejonych [45]

Odpowiednie przygotowanie materiału klejącego wpływa na stopień wymieszania składników kleju i jego napowietrzenie. Jest to bardzo istotne podczas tworzenia spoin charakteryzujących się wysoką wytrzymałością i trwałością. Powstające w masie kleju aglomeraty nanocząsteczkowe negatywnie wpływają na połączenia klejone, gdyż sprzyjają powstawaniu licznych wad. W celu wyeliminowania procesu aglomeracji konieczne staje się stosowanie odpowiednich metod mieszania produktów. Najczęściej wykorzystywane są metody mechaniczne i homogeniczne [46]–[49].

Obciążenie połączeń klejonych, temperatura i czas wiązania kleju wpływają na finalną wytrzymałość spoin. Ponadto temperatura i czas wiązania determinują stopień usieciowania kleju. Gdy parametry te są niewłaściwie dobrane, może dochodzić do niepoprawnego związania spoiny, a w konsekwencji osłabienia jej wytrzymałości kohezcyjnej. Nadmierne utwardzanie spoiny przy udziale podwyższonej temperatury skutkuje zagęszczeniem produktu klejącego. W przypadku pogłębienia się tego stanu może dojść do uszkodzenia struktury [30], [50].

Modyfikacje fizyczne klejów, które polegają na dodatku różnych napelnaczy, prowadzi się w celu zwiększenia ich wytrzymałości bądź uzyskania przewodności elektrycznej. Obecnie producenci klejów nieustannie rozwijają swoje technologie i wprowadzają produkty charakteryzujące się nowymi właściwościami, które mają za zadanie sprostać potrzebom odbiorców.

2.4.2. Połączenia klejone w meblarstwie

W związku z rozwojem nowych materiałów, w tym kompozytów, które zastępują dotychczas wykorzystywane surowce, procesy klejenia zyskują na znaczeniu. Obecnie następuje trend zastępowania klasycznych połączeń kształtowych i śrubowych oraz połączeń spawanych nowoczesnymi, lżejszymi połączeniami klejonymi, które charakteryzują się wysoką wytrzymałością. Współczesne metody klejenia przeszły szereg optymalizacji, co zaowocowało uznaniem wielu firm. Połączenia klejone z powodzeniem stosowane są w wielu dziedzinach przemysłu. Wykorzystywane są w budowie samolotów, samochodów oraz łodzi. Przy ich pomocy mogą być przeprowadzane również naprawy. Chester i in. (1999) opublikowali wyniki dotyczące skutecznego naprawienia konstrukcji samolotu z wykorzystaniem połączeń klejonych [51].

Klejenie z powodzeniem stosuje się w połączeniach materiałów drewnopochodnych, a drewno klejone spotykane jest również w konstrukcjach budynków wysokościowych [52], [53]. W budownictwie stosowane są również kleje UV, za pomocą których łączy się elementy szklane np. drzwi z zawiasami. Jednakże rozwiązania tego typu wymagają bezwzględnie przynajmniej jednego elementu transparentnego wchodzącego w skład połączenia klejonego, który przepuszcza światło i pozwala na utwardzenie spoiny [54]. Obecnie w branży meblarskiej również spotykane są różne warianty połączeń klejonych elementów drewnopochodnych i elementów metalowych, które charakteryzują się licznymi zaletami. Do najważniejszych zalicza się równomierne obciążenie powierzchni spoiny, spajanie materiałów o różnych właściwościach fizycznych i chemicznych, możliwość łączenia elementów na większych powierzchniach, ograniczenie masy finalnego produktu, przy czym spoina klejowa nie wymaga obróbki oraz ograniczenie ryzyka powstania korozji elektrochemicznej [55].

Kleje stosowane w łączeniu kompozytowych materiałów drewnnych przenoszą i rozkładają obciążenia, co zwiększa sztywność i wytrzymałość, a w konsekwencji niezawodność gotowych produktów. Poprzez odpowiednie ułożenie poszczególnych warstw fornirów drewnnych np. w sklejkach uzyskuje się mniejsze pęcznienie i kurczenie produktów pod wpływem zmian wilgotności [56]. Znane są również badania wytrzymałości kompozytów na bazie drewna z forniru topoli modyfikowanych przez polimeryzację monomerów warstwy wierzchniej [57]. Poza wytwarzaniem płyt drewnopochodnych proces klejenia wykorzystywany jest głównie w konstrukcji korpusów meblowych oraz laminowaniu płyt meblowych. Efimova i in. [58] w 2018 roku opublikowali wyniki badań dotyczących doskonalenia metod laminowania paneli drewnianych cienką okleiną z cennego gatunku drewna jakim jest mahoń afrykański. Znane są również badania wpływu połączeń klejonych w konstrukcjach skrzynkowych na wytrzymałość mebli [59], badania połączeń z wykorzystaniem zszywek i kleju w płytach meblowych [60], czy badania klejonych elementów meblowych w krzesłach w postaci klejonych ciernych łączników mimośrodowych [61]. W procesie klejenia istotna jest również grubość klejonych materiałów.

Ziółkowski i in. [62] w 2019 roku przeprowadzili ocenę wpływu grubości elementów łączonych na wytrzymałość zakładkowego połączenia klejonego blach. W badaniu wykorzystano płaskowniki aluminiowe PA9 oraz klej Plexus MA 300. Udowodniono, że wraz ze wzrostem grubości blachy zwiększeniu ulega wytrzymałość połączenia klejonego, przy czym zależność ta jest wprost proporcjonalna. W literaturze dostępne są również publikacje dotyczące cyklicznych badań połączeń klejonych konstrukcji drewnianych z prętami stalowymi. Pręty o średnicy 14 mm zostały wklejone w drewnianą próbkę, a badanie polegało na ich wyrywaniu z próbek drewna poprzez przyłożenie obciążenia monotonicznie narastającego z prędkością 5 mm/min oraz obciążenia cyklicznego z częstotliwością w zakresie 240-300 cykli/min [63].

W 2017 roku zbadano wpływ gatunku drewna, rodzaju kleju i kierunku rocznych przyrostów drewna na sztywność klejonych połączeń czopowych [64]. Inne zaprezentowane w tym samym roku wyniki badań dotyczyły wpływu gatunku drewna, rodzaju kleju, grubości spoiny, ugięcia pierścieni rocznych przyrostów drewna oraz rodzaju obciążenia na sztywność złączy klejonych [65]. Z kolei w 2021 roku zostały opublikowane wyniki badań wytrzymałości połączeń klejonych drewna bukowego z wykorzystaniem kleju PVAc D3. Klejenie próbek wykonywano pod ciśnieniem 17,85 kPa. Uzyskano w ten sposób warstwę kleju o grubości 0,1 mm. Wszystkie próbki kondycjonowano przez 7 dni w warunkach standardowych, tj. w temp. 20 ± 2 °C i wilgotności względnej $65 \pm 5\%$. Jedną z trzech części próbek poddano 3-godzinnemu zanurzeniu w wodzie o temp. 20 ± 5 °C i następnie kondycjonowano przez 7 dni w atmosferze standardowej w temp. 20 ± 2 °C i wilgotności względnej $65 \pm 3\%$. Jedną z trzech części zanurzono na 4 dni w wodzie o temp. 20 ± 5 °C, po czym kondycjonowano przez 7 dni w warunkach standardowych, tj.: w temperaturze 20 ± 2 °C i wilgotności względnej $65 \pm 3\%$. Po okresie kondycjonowania próbki poddawano badaniu wytrzymałości na ścinanie. Badanie tego typu jest najczęściej używanym parametrem porównawczym służącym do oceny siły wiązania kleju, gdyż jest to najczęściej występujący w warunkach eksploatacyjnych wariant naprężeń międzyfazowych [66]. Ascione i in. (2017) przebadali wytrzymałość na ścinanie i zginanie połączeń klejonych z wykorzystaniem kompozytu zbrojonego włóknami szklanymi i polimerową osnową (GFRP). Badanie obejmowało wykonanie złącza klejonego pomiędzy belką i słupem. Wykazano, że możliwe jest wykonywanie standardowych czy ulepszonych połączeń klejonych GFRP, które charakteryzują się wytrzymałością porównywalną z połączeniami wykonanymi przy pomocy śrub stalowych czy GFRP [67]. Z kolei Atar i in. (2022) przeprowadzili badania wpływu osi montażu, rodzaju materiału oraz rodzaju kleju na wytrzymałość drewnianych złączy narożnych. W przeprowadzonej analizie wykorzystano drewno sosny zwyczajnej, drewno topoli lombardzkiej oraz płyty pilśniowej MDF. Do wykonania spoin klejowych wykorzystano klej z polioctanu winylu oraz klej poliuretanowy. Autorzy posłużyli się pięcioma różnymi technikami wykonywania połączeń. Wśród nich znalazły się połączenia wykorzystujące: kołki, pióro-wpust, półślepe

na jaskółczy ogon, śruby oraz mimośrodowo. Wykonane połączenia poddawano rozciąganiu zgodnie z normą ASTM D 1037 [68]. W 2015 przetestowano wpływ rodzaju kleju i gatunku drewna tropikalnego na wytrzymałość połączeń klejonych. Wytrzymałość na ścinanie określono dla trzech gatunków drewna oraz dla trzech rodzajów kleju: PVAc (D4-W), Cosmopur (K-W) oraz poliuretanu (PU). Próbkki jednozakładkowych połączeń klejonych zostały przygotowane w oparciu o normę TS EN 205 [69]. Džinić i Živanić w 2014 roku zbadali wpływ rodzaju pasowania na grubość linii kleju w połączeniach konstrukcji drewnianych. Udowodniono, że nacisk wywierany na czop i wpust zmienia grubość spoiny klejowej [70].

Ponadto w literaturze dostępne są publikacje przedstawiające wyniki badań wytrzymałości połączeń śrubowych płyt meblowych i zawiasów. Publikacje te odnoszą się do rodzaju oddziaływania, ilości oraz usytuowania zawiasów na odkształcenie i trwałość połączeń. Znane są również prace, w których zbadano wpływ momentu dokręcenia śrub na wytrzymałość drzwi meblowych. Z kolei inni autorzy za pomocą analizy elementów skończonych dokonali oceny maksymalnego odkształcenia, a także stanu naprężenia drzwi meblowych w zależności od różnych konfiguracji zawiasów. Niestety większość istniejących publikacji dotyczy jednak badań wytrzymałości połączeń śrubowych wykonywanych w tradycyjnych płytach meblowych i w bazach danych nie występują publikacje naukowe, które dotyczyłyby wykonywania połączeń adhezyjnych frontów i zawiasów meblowych. Taki stan rzeczy wynika przede wszystkim z dostępu do powszechnie znanych i stosowanych rozwiązań w procesie produkcji mebli. Wraz z pojawieniem się nowych materiałów, w tym płyt drewnopochodnych, pojawiają się nowe możliwości. Jednakże zastosowanie w tego typu produkcji tradycyjnych połączeń śrubowych niesie za sobą możliwość wystąpienia uszkodzeń mechanicznych płyt drewnopochodnych, jak i samych połączeń. Ze względu na innowacyjny charakter płyt drewnopochodnych, zwłaszcza charakteryzujących się grubością 6,4 mm, ten rodzaj połączenia jest praktycznie niemożliwy do wykonania.

Alternatywą w tym przypadku są połączenia klejone. Technika ta nie ingeruje w konstrukcję płyty drewnopochodnej oraz nie wymaga wykonywania otworów. Rozwiązanie takie pozwala na zachowanie estetyki frontowych elementów meblowych, a także przyczynia się do redukcji powstających odpadów, co stanowi dodatkowy atut tej technologii i jest powodem do prowadzenia prac nad jej szerszym wprowadzeniem do produkcji. Jest to również doceniane przez konsumentów, którzy coraz częściej są w stanie wydać więcej pieniędzy za produkty o charakterze ekologicznym [71].

Analiza aktualnego stanu wiedzy wskazuje na potrzebę dokonania oceny wytrzymałości i trwałości złączy klejonych w relacji płyta drewnopochodna – zawias. Sytuacja taka w połączeniu z licznymi ograniczeniami standardowo występujących w meblarstwie rozwiązań śrubowych stanowiły inspirację do zajęcia się tym problemem w szerszej skali i przyczyniły się do sporządzenia niniejszej pracy doktorskiej.

2.4.3. Kontrola jakości połączenia klejonego

Kontrola połączeń klejonych jest procesem wieloetapowym, zależnym od wielu czynników. Proces klejenia wymaga wykorzystania dużej liczby metod badawczych służących ocenie samych połączeń, jak również procesu ich powstawania [36], [72], [73]. W tym miejscu należy wymienić:

- ocenę wizualną połączenia w oparciu o poprawność wymiarowo-kształtową,
- ocenę właściwego wykonania połączenia,
- badania wytrzymałościowe,
- badania eksploatacyjne.

Kompleksowa analiza połączenia klejonego uwzględnia wykonanie oględzin zewnętrznych, ocenę jakości klejenia, a także badania wytrzymałościowe. Realizacja powyższych czynności możliwa jest poprzez zastosowanie badań niszczących oraz nieniszczących.

Badania nieniszczące obejmują zweryfikowanie poprawności wymiarowo-kształtowej spoiny oraz poprawności wykonania połączenia. Wspomniane analizy przeprowadzane są głównie w oparciu o ocenę wizualną. Ponadto w kontroli poprawności wykonania połączenia z stosowane są również metody badań penetracyjnych, jak również metody wykorzystujące fale ultradźwiękowe.

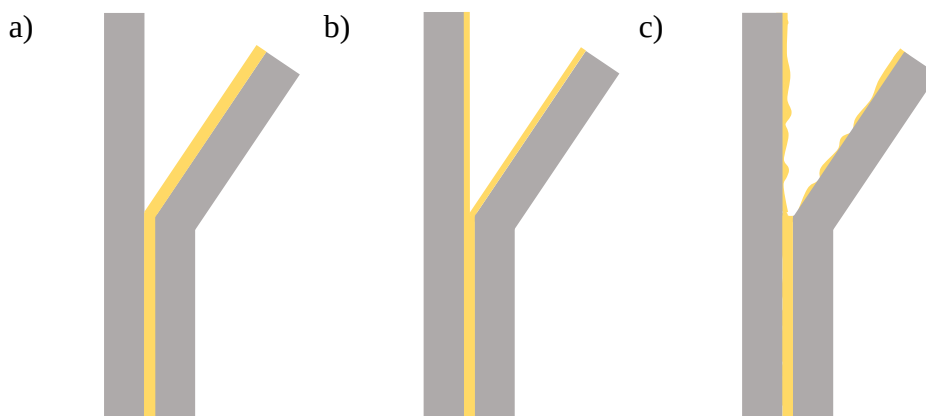
Badania niszczące przeprowadzane są w oparciu o analizy wytrzymałościowe i starzeniowe. Pierwsze z nich opierają się na ocenie wytrzymałości statycznej, dynamicznej oraz zmęczeniowej połączeń klejonych. W celu dokonania oceny doraźnej wytrzymałości spoiny wykonuje się oznaczenie wytrzymałości na ścinanie. Natomiast badania starzeniowe wykonywane są w warunkach naturalnych, a także w warunkach przyspieszonych [74].

2.4.4. Rodzaje uszkodzeń połączeń klejonych

Zniszczenie połączenia klejonego może nastąpić w przypadku, gdy siła adhezji lub siła kohezji, bądź obie z tych sił są niewystarczające do przeniesienia obciążeń występujących w spoinie. Rodzaje zniszczeń połączeń klejonych przedstawiono na Rys. 2.3.

Wyróżnia się cztery typy zniszczeń połączeń klejonych [75]:

- zniszczenie adhezyjne – siły spójności (kohezji) oraz siły obciążenia zewnętrznego są większe aniżeli siły adhezji; w tym przypadku następuje oderwanie warstwy kleju od podłoża,
- zniszczenie kohezyjne – siły spójności (kohezji) i siły obciążenia zewnętrznego są większe od sił międzycząsteczkowych kleju; w tym przypadku następuje zniszczenie warstwy kleju,
- zniszczenie adhezyjno-kohezyjne – fragmentarycznemu oderwaniu spoiny od materiału towarzyszy zniszczenie warstwy kleju,
- zniszczenie klejonego materiału – siły spójności klejonego materiału są porównywalne lub mniejsze od sił spójności kleju i siły przyczepności.



Rys. 2.3. Rodzaje zniszczeń połączeń klejonych: a) adhezyjne, b) kohezyjne, c) mieszane [75]

2.5. Badania połączeń klejonych

Najczęściej poddawane badaniom eksperymentalnym są klejone połączenia jednozakładkowe. Rozkłady naprężeń w takim złączu wyznacza się z użyciem metod analitycznych lub metod numerycznych [76].

Sposób przygotowania próbek do badań zakładkowych połączeń klejonych opisuje norma PN-EN 1465-2009 [77]. Zakłada ona wykonanie połączenia klejonego dwóch płaskowników o wymiarach 100 x 25 mm. Utworzona między nimi zakładka ma postać prostokąta o wymiarach 25 x 12,5 ±0,1 mm. Oczyszczenie powierzchni płaskowników odbywa się z reguły metodą zanurzeniową z zastosowaniem acetonu.

Poprawnie wykonane połączenie klejone powinno być poddawane przede wszystkim obciążeniom ścinającym [38]. Środowisko, w którym połączenie klejone jest eksploatowane oraz rodzaj obciążenia, jakiemu jest ono poddawane wpływają na jego trwałość [30]. Za podstawową metodę badania połączeń klejonych należy uznać oznaczanie wytrzymałości na ścinanie. Badanie opisuje norma PN-69/C-89300.

Jedną z podstawowych metod badania wytrzymałości złączy klejonych jest oznaczanie wytrzymałości na ścinanie zgodnie z normą PN-69/C-89300 [78].

Według normy próbka powinna składać się z dwóch płytek metalowych o długości wynoszącej 100 ±0,5 mm, szerokości 25 ±0,1 mm i grubości 1,8 mm, które sklejane są na zakładkę o długości 12,5 ±0,5 mm. Do przeprowadzenia badań porównawczych konieczne jest użycie konstrukcyjnej blachy aluminiowej wykonanej ze stopu PA7N [79]. Płytki ze stopu aluminium należy wstępnie oczyścić za pomocą ligniny lub flaneli nasączonej benzyną. Odtłuszczenie właściwe powinno zostać przeprowadzone przy użyciu acetonu do momentu uzyskania czystego tamponu. W dalszej kolejności należy wykonać trawienie

w kąpeli składającej się z 5 g bezwodnika chromowego, 15 ml kwasu siarkowego o gęstości 1,83 g/cm³. oraz wody destylowanej uzupełnionej do 100 ml. Temperatura kąpeli powinna wynosić 60 ± 2 °C. Zanurzone płytki powinny podlegać procesowi trawienia przez 20 min. Litr kąpeli pozwala na wytrawienie 1 m² blachy. Wytrawione próbki należy opłukać zimną wodą i wysuszyć w temp. 55 ± 5 °C. Aplikację kleju należy przeprowadzić zgodnie z normą przedmiotową maksymalnie do 3 godz. od chwili zakończenia trawienia. Po zaaplikowaniu kleju należy połączyć obie powierzchnie w taki sposób, aby sklepane elementy nie przemieszczały się, zostały równomiernie obciążone i posiadały właściwe wymiary zakładki. W celu zachowania powyższych warunków zaleca się stosowanie odpowiednich form do klejenia oraz dźwigni generujących nacisk. Parametry, tj. nacisk, temperatura oraz czasu utwardzania powinny być dobrane zgodnie z zaleceniem odpowiedniej normy przedmiotowej. Wypływki klejowe należy usunąć bez ingerencji w spoinę. Wykonanie oznaczenia powinno obejmować min. 10 próbek.

Urządzenie pomiarowe powinno umożliwiać osiowe zamocowanie próbek badawczej, równomierność obciążenia statycznego, przemieszczanie głowicy z prędkością 5 mm/min. Oraz dokładność siłomierza do ±1%. Zakres pomiarowy maszyny powinien być dostosowany w taki sposób, aby siła zrywająca mieściła się w zakresie 15 – 85% całkowitego zakresu obciążenia.

2.6. Podsumowanie

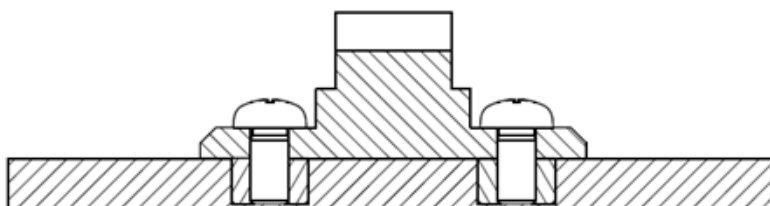
Przeprowadzony przegląd literatury wskazuje na szerokie spektrum zastosowań połączeń klejonych w wielu dziedzinach przemysłu i gospodarki, a jednocześnie ograniczenie tego typu rozwiązań w branży meblowej. W trakcie przygotowywania powyższej analizy nie stwierdzono obecności rozwiązań konstrukcyjnych, a nawet publikacji naukowych dotyczących połączenia klejone frontów meblowych z zawiasami meblowymi. Występująca niewątpliwie luka stanowiła inspirację do podjęcia tematu badawczego oraz zbadania możliwych do zastosowania w praktyce rozwiązań połączeń klejonych w relacji płyta meblowa- zawias.

3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

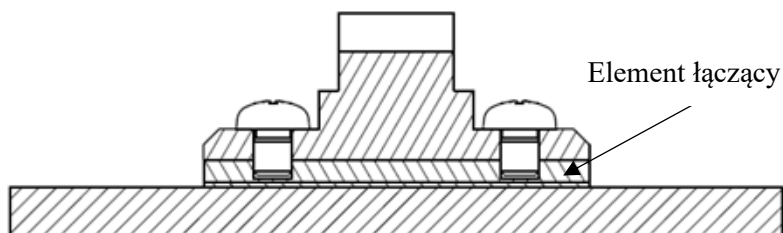
3.1. Obiekt badań

Badania dotyczyły metody wykonania trwałego połączenia klejonego pomiędzy płytą drewnopochodną CDF a zawiasem meblowym umożliwiającemu zastąpienie typowego połączenia śrubowego (Rys. 3.1a).

a)



b)

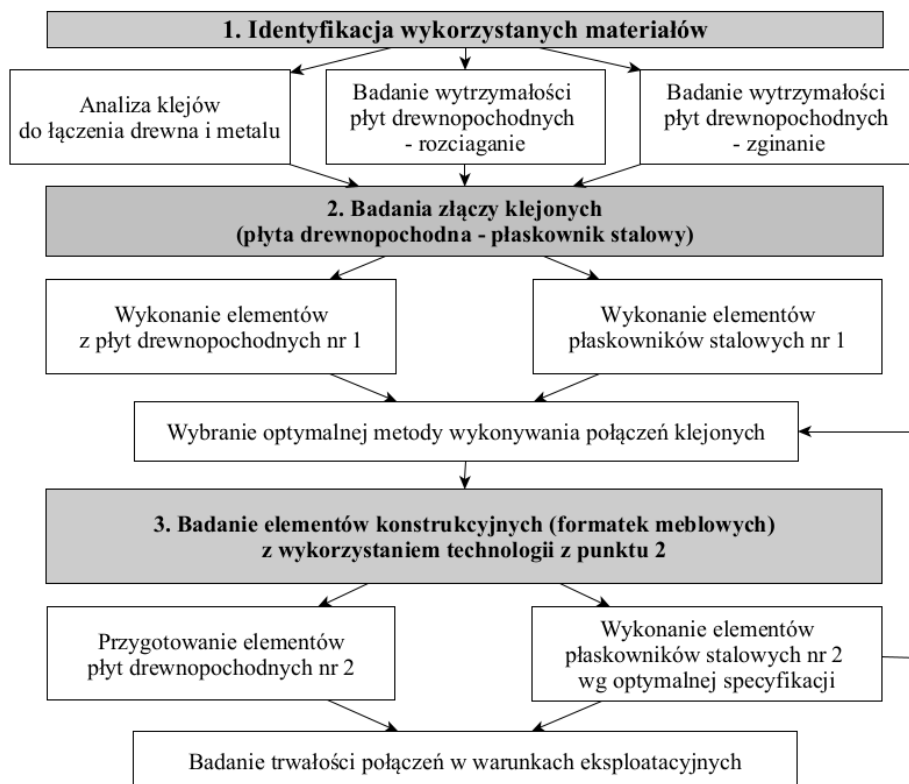


Rys. 3.1. Metody łączenia frontu meblowego z zawiasem: a) z wykorzystaniem połączenia śrubowego, b) z wykorzystaniem połączenia klejonego i elementu łączącego

Ze względu na brak w sprzedaży zawiasów dedykowanych połączeniom klejonym stosowanym we frontach meblowych w pracy wykorzystano standardowe, dostępne na rynku zawiasy meblowe Blum Expando T. Zastosowane rozwiązanie pozwala na przytwierdzenie zawiasu do frontu meblowego wyłącznie za pomocą połączeń śrubowych. Rozwiązanie takie wymaga wykonania otworów w płycie meblowej pod śruby lub kołki (Rys. 3.1a). W celu dostosowania wspomnianych zawiasów do procesu klejenia przygotowano element łączący o kształcie odpowiadającym części mocującej zawiasu, do którego za pomocą połączeń śrubowych mocowano wspomniany powyżej zawias (Rys. 3.1b). Wykonane w elemencie gwintowane otwory przelotowe o parametrach zgodnych ze specyfikacją zawiasu umożliwiły wykorzystanie dostarczanych z nimi śrub. Jednakże jest to rozwiązanie przygotowane wyłącznie na potrzeby badań. Docelowo zaleca się stworzenie zawisu meblowego dostosowanego do procesu klejenia lub rozwiązania hybrydowego umożliwiającego jego zastosowanie w obu opisanych powyżej konfiguracjach.

3.2. Program badań

Na Rys. 3.2 przedstawiono program badań z podziałem na 3 główne etapy.



Rys. 3.2. Program badań

Pierwszy etap prac obejmował identyfikację materiałów użytych w badaniach. Przeprowadzono ocenę wytrzymałości płyt drewnopochodnych CDF w warunkach obciążeń rozciągających i zginających. Przeanalizowano właściwości oraz dostępność klejów, które mogłyby posłużyć do wykonania spoin pomiędzy płytą CDF a płaskownikiem stalowym.

W drugiej części programu przewidziano wykonanie badań różnych konfiguracji złączy klejonych płyta drewnopochodna – płaskownik stalowy oraz wybranie jednej z nich, która odznaczałaby się najkorzystniejszymi cechami z punktu widzenia zastosowania jej w ostatnim etapie badań trwałościowych.

Etap końcowy prac obejmował wykonanie elementów płyt drewnopochodnych CDF i elementów łączących w postaci zawiasu meblowego wraz z płaskownikiem stalowym oraz wykonanie między nimi połączenia klejonego wg metody z drugiego punktu oraz przeprowadzenie badań trwałościowych uzyskanej konfiguracji.

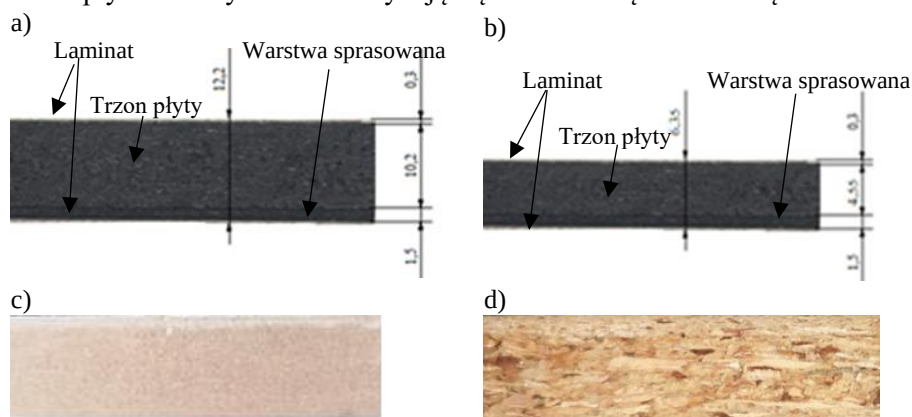
3.3. Identyfikacja płyt drewnopochodnych

3.3.1. Ogólna charakterystyka zastosowanych płyt

Płyty drewnopochodne stanowią grupę produktów o szerokim zakresie zastosowań, która nie jest otrzymywana z litego drewna, a wytwarzana jest z jego fragmentów, np. wiórów, trocin czy pyłu drzewnego, które zazwyczaj stanowią odpad z produkcji. Materiał pochodzący z recyklingu po wymieszaniu ze spoiwem, np. żywicą poddawany jest sprasowaniu. W konsekwencji takiego procesu otrzymuje się różne rodzaje płyt: MDF (ang. *Medium-Density Fiberboard*), HDF (ang. *High-Density Fiberboard*), pilśniowe lub wiórowe.

W odpowiedzi na problemy towarzyszące eksploatacji płyt MDF i HDF opracowano nowy rodzaj płyt drewnopochodnych SwissCDF firmy Swiss Krono, które są zabarwianymi na czarno, uszlachetnionymi płytami drewnopochodnymi HDF sprasowanymi pod wysokim ciśnieniem, przez co charakteryzuje je wysoka gęstość $> 1000 \text{ kg/m}^3$. Powierzchnia płyt zabezpieczona jest wieloma warstwami powłoki filmów melaminowych, dzięki czemu charakteryzuje się dużą stabilnością oraz odpornością na zarysowania, rozpryski wody, a nawet ogień. Płyty CDF (ang. *Compact Density Fibreboard*) są szczególnie rekomendowane jako element konstrukcyjny luksusowych mebli, od których wymaga się ponadprzeciętnej wytrzymałości i najwyższej jakości wykonania. Podwyższona wilgocioodporność płyt CDF sprawia, że świetnie sprawdzają się w meblach do pomieszczeń o podwyższonej wilgotności np. szafkach łazienkowych czy w meblach stref wellness. Płyty te charakteryzuje ograniczona zawartość formaldehydu $\leq 8 \text{ mg} / 100 \text{ g}$ suchej masy. W przypadku kontaktu z otwartym źródłem ognia wykazują trudnopalność klasy C-s2, d0. Płyty te produkowane są w zakresie grubości od 6,4 do 19,4 mm [80].

Przekrój płyt CDF przedstawiono na Rys. 3.3. W przeciwieństwie do płyt MDF i płyt wiórowych charakteryzują się one budową warstwową.



Rys. 3.3. Płyty meblowe: a) drewnopochodna CDF o grubości 12,4 mm, b) drewnopochodna CDF o grubości 6,4 mm, c) MDF, jednowarstwowa o grubości 18 mm, d) wiórowa, jednowarstwowa o grubości 18 mm

W strukturze płyty drewnopochodnej o nominalnej i zmierzonej grubości wynoszących odpowiednio 12,4 mm oraz 12,2 mm należy wyróżnić trzon zbudowany z zabarwionej na czarno mieszaniny wiórów drzewnych o różnej ziarnistości i grubości 10,2 mm, znajdującej się po jednej stronie sprasowanej warstwy o wysokiej gęstości i grubości 1,5 mm oraz laminatów o grubości 0,3 mm. W analogiczny sposób zbudowane są płyty o grubości 6,4 mm. Płyty MDF oraz płyty wiórowe o standardowej grubości 18 mm charakteryzują się strukturą jednowarstwową. Ewentualnie poddaje się je okleinowaniu.

Dzięki swoim właściwościom płyty CDF znajdują szerokie zastosowanie. Zwiększona wytrzymałość tych płyt pozwala na ich wykorzystanie m.in. na panele ochronne np. maszyn roboczych. W przeciwieństwie do osłon wykonanych z kratownic mogą zmniejszać emisję hałasu pracujących urządzeń czy minimalizować rozprzestrzenianie się szkodliwych gazów i aerozoli, a także transmisję pyłu drzewnego z maszyn stolarskich.

Płyty drewnopochodne CDF, dzięki mniejszej grubości niż inne typy płyt, pozwalają na wytwarzanie konstrukcji meblowych, które charakteryzują się większą ergonomią i nowoczesnym wzornictwem. Wytrzymałość, wodoodporność, trudnopalność pozwalają na stosowanie tych płyt zarówno w przestrzeni mieszkalnej, jak i użyteczności publicznej.

Jednakże ze względu na niewielką grubość płyt drewnopochodnych CDF, w szczególności w przypadku płyt o najniższej grubości 6,4 mm, wykonanie połączeń śrubowych pomiędzy frontem meblowym, a zawiasem meblowym może powodować kilka istotnych problemów. Przede wszystkim wykonanie w płytach otworów montażowych osłabia strukturę materiału, a w przypadku wykonania przelotowych otworów montażowych wpływa negatywnie na estetykę produktu. Z kolei intensywna eksploatacja mebli z zamontowanymi przy pomocy połączeń śrubowych frontami meblowymi może doprowadzić do ich zniszczenia w postaci złamania frontu w miejscu wykonania połączenia. Samo wykonanie otworów montażowych we frontach meblowych jest etapem pracochłonnym i wpływa na czas i stopień skomplikowania procesu produkcyjnego, gdyż wymaga zaangażowania dodatkowych sił i środków. Na tym etapie wytwarzane są dodatkowe odpady, których utylizacja podnosi cenę finalnego produktu. Istniejący szereg czynników mogących negatywnie wpłynąć na proces produkcji i eksploatacji mebli z wykorzystaniem połączeń śrubowych w płytach drewnopochodnych CDF można ominąć poprzez zastosowanie połączeń klejonych pomiędzy frontami wykonanymi z tego materiału i zawiasami meblowymi.

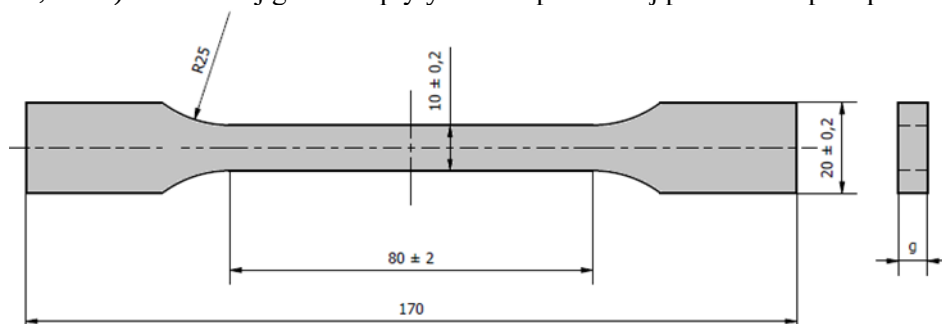
Z tego też względu w badaniach dotyczących identyfikacji właściwości wytrzymałościowych płyt drewnopochodnych CDF, a także w dalszej kolejności w badaniach połączeń klejonych wykorzystano cztery grubości wspomnianych płyt, tj.: 6,4 mm, 8,4 mm, 10,4 mm oraz 12,4 mm.

Badania te dotyczyły dwóch podstawowych przypadków obciążenia płyt meblowych: rozciągania oraz zginania.

3.3.2. Badanie wytrzymałości na rozciąganie płyt

3.3.2.1. Próbki do badań

Obiekt badań stanowiły próbki wioselkowe typu 1A (Rys. 3.4) przeznaczone do badań w warunkach obciążeń rozciągających, które zostały wykonane zgodnie z normą PN-EN ISO 3167:2014-09E [81]. Grubość g próbek odpowiadała grubości płyt, z których wykonano próbki (6,4 mm, 8,4 mm, 10,4 mm lub 12,4 mm). Dla każdej grubości płyty drewnopochodnej przebadano po 3 próbki.



