

Politechnika Śląska w Gliwicach  
Wydział Budownictwa  
Katedra Inżynierii Budowlanej

Mgr inż. Arkadiusz Bula

Rozprawa doktorska pod tytułem:

**Analiza doświadczalno-numeryczna  
połączeń klejonych w konstrukcjach stalowych**

Promotor:

dr hab. inż. Jacek Hulimka, prof. PŚ

Promotor pomocniczy:

dr inż. Marcin Kozłowski

Gliwice, 2020 r.



There are agents in nature able to make the particles of joints stick together by very strong attraction and it is the business of experimental philosophy to find them out.

- sir Isaac Newton (1643-1727)



## Podziękowania

Chciałbym podziękować tym wszystkim, bez pomocy i wsparcia których praca ta nie mogłaby powstać.

Składam serdeczne podziękowania mojemu Promotorowi, dr hab. inż. Jackowi Hulimce prof. PŚ i Promotorowi pomocniczemu, dr inż. Marcinowi Kozłowskiemu za wszystkie udzielone porady naukowe i inżynierskie, pomoc przy badaniach laboratoryjnych i analizach numerycznych, a także wsparcie, cierpliwość oraz wyrozumiałość w trakcie przygotowywania pracy doktorskiej.

Punktem wyjściowym dla zawartych w rozprawie analiz doświadczalno-numerycznych były badania przeprowadzone przez mojego Promotora, dr hab. inż. Jacka Hulimkę prof. PŚ, prof. dr inż. Jana Kubicę oraz dr inż. Martę Kałużę. Pragnę im podziękować za podzielenie się wiedzą i doświadczeniem, które zdobyli w trakcie prowadzenia prac nad połączeniami klejowymi.

Dziękuję Panu dr inż. Błażejowi Chmielnickiemu oraz Panu dr inż. Sebastianowi Jurczykowi z Instytutu Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników w Gliwicach za nieocenioną pomoc przy wykonywaniu badań wytrzymałościowych oraz termicznych na próbkach kleju oraz inspirację do zgłębiania zagadnień naukowych związanych z tworzywami sztucznymi.

Dziękuję za pomoc w przygotowaniu i badaniu wzmocnionych belek dwuteowych Panom Tomaszowi Hahnowi oraz Karolowi Konopce z Laboratorium Wydziału Budownictwa oraz Panu Mieczysławowi Kotowi za wykonanie optycznych badań pomiarowych.

Zakup materiałów do badań laboratoryjnych został częściowo sfinansowany w ramach grantów BKM-504/RB-6/2017, BK-237/RB6/2018 i BKM-547/RB6/2018. Dziękuję również wszystkim firmom, które udostępniły materiały lub usługi na potrzeby przedstawionych w rozprawie badań.

Analizy numeryczne w programie ABAQUS zostały wykonane w ramach grantu: Badanie połączeń klejonych (*Research of bonding connections*) – badanie 1, w Akademickim Centrum Komputerowym AGH-Cyfronet.

Dziękuję też mojej Rodzinie, a w szczególności Żonie, za otuchę oraz wsparcie w czasie tych wszystkich lat, kiedy praca nad rozprawą doktorską odbywała się kosztem życia rodzinnego.

Arkadiusz Bula

Gliwice, czerwiec 2020 r.



## Spis treści

Podziękowania.....	I
Spis treści.....	III
Wybrane oznaczenia i skróty stosowane w pracy.....	VII
1. Wprowadzenie.....	1
1.1. Wstęp.....	1
1.2. Zalety i wady połączeń klejonych.....	2
1.3. Cel i zakres pracy .....	4
1.4. Tezy i ograniczenia.....	5
1.5. Plan pracy .....	6
2. Przegląd literatury.....	9
2.1. Wybrane cechy klejów .....	9
2.1.1. Adhezja.....	9
2.1.2. Kohezja.....	10
2.1.3. Rodzaje zniszczenia .....	11
2.1.4. Rodzaje klejów .....	11
2.1.5. Polimetakrylan metylu P(MMA) .....	13
2.2. Krótki przegląd badań w wybranym zakresie.....	14
2.3. Analizy numeryczne.....	18
2.3.1. Kryterium zniszczenia.....	18
2.3.2. Metody modelowania połączeń.....	20
2.3.3. Efekty przyjętego sposobu modelowania.....	22
3. Badania laboratoryjne (mechaniczne) kleju .....	25
3.1. Zakres wykonanych badań.....	25
3.2. Wytrzymałość na rozciąganie .....	25
3.2.1. Metodyka badania wg norm [67], [68].....	25
3.2.2. Wyniki badań laboratoryjnych .....	27
3.2.3. Analiza szybkości przyrostu wytrzymałości .....	29

3.3. Parametry reologiczne.....	30
3.3.1. Metoda wyznaczania .....	30
3.3.2. Wyniki.....	32
3.3.3. Analiza numeryczna.....	34
3.3.4. Wnioski .....	36
3.4. Wytrzymałość na ścinanie .....	37
3.4.1. Badanie na próbkach SLJ [73] .....	37
3.4.2. Badanie na próbkach typu TAST [74] .....	39
3.4.3. Badanie metodą punch-tool [75].....	40
3.4.4. Porównanie wyników .....	42
3.4.5. Analiza numeryczna.....	44
3.4.6. Wnioski .....	47
3.5. Wytrzymałość na ściskanie .....	49
3.5.1. Metodyka badań .....	49
3.5.2. Wyniki badań laboratoryjnych.....	49
3.6. Przyczepność .....	50
3.6.1. Metodyka badań .....	50
3.6.2. Wyniki badań laboratoryjnych.....	51
3.6.3. Analiza numeryczna.....	53
3.6.4. Wnioski .....	56
4. Badania laboratoryjne (termiczne) kleju .....	59
4.1. Wstęp do badań .....	59
4.2. Analiza termiczna podczas wiązania próbki kleju [8] .....	59
4.2.1. Badanie termowizyjne.....	59
4.2.2. Analiza DSC.....	61
4.2.3. Porównanie wyników .....	62
4.3. Analiza DMTA – ścinanie próbki [79], [80].....	63
4.3.1. Metodyka badania .....	63
4.3.2. Wyniki badań .....	64



4.3.3. Analiza wyników – krzywe wiodące .....	66
4.4. Analiza TGA .....	70
5. Badania i analizy numeryczne połączeń klejonych.....	73
5.1. Założenia do numerycznego modelu materiałowego w połączeniach klejonych	73
5.1.1. Wstęp.....	73
5.1.2. Model materiałowy kleju.....	74
5.1.3. Model materiałowy warstwy kontaktowej .....	77
5.1.4. Model materiałowy stali .....	78
5.2. Analiza numeryczna połączenia zakładkowego.....	78
5.2.1. Charakterystyka złącza.....	78
5.2.2. Badania laboratoryjne [41].....	79
5.2.3. Analiza numeryczna .....	80
5.2.4. Wnioski .....	87
5.3. Wzmocnienie belek stalowych IPE120 .....	87
5.3.1. Charakterystyka złącza.....	87
5.3.2. Wyniki badań laboratoryjnych .....	90
5.3.3. Analiza numeryczna .....	94
5.3.4. Wnioski .....	107
6. Podsumowanie i wnioski.....	111
Bibliografia.....	115
Spis rysunków .....	123
Spis tabel .....	129
Streszczenie.....	131
Abstract.....	133



## Wybrane oznaczenia i skróty stosowane w pracy

### Litery greckie

$\beta_{DP}$	- kąt tarcia wewnętrznego materiału
$\beta_G, \gamma_G$	- współczynnik kształtu w definicji sigmoidalnej funkcji
$\tan \beta_{DP}$	- współczynnik podatności na uplastycznienie dla naprężeń hydrostatycznych
$\delta_n^0, \delta_s^0$	- przemieszczenie odpowiadające granicznym wartościom naprężeń
$\delta$	- przesunięcie fazowe pomiędzy funkcją naprężeń i odkształceń
$\tan \delta$	- współczynnik stratności, stosowany jako miara tłumienia w układzie lepko-sprężystym
$\delta_{avr}(f)$	- średnie przesunięcie fazowe w określonej częstotliwości dla kolejno rozważanych temperatur
$\delta_G$	- najniższa asymptota w definicji sigmoidalnej funkcji
$\varepsilon_y$	- odkształcenie podłużne próbki kleju
$\varepsilon_0$	- ustalone, niezmiennie odkształcenie podłużne próbki
$\varepsilon_H$	- graniczna wartość odkształcenia, dla którego zachowane jest prawo proporcjonalności Hook'a
$\varepsilon_T$	- odkształcenie rzeczywiste
$\varepsilon_t$	- rzeczywiste odkształcenie poprzeczne
$\varepsilon_T^P$	- rzeczywiste odkształcenie plastyczne
$\varepsilon_t^P$	- rzeczywiste plastyczne odkształcenie poprzeczne
$\varepsilon_s^P$	- odkształcenie plastyczne
$\varepsilon_{s,eff}^P$	- efektywne plastyczne odkształcenie ścinające
$\sigma_e, \sigma_p, \varepsilon_e, \varepsilon_p, \varepsilon_f$	- punkty charakterystyczne uproszczonego modelu sprężysto-liniowego
$\sigma(t)$	- funkcja naprężeń w czasie
$\sigma_{xx}$	- naprężenie podłużne w połączeniu
$\sigma_{yy}$	- naprężenie odrywające w połączeniu
$\sigma_T$	- naprężenie rzeczywiste
$\sigma_{s,eff}$	- efektywne naprężenie ścinające
$\lambda_G$	- współczynnik pozwalający na uzyskanie krzywej asymetrycznego kształtu w definicji sigmoidalnej funkcji
$\lambda_{DP}$	- parametr podatności na ciśnienie hydrostatyczne
$\nu$	- współczynnika Poissona
$\nu^P$	- rzeczywisty plastyczny współczynnik Poissona

- $\tau_{xy}$  - naprężenie ścinające w połączeniu
- $\chi_{LT}$  - normowy współczynnik zwężenia
- $\psi_{DP}$  - parametr umocnienia/płynięcia (*flow parameter*)

### Litery łacińskie

- $a_T$  - współczynnik przesunięcia (*shift factor*)
- $C_1, C_2$  - współczynniki wykorzystywane w metodzie WLF
- $d_{DP}$  - kohezja, czyli parametrem materiału związany z naprężeniami uplastyczniającymi przy ścinaniu
- $E$  - moduł sprężystości
- $E_0$  - wstępny (chwilowy) moduł sprężystości
- $E_{PN-EN}$  - normowy moduł sprężystości podłużnej
- $E(t)$  - funkcja relaksacji (zmiany sztywności w czasie)
- $f_r$  - częstotliwość zredukowana
- $f_{DP}$  - funkcja plastyczności wg kryterium Druckera-Pragera
- $G$  - moduł sprężystości poprzecznej
- $G_{cI}, G_{cII}$  - energia niezbędna do utworzenia pary powierzchni dla rozciągania (I) i ścinania (II)
- $g_i, \tau_i$  - współczynniki Prony
- $G'$  - moduł zachowawczy
- $G''$  - moduł stratności
- $G^*$  - zespolony moduł ścinania
- $G^*(T_j, f)$  - moduł zespolony otrzymany z badania dla określonej częstotliwości i kolejno rozważanych temperatur
- $G^*(T_j+1, f)$  - przewidywany (przesunięty / zmodyfikowany) moduł zespolony w stosunku do temperatury odniesienia  $T_j$
- $G_{PN-EN}$  - normowy moduł sprężystości poprzecznej
- $\Delta H$  - całkowita zmiana entalpii
- $i$  - moduł urojony, opisuje przesunięcie fazowe
- $p_{DP}$  - średnie naprężenie hydrostatyczne
- $R(t)$  - funkcja relaksacji w czasie
- $R_{meas}(t)$  - funkcja relaksacji w czasie, na podstawie wyników badań
- $R_{pred}(t)$  - funkcja relaksacji w czasie, na podstawie obliczeń analitycznych
- $t$  - czas
- $T$  - temperatura

- $t_n^0, t_s^0, t_t^0$  - graniczne wartości naprężeń dla rozciągania i ścinania
- $T_{ref}$  - temperatura odniesienia
- $t_{DP}$  - naprężenie efektywne definiowane jako składowa naprężeń głównych

### Skróty

- CFRP - *Carbon Fiber Reinforced Polymer*, kompozyt zbrojony włóknem węglowym z polimerową osłoną
- CZM - *Cohesive Zone Modeling*, modelowanie strefy kohezynnej
- DIC - *Digital Image Correlation*, cyfrowa korekcja obrazu
- DMTA - *Dynamic-Mechanic Thermal Analysis*, dynamiczno-mechaniczno-termiczna analiza
- DSC - *Differential Scanning Calorimetry*, metoda różnicowej kalorymetrii skaningowej
- GLAM - *Generalized Logistic Sigmoidal Model*
- GMNIA - *Geometrically and Materially Nonlinear Imperfection Analysis*, geometrycznie i materiałowo nieliniowa analiza z uwzględnieniem imperfekcji
- LEFM - *Linear Elastic Fracture Mechanics*, liniowo sprężysta mechanika pękania
- MES - Metoda Elementów Skończonych
- P(MMA) - *Poli (Methyl MethAcrylate)*, polimetakrylan metylu
- SDEG - *overall scalar Stiffness DEGradation*, ogólna zmienna uszkodzenia, która uwzględnia łączny efekt wszystkich aktywnych mechanizmów zniszczenia
- SLJ - *Single Lap Joint*, połączenie zakładkowe, jednostronne
- TAST - *Thick Adherend Shear Test*, badanie ścinania na grubych elementach łącznych
- TGA - *ThermoGravimetric Analysis*, analiza termogravimetryczna
- XFEM - *eXtended Finite Element Method*, rozszerzenie metody elementów skończonych



# 1. Wprowadzenie

## 1.1. Wstęp

Pierwsze konstrukcyjne połączenia klejone stosowane były już w pierwszej połowie 20. wieku. Na podstawie badań Pierra Castana z 1936 r., w wyniku których otrzymano żywice epoksydowe, bardzo dobrze nadające się do łączenia metali, firma Ciba rozpoczęła przemysłową produkcję tych żywic w 1946 r. Początkowo żywice epoksydowe stosowane były głównie w przemyśle lotniczym, później jednak znalazły zastosowanie również w branży motoryzacyjnej, budownictwie i medycynie. Znaczny rozwój połączeń spawanych w konstrukcjach stalowych w drugiej połowie 20. wieku sprawił, że połączenia klejone w budownictwie stalowym nie były rozwijane i nie weszły do powszechnego stosowania. Niemniej, kleje są dziś z powodzeniem stosowane w przypadku wykonywania konstrukcji z drewna klejonego lub tworzyw sztucznych, wykonywania wzmocnień istniejących konstrukcji (niezależnie od materiału), w konstrukcjach zespolonych stalowo-żelbetowych, czy do kotwienia śrub stalowych w betonie. Ciekawym przykładem zastosowania połączeń klejonych jest IBM Travelling Pavilion (rys. 1), gdzie spoiny klejowe zapewniają współpracę elementów konstrukcyjnych z obudową (w zakresie elementów ze stali nierdzewnej, aluminium, drewna klejonego i płyt z poliwęglanu).



Rys. 1 IBM Travelling Pavilion [1]

Wraz z rozwojem technologii produkcji różnego rodzaju klejów, na przestrzeni lat zmianom ulegały również metody obliczania naprężeń w spoinach klejowych. Począwszy od uproszczonego podejścia Volkersena (1938 r.) [2], [3], gdzie uwzględniona została sztywność elementów łączonych, aż po bardzo złożone metody analityczne, jak np. Adamsa i Mallika (1992 r.) [2], [3], [4], w których dopuszczano możliwość uplastycznienia materiału wraz z uwzględnieniem mechanizmu zniszczenia kleju. W obliczeniach wciąż występowała jednak potrzeba uwzględniania dodatkowych efektów, pozwalających na możliwie wierne odwzorowanie rzeczywistego zachowania się zarówno klejów, jak i łączonych elementów. Świadomość mnogości czynników i złożoności połączeń, często wykraczających poza możliwości ujęcia we wzorach analitycznych, doprowadziły do konieczności wykorzystania obliczeń komputerowych. Do analiz numerycznych wykorzystuje się najczęściej MES, dzięki czemu w stosunkowo łatwy sposób można otrzymać rozkłady naprężeń przy uwzględnieniu sztywności wszystkich komponentów połączenia (z modelowaniem ich zmian w czasie) oraz ich dowolnych kształtów. Możliwa jest również analiza naprężeń w zakresie plastycznym lub kruchego zniszczenia materiałów tworzących połączenia, przy wykorzystaniu złożonych modeli materiałowych i algorytmów obliczeniowych.

### **1.2. Zalety i wady połączeń klejonych**

Obecnie w połączeniach konstrukcji stalowych stosuje się łączniki mechaniczne (najczęściej śruby) albo spawanie elementów. W obydwu przypadkach elementy łączące mają wytrzymałość oraz inne cechy zbliżone do łączonej stali. W budownictwie projektanci zazwyczaj dążą, aby połączenia nie były najsłabszymi miejscami konstrukcji, ponieważ ich zniszczenie zazwyczaj nie jest poprzedzone widocznymi odkształceniami i może mieć gwałtowny charakter. Dodatkowo, a może przede wszystkim, połączenia z wykorzystaniem śrub lub spawania mają swoje umocowanie w normach [5], [6].

Wykorzystanie klejów w połączeniach typu stal-stal niesie obawy związane przede wszystkim z faktem, że wytrzymałość klejów jest zazwyczaj kilkukrotnie mniejsza niż stali. Pomimo tego, co nie jest aż tak oczywiste, połączenia klejone mają wiele korzyści. Jedną z nich jest brak dodatkowych naprężeń termicznych, jak ma to miejsce w przypadku spawania – bowiem podczas wiązania typowych klejów temperatura zazwyczaj nie



przekracza 120°C [3], [7], [8]. Połączenia śrubowe mają charakter quasipunktowy, spoiny są zazwyczaj łącznikami liniowymi, natomiast spoiny klejowe tworzą powierzchnię kontaktową, co pozwala na wyraźne zmniejszenie naprężeń w obszarze połączenia. Dodatkowo, niektóre kleje ze względu na swoją podatność umożliwiają redystrybucję naprężeń na większą powierzchnię spoiny, podczas gdy w przypadku spawania oraz stosowania łączników mechanicznych mamy do czynienia z nagłą (skokową) zmianą kształtu wykresu naprężeń. Nierównomierny rozkład naprężeń wiąże się z powstaniem w spoinach karbów, które powodują spadek wytrzymałości zmęczeniowej stali [9], czego nie obserwuje się w przypadku połączeń klejonych. Zastosowanie klejenia daje również możliwość redukcji ciężaru konstrukcji, co wykorzystywane jest przede wszystkim w przemyśle lotniczym [10]. Stosowanie połączeń klejonych daje również możliwość łączenia ze sobą różnych gatunków stali, bez niebezpieczeństwa powstania ogniw korozyjnych występujących w przypadku łączenia np. stali nierdzewnej ze zwykłą stalą węglową, a także możliwość łączenia stali z innymi materiałami – jak w przypadku połączeń stal-CFRP. Obecnie w budownictwie kleje stosowane są najczęściej do wykonywania wzmocnień istniejącej konstrukcji [11], [12], [13] – tego typu rozwiązania pozwalają na uniknięcie konieczności odtwarzania powłok antykorozyjnych w miejscach styku, a w przypadku zastosowania systemów malarskich o wysokiej przyczepności eliminują konieczność mechanicznego przygotowania powierzchni stali do klejenia, np. metodą piaskowania.

Niechęć do stosowania w praktyce projektowej stalowych połączeń klejonych spowodowana jest jednak przede wszystkim brakiem norm dotyczących tego typu złączy. Kleje należą do materiałów bardzo czułych na szereg czynników zewnętrznych oraz wykonawczych, dlatego bez umocowanych w normach współczynników materiałowych oraz obliczeniowych trudno jest określić z wymaganą pewnością nośność i podatność takich połączeń – obecnie jedyną możliwością są dodatkowe badania laboratoryjne. Stąd podejmowane są inicjatywy europejskie mające na celu certyfikację nośnych połączeń klejonych, jak np. akcja COST [14] – daleko jednak jeszcze do wprowadzenia odpowiednich norm.

Pomimo wciąż niskiej popularności połączeń klejonych w budownictwie, na rynku dostępnych jest bardzo wiele klejów określanych jako konstrukcyjne – o różnych

własnościach mechanicznych, zwykle tylko sygnalizowanych w kartach technicznych. Producenci zazwyczaj ograniczają tu dane do wytrzymałości na rozciąganie i ścinanie, sztywności oraz odkształcalności, otrzymanych w warunkach laboratoryjnych w próbach statycznych. Wielkości te są zwykle mylące, dotyczą bowiem wielkości uzyskanych w normowych badaniach (nie zawsze z powołaniem na daną normę) w kontrolowanych warunkach temperatury i wilgotności. Tym samym przedstawiają one obraz słabo przystający do rzeczywistych warunków panujących w połączeniach konstrukcyjnych, gdzie relatywnie cienka warstwa kleju jest silnie skrępowana sztywnymi elementami stalowymi, a dodatkowo narażona na szereg czynników nieuwzględnionych w badaniach normowych, w tym: promieniowanie UV, zmienną w szerokim zakresie temperaturę i wilgotność, czynniki chemiczne, a także rodzaj działających obciążeń (w tym o charakterze szybkozmiennym lub zmęczeniowym). W praktyce projektowej wpływ każdego z tych czynników powinien być zbadany i uwzględniony w procedurach projektowania złączy klejowych. Brak większości z wymienionych danych oraz niedostosowanie badań normowych do rzeczywistych warunków pracy połączeń klejonych przerzucają na projektantów odpowiedzialność za przyjęte założenia – a to leży u podstaw bardzo ostrożnego podejścia do praktycznego zastosowania klejów w miejsce śrub lub spoin. Pewnym wyjątkiem są wspomniane już wzmocnienia istniejących konstrukcji, zwykle przy użyciu taśm lub mat zbrojonych włóknami niemetalicznymi – tu jednak projektanci zwykle bazują na wytycznych producenta danego systemu, gdzie stosowany jest ściśle określony klej, a sama procedura projektowania bazuje na wynikach badań.