Rys. 3.4. Wymiary próbek wioselkowych

Wyniki pomiarów grubości i szerokości próbek wykonanych w celu określenia przekroju początkowego wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru [82], [83] przedstawiono w Tabeli 3.1 oraz Tabeli 3.2. Zastosowano w nich następujące oznaczenia:

- g_1, g_2, g_3 - poszczególne pomiary grubości próbki w części pomiarowej, mm,
- b_1, b_2, b_3 - poszczególne pomiary szerokości próbki w części pomiarowej, mm,
- g_0, b_0 - średnia grubość lub szerokość próbki w części pomiarowej, mm,
- s_x - odchylenie standardowe grubości lub szerokości próbki w części pomiarowej, mm.

Na podstawie zamieszczonych w tabelach wyników pomiarów wyznaczono dla grubości i szerokości poszczególnych próbek niepewność typu A przyjmując, że wyniki pomiarów mają rozkład normalny

$$u_{x(A)} = \frac{s_x}{\sqrt{n}}, \quad (3.1)$$

gdzie:

- n - liczba pomiarów,
- s_x - odchylenie standardowe danego wymiaru.

Niepewność typu B określono dla pomiaru mikrometrem cyfrowym o działce elementarnej wynoszącej $\Delta x = 0,01$ mm przyjmując jednostajny rozkład prawdopodobieństwa

$$u_{x(B)} = \frac{\Delta x}{\sqrt{3}} \quad (3.2)$$

Niepewność całkowitą pomiarów grubości lub szerokości próbek określono na podstawie zależności

$$u_{x(C)} = \sqrt{(u_{x(A)})^2 + (u_{x(B)})^2}. \quad (3.3)$$

Tabela 3.1. Wyniki pomiarów grubości próbek g_0 poddanych badaniu wytrzymałości na rozciąganie wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Grubość nominalna	Oznaczenie próbki	g_1	g_2	g_3	g_0	s_x	$u_{x(A)}$	$u_{x(B)}$	$u_{x(C)}$	U_x	$g_0 \pm U_x$
		mm									
6,4 mm	6-1	6,31	6,32	6,32	6,32	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	6,32±0,02
	6-2	6,28	6,29	6,29	6,29	0,01	0,01		0,01	0,02	6,29±0,02
	6-3	6,36	6,36	6,36	6,36	0,01	0,01		0,01	0,02	6,36±0,02
8,4 mm	8-1	8,44	8,44	8,44	8,44	0,00	0,00		0,01	0,02	8,44±0,02
	8-2	8,45	8,39	8,43	8,42	0,03	0,02		0,02	0,04	8,42±0,04
	8-3	8,43	8,38	8,43	8,41	0,03	0,02		0,02	0,04	8,41±0,04
10,4 mm	10-1	10,40	10,44	10,43	10,42	0,02	0,01		0,01	0,02	10,42±0,02
	10-2	10,43	10,40	10,44	10,42	0,02	0,01		0,01	0,02	10,42±0,02
	10-3	10,44	10,41	10,44	10,43	0,02	0,01		0,01	0,02	10,43±0,02
12,4 mm	12-1	12,20	12,20	12,20	12,20	0,00	0,00		0,01	0,02	12,20±0,02
	12-2	12,20	12,20	12,20	12,20	0,00	0,00		0,01	0,02	12,20±0,02
	12-3	12,00	12,00	12,00	12,00	0,00	0,00		0,01	0,02	12,00±0,02

Tabela 3.2. Wyniki pomiarów szerokości próbek b_0 poddanych badaniu wytrzymałości na rozciąganie wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Grubość nominalna	Oznaczenie próbki	b_1	b_2	b_3	b_0	s_x	$u_{x(A)}$	$u_{x(B)}$	$u_{x(C)}$	U_x	$b_0 \pm U_x$
		mm									
6,4 mm	6-1	10,30	10,30	10,48	10,36	0,10	0,06	0,01	0,06	0,12	10,36±0,12
	6-2	10,30	9,85	10,33	10,16	0,27	0,16		0,16	0,31	10,16±0,31
	6-3	10,29	10,24	10,69	10,41	0,25	0,14		0,14	0,29	10,41±0,29
8,4 mm	8-1	10,23	9,89	10,52	10,21	0,32	0,18		0,18	0,37	10,21±0,37
	8-2	10,01	9,95	10,60	10,19	0,36	0,21		0,21	0,42	10,19±0,42
	8-3	10,10	9,95	10,44	10,16	0,25	0,14		0,14	0,29	10,16±0,29
10,4 mm	10-1	10,85	10,40	10,60	10,62	0,23	0,13		0,13	0,27	10,62±0,27
	10-2	10,29	10,10	10,07	10,15	0,12	0,07		0,07	0,14	10,15±0,14
	10-3	10,36	10,07	10,23	10,22	0,15	0,09		0,09	0,17	10,22±0,17
12,4 mm	12-1	10,18	10,55	12,30	10,34	0,19	0,11		0,11	0,22	10,34±0,22
	12-2	10,70	10,30	10,58	10,53	0,21	0,12		0,12	0,24	10,53±0,24
	12-3	10,10	9,90	10,10	10,03	0,12	0,07		0,07	0,14	10,03±0,14

Niepewność rozszerzoną pomiarów wyznaczono przyjmując współczynnik rozszerzenia $k = 2$ (poziom ufności wynoszący ok. 95%)

$$U_x = k \cdot u_{x(C)}. \quad (3.4)$$

Wielkość przekroju początkowego próbki S_0 określa wzór

$$S_0 = b_0 \cdot g_0, \quad (3.5)$$

natomiast niepewność złożoną pomiaru przekroju zależność

$$u_{S_0} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_0}{\partial b}\right)^2 \cdot u_b^2 + \left(\frac{\partial S_0}{\partial g}\right)^2 \cdot u_g^2}, \quad (3.6)$$

gdzie:

b_0, g_0 - odpowiednio szerokość początkowa lub grubość początkowa poszczególnych próbek w części pomiarowej, mm,

u_b, u_g - odpowiednio niepewność pomiaru szerokości lub grubości początkowej poszczególnych próbek w części pomiarowej, mm.

Ponieważ

$$\frac{\partial S_0}{\partial b} = g_0 \quad (3.7)$$

oraz

$$\frac{\partial S_0}{\partial g} = b_0, \quad (3.8)$$

stąd

$$u_{S_0} = \sqrt{g_0 \cdot u_b^2 + b_0 \cdot u_g^2}. \quad (3.9)$$

Wyznaczone na podstawie danych zamieszczonych w Tabeli 3.1 oraz Tabeli 3.2 powierzchnie początkowe przekroju poprzecznego poszczególnych próbek zamieszczono w Tabeli 3.3. Niepewność rozszerzoną wyznaczono na podstawie poniższej zależności przyjmując współczynnik rozszerzenia $k = 2$ (poziom ufności wynoszący ok. 95%)

$$U_{S_0} = k \cdot u_{S_0}. \quad (3.10)$$

3.3.2.2. Przebieg i wyniki badań

Badania wytrzymałości na rozciąganie zostały przeprowadzone w oparciu o normę PN-EN ISO 527-2:2012 [84] przy zastosowaniu maszyny wytrzymałościowej INSTRON 5966. Próbkę zamocowaną osiowo w uchwytach maszyny (Rys. 3.5) poddano monotonicznie narastającemu obciążeniu rozciągającemu z prędkością przesuwu tłoka maszyny wytrzymałościowej wynoszącą 0,05 mm/s. Badania przeprowadzono w temperaturze 21 °C przy wilgotności powietrza wynoszącej 45%. Podczas próby rejestracji podlegały chwilowe wartości siły obciążającej, przemieszczenia uchwytu maszyny wytrzymałościowej oraz odkształcenia próbki w części pomiarowej za pomocą

ekstensometru o bazie pomiarowej wynoszącej 50 mm i zakresie pomiarowym ± 5 mm. Badania prowadzono aż do zerwania próbki.

Tabela 3.3. Przekrój początkowy próbek S_0 poddanych badaniu wytrzymałości na rozciąganie wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

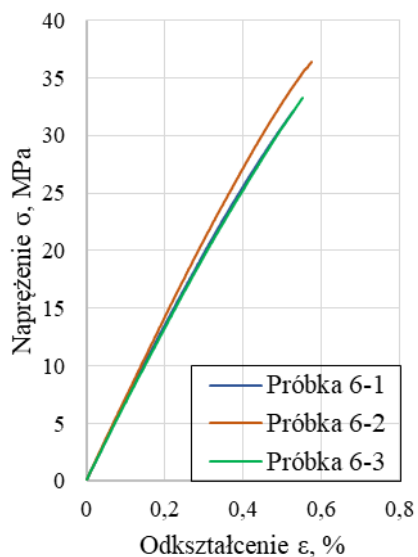
Grubość nominalna	Oznaczenie próbki	g_0	u_g	b_0	u_b	S_0	u_{S_0}	U_{S_0}	$S_0 \pm U_{S_0}$
		mm				mm ²			
6,4 mm	6-1	6,32	0,01	10,36	0,06	65,5	1,8	3,6	65,5 $\pm$ 3,6
	6-2	6,29	0,01	10,16	0,16	63,9	2,6	5,3	63,9 $\pm$ 5,3
	6-3	6,36	0,01	10,41	0,14	66,2	2,6	5,2	66,2 $\pm$ 5,2
8,4 mm	8-1	8,44	0,01	10,21	0,18	86,2	3,7	7,4	86,2 $\pm$ 7,4
	8-2	8,42	0,02	10,19	0,21	85,8	4,1	8,2	85,8 $\pm$ 8,2
	8-3	8,41	0,02	10,16	0,14	85,4	3,5	7,0	85,4 $\pm$ 7,0
10,4 mm	10-1	10,42	0,01	10,62	0,13	110,7	4,0	8,0	110,7 $\pm$ 8,0
	10-2	10,42	0,01	10,15	0,07	105,8	3,0	6,0	105,8 $\pm$ 6,0
	10-3	10,43	0,01	10,22	0,09	106,6	3,3	6,6	106,6 $\pm$ 6,6
12,4 mm	12-1	12,20	0,01	10,34	0,11	126,1	4,1	8,2	126,1 $\pm$ 8,2
	12-2	12,20	0,01	10,53	0,12	128,5	4,3	8,7	128,5 $\pm$ 8,7
	12-3	12,00	0,01	10,03	0,07	120,4	3,3	6,5	120,4 $\pm$ 6,5



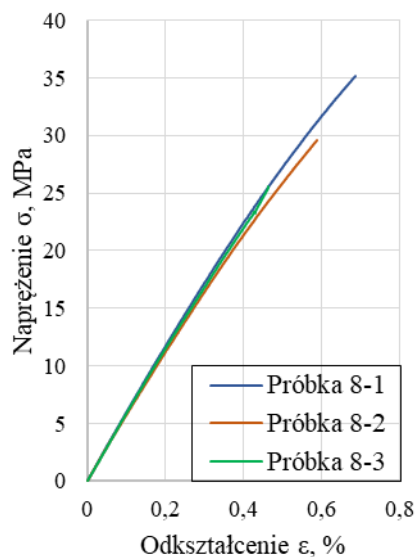
Rys. 3.5. Próbką wraz z ekstensometrem w uchwytach maszyny wytrzymałościowej INSTRON 5966

Zarejestrowane w trakcie prób chwilowe wartości siły F podzielono przez przekrój początkowy S_0 wyznaczając wykresy zależności naprężenia od odkształcenia próbki w części pomiarowej (Rys. 3.6).

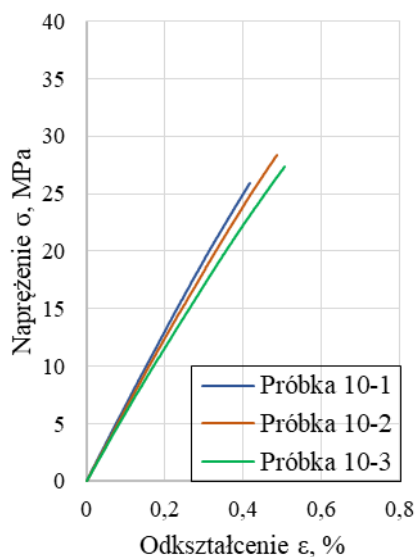
a)



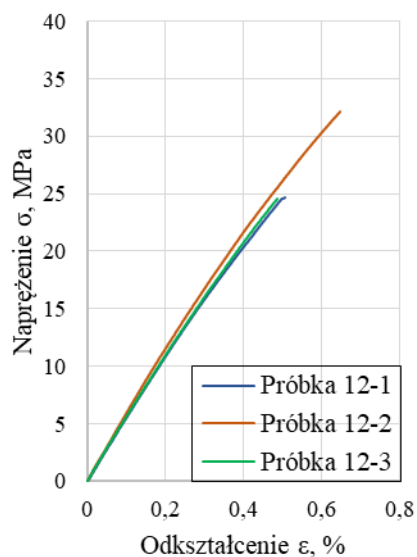
b)



c)



d)



Rys. 3.6. Wyniki badań monotonicznego rozciągania próbek wioselkowych o grubości: a) 6,4 mm; b) 8,4 mm; c) 10,4 mm; d) 12,4 mm

Napężenie w części pomiarowej rozciąganej próbki σ określa wzór

$$\sigma = \frac{F}{S_0}, \quad (3.11)$$

natomiast niepewność złożoną pomiaru napężenia zależność

$$u_\sigma = \sqrt{\left(\frac{\partial \sigma}{\partial F}\right)^2 \cdot u_F^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial S_0}\right)^2 \cdot u_{S_0}^2}, \quad (3.12)$$

gdzie:

- F - siła rozciągająca próbkę, N,
- S₀ - przekrój początkowy próbki, mm²,
- u_F - niepewność pomiaru siły, N,
- u_{S₀} - niepewność pomiaru przekroju początkowego próbki, mm².

Ponieważ

$$\frac{\partial \sigma}{\partial F} = \frac{1}{S_0} \quad (3.13)$$

oraz

$$\frac{\partial \sigma}{\partial S_0} = -\frac{F}{S_0^2}, \quad (3.14)$$

stąd

$$u_\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{S_0}\right)^2 \cdot u_F^2 + \left(\frac{F}{S_0^2}\right)^2 \cdot u_{S_0}^2}. \quad (3.15)$$

Podobnie jak uprzednio niepewność rozszerzoną wyznaczono przyjmując współczynnik rozszerzenia $k = 2$ (poziom ufności wynoszący ok. 95%)

$$U_\sigma = k \cdot u_\sigma. \quad (3.16)$$

Niepewność pomiaru przekroju poprzecznego określono w Tabeli 3.3, natomiast niepewność pomiaru siły określono na podstawie klasy siłomierza maszyny wytrzymałościowej $K = 0,5$ oraz jego zakresu pomiarowego wynoszącego $\Delta F = 10$ kN:

$$u_F = \frac{K \cdot \Delta F}{100} = 50 \text{ N}. \quad (3.17)$$

Na podstawie zarejestrowanych zmian siły i odkształcenia nie można wyznaczyć wartości granicy plastyczności. Wytrzymałość doraźną na rozciąganie R_m wraz z niepewnością pomiaru zamieszczono w Tabeli 3.4.

Niepewność pomiaru odkształcenia określono na podstawie klasy ekstensometru $K = 0,5$ oraz jego zakresu pomiarowego wynoszącego $\Delta \epsilon = 5$ mm bazy pomiarowej $L_0 = 50$ mm, tj. 10%:

$$u_\epsilon = \frac{K \cdot \Delta \epsilon}{100} = 0,05\%. \quad (3.18)$$

Odkształcenie A_t wraz z niepewnością pomiaru zamieszczono w Tabeli 3.5.

Tabela 3.4. Wytrzymałość doraźna na rozciąganie R_m próbek poddanych rozciąganiu wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Grubość nominalna	Oznaczenie próbki	F	u_F	S_0	u_{S_0}	R_m	u_{R_m}	U_{R_m}	$R_m \pm U_{R_m}$
		N		mm^2		MPa			
6,4 mm	6-1	2107,2	50	65,5	1,8	32,2	1,2	2,3	32,2±2,3
	6-2	2327,7		63,9	2,6	36,4	1,7	3,4	36,4±3,4
	6-3	2204,1		66,2	2,6	33,3	1,5	3,0	33,3±3,0
8,4 mm	8-1	3028,9		86,2	3,7	35,1	1,6	3,2	35,1±3,2
	8-2	2532,9		85,8	4,1	29,5	1,5	3,0	29,5±3,0
	8-3	2180,7		85,4	3,5	25,5	1,2	2,4	25,5±2,4
10,4 mm	10-1	2869,1		110,7	4,0	25,9	1,0	2,1	25,9±2,1
	10-2	2999,3		105,8	3,0	28,3	0,9	1,9	28,3±1,9
	10-3	2909,5		106,6	3,3	27,3	1,0	1,9	27,3±1,9
12,4 mm	12-1	3108,1		126,1	4,1	24,6	0,9	1,8	24,6±1,8
	12-2	4125,9		128,5	4,3	32,1	1,1	2,3	32,1±2,3
	12-3	2960,2		120,4	3,3	24,6	0,8	1,6	24,6±1,6

Tabela 3.5. Odkształcenie tensometryczne A_t próbek poddanych rozciąganiu wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Grubość nominalna	Oznaczenie próbki	A_t	u_{A_t}	U_{A_t}	$A_t \pm U_{A_t}$
		%			
6,4 mm	6-1	0,528	0,05	0,1	0,528±0,1
	6-2	0,573			0,573±0,1
	6-3	0,552			0,552±0,1
8,4 mm	8-1	0,685			0,685±0,1
	8-2	0,587			0,587±0,1
	8-3	0,462			0,462±0,1
10,4 mm	10-1	0,419			0,419±0,1
	10-2	0,485			0,485±0,1
	10-3	0,504			0,504±0,1
12,4 mm	12-1	0,504			0,504±0,1
	12-2	0,645			0,645±0,1
	12-3	0,487			0,487±0,1

Moduł Younga E wyznaczono metodą regresji liniowej dla liniowej zależności pomiędzy rejestrowanymi w trakcie próby sygnałami siły F oraz odkształcenia ε wyrażonego w mm/mm

$$E = \frac{F}{S_0 \cdot \varepsilon} = \frac{m_E}{S_0}, \quad (3.19)$$

dla której równanie linii regresji przyjmuje postać

$$F = m_E \cdot \varepsilon + b_E, \quad (3.20)$$

gdzie:

m_E - współczynnik kierunkowy prostej regresji,

b_E - wyraz wolny prostej regresji.

Niepewność złożoną pomiaru modułu Younga określa zależność

$$u_E = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial m_E}\right)^2 \cdot S_{m_E}^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial S_0}\right)^2 \cdot u_{S_0}^2}, \quad (3.21)$$

gdzie:

S_{m_E} - odchylenie standardowe współczynnika kierunkowego.

Ponieważ

$$\frac{\partial E}{\partial m_E} = \frac{1}{S_0} \quad (3.22)$$

oraz

$$\frac{\partial E}{\partial S_0} = -\frac{m_E}{S_0^2}, \quad (3.23)$$

stąd

$$u_E = \sqrt{\left(\frac{1}{S_0}\right)^2 \cdot S_{m_E}^2 + \left(\frac{m_E}{S_0^2}\right)^2 \cdot u_{S_0}^2}. \quad (3.24)$$

Podobnie jak uprzednio niepewność rozszerzoną wyznaczono przyjmując współczynnik rozszerzenia $k = 2$ (poziom ufności wynoszący ok. 95%)

$$U_E = k \cdot u_E. \quad (3.25)$$

Odchylenie standardowe współczynnika kierunkowego dla n par F_i, ε_i , na podstawie których wyznaczono prostą regresji

$$S_{m_E} = \sqrt{\frac{(1 - r^2) \cdot S_F^2}{(n - 2) \cdot S_\varepsilon^2}}. \quad (3.26)$$

Odchylenie standardowe wartości siły F_i opisanych osią rzędnych

$$S_F = \sqrt{\frac{1}{n - 1} \cdot \left[\sum_{i=1}^n F_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n F_i)^2}{n} \right]}. \quad (3.27)$$

Odchylenie standardowe wartości siły ε_i opisanych osią odciętych

$$S_\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{n - 1} \cdot \left[\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n \varepsilon_i)^2}{n} \right]}. \quad (3.28)$$

Współczynnik korelacji

$$r = \frac{S_{\varepsilon F}}{S_{\varepsilon} \cdot S_F}, \quad (3.29)$$

natomiast kowariancja

$$S_{\varepsilon F} = \frac{1}{n-1} \cdot \left[\sum_{i=1}^n \varepsilon_i \cdot F_i - \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i \cdot \sum_{i=1}^n F_i}{n} \right]. \quad (3.30)$$

Zestawienie wielkości wykorzystanych do wyznaczenia odchylenia standardowego współczynnika kierunkowego prostej regresji zamieszczono w Tabeli 3.6. Moduł Younga wraz z niepewnością pomiaru w Tabeli 3.7.

Tabela 3.6. Zestawienie wielkości wykorzystanych do wyznaczenia odchylenia standardowego współczynnika kierunkowego prostej regresji S_{m_E}

Grubość nominalna	Oznaczenie próbki	n	m_E	b_E	S_F	S_{ε}	$S_{\varepsilon F}$	S_{m_E}	R
		-	N			-	N		-
6,4 mm	6-1	141	450683,3	10,2	207,6	0,000460	0,096	589,1	~1
	6-2	155	454651,1	10,8	227,9	0,000501	0,114	378,7	~1
	6-3	144	440306,9	12,4	211,9	0,000481	0,102	501,5	~1
8,4 mm	8-1	204	503976,8	15,2	301,0	0,000597	0,180	451,0	~1
	8-2	167	479961,9	15,5	246,1	0,000513	0,126	644,1	~1
	8-3	136	498843,9	7,8	200,6	0,000402	0,081	445,3	~1
10,4 mm	10-1	179	726046,8	12,9	265,1	0,000365	0,097	586,0	~1
	10-2	190	664505,0	9,8	280,9	0,000423	0,119	400,1	~1
	10-3	186	628277,5	12,7	274,7	0,000438	0,120	643,9	~1
12,4 mm	12-1	205	693886,8	8,9	303,5	0,000437	0,133	593,1	~1
	12-2	282	742740,1	21,8	417,3	0,000562	0,234	599,5	~1
	12-3	77	660760,8	22,3	277,0	0,000419	0,116	1236	~1

Średnie wartości wytrzymałości na rozciąganie R_m , odkształcenia tensometrycznego przy zerwaniu A_t oraz modułu Younga E wraz z niepewnością pomiaru dla poszczególnych grubości paneli zamieszczono w Tabeli 3.8. Niepewność pomiaru uwzględnia rozrzut wyników badań uzyskanych dla poszczególnych grubości płyt.

Wyniki badań w formie graficznej przedstawiono na Rys. 3.7.

3.3.2.3. Analiza wyników badań

Analiza wyników badań miała na celu określenie możliwego wpływu grubości płyty CDF na właściwości wytrzymałościowe. Analizę statystyczną przeprowadzono w oparciu o jednoczynnikową analizę wariancji ANOVA przy użyciu zaawansowanego pakietu oprogramowania analitycznego STATISTICA

[85] zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 3.8 opracowanym na podstawie [86]. Jednoczynnikowa ANOVA to metoda testowania wyników pomiarów, na które ma wpływ tylko jeden czynnik, w tym przypadku grubość płyty CDF.

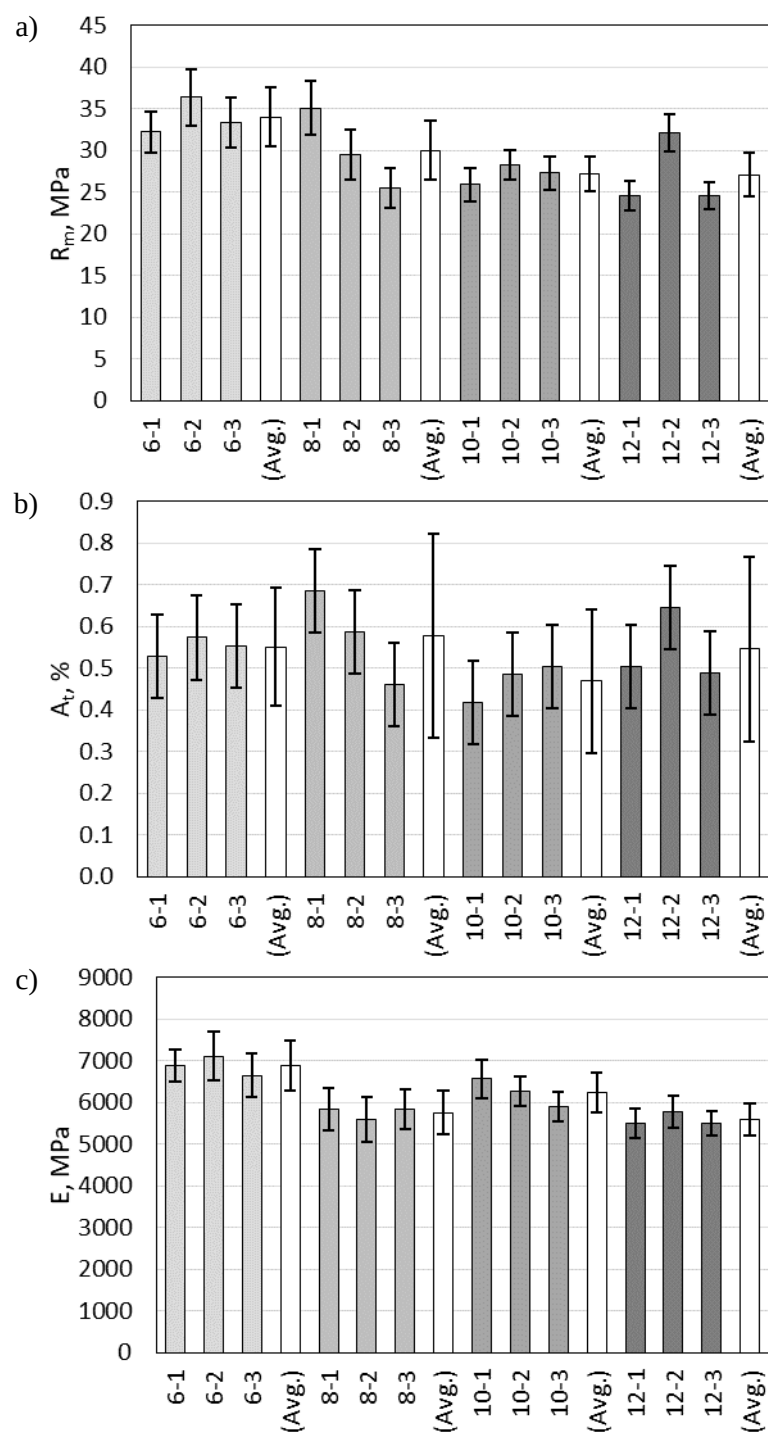
Pierwszym krokiem analizy było przeprowadzenie testu Shapiro-Wilka. Hipoteza zerowa tego testu zakłada, że populacja ma rozkład normalny. Jeśli wartość p-value jest większa niż wybrany poziom istotności $\alpha = 0,05$, to hipotezę zerową nie można odrzucić. Jeśli wartość p-value jest mniejsza niż poziom α , hipoteza zerowa zostaje odrzucona i istnieją dowody na to, że testowane dane nie mają rozkładu normalnego. Statystyka testu Shapiro-Wilka W i wartość p-value dla każdej badanej grubości paneli CDF zamieszczono w Tabeli 3.9. Wyniki analizy wskazują, że w przypadku wytrzymałości na rozciąganie R_m oraz odkształcenia tensometrycznego przy zerwaniu A_t założenia normalności rozkładu są spełnione. Dla tych parametrów kolejnym krokiem jest sprawdzenie założenia o jednorodności wariancji.

Tabela 3.7. Moduł Younga próbek poddanych rozciąganiu wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

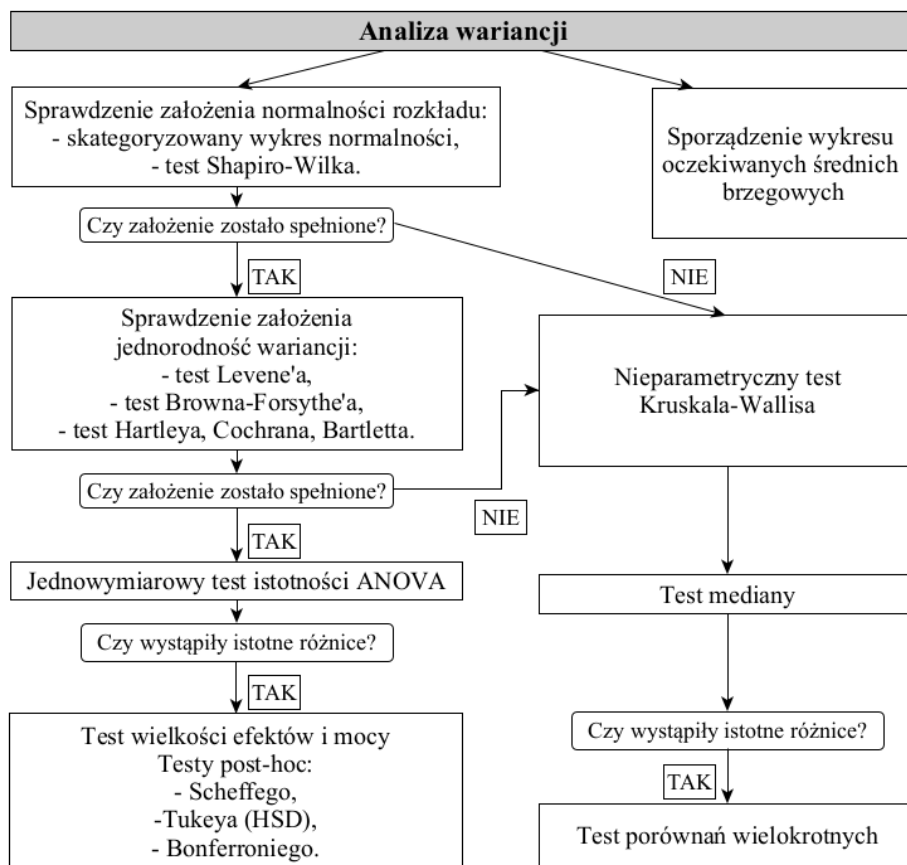
Grubość nominalna	Oznaczenie próbki	m_E	S_{m_E}	S_0	u_{S_0}	E	u_E	U_E	$E \pm U_E$
		N		mm^2		MPa			
6,4 mm	6-1	450683,3	589,1	65,5	1,8	6883	188	376	6883±376
	6-2	454651,1	378,7	63,9	2,6	7114	295	590	7114±590
	6-3	440306,9	501,5	66,2	2,6	6650	261	521	6650±521
8,4 mm	8-1	503976,8	451,0	86,2	3,7	5848	252	504	5848±504
	8-2	479961,9	644,1	85,8	4,1	5594	266	532	5594±532
	8-3	498843,9	445,3	85,4	3,5	5838	238	475	5838±475
10,4 mm	10-1	726046,8	586,0	110,7	4,0	6561	236	473	6561±473
	10-2	664505,0	400,1	105,8	3,0	6283	177	354	6283±354
	10-3	628277,5	643,9	106,6	3,3	5894	182	363	5894±363
12,4 mm	12-1	693886,8	593,1	126,1	4,1	5501	180	359	5501±359
	12-2	742740,1	599,5	128,5	4,3	5782	195	389	5782±389
	12-3	660760,8	1236	120,4	3,3	5490	149	298	5490±298

Tabela 3.8. Zestawienie średnich wartości parametrów wytrzymałościowych dla poszczególnych grubości paneli CDF

Grubość nominalna	R_m	A_t	E
	MPa	%	MPa
6,4 mm	34,0 ±3,5	0,551 ±0,14	6 882 ±590
8,4 mm	30,0 ±3,5	0,578 ±0,24	5 760 ±532
10,4 mm	27,2 ±2,1	0,469 ±0,17	6 246 ±472
12,4 mm	27,1 ±2,6	0,545 ±0,22	5 591 ±390



Rys. 3.7. Zestawienie uzyskanych wyników badań w próbie rozciągania



Rys. 3.8. Schemat postępowania dla jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA

Tabela 3.9. Wyniki testu Shapiro-Wilka ($\alpha = 0,05$)

Grubość nominalna	R _m		A _t		E	
	W	p-value	W	p-value	W	p-value
6,4 mm	0,9297	0,4876	0,9985	0,9265	0,9996	0,9620
8,4 mm	0,9908	0,8168	0,9951	0,8667	0,7669	0,0377
10,4 mm	0,9952	0,8679	0,9075	0,4098	0,9910	0,8184
12,4 mm	0,8710	0,2983	0,8297	0,1875	0,9995	0,9572

Test Levene'a służy do oceny równości wariancji dla zmiennej obliczonej dla dwóch lub więcej grup. Ponieważ otrzymana wartość p testu Levene'a jest większa niż poziom istotności $\alpha = 0,05$, wobec tego hipoteza zerowa testu wskazuje, że wariancje populacji są równe. Analogiczny wniosek wynika z pozostałych testów (Tabela 3.10 i Tabela 3.11). Taka sytuacja umożliwia przeprowadzenie jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA. Ponieważ

otrzymana wartość p-value jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA jest większa niż poziom istotności $\alpha = 0,05$, należy przyjąć hipotezę zerową o braku różnicy między wytrzymałością na rozciąganie R_m ze względu na grubość płyty CDF. Na ten sam wniosek wskazują wyniki jednoczynnikowej analizy wariancji dla odkształcenia tensometrycznego przy zerwaniu A_t (Tabela 3.12).

Tabela 3.10. Wyniki testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a ($\alpha = 0,05$)

Parametr	Test Levene'a		Test Browna-Forsythe'a	
	F	p-value	F	p-value
R_m	2,11	0,18	0,61	0,63
A_t	2,03	0,19	0,72	0,57
E	0,42	0,75	0,39	0,77

Tabela 3.11. Wyniki testu Bartlett'a, testu Cochran'a i testu Hartley'a ($\alpha = 0,05$)

Parametr	Test Bartlett'a	Test Cochran'a	Test Hartley'a	p-value
	χ^2	C	F	
R_m	3,35	0,44	14,81	0,34
A_t	3,90	0,55	24,64	0,27
E	1,08	0,39	4,85	0,78

Tabela 3.12. Wyniki jednoczynnikowej analizy ANOVA ($\alpha = 0,05$)

Parametr	Jednoczynnikowa ANOVA	
	F	p-value
R_m	2,57	0,13
A_t	1,16	0,38

Ponieważ moduł Younga E ma wartość p-value dla jednej grubości mniejszą niż poziom istotności $\alpha = 0,05$ (Tabela 3.9), a zatem założenie normalności rozkładu nie zostało spełnione. Przeprowadzono nieparametryczny test Kruskala-Wallisa dla sprawdzenia, czy próbki pochodzą z tego samego rozkładu oraz w tym samym celu test mediany. Wartości p-value uzyskane w obu testach (Tabela 3.13) są mniejsze od poziomu istotności, co wskazuje, że wyniki testów dla co najmniej jednej grubości płyty CDF różnią się istotnie od pozostałych. W celu zidentyfikowania takiej grupy wyników przeprowadzono testy porównań wielokrotnych średnich próbek. Analiza wykazała, że czwarta grupa wyników (dla płyty CDF o grubości 12,4 mm) była jedyną, która istotnie różniła się od pozostałych grup ($p\text{-value} = 0,0195 < \alpha = 0,05$).