### **1.3. Cel i zakres pracy**

Celem pracy jest rozwinięcie wiedzy na temat połączeń konstrukcyjnych elementów stalowych przy użyciu wybranego kleju polimetakrylowego P(MMA) – Plexus MA 420. W związku z powyższym w pracy skupiono się na następujących zadaniach:

- rozpoznanie wybranych cech kleju w zakresie koniecznym do wiarygodnego modelowania połączeń wykonanych przy jego użyciu,
- analiza wpływu wybranych czynników reologicznych na połączenia konstrukcyjne wykonane przy użyciu badanego kleju,
- określenie wybranych charakterystyk kleju w różnych temperaturach odniesienia,

- zaproponowanie metodyki modelowania numerycznego (w wybranym programie komercyjnym) połączeń stal-stal wykonanych przy użyciu badanego kleju.

Realizacja przedstawionych celów wymagała przeprowadzenia rozległych badań doświadczalnych oraz wielu analiz, w tym numerycznych, w związku z czym w zakres pracy weszły:

- przegląd literatury w celu przeanalizowania obecnego stanu wiedzy na temat połączeń klejonych w konstrukcjach stalowych, w szczególności w zakresie stosowania klejów metakrylowych P(MMA),
- badania wybranych parametrów wytrzymałościowych przyjętego kleju, w celu wykorzystania w modelu numerycznym,
- badania termiczne kleju związane z szybkością wiązania, zmianą parametrów oraz stabilnością struktury materiału,
- analizy numeryczne dwustronnych zakładkowych połączeń klejowych (na podstawie badań obcych),
- badania nośności wzmocnionych belek dwuteowych wraz z analizami numerycznymi.

Wyboru kleju dokonano na podstawie wyników badań połączeń zakładkowych [15] i [16], współautorstwa promotora pracy doktorskiej.

#### **1.4. Tezy i ograniczenia**

W związku z faktem, że zagadnienia związane z analizami doświadczalno-numerycznymi połączeń klejonych P(MMA) w konstrukcjach stalowych nie były do tej pory obiektem licznych publikacji, a dostępne źródła nie wyczerpują dostatecznie tematu, w pracy sformułowano wymienione niżej tezy badawcze.

##### **Teza I**

Wzmocnienie belek dwuteowych, wykonane przy użyciu stalowych płaskowników połączonych z konstrukcją klejem metakrylowym, daje możliwość znacznego zwiększenia nośności doraźnej. Istnieje również możliwość przywrócenia pierwotnej nośności uszkodzonych belek, przez zastosowanie stalowych płaskowników połączonych z konstrukcją klejem metakrylowym.

Ograniczenia: Praca doktorska ograniczona została do określonych warunków prędkości przyrostu obciążenia, czasu badania i temperatury, przy zastosowaniu jednego, wybranego kleju.

### **Teza II**

Połączenia klejone wykonane w elementach konstrukcyjnych stanowią przewidywalne rozwiązanie oraz pozwalają na pełne wykorzystanie parametrów materiałowych stali.

Ograniczenia: W badaniach rozpatrywano jeden rodzaj kleju. Schemat statyczny ograniczono do belek wolnopodpartych w trzypunktowym teście zginania.

### **Teza III**

Analizy numeryczne połączeń klejonych umożliwiają wiarygodne obliczenie ich nośności, sztywności oraz wpływu zjawisk reologicznych.

Ograniczenia: Analizy ograniczono do połączeń zakładkowych oraz belek dwuteowych wzmocnionych nakładkami, w zakresie wybranego kleju metakrylowego.

## **1.5. Plan pracy**

Rozprawa doktorska złożona jest z 6 rozdziałów zawierających odrębne zagadnienia związane z tematem pracy.

Rozdział 1 zawiera wprowadzenie do badań, charakterystykę połączeń klejonych oraz określenie i zdefiniowanie problematyki pracy. Przedstawiono w nim również cel i zakres rozprawy oraz sformułowano jej tezy, wraz z ograniczeniami.

W rozdziale 2 zamieszczono przegląd literatury zawierający opis wybranych cech klejów, wykaz i krótki opis publikacji związanych z badaniami klejów metakrylowych oraz możliwością modelowania połączeń w analizach numerycznych.

W rozdziale 3 przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzanych na próbkach kleju w maszynach wytrzymałościowych. Określono tu główne parametry materiałowe wybranego kleju metakrylowego.

W rozdziale 4 przedstawiono wyniki analiz termicznych przeprowadzonych na próbkach wybranego kleju. Oszacowano zmienność charakterystyki kleju w zależności od temperatury oraz określono długość procesu wiązania.

W rozdziale 5 przedstawiono założenia do modelu numerycznego kleju metakrylowego oraz walidację wyników analiz numerycznych na podstawie obcych badań modelowych prezentowanych w literaturze. Parametry określone w rozdziale 3 posłużyły do stworzenia założeń do modelu materiałowego. Przedstawiono również wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych na wzmocnionych belkach dwuteowych oraz ich analizy numeryczne.

W rozdziale 6 zawarto podsumowanie przeprowadzonych badań, w aspekcie postawionych tez pracy. Rozdział zawiera również plan dalszych badań związanych z połączeniami klejonymi.



## 2. Przegląd literatury

### 2.1. Wybrane cechy klejów

#### 2.1.1. Adhezja

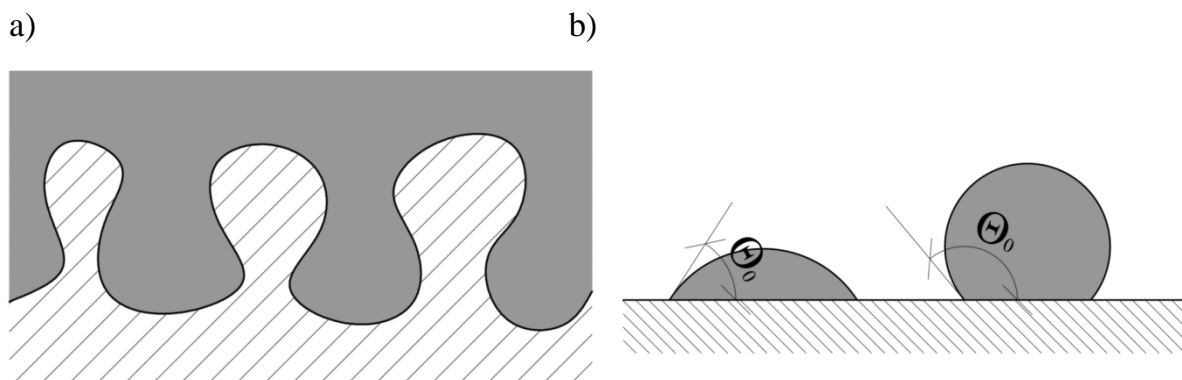
Głównymi czynnikami determinującym przyczepność klejów, zaproponowanymi w 1925 r. przez McBaina i Hopkinsa, były opory mechaniczne wprost wynikające z mechanicznego klinowania się kleju wypełniającego ubytki i pory łączonych materiałów [17] – rys. 2a. Jednakże późniejsze badania, wykazujące bardzo dobrą przyczepność części klejów do elementów gładkich (o niskiej chropowatości powierzchni) spowodowały, że uzależnienie adhezji tylko od mechanicznego klinowania się kleju w porach nie mogło zostać przyjęte jako uniwersalne [18]. Gent i Schultz [19] wykazali, że równie ważnym czynnikiem są interakcje międzyfazowe w kleju.

Podczas przygotowania elementów do wykonania złączy, najprościej jest zwiększyć przyczepność poprzez modyfikację łączonych powierzchni tak, aby zwiększyć ich chropowatość. W przypadku elementów stalowych zwykle wystarczające jest piaskowanie stali oraz odtłuszczenie jej powierzchni. Zwiększenie chropowatości powierzchni może być jednak nieskuteczne, jeżeli klej w trakcie formowania spoiny nie będzie w stanie wypełnić powstałych przestrzeni. Wpływ na właściwe wypełnienie porów mają dwa czynniki: napięcie powierzchniowe kleju oraz jego kąt kontaktu [20]. Napięcie powierzchniowe związane jest z siłami przyciągania międzycząsteczkowego i zależne jest od temperatury – wraz z jej wzrostem następuje spadek tych sił, co skutkuje tendencją powierzchni kleju (gęstej cieczy) do podziału na jak najmniejsze elementy. W efekcie, w podwyższonych temperaturach klej jest w stanie dokładniej wypełnić pory w elementach łączonych, przez co zwiększa się jego przyczepność po związaniu. Kąt kontaktu jest z kolei ściśle powiązany ze zdolnością kleju do pokrycia danej powierzchni – im mniejszy kąt, tym łatwiej dochodzi do rozptywu kleju po powierzchni – rys. 2b.

Jedną z możliwości poprawienia interakcji międzyfazowych w kleju jest zastosowanie warstwy gruntującej, tzw. primera, zazwyczaj w postaci cieczy rozprowadzanej na powierzchni przygotowywanej do klejenia. Zadaniem primera jest przede wszystkim zmniejszenia kąta tarcia pomiędzy niezwiązanym klejem a pokrytą powierzchnią,

co powoduje zmniejszenie kąta kontaktu i ułatwia rozplływ kleju; dodatkowo primer tworzy barierę chroniącą powierzchnię przed zabrudzeniami i korozją jeszcze przed klejeniem [20].

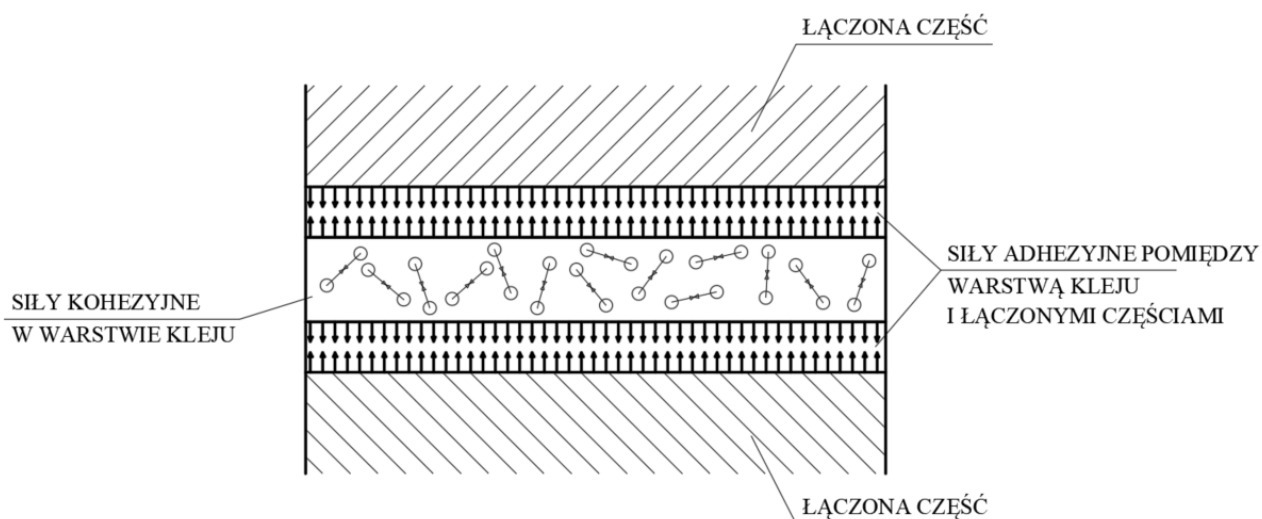
Badania adhezji mogą być wykonywane zgodnie z normą [21] na stemplach pomiarowych lub w badaniach odrywania płaskowników (*Peel test*).



Rys. 2 a) wypełnienie porów materialowych przez klej; b) oznaczenie kąta kontaktu

### 2.1.2. Kohezja

Kohezja odnosi się do sił międzycząsteczkowych wewnątrz danej substancji i ich zdolności do stawiania oporu podczas próby rozdzielenia jej na części [20]. Różni się ona w zależności od rodzaju i struktury danego kleju. Przyjmuje się, że miarą kohezji jest siła powodująca rozerwanie odpowiednio ukształtowanej próbki materiału, odniesiona do jednostki powierzchni jej przekroju poprzecznego [22], [23]. Na rys. 3 przedstawiono, w uproszczeniu, siły związane z adhezją i kohezją, występujące w warstwie kleju.

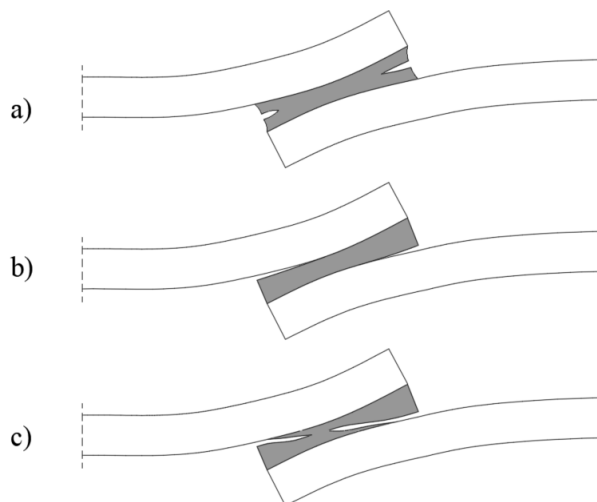


Rys. 3 Adhezyjne i kohezyjne siły występujące w warstwie kleju



### 2.1.3. Rodzaje zniszczenia

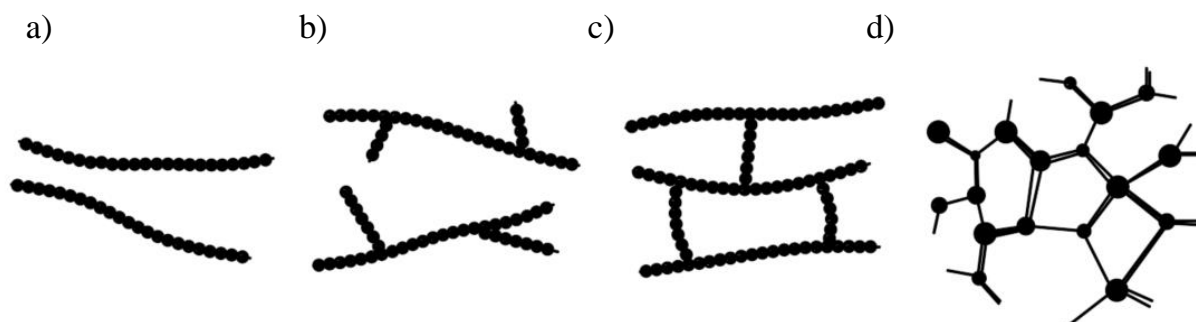
Graniczne naprężenia w spoinie klejowej związane są z adhezją, która zależy od kleju i podłoża oraz kohezją, która zależy od samego kleju. W spoinach występuje zazwyczaj złożony stan naprężeń, przez co do zniszczenia może dojść w różnych strefach połączeń. W zależności od rozkładu i przyrostu naprężeń oraz ich granicznych wartości w poszczególnych miejscach, w warstwie kleju wyróżnia się trzy rodzaje zniszczenia: kohezyjne, adhezyjne i mieszane (adhezyjno-kohezyjne), rys. 4.



Rys. 4 Rodzaje zniszczenia spoiny klejowej: a) kohezyjne; b) adhezyjne; c) adhezyjno-kohezyjne

### 2.1.4. Rodzaje klejów

Polimery są makromolekułami zbudowanymi z mniejszych molekuł nazywanych monomerami. Ze względu na strukturę molekularną, polimery można podzielić na liniowe, rozgałęzione, usieciowane i przestrzenne [3] – rys. 5, jednakże relatywnie słabe wiązania w polimerach o budowie liniowej i rozgałęzionej sprawiają, że większość klejów konstrukcyjnych ma budowę usieciowaną lub przestrzenną [24].



Rys. 5 Schematyczny model struktury molekularnej polimerów: a) liniowa; b) rozgałęziona; c) usieciowana; d) przestrzenna

Istnieje wiele kryteriów podziału klejów; jednym z głównych jest ich pochodzenie. Rozróżniamy tu kleje pochodzenia naturalnego oraz syntetycznego, które dzielą się na [25]:

- termoplastyczne – w trakcie wiązania nie dochodzi w nich do sieciowania, w związku z czym mogą być podgrzewane bez znacznego wpływu na ich właściwości; są to polimery twardniejące po schłodzeniu lub po odparowaniu rozpuszczalnika,
- termoutwardzalne – reakcje chemiczne podczas wiązania kleju mają miejsce zazwyczaj w temperaturze pokojowej lub nieco podwyższonej – proces wiązania nie wymaga dostarczenia dużych ilości ciepła; mają one gęsto usieciowaną strukturę,
- elastomery – materiały bazujące na syntetycznych lub naturalnie występujących polimerach, charakteryzujące się niewielką wytrzymałością, ale za to dużą odkształcalnością, przez co stosowane są zazwyczaj w elementach nieznacznie obciążonych; z zasady nie są to kleje konstrukcyjne.

Kolejnym kryterium podziału jest rodzaju monomerów tworzących klej; można tu wyróżnić:

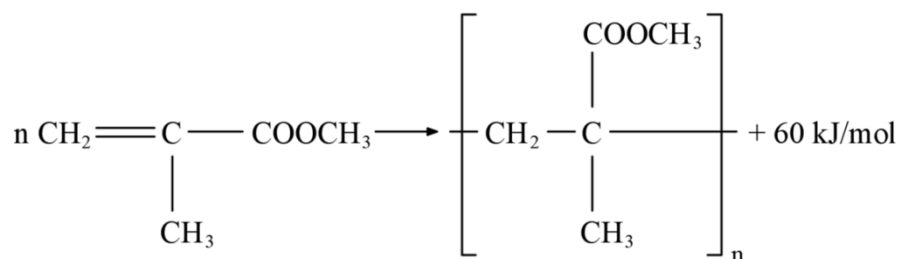
- kleje epoksydowe – mogą występować jako termoplastyczne lub częściej jako termoutwardzalne; czas wiązania klejów epoksydowych termoutwardzalnych jest zróżnicowany i może wynosić od kilkunastu minut do kilkunastu godzin [26]; mają one wiele zalet, takich jak wysoka wytrzymałość, duża sztywność, odporność chemiczna, niewielkie pęcznienie, mały skurcz; w zależności od rodzaju mogą być stosowane w zakresie temperatur od  $-50$  do  $+260^{\circ}\text{C}$  [27],
- kleje akrylowe – podobnie jak epoksydowe, mogą występować jako termoplastyczne i termoutwardzalne; w przypadku odmiany termoplastycznej klej składa się z dwóch akrylowych molekuł (metakrylanu metylu oraz kwasu akrylowego) które ze sobą kopolimeryzują; proces utwardzania może następować w temperaturze pokojowej, lecz może zostać przyspieszony przez podwyższenie temperatury lub dzięki działaniu promieni UV [27]; kleje akrylowe termoutwardzalne są z kolei polimerami w formie dwuskładnikowej – sieciują one w temperaturze pokojowej po połączeniu składników; należy wspomnieć, że same monomery akrylowe są łatwopalne w temperaturze  $\sim 10^{\circ}\text{C}$ , a tlen może działać na nie jak inhibitor, uniemożliwiając pełną polimeryzację miejsc spoiny wyeksponowanych na kontakt z powietrzem [1],

- kleje cyjanoakrylowe – występują w postaci ciekłych monomerów, które polimeryzują po wyciśnięciu z pojemnika [28]; zaletą klejów cyjanoakrylowych jest ich zdolność do łączenia się z wieloma różnymi powierzchniami oraz krótki czas wiązania, wynoszący czasem nawet kilka sekund w temperaturze pokojowej; do wad zaliczyć można dużą kruchość oraz pogarszanie się właściwości wraz ze wzrostem temperatury [27], [28],
- kleje uretanowe – występują w systemach termoplastycznych lub termoutwardzalnych; w stosunku do innych klejów konstrukcyjnych wykazują bardzo dobrą przyczepność w niższych temperaturach, są odkształcalne i wytrzymałe, natomiast ich czas wiązania w temperaturze pokojowej sięga 24 godzin [27], [28]; obecnie wykorzystywane są najczęściej w przemyśle motoryzacyjnym (ze względu na wytrzymałość), w przemyśle obuwniczym (z uwagi na odkształcalność), natomiast w budownictwie stosowane są tylko w elementach drugorzędnych; nie zaleca się ich w łączeniu materiałów alkalicznych, w tym betonu [1],
- kleje silikonowe – należą do grupy elastomerów; cechują się bardzo dużą odkształcalnością, także w podwyższonych temperaturach, są niewrażliwe na działanie wody oraz utlenianie [27], dlatego w budownictwie są najczęściej stosowane nie do połączeń konstrukcyjnych, lecz jako wypełnienia i uszczelnienia [1].

#### 2.1.5. Polimetakrylan metylu P(MMA)

Wiele żywic akrylowych jest wykorzystywanych w przemyśle odzieżowym oraz w przetwórstwie tworzyw. Do akrylowych monomerów wykorzystywanych w klejach należą: akrylan etylu, akrylan metylu, kwasy metakrylowe, kwas akrylowy, akrylamid i akrylonitryl [25]. W przypadku dodania katalizatora (aktywatora) do monomeru dochodzi do polimeryzacji, a więc sieciowania. W pracy rozpatrywano klej metakrylowy Plexus MA 420. Jest to klej stosowany głównie w przemyśle motoryzacyjnym, ze względu na szybki proces sieciowania. Nie wymaga on dokładnego przygotowania powierzchni klejonych, charakteryzuje się wysoką wytrzymałością zmęczeniową oraz odpornością na obciążenia udarowe [29]. Plexus MA 420 jest klejem termoutwardzalnym, dwuskładnikowym; jednym z jego składników jest nienasycony ester metylowy kwasu metakrylowego, a drugim aktywator, będący jednocześnie stabilizatorem procesu.