Na podstawie przeprowadzonej analizy wskazać można, że wytrzymałość na rozciąganie płyt CDF wynosząca co najmniej 27,1 MPa jest większa niż w przypadku płyt MDF (maksymalnie 20,7 MPa) [87], [88]. Płyty CDF, podobnie jak płyty MDF i HDF, charakteryzują się niskim całkowitym

wydłużeniem przy zerwaniu wynoszącym około 0,5%. Wykazują przy tym większą sztywność ze względu na wyższą wartość modułu Younga (co najmniej 5 600 MPa) w porównaniu z panelami HDF(3 450 MPa) lub MDF(2 400 MPa). W przypadku paneli o grubości do 12,4 mm ich grubość nie wpływa na ich właściwości wytrzymałościowe. Różnica ujawniła się jedynie w wartości modułu Younga dla największej badanej grubości, tj. 12,4 mm.

Tabela 3.13. Wyniki testu Kruskala-Wallisa oraz testu mediany ($\alpha = 0,05$)

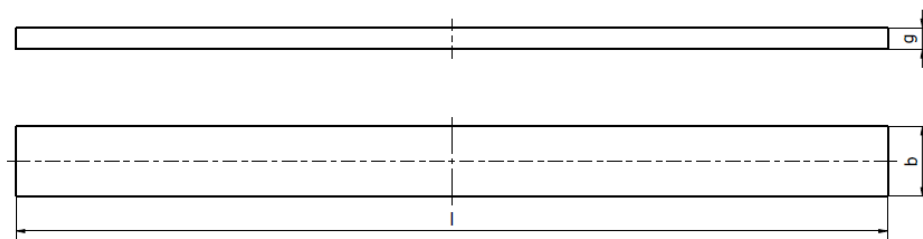
Parameter	Kruskal-Wallis test		Median test	
	Test statistic H	p-value	Test statistic χ^2	p-value
E	9,97	0,0188	12,00	0,0074

3.3.3. Badanie wytrzymałości na zginanie

Badania przeprowadzono w celu stwierdzenia wpływu otworów pod zawias oraz zamontowanego zawiasu na wytrzymałość płyty CDF na zginanie.

3.3.3.1. Próbki bez otworów

Obiekt badań stanowiły próbki płaskie (Rys. 3.9) przeznaczone do badań w warunkach czteropunktowego zginania o długości $l = 500$ mm, szerokości $b = 40$ mm oraz grubości g odpowiadającej grubości badanej płyty. Dla każdej grubości płyty drewnopochodnej przebadano po 3 próbki.



Rys. 3.9. Wymiary próbek bez otworów do próby zginania

Wyniki pomiarów grubości i szerokości próbek bez otworów wykonanych w celu określenia przekroju początkowego wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru [82], [83] przedstawiono w Tabeli 3.14 oraz Tabeli 3.15. Zastosowano w nich następujące oznaczenia:

- g_1, g_2, g_3 - poszczególne pomiary grubości próbki w części pomiarowej, mm,
- b_1, b_2, b_3 - poszczególne pomiary szerokości próbki w części pomiarowej, mm,
- g_0, b_0 - średnia grubość lub szerokość próbki w części pomiarowej, mm,
- s_x - odchylenie standardowe grubości lub szerokości próbki w części pomiarowej, mm.

Tabela 3.14. Wyniki pomiarów grubości próbek g_0 bez otworów poddanych badaniu wytrzymałości na zginanie wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Grubość nominalna	Oznaczenie próbki	g_1	g_2	g_3	g_0	s_x	$u_{x(A)}$	$u_{x(B)}$	$u_{x(C)}$	U_x	$g_0 \pm U_x$
		mm									
6,4 mm	B6-1	6,40	6,35	6,30	6,35	0,05	0,03	0,03	0,04	0,08	$6,35 \pm 0,08$
	B6-2	6,35	6,30	6,30	6,32	0,03	0,02		0,03	0,07	$6,32 \pm 0,07$
	B6-3	6,35	6,35	6,30	6,33	0,03	0,02		0,03	0,07	$6,33 \pm 0,07$
8,4 mm	B8-1	8,35	8,40	8,35	8,37	0,03	0,02		0,03	0,07	$8,37 \pm 0,07$
	B8-2	8,35	8,35	8,35	8,35	0,00	0,00		0,03	0,06	$8,35 \pm 0,06$
	B8-3	8,35	8,40	8,40	8,38	0,03	0,02		0,03	0,07	$8,38 \pm 0,07$
10,4 mm	B10-1	10,40	10,40	10,35	10,38	0,03	0,02		0,03	0,07	$10,38 \pm 0,07$
	B10-2	10,40	10,50	10,40	10,43	0,06	0,03		0,04	0,09	$10,43 \pm 0,09$
	B10-3	10,40	10,40	10,35	10,38	0,03	0,02		0,03	0,07	$10,38 \pm 0,07$
12,4 mm	B12-1	12,30	12,30	12,15	12,25	0,09	0,05		0,06	0,12	$12,25 \pm 0,12$
	B12-2	12,20	12,25	12,25	12,23	0,03	0,02		0,03	0,07	$12,23 \pm 0,07$
	B12-3	12,15	12,30	12,25	12,23	0,08	0,04		0,05	0,11	$12,23 \pm 0,11$

Tabela 3.15. Wyniki pomiarów szerokości próbek b_0 bez otworów poddanych badaniu wytrzymałości na zginanie wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Grubość nominalna	Oznaczenie próbki	b_1	b_2	b_3	b_0	s_x	$u_{x(A)}$	$u_{x(B)}$	$u_{x(C)}$	U_x	$b_0 \pm U_x$
		mm									
6,4 mm	B6-1	40,20	40,20	40,20	40,20	0,00	0,00	0,03	0,03	0,06	$40,20 \pm 0,06$
	B6-2	40,20	40,20	40,25	40,22	0,03	0,02		0,04	0,07	$40,22 \pm 0,07$
	B6-3	40,25	40,30	40,25	40,27	0,03	0,02		0,04	0,07	$40,27 \pm 0,07$
8,4 mm	B8-1	40,20	40,20	40,20	40,20	0,00	0,00		0,03	0,06	$40,20 \pm 0,06$
	B8-2	40,25	40,15	40,15	40,18	0,06	0,04		0,05	0,11	$40,18 \pm 0,11$
	B8-3	40,25	40,25	40,25	40,25	0,00	0,00		0,03	0,06	$40,25 \pm 0,06$
10,4 mm	B10-1	40,25	40,25	40,25	40,25	0,00	0,00		0,03	0,06	$40,25 \pm 0,06$
	B10-2	40,15	40,15	40,20	40,18	0,03	0,02		0,04	0,07	$40,18 \pm 0,07$
	B10-3	40,25	40,25	40,25	40,25	0,00	0,00		0,03	0,06	$40,25 \pm 0,06$
12,4 mm	B12-1	40,25	40,20	40,25	40,23	0,03	0,02		0,04	0,07	$40,23 \pm 0,07$
	B12-2	40,15	40,25	40,25	40,22	0,06	0,04		0,05	0,11	$40,22 \pm 0,11$
	B12-3	40,20	40,25	40,20	40,22	0,03	0,02		0,04	0,07	$40,22 \pm 0,07$

Niepewność pomiarów wyznaczono analogicznie jak w przypadku próbek rozciąganych zgodnie z zależnościami (3.1)÷(3.4). Pomiaru dokonano suwmiarką elektroniczną o działce elementarnej wynoszącej $\Delta x = 0,05$ mm. Niepewność rozszerzoną wyznaczono dla $k = 2$ (poziom ufności ok. 95%).

Wskaźnik wytrzymałości na zginanie W_x (Tabela 3.16) określa wzór

$$W_x = \frac{b_0 \cdot g_0^2}{6}, \quad (3.31)$$

natomiast niepewność złożoną wskaźnika zależność

$$u_{W_x} = \sqrt{\left(\frac{\partial W_x}{\partial b}\right)^2 \cdot u_b^2 + \left(\frac{\partial W_x}{\partial g}\right)^2 \cdot u_g^2}, \quad (3.32)$$

gdzie:

b_0, g_0 - odpowiednio szerokość początkowa lub grubość początkowa poszczególnych próbek w części pomiarowej, mm,

u_b, u_g - odpowiednio niepewność pomiaru szerokości lub grubości początkowej poszczególnych próbek w części pomiarowej, mm.

Ponieważ

$$\frac{\partial W_x}{\partial b} = \frac{g_0^2}{6} \quad (3.33)$$

oraz

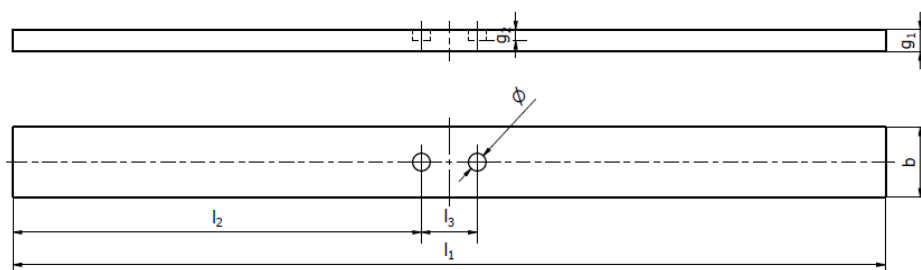
$$\frac{\partial W_x}{\partial g} = \frac{b_0 \cdot g_0}{3}, \quad (3.34)$$

stąd

$$u_{W_x} = \sqrt{\left(\frac{g_0^2}{6}\right)^2 \cdot u_b^2 + \left(\frac{b_0 \cdot g_0}{3}\right)^2 \cdot u_g^2}. \quad (3.35)$$

3.3.3.2. Próbki z otworami

Próbki z otworami miały wymiary gabarytowe takie same jak w przypadku próbek bez otworów. Za pomocą frezu wykonane zostały w nich dwa otwory o średnicy $d_{otw} = 10$ mm, głębokości $g_{otw} = 6$ mm i rozstawie $l_3 = 32$ mm. Taki sposób wykonania otworów odpowiadał wymiarom i rozstawowi kołków montażowych występujących w zawiasach Blum Expando T. Odległość otworu od krawędzi krótszego boku l_2 wyniosła 234 mm (Rys. 3.10).



Rys. 3.10. Wymiary próbek z otworami do próby zginania

Tabela 3.16. Wskaźnik wytrzymałości na zginanie W_x próbek bez otworów poddanych badaniu wytrzymałości na zginanie wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Grubość nominalna	Oznaczenie próbki	g_0	u_g	b_0	u_b	W_x	u_w	U_w	$W_x \pm U_w$
		mm				mm ³			
6,4 mm	B6-1	6,35	0,04	40,20	0,03	270,2	3,5	7,0	270,2±7,0
	B6-2	6,32	0,03	40,22	0,04	267,4	2,8	5,7	267,4±5,7
	B6-3	6,33	0,03	40,27	0,04	269,2	2,8	5,7	269,2±5,7
8,4 mm	B8-1	8,37	0,03	40,20	0,03	469,0	3,8	7,5	469,0±7,5
	B8-2	8,35	0,03	40,18	0,05	466,9	3,3	6,6	466,9±6,6
	B8-3	8,38	0,03	40,25	0,03	471,5	3,8	7,5	471,5±7,5
10,4 mm	B10-1	10,38	0,03	40,25	0,03	723,2	4,7	9,3	723,2±9,3
	B10-2	10,43	0,04	40,18	0,04	729,0	6,2	12,4	729,0±12,4
	B10-3	10,38	0,03	40,25	0,03	723,2	4,7	9,3	723,2±9,3
12,4 mm	B12-1	12,25	0,06	40,23	0,04	1006,3	9,5	19,1	1006,3±19,1
	B12-2	12,23	0,03	40,22	0,05	1003,1	5,6	11,2	1003,1±11,2
	B12-3	12,23	0,05	40,22	0,04	1003,1	8,7	17,4	1003,1±17,4

Wymiary próbek zamieszczono w Tabeli 3.17 i Tabeli 3.18. Niepewność pomiarów grubości i szerokości wyznaczono analogicznie jak w przypadku próbek bez otworów.

Tabela 3.17. Wyniki pomiarów grubości próbek g_0 z otworami poddanych badaniu wytrzymałości na zginanie wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Grubość nominalna	Oznaczenie próbki	g_1	g_2	g_3	g_0	s_x	$u_{x(A)}$	$u_{x(B)}$	$u_{x(C)}$	U_x	$g_0 \pm U_x$
		mm									
6,4 mm	O6-1	6,40	6,35	6,35	6,37	0,03	0,02	0,03	0,03	0,07	6,37±0,07
	O6-2	6,30	6,30	6,35	6,32	0,03	0,02		0,03	0,07	6,32±0,07
	O6-3	6,30	6,35	6,30	6,32	0,03	0,02		0,03	0,07	6,32±0,07
8,4 mm	O8-1	8,30	8,40	8,35	8,35	0,05	0,03		0,04	0,08	8,35±0,08
	O8-2	8,40	8,45	8,40	8,42	0,03	0,02		0,03	0,07	8,42±0,07
	O8-3	8,40	8,40	8,40	8,40	0,00	0,00		0,03	0,06	8,40±0,06
10,4 mm	O10-1	10,40	10,45	10,40	10,42	0,03	0,02		0,03	0,07	10,42±0,07
	O10-2	10,35	10,40	10,35	10,37	0,03	0,02		0,03	0,07	10,37±0,07
	O10-3	10,40	10,40	10,35	10,38	0,03	0,02		0,03	0,07	10,38±0,07
12,4 mm	O12-1	12,20	12,20	12,20	12,20	0,00	0,00		0,03	0,06	12,20±0,06
	O12-2	12,25	12,25	12,35	12,28	0,06	0,03		0,04	0,09	12,28±0,09
	O12-3	12,30	12,30	12,35	12,32	0,03	0,02		0,03	0,07	12,32±0,07

Tabela 3.18. Wyniki pomiarów szerokości próbek b_0 z otworami poddanych badaniu wytrzymałości na zginanie wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Grubość nominalna	Oznaczenie próbki	b_1	b_2	b_3	b_0	s_x	$u_{x(A)}$	$u_{x(B)}$	$u_{x(C)}$	U_x	$b_0 \pm U_x$
		mm									
6,4 mm	O6-1	40,25	40,20	40,25	40,23	0,03	0,02	0,03	0,04	0,07	40,23±0,07
	O6-2	40,25	40,20	40,20	40,22	0,03	0,02		0,04	0,07	40,22±0,07
	O6-3	40,15	40,20	40,20	40,18	0,03	0,02		0,04	0,07	40,18±0,07
8,4 mm	O8-1	40,25	40,25	40,25	40,25	0,00	0,00		0,03	0,06	40,25±0,06
	O8-2	40,25	40,25	40,25	40,25	0,00	0,00		0,03	0,06	40,25±0,06
	O8-3	40,15	40,20	40,15	40,17	0,03	0,02		0,04	0,07	40,17±0,07
10,4 mm	O10-1	40,20	40,20	40,25	40,22	0,03	0,02		0,04	0,07	40,22±0,07
	O10-2	40,25	40,15	40,25	40,22	0,06	0,04		0,05	0,11	40,22±0,11
	O10-3	40,25	40,25	40,25	40,25	0,00	0,00		0,03	0,06	40,25±0,06
12,4 mm	O12-1	40,15	40,25	40,30	40,23	0,08	0,06		0,07	0,13	40,23±0,13
	O12-2	40,45	40,40	40,40	40,42	0,03	0,02		0,04	0,07	40,42±0,07
	O12-3	40,35	40,35	40,35	40,35	0,00	0,00		0,03	0,06	40,35±0,06

Osiowy moment bezwładności I_x pola przekroju próbki w przekroju osłabionym otworem (Rys. 3.11) określa wzór

$$I_x = \frac{b_0 \cdot g_0^3}{12} + b_0 \cdot g_0 \cdot \left(\frac{g_0}{2} - y_{sc} \right)^2 + \frac{d_{otw} \cdot g_{otw}^3}{12} - d_{otw} \cdot g_{otw} \cdot \left(g_0 - \frac{g_{otw}}{2} - y_{sc} \right)^2, \quad (3.36)$$

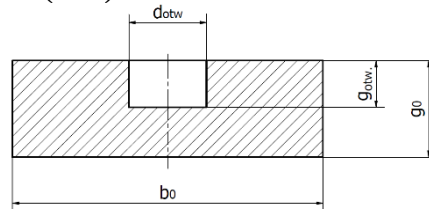
gdzie położenie środka ciężkości przekroju y_{sc} względem dolnej krawędzi

$$y_{sc} = \frac{b_0 \cdot g_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot g_0 - d_{otw} \cdot g_{otw} \cdot \left(g_0 - \frac{1}{2} \cdot g_{otw} \right)}{b_0 \cdot g_0 - d_{otw} \cdot g_{otw}}. \quad (3.37)$$

Wskaźnik wytrzymałości na zginanie W_x (Tabela 3.19) określa wzór

$$W_x = \frac{I_x}{g_0 - y_{sc}}, \quad (3.38)$$

natomiast niepewność złożoną wskaźnika oszacowano dla uproszczenia na podstawie zależności (3.35).



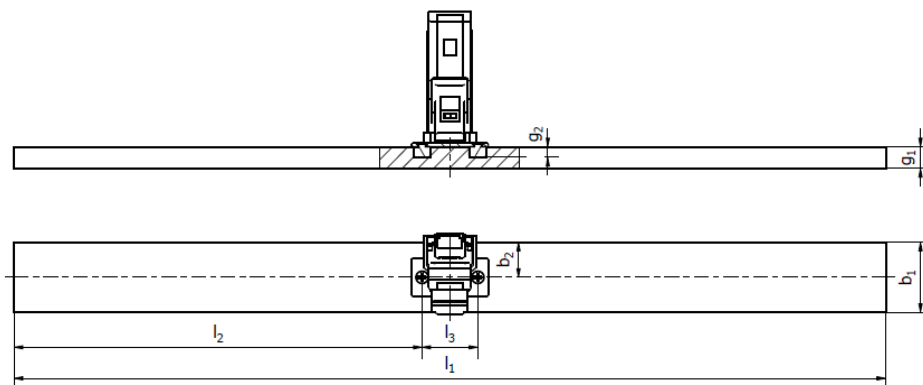
Rys. 3.11. Przekrój poprzeczny próbki z otworem

Tabela 3.19. Wskaźnik wytrzymałości na zginanie W_x próbek z otworami poddanych badaniu wytrzymałości na zginanie wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Grubość nominalna	Oznaczenie próbki	g_0	u_g	b_0	u_b	W_x	u_w	U_w	$W_x \pm U_w$
		mm				mm ³			
6,4 mm	O6-1	6,37	0,03	40,23	0,04	210,7	2,9	5,7	210,7±5,7
	O6-2	6,32	0,03	40,22	0,04	206,6	2,8	5,7	206,6±5,7
	O6-3	6,32	0,03	40,18	0,04	206,4	2,8	5,7	206,4±5,7
8,4 mm	O8-1	8,35	0,04	40,25	0,03	377,4	4,6	9,2	377,4±9,2
	O8-2	8,42	0,03	40,25	0,03	383,5	3,8	7,6	383,5±7,6
	O8-3	8,40	0,03	40,17	0,04	380,9	3,3	6,5	380,9±6,5
10,4 mm	O10-1	10,42	0,03	40,22	0,04	585,7	4,7	9,4	585,7±9,4
	O10-2	10,37	0,03	40,22	0,05	580,1	4,7	9,5	580,1±9,5
	O10-3	10,38	0,03	40,25	0,03	582,5	4,7	9,3	582,5±9,3
12,4 mm	O12-1	12,20	0,03	40,23	0,07	804,0	5,0	10,0	804,0±10,0
	O12-2	12,28	0,04	40,42	0,04	819,7	7,4	14,7	819,7±14,7
	O12-3	12,32	0,03	40,35	0,03	822,5	5,6	11,1	822,5±11,1

3.3.3.3. Próbki z zawiasami

Próbki przeznaczone do badań z zamontowanym zawiasem miały wymiary takie same jak w przypadku próbek z samymi otworami (Rys. 3.12).



Rys. 3.12. Wymiary próbek z otworami i zamocowanym zawiasem do próby zginania

Wymiary próbek zamieszczono w Tabeli 3.20 i Tabeli 3.21. Niepewność pomiarów grubości i szerokości wyznaczono analogicznie jak w przypadku próbek z samymi otworami.

Wskaźnik wytrzymałości na zginanie W_x (Tabela 3.22) wyznaczono identycznie jak w przypadku próbek bez otworów przyjmując, że otwór wypełniony śrubą niweluje występujące osłabienie przekroju.

Tabela 3.20. Wyniki pomiarów grubości próbek g_0 z otworami i zamocowanym zawiasem poddanych badaniu wytrzymałości na zginanie wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Grubość nominalna	Oznaczenie próbki	g_1	g_2	g_3	g_0	s_x	$u_{x(A)}$	$u_{x(B)}$	$u_{x(C)}$	U_x	$g_0 \pm U_x$
		mm									
6,4 mm	Z6-1	6,35	6,45	6,40	6,40	0,05	0,03	0,03	0,04	0,08	$6,40 \pm 0,08$
	Z6-2	6,40	6,40	6,40	6,40	0,00	0,00		0,03	0,06	$6,40 \pm 0,06$
	Z6-3	6,40	6,40	6,40	6,40	0,00	0,00		0,03	0,06	$6,40 \pm 0,06$
8,4 mm	Z8-1	8,50	8,50	8,50	8,50	0,00	0,00		0,03	0,06	$8,50 \pm 0,06$
	Z8-2	8,60	8,60	8,55	8,58	0,03	0,02		0,03	0,07	$8,58 \pm 0,07$
	Z8-3	8,50	8,50	8,50	8,50	0,00	0,00		0,03	0,06	$8,50 \pm 0,06$
10,4 mm	Z10-1	10,50	10,50	10,50	10,50	0,00	0,00		0,03	0,06	$10,50 \pm 0,06$
	Z10-2	10,50	10,55	10,50	10,52	0,03	0,02		0,03	0,07	$10,52 \pm 0,07$
	Z10-3	10,50	10,50	10,45	10,48	0,03	0,02		0,03	0,07	$10,48 \pm 0,07$
12,4 mm	Z12-1	12,25	12,25	12,30	12,27	0,03	0,02		0,03	0,07	$12,27 \pm 0,07$
	Z12-2	12,25	12,25	12,20	12,23	0,03	0,02		0,03	0,07	$12,23 \pm 0,07$
	Z12-3	12,35	12,25	12,30	12,30	0,05	0,03		0,04	0,08	$12,30 \pm 0,08$

Tabela 3.21. Wyniki pomiarów szerokości próbek b_0 z otworami i zamocowanym zawiasem poddanych badaniu wytrzymałości na zginanie wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

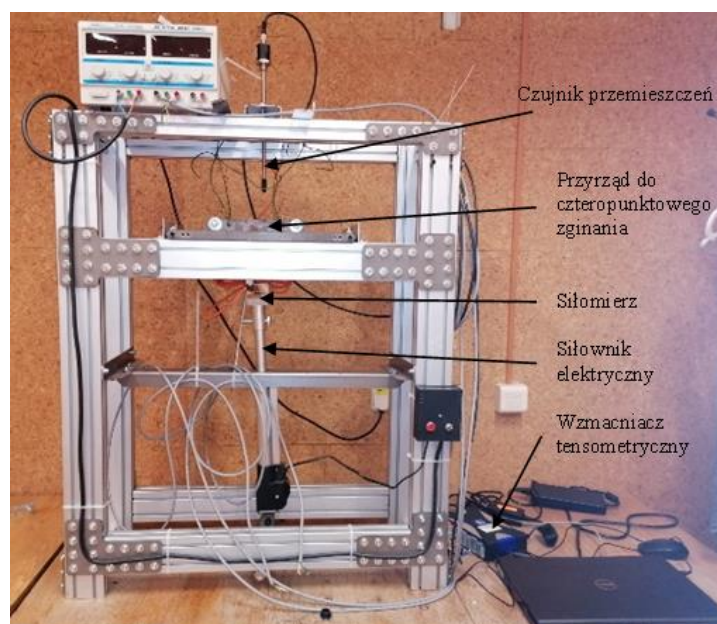
Grubość nominalna	Oznaczenie próbki	b_1	b_2	b_3	b_0	s_x	$u_{x(A)}$	$u_{x(B)}$	$u_{x(C)}$	U_x	$b_0 \pm U_x$
		mm									
6,4 mm	Z6-1	40,40	40,35	40,30	40,35	0,05	0,04	0,03	0,05	0,10	$40,35 \pm 0,10$
	Z6-2	40,35	40,35	40,30	40,33	0,03	0,02		0,04	0,07	$40,33 \pm 0,07$
	Z6-3	40,30	40,35	40,35	40,33	0,03	0,02		0,04	0,07	$40,33 \pm 0,07$
8,4 mm	Z8-1	40,30	40,30	40,30	40,30	0,00	0,00		0,03	0,06	$40,30 \pm 0,06$
	Z8-2	40,35	40,30	40,30	40,32	0,03	0,02		0,04	0,07	$40,32 \pm 0,07$
	Z8-3	40,35	40,35	40,35	40,35	0,00	0,00		0,03	0,06	$40,35 \pm 0,06$
10,4 mm	Z10-1	40,30	40,25	40,30	40,28	0,03	0,02		0,04	0,07	$40,28 \pm 0,07$
	Z10-2	40,40	40,30	40,30	40,33	0,06	0,04		0,05	0,11	$40,33 \pm 0,11$
	Z10-3	40,30	40,25	40,35	40,30	0,05	0,04		0,05	0,10	$40,30 \pm 0,10$
12,4 mm	Z12-1	40,35	40,35	40,35	40,35	0,00	0,00		0,03	0,06	$40,35 \pm 0,06$
	Z12-2	40,25	40,30	40,40	40,32	0,08	0,06		0,07	0,13	$40,32 \pm 0,13$
	Z12-3	40,35	40,35	40,30	40,33	0,03	0,02		0,04	0,07	$40,33 \pm 0,07$

3.3.3.4. Stanowisko do badań na zginanie

Badania wytrzymałości na zginanie zostały przeprowadzone na specjalnie w tym celu zbudowanym stanowisku przedstawionym na Rys. 3.13.

Tabela 3.22. Wskaźnik wytrzymałości na zginanie W_x próbek z otworami i zamocowanym zawiasem poddanych badaniu wytrzymałości na zginanie wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

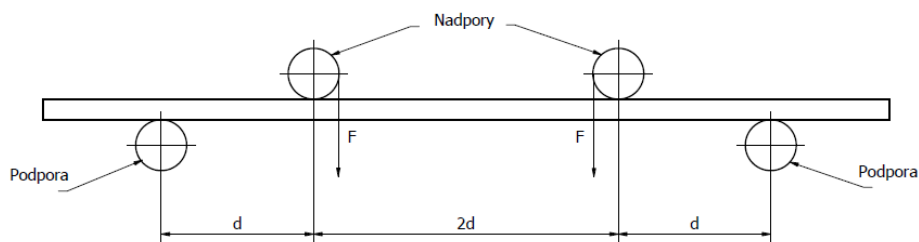
Grubość nominalna	Oznaczenie próbki	g_0	u_g	b_0	u_b	W_x	u_w	U_w	$W_x \pm U_w$
		mm				mm ³			
6,4 mm	Z6-1	6,40	0,04	40,35	0,05	275,5	3,5	7,1	275,5±7,1
	Z6-2	6,40	0,03	40,33	0,04	275,3	2,5	5,0	275,3±5,0
	Z6-3	6,40	0,03	40,33	0,04	275,3	2,5	5,0	275,3±5,0
8,4 mm	Z8-1	8,50	0,03	40,30	0,03	485,3	3,3	6,6	485,3±6,6
	Z8-2	8,58	0,03	40,32	0,04	495,0	3,9	7,7	495,0±7,7
	Z8-3	8,50	0,03	40,35	0,03	485,9	3,3	6,6	485,9±6,6
10,4 mm	Z10-1	10,50	0,03	40,28	0,04	740,2	4,1	8,2	740,2±8,2
	Z10-2	10,52	0,03	40,33	0,05	743,5	4,8	9,6	743,5±9,6
	Z10-3	10,48	0,03	40,30	0,05	738,2	4,8	9,6	738,2±9,6
12,4 mm	Z12-1	12,27	0,03	40,35	0,03	1011,9	5,6	11,1	1011,9±11,1
	Z12-2	12,23	0,03	40,32	0,07	1005,6	5,7	11,4	1005,6±11,4
	Z12-3	12,30	0,04	40,33	0,04	1017,0	6,8	13,6	1017,0±13,6



Rys. 3.13. Stanowisko do badania wytrzymałości na zginanie

Stanowisko składało się z ramy zaopatrzonej w siłownik elektryczny HAD9, który charakteryzował się następującymi parametrami: $F_{\max} = 4000 \text{ N}$, $V_{\max} = 6 \text{ mm/s}$, $U = 24 \text{ V}$. Za pomiar wartości siły odpowiadał czujnik wagowy typu „S” Keli DEE o klasie dokładności C3 i maksymalnym zakresie pomiaru siły wynoszącym $F = 2000 \text{ N}$ łączący siłownik z przyrządem obciążającym próbkę. Do pomiaru przemieszczenia wykorzystano czujnik indukcyjny LVP – 200 z zakresem pomiarowym $L = 200 \text{ mm}$, rozdzielczością $0,1 \text{ mm}$ i liniowością równą $0,6 \text{ mm}$, który opuszczano na badane elementy.

Badaną próbkę umieszczano w taki sposób, że opierała się ona na dwóch dolnych podporach połączonych z ramą, a dwie górne nadpory przyrządu obciążającego pod wpływem działania siłownika elektrycznego z prędkością $V = 0,5 \text{ mm/s}$ wywierały na nią nacisk (Rys. 3.14). Rozstaw dolnych punktów podparcia wynosił 360 mm , natomiast górnych 180 mm . Stanowisko badawcze połączono z komputerem poprzez wzmacniacz tensometryczny HBM. Do rejestracji pomiarów wykorzystano oprogramowanie EasyCatman.



Rys. 3.14. Układ obciążenia dwupunktowego (zginanie czteropunktowe)

Ze względu na ograniczenia konstrukcyjne maszyny wytrzymałościowej w postaci braku fizycznej możliwości zamocowania zawiasów w dolnej płaszczyźnie próbki, mocowanie próbek z otworami i próbek z zawiasami przeprowadzono w taki sposób, że otwory montażowe znajdowały się w górnej płaszczyźnie. Próbkę poddawano obciążeniu do momentu, w którym nastąpiło ich złamanie. Uzyskane wartości siły F i strzałki ugięcia f posłużyły do sporządzenia wykresów zależności naprężenia σ_g i strzałki ugięcia f . Obliczenia wykonano zgodnie z poniższym wzorem

$$\sigma_g = \frac{\frac{1}{2} \cdot F \cdot \frac{360}{4}}{W_x} = \frac{45 \cdot F}{W_x}. \quad (3.39)$$

Niepewność pomiaru siły określono na podstawie klasy czujnika C3, dla której w zakresie mierzonych sił $K = 0,5$ oraz jego zakresu pomiarowego wynoszącego $\Delta F = 2000 \text{ N}$:

$$u_F = \frac{K \cdot \Delta F}{100} = 10 \text{ N}. \quad (3.40)$$

Niepewność pomiaru strzałki ugięcia określono na podstawie rozdzielczości czujnika indukcyjnego wynoszącej $0,1 \text{ mm}$.

Niepewność złożoną pomiaru naprężenia gnącego z zależności (3.39)

$$u_{\sigma} = \sqrt{\left(\frac{\partial \sigma}{\partial F}\right)^2 \cdot u_F^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial W_x}\right)^2 \cdot u_{W_x}^2} \quad (3.41)$$

Ponieważ

$$\frac{\partial \sigma}{\partial F} = \frac{45}{W_x} \quad (3.42)$$

oraz

$$\frac{\partial \sigma}{\partial W_x} = -\frac{45 \cdot F}{W_x^2}, \quad (3.43)$$

stąd

$$u_{\sigma} = \sqrt{\left(\frac{45}{W_x}\right)^2 \cdot u_F^2 + \left(\frac{45 \cdot F}{W_x^2}\right)^2 \cdot u_{W_x}^2} \quad (3.44)$$

Podobnie jak uprzednio niepewność rozszerzoną wyznaczono przyjmując współczynnik rozszerzenia $k = 2$ (poziom ufności wynoszący ok. 95%).

3.3.3.5. Postać uszkodzeń próbek zginanych czteropunktowo

Na Rys. 3.15 przedstawiono przykładowe postaci uszkodzeń badanych próbek. Próbki bez otworów, które poddano badaniu na zginanie ulegały zniszczeniu najczęściej w pobliżu usytuowania dolnych podpór stanowiska badawczego. W przypadku próbek z otworami do pęknięcia wszystkie uległy uszkodzeniu w miejscu wykonania nawierceń. W przypadku próbek z zawiasami umiejscowienie uszkodzeń było zbliżone do zaobserwowanych dla próbek bez otworów. Również w tym przypadku próbki pękały najczęściej w miejscu usytuowania dolnych podpór.