Połączenie obydwu składników następuje dopiero w momencie aplikacji, poprzez specjalny mikser. Po zmieszaniu składników następuje proces sieciowania, który trwa kilkanaście minut i towarzyszy mu wydzielanie się znacznych ilości ciepła (proces egzotermiczny) [29] – po zakończeniu sieciowania powstaje polimetakrylan metylu P(MMA) [30] – rys. 6. Ze względu na konieczność dokładnego zmieszania ze sobą dwóch składników, zazwyczaj są one zabarwione innym pigmentem tak, aby po połączeniu można było ocenić jednorodność mieszanki. Bez dodatkowego zabarwienia polimetakrylan metylu charakteryzuje się dobrą przezroczystością, co umożliwia stosowaniu go jako szkła organicznego [30]. Bardzo istotny wpływ na parametry gotowego kleju ma aktywator. Sama polimeryzacja metakrylanu metylu spowodowałaby powstanie bardzo sztywnego i kruchego kleju, w związku z tym do aktywatorów wprowadza się dodatki, dzięki którym materiał uzyskuje większą odkształcalność [18] i nadaje się do wykorzystania jako klej konstrukcyjny. Wprowadzenie innego typu modyfikatorów umożliwia tworzenie z polimetakrylanu metylu arkuszy i prętów, wykorzystywanych w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym jako klosze świateł sygnalizujących i urządzenia odblaskowe, a także do wyrobu elementów aparatury elektrycznej, pryzmatów i soczewek [31].



Rys. 6 Schemat reakcji polimeryzacji metakrylanu metylu

## 2.2. Krótki przegląd badań w wybranym zakresie

Badania połączeń konstrukcyjnych elementów metalowych z wykorzystaniem klejów epoksydowych były już obiektem licznych publikacji w Polsce [13], [32], [33], [34] i na świecie [35], [36], [37], [38], [39], [40]. Świadczy to o popularności tego typu klejów w budownictwie, jednak zwykle przy wzmacnianiu istniejących elementów. Jak już wcześniej wspomniano, popularność ta wynika głównie z dostępnych na rynku rozwiązań systemowych, gdzie do danego typu taśmy lub maty (węglowej, bazaltowej, aramidowej lub

szklanej) dedykowany jest klej na bazie żywic epoksydowych. W przypadku typowych węzłów w konstrukcjach stalowych kleje epoksydowe okazują się jednak zbyt kruche.

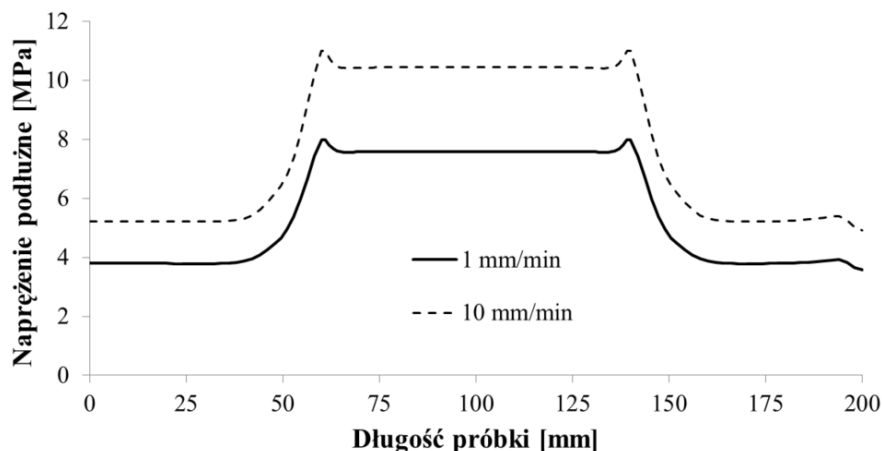
Połączenia stali z wykorzystaniem klejów metakrylowych były, w zakresie konstrukcji mogących mieć zastosowanie w budownictwie, obiektem nielicznych badań. Poniżej przedstawiono ich zakres tematyczny i podstawowe wnioski.

W pracy [15] przedstawione zostały badania przeprowadzone na połączeniach obustronnie zakładkowych, gdzie łączonymi materiałami były stal i taśmy CFRP. W badaniach porównano nośności złączy wykonanych przy użyciu różnego typu klejów konstrukcyjnych. Przeprowadzono również wstępne badania tego typu połączeń pod obciążeniem statycznym i zmęczeniowym [16]. W obydwu przypadkach wyselekcjonowano grupę klejów metakrylowych, w przypadku użyciu których najsłabszym komponentem połączenia był laminat CFRP, a nie spoina klejowa. Na podstawie prac [41] i [42] znane są również wstępne wyniki nośności złączy obustronnie zakładkowych typu stal-stal, przy części parametrów identycznych jak we wcześniej cytowanych badaniach [15], [16]. W tym wypadku analizie poddano dwie długości złączy 400/400 mm oraz 400/200 mm. W przypadku kleju metakrylowego Plexus MA 420, przy krótszych spoinach (200 mm) dochodziło do zniszczenia kohezynno-adhezyjnego na styku klej-płaskownik bazowy, natomiast przy dłuższych (400 mm) zniszczenie inicjowane było w strefie uplastycznienia podstawowego elementu stalowego. Świadczy to o znakomitych parametrach kleju (w tym o odkształcalności pozwalającej na współpracę spoiny na znacznej długości) – do badań wykorzystano bowiem wysokowartościową stal Domex 700 MS. Cytowane tu badania zostaną szerzej opisane w rozdziale 5, bowiem ich wyniki wykorzystane zostały do walidacji własnych modeli numerycznych.

Szereg badań materiałowych wybranego kleju metakrylowego wykonana została w latach ubiegłych przez autora niniejszej pracy doktorskiej (we współpracy z Promotorem, Promotorem pomocniczym i pracownikami Instytutu Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników w Gliwicach). Ich opis i wyniki zostały zaprezentowane w rozdziale 3 i 4, a poniżej zasygnalizowano jedynie zakres prezentowany w publikacjach współautorskich.

W pracy [43] zaprezentowano wyniki badań zależności wytrzymałości kleju Plexus MA-420 od prędkości przyrostu obciążenia. Badano typowe próbki wioselkowe przy dwóch różnych prędkościach, wykazując wyraźny wpływ prędkości przykładania obciążeń

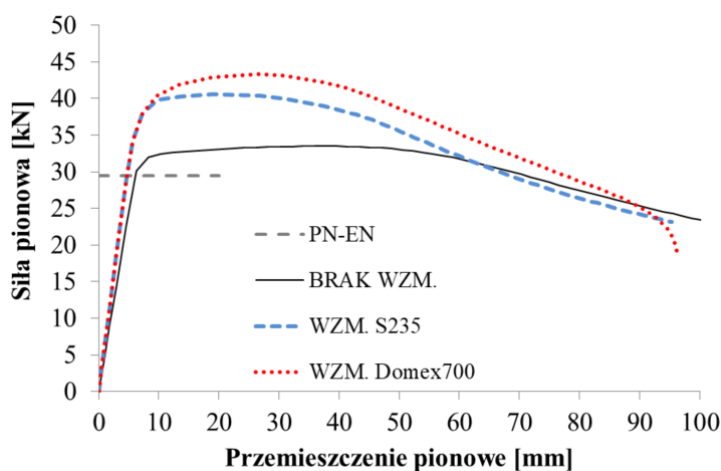
na wytrzymałość i sztywność doraźną kleju rys. 7 oraz odkształcenia przy zniszczeniu. Wykonano również analizy numeryczne walidowane na wynikach badań.



**Rys. 7** Rozkład naprężeń wzdłuż próbki w chwili uplastycznienia [43]

W publikacji [44] rozszerzono wyniki prezentowane w pracy [43] o wyższy zakres prędkości badań, a także opisano przebadane cechy reologiczne kleju przy różnym poziomie naprężeń wstępnych. Na bazie uzyskanych danych wyliczono współczynniki Prony, będące parametrami modelu lepkosprężystego, które wykorzystano do walidacji modelu materiałowego wykorzystywanego w analizach numerycznych.

W pracy [45] przedstawiono wyniki analiz numerycznych belek stalowych wzmocnionych przyklejonymi płaskownikami. Wykazano możliwość wykonania wzmocnień lub napraw o wysokiej skuteczności rys. 8, a także możliwość wiarygodnego modelowania elementów przy użyciu GMNIA z wykorzystaniem parametrów materiałowych uzyskanych z badań własnych.



**Rys. 8** Zależność siła-ugięcie w belce niewzmocnionej i wzmocnionej [45]

W pracy [46] przedstawiono badania połączenia metalowego pręta z kompozytową rurą przy użyciu kleju P(MMA) – Plexus AO425. Autorzy wykazali zależność odkształceń oraz wytrzymałości na zmęczenie połączenia od czasu trwania obciążenia oraz temperatury otoczenia, nie notując natomiast istotnego wpływu na wyniki kierunku obciążenia oraz rozmiaru węzła. Mechanizm zniszczenia miał tu mieszaną postać – dochodziło do zniszczenia kohezyjnego w kleju i utraty przyczepności na styku stal-klej.

Badanie wpływu obciążenia impulsowego na aluminiowe złącze kołnierzowe wykonane z wykorzystaniem kleju metakrylowego przedstawiono w pracy [47]. Autorzy tej pracy wykazali, że warstwa kleju zaabsorbowała ponad jedną czwartą energii wywołanej falą uderzeniową. Przeprowadzone analizy numeryczne z uproszczonym, sprężysto-(idealnie) plastycznym modelem kleju dały bardzo dobrą zbieżność z badaniami laboratoryjnymi.

W pracy [48] przedstawiono wyniki badań rozciągania i ściskania próbek kleju metakrylowego. Autorzy wykazali, że do określenia modułu Younga właściwe jest badanie wytrzymałości na rozciąganie. Porównanie wyznaczonych parametrów z danymi deklarowanymi przez producenta wykazało dobrą zbieżność w zakresie wytrzymałości oraz odkształceń przy zniszczeniu, przy istotnych rozbieżnościach wartości modułu Younga.

Polimetakrylan metylu, ze względu na wysoką wytrzymałością oraz lepkosprężystość, stosowany jest również jako dodatek do innych rodzajów klejów jak np. cyjanoakryle [49] czy żywice epoksydowe [50].

W pracy [51] przedstawiono badania połączeń zakładkowych z wykorzystaniem polimetakrylanu metylu nie jako spoiny, ale jako elementu nośnego. Kolejne badania połączeń z wykorzystaniem P(MMA) jako substratu przedstawiono w pracy [52], gdzie badano wpływ chropowatości metakrylanu na nośność połączenia z wykorzystaniem kleju epoksydowego. W przypadku badań [51] autorzy wykazali, że żywotność połączeń klejonych P(MMA)-P(MMA) oraz P(MMA)-aluminium były niezależne od zakresu testowanych częstotliwości (od 54 do 135 cykli na minutę), natomiast wpływ na nośność doraźną miała wartość naprężeń oraz temperatura otoczenia podczas badania. Z kolei z badań przedstawionych w [52] wynika, że wraz ze wzrostem chropowatości powierzchni P(MMA) aż do wartości  $R_a=1,2 \mu\text{m}$ , nośność połączenia wzrasta o 40%, natomiast dalszy przyrost chropowatości jest już mniej efektywny i prowadzi do mniejszego wzrostu nośności.

Wykorzystanie klejów metakrylowych ma miejsce również w medycynie, m.in. w stomatologii. W pracy [53] przedstawiono badania próbek kleju pod obciążeniem statycznym i cyklicznie powtarzalnym w suchym i wilgotnym otoczeniu. Autorzy wykazali zachowanie wyraźnie lepszych parametrów wytrzymałościowych w suchych warunkach.

### **2.3. Analizy numeryczne**

Analizy numeryczne mogą być wykorzystywane do badania wpływu różnych czynników działających na połączenia klejone. Ostatecznym celem takich analiz jest zazwyczaj określenie nośności połączenia, jego odkształcalności oraz sposobu zniszczenia, natomiast mnogość czynników mogących wpływać na wyniki i, nierzadko, trudność w wykonywaniu pomiarów na próbkach laboratoryjnych sprawiają, że analizy numeryczne wykorzystywane są m.in. do analizy rozkładu naprężeń w połączeniach klejonych [33], oceny wpływu temperatury na nośność połączeń przy różnych typach klejów [54], analizy wpływu temperatury na połączenia klejowe z defektami [55], czy oceny wpływu czynników geometrycznych na nośność połączeń klejonych [56]. Metodami numerycznymi ocenia się także mechanizm zniszczenia połączeń [57], [58]. Z uwagi na szereg czynników zmiennych, wśród których niesłychanie istotny jest typ danego kleju, nie ma uniwersalnej metody pozwalającej na określenie nośności połączenia lub innych jego cech. Dlatego, przed przystąpieniem do analiz numerycznych, należy dokonać wyboru przede wszystkim metody modelowania danego połączenia i ustalenia kryteriów jego zniszczenia. Wyboru dokonuje się zazwyczaj bazując na znanych cechach rozpatrywanych materiałów, występujących oddziaływaniach oraz wymaganych efektach analiz.

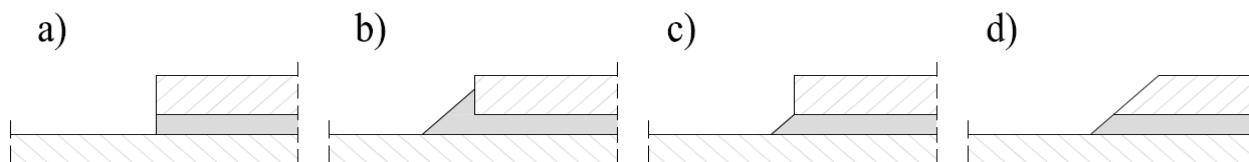
#### **2.3.1. Kryterium zniszczenia**

##### **2.3.1.1. Kontynualna mechanika uszkodzeń**

W założeniach mechaniki kontynualnej porównywane są maksymalne wartości głównych naprężeń, odkształceń lub energii odkształcenia, wyznaczonych na podstawie MES, z granicznymi wartościami określonymi w parametrach materiałowych [59]. Nie uwzględnia się jednak przy tym występowania (często niezerowych) wartości innych naprężeń głównych. Ze względu na bardzo duże koncentracje naprężeń na krawędziach



połączeń (w szczególności w przypadku sztywnych klejów), bardzo istotne jest gęste siatkowanie oraz modelowanie krawędzi połączeń zgodnie z rzeczywistością (fazowanie spoin, fazowanie elementów łączonych), rys. 9.



**Rys. 9 Przykładowe kształtowanie krawędzi połączeń: a) proste; b) spoina przykrywająca element łączony; c) niewielkie poszerzenie spoiny; d) ukosowanie spoiny i elementu łączonego**

W przypadku klejów bardziej odkształcalnych, które pomimo uplastycznienia są w stanie nadal przenosić znaczne obciążenia, podejście bazujące tylko na naprężeniach głównych wydaje się jednak być niewłaściwe.

Kryterium Hubera-Misesa-Hencky'ego określa, że materiał ulega uplastycznieniu pod wpływem złożonych naprężeń, gdy jego energia odkształcenia osiąga wartość krytyczną:

$$\sigma_{VM}^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = \text{constant} \quad (1)$$

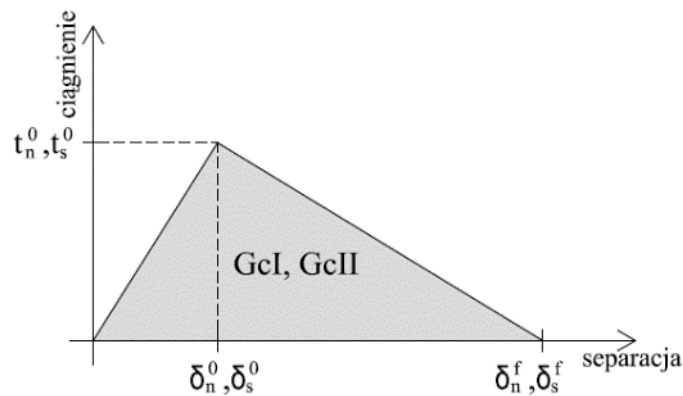
gdzie  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  są naprężeniami głównymi. Należy przy tym podkreślić, że jest to kryterium stosowane raczej w celu oszacowania uplastycznienia, aniżeli wytrzymałości.

W przeciwieństwie do metali, charakterystyka klejów wykazujących wzmocnienie w fazie plastycznej, jest podatna na hydrostatyczny komponent naprężeń [60], [61]. W klejach wykazujących półkę plastyczną, w zależności naprężenie-odkształcenie Chaign [62] zaleca wykorzystanie kryterium Druckera-Pragera, które wydaje się dokładnie opisywać ich zachowanie się podczas uplastycznienia.

### 2.3.1.2. Założenia mechaniki pękania

Kontynualne kryteria materiałowe zakładają, że materiał jest ciągły i w trakcie przyrostu naprężeń nie mogą w nim powstać uszkodzenia, których efektem byłyby np. rysy powodująca nieproporcjonalny przyrost przemieszczeń oraz nagłą zmianę rozkładu naprężeń w materiale. Do modelowania tego typu zagadnień, również w przypadku sztywnych i kruchych klejów, bardzo dobrze nadaje się liniowo-sprężysta mechanika pękania LEFM. W mechanice pękania propagacja rysy może być powiązana z szybkością

uwalniania/dyssypacji energii podczas odkształceń [63], która to energia związana jest z zależnością ciągnienie-separacja. Zależność ta określona jest granicznymi wartościami naprężeń (osobno dla rozciągania  $t_n^0$  i ścinania  $t_s^0$ ) oraz odpowiadającymi im przemieszczeniami (odpowiednio  $\delta_n^0$  i  $\delta_s^0$ ), po przekroczeniu których następuje proces degradacji (rys. 10). Pole powierzchni pod wykresem jest energią niezbędną do utworzenia pary powierzchni ( $G_{cI}$  dla rozciągania i  $G_{cII}$  dla ścinania). Oznacza to, że po dyssypacji tej energii nastąpi separacja w rozpatrywanym punkcie materiału – a, w efekcie, redukcja naprężeń. Naprężenia zostaną redystrybuowane na sąsiednie elementy i jeśli w którychś z nich również nastąpi przekroczenie granicznych naprężeń, to rysa dalej będzie propagowała w materiale [59], [64].



**Rys. 10** Przykład trójkątnej zależności ciągnienie-separacja [59], [64]

W przypadku materiałów charakteryzujących się ciągłym zniszczeniem, uplastycznianie się strefy wokół rysy sprawia, że zniszczenie zachodzi w sposób stabilny (bez gwałtownego zerwania). Ze względu na ten efekt LEFM nie może być z powodzeniem wykorzystywana do opisu tego typu materiałów [59].

### 2.3.2. Metody modelowania połączeń

W rozprawie doktorskiej do analizy MES stosowano program ABAQUS (Dassault Systemes Simulia Corp), w którym istnieje kilka opisanych niżej możliwości modelowania warstwy kleju [65], [64].

Model ciągły bazuje na sztywności kleju określonej na podstawie modułu Younga  $E$ , współczynnika Poissona  $\nu$  oraz zdefiniowanej grubości spoiny klejowej. Inicjację

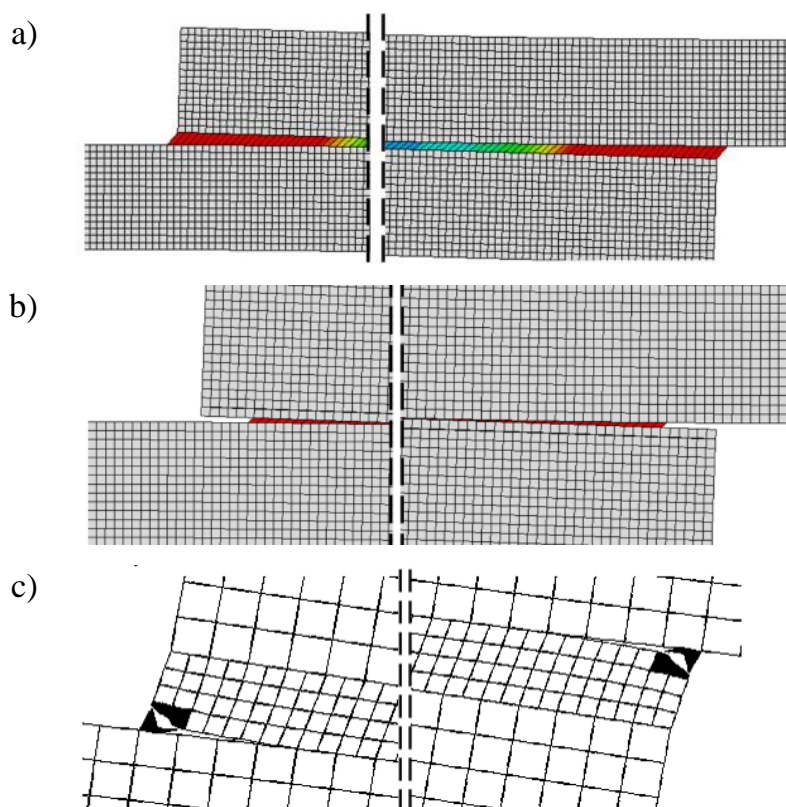
zniszczenia można zdefiniować w klejach sztywnych przez określenie warunków niezbędnych do powstania rysy oraz jej propagacji (zgodnie z LEFM), a w klejach podatnych przez określenie kryterium uplastycznienia. W przypadku klejów sztywnych, stosując założenia LEFM, można wykorzystać tradycyjną MES, wybierając do tego celu elementy skończone typu „cohesive”. Nie ma wówczas możliwości zagęszczenia siatki elementów skończonych na grubości spoiny klejowej co, w momencie zniszczenia, nie prowadzi do powstania rzeczywistej rysy w materiale, tylko do degradacji sztywności w danym obszarze. Z kolei w klejach podatnych, gdzie stosowane są kryteria uplastycznienia materiału, modelując klej wykorzystuje się ten sam typ elementów skończonych co w łączonych elementach (np. płaskownikach stalowych), co daje możliwość zagęszczenia siatki na grubości spoiny. W efekcie pozwala to na analizę zmian profilu naprężeń na całej grubości spoiny klejowej.

Model bazujący na zależności kontaktowej najczęściej wykorzystywany jest przy modelowaniu kompozytów, gdzie warstwa kleju jest tak cienka, że z praktycznego punktu widzenia można przyjąć jej grubość jako zero. Makroskopowe parametry kleju nie są wówczas istotne podczas modelowania połączenia, a do analizy wykorzystuje się założenia mechaniki pęknięcia. Zależności kontaktowe można również wykorzystać w celu zamodelowania parametrów związanych z adhezją pomiędzy warstwą kleju a elementami łączonymi. Wówczas do modelowania samej warstwy kleju nie można zastosować LEFM, ponieważ jest już ona wykorzystywana w powierzchniach styku. W warstwie kleju można natomiast określić kryteria związane z uplastycznieniem materiału.

Wykorzystanie XFEM. Dzięki rozszerzeniu Metody Elementów Skończonych, XFEM, możliwe jest przerwanie połączenia między węzłami, dzięki dodatkowym funkcjom opisującym przemieszczenia węzłów w trakcie powstawania rysy, aż do utworzenia dwóch nowych powierzchni [66]. Metoda ta służy do opisywania nieciągłości takich jak rysy, pozwalając na ich narastanie w kontrolowany sposób. Dodatkowo, jeśli wykorzystuje się XFEM, typ elementu skończonego nie musi być taki jak w modelu ciągłym (czyli „cohesive”), możliwe jest zatem zagęszczenie siatki elementów skończonych na grubości spoiny.

### 2.3.3. Efekty przyjętego sposobu modelowania

W zależności od oczekiwanych efektów analiz numerycznych, można decydować o wyborze podejścia do modelowania złączy. Należy tu mieć świadomość, że każda metoda obarczona jest pewnymi zaletami, ale także ograniczeniami rzutującymi na uzyskane wyniki. Na rys. 11 [64] przedstawiono graficzne porównanie inicjacji mechanizmu zniszczenia w wybranym połączeniu zakładkowym.



**Rys. 11 Wizualizacje mechanizmu zniszczenia połączenia zakładkowego, w zależności od metody modelowania połączenia: a) model kontinuum; b) zależność kontaktowa; c) zastosowanie XFEM [64]**

Metoda bazująca na modelowaniu kleju w sposób ciągły (rys. 11a) jest najszybsza, natomiast nie daje informacji na temat typu zniszczenia w złączy. Można w tym przypadku analizować przyrost i rozkład naprężeń w spoinie, natomiast w momencie osiągnięcia naprężeń granicznych zastosowanie LEFM pozwala jedynie na ocenę, w obrębie którego Elementu Skończonego dochodzi do degradacji materiału. Jeżeli wykorzystane jest kryterium dla materiałów o charakterystyce sprężysto-plastycznej, możliwa jest jeszcze analiza przyrostu odkształceń plastycznych. W przypadku podejścia kontaktowego (rys. 11b), możliwe jest uzyskanie zniszczenia adhezyjnego, lecz warstwa kleju znajdująca się pomiędzy powierzchniami kontaktowymi uniemożliwia ewentualne łączenie się pęknięć,

przez co nie jest możliwe uzyskanie zniszczenia np. adhezyjno-kohezyjnego. Siatkowanie XFEM (rys. 11c) daje największą dowolność kształtowania się rysy w spoinie, pozwala zatem na najdokładniejszą ocenę sposobu zniszczenia; jest to natomiast rozwiązanie bardzo czasochłonne.



### **3. Badania laboratoryjne (mechaniczne) kleju**

#### **3.1. Zakres wykonanych badań**

Badania laboratoryjne próbek miały na celu określenie charakterystyki materiałowej kleju metakrylowego Plexus MA 420. Przeprowadzono podstawowe badanie wytrzymałości kleju na rozciąganie, analizując przy tym wpływ prędkości obciążenia na uzyskane charakterystyki. Poddano wstępnej analizie szybkość przyrostu wytrzymałości na rozciąganie kleju, co pozwala na określenie jego przydatności pod kątem wykonywania np. szybkich wzmocnień konstrukcji. Zbadano też parametry reologiczne, które są niezbędne do analizy numerycznej połączeń obciążonych w sposób długotrwały. Wykonano badania wytrzymałości na ścinanie wg trzech wybranych metod, określając warunki i ograniczenia ich stosowania. Zbadano też graniczne naprężenia związane z przyczepnością kleju do trzech różnych powierzchni stali: ocynkowanej, malowanej (wg zastrzeżonej receptury firmy Hiab) i piaskowanej. Określono również sposób zniszczenia próbek kleju podczas badania w stanie jednoosiowego ściskania. Dla poszczególnych badań laboratoryjnych wykonano również analizy numeryczne, pozwalające na porównanie wyników i walidację modeli obliczeniowych.

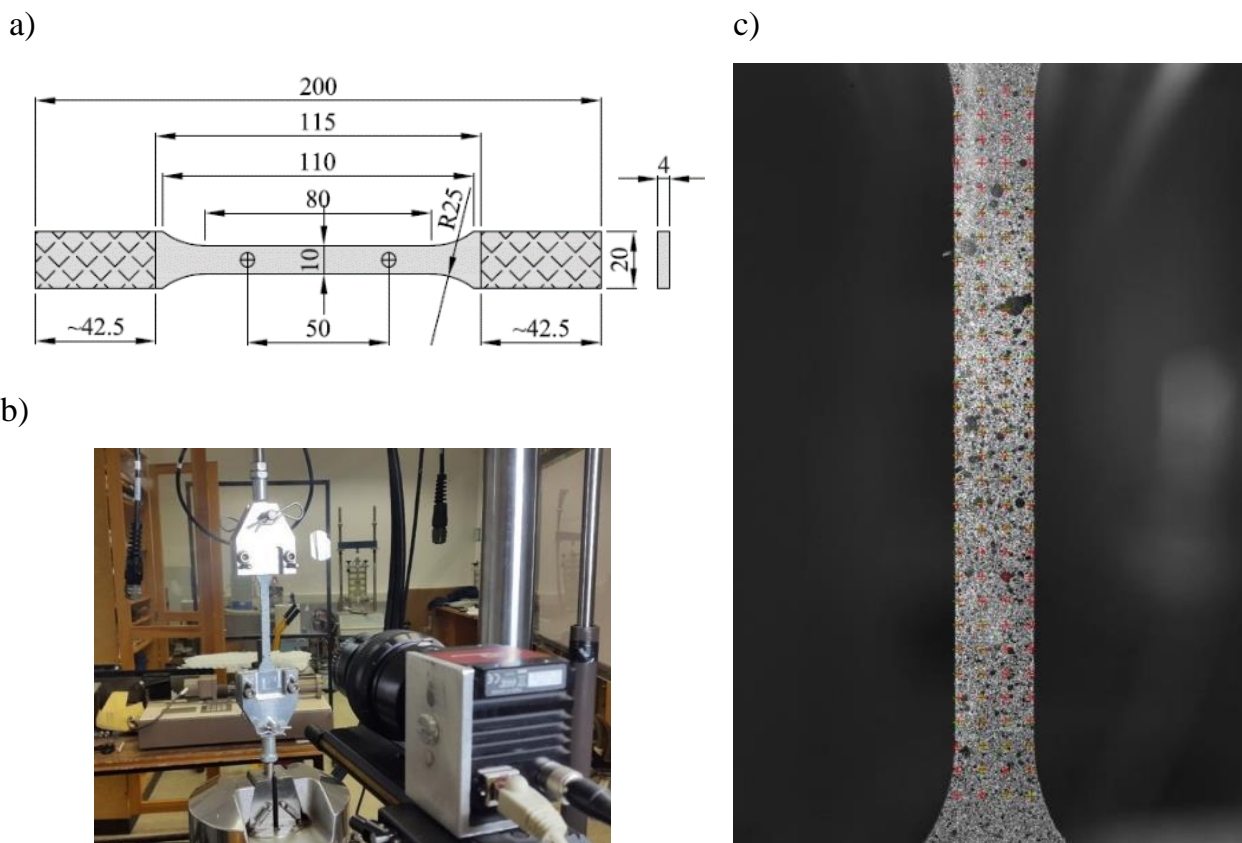
#### **3.2. Wytrzymałość na rozciąganie**

##### **3.2.1. Metodyka badania wg norm [67], [68]**

Badanie wytrzymałości przy statycznym rozciąganiu przeprowadzono zgodnie z zaleceniami norm [67], [68]. Badanie zostało przeprowadzone na próbkach wiosełkowych (rys. 12a), w sterowanej przemieszczeniowo prasie hydraulicznej. Każdorazowo próbka była zamocowana w prasie przy użyciu zacisków o długości bazowej 42,5 mm. Kształtki były kondycjonowane przez 24 godziny w temperaturze 23°C, przy wilgotności względnej 50%. Następnie wykonano po pięć badań przy trzech różnych prędkościach przyrostu przemieszczeń tłoka maszyny: 1, 10 i 100 mm/min. Do próbek obustronnie zamocowano dwa ekstensometry o bazie 50 mm w celu pomiaru odkształceń w kierunku równoległym do działania siły. Przeprowadzone próby statycznego rozciągania pozwoliły na uzyskanie

zależności naprężenia-odkształcenia. Na ich podstawie obliczono moduł sprężystości dla odkształceń z zakresu 0,05 – 0,25%, zgodnie z zaleceniami normy [67].

Wyznaczenia współczynnika Poissona również dokonano zgodnie z normami [67], [68], na próbkach wiosekłowych przygotowanych identycznie jak do badania wytrzymałości na rozciąganie. Wykonano trzy próby, przy prędkości przyrostu przemieszczenia tłoka prasy 1 mm/min. Odkształcenia poprzeczne i podłużne rejestrowano przy użyciu niekontaktowego systemu optycznego. Stanowisko badawcze przedstawiono na rys. 12b. Współczynnik Poissona wyznaczono w zakresie odkształceń 0,3% –  $\varepsilon_y$ , zgodnie z zaleceniami normy [67]. Dzięki wprowadzeniu na przewężonej części próbki punktów charakterystycznych (rys. 12c) jednocześnie śledzono przemieszczenia poprzeczne i podłużne, na podstawie których wyznaczono odkształcenia. Iloraz odkształceń posłużył do wyznaczenia współczynnika Poissona.

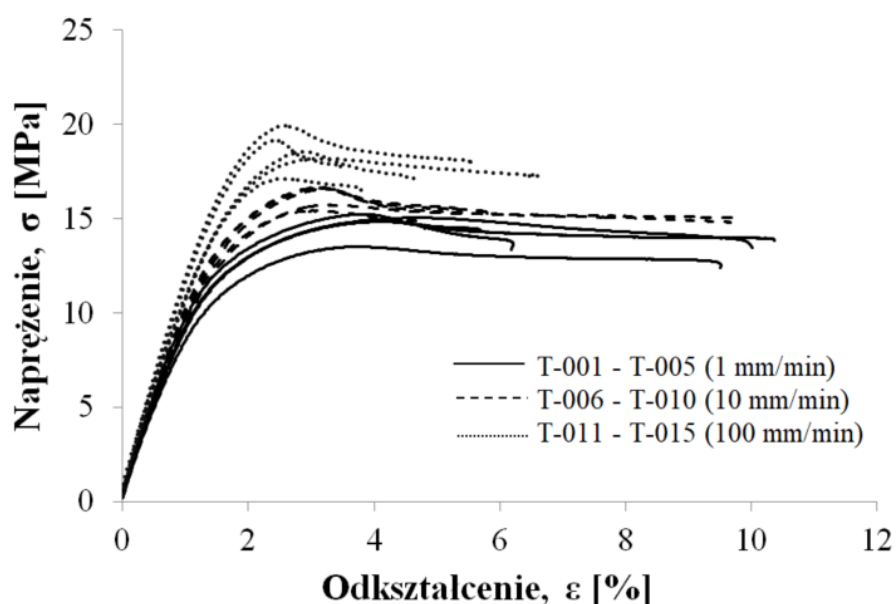


**Rys. 12** Rozciąganie próbki wiosekłowej: a) geometria badanej próbki zgodnie z [68]; b) stanowisko badawcze – oznaczenie współczynnika Poissona; c) punkty charakterystyczne na przewężonej części próbki

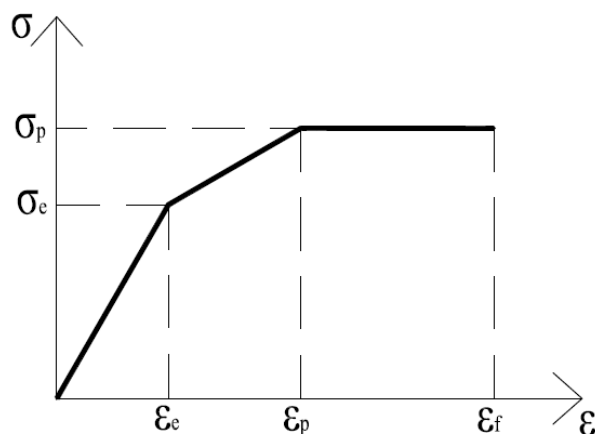


### 3.2.2. Wyniki badań laboratoryjnych

W przeprowadzonych próbach rozciągania statycznego z różnymi prędkościami: 1, 10 i 100 mm/min uzyskano różne wartości wytrzymałości badanego kleju metakrylowego (rys. 13). W celu określenia wiarygodnych parametrów dla sprężysto-plastycznego modelu materiałowego (rys. 14), określono punkty charakterystyczne jako uśrednione dla każdej z rozpatrywanych prędkości badania; wyniki zestawiono w tabeli 1. W normie [67] podany jest bezpośredni zakres odkształceń w którym należy wyznaczyć wartość modułu sprężystości, jako 0,05 – 0,25%. Wartości normowego modułu sprężystości, oznaczone w tabeli 1 indeksem  $E_{PN-EN}$ , przewyższają wartości modułu siecznego uzyskanego bezpośrednio z ilorazu wartości  $\sigma_e$  i  $\varepsilon_e$ . Wynika to z faktu określania modułu normowego w zakresie bardzo małych odkształceń (po krótkim czasie badania), gdy czynniki reologiczne kleju nie mają jeszcze dużego znaczenia. Wraz ze wzrostem odkształceń podczas badania, zależność naprężenie-odkształcenie przybiera nieliniowy kształt, przez co stosowanie normowej wartości współczynnika sprężystości w prostym modelu sprężysto-plastycznym może prowadzić do zawyżenia sztywności kleju.



Rys. 13 Zależność naprężenie-odkształcenie przy różnych prędkościach badania próbek



Rys. 14 Punkty charakterystyczne uproszczonego modelu sprężysto-plastycznego

Tabela 1 Średnie wartości punktów charakterystycznych zależności naprężenie-odkształcenie

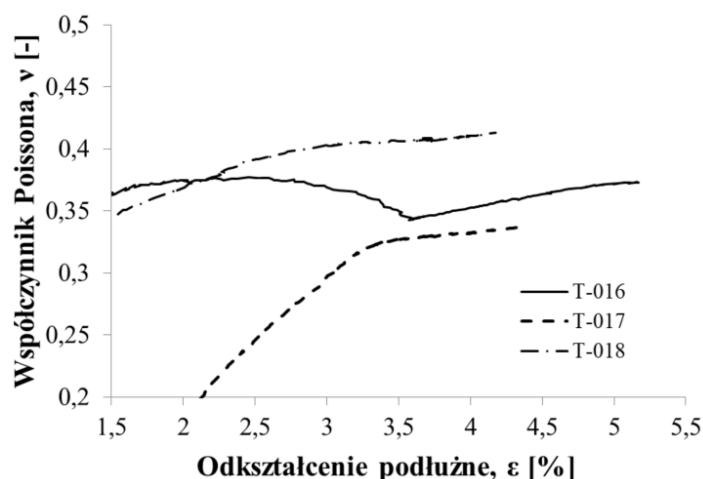
Prędkość badania [mm/min]	$\sigma_e$ [MPa]	Odch. stand.	$\varepsilon_e$ [%]	Odch. stand.	$\sigma_p$ [MPa]	Odch. stand.	$\varepsilon_p$ [%]	Odch. stand.	$\varepsilon_f$ [%]	Odch. stand.	$E_{PN-EN}$ [MPa]	Odch. stand.
1	8,0	0,6	0,8	0,2	14,7	0,6	4,1	0,3	8,4	2,0	1058	62,9
10	11,0	0,6	1,2	0,4	16,2	0,5	3,2	0,1	6,8	1,9	1131	23,3
100	13,9	0,6	1,4	0,3	18,3	0,7	2,4	0,1	4,6	1,8	1224	58,2

Charakterystyka badanego kleju pokazuje, że im szybszy jest przyrost obciążenia, tym większa jest uzyskiwana wytrzymałość i sztywność, przy jednoczesnym obniżeniu odkształceń plastycznych. W ujęciu jakościowym jest to typowe dla badanych materiałów.

Na rys. 15 przedstawiono zależność wartości współczynnika Poissona od odkształceń podłużnych, dla trzech badanych próbek. Ze względu na lepkosprężystość materiału uzyskano nieliniową zależność wartości współczynnika od stanu wyężenia materiału. Średnia wartość współczynnika Poissona dla zadanej prędkości 1 mm/min wyniosła 0,365.

W tabeli 2 przedstawiono parametry podane przez producenta kleju [29]. Uzyskane w badaniach wartości istotnie różnią się od deklarowanych, co wynika z nieco innych metod badawczych zawartych w normie amerykańskiej [69], wykorzystanej przez producenta. Moduł sprężystości wg normy ASTM [69] należy określić dla niższych wartości naprężeń, co w przypadku kleju o nieliniowej charakterystyce może dać dużą rozbieżność. Dodatkowo istotny wpływ na różnice w wynikach może wynikać z wykorzystania małych próbek przez producenta w badaniach. Norma [68] określa, że badania przeprowadzone na próbkach

dużych nie mogą być wprost porównywane z wynikami uzyskanymi na próbkach małych, ponieważ w ich przypadku pomiary są wykonywane na niewielkich odcinkach, a czas badania jest krótszy. Współczynnik Poissona z kolei, w badaniach przeprowadzonych zgodnie z [67], został określony przy prędkości 1 mm/min, podczas gdy według normy [69], prędkość ta powinna wynosić aż 5 mm/min.



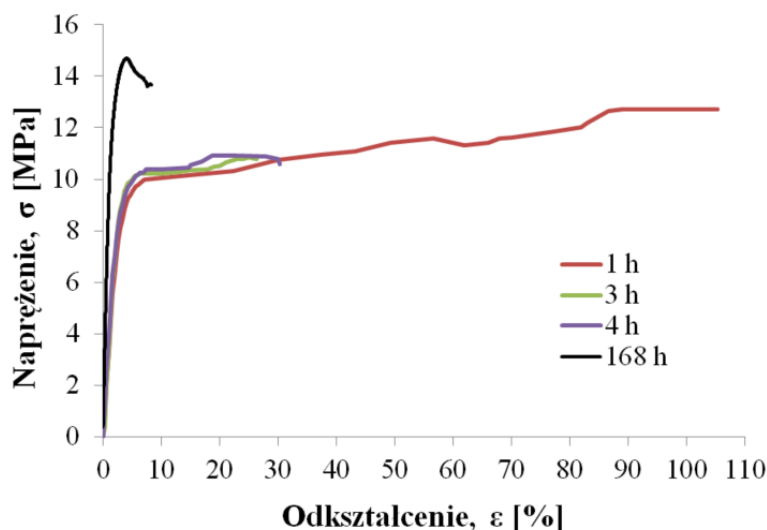
Rys. 15 Zmienność współczynnika Poissona w zależności od odkształceń podłużnych

Tabela 2 Wartości deklarowane przez producenta kleju [29]

Prędkość badania [mm/min]	Wytrzymałość na rozciąganie $\sigma_p$ [MPa]	Odształcenia przy zniszczeniu $\epsilon_f$ [%]	Moduł sprężystości $E$ [MPa]	Współczynnik Poissona $\nu$ [-]
-	18,6 – 20,7	30 – 50	517 – 689	0,41

### 3.2.3. Analiza szybkości przyrostu wytrzymałości

Wstępne badanie szybkości przyrostu wytrzymałości próbki kleju przeprowadzono analogicznie do badań wytrzymałości na rozciąganie, z tą różnicą, że nie zachowano czasu kondycjonowania próbek. Wykonano trzy badania na pojedynczych próbkach, po upływie 1, 3 i 4 godzin od czasu ich uformowania. Próbki rozciągano z prędkością 1 mm/min. Na rys. 16 przedstawiono, dla porównania, także wynik uzyskany dla próbki sezonowanej przez 168 godzin.



**Rys. 16** Zależność naprężenie-odkształcenie dla próbek badanych z prędkością 1 mm/min w zależności od czasu, który upłynął po uformowaniu próbki

Ze względu na wykonanie badań na pojedynczych próbkach, uzyskane wyniki nie mogą być traktowane jako miarodajne i mają jedynie orientacyjny charakter. Niemniej, widoczne są tu pewne tendencje, a mianowicie: stosunkowo szybki przyrost wytrzymałości kleju w ciągu pierwszej godziny, z nieznacznym wzrostem w okresie kolejnych 2 i 3 godzin oraz bardzo wysoka odkształcalność próbki po 1 godzinie, wyraźnie zredukowana po kolejnych 2 i 3 godzinach. Wartości uzyskane po 168 godzinach, które mogą być traktowane jako docelowe, wskazują na dalszy konsekwentny wzrost wytrzymałości przy silnej redukcji odkształcalności. Uzyskane wyniki wskazują na zasadność wykonania w przyszłości dokładniejszych badań w tym zakresie.

### 3.3. Parametry reologiczne

#### 3.3.1. Metoda wyznaczania

W celu uzyskania parametrów reologicznych kleju metakrylowego przeprowadzono badanie relaksacji. Sposób przygotowania próbek oraz ich geometria były takie same jak przy badaniu wytrzymałości na rozciąganie (rys. 12). Badanie przeprowadzono w temperaturze 23°C. Każda próbka obciążana była w prasie hydraulicznej sterowanej przemieszczeniowo, z maksymalną dopuszczalną przez urządzenie prędkością 100 mm/min, do momentu osiągnięcia wstępnej wartości siły rozciągającej. Po osiągnięciu wymaganej siły następowała blokada głowicy prasy i przez 1 godzinę odczytywano spadek wartości siły

rozciągającej. Duża prędkość badania miała na celu zminimalizowanie wpływu relaksacji jeszcze przed rozpoczęciem zasadniczych pomiarów.