3.3.3.6. Wyniki badań próbek bez otworów

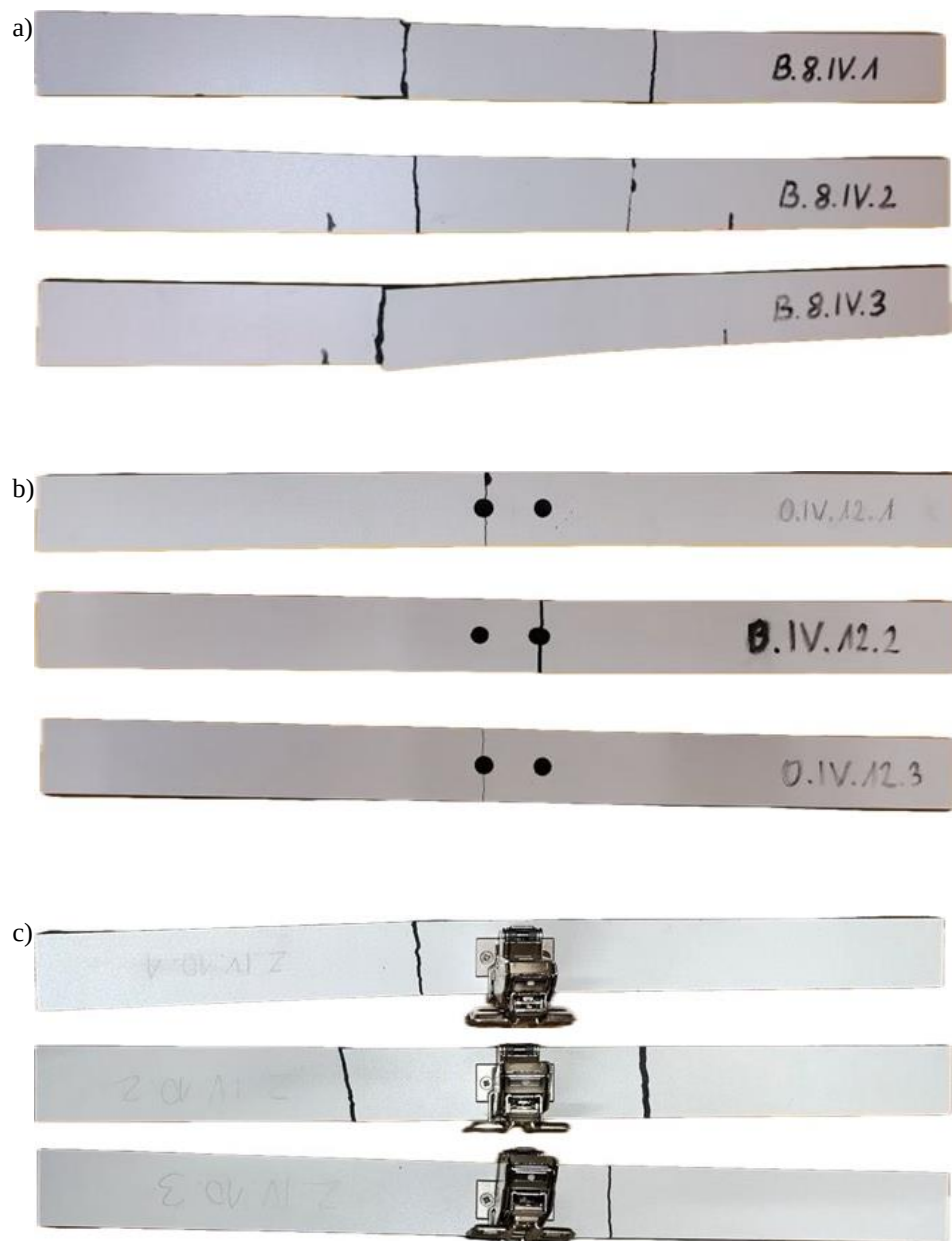
Zarejestrowane w trakcie prób wykresy zależności naprężenia od ugięcia próbki przedstawiono na Rys. 3.16. Maksymalne naprężenie gnące uzyskane podczas próby zamieszczono w Tabeli 3.23 oraz Tabeli 3.26.

3.3.3.7. Wyniki badań próbek z otworami

Zarejestrowane w trakcie prób wykresy zależności naprężenia od ugięcia próbki przedstawiono na Rys. 3.17. maksymalne naprężenie gnące uzyskane podczas próby zamieszczono w Tabeli 3.24 oraz Tabeli 3.26.

3.3.3.8. Wyniki badań próbek z otworami i zamocowanym zawiasem

Zarejestrowane w trakcie prób wykresy zależności naprężenia od ugięcia próbki przedstawiono na Rys. 3.18. maksymalne naprężenie gnące uzyskane podczas próby zamieszczono w Tabeli 3.25 oraz Tabeli 3.26.



Rys. 3.15. Przykładowe postaci uszkodzeń próbek poddanych czteropunktowemu zginaniu: a) bez otworów, b) z otworami, c) z zawiasami

Tabela 3.23. Maksymalne naprężenie gnące σ_g próbek bez otworów wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Grubość nominalna	Oznaczenie próbki	F	u_F	W_x	u_{W_x}	σ_g	u_{σ}	U_{σ}	$\sigma_g \pm U_{\sigma}$
		N		mm^3		MPa			
6,4 mm	B6-1	449,7	10	270,2	3,5	74,9	1,9	3,8	74,9 $\pm$ 3,8
	B6-2	385,3		267,4	2,8	64,8	1,8	3,6	64,8 $\pm$ 3,6
	B6-3	467,1		269,2	2,8	78,1	1,9	3,7	78,1 $\pm$ 3,7
8,4 mm	B8-1	675,1		469,0	3,8	64,8	1,1	2,2	64,8 $\pm$ 2,2
	B8-2	767,6		466,9	3,3	74,0	1,1	2,2	74,0 $\pm$ 2,2
	B8-3	702,1		471,5	3,8	67,0	1,1	2,2	67,0 $\pm$ 2,2
10,4 mm	B10-1	1061,8		723,2	4,7	66,1	0,8	1,5	66,1 $\pm$ 1,5
	B10-2	1104,7		729,0	6,2	68,2	0,8	1,7	68,2 $\pm$ 1,7
	B10-3	1096,9		723,2	4,7	68,2	0,8	1,5	68,2 $\pm$ 1,5
12,4 mm	B12-1	1374,3		1006,3	9,5	61,5	0,7	1,5	61,5 $\pm$ 1,5
	B12-2	1406,3		1003,1	5,6	63,1	0,6	1,1	63,1 $\pm$ 1,1
	B12-3	1317,8		1003,1	8,7	59,1	0,7	1,4	59,1 $\pm$ 1,4

Tabela 3.24. Maksymalne naprężenie gnące σ_g próbek z otworami wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Grubość nominalna	Oznaczenie próbki	F	u_F	W_x	u_{W_x}	σ_g	u_{σ}	U_{σ}	$\sigma_g \pm U_{\sigma}$
		N		mm^3		MPa			
6,4 mm	O6-1	268,4	10	210,7	2,9	57,3	2,3	4,5	57,3 $\pm$ 4,5
	O6-2	268,2		206,6	2,8	58,4	2,3	4,6	58,4 $\pm$ 4,6
	O6-3	233,8		206,4	2,8	51,0	2,3	4,6	51,0 $\pm$ 4,6
8,4 mm	O8-1	307,6		377,4	4,6	36,7	1,3	2,5	36,7 $\pm$ 2,5
	O8-2	340,6		383,5	3,8	40,0	1,2	2,5	40,0 $\pm$ 2,5
	O8-3	361,5		380,9	3,3	42,7	1,2	2,5	42,7 $\pm$ 2,5
10,4 mm	O10-1	515,4		585,7	4,7	39,6	0,8	1,7	39,6 $\pm$ 1,7
	O10-2	522,5		580,1	4,7	40,5	0,8	1,7	40,5 $\pm$ 1,7
	O10-3	515,7		582,5	4,7	39,8	0,8	1,7	39,8 $\pm$ 1,7
12,4 mm	O12-1	631,3		804,0	5,0	35,3	0,6	1,2	35,3 $\pm$ 1,2
	O12-2	664,8		819,7	7,4	36,5	0,6	1,3	36,5 $\pm$ 1,3
	O12-3	691,0		822,5	5,6	37,8	0,6	1,2	37,8 $\pm$ 1,2

3.3.3.9. Analiza wyników badań – wpływ grubości płyty

Analiza wyników, podobnie jak w przypadku badań na rozciąganie, miała w pierwszej kolejności na celu określenie możliwego wpływu grubości płyty CDF na właściwości wytrzymałościowe. Analizę statystyczną przeprowadzono przy użyciu pakietu STATISTICA zgodnie ze schematem z Rys. 3.8.

Tabela 3.25. Maksymalne naprężenie gnące σ_g próbek z otworami i zamocowanym zawiasem wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Grubość nominalna	Oznaczenie próbki	F	u_F	W_x	u_{W_x}	σ_g	u_σ	U_σ	$\sigma_g \pm U_\sigma$
		N		mm^3		MPa			
6,4 mm	Z6-1	406,9	10	275,5	3,5	66,6	2,5	5,1	66,5±3,7
	Z6-2	416,6		275,3	2,5	68,2	2,3	4,7	68,1±3,5
	Z6-3	424,3		275,3	2,5	69,3	2,3	4,7	69,3±3,5
8,4 mm	Z8-1	660,6		485,3	3,3	61,3	1,3	2,6	61,3±2
	Z8-2	535,9		495,0	3,9	48,8	1,3	2,5	48,7±2
	Z8-3	715,7		485,9	3,3	66,3	1,3	2,7	66,3±2,1
10,4 mm	Z10-1	1088,7		740,2	4,1	66,2	0,9	1,9	66,2±1,4
	Z10-2	1027,5		743,5	4,8	62,2	1,0	1,9	62,2±1,5
	Z10-3	955,7		738,2	4,8	58,3	1,0	1,9	58,3±1,4
12,4 mm	Z12-1	1171,1		1011,9	5,6	52,1	0,7	1,4	52,1±1,1
	Z12-2	1287,4		1005,6	5,7	57,7	0,7	1,5	57,6±1,1
	Z12-3	1177,1		1017,0	6,8	52,1	0,8	1,5	52,1±1,1

Tabela 3.26. Zestawienie średnich maksymalnych naprężeń gnących σ_g dla poszczególnych grubości paneli CDF

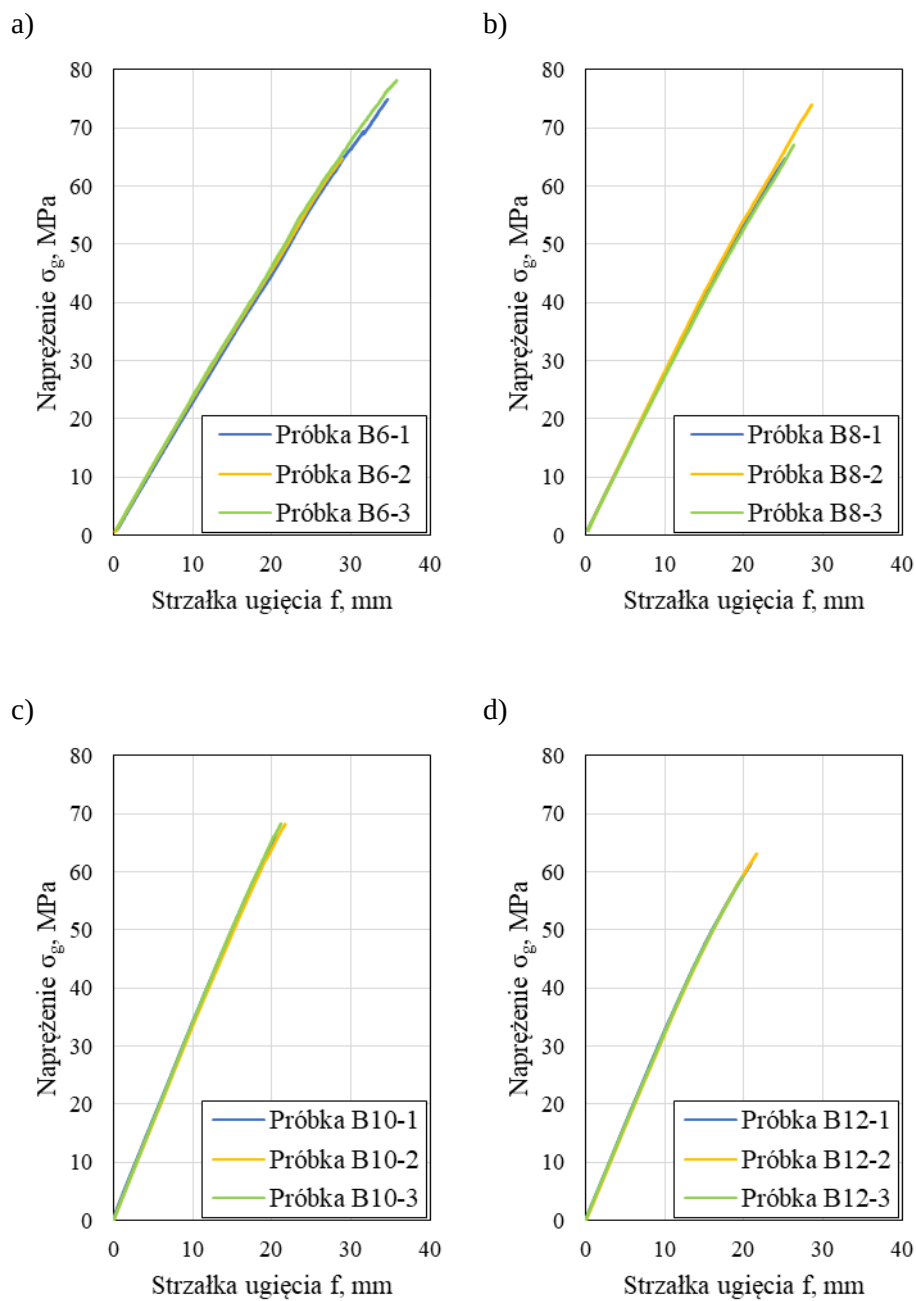
Grubość nominalna	Średnie maksymalne naprężenia gnące σ_g w MPa dla próbek		
	bez otworów	z otworami	z otworami i zawiasem
6,4 mm	72,6 ±6,0	55,6 ±5,3	68,0 ±3,8
8,4 mm	68,6 ±3,9	39,8 ±3,2	58,8 ±6,4
10,4 mm	67,5 ±1,7	40,0 ±1,7	62,2 ±3,0
12,4 mm	61,2 ±2,0	36,5 ±1,5	53,9 ±2,4

Analizę tę przeprowadzono dla próbek bez otworów.

Pierwszym krokiem analizy było przeprowadzenie testu Shapiro-Wilka w celu potwierdzenia, że populacja ma rozkład normalny. Statystyka testu Shapiro-Wilka W i wartość p -value dla każdej badanej grubości paneli CDF zamieszczono w Tabeli 3.27. Wyniki analizy wskazują, że nie zostało spełnione założenie normalności rozkładu ($p\text{-value} = 0,0384 < \alpha = 0,05$).

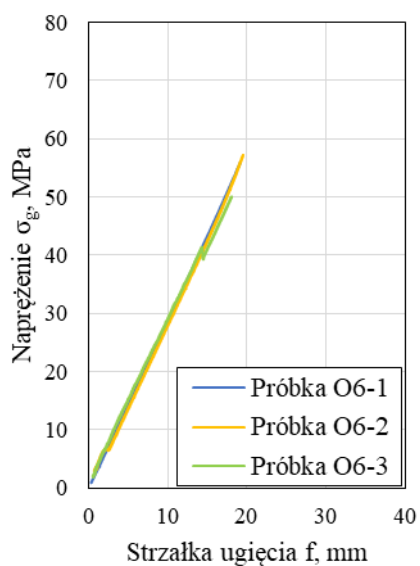
Tabela 3.27. Wyniki testu Shapiro-Wilka dla maksymalnych naprężeń gnących σ_g próbek bez otworów ($\alpha = 0,05$)

Grubość nominalna	W	$p\text{-value}$
6,4 mm	0,9187	0,4477
8,4 mm	0,9252	0,4710
10,4 mm	0,7672	0,0384
12,4 mm	0,9911	0,8200

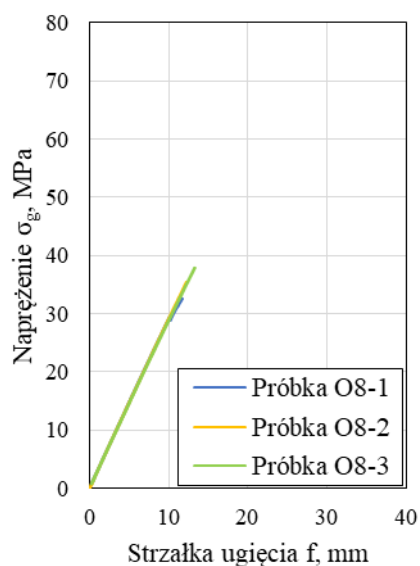


Rys. 3.16. Wyniki badań zginania czteropunktowego próbek bez otworów o grubości: a) 6,4 mm; b) 8,4 mm; c) 10,4 mm; d) 12,4 mm

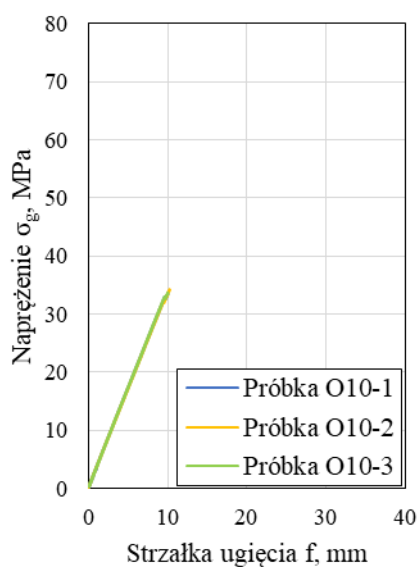
a)



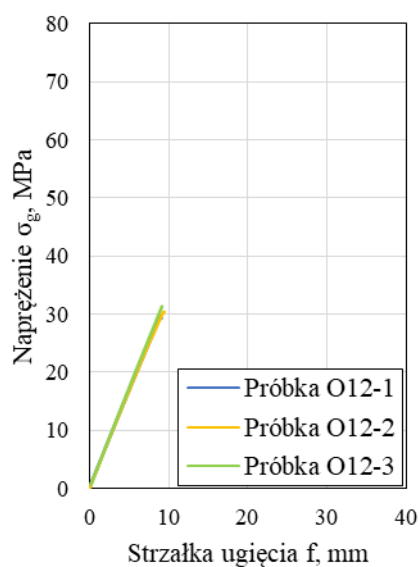
b)



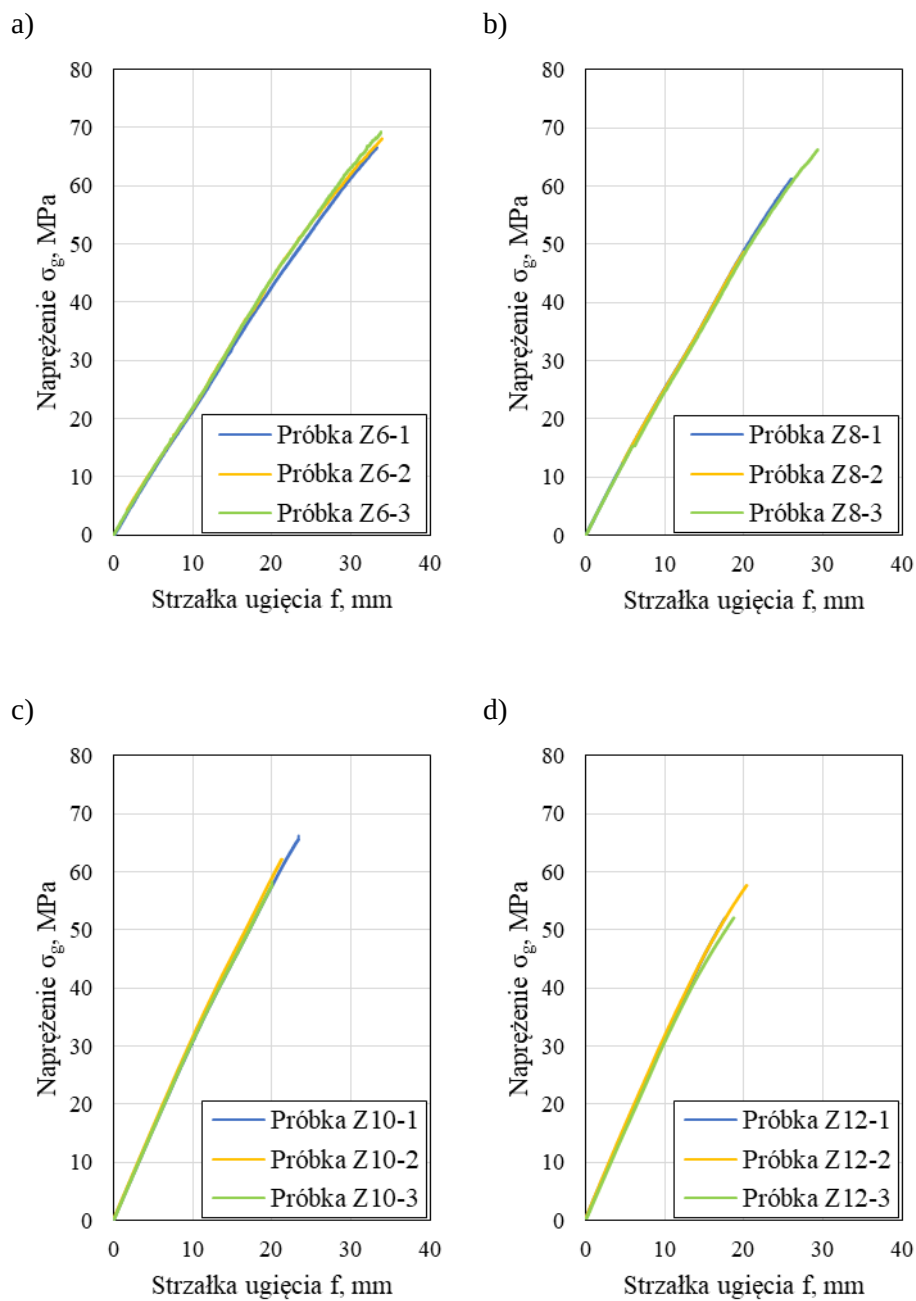
c)



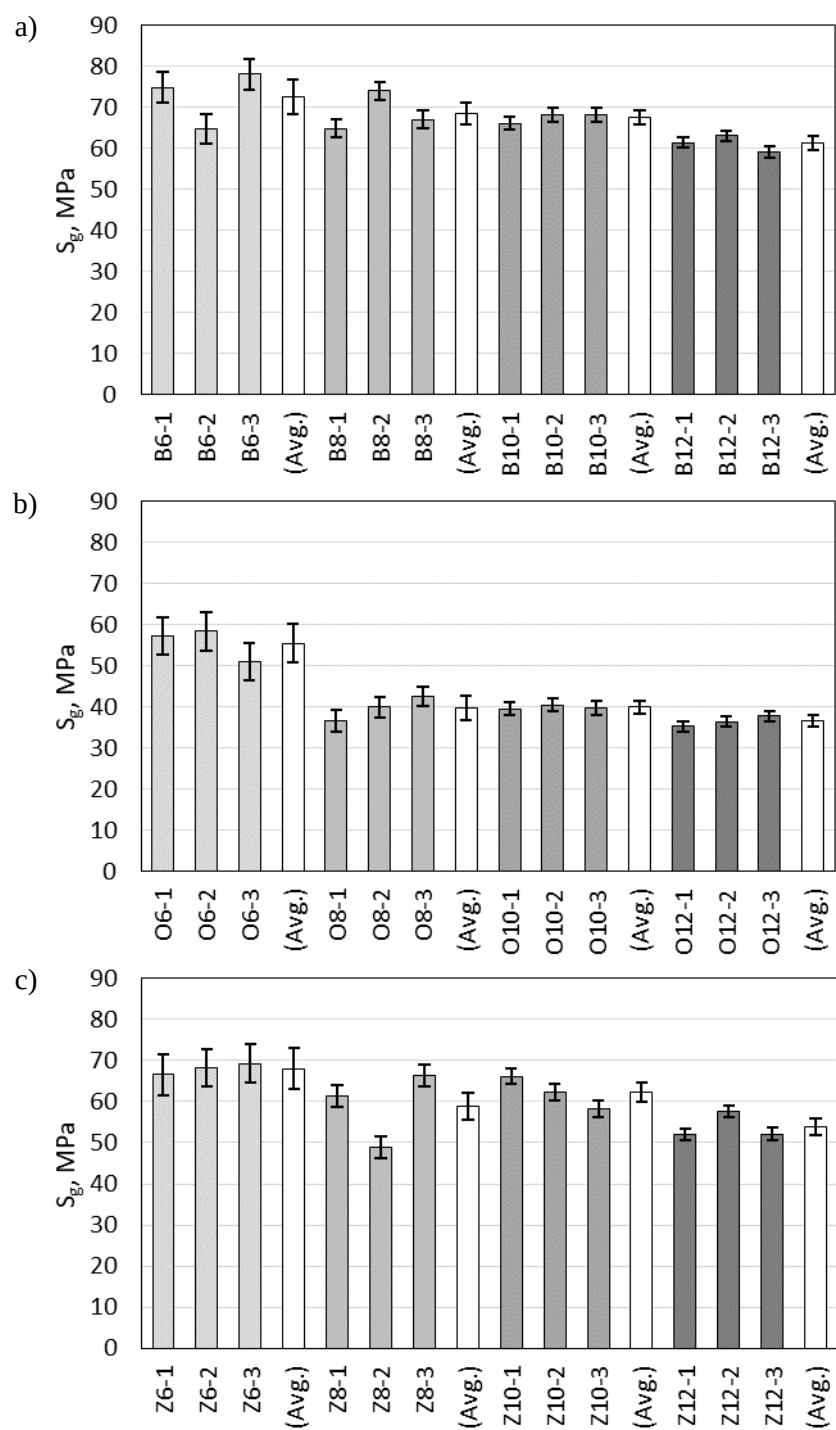
d)



Rys. 3.17. Wyniki badań zginania czteropunktowego próbek z otworami o grubości:
a) 6,4 mm; b) 8,4 mm; c) 10,4 mm; d) 12,4 mm



Rys. 3.18. Wyniki badań zginania czteropunktowego próbek z otworami i zamocowanym zawiasem o grubości: a) 6,4 mm; b) 8,4 mm; c) 10,4 mm; d) 12,4 mm



Rys. 3.19. Zestawienie uzyskanych wyników badań w próbie zginania

Ze względu na niespełnienie założenia normalności rozkładu przeprowadzono nieparametryczny test Kruskala-Wallisa dla sprawdzenia, czy próbki pochodzą z tego samego rozkładu oraz w tym samym celu test mediany. Wartości p-value uzyskane w obu testach (Tabela 3.28) są większe od poziomu istotności, co wskazuje, że żadna z grup nie różni się istotnie od pozostałych.

Tabela 3.28. Wyniki testu Kruskala-Wallisa oraz testu mediany dla maksymalnych naprężeń gnących σ_g próbek bez otworów ($\alpha = 0,05$)

Parameter	Kruskal-Wallis test		Median test	
	Test statistic H	p-value	Test statistic χ^2	p-value
σ_g	6,90	0,0752	4,00	0,2615

Na podstawie przeprowadzonej analizy wskazać można, że wytrzymałość na zginanie płyt CDF nieosłabionych otworami wynosi co najmniej 61,2 MPa i w zakresie do 12,4 mm nie zależy od grubości płyty.

W przypadku analizy próbek z otworami wyniki testu Shapiro-Wilka wskazują, że zostało spełnione założenie normalności rozkładu (Tabela 3.29), a testy jednorodności wariancji Levene'a, Browna-Forsythe'a, Hartleya, Cochran'a oraz Bartletta, że założenie jednorodności wariancji zostało spełnione (Tabela 3.30 i Tabela 3.31).

Tabela 3.29. Wyniki testu Shapiro-Wilka dla maksymalnych naprężeń gnących σ_g próbek z otworami ($\alpha = 0,05$)

Grubość nominalna	W	p-value
6,4 mm	0,8721	0,3016
8,4 mm	0,9985	0,9268
10,4 mm	0,9630	0,6303
12,4 mm	0,9998	0,9760

Tabela 3.30. Wyniki testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a dla maksymalnych naprężeń gnących σ_g próbek z otworami ($\alpha = 0,05$)

Parametr	Test Levene'a		Test Browna-Forsythe'a	
	F	p-value	F	p-value
σ_g	3,84	0,06	0,90	0,48

Tabela 3.31. Wyniki testu Bartlett'a, testu Cochran'a i testu Hartley'a dla maksymalnych naprężeń gnących σ_g próbek z otworami ($\alpha = 0,05$)

Parametr	Test Bartlett'a	Test Cochran'a	Test Hartley'a	p-value
	χ^2	C	F	
σ_g	6,86	0,65	89,55	0,08

Taka sytuacja umożliwia przeprowadzenie jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA. Ponieważ otrzymana wartość p-value jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA (Tabela 3.32) jest mniejsza niż poziom istotności $\alpha = 0,05$, co świadczy o występowaniu różnic między wartościami maksymalnego naprężenia gnącego ze względu na grubość płyty CDF.

Tabela 3.32. Wyniki jednoczynnikowej analizy ANOVA dla maksymalnych naprężeń gnących σ_g próbek z otworami ($\alpha = 0,05$)

Parametr	Jednoczynnikowa ANOVA	
	F	p-value
σ_g	60,32	0,00

W celu określenia wielkości tych różnic posłużono się testami post-hoc: testem Scheffego, testem Tukeya HSD oraz testem Bonferroniego. Wszystkie testy tworzą dwie jednorodne grupy, które różnią się od siebie. Do pierwszej z nich zaliczane są trzy grubości płyt, tj.: 6,4 mm, 8,4 mm oraz 10,4 mm. W drugiej z jednorodnych grup znajduje się grubość 12,4 mm.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wskazać można, że wytrzymałość na zginanie płyt CDF osłabionych otworami nie wykazuje istotnych statystycznie różnic dla grubości do 10,4 mm.

W przypadku analizy próbek z otworami i zamocowanym zawiasem wyniki testu Shapiro-Wilka (Tabela 3.33) wskazują, że nie zostało spełnione założenie normalności rozkładu ($p\text{-value} = 0,0112 < \alpha = 0,05$). Ze względu na niespełnienie tego założenia przeprowadzono nieparametryczny test Kruskala-Wallisa oraz test mediany (Tabela 3.28). Uzyskane wyniki wskazują, że przynajmniej jedna grupa różni się w istotny sposób od pozostałych. W celu jej wyróżnienia wykonano test wielokrotnego porównania średnich rang prób, który wskazał na płytę o grubości 12,4 mm jako istotnie różną od pozostałych.

Tabela 3.33. Wyniki testu Shapiro-Wilka dla maksymalnych naprężeń gnących σ_g próbek z otworami i zamocowanym zawiasem ($\alpha = 0,05$)

Grubość nominalna	W	p-value
6,4 mm	0,9946	0,8593
8,4 mm	0,9430	0,5394
10,4 mm	0,9998	0,9751
12,4 mm	0,7550	0,0112

Tabela 3.34. Wyniki testu Kruskala-Wallisa oraz testu mediany dla maksymalnych naprężeń gnących σ_g próbek z otworami i zamocowanym zawiasem ($\alpha = 0,05$)

Parameter	Kruskal-Wallis test		Median test	
	Test statistic H	p-value	Test statistic χ^2	p-value
σ_g	7,82	0,0499	6,67	0,0833

3.3.3.10. Analiza wyników badań – wpływ otworów i zawiasów

Analiza wyników zrealizowana w tym punkcie miała na celu ustalenie wpływu wykonania otworów w płycie, a następnie zamocowania zawiasu. Podobnie jak w przypadku poprzednich badań analizę statystyczną przeprowadzono przy użyciu pakietu STATISTICA zgodnie ze schematem z Rys. 3.8. Analizie poddano wartości maksymalne naprężenia gnącego otrzymane w badaniach próbek bez otworów (próbki B), z otworami (próbki O) oraz z otworami i zamocowanym zawiasem (próbki Z).

Założenie normalności rozkładu przeprowadzono przy wykorzystaniu testu Shapiro-Wilka (Tabela 3.35). Jednorodność wariancji sprawdzono za pomocą testów Levene'a i Browna-Forsythe'a (Tabela 3.36) oraz Hartleya, Cochran'a i Bartletta (Tabela 3.37).

Tabela 3.35. Wyniki testu Shapiro-Wilka - wpływ otworów i zawiasów ($\alpha = 0,05$)

Grubość nominalna	Próbki B		Próbki O		Próbki Z	
	W	p-value	W	p-value	W	p-value
6,4 mm	0,9187	0,4477	0,8724	0,3023	0,9946	0,8593
8,4 mm	0,9252	0,4710	0,9985	0,9268	0,9430	0,5394
10,4 mm	0,7672	0,0384	0,9630	0,6303	0,9998	0,9751
12,4 mm	0,9911	0,8200	0,9998	0,9760	0,7550	0,0112

Tabela 3.36. Wyniki testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a ($\alpha = 0,05$)

Grubość nominalna	Test Levene'a		Test Browna-Forsythe'a	
	F	p-value	F	p-value
6,4 mm	3,89	0,08	0,74	0,52
8,4 mm	2,66	0,15	0,72	0,52
10,4 mm	2,52	0,16	2,09	0,20
12,4 mm	2,90	0,13	0,27	0,78

Tabela 3.37. Wyniki testu Bartlett'a, testu Cochran'a i testu Hartley'a ($\alpha = 0,05$)

Grubość nominalna	Test Bartlett'a	Test Cochran'a	Test Hartley'a	p-value
	χ^2	C	F	
6,4 mm	3,17	0,74	23,50	0,20
8,4 mm	2,24	0,73	11,72	0,33
10,4 mm	6,29	0,90	91,69	0,04
12,4 mm	1,89	0,67	10,06	0,39

W przypadku grubości wynoszącej 6,4 mm oraz 8,4 mm, ze względu na spełnienie założenia o normalności rozkładu oraz jednorodności wariancji, możliwe jest przeprowadzenie jednoczynnikowej analizy ANOVA (Tabela 3.38).

Tabela 3.38. Wyniki jednoczynnikowej analizy ANOVA ($\alpha = 0,05$)

Grubość nominalna	Jednoczynnikowa ANOVA	
	F	p-value
6,4 mm	12,13	0,01
8,4 mm	23,59	0,00

Wyniki analizy ANOVA ($p\text{-value} < \alpha = 0,05$) w przypadku obu grubości wskazuje na występowanie istotnych różnic pomiędzy wartościami naprężenia gnącego dla poszczególnych wariantów próbek. Dla oszacowania wielkości różnic przeprowadzono dodatkowe testy post-hoc: Scheffego, Tukeya HSD oraz Bonferroniego. W przypadku obu grubości powyższe testy pozwoliły na wyodrębnienie dwóch różniących się od siebie grup jednorodnych. Do pierwszej z nich należą próbki bez otworów (próbki B) oraz próbki z otworami i zamocowanym zawiasem (próbki Z). Do drugiej grupy należą próbki z otworami (próbki O).

W przypadku grubości wynoszącej 10,4 mm oraz 12,4 mm, ze względu na niespełnienie założenia o normalności rozkładu oraz jednorodności wariancji, nieparametryczny test Kruskala-Wallisa i test mediany (Tabela 3.39).

Tabela 3.39. Wyniki testu Kruskala-Wallisa oraz testu mediany ($\alpha = 0,05$)

Grubość nominalna	Kruskal-Wallis test		Median test	
	Test statistic H	p-value	Test statistic χ^2	p-value
10,4 mm	6,49	0,0390	6,30	0,0429
12,4 mm	7,20	0,0273	6,30	0,0429

Przeprowadzone testy wyników uzyskanych dla obu grubości płyt pozwalają stwierdzić, że przynajmniej jedna z grup różni się istotnie od pozostałych. W celu wyłonienia różniących się istotnie grup wykonano testy wielokrotnych porównań średnich rang prób, które wykazały, że w przypadku próbek z otworami (próbki O) uzyskane wyniki różnią się w istotny sposób od pozostałych.

Przeprowadzone analizy wskazują, że dla wszystkich badanych grubości paneli występuje istotne obniżenie wartości maksymalnych naprężeń gnących wyznaczonych w próbie zginania czteropunktowego będące skutkiem wykonania otworu pod śrubę mocującą zawias. Zamocowanie zawiasu powoduje jednak istotne zniwelowanie tego efektu.

3.4. Charakterystyka stali S235

Jak wspomniano wcześniej opisując obiekt badań, w celu dostosowania standardowych zawiasów mocowanych za pomocą śrub do klejenia do płyty przygotowano pośrednie elementy łączące o kształcie odpowiadającym części mocującej zawiasu, do których z jednej strony za pomocą śrub mocowano wspomniany powyżej zawias, a z drugiej klejono do płyty (Rys. 3.1b). Elementy

te wykonano z płaskowników 20x4 ze stali S235 (Rys. 3.20), która zgodnie z normą PN-EN 10020:2003 klasyfikowana jest jako stal konstrukcyjna niestopowa [89] walcowana na gorąco. Takich samych płaskowników użyto do wykonania próbek do badań wybranych parametrów złączy klejonych stal-płyta CDF.