Badania relaksacji zostały przeprowadzone porównawczo dla czterech wartości sił wstępnych: 125; 219; 313 i 407 N, co odpowiadało wstępnym naprężeniom: 3,4; 5,9; 8,4 i 10,9 MPa. Zgodnie z wynikami badań przedstawionych w p. 3.2.2 są to wartości mieszczące się w zakresie proporcjonalności zależności naprężenie-odkształcenie. Dla każdej z rozpatrywanych sił wstępnych przeprowadzono badania na trzech próbkach. Zgodnie z zapisami w publikacjach [70], [71], jeżeli wartości wstępnych sił wywołują naprężenia mieszczące się w zakresie liniowo-sprężystym (to jest w obszarze obowiązywania prawa Hooke'a), spadki tych naprężeń powinny być opisane taką samą funkcją niezależnie od wartości sił.

Funkcję, zgodnie z którą jaką następuje spadek wartości naprężeń w badanej próbce, można wyrazić wzorem:

$$\sigma(t) = E(t)\varepsilon_0 \quad (2)$$

gdzie  $\sigma(t)$  jest funkcją naprężeń w czasie,  $E(t)$  jest funkcją relaksacji (zmiany sztywności w czasie), a  $\varepsilon_0$  jest ustalonym, niezmiennym odkształceniem podłużnym próbki. Wykorzystując model materiałowy Maxwella [72], funkcja relaksacji  $E(t)$  może zostać wyrażona w postaci:

$$E(t) = E_0 \left( 1 - \sum_{i=1}^n g_i \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \right) \quad (3)$$

gdzie  $E_0$  jest wstępnym (chwilowym) modułem sprężystości,  $t$  jest czasem, natomiast  $g_i$  oraz  $\tau_i$  są współczynnikami Prony. Pozostawiając tylko zmienną część wzoru (3), można uprościć funkcję relaksacji do zależności:

$$R(t) = 1 - \sum_{i=1}^n g_i \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \quad (4)$$

Wyznaczenie współczynników Prony zostało wykonane przy użyciu nieliniowej metody najmniejszych kwadratów:

$$SSE = \sum \frac{(R_{meas}(t) - R_{pred}(t))^2}{(R_{meas}(t))^2} \quad (5)$$

gdzie  $R_{meas}(t)$  jest funkcją relaksacji na podstawie wyników badań, natomiast  $R_{pred}(t)$  jest funkcją wyznaczoną z wzoru (4).

### 3.3.2. Wyniki

Na podstawie wyników badań, w tabeli 3 zestawiono średnie wartości funkcji relaksacji po upływie 60; 360; 1800 i 3600 s od momentu uzyskania wstępnej siły w głowicy maszyny i jej blokady. Pozwala to na porównanie przebiegu procesu relaksacji próbki kleju w zależności od wstępnego wyężenia materiału.

**Tabela 3** Wartości średnie funkcji relaksacji  $R(t)$  w zależności od naprężeń wstępnych oraz charakterystycznych punktów czasowych

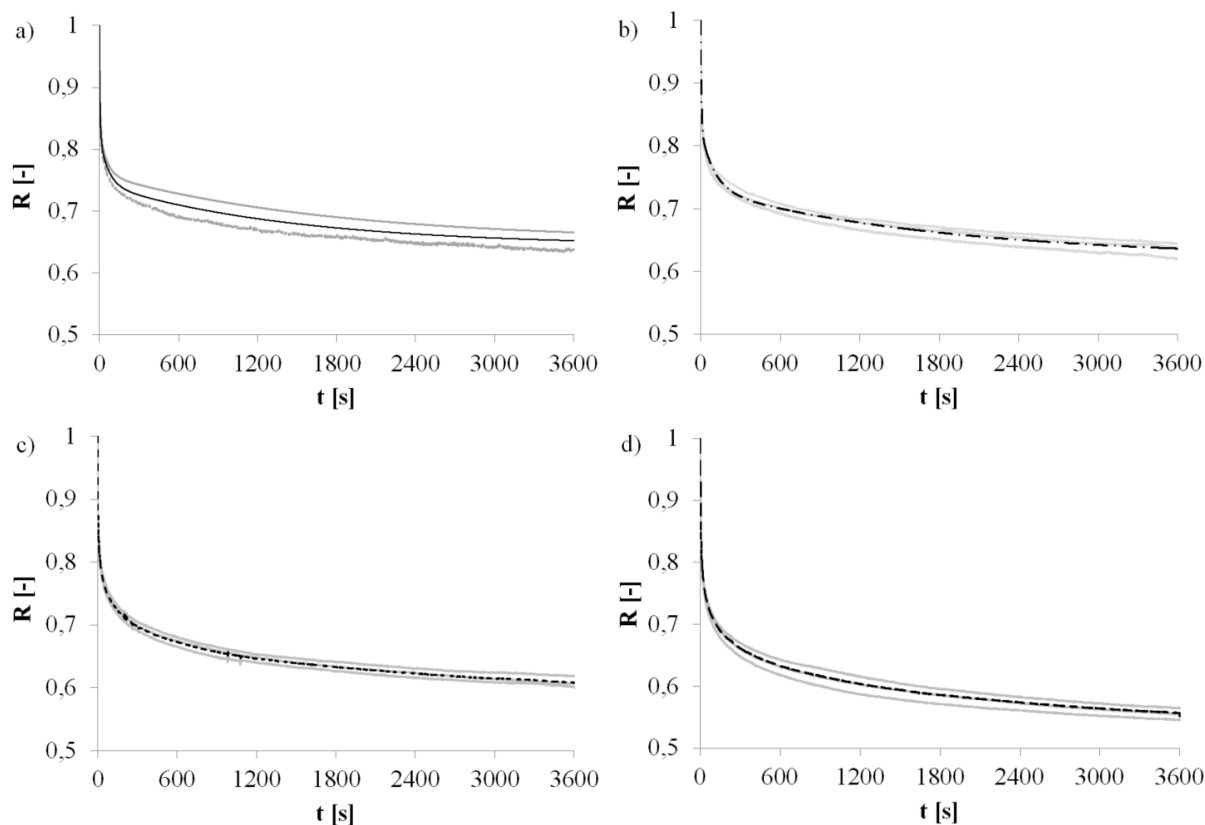
Czas relaksacji, $t$ [s]	Wartość naprężeń wstępnych, $\sigma$ [MPa]							
	3,4	Odch. stand.	5,9	Odch. stand.	8,4	Odch. stand.	10,9	Odch. stand.
	Wartość funkcji relaksacji, $R(t)$ [-]							
60	0,767	0,001	0,773	0,002	0,757	0,003	0,728	0,003
360	0,724	0,004	0,717	0,003	0,691	0,005	0,654	0,004
1800	0,673	0,011	0,662	0,006	0,633	0,007	0,586	0,006
3600	0,651	0,013	0,634	0,010	0,608	0,007	0,556	0,008

W badanym kleju metakrylowym zauważalna jest duża zależność relaksacji od wartości naprężeń wstępnych. Po upływie 60 s różnica wynosi 0,039, natomiast po upływie 3600 s jest to już 0,095 – wraz ze wzrostem naprężeń wstępnych relaksacja wyraźnie rośnie. Taki wynik jest niezgodny z założeniami opisanymi w pracach [70], [71], a zatem potwierdza nieliniową charakterystykę kleju w zakresie sprężystym.

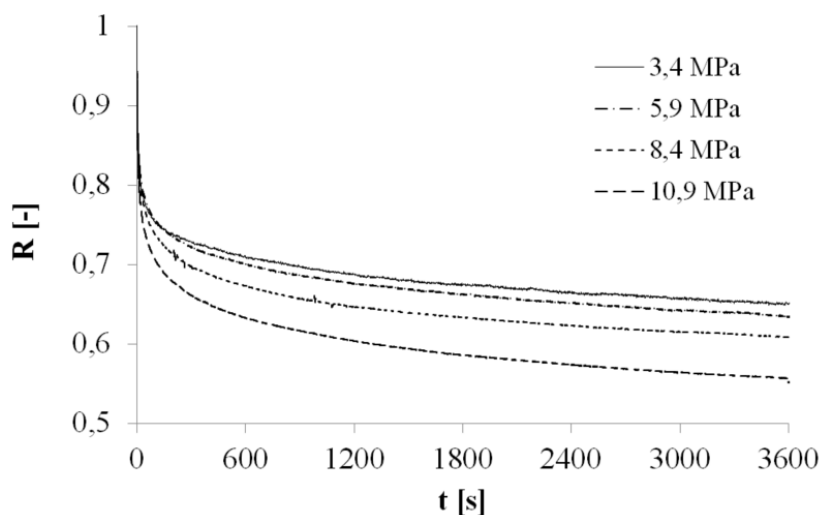
Otrzymane wyniki relaksacji próbek kleju metakrylowego posłużyły do wyznaczenia współczynników Prony – wykorzystano cztery pary współczynników  $g_i$ ,  $\tau_i$ . Obliczone wartości zestawiono w tabeli 4, natomiast na rys. 17 i rys. 18 przedstawiono porównawczo przebiegi funkcji relaksacji otrzymane z badań oraz wyznaczone na podstawie wzoru (4).

Tabela 4 Obliczone współczynniki Prony

Wsp. Prony $g_i [-], \tau_i [s]$	Wartość naprężeń wstępnych, $\sigma$ [MPa]			
	3,4	5,9	8,4	10,9
$g_1$	0,080	0,088	0,092	0,096
$\tau_1$	0,761	1,471	0,887	0,884
$g_2$	0,099	0,095	0,101	0,116
$\tau_2$	6,189	11,254	8,044	7,652
$g_3$	0,077	0,078	0,098	0,112
$\tau_3$	65,1	130	111	102
$g_4$	0,100	0,109	0,107	0,129
$\tau_4$	1460	1804	1415	1486



Rys. 17 Funkcje relaksacji kleju  $R(t)$  uzyskane na podstawie współczynników Prony (kolor czarny) i na podstawie badań (kolor szary): a) 3,4 MPa; b) 5,9 MPa; c) 8,4 MPa; d) 10,9 MPa



**Rys. 18** Porównanie funkcji relaksacji kleju  $R(t)$  uzyskanych na podstawie współczynników Prony

### 3.3.3. Analiza numeryczna

Analiza numeryczna została wykonana przy użyciu MES w programie ABAQUS [65]. Dla uproszczenia model był rozpatrywany w płaskim stanie naprężeń. Siatka elementów skończonych, po analizie jej wpływu na wyniki, została przyjęta jako CPS4 – czterowęzłowa siatka kwadratowa o wymiarach  $2 \times 2$  mm w szerszej części próbki oraz  $1 \times 1$  mm w jej przewężeniu. Pominięto wpływ tarcia pomiędzy zaciskami maszyny a próbką. Warunki brzegowe przedstawiono na rys. 19.



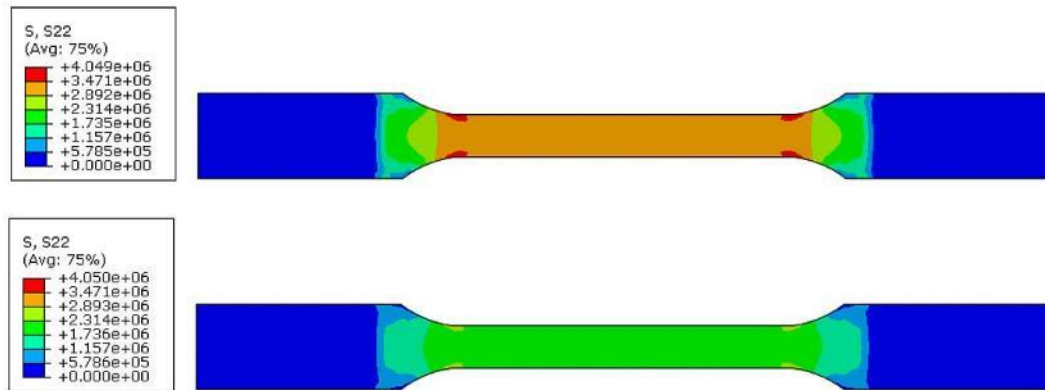
**Rys. 19** Model obliczeniowy przyjęty do analiz numerycznych

W analizach numerycznych wykorzystano równocześnie dwa modele materiałowe – hipersprężysty (*hyperfoam*) oraz lepkosprężysty (*time-domain viscoelasticity*). Materiał hipersprężysty wykorzystywany był do momentu przyrostu obciążenia w próbce, czyli aż do osiągnięcia odpowiednio analizowanych naprężeń 3,4; 5,9; 8,4 lub 10,9 MPa. Pozwoliło to w zakresie przyrostu obciążenia na uwzględnienie nieliniowej charakterystyki kleju. Odpowiedź materiału determinowana jest parametrami związanymi z funkcją energii odkształceń, którą określono automatycznie w programie ABAQUS na podstawie wyników badania jednoosiowego rozciągania, [44]. Materiał pozwalający na uwzględnienie właściwości reologicznych kleju wymagał wyznaczenia zależnej od czasu dyssypowanej



energii, powodowanej wewnętrznymi efektami tłumienia [65]. W tym celu wykorzystano wyznaczone współczynniki Prony, zestawione w tabeli 4.

Przeprowadzenie analiz numerycznych miało na celu weryfikację przyjętego modelu materiałowego z wynikami uzyskanymi w badaniach laboratoryjnych. Na rys. 20 przedstawiono przykładowo rozkład naprężeń wzdłuż osi podłużnej próbki, w momencie rozpoczęcia próby relaksacji ( $t = 0$  s) oraz po upływie 3600 s.



**Rys. 20** Mapy rozkładu naprężeń w próbce dla naprężeń wstępnych 3,4 MPa w czasie:  
a) 0 s; b) 3600 s

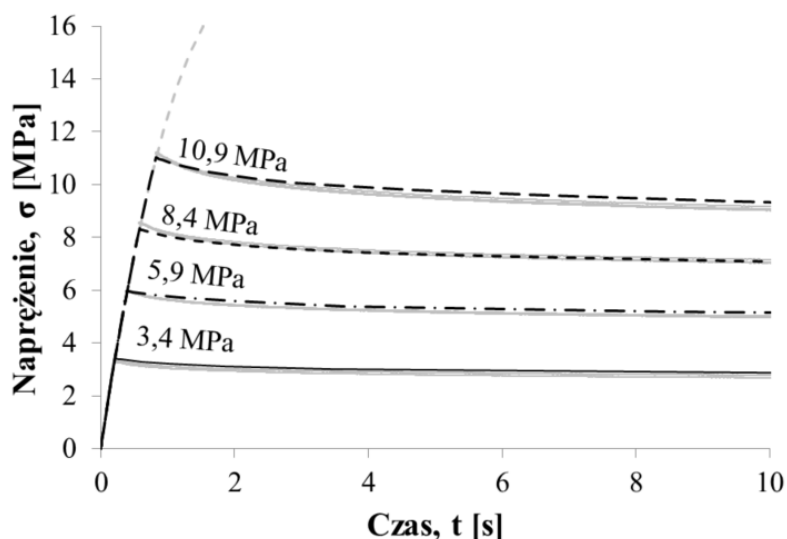
Analogicznie przeprowadzono analizy numeryczne pozostałych przypadków – wyniki zestawiono w tabeli 5 (oznaczono jako N). Dla porównania zestawiono również wartości funkcji relaksacji otrzymanych z badań laboratoryjnych (oznaczono jako L). Analiza numeryczna pozwoliła również na przeprowadzenie badania relaksacji w dłuższych odcinkach czasowych (poprzez ekstrapolację), co w warunkach laboratoryjnych byłoby kosztowne i czasochłonne. W związku z tym w tabeli 5 przedstawiono również wyniki relaksacji po upływie 1 dnia oraz 1 roku.

Można zauważyć bardzo dużą zbieżność pomiędzy wynikami badań laboratoryjnych i analiz numerycznych, co potwierdza, że wyznaczone współczynniki Prony pozwalają na wiarygodne odtworzenie funkcji relaksacji materiału. Dodatkowo, analizy numeryczne dla dłuższych odcinków czasowych pokazują, że po upływie 1 godziny dalsza relaksacja materiału jest już nieznaczna.

Na rys. 21, przedstawiono porównanie wyników uzyskanych z analiz numerycznych oraz badań laboratoryjnych. Połączenie cech materiału hipersprężystego oraz lepko-sprężystego pozwoliło na dokładną analizę numeryczną w zakresie przyrostu obciążenia oraz w trakcie badania relaksacji.

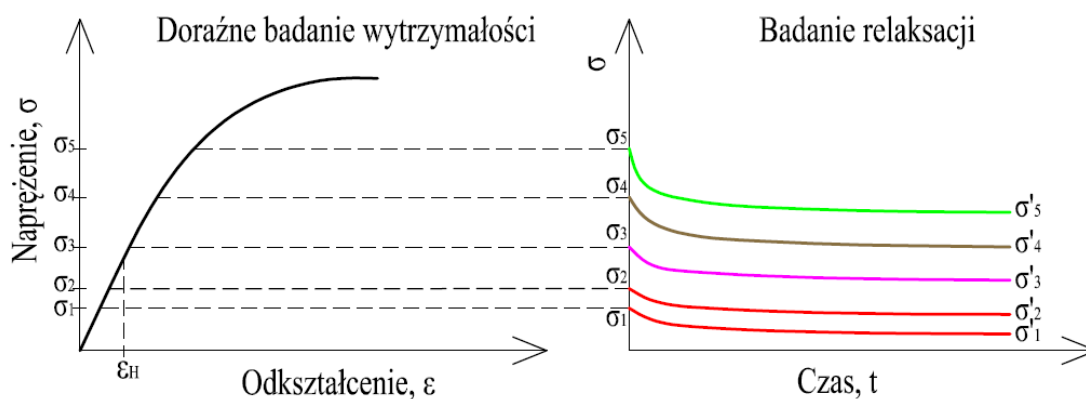
**Tabela 5** Wybrane wartości funkcji relaksacji  $R(t)$  z badań laboratoryjnych (L) i z analiz numerycznych (N)

Czas relaksacji, $t$ [s]	Wartość naprężeń wstępnych, $\sigma$ [MPa]							
	3,4		5,9		8,4		10,9	
	L	N	L	N	L	N	L	N
60	0,767	0,770	0,773	0,779	0,757	0,762	0,728	0,733
360	0,724	0,722	0,717	0,714	0,691	0,689	0,654	0,652
1800	0,673	0,672	0,662	0,662	0,633	0,632	0,586	0,585
3600 (1 h)	0,651	0,652	0,634	0,636	0,608	0,611	0,556	0,558
86499 (1 dzień)	b/d	0,644	b/d	0,621	b/d	0,602	b/d	0,547
30758400 (1 rok)	b/d	0,644	b/d	0,621	b/d	0,602	b/d	0,547

**Rys. 21** Zależność naprężenia-czas uzyskana w analizach numerycznych (kolor czarny) i w badań laboratoryjnych (kolor szary), w zależności od wartości naprężeń wstępnych

### 3.3.4. Wnioski

Badania relaksacji kleju metakrylowego, przeprowadzone dla czterech różnych poziomów obciążenia wstępnego wykazały, że klej ten charakteryzuje się nieliniową lepkosprężystością, ponieważ wyznaczone funkcje relaksacji  $R(t)$  były zależne od obciążenia wstępnego. Większa wartość naprężeń wstępnych w kleju powodowała większą relaksację podczas badania – zależność przedstawiono na rys. 22.