Rys. 3.20. Płaskownik wykonany ze stali S235 w stanie surowym

Stal S235 stanowi odpowiednik dawnej konstrukcyjnej stali niestopowej St3S, która odznaczała się mikrostrukturą ferrytyczno-perlityczną. Stal S235 wg normy PN-EN 10025-2:2007 [90] dla wyrobów o grubości większej niż 3 mm charakteryzuje się następującymi właściwościami wytrzymałościowymi: granica plastyczności R_e - min. 235 MPa, wytrzymałość na rozciąganie R_m - 360-510 MPa, wydłużenie przy zerwaniu A - min. 26%.

Skład chemiczny stali S235 wg pracy [13] zamieszczono w Tabeli 3.40 w zestawieniu z wymaganiami normy PN-EN 10025-2:2007 [90] oraz z często z nią porównywaną stalą DC04 wg normy PN-EN 10130:2009 [91].

Wyniki próby monotonicznego rozciągania stali S235 przedstawione w [13] przeprowadzone zgodnie z normą PN-EN 10002 [92] na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 1126 wykazały, że stal S235 charakteryzuje się brakiem wyraźnej granicy plastyczności R_e , a wykres rozciągania takiej stali nie odzwierciedla przebiegu charakterystycznego dla stali konstrukcyjnych. Wyniki badań wskazują, że granica plastyczności R_e i wytrzymałość na rozciąganie R_m można sprowadzić do zależności $R_e \approx R_m$. Średnia wartość R_m uzyskana na podstawie badania trzech próbek wynosi 360 ± 39 MPa, a odkształcenie przy zerwaniu A wynosi $32,67 \pm 12,41\%$ [93]. Modułu Young'a E wynosi $208,2 \pm 4,1$ GPa [94]. Współczynnik Poissona dla tej stali przyjmuje wartość 0,3 [94].

Tabela 3.40. Skład chemiczny badanej stali S235 w porównaniu z wymaganiami normy PN-EN 10025-2:2007 (norma A) oraz stalą DC04 wg PN-EN 10130:2009 (norma B)

	Pierwiastek, %													
	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Cu	Co	Al	Mo	Ni	W	Fe
stal	0,04	0,04	0,79	0,005	0,004	0,02	0,005	0,01	0,01	0,04	0,002	0,01	0,01	reszta
norma A	max 0,2	-	max 1,4	max 0,04	max 0,04	-	-	-	-	-	-	-	-	reszta
norma B	max 0,08	-	max 0,4	max 0,03	max 0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	reszta

3.5. Charakterystyka klejów

Badania połączeń poprzedzono analizą klejów pozwalających na łączenie płyt drewnopochodnych, tworzyw sztucznych oraz metali (Tabela 3.41).

Tabela 3.41. Zestawienie najważniejszych parametrów klejów stosowanych do łączenia płyt drewnopochodnych, tworzyw sztucznych i metali

Gatunek i oznaczenie kleju		Wytrzymałość			Grubość szczeliny
		rozciąganie	ściananie	oddzieranie / odrywanie	
Cyjanoakrylowy	Multibond – 433	19-20 MPa	16-20 MPa	-	10-200 μ m
	Multibond – 443	25-30 MPa	22-25 MPa	-	10-200 μ m
	Multibond – 421 (43)	22-25 MPa	20-22 MPa	-	10-100 μ m
	Multibond – 410 (41)	20-25 MPa	18-22 MPa	-	10-50 μ m
	Multibond – 422 (44)	22-24 MPa	19-22 MPa	-	10-200 μ m
	Multibond – 411 (42)	22-25 MPa	13-22 MPa	-	10 -100 μ m
	Multibond – 431 (47)	19-20 MPa	16-20 MPa	-	10 -150 μ m
	Multibond – 430	19-20 MPa	16-20 MPa	-	10-50 μ m
	Multibond – 415 (45)	25-30 MPa	20-25 MPa	-	1 mm
	Multibond – 413 (48)	22-25 MPa	13-22 MPa	-	10-200 μ m
Metakrylowy	Multibond – 5714	-	15-18 MPa	3 MPa	0,05-0,5 mm max. 1 mm
	Multibond – 5711	20-30 MPa	-	-	0,05-0,1 mm
	Multibond – 5715	-	15-25 MPa	3,5-5 MPa / 12-25 MPa	0,05-0,5 mm
	Multibond – 5821	-	< 22 MPa (A) < 20 MPa (B)	4 MPa	< 0,1 mm
	Multibond – 5712	20-30 MPa	-	-	0,05-0,2 mm
	Multibond – 5722	18-26 MPa	18-25 MPa	3,5-5 MPa	0,05-0,2 mm
	Multibond – 5822	-	< 22 MPa (A) < 20 MPa (B)	2 MPa	< 0,15 mm
	Multibond – 5721	15-25 MPa	18-25 MPa	3,5-5 MPa	0,05-0,2 mm
	Multibond – 5824	-	< 30 MPa (A) < 27 MPa (B)	> 4 MPa	0,1-0,5 mm max. 4,5 mm
	Multibond – 5823	-	< 24 MPa (A) < 22 MPa (B)	> 2 MPa	0,1-0,2 mm max. 4 mm
Epoksydowy	Henkel Pattex Epoxy	-	24 MPa	-	-
	Technicql Standardowy	-	10,5 MPa	-	-

A – Ściananie z rozciąganiem, stal / stal. B – Ściananie z rozciąganiem, aluminium / aluminium.

Analizę klejów przeprowadzono w oparciu o następujące kryteria: wytrzymałość, zdolność do łączenia płyt drewnopochodnych, tworzyw sztucznych oraz metali, sposób aplikacji i czas wiązania kleju.

Z punktu widzenia wytrzymałości oraz sposobu aplikacji za najkorzystniejszy uznano klej metakrylowy Multibond – 5711. Klej наносzony jest na jeden z klejonych elementów, natomiast na drugi element aplikowany jest aktywator Multibond – 71. Po połączeniu obu elementów następuje polimeryzacja i wiązanie kleju. Takie rozwiązanie pozwala na swobodne dozowanie produktu bez obawy o jego przedwczesne utwardzenie. Pomimo wielu zalet, tj. możliwości zastosowania w przemyśle meblarskim, bardzo dobrej wydajności oraz stosunkowo niewielkiej ceny produkt ten nie mógł być wykorzystany w badaniach połączeń klejonych, gdyż został wycofany ze sprzedaży.

Kolejną grupę klejów, która ze względu na odpowiednią wytrzymałość zasługuje na uznanie, stanowią kleje cyjanoakrylowe Multibond – 415, 421, 443. W przeciwieństwie do kleju Multibond – 5711 kleje cyjanoakrylowe mogą nastręczać wielu problemów na etapie aplikacji kleju. Niewielki czas wiązania spoiny może prowadzić do niewłaściwego zamocowania elementów bez możliwości wykonania korekty ich położenia. Z tego też względu nie zdecydowano się na wykorzystanie klejów cyjanoakrylowych w badaniach połączeń klejonych.

Kleje epoksydowe stanowią ostatnią z analizowanych grup. Na szczególną uwagę zasługuje klej epoksydowy Henkel Pattex Epoxy. Klej ten należy do grupy szybkowiązających klejów epoksydowych i może być stosowany zarówno wewnątrz, jak i na zewnątrz pomieszczeń. Charakteryzuje się odpornością na działanie wilgoci i oleju. Po utwardzeniu tworzy podatne na obróbkę mechaniczną bezbarwne spoiny, a także wykazuje podwyższoną odporność na uderzenia. Ponadto, charakteryzuje się odpowiednio wysoką wytrzymałością, którą producent szacuje na 24 MPa. Odpowiednio długi czas wiązania pozwala na precyzyjne łączenie elementów. Jego transparentność nie sprawia problemów w przypadku pojawienia się ewentualnych nadlewów. Klej ten umożliwia łączenie płyt drewnopochodnych, tworzyw sztucznych oraz metali. Za jego wadę należy uznać nieprecyzyjny dozownik w postaci zestawu strzykawek. Uniemożliwia on powtarzalne wyciskanie obu składników kleju, tj. kleju i utwardzacza, przez co w każdej próbce badawczej spoina może wykazywać nieznaczne rozbieżności wytrzymałości. Jest to jednak zagadnienie możliwe do rozwiązania na etapie wdrażania połączeń klejonych z wykorzystaniem kleju tego typu do produkcji. W związku ze znaczną liczbą zalet kleju Henkel Pattex Epoxy w połączeniu z dostępnością i niską ceną zdecydowano się na jego wykorzystanie w dalszej części pracy dotyczącej badań połączeń klejonych.

3.6. Podsumowanie

Zastosowane w połączeniu klejonym materiały charakteryzują się istotnie różnymi właściwościami wytrzymałościowymi. Stal ma ok. 30-krotnie większy moduł Younga E oraz ok. 13-krotnie większą wytrzymałość na rozciąganie R_m .

4. BADANIA POŁĄCZEŃ KLEJONYCH

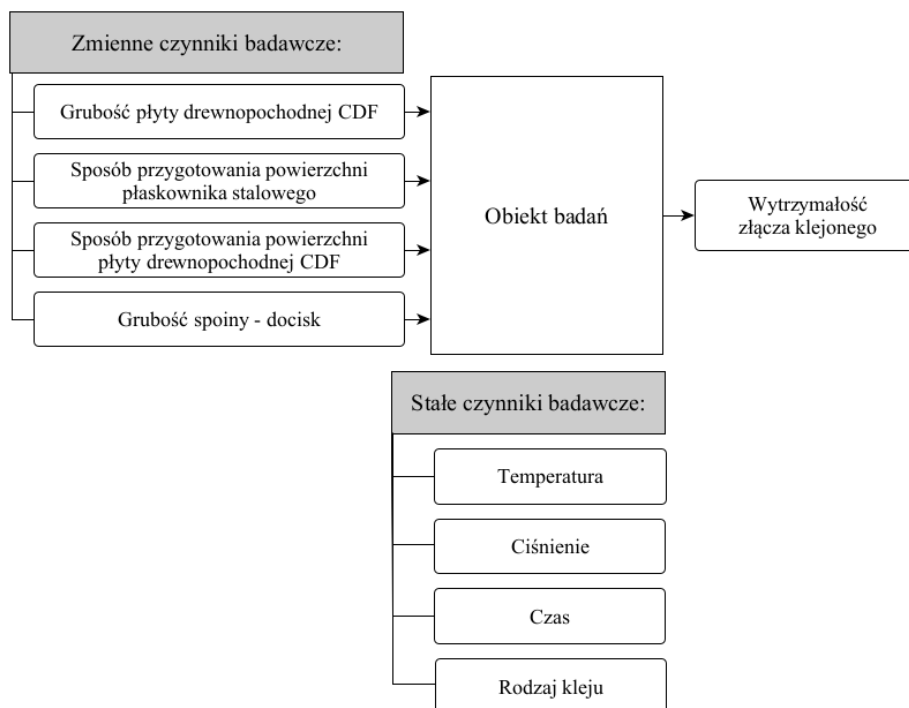
Jako obiekt badań przyjęto proces przygotowywania złącza klejonego stosowanego w połączeniach elementów o różnych właściwościach mechanicznych, tj. płyty drewnopochodnej CDF oraz stalowego elementu pośredniczącego, zmierzający do uzyskania maksymalnej wytrzymałości złącza.

Jako czynniki wejściowe przyjęto (Rys. 4.1):

- grubość płyty drewnopochodnej CDF,
- sposób przygotowania powierzchni płaskownika stalowego związany przede wszystkim z występowaniem powłoki galwanicznej zwiększającej estetykę okucia meblowego,
- sposób przygotowania powierzchni płyty drewnopochodnej CDF,
- grubość spoiny związana z dociskiem łączonych powierzchni.

Jako czynnik wyjściowy przyjęto wytrzymałość złącza klejonego uzyskaną w próbie ścinania próbek dwuzakładkowych.

W trakcie badań za stałe czynniki przyjęto: monitorowaną w trakcie przygotowywania i prób temperaturę i wilgotność otoczenia, czas od przygotowania próbek do przeprowadzenia badania oraz ciśnienie atmosferyczne.



Rys. 4.1. Proces przygotowywania złącza klejonego jako obiekt badań

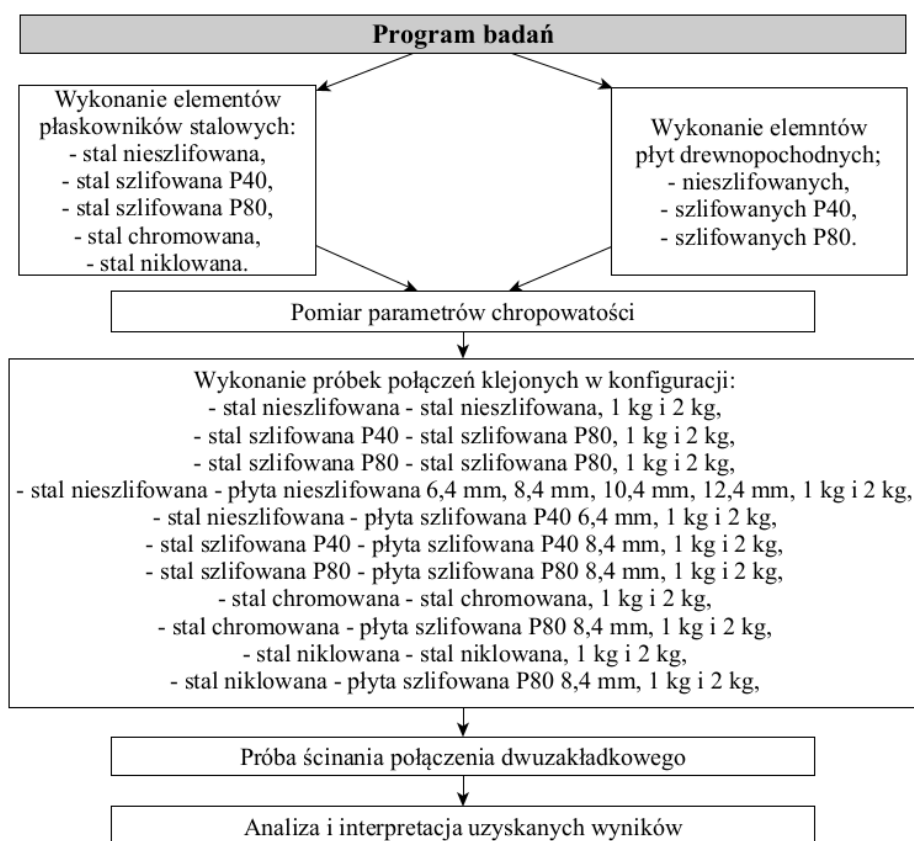
4.1. Program badań

Przygotowany program (Rys. 4.2) umożliwia uzyskanie odpowiedzi na następujące pytania dotyczące wpływu wybranych czynników na wytrzymałość:

1. W jaki sposób połączenie elementów o różnych właściwościach mechanicznych, tj. płyty drewnopochodnej CDF oraz stalowego elementu pośredniczącego wpływa na wytrzymałość złącza?
2. Jaki jest wpływ metody przygotowania powierzchni łączonych elementów?
3. W jaki sposób docisk łączonych elementów wpływa na wytrzymałość złącza?
4. W jaki sposób powłoka galwaniczna wpływa na wytrzymałość złącza?

Zaplanowano realizację badań połączeń klejonych w oparciu o 5 sposobów przygotowania płaskowników stalowych oraz 3 sposoby przygotowania elementów płyt drewnopochodnych. W sumie uzyskano 11 wariantów przygotowania elementów połączeń, dla których przyjęto 2 przypadki docisku.

Znalezienie odpowiedzi na postawione powyżej pytania umożliwia analiza statystyczna wyników badań ścinania odpowiednio przygotowanych próbek.



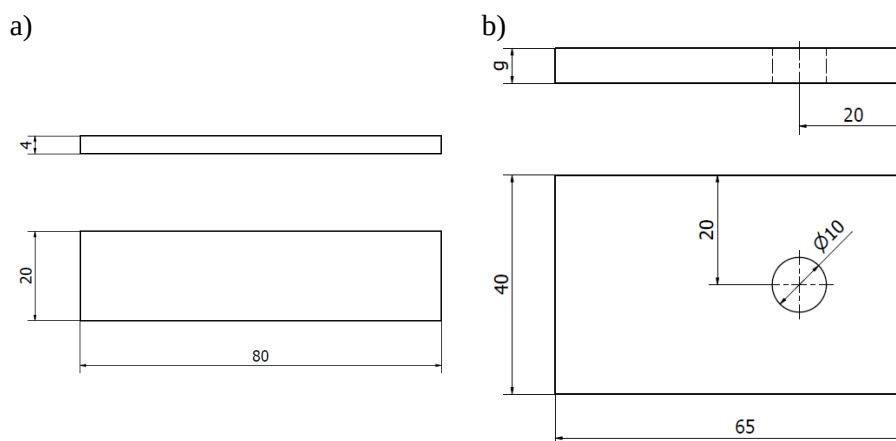
Rys. 4.2. Program badań połączeń klejonych

4.2. Próbkki do badań

Obiekt badań stanowiły klejone próbki z połączeniem klejonym dwuzakładkowym przeznaczone do badań w warunkach ścinania spoiny uzyskanej w wyniku sklejenia trzech elementów o wymiarach pokazanych na Rys. 4.3 za pomocą kleju epoksydowego Henkel Pattex Epoxy. Każda próbka posiadała jeden płaskownik stalowy o wymiarach 80 x 20 x 4 mm stanowiący centralną część próbki oraz dwa elementy o wymiarach 65 x 40 mm stanowiące zakładki wykonane ze stali lub płyty CDF o jednakowej grubości wynoszącej 6,4 mm, 8,4 mm, 10,4 mm lub 12,4 mm. Poszczególne elementów połączone były spoiną klejową o wymiarach 20 x 5 mm.



Rys. 4.3. Przykładowa próbka z połączeniem klejonym dwuzakładkowym – stal-stal



Rys. 4.4. Wymiary elementów składowych próbek dwuzakładkowych: a) płaskownik stalowy, b) płyta drewnopochodna lub płaskownik stalowy

4.3. Przygotowanie próbek

Elementy stalowe próbek wycięto z płaskownika ze stali S235, którego powierzchnię poddano obróbce mechanicznej w celu wyrównania powierzchni.

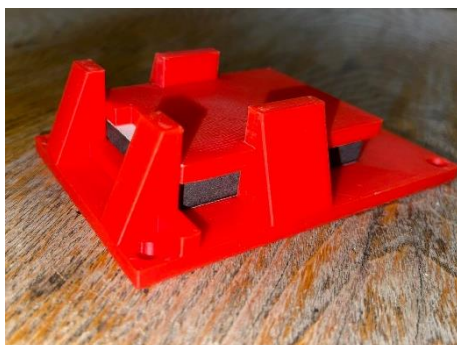
Elementy płyt drewnopochodnych zostały wycięte z arkuszy przy pomocy pilarki stołowej. W tym celu wykorzystano tarczę o średnicy 185 mm wyposażoną w 60 zębów powleczonych węglkami spiekanymi. Właściwie dobrana tarcza pozwoliła na wykonanie dokładnych i ostrych cięć materiału bez poszarpanych krawędzi.

Otworki przelotowe o średnicy 10 mm niezależnie od użytego materiału (płyta drewnopochodna, płaskownik stalowy) wykonano na wiertarce stołowej. Dla zachowania powtarzalności obróbki posłużono się odpowiednim szablonem.

Materiał badawczy w postaci elementów płyt drewnopochodnych oraz płaskowników stalowych podzielono na dwie grupy. Pierwszą z nich stanowiły elementy płyt drewnopochodnych oraz płaskowników stalowych, których powierzchnie klejone nie zostały zmatowione przy pomocy papieru ściernego, a jedynie odtłuszczone za pomocą izopropanolu (propan-2-ol) o czystości 99%. W grupie drugiej elementy płyt drewnopochodnych oraz płaskowników stalowych przed procesem klejenia poddano wstępnemu przygotowaniu, które polegało na ręcznym zmatowaniu powierzchni laminatu płyty drewnopochodnej oraz płaskownika stalowego za pomocą papieru ściernego o gradacji P40 i P80. Procedura polegała na pięciokrotnym (płyta drewnopochodna) oraz dwudziestokrotnym (płaskownik stalowy) przetarciu w obu kierunkach docelowego miejsca papierem ściernym. W następnej kolejności dokonywano odtłuszczenia przygotowanych powierzchni przy pomocy izopropanolu o czystości 99%.

W celu powtarzalności przygotowania połączeń klejonych próbek wykonano dwa przyrządy: do aplikacji kleju (Rys. 4.5a) oraz do pozycjonowania elementów połączenia w trakcie klejenia (Rys. 4.5b).

a)



b)



Rys. 4.5. Przyrządy do przygotowywania połączeń klejonych: a) do nanoszenia kleju, b) do pozycjonowania elementów połączenia

Pierwszy z przyrządów składał się z podstawy, na której umieszczano element płyty drewnopochodnej lub płaskownik stalowy. Na umieszczonym elemencie przeznaczonym do klejenia opierano górną część aplikatora kleju w ściśle wyznaczonym miejscu. Miejsce wycięcia w szablonie stanowiło powierzchnię aplikacji kleju. Płyta górna posiadała możliwość podnoszenia i opuszczania, przez co mogła być dociskana do klejonej powierzchni bez względu na jego grubość. Procedura aplikacji kleju obejmowała unieruchomienie elementu płyty drewnopochodnej lub płaskownika stalowego pomiędzy podstawą i szablonem przyrządu. W miejscu wyznaczonym przez przyrząd przy pomocy dokonywano aplikacji kleju. Klej uprzednio wyciśnięto z podwójnej strzykawką i dokładnie wymieszano.

Drugi przyrząd służył do składania elementów płyt drewnopochodnych i elementów płaskowników stalowych w celu sklejenia. Przyrząd posiadał podstawę, w której osadzano odpowiednie podkładki, na których w miejscach wyznaczonych przez wsporniki umieszczano element płyty drewnopochodnej z zaaplikowanym klejem. Następnie w ściśle wyznaczonym przez przyrząd miejscu umieszczano płaskownik stalowy, który w miejscu klejenia opierał się na płycie drewnopochodnej, natomiast po przeciwnej stronie na elemencie dystansowym o grubości płyty drewnopochodnej. Na płaskowniku stalowym umieszczano drugi element płyty drewnopochodnej, który opierał się na płaskowniku stalowym oraz na elemencie dystansowym o grubości równej grubości płaskownika. W celu uzyskania trwałego połączenia, na łączonych elementach umieszczano odważnik o średniej masie 1002,93 g lub 2004,73 g, który pozwalał na zapewnienie stałej siły docisku. Obciążenie rozkładało się na powierzchnię klejoną wynoszącą 100 mm² oraz podporę o powierzchni 600 mm², co w przeliczeniu na powierzchnię samej spoiny klejowej dało nacisk wynoszący odpowiednio 143,28 g / 100 mm² i 286,39 g / 100 mm². Dla zapewnienia pełnego utwardzenia kleju przed badaniem próbki sezonowano zgodnie z zaleceniami producenta przez okres minimum 24 godzin w temperaturze 20 ±3°C i wilgotności 30 ±10% do czasu związania spoiny. Przyjęto, że o tym czasie złącze uzyskuje pełną wytrzymałość i mogło zostać poddane badaniu wytrzymałościowemu.

4.3.1. Chropowatość powierzchni łączonych elementów

Wybrane elementy nieszlifowane i szlifowane próbek, tj. płaskowniki stalowe, płaskowniki chromowane lub niklowane oraz płyty drewnopochodne przed procesem klejenia poddano pomiarowi chropowatości powierzchni na urządzeniu Mahr MarSurf GD 120 (Rys. 4.6). Pomiaru dokonano zgodnie z normą PN-EN ISO 21920-3:2022-06 [95] przyjmując odcinek pomiarowy $l_n = 0,4$ mm dla płaskownika stalowego lub 1,25 mm dla płyty drewnopochodnej CDF wyznaczając 5 parametrów chropowatości (R_a , R_q , R_z , R_t oraz R_p), z których analizie poddano wartości średniego arytmetycznego odchylenia profilu od linii średniej R_a oraz wysokości chropowatości według dziesięciu punktów profilu R_z .



Rys. 4.6. Stanowisko do pomiaru parametrów chropowatości Mahr MarSurf GD 120

Wyniki pomiarów chropowatości powierzchni próbek stalowych i wykonanych z płyt CDF zamieszczono w Tabela 4.1 i Tabela 4.2. Dla każdego z wariantów powierzchni wykonano po trzy pomiary poprzeczne i trzy pomiary wzdłużne dla min. 5 próbek wyznaczając wartości średnie parametrów.

Tabela 4.1. Średnie wartości parametrów chropowatości powierzchni płaskowników stalowych

Parametr chropowatości	Próbki stalowe nieszlifowane			Szlifowane	
	bez powłoki	chromowana	niklowana	P40	P80
Pomiar poprzeczny					
R_a , μm	0,10	0,02	0,03	1,21	0,83
R_z , μm	0,81	0,17	0,25	8,34	6,35
Pomiar wzdłużny					
R_a , μm	0,20	0,05	0,13	1,43	0,91
R_z , μm	1,68	0,29	0,69	10,51	7,29

Tabela 4.2. Średnie wartości parametrów chropowatości powierzchni płyt drewnopochodnych CDF

Parametr chropowatości	Nieszlifowane				Szlifowane P40		P80
	6,4 mm	8,4 mm	10,4 mm	12,4 mm	6,4 mm	8,4 mm	8,4 mm
Pomiar poprzeczny							
R_a , μm	6,92	6,67	7,75	7,37	3,66	4,20	2,44
R_z , μm	31,52	31,91	35,79	34,97	24,76	29,32	18,79
Pomiar wzdłużny							
R_a , μm	6,89	7,10	8,65	8,22	5,96	5,29	5,34
R_z , μm	30,21	34,60	40,59	38,57	42,37	37,37	36,09

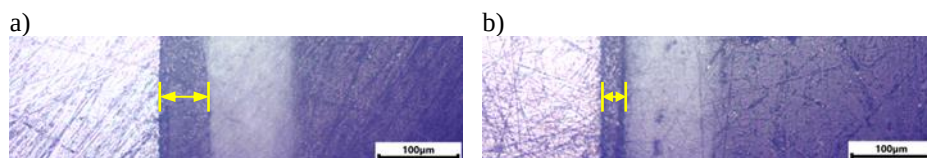
Na podstawie powyższego zestawienia można stwierdzić, że w przypadku płaskownika stalowego nałożenie warstwy galwanicznej przynosi podobny efekt, zarówno w przypadku chromowania jak i niklowania, tzn. 4-5 – krotne zmniejszenie chropowatości powierzchni. W przypadku szlifowania papierem ściernym zauważyć można odwrotny efekt, tzn. kilku-kilkunastokrotne zwiększenie chropowatości, przy czym wzrost chropowatości jest mniejszy w przypadku zastosowania drobniejszego papieru ściernego P80 w porównaniu z papierem P40. W przypadku płyt CDF szlifowanie powierzchni przynosi odwrotny efekt, tzn. szlifowanie zarówno papierem ściernym P40, jak i P80 wygładza powierzchnię w porównaniu do wyjściowej powierzchni płyty.

4.3.2. Grubość spoiny klejonej

W celu ustalenia zależności grubości spoiny połączenia od obciążenia w trakcie klejenia wykonano z pomocą mikroskopu Delta Optical FMA 050 (Rys. 4.7) wyposażonego w kamerę DLTA14000CMOSAPU3 fotografie przekrojów próbek nieszlifowany płaskownik stalowy – nieszlifowana płyta CDF (Rys. 4.8) obciążonych odważnikami o masie 1 kg lub 2 kg. W przypadku próbek obciążonych odważnikami o masie 1 kg średnia zmierzona grubość spoiny wyniosła 0,05 mm, natomiast w przypadku próbek obciążanych masą 2 kg 0,03 mm.



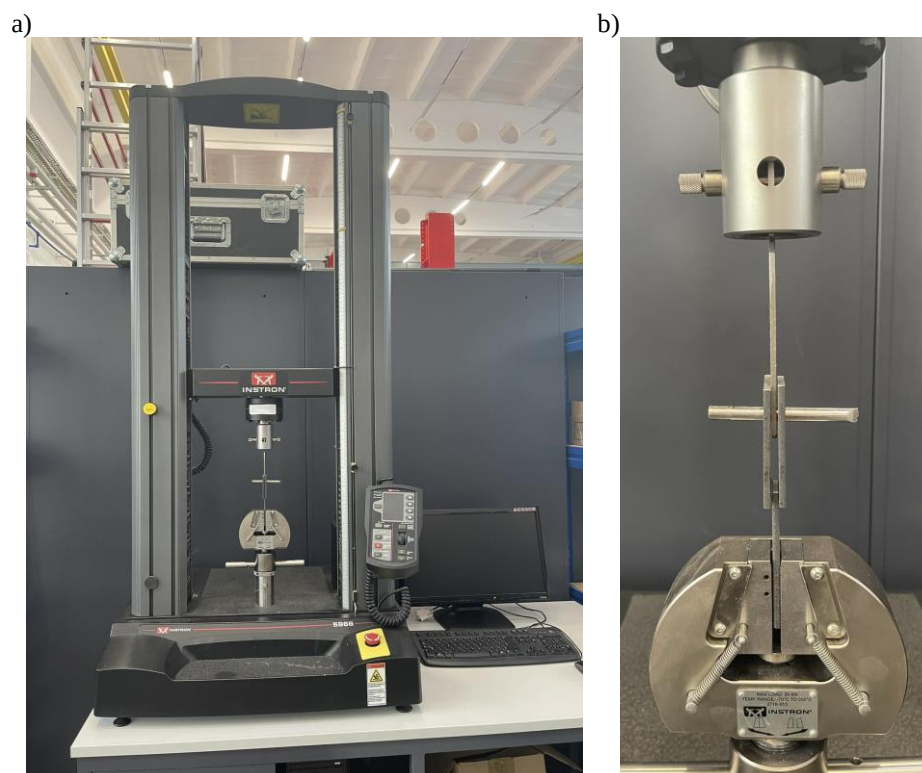
Rys. 4.7. Mikroskop Delta Optica FMA 050 z kamerą DLTA14000CMOSAPU3



Rys. 4.8. Zdjęcie mikroskopowe połączenia klejonego nieszlifowanego płaskownika stalowego z nieszlifowaną płytą drewnopochodną, które obciążono w trakcie klejenia odważnikami o masie: a) 1 kg, b) 2 kg

4.4. Stanowisko i przebieg prób ścinania próbek klejonych

Badania wytrzymałości na ścinanie połączeń klejonych zostały przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 5966 (Rys. 4.9a).



Rys. 4.9. Maszyna wytrzymałościowa INSTRON 5966 (a) oraz próbka zamocowana w jej uchwytach

Maszyna INSTRON 5966 jest zbudowana z ramy, do której nieruchomo mocowana jest dolna szczęka. Przesunięcie ruchomego górnego uchwytu maszyny wywiera obciążenie próbki. Maszyna sterowana jest za pomocą komputera wyposażonego w oprogramowanie sterujące Bluehill 2 umożliwiające rejestrację czasu, przemieszczenia i obciążenia próbki.

Próbki dwuzakładowe połączeń klejonych mocowano osiowo za pomocą sworznia w elemencie dodatkowym o grubości odpowiadającej płaskownikowi zamocowanym w górnym uchwycie maszyny wytrzymałościowej oraz szczęce uchwytu dolnego mocującej płaskownik (Rys. 4.9b). Zamocowane w ten sposób próbki poddawano jednostajnie narastającemu obciążeniu z prędkością przesuwu tłoka maszyny wytrzymałościowej wynoszącą 0,05 mm/s aż do momentu zerwania próbki. Badania realizowano w temperaturze 23 ± 3 °C i wilgotności powietrza wynoszącej $45 \pm 5\%$.

4.5. Wyniki badań

Wyniki badań przedstawiają wartości maksymalnej siły niszczącej F_{sr} zarejestrowane w trakcie poszczególnych prób. Na budżet niepewności poszczególnych pomiarów złożyła się niepewność typu A (3.1) wynikająca ze statystycznego rozrzutu wyników oraz niepewność typu B (3.2) wynikająca z użytego siłomierza maszyny wytrzymałościowej, której wartość określono w opisie poprzednich badań. Niepewność całkowitą określono na podstawie zależności (3.3). Dla wyznaczenia niepewności rozszerzonej przyjęto, podobnie jak uprzednio, współczynnik rozszerzenia $k = 2$.

Tabela 4.3 zawiera wyniki badań dla połączeń klejonych stal-stal, dla których powierzchnie nie były szlifowane (wariant N/N), były szlifowane papierem P40 (wariant P40/P40) lub P80 (wariant P80/P80).

Tabela 4.3. Wartości siły zrywającej F dla próbek połączeń klejonych stal-stal (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Wariant stal/stal	Obc.	F_1	F_2	F_3	F_{sr}	$u_{F(A)}$	$u_{F(B)}$	$u_{F(C)}$	$F \pm U_F$
		N							
N/N	1 kg	2248,4	3045,6	1417,0	2237,0	470,2	28,9	471,1	2237,0±942,1
N/N	2 kg	1911,2	2052,6	2343,6	2102,5	127,3		130,5	2102,5±261,0
P40/P40	1 kg	2794,8	2035,4	2491,9	2440,7	220,7		222,6	2440,7±445,2
P40/P40	2 kg	2098,2	2149,0	2176,0	2141,1	22,8		36,8	2141,1±73,6
P80/P80	1 kg	2689,7	2321,5	1710,8	2240,7	285,5		286,9	2240,7±573,8
P80/P80	2 kg	1979,0	1928,7	2261,2	2056,3	103,5		107,4	2056,3±214,9

Najwyższą wartością siły zrywającej F_{sr} charakteryzowały się próbki szlifowane papierem ściernym o ziarnistości P40, a więc o najwyższej chropowatości powierzchni (Tabela 4.1). Wyższą siłą zrywającą charakteryzowały się w każdym przypadku próbki o mniejszej sile docisku (obciążone odważnikiem o masie 1 kg). Wpływ wyższej wartości siły docisku (odważnik o masie 2 kg) zauważyć można w uzyskanych rozrzutach wyników dla poszczególnych prób. Wyższy docisk w każdym z przypadków wpłynął na wyższą powtarzalność badań (mniejsza niepewność typu A).

Szczegółową analizę wyników przeprowadzoną metodami statystycznymi zamieszczono w kolejnym rozdziale.

Tabela 4.4 zawiera wyniki badań dla połączeń klejonych stal-stal, dla których powierzchnie płaskowników poddane były niklowaniu (wariant Ni/Ni). Tabela 4.5 dotyczy tego samego wariantu połączenia płaskownika niklowanego oraz płyty o grubości 8,4 mm szlifowanej P80 (wariant Ni/P80-8).

Tabela 4.6 zawiera wyniki badań dla połączeń klejonych stal-stal, dla których powierzchnie płaskowników poddane były chromowaniu (wariant Ch/Ch). Tabela 4.7 dotyczy tego samego wariantu połączenia płaskownika chromowanego oraz płyty szlifowanej o grubości 8,4 mm (wariant Ch/P80-8).