**Rys. 22** Efekt wpływu naprężeń wstępnych na funkcję relaksacji, opis w tekście

Granica proporcjonalności dla większości tworzyw sztucznych, zgodnie z normą [67], powinna mieścić się w zakresie niewielkich odkształceń, w granicach 0,05 – 0,25%. Wobec tego, w tym zakresie odkształceń i odpowiadających im naprężeń, zachodzić będzie liniowa lepkosprężystość  $\varepsilon_H$  [70], [71]. W badanym kleju odkształceniom równym 0,25% odpowiadały naprężenia o wartości 3,49 MPa. Dla tego zakresu naprężeń spełniony będzie zatem warunek:

$$\Delta\sigma_i = \sigma_i - \sigma'_i \quad (7)$$

$$\Delta\sigma_1 \cong \Delta\sigma_2 \quad (8)$$

gdzie  $\Delta\sigma_i$  jest różnicą pomiędzy naprężeniami wstępnymi  $\sigma_i$  i końcowymi  $\sigma'_i$  po upływie określonego czasu, w trakcie którego badano relaksację. Po przekroczeniu granicy proporcjonalności, wraz ze wzrostem odkształceń różnica w funkcji relaksacji będzie coraz większa, co świadczy o nieliniowej lepkosprężystości materiału:

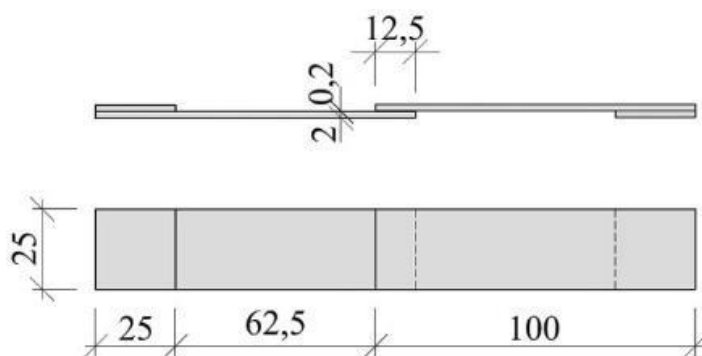
$$\Delta\sigma_2 < \Delta\sigma_3 < \Delta\sigma_4 < \Delta\sigma_5 \quad (9)$$

### 3.4. Wytrzymałość na ścinanie

#### 3.4.1. Badanie na próbkach SLJ [73]

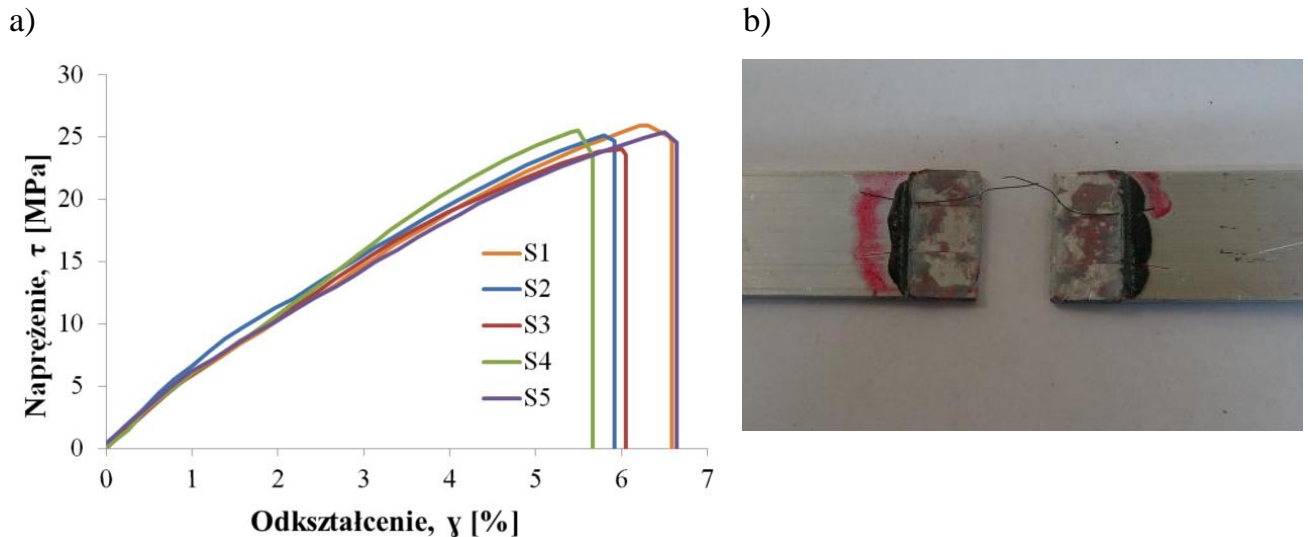
W pierwszej kolejności wykonano badania ścinania kleju poprzez rozciąganie połączenia zakładkowego SLJ, zgodnie z [73], rys. 23. Próbki były zamocowane w prasie za pomocą zacisków o długości bazowej 25 mm. Następnie wykonano badania na pięciu

próbkach, przy prędkości przyrostu przemieszczeń tłoka maszyny równej 1 mm/min. Powierzchnie płaskowników aluminiowych bezpośrednio przed klejeniem przygotowano poprzez piaskowanie, oczyszczenie acetonem oraz pokrycie primerem zalecanym przez producenta kleju. Gotowe połączenia były kondycjonowane przez 24 godziny w temperaturze 23°C i wilgotności względnej 50%.



**Rys. 23 Geometria połączenia zakładkowego SLJ [73]; wymiary w [mm]**

Podczas badania SLJ wartości przemieszczeń (wydłużeń próbek) i sił odczytywano bezpośrednio z przemieszczenia tłoka maszyny wytrzymałościowej. Zastosowane w połączeniach zakładkowych płaskowniki aluminiowe wykonane ze stopu 1050A w stanie H18, o module sprężystości wynoszącym 69 GPa i granicy plastyczności 120 MPa (wg danych producenta), uplastyczyły się podczas badania, w miejscu spoiny klejowej, ze względu na mimośrodowe obciążenie połączenia. Otrzymane w ten sposób odkształcenia kleju musiały zostać pomniejszone o wartości odkształceń sprężystych i plastycznych występujących w adherentach. Wartości tych odkształceń odczytano za pomocą ekstensometrów umieszczonych obustronnie na aluminiowych płaskownikach. Na rys. 24a przedstawiono zależności naprężenie-odkształcenie uzyskane z badań SLJ. Obliczona zgodnie z [73] wytrzymałość na ścinanie kleju wynosiła średnio 25,22 MPa, przy średnich odkształceniach granicznych 6%; szczegółowe wyniki zamieszczono w tabeli 6. Zależności przedstawione na rys. 24a wskazują, że zniszczenie spoiny klejowej miało charakter kruchy/gwałtowny – bez zauważalnej półki plastycznej. Zniszczenie spoiny w każdym przypadku miało charakter kohezyjno-adhezyjny (rys. 24b).

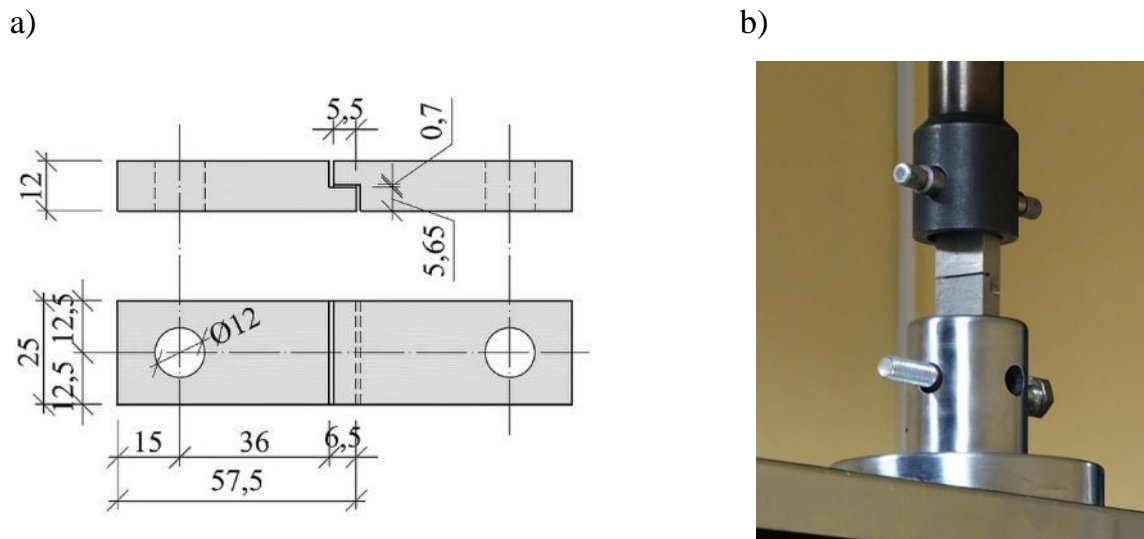


Rys. 24 Badanie SLJ: a) zależność naprężenie-odkształcenie; b) przykład typowego zniszczenia próbki

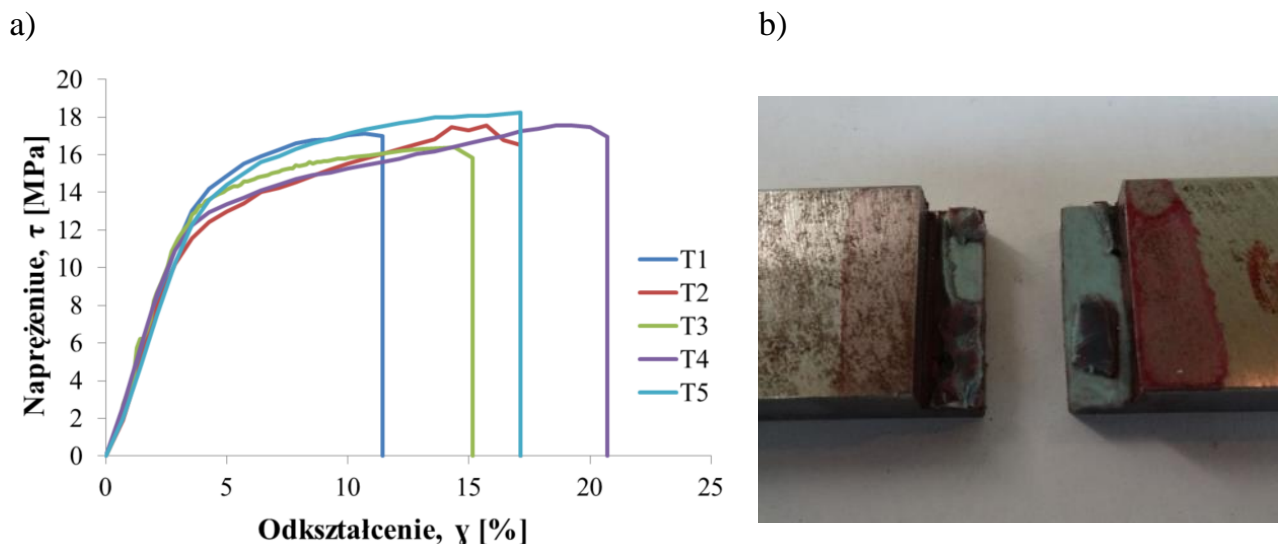
### 3.4.2. Badanie na próbkach typu TAST [74]

Kolejno, wykonano badanie ścinania kleju wg [74]. Ze względu na geometrię klejonych elementów badanie to nosi potoczną nazwę TAST. Wykorzystanie w badaniu sztywnych stalowych elementów pozwala na zbadanie naprężeń ścinających bez znaczącego wpływu dodatkowych naprężeń odrywających; kształt i wymiary próbek przedstawiono na rys. 25a. Podczas badania próbki były zamocowane za pomocą stalowych sworzni o średnicy 10 mm, przechodzących przez wykonane w elementach otwory rys. 25b. W tym badaniu sposób zamocowania próbek eliminuje wpływ zginania na zachowanie się spoiny klejowej. Badania wykonano na pięciu próbkach, przy zalecanej w normie prędkości przyrostu przemieszczeń tłoka maszyny równej 0,5 mm/min. Elementy stalowe zostały przygotowane tak samo jak próbki w badaniu SLJ.

Wyniki badania TAST, przedstawione na rys. 26a, pozwalają na wyraźne wydzielenie dwóch faz pracy kleju: sprężystej i plastycznej. Granicę sprężystości osiągnięto dla naprężeń wynoszących średnio 13,49 MPa, przy odkształceniach 4,5%; po przekroczeniu tej granicy obserwowana była faza plastyczna ze wzmocnieniem, aż do zerwania przy średniej wartości naprężeń 17,36 MPa. W momencie zniszczenia obserwowano znaczne odkształcenia, mieszczące się w zakresie od 10,71 do 19,23%. We wszystkich próbkach doszło do zniszczenia adhezyjno-kohezyjnego (rys. 26b).



Rys. 25 Badania TAST: a) geometria połączenia zakładkowego [74] – wymiary w [mm];  
b) próbka podczas badania

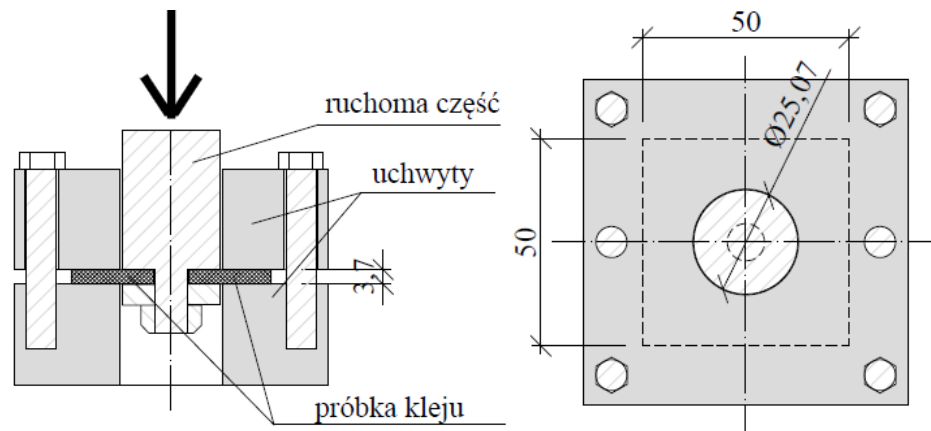


Rys. 26 Badania TAST: a) zależność napężenie-odkształcenie;  
b) przykład zniszczenia próbki

### 3.4.3. Badanie metodą punch-tool [75]

Jako kolejne, przeprowadzono badania wytrzymałości ścinania jak dla tworzyw sztucznych, przez przeciskanie (*Shear Strength of Plastics by Punchtool*), zgodnie z normą [75]. W badaniu tym nie wykorzystuje się sklejonych ze sobą metalowych elementów, konieczne jest natomiast wykonanie przestrzennej próbki o kształcie prostopadłościanu, a następnie – w specjalnie przygotowanym mocowaniu – przeciskanie przez nią stalowego tłoka (rys. 27 i rys. 28). Ze względu na fakt wykonania badań na próbkach kleju w zupełnie odmiennych warunkach niż w przypadkach praktycznych, przebadano tylko dwie próbki

w celu uzyskania danych porównawczych. Badania przeprowadzono przy prędkości przyrostu przemieszczeń tłoka maszyny (wciskania tłoka przez próbkę kleju) wynoszącej 1 mm/min.



**Rys. 27** Geometria próbki w uchwycie do badania punch-tool [75]; wymiary w [mm]

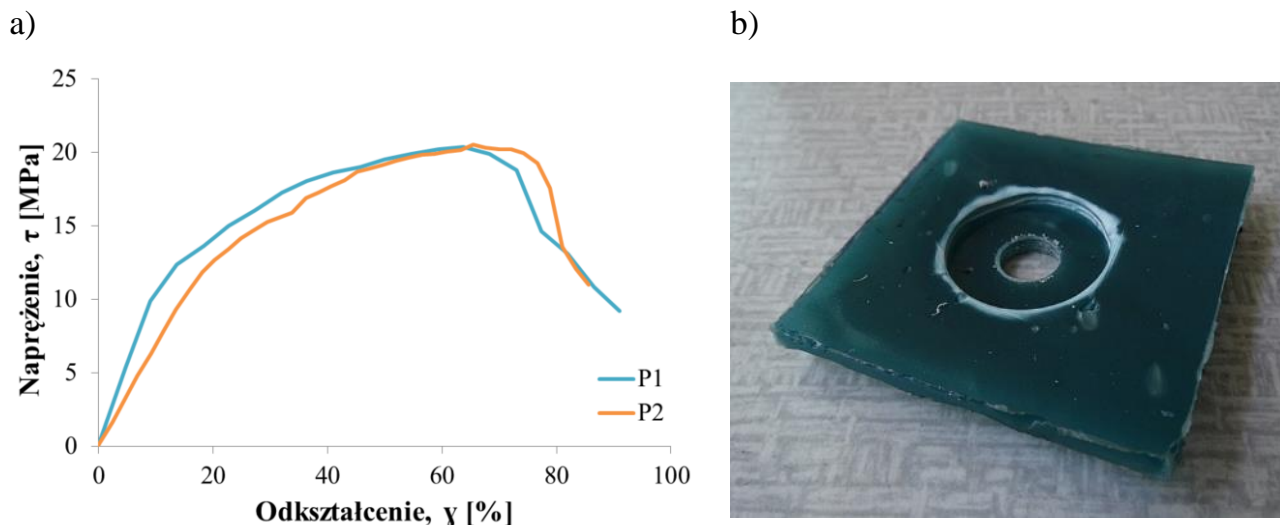


**Rys. 28** Próbkę kleju przed badaniem

Zależności naprężenie-odkształcenie uzyskane z opisanych badań wg [75] przedstawiono na rys. 29a.

Podobnie jak w przypadku badania próbek TAST, można tu wydzielić fazę sprężystą i fazę plastyczną ze wzmocnieniem. Granica sprężystości osiągnąta jest przy średniej wartości naprężeń wynoszącej 12,52 MPa, przy odkształceniach 16,96%; w zakresie półki plastycznej naprężenia rosną jeszcze prawie dwukrotnie, do poziomu 20,46 MPa. Maksymalnym naprężeniom towarzyszą tu znaczne odkształcenia plastyczne sięgające 52%, co widoczne jest na zniszczonej próbce, na rys. 29b. W przypadku badania wg [75],

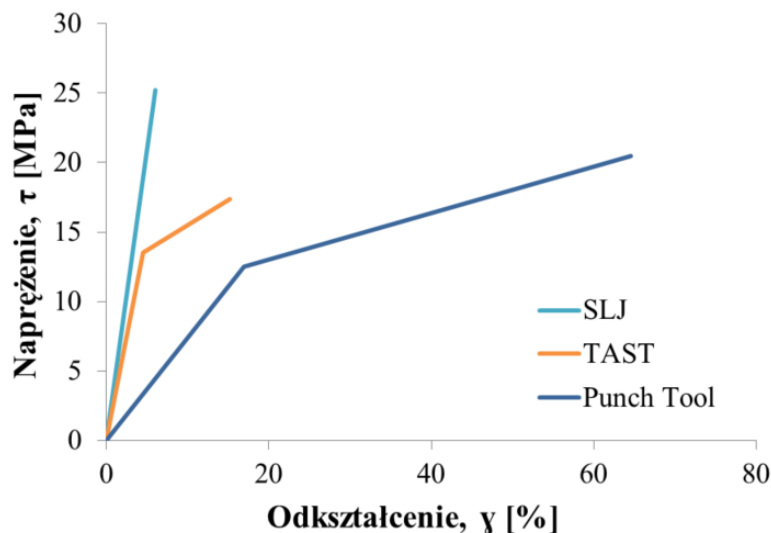
powierzchnia ścinania określana była jako iloczyn obwodu urządzenia przeciskającego i grubości próbki, co w danym przypadku oznacza  $291,3 \text{ mm}^2$ .



**Rys. 29** Badanie punch-tool: a) zależność naprężenie-odkształcenie;  
b) próbka kleju po badaniu

#### 3.4.4. Porównanie wyników

Zestawienie wartości charakterystycznych, otrzymanych na podstawie trzech różnych metod, przedstawiono w tabeli 6. Na rys. 30 porównano również obliczone średnie wartości zależności naprężenie-odkształcenie – w uproszczonej formie wykresów liniowych.



**Rys. 30** Porównanie zależności naprężenie-odkształcenie w przeprowadzonych badaniach wytrzymałości na ścinanie, na podstawie tabeli 6



Tabela 6 Zestawienie wyników przeprowadzonych badań wytrzymałości na ścinanie

Prędkość badania [mm/min]	Nr	$\tau_p$ [MPa]	$\gamma_p$ [%]	$\tau_f$ [MPa]	$\varepsilon_f$ [%]	$G_{PN-EN}$ [MPa]
Badania SLJ [73]						
1,0	S1	-	-	25,95	6,2	770
	S2	-	-	25,18	5,8	810
	S3	-	-	24,06	6,0	629
	S4	-	-	25,51	5,5	662
	S5	-	-	25,39	6,5	776
Średnia		-	-	25,22	6,0	729
Odchylenie standardowe		-	-	0,63	0,34	70,6
Współczynnik zmienności		-	-	2,50%	5,68%	9,68%
Badanie TAST [74]						
0,5	T1	14,20	4,30	17,14	10,71	383
	T2	12,42	4,29	17,46	14,29	368
	T3	13,84	4,57	16,39	14,43	384
	T4	13,36	5,01	17,57	19,29	403
	T5	13,61	4,35	18,22	17,14	357
Średnia		13,49	4,50	17,36	15,17	379
Odchylenie standardowe		0,60	0,27	0,60	2,90	15,63
Współczynnik zmienności		4,45%	6,05%	3,44%	19,12%	4,12%
Badanie punch-tool [75]						
1,0	P1	12,38	13,66	20,36	63,66	116
	P2	12,65	20,26	20,55	65,38	71
Średnia		12,52	16,96	20,46	64,52	94

Z porównania wyników badań SLJ i TAST wynika, że istotny wpływ na rozwój naprężeń w spoinie musiała mieć jej grubość. W przypadku SLJ, gdzie grubość spoiny wynosiła 0,2 mm, doszło do kruchego zniszczenia próbki, natomiast w badaniu TAST, przy grubości 0,7 mm obserwowana była wyraźna półka plastyczna ze wzmocnieniem oraz istotny przyrost odkształceń w tej fazie. Wykonane w celach porównawczych badania przeciskania mogą posłużyć tylko jako odniesienie co do osiągniętych naprężeń granicznych.

Jak widać uplastycznienie w kleju osiągnięto tu, podobnie jak w próbkach TAST, na poziomie ~13 MPa (różnica wyników rzędu 1 MPa), jednak różnica przy zniszczeniu była już rzędu 3 MPa. Odkształcenia osiągnięte podczas badania punch-tool są na tyle duże, że wykluczają możliwość implementacji tego modelu materiałowego w obliczeniach połączeń klejonych. Ich wielkość jest tu łatwo wytłumaczalna faktem braku skrępowania cienkiej warstwy kleju metalowymi elementami – jak ma to miejsce w połączeniach zakładkowych.

Średni moduł sprężystości poprzecznej kleju, w zakresie odkształceń 0,05 – 0,25%, uzyskany z badań TAST jest zbliżony do sztywności kleju uzyskaną z badań laboratoryjnych przedstawionych w tabeli 1. Wykorzystując zależność sprężystości podłużnej, poprzecznej i współczynnika Poissona, obliczono odpowiadające poszczególnym badaniom moduły na podstawie wzoru (10) i zestawiono je w tabeli 7.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (10)$$

**Tabela 7 Porównanie modułów sprężystości**

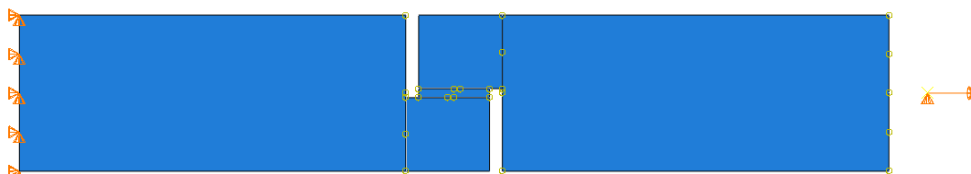
Rodzaj badania	Moduł sprężystości podłużnej, $E_{PN-EN}$ [MPa]	Moduł sprężystości poprzecznej, $G_{PN-EN}$ [MPa]	Współczynnik Poissona, $\nu$ [-]
TAST	1035*	379	0,365
Rozciąganie, tabela 1	1058	388*	

\* wartości obliczone ze wzoru (10)

### 3.4.5. Analiza numeryczna

Przeprowadzono analizę numeryczną badań TAST i SLJ w celu określenia rozkładów naprężeń w spoinach jeszcze przed zniszczeniem. W tym celu wykorzystano model materiałowy o charakterystyce liniowosprężystej. Do analizy numerycznej przyjęto moduł sprężystości kleju uzyskany z badania wytrzymałości na rozciąganie, przy prędkości 1 mm/min. Wykorzystano w tym celu moduł ścieżny, wynikający z ilorazu  $\sigma_e$  i  $\varepsilon_e$  (tabela 1), który wynosi 964 MPa; w analizie nie uwzględniano cech reologicznych.

Analizy numeryczne zostały przeprowadzone w płaskim stanie naprężenia. Została przyjęta czterowęzłowa siatka kwadratowa – CPS4 o wymiarach  $0,05 \times 0,05$  mm w badaniu TAST oraz  $0,02 \times 0,02$  mm w badaniu SLJ. Warunki brzegowe w obydwu badaniach przedstawiono na rys. 31 i rys. 32. W badaniu TAST jedna z pionowych krawędzi stalowego elementu została zamocowana w sposób przegubowy, nieprzesuwny, a wymuszenie poziome w postaci przemieszczenia zostało przyłożone do jednego punktu referencyjnego, połączonego sztywnymi więzami (typu *tie*) z punktami znajdującymi się na krawędzi drugiego elementu stalowego. W przypadku badania SLJ warunki brzegowe różniły się tylko tym, że blokada pionowych przemieszczeń została zadana nie na pionowych krawędziach elementów stalowych, a na poziomych odcinkach, które zostały dodane w celu zniwelowania mimośrodowość połączenia.



**Rys. 31 Model obliczeniowy TAST przyjęty do analiz numerycznych**



**Rys. 32 Model obliczeniowy SLJ przyjęty do analiz numerycznych**

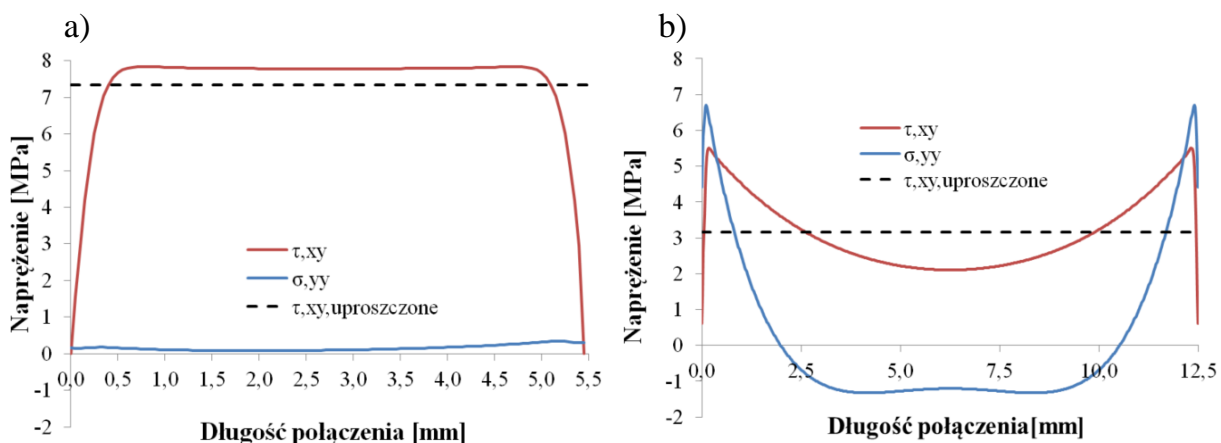
W analizie każdego z połączeń rozpatrywano dwa przypadki: pierwszy dla naprężeń w środku grubości spoiny, rys. 33 i drugi dla naprężeń kontaktowych pomiędzy klejem i elementem metalowym, rys. 34. Na wykresach pokazano rozkład naprężeń przy wartości siły wynoszącej 1000 N.

W badaniu TAST, zarówno w warstwie środkowej jak i krawędziowej, dochodzi do równomiernego rozkładu naprężeń ścinających,  $\tau_{xy}$ , na odcinku od 0,5 do 5,0 mm wynoszących około 7,8 MPa, rys. 33a. Naprężenia odrywające,  $\sigma_{yy}$ , w warstwie środkowej spoiny nie przekraczają 0,2 MPa, w związku z czym można przyjąć, że w przekroju tym zachodzi stan czystego ścinania kleju. Jak wynika z rozkładu naprężeń w warstwie kontaktowej, rys. 34a, dochodzi tam do tworzenia się lokalnych ekstremów naprężeń odrywających,  $\sigma_{yy}$ , natomiast na przeważającej długości spoiny, bo na odcinku od 1,0 do 4,5 mm, są to nadal równomierne naprężenia ścinające wynoszące średnio 7,8 MPa. Dodatkowo na wykresach umieszczono, liniami przerywanymi, średnie naprężenia

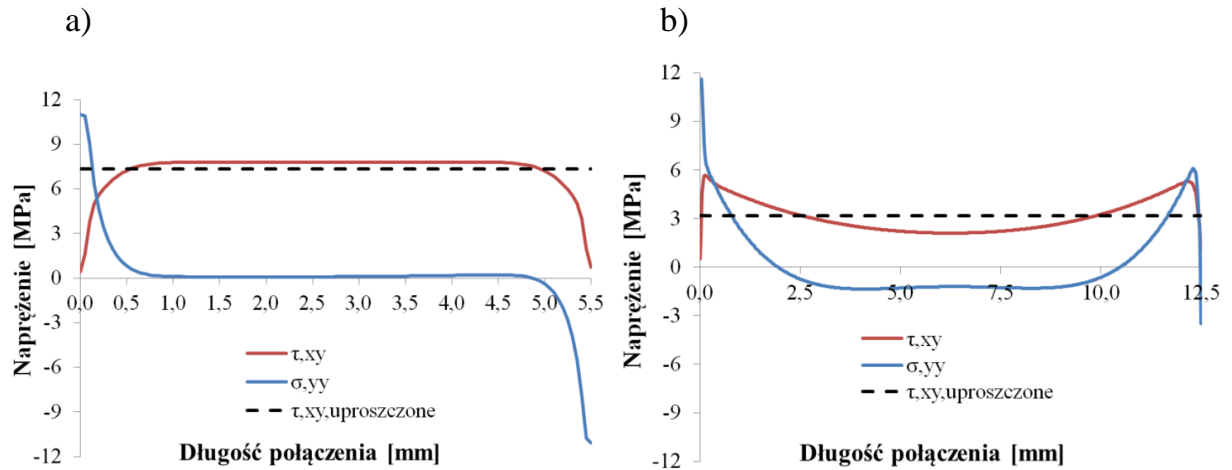
ścinające wynikające wprost z ilorazu siły i powierzchni połączenia. Obliczone w ten sposób naprężenia ścinające równe są 7,3 MPa; co daje różnicę w odniesieniu do wartości maksymalnych na poziomie 0,5 MPa, to jest poniżej 7%. W tym aspekcie należy jednak pamiętać, że powyższa analiza dotyczy bardzo krótkich połączeń – przy dłuższych odcinkach spoin należy się spodziewać znacznie większych różnic pomiędzy wartościami ekstremalnymi i średnimi.

Analogicznie jak dla badań TAST, wykonano analizę rozkładu naprężeń w spoinie klejowej w badaniach SLJ. W tym wypadku nie jest zauważalna różnica pomiędzy rozkładem naprężeń w środkowej (rys. 33b) i kontaktowej (rys. 34b) warstwie spoiny. W obydwu przypadkach na krawędzi połączenia dochodzi do koncentracji naprężeń odrywających  $\sigma_{yy}$  i, co nie miało miejsca w przypadku TAST, również ścinających  $\tau_{xy}$ . Różnica pomiędzy obliczonymi w analizie numerycznej naprężeniami ścinającymi oraz wartościami uproszczonymi na podstawie ilorazu siły i powierzchni spoiny jest w tym wypadku prawie dwukrotna. Średnie, uproszczone naprężenia wynoszą tu 3,2 MPa, podczas gdy rzeczywiste naprężenia krawędziowe osiągają wartość 5,7 MPa.

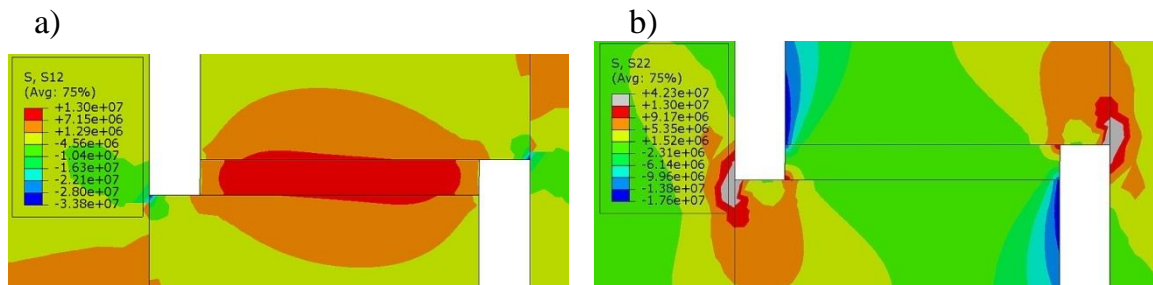
Na rys. 35 przedstawiono mapy naprężeń ścinających i odrywających w badaniu TAST. Naprężenia ścinające występujące na prawie całej powierzchni spoiny oraz niewielki wpływ naprężeń odrywających sprawiły, że podczas badań laboratoryjnych możliwe było uzyskanie pełnej charakterystyki materiału. Na rys. 36, przedstawiono mapy naprężeń ścinających i odrywających w badaniu SLJ. Ze względu na podatność adherentów i geometrię połączenia, podczas badania powstaje tu dodatkowy mimośród spowodowany obrotem połączenia, co powoduje powstanie złożonego stanu naprężeń.



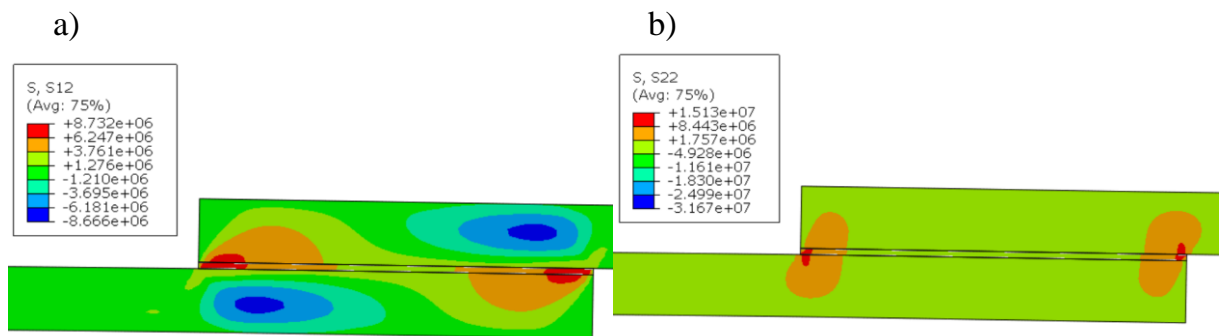
**Rys. 33** Rozkład naprężeń wzdłuż połączenia, w środku grubości warstwy kleju, w badaniu:  
a) TAST; b) SLJ



Rys. 34 Rozkład naprężeń wzdłuż połączenia, w warstwie kontaktowej kleju, w badaniu: a) TAST; b) SLJ



Rys. 35 Mapa naprężeń w połączeniu TAST: a) ścinających; b) odrywających – skalę ograniczono do 13 MPa



Rys. 36 Mapa naprężeń w połączeniu SLJ: a) ścinających; b) odrywających – skalę ograniczono do 13 MPa

### 3.4.6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań ścinania kleju metakrylowego otrzymano trzy różniące się w sposób istotny charakterystyki.

W wyniku badań połączeń zakładkowym SLJ wg [73] uzyskano liniową zależność naprężenie-odkształcenie. Wynikało to z niewielkiej grubości warstwy spoiny klejowej, przez co naprężenia w spoinie nie mogły być redystrybuowane na całą jej długość.

W związku z tym zniszczenie miało charakter nagły (kruchy). Istotny wpływ na wyniki miała również podatność złącza oraz pojawiający się mimośród, przez co w kleju występował złożony stan naprężeń: ścinanie i odrywanie. Można więc przyjąć, że wyniki otrzymane z badania SLJ wg [73] nie pozwalają na uzyskanie prawdziwej charakterystyki samego kleju, a dają tylko informację na temat klejonego połączenia zakładkowego z cienką spoiną, wynoszącą 0,2 mm. Potwierdziły to również analizy numeryczne, na podstawie których możliwe było określenie sposobu przyrostu naprężeń w spoinie klejowej. Zauważalna była znaczna koncentracja naprężeń zarówno ścinających, jak i odrywających, na krawędziach spoiny. Rozkład naprężeń na grubości spoiny był jednorodny, tzn. zarówno w warstwie środkowej, jak i kontaktowej otrzymano podobne ich wartości.

Zależność naprężenie-odkształcenie otrzymana z badania TAST wg [74], miała kształt biliniowy z częścią sprężystą oraz plastyczną, w której następowało istotne wzmocnienie materiału. Grubość spoiny wynosząca 0,7 mm umożliwiła redystrybucję naprężeń ścinających na jej grubości i długości, a kształt łączonych elementów stalowych umożliwił uzyskanie prostego stanu naprężeń ścinających w znacznej części kleju. W związku z tym można przyjąć, że otrzymano charakterystykę samego kleju, bez istotnego wpływu warunków brzegowych. Dodatkowo potwierdza to porównanie sztywności kleju uzyskanej w przeprowadzonych badaniach ścinania oraz otrzymanych w próbie rozciągania. Analiza numeryczna połączenia TAST potwierdziła, że w spoinie klejowej, zarówno na jej długości jak i grubości, występuje w przeważającej większości prosty stan naprężenia.

Badanie przeciskania przeprowadzone zgodnie z [75] wykazało, podobnie jak TAST, biliniową charakterystykę kleju. Wartości naprężeń granicznych były do siebie zbliżone, natomiast odkształcenia, sięgające w momencie zniszczenia 90%, wykluczają możliwość implementacji takiej charakterystyki kleju w połączeniach konstrukcyjnych. Pomimo możliwości uzyskania w tych badaniach prostego stanu naprężeń ścinających, geometria próbek oraz brak skrępowania warstwy kleju sztywnymi łączonymi elementami na tyle odbiegają od warunków panujących w rzeczywistych połączeniach, że uzyskane wyniki mają znikomą wartość praktyczną.

### 3.5. Wytrzymałość na ściskanie

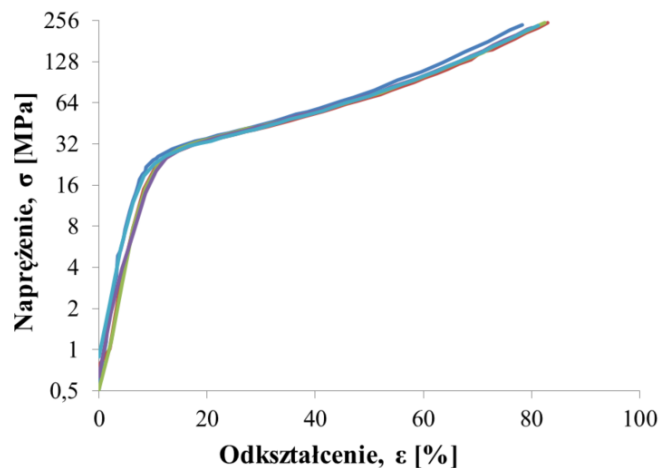
#### 3.5.1. Metodyka badań

Badania wytrzymałości kleju na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężenia wykonano na pięciu próbkach walcowych o średnicy 10 mm i wysokości 4 mm, w prasie hydraulicznej sterowanej przemieszczeniowo. Kształtki były kondycjonowane przez 24 godziny w temperaturze 23°C i wilgotności względnej 50%. Następnie wykonano pięć badań przy stałej prędkości przyrostu przemieszczeń tłoka maszyny 1 mm/min.

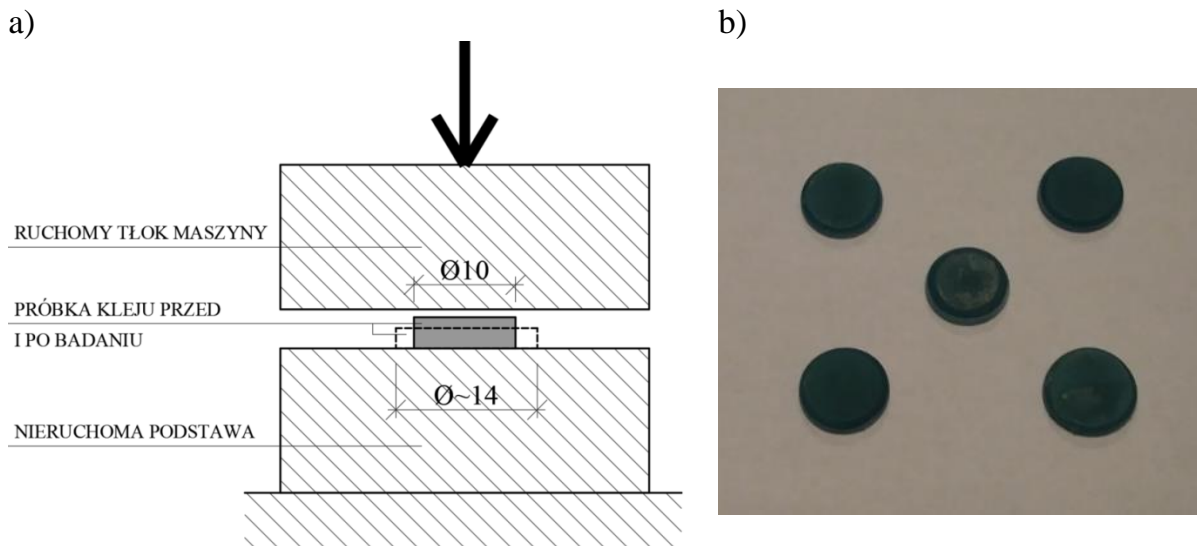
Jak wykazano w opisanych już badaniach rozciągania i ścinania, badany klej metakrylowy cechował się plastycznym zniszczeniem, tzn. zerwanie było poprzedzone znacznymi odkształceniami plastycznymi. Badania ściskania miały więc na celu głównie wykluczenie możliwości kruchego zniszczenia kleju w tym stanie naprężenia.

#### 3.5.2. Wyniki badań laboratoryjnych

Uzyskaną w badaniach zależność naprężenie-odkształcenie pionowe pokazano na rys. 37. Ze względu na hipersprężystą naturę badanego kleju podczas ściskania, wartości naprężeń podano w skali logarytmicznej. Przedstawione na rys. 37 wykresy świadczą o plastycznych odkształceniach badanych próbek, bez nagłych pęknięć czy uszkodzeń. Badania przerywano przy odkształceniach próbek na poziomie 80%, ponieważ dalszy przyrost siły był już bardzo gwałtowny. Sztywność materiału pozostała stała do osiągnięcia naprężeń rzędu 22 MPa; powyżej tej wartości zaobserwowano przejście w stan plastyczny. Na rys. 38 przedstawiono odkształcone próbki kleju po badaniu – bez widocznych uszkodzeń o charakterze nieciągłym (rysy, pęknięcia).



Rys. 37 Zależność naprężenie-odkształcenie w badaniach ściskania



Rys. 38 Badanie ściskania: a) schemat badania; b) widok próbek po badaniu

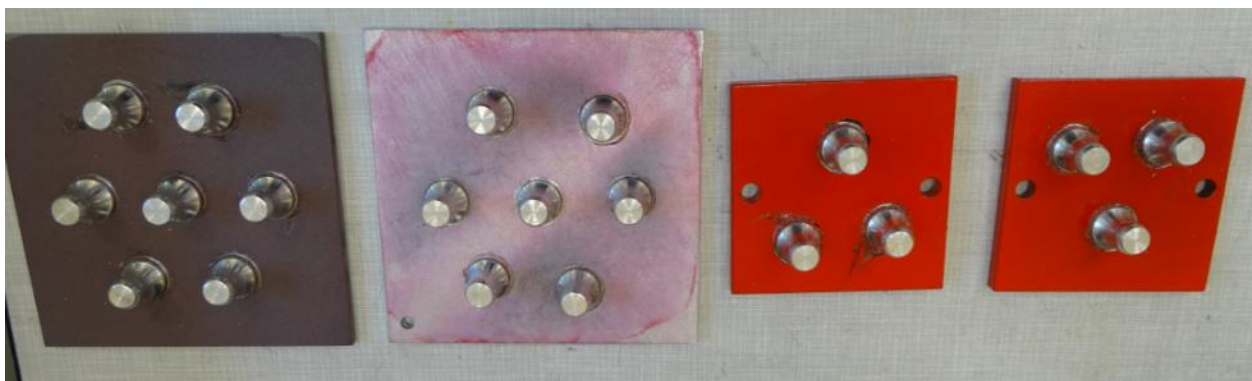
### 3.6. Przyczepność

#### 3.6.1. Metodyka badań

Badanie przyczepności kleju metakrylowego do powierzchni stalowych wykonano zgodnie z wytycznymi normy [21]. Badanie polegało przyklejeniu do podłoża – blachy stalowej – aluminiowych stempli pomiarowych, a następnie wyznaczeniu siły odrywającej pomiędzy sklejonymi elementami. Naprężenia odrywającej określono jako iloraz siły zrywającej i powierzchni podstawy stempla (w badanych przypadkach  $314 \text{ mm}^2$ ). Analizie poddano trzy rodzaje podłoża: stal piaskowaną, stal ocynkowaną i stal malowaną zgodnie z technologią firmy Hiab (rys. 39).