Tabela 4.4. Wartości siły zrywającej F dla próbek połączeń klejonych stal niklowana – stal niklowana (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Wariant stal/stal	Obc.	F ₁	F ₂	F ₃	F _{śr}	u _{F(A)}	u _{F(B)}	u _{F(C)}	F ± U _F
		N							
Ni/Ni	1 kg	2873,6	3091,4	3326,1	3097,0	130,7	28,9	133,8	3097,0±267,6
Ni/Ni	2 kg	1793,1	2786,8	2077,3	2219,1	295,5		296,9	2219,1±593,8

Tabela 4.5. Wartości siły zrywającej F dla próbek połączeń klejonych stal niklowana – płyta drewnopochodna o grubości 8,4 mm szlifowana P80 (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Wariant stal/płyta	Obc.	F ₁	F ₂	F ₃	F _{śr}	u _{F(A)}	u _{F(B)}	u _{F(C)}	F ± U _F
		N							
Ni/P80-8,4	1 kg	2598,6	1917,7	2175,3	2230,5	198,5	28,9	200,6	2230,5±401,2
Ni/P80-8,4	2 kg	2726,2	2894,6	2814,2	2811,7	48,6		56,6	2811,7±113,1

Tabela 4.6. Wartości siły zrywającej F dla próbek połączeń klejonych stal chromowana – stal chromowana (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Wariant stal/stal	Obc.	F ₁	F ₂	F ₃	F _{śr}	u _{F(A)}	u _{F(B)}	u _{F(C)}	F ± U _F
		N							
Ch/Ch	1 kg	2715,90	2830,40	2333,90	2626,7	150,1	28,9	152,9	2626,7±305,7
Ch/Ch	2 kg	1554,30	2751,7	2696,8	2334,3	390,3		391,4	2334,3±782,7

Tabela 4.7. Wartości siły zrywającej F dla próbek połączeń klejonych stal chromowana – płyta drewnopochodna o grubości 8,4 mm szlifowana P80 (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Wariant stal/płyta	Obc.	F ₁	F ₂	F ₃	F _{śr}	u _{F(A)}	u _{F(B)}	u _{F(C)}	F ± U _F
		N							
Ch/P80-8,4	1 kg	2365,8	2132,8	2095,6	2198,1	84,6	28,9	89,3	2198,1±178,7
Ch/P80-8,4	2 kg	2401,2	2089,8	1951,3	2147,4	133,0		136,1	2147,4±272,3

Wyniki uzyskane dla połączenia klejonego stal – płyta CDF, oba elementy w stanie nieszlifowanym, o różnej grubości zamieszczono w kolejnych tabelach: grubość 6,4 mm (Tabela 4.8), grubość 8,4 mm (Tabela 4.9), grubość 10,4 mm (Tabela 4.10), grubość 12,4 mm (Tabela 4.11).

Tabela 4.8. Wartości siły zrywającej F dla próbek połączeń klejonych stal nieszlifowana – płyta drewnopochodna nieszlifowana o grubości 6,4 mm (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Wariant stal/płyta	Obc.	F ₁	F ₂	F ₃	F _{śr}	u _{F(A)}	u _{F(B)}	u _{F(C)}	F ± U _F
		N							
N/N-6,4	1 kg	1019,8	1364,1	534,2	972,7	240,7	28,9	242,5	972,7±484,9
N/N-6,4	2 kg	2361,6	2035,1	1680,0	2025,6	196,8		198,9	2025,6±397,8

Tabela 4.9. Wartości siły zrywającej F dla próbek połączeń klejonych stal nieszlifowana – płyta drewnopochodna nieszlifowana o grubości 8,4 mm (wsp. rozszerzenia k = 2)

Wariant stal/płyta	Obc.	F ₁	F ₂	F ₃	F _{sr}	u _{F(A)}	u _{F(B)}	u _{F(C)}	F ± U _F
		N							
N/N-8,4	1 kg	2058,5	2158,0	1916,0	2044,2	70,2	28,9	75,9	2044,2±151,9
N/N-8,4	2 kg	1722,8	973,3	1882,1	1526,1	280,2		281,7	1526,1±563,3

Tabela 4.10. Wartości siły zrywającej F dla próbek połączeń klejonych stal nieszlifowana – płyta drewnopochodna nieszlifowana o grubości 10,4 mm (wsp. rozszerzenia k = 2)

Wariant stal/płyta	Obc.	F ₁	F ₂	F ₃	F _{sr}	u _{F(A)}	u _{F(B)}	u _{F(C)}	F ± U _F
		N							
N/N-10,4	1 kg	1166,2	772,9	1281,5	1073,5	154,0	28,9	156,6	1073,5±313,3
N/N-10,4	2 kg	2055,5	1673,1	1586,9	1771,8	144,0		146,9	1771,8±293,7

Tabela 4.11. Wartości siły zrywającej F dla próbek połączeń klejonych stal nieszlifowana – płyta drewnopochodna nieszlifowana o grubości 12,4 mm (wsp. rozszerzenia k = 2)

Wariant stal/płyta	Obc.	F ₁	F ₂	F ₃	F _{sr}	u _{F(A)}	u _{F(B)}	u _{F(C)}	F ± U _F
		N							
N/N-12,4	1 kg	1538,0	1147,5	1460,6	1382,0	119,4	28,9	122,8	1382,0±245,6
N/N-12,4	2 kg	1309,4	982,5	966,7	1086,2	111,7		115,4	1086,2±230,7

Wyniki badań próbek połączeń klejonych wykonanych w wariancie stal nieszlifowana – płyta drewnopochodna o grubości 6,4 mm szlifowana papierem P40 zamieszczono w Tabela 4.12.

Tabela 4.12. Wartości siły zrywającej F dla próbek połączeń klejonych stal nieszlifowana – płyta drewnopochodna szlifowana o grubości 6,4 mm (wsp. rozszerzenia k = 2)

Wariant stal/płyta	Obc.	F ₁	F ₂	F ₃	F _{sr}	u _{F(A)}	u _{F(B)}	u _{F(C)}	F ± U _F
		N							
N/P40-6,4	1 kg	2912,4	1736,9	1341,4	1996,9	471,8	28,9	472,7	1996,9±945,3
N/P40-6,4	2 kg	2336,1	1430,7	2374,4	2047,1	308,4		309,7	2047,1±619,5

Dwa warianty szlifowania płaskownika w połączeniu ze szlifowaną płytą CDF o grubości 8,4 mm zamieszczono w Tabela 4.13 (oba elementy szlifowane papierem P40) oraz Tabela 4.14 (oba elementy szlifowane papierem P80).

Przykładowe postaci zniszczeń próbek przedstawiono na Rys. 4.10. Zerwaniu większości próbek towarzyszyła obecność uszkodzeń kohezyjnych bądź mieszanych, adhezyjno-kohezyjnych. W przypadku połączeń klejonych płaskowników niklowanych bądź chromowanych ze szlifowaną płytą drewnopochodną, gdzie siły spójności kleju były wyższe od sił spójności płyty drewnopochodnej obserwowano częściowe wyrwanie laminatu z fragmentem

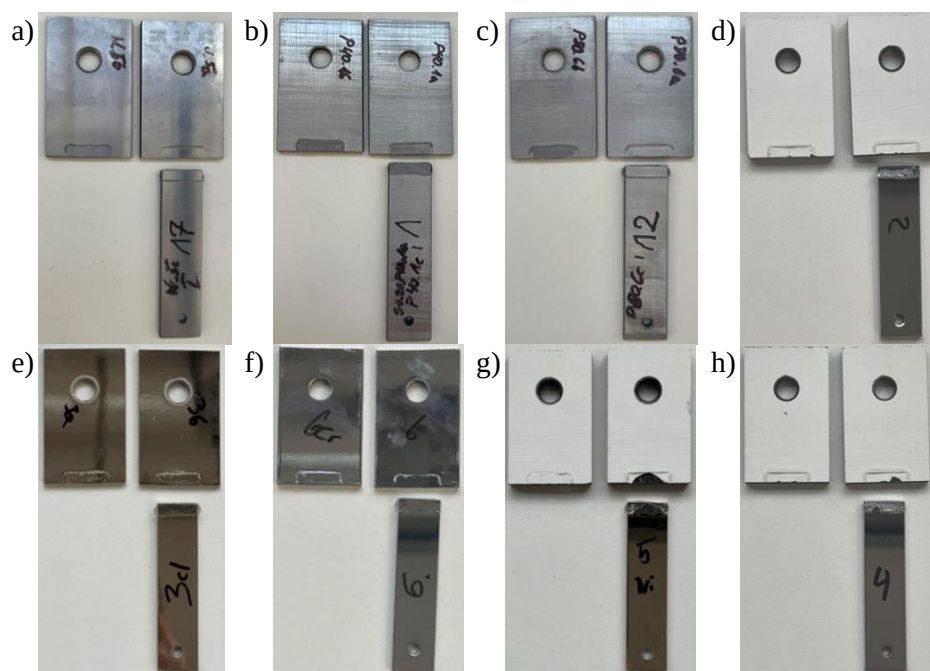
trzonu płyty. Tylko w przypadku próbek z nieszlifowanej stali i nieszlifowanej płyty obserwowano typowe uszkodzenia adhezyjne. W tych przypadkach obserwowano oderwanie się warstwy kleju od laminatu płyty drewnopochodnej.

Tabela 4.13. Wartości siły zrywającej F dla próbek połączeń klejonych stal – płyta drewnopochodna o grubości 8,4 mm (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

Wariant stal/płyta	Obc.	F_1	F_2	F_3	F_{sr}	$u_{F(A)}$	$u_{F(B)}$	$u_{F(C)}$	$F \pm U_F$
		N							
P40/P40	1 kg	2368,1	2094,0	1970,0	2144,0	117,6	28,9	121,1	2144,0±242,2
P40/P40	2 kg	2307,6	2520,8	2364,2	2397,5	63,8		70,0	2397,5±140,0

Tabela 4.14. Wartości siły zrywającej F dla próbek połączeń klejonych stal – płyta drewnopochodna o grubości 8,4 mm (wsp. rozszerzenia $k = 2$)

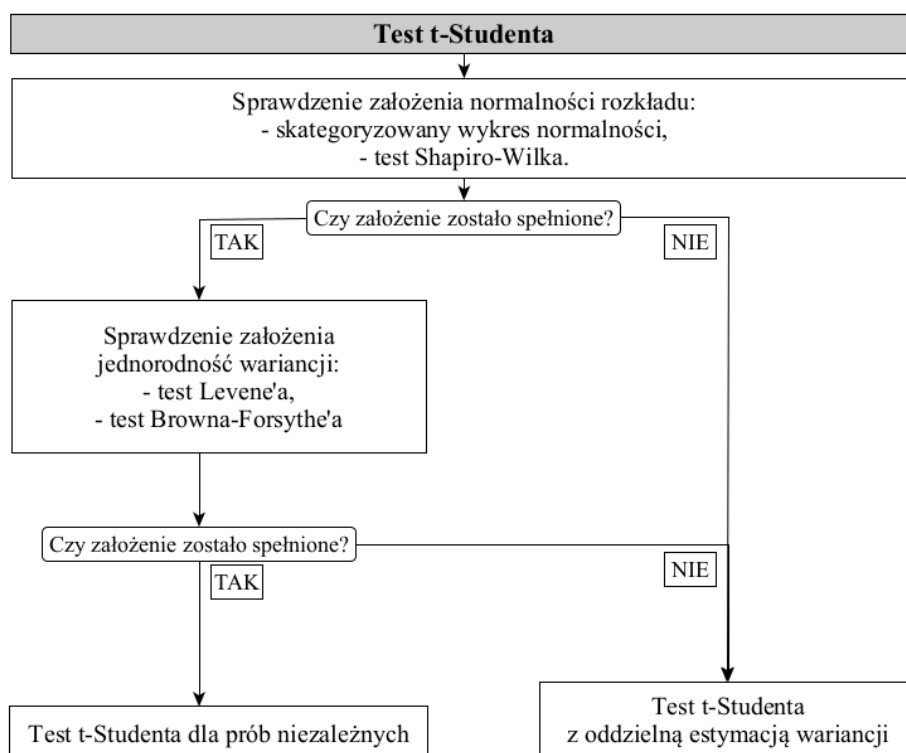
Wariant stal/płyta	Obc.	F_1	F_2	F_3	F_{sr}	$u_{F(A)}$	$u_{F(B)}$	$u_{F(C)}$	$F \pm U_F$
		N							
P80/P80	1 kg	2471,0	2734,0	2980,1	2728,4	147,0	28,9	149,8	2728,4±299,6
P80/P80	2 kg	2995,0	2282,7	2965,2	2747,6	232,6		234,4	2747,6±468,8



Rys. 4.10. Przykładowe postaci zniszczeń próbek po zerwaniu: a) stal nieszlifowana – stal nieszlifowana, b) stal szlifowana P40 – stal szlifowana P40, c) stal szlifowana P80 – stal szlifowana P80, d) stal nieszlifowana – płyta szlifowana P80, e) stal niklowana – stal niklowana, f) stal chromowana – stal chromowana, g) stal niklowana – płyta szlifowana P80, h) stal chromowana – płyta szlifowana P80

4.6. Analiza wyników badań

Analiza wyników badań miała na celu znalezienie odpowiedzi na pytania postawione w programie badań. Wykonano ją w oparciu o test t dla dwóch prób niezależnych względem zmiennych z wykorzystaniem oprogramowania analitycznego STATISTICA [85] zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 4.11 opracowanym na podstawie [86].



Rys. 4.11. Schemat postępowania dla analizy testem t-Studenta

Testy t-Studenta wykorzystywane są w celu weryfikacji hipotez, w których wartość oczekiwana populacji jest identyczna jak pewna wartość hipotetyczna lub dwie populacje posiadają taką samą wartość oczekiwaną. W przypadku analizy wyników badań w niniejszej pracy posłużono się testem t-Studenta porównującym wartości dla dwóch zbiorów danych.

Pierwszym krokiem analizy było sprawdzenie założeń testu t-Studenta dotyczącego normalności rozkładu za pomocą testu Shapiro-Wilka oraz sprawdzenie założenia o jednorodności wariancji za pomocą testu Levene'a oraz testu Browna-Forsythe'a. Spełnienie założeń umożliwiło przeprowadzenie testu t-Studenta dla prób niezależnych. W przypadku ich niespełnienia przeprowadzano test t-Studenta z oddzielną estymacją wariancji.

4.6.1. Wpływ grubości płyty drewnopochodnej CDF

Różnicę w uzyskanych nośnościach połączeń wynikającą z różnicy grubości łączonych płyt CDF przeanalizowano porównując wybrane wyniki badań połączeń o takim samym docisku w trakcie klejenia oraz wariancie przygotowania powierzchni.

4.6.1.1. Połączenie stali i płyt o różnej grubości

Wyniki testu Shapiro-Wilka (Tabela 4.15) oraz testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a (Tabela 4.16) wskazują na spełnienie założeń testu t-Studenta dotyczącego normalności rozkładu oraz jednorodności wariancji.

Wyniki testu dla zmiennych niezależnych (Tabela 4.17) wskazują, że ze statystycznego punktu widzenia występują różnice pomiędzy wartościami siły zrywającej F (Tabela 4.8÷Tabela 4.11) próbek z połączeniem stal nieszlifowana – płyta nieszlifowana dla różnych grubości dla obciążenia 1 kg oraz 2 kg.

Dla docisku 1 kg w przypadku płyty o grubości 8,4 mm uzyskane połączenie klejone wykazuje istotnie wyższą siłę zrywającą w porównaniu do pozostałych grubości płyt ($p\text{-value} < \alpha = 0,05$).

Dla docisku 2 kg w przypadku płyty o grubości 12,4 mm uzyskane połączenie klejone wykazuje istotnie niższą siłę zrywającą w porównaniu do pozostałych grubości płyt ($p\text{-value} < \alpha = 0,05$).

Tabela 4.15. Wyniki testu Shapiro-Wilka dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal nieszlifowana – płyta nieszlifowana o różnej grubości ($\alpha = 0,05$)

Wariant połączenia	W	p-value
stal (N) – płyta 6,4 mm (N), 1 kg	0,9904	0,8129
stal (N) – płyta 8,4 mm (N), 1 kg	0,9896	0,8048
stal (N) – płyta 10,4 mm (N), 1 kg	0,9094	0,4162
stal (N) – płyta 12,4 mm (N), 1 kg	0,8917	0,3596
stal (N) – płyta 6,4 mm (N), 2 kg	0,9994	0,9537
stal (N) – płyta 8,4 mm (N), 2 kg	0,8767	0,3149
stal (N) – płyta 10,4 mm (N), 2 kg	0,8825	0,3317
stal (N) – płyta 12,4 mm (N), 2 kg	0,7845	0,0780

4.6.1.2. Wnioski z analizy

Grubość płyty drewnopochodnej CDF w niewielkim stopniu wpływa na nośność połączenia. W większości przypadków dla obu wartości docisku przy klejeniu siły zrywające są porównywalne.

Tabela 4.16. Wyniki testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal nieszlifowana – płyta nieszlifowana o różnej grubości ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	Test			
	Levene'a		Browna-Forsythe'a	
	F	p-value	F	p-value
stal (N) – płyta (N), 1 kg: 6,4 mm – 8,4 mm	2,59	0,18	1,70	0,26
stal (N) – płyta (N), 1 kg: 6,4 mm – 10,4 mm	0,45	0,54	0,33	0,59
stal (N) – płyta (N), 1 kg: 6,4 mm – 12,4 mm	1,07	0,36	0,72	0,44
stal (N) – płyta (N), 1 kg: 8,4 mm – 10,4 mm	2,70	0,18	0,51	0,51
stal (N) – płyta (N), 1 kg: 8,4 mm – 12,4 mm	1,52	0,29	0,23	0,66
stal (N) – płyta (N), 1 kg: 10,4 mm – 12,4 mm	0,34	0,59	0,07	0,81
stal (N) – płyta (N), 2 kg: 6,4 mm – 8,4 mm	0,84	0,41	0,09	0,78
stal (N) – płyta (N), 2 kg: 6,4 mm – 10,4 mm	0,11	0,75	0,19	0,68
stal (N) – płyta (N), 2 kg: 6,4 mm – 12,4 mm	0,49	0,52	0,53	0,51
stal (N) – płyta (N), 2 kg: 8,4 mm – 10,4 mm	2,39	0,20	0,33	0,60
stal (N) – płyta (N), 2 kg: 8,4 mm – 12,4 mm	4,02	0,12	0,56	0,49
stal (N) – płyta (N), 2 kg: 10,4 mm – 12,4 mm	0,38	0,57	0,07	0,80

Tabela 4.17. Wyniki testu t-Studenta dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal nieszlifowana – płyta nieszlifowana o różnej grubości ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	t	p-value
stal (N) – płyta (N), 1 kg: 6,4 mm – 8,4 mm	4,27	0,01
stal (N) – płyta (N), 1 kg: 6,4 mm – 10,4 mm	0,35	0,74
stal (N) – płyta (N), 1 kg: 6,4 mm – 12,4 mm	1,52	0,20
stal (N) – płyta (N), 1 kg: 8,4 mm – 10,4 mm	5,74	0,00
stal (N) – płyta (N), 1 kg: 8,4 mm – 12,4 mm	4,78	0,01
stal (N) – płyta (N), 1 kg: 10,4 mm – 12,4 mm	1,58	0,19
stal (N) – płyta (N), 2 kg: 6,4 mm – 8,4 mm	1,46	0,22
stal (N) – płyta (N), 2 kg: 6,4 mm – 10,4 mm	1,04	0,36
stal (N) – płyta (N), 2 kg: 6,4 mm – 12,4 mm	4,15	0,01
stal (N) – płyta (N), 2 kg: 8,4 mm – 10,4 mm	0,78	0,48
stal (N) – płyta (N), 2 kg: 8,4 mm – 12,4 mm	1,46	0,22
stal (N) – płyta (N), 2 kg: 10,4 mm – 12,4 mm	3,76	0,02

4.6.2. Wpływ docisku łączonych elementów

Różnicę w uzyskanych nośnościach połączeń wynikającą z różnicy w docisku łączonych elementów w trakcie klejenia przeanalizowano porównując wybrane wyniki badań połączeń o takich samych elementach łączonych i wariantach przygotowania powierzchni.

4.6.2.1. Połączenie stali nieszlifowanej

Wyniki testu Shapiro-Wilka (Tabela 4.18) oraz testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a (Tabela 4.19) wskazują na spełnienie założeń testu t-Studenta dotyczącego normalności rozkładu oraz jednorodności wariancji.

Wyniki testu dla zmiennych niezależnych (Tabela 4.20) wskazują, że ze statystycznego punktu widzenia nie ma różnicy pomiędzy wartościami siły zrywającej F (Tabela 4.3) próbki z połączeniem stal nieszlifowana – stal nieszlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg.

Tabela 4.18. Wyniki testu Shapiro-Wilka dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal nieszlifowana – stal nieszlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant połączenia	W	p-value
stal (N) – stal (N), 1 kg	0,9999	0,9768
stal (N) – stal (N), 2 kg	0,9617	0,6236

Tabela 4.19. Wyniki testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal nieszlifowana – stal nieszlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	Test Levene'a		Test Browna-Forsythe'a	
	F	p-value	F	p-value
stal (N) – stal (N): 1 kg - 2 kg	1,99	0,23	1,97	0,23

Tabela 4.20. Wyniki testu t-Studenta dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal nieszlifowana – stal nieszlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	t	p-value
stal (N) – stal (N): 1 kg - 2 kg	0,28	0,80

4.6.2.2. Połączenie stali szlifowanej

Wyniki testu Shapiro-Wilka (Tabela 4.21) oraz testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a (Tabela 4.22) wskazują na spełnienie założeń testu t-Studenta dotyczącego normalności rozkładu oraz jednorodności wariancji.

Wyniki testu dla zmiennych niezależnych (Tabela 4.23) wskazują, że ze statystycznego punktu widzenia nie ma różnicy pomiędzy wartościami siły zrywającej F (Tabela 4.13, Tabela 4.14) próbki z połączeniem stal szlifowana – stal szlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg niezależnie od rodzaju użytego papieru ściernego.

4.6.2.3. Połączenie stali nieszlifowanej i płyty nieszlifowanej

Wyniki testu Shapiro-Wilka (Tabela 4.24) oraz testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a (Tabela 4.25) wskazują na spełnienie założeń testu t-Studenta dotyczącego normalności rozkładu oraz jednorodności wariancji.

Wyniki testu dla zmiennych niezależnych (Tabela 4.26) wskazują, że ze statystycznego punktu widzenia występują istotne różnice pomiędzy wartościami siły zrywającej F (Tabela 4.8÷Tabela 4.11) próbki z połączeniem stal nieszlifowana – stal nieszlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg. W przypadku połączenia płyty o grubości 6,4 mm oraz 12,4 mm poddanej w trakcie klejenia obciążeniu 1 kg siła zrywająca jest istotnie niższa niż dla obciążenia 2 kg ($p\text{-value} < \alpha = 0,05$).

Tabela 4.21. Wyniki testu Shapiro-Wilka dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal szlifowana– stal szlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant połączenia	W	p-value
stal (P40) – stal (P40), 1 kg	0,9865	0,7780
stal (P40) – stal (P40), 2 kg	0,9696	0,6653
stal (P80) – stal (P80), 1 kg	0,9799	0,7286
stal (P80) – stal (P80), 2 kg	0,8604	0,2688

Tabela 4.22. Wyniki testu Levene’a i testu Browna-Forsythe’a dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal szlifowana– stal szlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	Test Levene’a		Test Browna-Forsythe’a	
	F	p-value	F	p-value
stal (P40) – stal (P40): 1 kg - 2 kg	4,74	0,10	2,84	0,17
stal (P80) – stal (P80): 1 kg - 2 kg	2,29	0,20	1,19	0,34

Tabela 4.23. Wyniki testu t-Studenta dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal szlifowana – stal szlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	t	p-value
stal (P40) – stal (P40): 1 kg - 2 kg	1,35	0,25
stal (P80) – stal (P80): 1 kg - 2 kg	0,61	0,58

Tabela 4.24. Wyniki testu Shapiro-Wilka dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal nieszlifowana – płyta nieszlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant połączenia	W	p-value
stal (N) – płyta 6,4 mm (N), 1 kg	0,9904	0,8129
stal (N) – płyta 6,4 mm (N), 2 kg	0,9994	0,9537
stal (N) – płyta 8,4 mm (N), 1 kg	0,9896	0,8048
stal (N) – płyta 8,4 mm (N), 2 kg	0,8767	0,3149
stal (N) – płyta 10,4 mm (N), 1 kg	0,9094	0,4162
stal (N) – płyta 10,4 mm (N), 2 kg	0,8825	0,3317
stal (N) – płyta 12,4 mm (N), 1 kg	0,8917	0,3596
stal (N) – płyta 12,4 mm (N), 2 kg	0,7845	0,0780

Tabela 4.25. Wyniki testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal nieszlifowana – płyta nieszlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	Test			
	Levene'a		Browna-Forsythe'a	
	F	p-value	F	p-value
stal (N) – płyta 6,4 mm (N): 1 kg – 2 kg	0,14	0,73	0,07	0,80
stal (N) – płyta 8,4 mm (N): 1 kg – 2 kg	6,74	0,06	0,92	0,39
stal (N) – płyta 10,4 mm (N): 1 kg – 2 kg	0,02	0,89	0,01	0,94
stal (N) – płyta 12,4 mm (N): 1 kg – 2 kg	0,02	0,90	0,01	0,92

Tabela 4.26. Wyniki testu t-Studenta dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal nieszlifowana – stal nieszlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	t	p-value
stal (N) – płyta 6,4 mm (N): 1 kg – 2 kg	3,39	0,03
stal (N) – płyta 8,4 mm (N): 1 kg – 2 kg	1,79	0,15
stal (N) – płyta 10,4 mm (N): 1 kg – 2 kg	3,31	0,03
stal (N) – płyta 12,4 mm (N): 1 kg – 2 kg	1,81	0,14

4.6.2.4. Połączenie stali nieszlifowanej i płyty szlifowanej

Wyniki testu Shapiro-Wilka (Tabela 4.27) oraz testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a (Tabela 4.28) wskazują na spełnienie założeń testu t-Studenta dotyczącego normalności rozkładu oraz jednorodności wariancji.

Wynik testu dla zmiennych niezależnych (Tabela 4.29) wskazuje, że ze statystycznego punktu widzenia nie występują istotne różnice pomiędzy wartościami siły zrywającej F (Tabela 4.12) próbki z połączeniem stal nieszlifowana – płyta szlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg.

Tabela 4.27. Wyniki testu Shapiro-Wilka dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal nieszlifowana – płyta szlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant połączenia	W	p-value
stal (N) – płyta 6,4 mm (P40), 1 kg	0,9241	0,4668
stal (N) – płyta 6,4 mm (P40), 2 kg	0,7804	0,0685

Tabela 4.28. Wyniki testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal nieszlifowana – płyta szlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	Test			
	Levene'a		Browna-Forsythe'a	
	F	p-value	F	p-value
stal (N) – płyta 6,4 mm (P40): 1 kg – 2 kg	0,85	0,41	0,21	0,67

Tabela 4.29. Wyniki testu t-Studenta dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal nieszlifowana – płyta szlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	t	p-value
stal (N) – płyta 6,4 mm (P40): 1 kg – 2 kg	0,09	0,93

4.6.2.5. Połączenie stali szlifowanej i płyty szlifowanej

Wyniki testu Shapiro-Wilka (Tabela 4.30) oraz testu Levene’a i testu Browna-Forsythe’a (Tabela 4.31) wskazują na spełnienie założeń testu t-Studenta dotyczącego normalności rozkładu oraz jednorodności wariancji.

Wyniki tego testu dla zmiennych niezależnych (Tabela 4.32) wskazują, że ze statystycznego punktu widzenia nie ma różnicy pomiędzy wartościami siły zrywającej F (Tabela 4.13 i Tabela 4.14) próbki z połączeniem stal szlifowana – płyta szlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg niezależnie od rodzaju użytego papieru ściernego.

Tabela 4.30. Wyniki testu Shapiro-Wilka dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal szlifowana– płyta szlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant połączenia	W	p-value
stal (P40) – płyta 8,4 mm (P40), 1 kg	0,9548	0,5906
stal (P40) – płyta 8,4 mm (P40), 2 kg	0,9317	0,4949
stal (P80) – płyta 8,4 mm (P80), 1 kg	0,9996	0,9634
stal (P80) – płyta 8,4 mm (P80), 2 kg	0,7813	0,0706

Tabela 4.31. Wyniki testu Levene’a i testu Browna-Forsythe’a dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal szlifowana– płyta szlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	Test			
	Levene’a		Browna-Forsythe’a	
	F	p-value	F	p-value
stal (P40) – płyta 8,4 mm (P40): 1 kg - 2 kg	1,34	0,31	0,45	0,54
stal (P80) – płyta 8,4 mm (P80): 1 kg - 2 kg	1,48	0,29	0,08	0,79

Tabela 4.32. Wyniki testu t-Studenta dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal szlifowana – płyta szlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	t	p-value
stal (P40) – płyta 8,4 mm (P40): 1 kg - 2 kg	1,89	0,13
stal (P80) – płyta 8,4 mm (P80): 1 kg - 2 kg	0,07	0,95

4.6.2.6. Połączenie stali pokrytej galwanicznie

Wyniki testu Shapiro-Wilka (Tabela 4.33) oraz testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a (Tabela 4.34) wskazują na spełnienie założeń testu t-Studenta dotyczącego normalności rozkładu oraz jednorodności wariancji.

Wyniki testu dla zmiennych niezależnych (Tabela 4.35) wskazują, że ze statystycznego punktu widzenia nie ma różnicy pomiędzy wartościami siły zrywającej F (Tabela 4.4 i Tabela 4.6) próbek z połączeniem stal chromowana – stal chromowana lub stal niklowana – stal niklowana niezależnie od wielkości docisku wynoszącego 1 kg lub 2 kg.

Tabela 4.33. Wyniki testu Shapiro-Wilka dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal chromowana – stal chromowana lub stal niklowana – stal niklowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant połączenia	W	p-value
stal (Ch) – stal (Ch), 1 kg	0,9118	0,4240
stal (Ch) – stal (Ch), 2 kg	0,7843	0,0776
stal (Ni) – stal (Ni), 1 kg	0,9995	0,9588
stal (Ni) – stal (Ni), 2 kg	0,9425	0,5373

Tabela 4.34. Wyniki testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal chromowana – stal chromowana lub stal niklowana – stal niklowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	Test			
	Levene'a		Browna-Forsythe'a	
	F	p-value	F	p-value
stal (Ch) – stal (Ch): 1 kg - 2 kg	5,11	0,09	0,36	0,58
stal (Ni) – stal (Ni): 1 kg - 2 kg	2,42	0,20	0,67	0,46

Tabela 4.35. Wyniki testu t-Studenta dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal chromowana – stal chromowana lub stal niklowana – stal niklowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	t	p-value
stal (Ch) – stal (Ch): 1 kg - 2 kg	0,70	0,52
stal (Ni) – stal (Ni): 1 kg - 2 kg	2,72	0,053

4.6.2.7. Połączenie stali pokrytej galwanicznie i płyty drewnopodobnej

Wyniki testu Shapiro-Wilka (Tabela 4.36) oraz testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a (Tabela 4.37) wskazują na spełnienie założeń testu t-Studenta dotyczącego normalności rozkładu oraz jednorodności wariancji.

Wyniki testu dla zmiennych niezależnych (Tabela 4.38) wskazują, że ze statystycznego punktu widzenia różnica pomiędzy wartościami siły zrywającej F (Tabela 4.5 i Tabela 4.7) próbek z połączeniem stal chromowana – płyta drewnopodobna są niezależne od wielkości docisku wynoszącego 1 kg lub 2 kg. Dla stali niklowanej siła zrywająca jest istotnie większa dla docisku wywołanego obciążeniem 2 kg.

Tabela 4.36. Wyniki testu Shapiro-Wilka dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal pokryta galwanicznie – płyta drewnopodobna dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant połączenia	W	p-value
stal (Ch) – płyta 8,4 mm (P80), 1 kg	0,8510	0,2432
stal (Ch) – płyta 8,4 mm (P80), 2 kg	0,9531	0,5830
stal (Ni) – płyta 8,4 mm (P80), 1 kg	0,9806	0,7334
stal (Ni) – płyta 8,4 mm (P80), 2 kg	0,9993	0,9502

Tabela 4.37. Wyniki testu Levene’a i testu Browna-Forsythe’a dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal pokryta galwanicznie – płyta drewnopodobna dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	Test			
	Levene’a		Browna-Forsythe’a	
	F	p-value	F	p-value
stal (Ch) – płyta 8,4 mm (P80): 1 kg - 2 kg	0,77	0,43	0,27	0,63
stal (Ni) – płyta 8,4 mm (P80): 1 kg - 2 kg	3,54	0,13	1,83	0,25

Tabela 4.38. Wyniki testu t-Studenta dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal pokryta galwanicznie – płyta drewnopodobna dla obciążenia 1 kg lub 2 kg ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	t	p-value
stal (Ch) – płyta 8,4 mm (P80): 1 kg - 2 kg	0,32	0,76
stal (Ni) – płyta 8,4 mm (P80): 1 kg - 2 kg	2,84	0,047

4.6.2.8. Wnioski z analizy

W przypadku połączeń wykonanych z jednakowych materiałów, tj. połączeń stal - stal dla nieszlifowanych lub szlifowanych elementów wpływ ich docisku w trakcie łączenia na nośność połączenia nie był statystycznie istotny. Podobny wniosek można wysunąć z analizy próbek stalowych z warstwą galwaniczną: chromowanych lub niklowanych.

Istotny wpływ docisku na nośność połączenia stwierdzono w przypadku połączeń wykonanych z elementów o różnych właściwościach wytrzymałościowych, tj. dla połączeń stal – płyta drewnopodobna CDF niepoddanych szlifowaniu. Zabieg szlifowania płyty niezależnie od użytego

papieru ściernego powoduje, że dla siła zrywająca próbki jest dla wszystkich grubości porównywalna.

Siła zerwania połączenia klejonego stal chromowana – płyta drewnopochodna nie zależy od docisku. W przypadku takiego samego połączenia, ale dla niklowania wyraźnie wyższą nośność połączenia uzyskano dla większego docisku w trakcie klejenia, tj. dla obciążenia wynoszącego 2 kg.

4.6.3. Wpływ przygotowania powierzchni łączonych elementów

Różnicę w uzyskanych nośnościach połączeń wynikającą ze sposobu przygotowania powierzchni łączonych elementów (szlifowania) przeanalizowano porównując wybrane wyniki badań połączeń o takim samym docisku w trakcie klejenia oraz grubości płyty.

4.6.3.1. Połączenie stali ze stalą

Wyniki testu Shapiro-Wilka (Tabela 4.39) oraz testu Levene’a i testu Browna-Forsythe’a (Tabela 4.40) wskazują na spełnienie założeń testu t-Studenta dotyczącego normalności rozkładu oraz jednorodności wariancji dla wszystkich porównywanych grup poza ostatnią (porównanie dla połączeń stal (P40) – stal (P80) dla docisku 2 kg).

Wyniki testu t-Studenta dla zmiennych niezależnych (Tabela 4.41) wskazują, że ze statystycznego punktu widzenia nie ma różnicy pomiędzy wartościami siły zrywającej F (Tabela 4.3) próbki z połączeniem stal nieszlifowana – stal nieszlifowana a połączeniem stal szlifowana – stal szlifowana dla obciążenia 1 kg lub 2 kg niezależnie od rodzaju użytego papieru ściernego.

Ze względu na wspomniane powyżej niespełnienie założenia jednorodności wariancji w przypadku ostatniej porównywanej grupy (test Levene’a) konieczne było skorzystanie z testu t-Studenta z oddzielną oceną wariancji. Wynik tego testu (Tabela 4.42) potwierdza wniosek sformułowany dla pozostałych porównywanych grup o braku różnicy pomiędzy wartościami siły zrywającej dla połączenia stal – stal.

Tabela 4.39. Wyniki testu Shapiro-Wilka dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal – stal ($\alpha = 0,05$)

Wariant połączenia	W	p-value
stal (N) – stal (N), 1 kg	0,9999	0,9768
stal (N) – stal (N), 2 kg	0,9617	0,6236
stal (P40) – stal (P40), 1 kg	0,9865	0,7780
stal (P40) – stal (P40), 2 kg	0,9696	0,6653
stal (P80) – stal (P80), 1 kg	0,9799	0,7286
stal (P80) – stal (P80), 2 kg	0,8604	0,2688

Tabela 4.40. Wyniki testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal – stal nieszlifowana lub szlifowana ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	Test			
	Levene'a		Browna-Forsythe'a	
	F	p-value	F	p-value
1 kg: stal (N) – stal (P40)	0,91	0,39	0,91	0,39
1 kg: stal (N) – stal (P80)	0,41	0,56	0,45	0,54
2 kg: stal (N) – stal (P40)	5,15	0,09	1,92	0,24
2 kg: stal (N) – stal (P80)	0,13	0,74	0,08	0,80
1 kg: stal (P40) – stal (P80)	0,22	0,66	0,11	0,76
2 kg: stal (P40) – stal (P80)	7,84	0,049	0,80	0,50

Tabela 4.41. Wyniki testu t-Studenta dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal – stal nieszlifowana lub szlifowana ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	t	p-value
1 kg: stal (N) – stal (P40)	0,39	0,71
1 kg: stal (N) – stal (P80)	0,01	0,99
2 kg: stal (N) – stal (P40)	0,30	0,78
2 kg: stal (N) – stal (P80)	0,28	0,79
1 kg: stal (P40) – stal (P80)	0,55	0,61

Tabela 4.42. Wyniki testu t-Studenta z oddzielną oceną wariancji ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	t	p-value
2 kg: stal (P40) – stal (P80)	0,80	0,50

4.6.3.2. Połączenie stali i płyty drewnopochodnej

Wyniki testu Shapiro-Wilka (Tabela 4.43) oraz testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a (Tabela 4.44) wskazują na spełnienie założeń testu t-Studenta dotyczącego normalności rozkładu oraz jednorodności wariancji dla wszystkich porównywanych grup poza ostatnią (porównanie dla połączeń stal (P40) – stal (P80) dla docisku 2 kg).

Wyniki testu t-Studenta dla zmiennych niezależnych (Tabela 4.41) wskazują, że ze statystycznego punktu widzenia występują istotne różnice pomiędzy wartościami siły zrywającej F (Tabela 4.13 i Tabela 4.14) próbki z połączeniem stal szlifowana – płyta szlifowana szlifowanych różnymi papierami dla obciążenia 1 kg. W przypadku docisku obciążeniem 1 kg uzyskane połączenie klejone wykazuje niższą siłę zrywającą w porównaniu do docisku 2 kg ($p\text{-value} < \alpha = 0,05$).

Tabela 4.43. Wyniki testu Shapiro-Wilka dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal szlifowana – płyta szlifowana ($\alpha = 0,05$)

Wariant połączenia	W	p-value
stal (P40) – płyta (P40), 1 kg	0,9548	0,5906
stal (P80) – płyta (P80), 1 kg	0,9996	0,9634
stal (P40) – płyta (P40), 2 kg	0,9317	0,4949
stal (P80) – płyta (P80), 2 kg	0,7813	0,0706

Tabela 4.44. Wyniki testu Levene’a i testu Browna-Forsythe’a dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal szlifowana – płyta szlifowana ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	Test			
	Levene’a		Browna-Forsythe’a	
	F	p-value	F	p-value
1 kg: stal – płyta (P40) – stal – płyta (P80)	0,05	0,83	0,05	0,83
2 kg: stal – płyta (P40) – stal – płyta (P80)	7,67	0,0504	0,54	0,50

Tabela 4.45. Wyniki testu t-Studenta dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal szlifowana – płyta szlifowana ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	t	p-value
1 kg: stal – płyta (P40) – stal – płyta (P80)	3,10	0,04
2 kg: stal – płyta (P40) – stal – płyta (P80)	1,45	0,22

4.6.3.3. Wnioski z analizy

W przypadku połączeń wykonanych z jednakowych materiałów, tj. połączeń stal - stal dla nieszlifowanych lub szlifowanych elementów wpływ ich docisku w trakcie łączenia na nośność połączenia nie był statystycznie istotny.

Wpływ ten ujawnia się w przypadku połączeń o różnych właściwościach. W przypadku połączenia stal szlifowana – płyta szlifowana wyższe wartości nośności uzyskuje się dla większego docisku oraz papieru P80.

4.6.4. Wpływ powłoki galwanicznej

4.6.4.1. Połączenie stali nieszlifowanej lub stali pokrytej galwanicznie

Wyniki testu Shapiro-Wilka (Tabela 4.46) oraz testu Levene’a i testu Browna-Forsythe’a (Tabela 4.47) wskazują na spełnienie założeń testu t-Studenta dotyczącego normalności rozkładu oraz jednorodności wariancji dla wszystkich porównywanych grup. Wyniki testu t-Studenta dla zmiennych niezależnych (Tabela 4.48) wskazują, że ze statystycznego punktu widzenia nie występują istotne różnice pomiędzy wartościami siły zrywającej F (Tabela 4.3, Tabela 4.4, Tabela 4.6) próbki ze stali nieszlifowanej i próbki ze stali pokrytej galwanicznie niezależnie od sposobu pokrycia.

Tabela 4.46. Wyniki testu Shapiro-Wilka dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal nieszlifowana lub stal pokryta galwanicznie ($\alpha = 0,05$)

Wariant połączenia	W	p-value
stal nieszlifowana, 1 kg	0,9999	0,9768
stal nieszlifowana, 2 kg	0,9617	0,6236
stal chromowana, 1 kg	0,9118	0,4240
stal chromowana, 2 kg	0,7843	0,0776
stal niklowana, 1 kg	0,9995	0,9588
stal niklowana, 2 kg	0,9425	0,5373

Tabela 4.47. Wyniki testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal nieszlifowana lub stal pokryta galwanicznie ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	Test			
	Levene'a		Browna-Forsythe'a	
	F	p-value	F	p-value
1 kg: stal nieszlifowana – stal chromowana	1,64	0,27	1,64	0,27
2 kg: stal nieszlifowana – stal chromowana	6,32	0,07	0,45	0,54
1 kg: stal nieszlifowana – stal niklowana	2,01	0,23	1,93	0,24
2 kg: stal nieszlifowana – stal niklowana	2,50	0,19	0,71	0,45

Tabela 4.48. Wyniki testu t-Studenta dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stal nieszlifowana lub stal pokryta galwanicznie ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	t	p-value
1 kg: stal nieszlifowana – stal chromowana	0,79	0,47
2 kg: stal nieszlifowana – stal chromowana	0,56	0,60
1 kg: stal nieszlifowana – stal niklowana	1,76	0,15
2 kg: stal nieszlifowana – stal niklowana	0,36	0,74

4.6.4.2. Połączenie stali pokrytej galwanicznie

Wyniki testu Shapiro-Wilka (Tabela 4.43) oraz testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a (Tabela 4.44) wskazują na spełnienie założeń testu t-Studenta dotyczącego normalności rozkładu oraz jednorodności wariancji dla wszystkich porównywanych grup poza ostatnią (porównanie dla połączeń stal (P40) – stal (P80) dla docisku 2 kg).

Wyniki testu t-Studenta dla zmiennych niezależnych (Tabela 4.41) wskazują, że ze statystycznego punktu widzenia występują istotne różnice pomiędzy wartościami siły zrywającej F (Tabela 4.13 i Tabela 4.14) próbki z połączeniem stal szlifowana – płyta szlifowana szlifowanych różnymi papierami dla obciążenia 1 kg. W przypadku docisku obciążeniem 1 kg uzyskane połączenie klejone wykazuje niższą siłę zrywającą w porównaniu do 2 kg.

Tabela 4.49. Wyniki testu Shapiro-Wilka dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stali pokrytej galwanicznie ($\alpha = 0,05$)

Wariant połączenia	W	p-value
stal chromowana, 1 kg	0,9118	0,4240
stal chromowana, 2 kg	0,7843	0,0776
stal niklowana, 1 kg	0,9995	0,9588
stal niklowana, 2 kg	0,9425	0,5373

Tabela 4.50. Wyniki testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stali pokrytej galwanicznie ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	Test			
	Levene'a		Browna-Forsythe'a	
	F	p-value	F	p-value
1 kg: stal chromowana – stal niklowana	0,20	0,68	0,01	0,92
2 kg: stal chromowana – stal niklowana	0,61	0,48	0,03	0,88

Tabela 4.51. Wyniki testu t-Studenta dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stali pokrytej galwanicznie ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	t	p-value
1 kg: stal chromowana – stal niklowana	2,36	0,08
2 kg: stal chromowana – stal niklowana	0,24	0,83

4.6.4.3. Połączenie stali pokrytej galwanicznie i płyty drewnopochodnej

Wyniki testu Shapiro-Wilka (Tabela 4.52) oraz testu Levene'a i testu Browna-Forsythe'a (Tabela 4.53) wskazują na spełnienie założeń testu t-Studenta dotyczącego normalności rozkładu oraz jednorodności wariancji dla wszystkich porównywanych grup.

Wyniki testu t-Studenta dla zmiennych niezależnych (Tabela 4.54) wskazują, że ze statystycznego punktu widzenia występują istotne różnice pomiędzy wartościami siły zrywającej F (Tabela 4.5 i Tabela 4.7) próbki z połączeniem stal pokryta galwanicznie – płyta szlifowana. W przypadku docisku obciążeniem 2 kg uzyskane połączenie klejone wykazuje wyższą siłę zrywającą w przypadku występowania powłoki niklowanej ($p\text{-value} < \alpha - 0,05$).

4.6.4.4. Wnioski z analizy

Na podstawie przeprowadzonej analizy wskazać można, że niklowanie wraz z wyższą wartością docisku łączonych elementów sprzyja uzyskaniu wyższej nośności połączenia klejonego w przypadku skojarzenia materiałów o różnych właściwościach wytrzymałościowych. Podobnie jak zauważono wcześniej powłoka galwaniczna nie wpływa na połączenie stal – stal.

Tabela 4.52. Wyniki testu Shapiro-Wilka dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stali pokrytej galwanicznie i płyty drewnopochodnej ($\alpha = 0,05$)

Wariant połączenia	W	p-value
stal chromowana – płyta 8,4 mm (P80), 1 kg	0,8519	0,2432
stal niklowana – płyta 8,4 mm (P80), 1 kg	0,9806	0,7334
stal chromowana – płyta 8,4 mm (P80), 2 kg	0,9531	0,5830
stal niklowana – płyta 8,4 mm (P80), 2 kg	0,9993	0,9502

Tabela 4.53. Wyniki testu Levene’a i testu Browna-Forsythe’a dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stali pokrytej galwanicznie i płyty szlifowanej 8,4 mm ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	Test			
	Levene’a		Browna-Forsythe’a	
	F	p-value	F	p-value
1 kg: stal (Ch) – płyta P80 – stal (Ni)-płyta P80	1,75	0,26	0,92	0,39
2 kg: stal (Ch) – płyta P80 – stal (Ni)-płyta P80	3,05	0,16	0,99	0,38

Tabela 4.54. Wyniki testu t-Studenta dla siły zrywającej F próbki z połączeniem stali pokrytej galwanicznie ($\alpha = 0,05$)

Wariant: Porównywana grupa	t	p-value
1 kg: stal (Ch) – płyta P80 – stal (Ni)-płyta P80	0,15	0,98
2 kg: stal (Ch) – płyta P80 – stal (Ni)-płyta P80	4,69	0,009

4.7. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza statystyczna z wykorzystaniem testu t-Studenta pozwoliła na znalezienie dziesięciu porównań, pomiędzy którymi wystąpiły istotne ze statystycznego punktu widzenia różnice. W głównej mierze istotne różnice występowały wewnątrz różnych wariantów porównań połączeń klejonych materiałów o różnych właściwościach wytrzymałościowych. Należy tu wymienić:

- połączenie klejone stal nieszlifowana – płyta nieszlifowana o grubości 6,4 mm obciążane w trakcie klejenia odważnikiem o masie 1 kg z połączeniem klejonym stal nieszlifowana – płyta nieszlifowana o grubości 6,4 mm obciążanym odważnikiem o masie 2 kg,
- połączenie klejone stal nieszlifowana – płyta nieszlifowana o grubości 10,4 mm obciążane odważnikiem o masie 1 kg z połączeniem klejonym stal nieszlifowana – płyta nieszlifowana o grubości 10,4 mm obciążanym odważnikiem o masie 2 kg,
- połączenie klejone stal nieszlifowana – płyta nieszlifowana o grubości 6,4 mm obciążane odważnikiem o masie 1 kg z połączeniem klejonym stal

- nieszlifowana – płyta nieszlifowana o grubości 8,4 mm obciążanym odważnikiem o masie 1 kg,
- d) połączenie klejone stal nieszlifowana – płyta nieszlifowana o grubości 8,4 mm obciążane odważnikiem o masie 1 kg z połączeniem klejonym stal nieszlifowana – płyta nieszlifowana o grubości 10,4 mm obciążanym odważnikiem o masie 1 kg,
 - e) połączenie klejone stal nieszlifowana – płyta nieszlifowana o grubości 8,4 mm obciążane odważnikiem o masie 1 kg z połączeniem klejonym stal nieszlifowana – płyta nieszlifowana o grubości 12,4 mm obciążanym odważnikiem o masie 1 kg,
 - f) połączenie klejone stal nieszlifowana – płyta nieszlifowana o grubości 6,4 mm obciążane odważnikiem o masie 2 kg z połączeniem klejonym stal nieszlifowana – płyta nieszlifowana o grubości 12,4 mm obciążanym odważnikiem o masie 2 kg,
 - g) połączenie klejone stal nieszlifowana – płyta nieszlifowana o grubości 10,4 mm obciążane odważnikiem o masie 2 kg z połączeniem klejonym stal nieszlifowana – płyta nieszlifowana o grubości 12,4 mm obciążanym odważnikiem o masie 2 kg.

Zaobserwowano również występowanie istotnych różnic wewnątrz porównania połączenia klejonego stali szlifowanej papierem P40 i płyty drewnopochodnej o grubości 8,4 mm szlifowanej papierem P40 obciążanym odważnikiem o masie 1 kg z połączeniem klejonym stali szlifowanej papierem P80 i płyty drewnopochodnej o grubości 8,4 mm szlifowanej papierem P80 obciążanym odważnikiem o masie 1 kg.

Ponadto odnotowano występowanie istotnych różnic wewnątrz porównania połączenia stal niklowana – płyta szlifowana papierem P80 obciążonego odważnikiem o masie 1 kg z połączeniem stal niklowana – płyta szlifowana papierem P80 obciążonego odważnikiem o masie 2 kg.

Ostatnie porównanie, w którym wystąpiły znaczące różnice wewnątrz porównywanych grup dotyczyło połączenia klejonego stali niklowanej z płytą drewnopochodną o grubości 8,4 mm szlifowanej papierem P80, które obciążano odważnikiem o masie 2 kg i połączenia stali chromowanej z płytą drewnopochodną o grubości 8,4 mm szlifowaną papierem P80, które również obciążano odważnikiem o masie 2 kg.

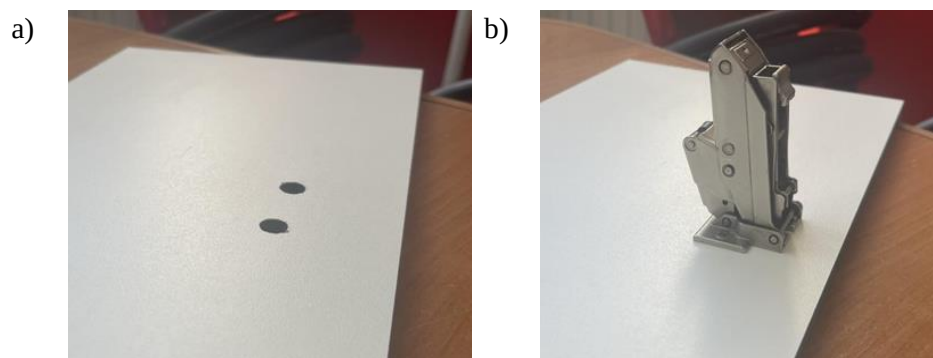
Ze względu najwyższą odnotowaną wartość siły zrywającej F dla połączenia płaskownika z płytą drewnopochodną oraz na otrzymane wyniki analizy statystycznej, które potwierdziły otrzymane rezultaty badań wytrzymałościowych połączeń klejonych, jak również na samą estetykę powłok galwanicznych wymaganą w połączeniach meblarskich w dalszych badaniach trwałościowych połączeń klejonych wykorzystano sposób przygotowania połączeń klejonych oparty o stal niklowaną i płytę drewnopochodną szlifowaną papierem P80, które dociskano w trakcie klejenia masą zbliżoną do nacisku generowanego przez odważnik o masie 2 kg wykorzystany w badaniach wstępnych.

5. BADANIA TRWAŁOŚCI POŁĄCZEŃ

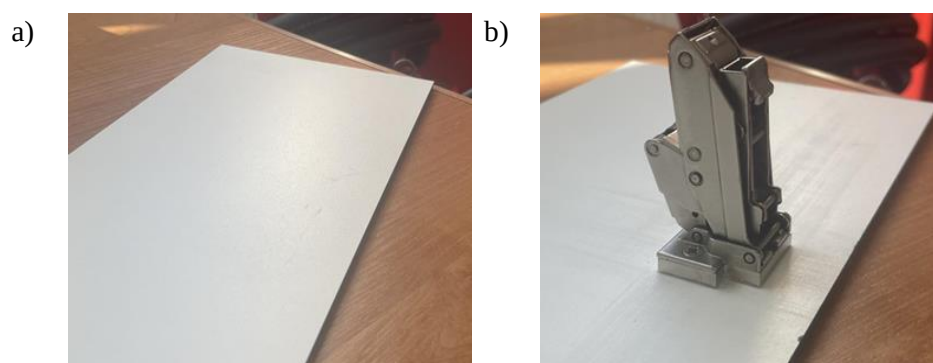
5.1. Obiekt badań

Obiekt badań stanowiły dwa typy próbek badawczych stanowiących odzwierciedlenie połączenia drzwi oraz korpusu meblowego połączonych za pomocą dwóch zawiasów.

Pierwszy rodzaj użytych próbek wykorzystywał płyty drewnopochodne CDF o grubości 12,4 mm z wyfrezowanymi otworami (Rys. 5.1a), w których osadzano zawias Blum Expando T (Rys. 5.1b). Kołki montażowe zawiasu osadzano w wyfrezowanych otworach płyty drewnopochodnej i dokręcano do momentu, w którym następowała całkowita eliminacja luzu pomiędzy płytą a zawiasem. Drugi rodzaj próbek wykorzystywał płyty drewnopochodne CDF bez otworów (Rys. 5.2a), do których za pomocą złączy klejonych oraz dedykowanego elementu łączącego przytwierdzano wspomniany powyżej zawias (Rys. 5.2b).



Rys. 5.1. Próbką badawczą do badań trwałościowych z zawiasem przykręcanym:
a) surowa płyta CDF z otworami, b) sposób mocowania zawiasu



Rys. 5.2. Próbką badawczą do badań trwałościowych z zawiasem przyklejanym:
a) surowa płyta CDF, b) sposób mocowania zawiasu

Użyte w badaniach trwałościowych formatki z płyt drewnopochodnych CDF odznaczały się długością wynoszącą 1200 mm oraz szerokością 200 mm. Do badań wybrano dwie grubości płyt: najlżejszą i najmniej sztywną płytę o grubości 6,4 mm oraz najcięższą i najbardziej sztywną płytę o grubości 12,4 mm. Przed wykonaniem połączeń wszystkie formatki zważono, a ich masy wraz z podaniem wartości średnich zamieszczono w Tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Masy formatek z płyt drewnopochodnych CDF wykorzystanych w badaniach trwałościowych

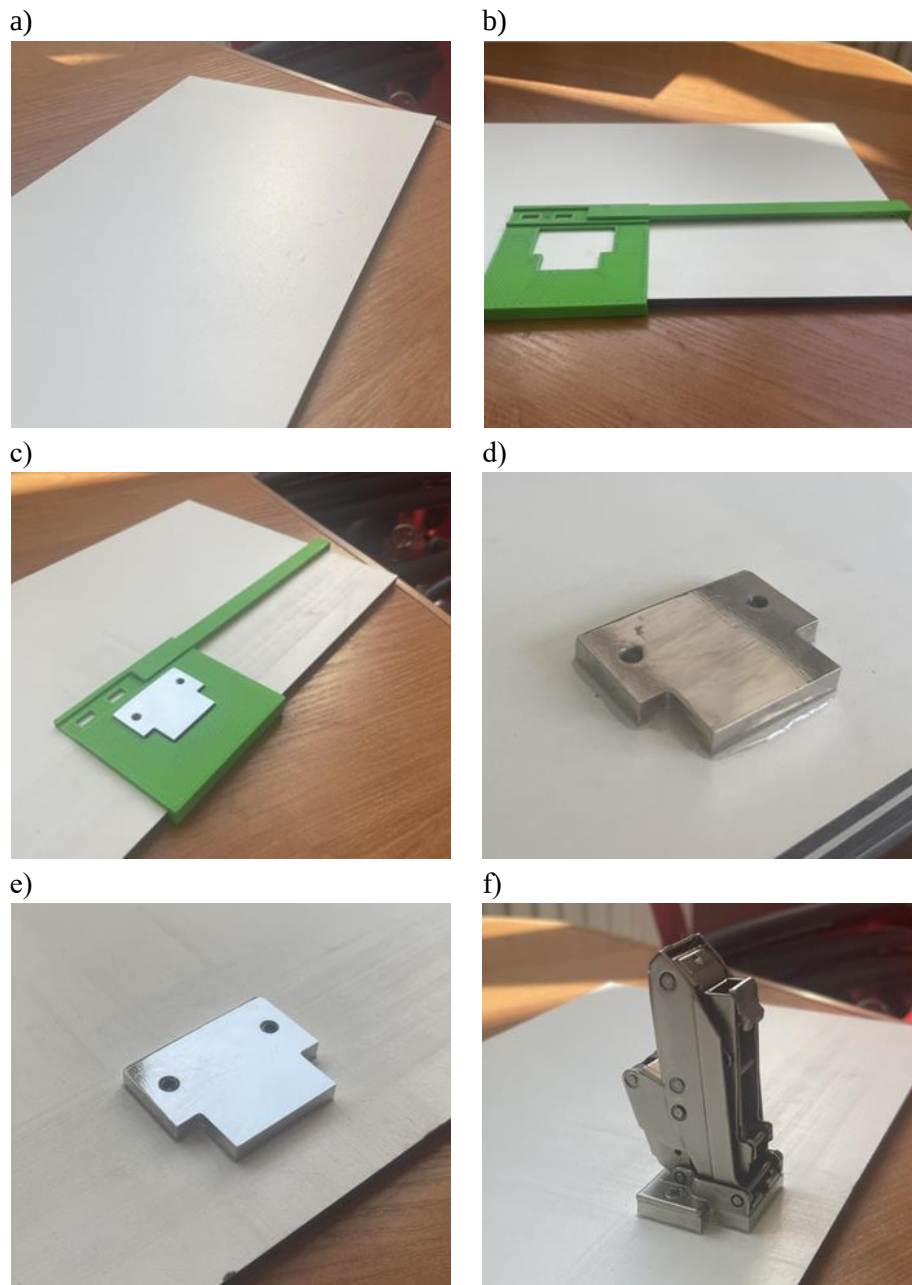
Grubość nominalna płyty	Oznaczenie próbki	Masa	Średnia
		g	
6,4 mm	ZK6-1	1675,9	1673,0
	ZK6-2	1676,9	
	ZK6-3	1666,3	
12,4 mm	ZK12-1	3088,0	3091,7
	ZK12-2	3098,1	
	ZK12-3	3088,9	
12,4 mm	ZP12-1	3080,1	3075,3
	ZP12-2	3069,5	
	ZP12-3	3076,4	

Formatki z płyt drewnopochodnych CDF o grubości 6,4 mm, które wykorzystano w badaniu trwałości połączeń klejonych (ZK6) charakteryzowały się średnią masą 1673 g. Próbki o grubości 12,4 mm do badań połączeń klejonych (ZK12) i próbki o grubości 12,4 mm z zawiasem przykręcanym (ZP12) odznaczały się prawie dwukrotnie większą masą wynoszącą odpowiednio 3091,7 g i 3075,3 g. Niewielka różnica w średniej masie płyt może wynikać z faktu wykonania w formatkach dedykowanych połączeniom śrubowym otworów pod kołki montażowe.

5.2. Przygotowanie próbek

Przygotowanie próbek przykręcanych do badań eksploatacyjnych polegało na przytwierdzeniu zawiasów do formatek meblowych wykonanych z płyt drewnopochodnych. Zawiasy zostały zamontowane i dokręcone w wyfrezowanych wcześniej otworach o średnicy 10 mm i rozstawie 32 mm. Odległość otworów od dłuższej krawędzi wynosiła 25 mm, a odległość od krótszej krawędzi 184 mm.

Poszczególne etapy przygotowywania próbek połączeń klejonych do badań eksploatacyjnych przedstawiono na Rys. 5.3.



Rys. 5.3. Etapy przygotowywania próbki połączenia klejonego do badań eksploatacyjnych: a) surowa płyta, b) szablon nanoszenia kleju, c) szablon osadzania elementu łączącego, d) przyklejony element łączący ze stali niklowanej, e) przyklejony element łączący ze stali niklowanej z usuniętymi wypływkami kleju, f) zawias przykręcony do elementu łączącego

Badania eksploatacyjne poprzedzono wycięciem elementów łączących z płaskownika o grubości 6 mm wykonanego ze stali S235 oraz ich wstępnemu oszlifowaniu, które miało na celu usunięcie zabrudzeń i niedoskonałości powierzchni zgodnie z metodą wykonania płaskowników stalowych do badań połączeń klejonych. W wykonanych elementach wiercono dwa otwory przelotowe, które następnie nagwintowano. Użyty w elementach gwint M4 pozwolił na wykorzystanie oryginalnych śrub dostarczonych wraz z zawiasem. Wycięte i oszlifowane próbki, w których wykonano otwory gwintowane poddano galwanicznemu procesowi niklowania.

Formatki płyty drewnopochodnych CDF do badań trwałości połączeń klejonych (Rys. 5.3a) poddano szlifowaniu papierem ściernym o gradacji P80. Powierzchnie płyt zmatowiono poprzez wykonanie pięciu cykli przetarcia fragmentu powierzchni przeznaczonego do wykonania złącza prostopadłe do dłuższej oraz krótszej krawędzi. Oszlifowane powierzchnie płyt poddano oczyszczeniu i odtłuszczeniu poprzez przetarcie powierzchni alkoholem izopropylowym o czystości 99%. W identyczny sposób postępowano w przypadku niklowanego elementu łączącego.

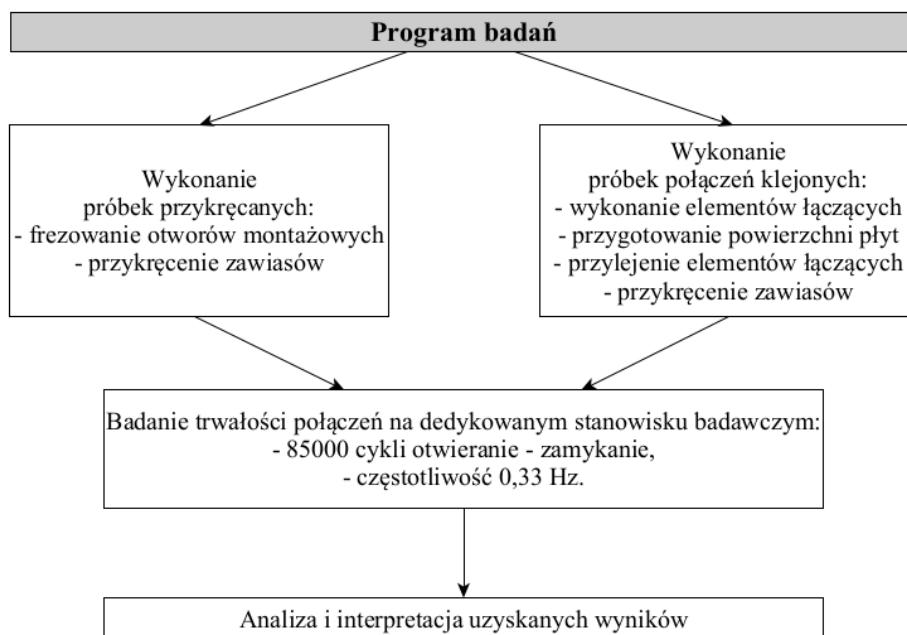
W celu właściwej aplikacji kleju oraz poprawnego zamontowania elementu łączącego wykonano szablony z wykorzystaniem metody druku przestrzennego. Szablon osadzania elementu łączącego (Rys. 5.3c), w przeciwieństwie do szablonu aplikacji kleju (Rys. 5.3b) charakteryzował się większą grubością i sfazowaną dolną krawędzią dla ograniczenia kontaktu szablonu z wypływającym klejem. Ze względu na obecność ramienia stabilizującego oba typy szablonów umożliwiały przeprowadzenie operacji w odpowiednich miejscach i były dostosowane do mocowania górnego i dolnego zawiasu. Po uprzednim zmieszaniu i zaaplikowaniu dwuskładnikowego kleju epoksydowego Henkel Pattex Epoxy, którego używano we wcześniejszych badaniach połączeń klejonych, na elemencie łączącym umieszczano odważniki o średniej masie 4010,70 g. Używana w tej części badań masa odważnika wynika bezpośrednio z konieczności uzyskania zbliżonego nacisku jednostkowego na łączoną powierzchnię. Otrzymana we wcześniejszych badaniach połączeń klejonych wartość 286,39 g / 100 mm² przy powierzchni elementu łączącego (po odjęciu powierzchni otworów) wynoszącej 1324,13 mm² wymusił użycie odważnika o masie 3792,18 g. Jednak ze względu na dostępność odważników 1 kg i 2 kg w części badań eksploatacyjnych wykorzystano wspomniane wcześniej obciążenie. Obciążone próbki sezonowano przez okres 24 godzin po czym zdejmowano odważniki.

W kolejnym kroku za pomocą pilnika i wiertła dokonywano usunięcia wypływek kleju, które widoczne są na Rys. 5.3d.

Rys. 5.3e przedstawia niklowany element łączący pozbawiony wypływek kleju, do którego przykręcano zawias (Rys. 5.3f) za pomocą dołączonych do kompletu śrub montażowych.

5.3. Program badań

Program badań eksploatacyjnych połączeń klejonych przedstawiono na Rys. 5.4.



Rys. 5.4. Program badań eksploatacyjnych

Program zakładał realizację badań połączeń klejonych przygotowanych w oparciu o metodę wykonania połączenia klejonego, którą przetestowano i wybrano we wcześniejszych badaniach połączeń klejonych. W oparciu o ten sposób wykonania połączenia przygotowano dwa warianty połączeń klejonych dla płyty o grubości 6,4 mm i 12,4 mm oraz jeden wariant standardowego połączenia zawiasu z użyciem kołków montażowych dla płyty o grubości 12,4 mm.

Wymagany czas pracy każdej z próbek przyjęto jako wynoszący 85000 cykli otwarcia i zamknięcia. Ze względu na potencjalne zastosowanie płyt drewnopochodnych CDF wyliczenia liczby cykli dokonano na podstawie danych zaczerpniętych z miejsc użyteczności publicznej (szatnie basenowe, hale sportowe). Założono otwarcie obiektu 365 dni w roku przez 15 godzin na dobę przy występowaniu 2 cykli otwarcia i zamknięcia szafki na godzinę. Przy przyjęciu takich założeń trwałość wynosząca 85 000 cykli odpowiada ok. 8-letniemu okresowi eksploatacji.

5.4. Stanowisko do badań eksploatacyjnych

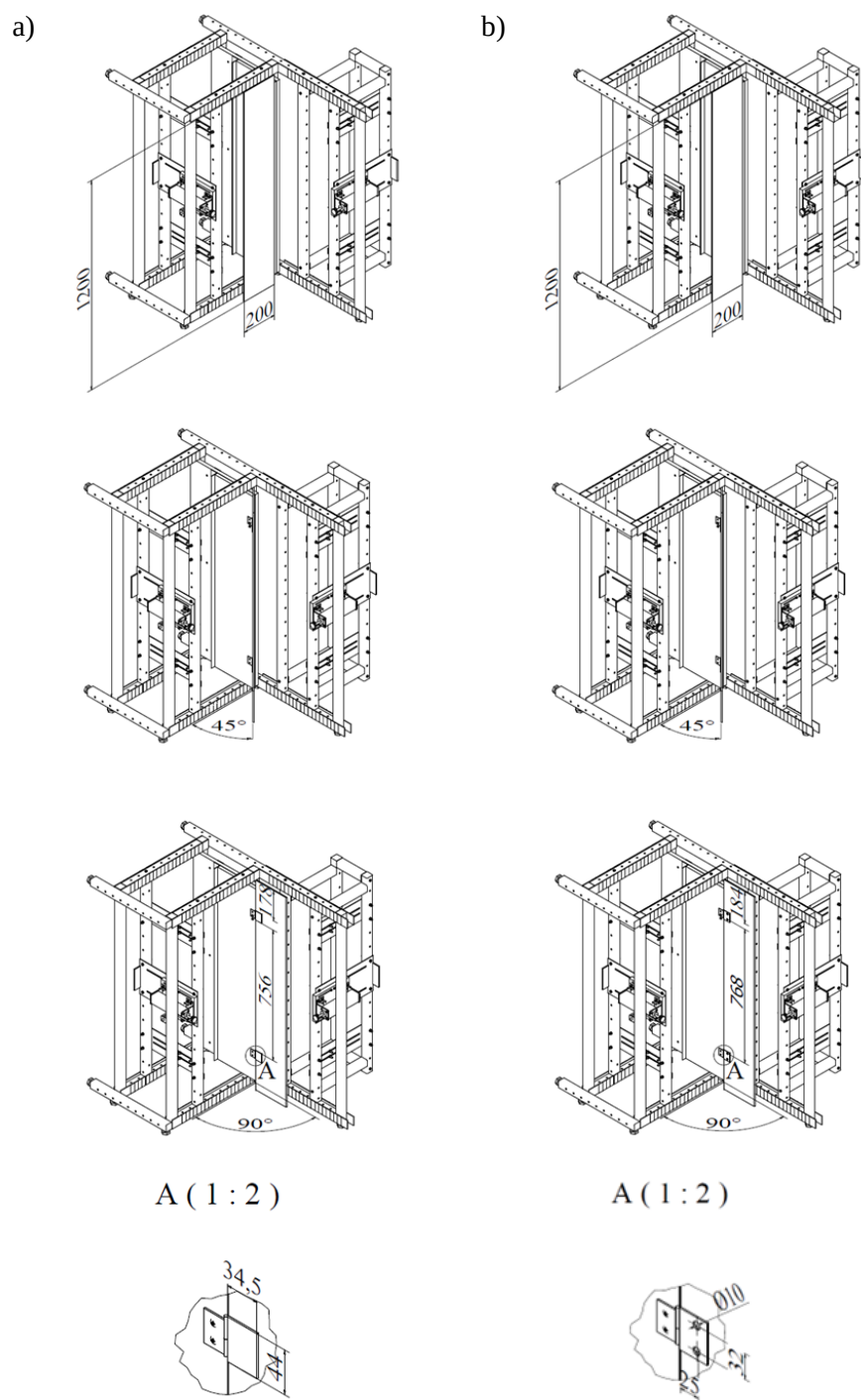
Badania trwałości połączeń klejonych płyta drewnopochodna CDF – stal niklowana mocujących zawias meblowy przeprowadzono na dedykowanym stanowisku badawczym, które zostało w roku 2021 zgłoszone w Urzędzie Patentowym RP jako wynalazek zarejestrowany pod numerem P.439220 pt. „Stanowisko do badania trwałości połączenia zawias - płyta meblowa” (Rys. 5.5). Stanowisko to umożliwia badanie trwałości w warunkach eksploatacyjnych z zachowaniem pionowej osi obrotu (obróćt wzdłuż osi Y), co skutkuje cyklicznym pojawieniem się obciążeń odrywających i/lub ścinających w obrębie mocowania zawiasów.



Rys. 5.5. Stanowisko badawcze do badania trwałości eksploatacyjnej

Stanowisko składa się z ramy, która została zaopatrzona w płytę imitującą korpus meblowy, do której mocowano próbki badawcze z zamocowanymi za pomocą klejenia lub poprzez przykręcenie zawiasami. Mocowanie zawiasów do korpusu odbywało się z wykorzystaniem połączeń śrubowych.

Na Rys. 5.6 przedstawiono próbki badawcze w różnych fazach cyklu pracy wraz ze sposobem mocowania zawiasów klejonych (Rys. 5.6a) lub przykręcanych (Rys. 5.6b).



Rys. 5.6. Stanowisko badawcze do badania trwałości eksploatacyjnej wraz ze schematem mocowania zawiasów: a) klejonych, b) przykręconych

Stanowisko zostało zaopatrzone w dwa siłowniki pneumatyczne, które wprowadzały badaną próbkę w cykliczny ruch (obróć wokół osi pionowej). Pierwszy z siłowników odpowiadał za otwieranie drzwi, natomiast drugi za ich zamykanie. Dystrybucja sprężonego powietrza do siłowników odbywała się poprzez parę rozdzielaczy FESTO, które otrzymywały sygnał z modułu Arduino Nano wyposażonego w procesor NH340 poprzez zastosowane w urządzeniu dwa dwukanałowe przekaźniki SSR o napięciu 5V z wysokim poziomem wyzwalań. Ponadto urządzenie zostało wyposażone w kamerę, która dokonywała rejestracji obrazu w trakcie realizacji badań celem wychwycenia momentu ewentualnego uszkodzenia połączeń. Na Rys. 5.7 przedstawiono komputer, za pośrednictwem którego dokonywano rejestracji obrazu z przebiegu badań.



Rys. 5.7. Komputer sterujący oraz rejestrujący obraz

Sprzężony z modułem Arduino Nano oraz kamerą komputer, poza rejestracją obrazu, odpowiadał za sterowanie i kontrolę przebiegu badań. W badaniach wykorzystano oprogramowanie Arduino IDE.

5.5. Przebieg badań

Każdy cykl otwarcia i zamknięcia drzwi trwał 3 sekundy i częściowo był wymuszony użytymi w badaniach zawiasami, które ze względu na zastosowane rozwiązania konstrukcyjne nie pozwalały na zwiększenie częstotliwości cyklu pracy głównie poprzez ograniczenie prędkości zamykania drzwi. Sytuację taką obserwowano pomimo wyłączenia w zastosowanych zawiasach opcji tzw. cichego domyku.

Badaniu poddano trzy warianty połączeń:

- płyta drewnopochodna CDF o grubości 12,4 mm z zawiasem przykręcanym,
- płyta drewnopochodna CDF o grubości 6,4 mm z zawiasem przyklejanym,
- płyta drewnopochodna CDF o grubości 12,4 mm z zawiasem przyklejanym.

Dla każdego wariantu badawczego wykonano badanie trzech próbek.

Każdą próbę przeprowadzano aż do zniszczenia połączenia lub osiągnięcia założonej liczby 85 000 cykli pracy.

5.6. Wyniki badań

Wszystkie próbki poddane badaniu, niezależnie od sposobu wykonania połączenia i grubości płyty drewnopochodnej przetrwały założony w badaniach 8-letni okres eksploatacji. Przebadane próbki poddano ocenie wizualnej, w trakcie której nie zaobserwowano uszkodzenia połączeń śrubowych czy połączeń klejonych. Jednakże po przeprowadzeniu poszczególnych serii badawczych obserwowano liczne uszkodzenia zawiasów. We wszystkich zawiasach wystąpiły luzy w mechanizmach, a w jednym przypadku zaobserwowano oderwanie się fragmentu mocowania zawiasu (Rys. 5.8).



Rys. 5.8. Uszkodzenie zawiasu powstałe w badaniach trwałości

Do zniszczenia wspomnianego elementu doszło w trakcie badania trwałości połączenia klejonego z wykorzystaniem płyty drewnopochodnej CDF o grubości 12,4 mm. Sytuację taką można tłumaczyć większą masą frontu meblowego wykorzystanego w badaniu, co w połączeniu ze stosunkowo wysoką liczbą cykli pracy w próbie wpłynęło w negatywny sposób na stan zawiasu, a w konsekwencji na jego zniszczenie.

5.7. Podsumowanie

Przeprowadzone badania trwałości połączeń klejonych na elementach konstrukcyjnych udowodniły, że proponowane rozwiązanie z powodzeniem może być wykorzystywane do trwałego łączenia okuć meblowych z frontami meblowymi zastępując stosowane dotychczas połączenia skręcane.

Przeprowadzone badania trwałości obejmujące 85 000 cykli pracy wykazały, że najsłabszą część całego połączenia stanowi zawias.

Użyte w badaniach zawiasy dedykowane wyłącznie połączeniom śrubowym oraz elementy łączące dostosowujące wspomniane zawiasy do połączeń klejonych, ze względu na brak dostępnych na rynku zawiasów przystosowanych wyłącznie do procesów klejenia frontów meblowych, stanowiły rozwiązanie doraźne o czym wspomniano w jednym z wcześniejszych rozdziałów niniejszej pracy. Dla potrzeb produkcji seryjnej na skalę przemysłową zaleca się stworzenie nowego typu trwalszych zawiasów meblowych dedykowanych wyłącznie połączeniom klejonym lub rozwiązań hybrydowych umożliwiających wykonanie dowolnego połączenia frontu meblowego z zawiasem.

6. WNIOSKI

W pracy przeprowadzono badania wytrzymałościowe nowego materiału, jakim jest płyta drewnopochodna CDF. Badania te wykazały, że materiał ten charakteryzuje się wyższą wytrzymałością niż standardowo stosowane w przemyśle meblarskim płyty MDF przy jednocześnie niższej masie wynikającej z możliwości stosowania cieńszych płyt umożliwiając dzięki temu lepsze wykorzystanie dostępnej przestrzeni, szczególnie w nietypowych zastosowaniach (jachty, kampery itp.). Do ważnych cech tego materiału należy również odporność na płomienie i na zachłapanie.

Badania połączeń klejonych wykazały, że w przypadku łączenia materiałów o różnych właściwościach wytrzymałościowych (stal – płyta drewnopochodna CDF) analizowane czynniki, takie jak np. szlifowanie powierzchni, pokrycie galwaniczne jednego z elementów może mieć wpływ na nośność połączenia. Zależności takiej nie stwierdzono w przypadku połączenia takich samych elementów (stal – stal).

Badania trwałościowe elementów meblowych z zastosowanymi połączeniami klejowymi lub przykręcanymi przeprowadzono na specjalnie w tym celu zbudowanym stanowisku, które w roku 2021 zarejestrowane zostało w Urzędzie Patentowym Rzeczypospolitej Polskiej pod numerem P.439220.

Przeprowadzone badania trwałości połączeń klejonych na elementach konstrukcyjnych wykazały, że połączenia klejone z powodzeniem mogą być stosowane do trwałego łączenia okuć meblowych z frontami meblowymi. Połączenia klejone łączące zarówno najmniej sztywne, jak i najcięższe płyty wytrzymały założoną liczbę 85 000 cykli pracy. Taką samą liczbę cykli wytrzymał zawias przykręcany łączący najgrubszą płytę. Na trwałość połączenia klejonego płyta meblowa – zawias meblowy może wpływać wytrzymałość wykorzystywanego zawiasu.

W celu wykonania poprawnego i estetycznego połączenia klejonego płyta meblowa – zawias meblowy zaleca się opracowanie nowego typu zawiasów meblowych z funkcją klejenia.

Poza wymienionymi wyżej wnioskami ogólnymi sformułowano szereg wniosków i spostrzeżeń szczegółowych:

1. Płyty drewnopochodne CDF o grubości 6,4 mm odznaczają się najwyższą wytrzymałością na rozciąganie.
2. W przypadku wytrzymałości na rozciąganie próbki wykonane z płyt drewnopochodnych CDF o grubości 10,4 mm i 12,4 mm odznaczały się zbliżoną wytrzymałością.
3. Analiza statystyczna wykonana dla modułu Younga E każdej z czterech grubości płyt wykazała, że na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ znaczące różnice występują jedynie dla grubości 12,4 mm. Przeprowadzona analiza nie wykazała występowania istotnych różnic w przypadku porównania wytrzymałości na rozciąganie R_m oraz wydłużenia przy zerwaniu A_t .

4. Najwyższą wytrzymałością w warunkach czteropunktowego zginania odznaczają się próbki bez otworów. Wykonanie otworów montażowych osłabia znacząco próbkę, a zamocowanie zawiasu w wykonanych otworach znacząco zmniejsza niekorzystne oddziaływanie otworów.
5. Spośród wszystkich trzech przebadanych w warunkach czteropunktowego zginania wariantów próbek badawczych, tj. bez otworów, z otworami, z otworami i zawiasami najwyższą wytrzymałością odznaczają się próbki o grubości 6,4 mm, zaś najmniejszą próbki o grubości 12,4 mm.
6. W przypadku naprężenia gnącego tylko próbki o grubości 12,4 mm różnią się znacząco od próbek o pozostałych grubościach.
7. Badania połączeń klejonych wykazały, że najwyższą wartość siły zrywającej dla połączenia płaskownika z elementami płyty drewnopochodnej odnotowano w przypadku próbek połączenia płaskownik niklowany – płyta drewnopochodna, którą szlifowano papierem ściernym o gradacji P80 i obciążano odważnikiem o masie 2 kg.

W ramach przyszłych prac dotyczących poruszonych w niniejszej rozprawie zagadnień konieczne wydaje się przeprowadzenie badań opracowanego nowego typu zawiasów meblowych z funkcją klejenia.

Badania dotyczące nowego materiału, jakim są płyty drewnopochodne CDF powinny być poszerzone o badania w obecności wilgoci, co znacząco podniosłoby stan wiedzy na temat możliwości jego zastosowania.

7. LITERATURA

- [1] Gozdecki C., Kociszewski M., Zajchowski S., Mirowski J., Badania kompozytów drzewno-polimerowych zawierających odpadowy materiał drzewny z produkcji płyt wiórowych, *Inżynieria i Apar. Chem.*, vol. 49, no. 5, 2010, pp. 41–42.
- [2] Miryuk O., Magnesia Composites Formation as a Result of Furniture Production Wood Waste Processing, *Environ. Clim. Technol.*, vol. 26, no. 1, 2022, pp. 836–847, doi: 10.2478/rtuct-2022-0063.
- [3] Jegorowa A. et al., Automatic Estimation of Drill Wear Based on Images of Holes Drilled in Melamine Faced Chipboard with Machine Learning Algorithms, *Forests*, vol. 14, no. 2, 2023, doi: 10.3390/f14020205.
- [4] Irle M., Thoemen H., Sernek M., *Wood-based panel technology*, Brunel University Press, 2010.
- [5] Bütün Buschalsky F. Y., Mai C., Repeated thermo-hydrolytic disintegration of medium density fibreboards (MDF) for the production of new MDF, *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 79, no. 6, 2021, pp. 1451–1459, doi: 10.1007/s00107-021-01739-6.
- [6] Sydor M., Branowski B., Nośność kątowych połączeń drewnopochodnych kompozytów z okuciowymi łącznikami, in *Konf: Metody i środki realizacji konkurencyjnych wyrobów przemysłu maszynowego*, 2005.
- [7] Sydor M., Właściwości konstrukcyjne półsztywnych kątowych połączeń płyt drewnopochodnych ze złączami, *Rozprawa doktorska pod kierunkiem B. Branowskiego*, Politechnika Poznańska.
- [8] Siwiec D., Pacana A., Zarz S., Kluczowe O. W. A., *Analiza identyfikacji przyczyny źródłowej problemu odklejającej się folii na froncie meblowym*, 2018, pp. 219–226.
- [9] Kokociński W., *Drewno pomiary właściwości fizycznych i mechanicznych*, Poznań: Prodruk, 2006.
- [10] Ciszewski A., Radomski T., Szummer A., *Materiałoznawstwo*, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2009.
- [11] Major M., Major I., *Wzmacnianie belek z drewna litego ciągniami stalowymi*, [w:] *Tradycyjne i współczesne budownictwo drewniane*, Częstochowa: Wyd. Politechniki Częstochowskiej, 2008.
- [12] Major M., Major I., *Zasady zbrojenia drewnianych elementów zginanych kompozytami włóknistymi*, [w:] *Tradycyjne i współczesne budownictwo drewniane*, Częstochowa: Wyd. Politechniki Częstochowskiej, 2007.
- [13] Grabowski W., *Budownictwo ogólne, Materiały i wyroby budowlane*, vol. 1., Warszawa, 2010.

- [14] Auriga R., Borysiuk P., Smulski P., Drewno jabłoni pochodzące z rocznego cięcia pielęgnacyjnego jako dodatek surowcowy przy produkcji płyt wiórowych, *Biul. Inf. OB-RPPD*, vol. 1–2, 2019, pp. 17–24.
- [15] Borysiuk P., Furmanik A., Wpływ warunków użytkowania na wybrane właściwości meblowych płyt wiórowych wykończonych filmem melaminowym *Impact of conditions of use on selected properties of furniture particleboards finished with melamine film*, *Biul. Inf. OBRPPD w Czarnej Wodzie*, vol. 4, 2019, pp. 107–117.
- [16] PN-EN 323:1999, Płyty drewnopochodne. Oznaczanie gęstości.
- [17] Oleńska S., Biernacka J., The influence of changing moisture content in three-layer chipboard for static bending strength, *Ann. Warsaw Univ. Life Sci. SGGW For. Wood Technol.*, vol. 115, 2021, pp. 95–100.
- [18] Nneka Anosike-Francis E. et al., Physical-Mechanical properties of wood based composite reinforced with recycled polypropylene and cowpea (*Vigna unguiculata* Walp.) husk, *Clean. Mater.*, vol. 5, 2022, p. 100101, doi: 10.1016/J.CLEMA.2022.100101.
- [19] Aicher S., Klöck W., Linear versus quadratic failure criteria for inplane loaded wood based panels, *Otto-Graf-Journal*, vol. 12, no. January 2001, 2001, pp. 187–199.
- [20] Bekhta P., Łęcka J., Morze Z., Short-term effect of the temperature on the bending strength of wood-based panels, *Holz als Roh- und Werkst.*, vol. 61, no. 6, 2003, pp. 423–424, doi: 10.1007/s00107-003-0423-4.
- [21] Szumilas B., Rozpoznawanie okuć, akcesoriów i łączników, Radom, 2006.
- [22] Krupanek J., Kalisz M., Michaliszyn-Gabryś B., Matejczyk M., Zarządzanie substancjami uznanymi za niebezpieczne w sektorze galwanotechnicznym, *Ochr. Przed Korozją W Prak.*, vol. 63, no. 11, 2020, pp. 369–373.
- [23] Alemayehu A., Beyene E., Batu T., Tirfe D., Analysis of High Temperature Oxidation Characteristic of Chrome-Plated, Nickel-Plated and Non-Plated Mild Steels, *Adv. Mech. Mater. Eng.*, vol. 40, 2023, pp. 215–228, doi: 10.7862/rm.2023.21.
- [24] PN-EN 12540:2002, Ochrona metali przed korozją. Elektrolityczne powłoki niklowe, nikiel-chrom, miedź-nikiel, miedź-nikiel-chrom.
- [25] Głowacka M., Szkodo M., Ocena jakości powłok galwanicznych Cr/Ni, *Probl. Eksploat.*, vol. 1, 2006, pp. 181–188.
- [26] Kołodziej M., Problemy z korozją powłok chromowych na stali, *Ochr. przed korozją*, vol. 64, no. 11, 2021, pp. 10–12.
- [27] Kukła D., Wyszowski M., Ocena grubości warstw i powłok z wykorzystaniem prądów wirowych, in *XXIV Seminarium NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW*, Zakopane, 2018, pp. 119–134.

- [28] Mekicha M. A., de Rooij M. B., Matthews D. T. A., Pelletier C., Jacobs L., Schipper D. J., The effect of hard chrome plating on iron fines formation, *Tribol. Int.*, vol. 142, 2020, p. 106003, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2019.106003.
- [29] Nguyen H. L., Lam V. P., Effects of Nickel Plating on Interference Fit between Medium Carbon Steel and Copper–Zinc Alloy Parts, *Metals (Basel)*, vol. 13, no. 2, 2023, p. 247, doi: 10.3390/met13020247.
- [30] Miturska I., Rudawska A., Możliwość podwyższania wytrzymałości połączeń klejowych blach ze stopu aluminium w aspekcie modyfikacji klejów epoksydowych, *Politechnika Lubelska*, 2020.
- [31] Kuczaszewski J., Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali. Lublin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 1995.
- [32] Czaplicki J., Ćwikliński J., Godzimirski J., Konar P., Klejenie tworzyw konstrukcyjnych, Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1987.
- [33] Kuczaszewski J., Technologia śmigłowców: teoria i technika klejenia. Lublin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 1990.
- [34] Sikora R., Podstawy przetwórstwa tworzyw wielkocząsteczkowych, Lublin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 1992.
- [35] Rudawska A., Kuczaszewski J., Klejenie blach ocynkowanych. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2005.
- [36] Żenkiewicz M., Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2000. [Online]. Available: <https://home.agh.edu.pl/~kmr/instrukcje/zwilzalnosc.pdf>
- [37] Mirski Z., Piwowarczyk T., Podstawy klejenia, kleje i ich właściwości, *Przegląd Spaw.*, vol. 80, no. 8, 2008, pp. 12–21.
- [38] Godzimirski J., Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2002.
- [39] Szychaj T., Farby i kleje wodorozcieńczalne, Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1996.
- [40] Godzimirski J., Problemy klejenia konstrukcyjnego, *Technol. i Autom. Montażu*, vol. 1, 2009, pp. 25–31.
- [41] Rudawska A., Operacje specjalne w technologii klejenia blach ocynkowanych, *Technol. i Autom. Montażu*, vol. 2–3, 2007, pp. 100–103.
- [42] Kumar A., Kumar K., Ghosh P. K., Rathi A., Yadav K. L., Raman, MWCNTs toward superior strength of epoxy adhesive joint on mild steel adherent, *Compos. Part B Eng.*, vol. 143, 2018, pp. 207–216, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2018.01.016.

- [43] Stratakis D., Ayre D., Yazdani Nezhad H., Performance of aerospace composites in the presence of process-induced defects, in *Composites Assembly for High Performance Fastener-less Structures*, Institution of Engineering and Technology, 2022, pp. 507–536. doi: 10.1049/PBME015E_ch14.
- [44] Maćkowiak P., Analiza wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej zakładkowych połączeń klejonych wykonanych z materiałów o różnych właściwościach mechanicznych, Politechnika Bydgoska, Bydgoszcz, 2021.
- [45] Habenicht G., *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*, 2009.
- [46] Bittmann B., Hauptert F., Schlarb A. K., Ultrasonic dispersion of inorganic nanoparticles in epoxy resin, *Ultrason. Sonochem.*, vol. 16, no. 5, 2009, pp. 622–628, doi: 10.1016/j.ultsonch.2009.01.006.
- [47] Rośkowicz M., Rożek M., Zasada D., Wpływ sposobu mieszania kleju na wytrzymałość doraźną połączeń klejonych, *Technol. i Autom. Montażu*, vol. 3, 2014, pp. 213–216.
- [48] da Silva L. F. M., Öchsner A., Adams R. D., *Handbook of adhesion technology*, Heidenberg: Springer, 2011.
- [49] He X., Effect of mechanical properties of adhesives on stress distributions in structural bonded joints, *WCE 2010 - World Congr. Eng. 2010*, vol. 2, no. January, 2010, pp. 1168–1172.
- [50] Gołębiewski J., Nanokompozyty polimerowe. Struktura, metody wytwarzania i właściwości, *Przem. Chem.*, vol. 83, no. 1, 2004, pp. 15–20.
- [51] Chester R. J., Walker K. F., Chalkley P. D., Adhesively bonded repairs to primary aircraft structure, *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 19, no. 1, 1999, pp. 1–8, doi: 10.1016/S0143-7496(98)00014-1.
- [52] Abrahamsen R. B., Malo K. A., Structural design and assembly of “treet” - A 14-storey timber residential building in Norway, in *WCTE 2014 - World Conference on Timber Engineering, Proceedings*, 2014, pp. 3–10.
- [53] Dmitruk M., Zastosowanie drewna klejonego w konstrukcji budynków wysokościowych, na przykładzie realizacji z krajów zachodnich, *Teka Kom. Archit. Urban. i Stud. Kraj.*, vol. 16, no. 2, 2020, pp. 76–87, doi: 10.35784/teka.1689.
- [54] Goss B., Bonding glass and other substrates with UV curing adhesives, *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 22, no. 5, 2002, pp. 405–408, doi: [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(02\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(02)00022-2).
- [55] Mirski Z., Piwowarczyk T., Composite adhesive joints of hardmetals with steel, *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 10, no. 3, 2010, pp. 83–94, doi: 10.1016/S1644-9665(12)60138-1.

- [56] Frihart C. R., Hunt C. G., Chapter 10: Wood Adhesives: Bond Formation and Performance, in *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. General Technical Report FPL-GTR-282, 2021, pp. 10.1-10.22.
- [57] Yu X. et al., Preparation of wood-based panel composites with poplar veneer as the surface layer modified by in-situ polymerization of active monomers, *Forests*, vol. 11, no. 8, 2020, doi: 10.3390/F11080893.
- [58] Efimova T., Ishchenko T., Sedliačik J., Development of laminating methods of wood based panels with thin decorative veneer of valuable wood species, *Acta Fac. Xylologiae*, vol. 60, no. 2, 2018, pp. 143–152, doi: 10.17423/afx.2018.60.2.14.
- [59] Altinok M., Taş H. H., Çimen M., Effects of combined usage of traditional glue joint methods in box construction on strength of furniture, *Mater. Des.*, vol. 30, no. 8, 2009, pp. 3313–3317, doi: 10.1016/J.MATDES.2008.12.004.
- [60] Demirel S., Tor O., Yu X., Zhang J., LATERAL LOADS OF STAPLED – GLUED SURFACE-TO-SURFACE JOINTS IN ORIENTED STRANDBOARD FOR FURNITURE, *Wood Fiber Sci.*, vol. 50, no. 3, 2018, pp. 280–290.
- [61] Branowski B., Zablocki M., Sydor M., Experimental analysis of new furniture joints, *BioResources*, vol. 13, no. 1, 2018, pp. 370–382, doi: 10.15376/biores.13.1.370-382.
- [62] Ziółkowski W., Kotyk M., Maćkowiak P., Wpływ grubości elementów łączonych na wytrzymałość zakładkowego połączenia klejonego, *POSTĘPY W INŻYNIERII Mech.*, vol. 13, no. 7, 2019, pp. 73–81.
- [63] Aruova L. B., Ospanova Z. N., Aruov B. B., Alibekova N. T., Shashpan Z. A., Kyrgyzbaev A. T., Cyclic Tests of Joints of Glued Wooden Structures, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/829/1/012017.
- [64] Záborský V., Boruvka V., Kašicková V., Ruman D., Effect of wood species, adhesive type, and annual ring directions on the stiffness of rail to leg mortise and tenon furniture joints, *BioResources*, vol. 12, no. 4, 2017, pp. 7016–7031, doi: 10.15376/biores.12.4.7016-7031.
- [65] Záborský V., Borůvka V., Ruman D., Gaff M., Effects of Geometric Parameters of Structural Elements on Joint Stiffness, *BioResources*, vol. 12, no. 1, 2017, pp. 932–946, doi: 10.15376/biores.12.1.932-946.
- [66] Barboutis I., Kamperidou V., Shear strength of beech wood joints bonded with commercially produced PVAc D3 adhesives, *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 105, 2021, p. 102774, doi: 10.1016/J.IJADHADH.2020.102774.
- [67] Ascione F., Lamberti M., Razaqpur A. G., Spadea S., Strength and stiffness of adhesively bonded GFRP beam-column moment resisting connections,

- Compos. Struct., vol. 160, 2017, pp. 1248–1257, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2016.11.021.
- [68] Atar M., Gode F., Kucuktuvek M., Akan A. E., Ormecioglu H. T., Keskin H., Tensile Performance of Traditional and Modern Corner Joints in Wooden Structures, *Drv. Ind.*, vol. 73, no. 1, 2022, pp. 69–80, doi: 10.5552/drvind.2022.2106.
- [69] Demirci S., Kasal A., Acar M., Kuskun T., Tensile shear strengths of some tropical woods bonded with different adhesives, *Proc. 27th Int. Conf. Res. Furnit. Ind.*, no. September, 2015, pp. 450–457.
- [70] Džinčić I., Živanić D., The influence of fit on the distribution of glue in oval Tenon/Mortise joint, *Wood Res.*, vol. 59, no. 2, 2014, pp. 297–302.
- [71] Bumgardner M. S., Nicholls D. L., Sustainable practices in furniture design: A literature study on customization, biomimicry, competitiveness, and product communication, *Forests*, vol. 11, no. 12, 2020, pp. 1–16, doi: 10.3390/f11121277.
- [72] Mylavarapu P., Woldesenbet E., Non-destructive characterization of bondlines in composite adhesive joints, *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 7, 2006, pp. 647–660, doi: 10.1163/156856106777412455.
- [73] Tamborrino R., Palumbo D., Galiotti U., Aversa P., Chiozzi S., Luprano V. A. M., Assessment of the effect of defects on mechanical properties of adhesive bonded joints by using non destructive methods, *Compos. Part B Eng.*, vol. 91, 2016, pp. 337–345, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2016.01.059.
- [74] Rudawska A., *Oprzrządzowanie w technologii klejenia*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2016.
- [75] Majda P., Skrodzewicz J., A modified creep model of epoxy adhesive at ambient temperature, *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 29, no. 4, 2009, pp. 396–404, doi: 10.1016/J.IJADHADH.2008.07.010.
- [76] Godzimirski J., Tkaczuk S., Modelowanie spoin klejowych w obliczeniach MES, *Biul. WAT*, vol. LIX, no. 4, 2010, pp. 399–410.
- [77] PN-EN 1465-2009, Kleje. Oznaczanie wytrzymałości na ścianie przy rozciąganiu połączeń na zakładkę.
- [78] PN-69/C-89300, Kleje do metali. oznaczanie wytrzymałości na ścinanie.
- [79] Rozumek D., Hepner M., Faszynka S., Badania zmęczeniowe na zginanie stopów PA6 i PA7 nieutwardzonych i po utwardzaniu wydzieleniowym in, *Mechanik*, vol. 3, no. 3, 2015, pp. 246–249.
- [80] www.swisskrono.com/pl-pl/produkty/produkty-meblowe/swisscdf/#/.
- [81] PN-EN ISO 3167:2014-09E, Tworzywa sztuczne - Uniwersalne kształtki do badań.

- [82] Bullough C. K., The determination of uncertainties in dynamic Young's modules, Stand. Meas. Test. Proj. No. SMT4-CT97-2165, no. 1, 2000.
- [83] Arendarski J., Niepewność pomiarów, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006.
- [84] PN-EN ISO 527-2:2012, Oznaczanie właściwości przy rozciąganiu tworzyw sztucznych - Część 2: Warunki badania tworzyw sztucznych do formowania i wytłaczania.
- [85] StatSoft, Elektroniczny Podręcznik Statystyki PL.
- [86] Rabiej A., Analizy statystyczne z programami Statistica i Excel, Gliwice: Helion, 2018.
- [87] Youngquist J. A., Wood-based composites and panel products," in Wood handbook : wood as an engineering material. General technical report FPL, GTR-113, Madison, WI: USDA Forest Service.
- [88] Jakimovska Popovska V., Iliev B., Spiroski I., "Characteristics of medium density fiberboards for furniture production and interior application, South East Eur. J. Archit. Des., vol. 201, 2016, p. 10013.
- [89] PN-EN 10020:2003, Definicja i klasyfikacja gatunków stali
- [90] PN-EN 10025-2:2007, Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych – Część 2: Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych niestopowych"
- [91] PN-EN 10130:2009, Wyroby płaskie walcowane na zimno ze stali niskowęglowych do obróbki plastycznej na zimno - Warunki techniczne dostawy.
- [92] PN-EN 10002, Metale - Próba rozciągania - Część 1: Metoda badania w temperaturze otoczenia.
- [93] Lachowicz M. B., Lachowicz M. M., Właściwości użytkowe, projektowe i technologiczne stali konstrukcyjnych klasyfikowanych według obowiązujących norm i stosowanych w budowie maszyn, Górnictwo Odkryw., 2013, pp. 103–109.
- [94] Seitzl S., Pokorný P., Miarka P., Klusák J., Kala Z., Kunz L., Comparison of fatigue crack propagation behaviour in two steel grades S235, S355 and a steel from old crane way, in MATEC Web of Conferences, K. Kotrasová, E. Kormaníková, and S. Kmeť, Eds., Mar. 2020, p. 00034. doi: 10.1051/matecconf/202031000034.
- [95] PN-EN ISO 21920-3:2022-06, Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) - Struktura geometryczna powierzchni: Profil - Część 3: Operatory specyfikacji.

STRESZCZENIE

Wpływ wybranych parametrów technologicznych na wytrzymałość złącza klejonego stosowanego w połączeniach elementów o różnych właściwościach mechanicznych

Słowa kluczowe: płyta drewnopochodna, zawias, klej, połączenie klejone, obróbka powierzchni, obciążenie, wytrzymałość, trwałość

W pracy przedstawiono zastosowania połączeń klejonych i zaprezentowano ich wady i zalety. Przeprowadzono przegląd metod badawczych materiałów i połączeń klejonych. Wykonano badania identyfikacyjne rozciągania oraz czteropunktowego zginania płyt drewnopochodnych CDF.

Wyniki rozciągania poddane analizie statystycznej wykonane dla modułu Younga E każdej z czterech grubości płyt wykazała, że na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ znaczące różnice występują jedynie dla grubości 12,4 mm. Przeprowadzona analiza nie wykazała występowania istotnych różnic w przypadku porównania wytrzymałości na rozciąganie R_m oraz wydłużenia A_t . Najwyższą wytrzymałością w warunkach czteropunktowego zginania odznaczają się próbki bez otworów. Wykonanie otworów montażowych osłabia znacząco próbkę, a zamocowanie zawiasu w wykonanych otworach zwiększa jej wytrzymałość. Spośród wszystkich trzech wariantów próbek badawczych, tj. bez otworów, z otworami, z zawiasami, najwyższą wytrzymałością odznaczają się próbki o grubości 6,4 mm, zaś najmniejszą próbki o grubości 12,4 mm.

Przeprowadzono badania wytrzymałości połączeń klejonych z uwzględnieniem zmiennych czynników, tj. grubość płyty, sposób przygotowania powierzchni płaskownika stalowego i płyty drewnopochodnej oraz grubość warstwy kleju. Badania połączeń płaskowników wykazały najwyższą średnią wartość siły zrywającej F dla próbek płaskownik niklowany – płaskownik niklowany obciążony odważnikiem o masie 1 kg (3097 N). Najwyższą średnią wartość siły zrywającej dla połączenia płaskownika z płytą drewnopochodną odnotowano dla próbek płaskownik niklowany – płyta drewnopochodna, którą szlifowano papierem ściernym o gradacji P80 i obciążano odważnikiem o masie 2 kg (2811,7 N). Badania wstępne wraz z przeprowadzoną analizą statystyczną pozwoliły na wybranie optymalnego połączenia płaskownika niklowanego z płytą drewnopochodną szlifowaną papierem ściernym o gramaturze P80 i obciążanego odważnikiem o masie 2 kg jako finalnej metody wykonania połączenia.

Badania trwałości połączeń klejonych przeprowadzono dla formatek z płyty CDF. Zastosowana liczba cykli wyniosła 85 000. We wszystkich przypadkach wykazano pełną trwałość połączeń klejonego. Najsłabszym elementem okazał się zawias meblowy.

SUMMARY

Influence of selected process parameters on the strength of a bonded joint used to join components with different mechanical properties

Keywords: wood-based board, hinge, glue, glued connection, surface treatment, load, strength, durability

The paper presents the applications of glued bonds and presents their advantages and disadvantages. Research methods for materials and glued bonds were reviewed. Identification tests of tension and four-point bending of CDF wood-based panels were performed.

Statistically analyzed tensile results for Young's modulus E for each of the four plate thicknesses showed that at the assumed significance level of $\alpha = 0.05$, significant differences occur only for a thickness of 12.4 mm. The analysis carried out did not show any significant differences when comparing the tensile strength R_m and elongation at rupture A_t . Samples without holes have the highest strength under four-point bending conditions. Making mounting holes significantly weakens the sample, and attaching the hinge in the holes increases its strength. Of all three variants of test samples, i.e. without holes, with holes, and with hinges, the samples with a thickness of 6.4 mm have the highest strength, and the samples with a thickness of 12.4 mm have the lowest strength.

Tests were carried out on the strength of glued bonds, taking into account variable factors, i.e. board thickness, method of preparing the surface of the steel flat bar and wood-based board, and the thickness of the adhesive layer. Tests of flat bar connections showed the highest average value of the breaking force F for nickel-plated flat bar samples – nickel-plated flat bar loaded with a 1 kg (3097 N) weight. The highest average value of the breaking force for the connection of a flat bar with a wood-based board was recorded for samples of a nickel-plated flat bar - wood-based board, which was sanded with P80 grit sandpaper and loaded with a 2 kg (2811.7 N) weight. Preliminary research and statistical analysis allowed us to select the optimal connection of a nickel-plated flat bar with a wood-based board sanded with P80 sandpaper and loaded with a 2 kg weight as the final connection method.

Tests on the durability of glued bonds were carried out for CDF board forms. The number of cycles used was 85,000. In all cases, full durability of glued bonds was demonstrated. The weakest element turned out to be the furniture hinge.