Stemple pomiarowe przed klejeniem były uszorstnione przy użyciu papieru ściernego, odtłuszczone i pokryte warstwą primera zalecanego przez producenta kleju. W przypadku podłoża z czystej stali, blacha została wypiąskowana, odtłuszczona i pokryta primerem. Blachy ocynkowane odtłuszczono i pokryto warstwą primera. Blachy malowane systemem Cargotec – Hiab, stosowanym do urządzeń dźwigowych użytkowanych w trudnych warunkach środowiskowych, tylko odtłuszczono. W każdym z badanych przypadków grubość blach wynosiła 6 mm. Po sklejeniu powierzchni, próbki były kondycjonowane przez 168 godzin w temperaturze  $23^\circ\text{C}$  i wilgotności względnej 50%.





**Rys. 39** Próbki (od lewej) na podłożu ze stali piaskowanej, stali ocynkowanej i stali malowanej (dwa elementy)

### 3.6.2. Wyniki badań laboratoryjnych

W wyniku wykonanych badań przyczepności do wypięskowanej powierzchni stalowej (rys. 40) otrzymano bardzo zbliżone wartości naprężeń odrywających, przy konsekwentnym kohezyjnym charakterze zniszczenia (Y). Badanie przeprowadzone na podłożu ocynkowanym (rys. 41) dały znaczną rozbieżność wyników, przy czym w sześciu próbach uzyskano zniszczenie adhezyjne pomiędzy klejem a ocynkowaną powierzchnią podłoża (B/C), natomiast w jednym przypadku zniszczenie miało charakter adhezyjny pomiędzy warstwą kleju a stemplem pomiarowym (Y/Z). Próby odrywania wykonane na blachach malowanych wykazały istotny wpływ poprawnego wykonania kolejnych warstw systemu malarskiego. Na rys. 42a widać, że zniszczenie miało charakter adhezyjny pomiędzy podłożem, a warstwą farby (A/B), wobec czego uzyskane w tym przypadku wyniki dotyczą nie kleju, a przyczepności samej farby do podłoża. W pozostałych przypadkach (przy bardzo dobrej jakości wykonania warstw malarskich), rys. 42b, stwierdzono odrywanie głównie kohezyjne w warstwie kleju (Y), natomiast w dwóch przypadkach wystąpiło również częściowe oderwanie adhezyjne pomiędzy klejem, a malowaną powierzchnią podłoża (na rys. 42b oznaczone wartością poniżej 100%).

Podsumowanie wyników badania przyczepności przedstawiono w tabeli 8. Największą średnią przyczepność uzyskano w badaniach przeprowadzonych na próbkach ze stali piaskowanej, a niewiele mniejszą w przypadku stali malowanej (przy bardzo dobrej jakości wykonania warstw malarskich). W obydwu przypadkach różnice pomiędzy poszczególnymi wynikami były nieznaczne, a odchylenie standardowe wyniosło tylko 0,44 MPa. Wyniki

uzyskane na próbkach z blachy ocynkowanej świadczą o bardzo dużym zróżnicowaniu chropowatości podłoża, skutkującym znacznym rozrzutem uzyskanych wartości.



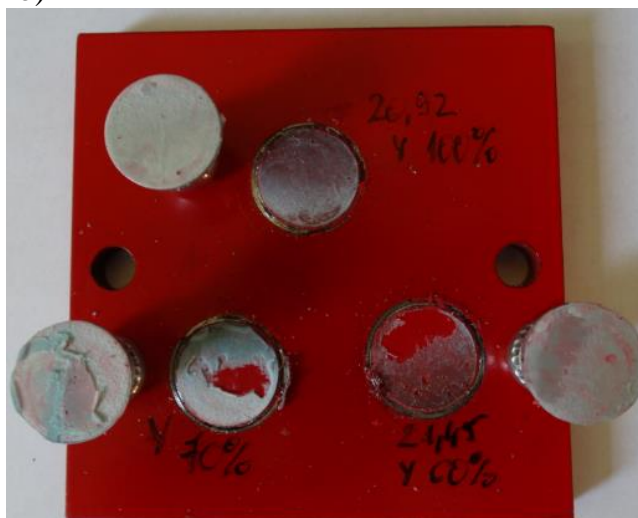
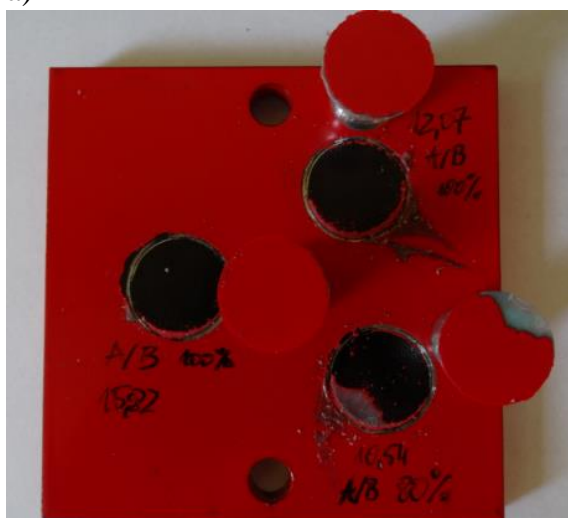
Rys. 40 Wyniki badań odrywania na podłożu ze stali piaskowanej



Rys. 41 Wyniki badania na podłożu ze stali ocynkowanej

a)

b)



Rys. 42 Wyniki badania na podłożu ze stali malowanej: a) próbka z przeciętnie wykonaną warstwą malarską; b) próbka z bardzo dobrze wykonaną warstwą malarską

**Tabela 8 Podsumowanie wyników**

Rodzaj przygotowanej powierzchni	Piaskowanie, rys. 40	Cynkowanie ogniowe, rys. 41	Malowanie – wadliwe, rys. 42a	Malowanie – poprawne, rys. 42b
Średnia przyczepność [MPa]	21,85	10,27	12,81	21,39
Odchylenie standardowe [MPa]	0,44	5,63	2,72	0,44
Współczynnik zmienności [%]	2,0	54,9	21,2	2,1

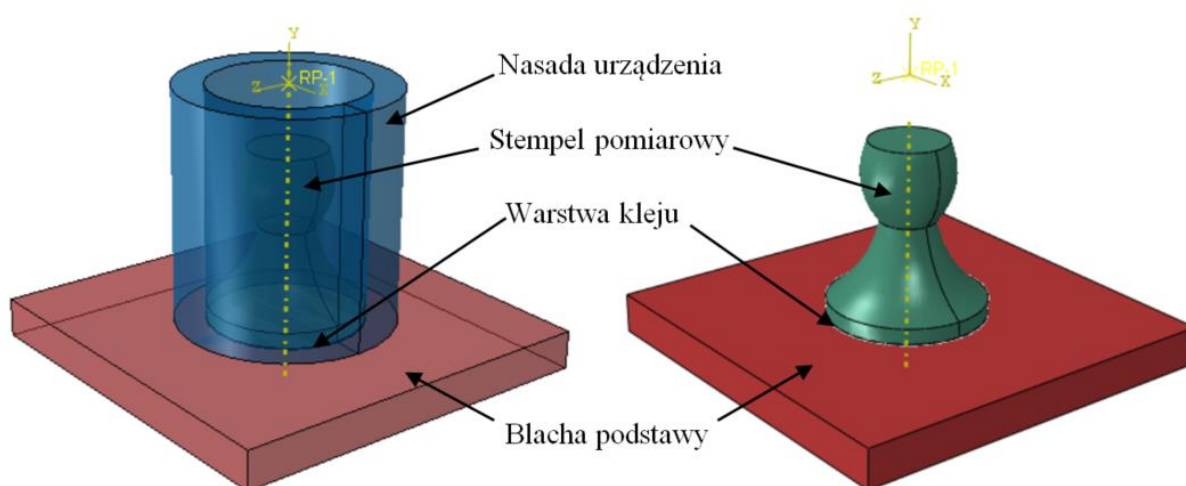
### 3.6.3. Analiza numeryczna

Przeprowadzono analizę numeryczną badań przyczepności, w celu zbadania wpływu grubości (sztywności) podłoża na wyniki. Dla stalowego podłoża i nasady urządzenia pomiarowego oraz aluminiowego stempla przyjęto prosty, liniowo-sprężysty, model materiałowy; dla stali zadano moduł sprężystości  $E = 210$  GPa i współczynnik Poissona  $\nu = 0,3$ , a dla aluminium – odpowiednio  $E = 70$  GPa oraz  $\nu = 0,33$ . W przypadku kleju zastosowano model kontynualny z wykorzystaniem kryteriów LEFM – Cohesive Zone Modelling [59], [64]. Bazując na wykonanych badaniach przyczepności kleju do stali piaskowanej przyjęto graniczne naprężenia odrywające jako 21,85 MPa. Energię pęknięcia przyjęto jako  $3,5$  kJ/m<sup>2</sup>, bazując na opracowaniu [76]. Geometrię stempla pomiarowego odwzorowano z badań, zachowując średnicę podstawy równą 20 mm. Blacha podstawy każdorazowo miała wymiary 80 × 80 mm (jak w badaniach), natomiast analizy wykonano dla różnych grubości podłoża, w zakresie od 3 do 40 mm. Grubość spoiny klejowej pomiędzy podstawą stempla a podłożem każdorazowo wynosiła 0,1 mm.

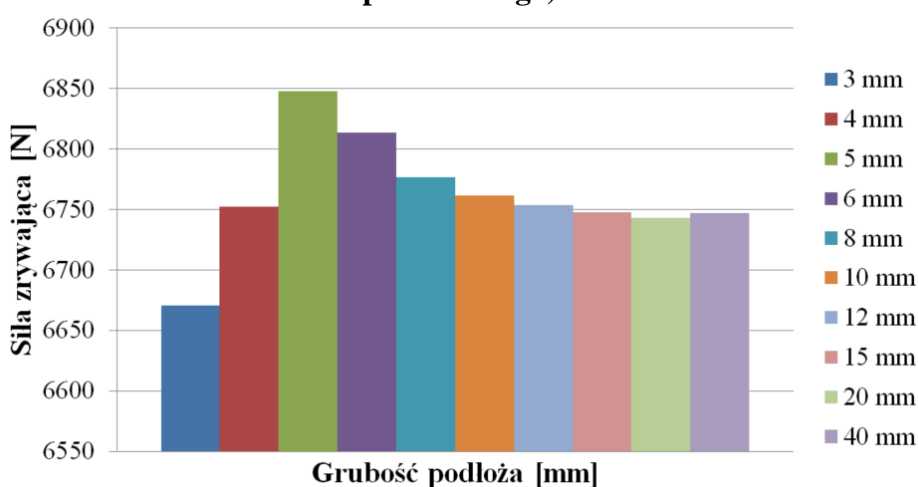
Analizy numeryczne zostały przeprowadzone w złożonym stanie naprężeń. Dla kleju przyjęto 8 węzłową siatkę sześcienną o wymiarach 0,1 × 0,1 × 0,1 mm, a dla stempla pomiarowego oraz blachy podłoża 0,1 × 0,1 × 0,1 mm w strefie skleiny oraz 0,2 × 0,2 × 0,2 mm poza nią i dla całej nasady urządzenia. Obciążenie stempla pomiarowego zadano poprzez wymuszenie przemieszczenia punktu referencyjnego, połączonego z jego górną powierzchnią. Warstwa kleju została połączona ze stemplem pomiarowym oraz blachą podstawy za pomocą elementów typu „tie” – sztywne przyleganie. Dookoła stempla znajdowała się nasada urządzenia, gdzie zadano utwierdzenie

na górnej powierzchni. Pomiędzy nasadą, a blachą podstawy zadano parametry kontaktowe umożliwiające przenoszenie tylko docisku między obydwoma elementami. Pełny model obliczeniowy oraz model z ukrytą nasadą przedstawiono na rys. 43.

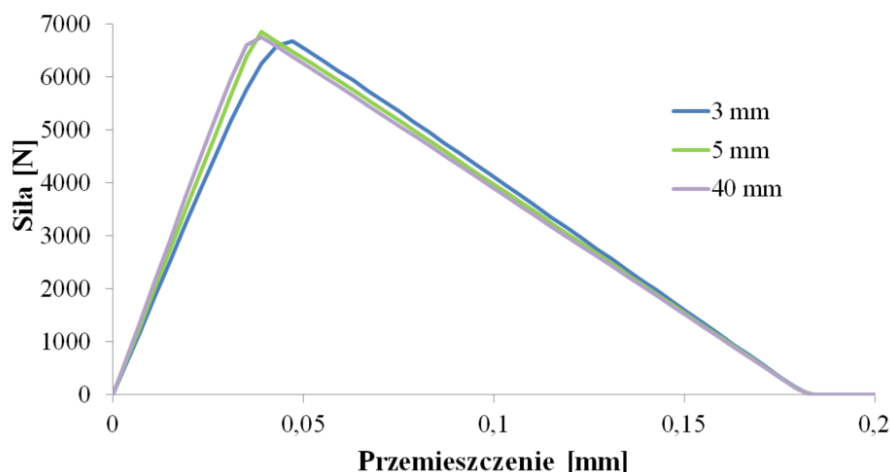
Wyniki analiz numerycznych, przy różnych grubościach podłoża, zostały przedstawione w formie wykresu słupkowego na rys. 44 – jako zależność maksymalnej siły zrywającej od grubości blachy podłoża. Na rys. 45 przedstawiono zależność siły od przemieszczenia stempla pomiarowego dla trzech wybranych grubości podłoża. W tym celu wybrano najmniejszą i największą rozpatrywaną grubość podłoża (3 i 40 mm) oraz grubość, przy której otrzymano największą wartość siły zrywającej (5 mm).



**Rys. 43 Model obliczeniowy badania pull-off przyjęty do analiz numerycznych: z nasadą urządzenia – po lewej oraz z ukrytą nasadą – po prawej (dla lepszej widoczności stempla pomiarowego)**



**Rys. 44 Wykres zależności siły zrywającej od grubości podłoża**

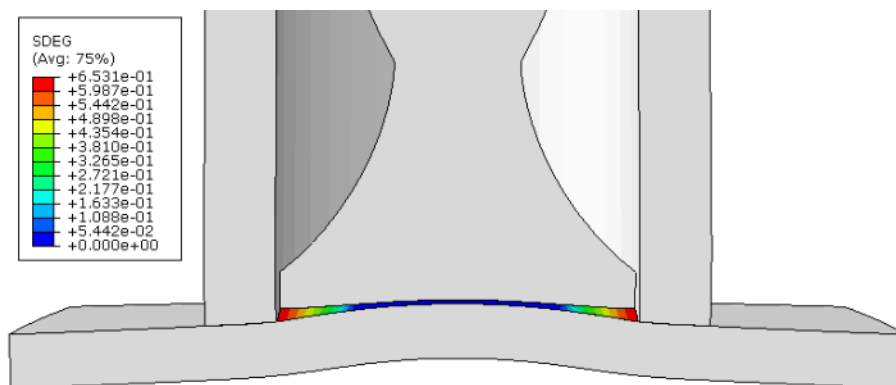


**Rys. 45** Zależność siły od przemieszczenia stempla pomiarowego

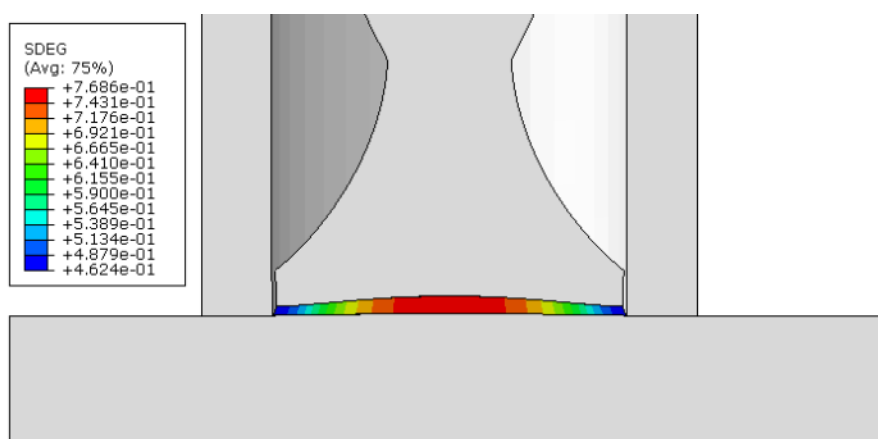
Różnica w przebiegu zależności siła-przemieszczenie wynika z podatności podłoża, do którego przyklejony był stempel. Wpływ grubości podłoża na wartość siły zrywającej wynika z rozkładu naprężeń rozciągających w warstwie kleju. Blachy o małej grubości są znacznie odkształcone podczas badania, skutkiem czego odległość od podłoża na krawędzi stempla jest znacznie większa niż w jego osi. W efekcie naprężenia w skrajnej strefie spoiny przyrastają znacznie szybciej niż w środkowej strefie, a to prowadzi do wcześniejszej degradacji kleju (rys. 46). W przypadku sztywniejszego podłoża widoczny jest bardziej równomierny przyrost naprężeń na całej powierzchni spoiny klejowej, przy czym zbyt sztywne podłoże też nie jest korzystne. Na rys. 47 przedstawiono mapę degradacji kleju dla blachy podstawy o grubości 40 mm. W tym przypadku znacząca staje się sztywność samego stempla – jego deformacja (większe przemieszczenia w części środkowej niż na obwodzie) prowadzi do spiętrzenia naprężeń w środkowej części spoiny.

Największa wartość siły zrywającej, uzyskana przy grubości podłoża równej 5 mm, wynika z równomiernego przyrostu naprężeń rozciągających na całej powierzchni skleiny (rys. 48). Oznaczona na rys. 46 – rys. 48 wartość SDEG jest ogólną zmienną uszkodzenia, która uwzględnia łączny efekt wszystkich aktywnych mechanizmów zniszczenia. Przyjmuje ona wielkości od 0,0 do 1,0, gdzie 1,0 oznacza zupełną degradację sztywności – taki element nie przenosi żadnych naprężeń.

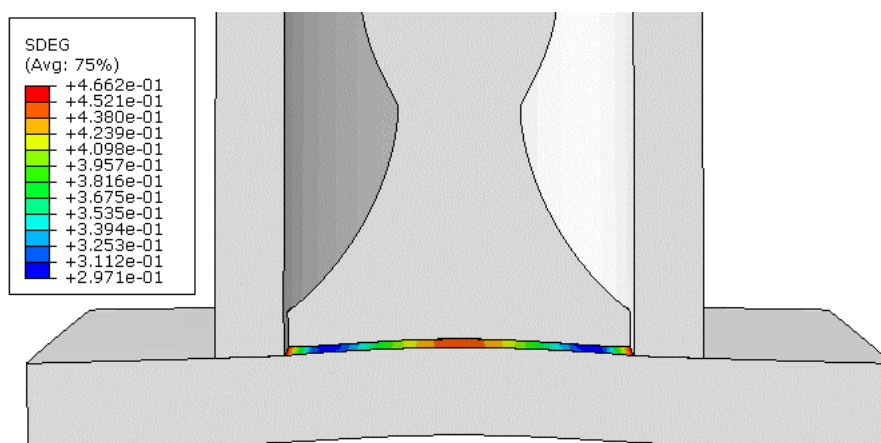




**Rys. 46** Mapa degradacji kleju podczas badania przy grubości podłoża 3 mm, dla przemieszczenia równego 0,039 mm (widoczne deformacje przeskalowano stukrotnie)



**Rys. 47** Mapa degradacji kleju podczas badania przy grubości podłoża 40 mm, dla przemieszczenia równego 0,039 mm (widoczne deformacje przeskalowano stukrotnie)



**Rys. 48** Mapa degradacji kleju podczas badania przy grubości podłoża 5 mm, dla przemieszczenia równego 0,039 mm (widoczne deformacje przeskalowano stukrotnie)

### 3.6.4. Wnioski

Sposób przygotowania powierzchni do klejenia ma istotny wpływ na wartość przyczepności łączonych elementów. W przypadku badanego kleju metakrylowego

uzyskano porównywalne wartości przyczepności do piaskowane stali i do stali o prawidłowo nałożonych warstwach malarskich (przy odpowiedniej przyczepności farby do podłoża). Nie świadczy to o tym, że stal piaskowana oraz malowana mają podobną chropowatość, lecz pozwala na stwierdzenie, że naprężenia graniczne w warstwie kleju były mniejsze niż na styku warstw klejonych. W obydwu przypadkach otrzymane naprężenia przyczepności są więc wartościami bezpośrednio związanymi z parametrami kleju, a nie z chropowatością podłoża. W pozostałych przypadkach, czyli stali ocynkowanej oraz stali o przeciętnej jakości powłoce malarskiej, otrzymane naprężenia świadczą, odpowiednio, o adhezji na powierzchni ocynkowanej i w samej farbie (na styku jej warstw).

Przeprowadzone analizy numeryczne pozwoliły na porównanie wpływ grubości podłoża na naprężenia przyczepności. Obliczone różnice w wynikach są niewielkie i mieszczą się w granicach 2,6% co oznacza, że w rozpatrywanych badaniach grubość blach podstawy (w rozsądnych granicach) nie miałaby większego wpływu na wyniki. Analiza pozwoliła jednak na przedstawienie w uproszczony sposób mechanizmu degradacji kleju w badaniu przyczepności, w zależności od sztywności łączonych elementów.





## 4. Badania laboratoryjne (termiczne) kleju

### 4.1. Wstęp do badań

Równie istotna jak parametry wytrzymałościowe kleju jest jego prędkość wiązania oraz zakres temperatur, w których może on być stosowany. Na podstawie analizy termowizyjnej oraz analizy DSC wykonano badania czasu wiązania próbki kleju, określono maksymalną temperaturę jego powierzchni, a także całkowitą zmianę entalpii podczas wiązania.

Przeprowadzono również analizę DMTA, na podstawie której wyznaczono zmienność modułu zachowawczego i stratności przy ścinaniu kleju, w zakresie temperatur od -70 do 180°C. Na podstawie zmiany modułu zespolonego, w zależności od temperatury określono pięć przedziałów charakteryzujących właściwości reologiczne kleju. Dodatkowo, dzięki wyznaczeniu krzywych wiodących, określono parametry kleju dla szerokiego spektrum częstotliwości, również zależnego od temperatury.

Opisy zastosowanych procedur badawczych zamieszczono w kolejnych podrozdziałach.

### 4.2. Analiza termiczna podczas wiązania próbki kleju [8]

#### 4.2.1. Badanie termowizyjne

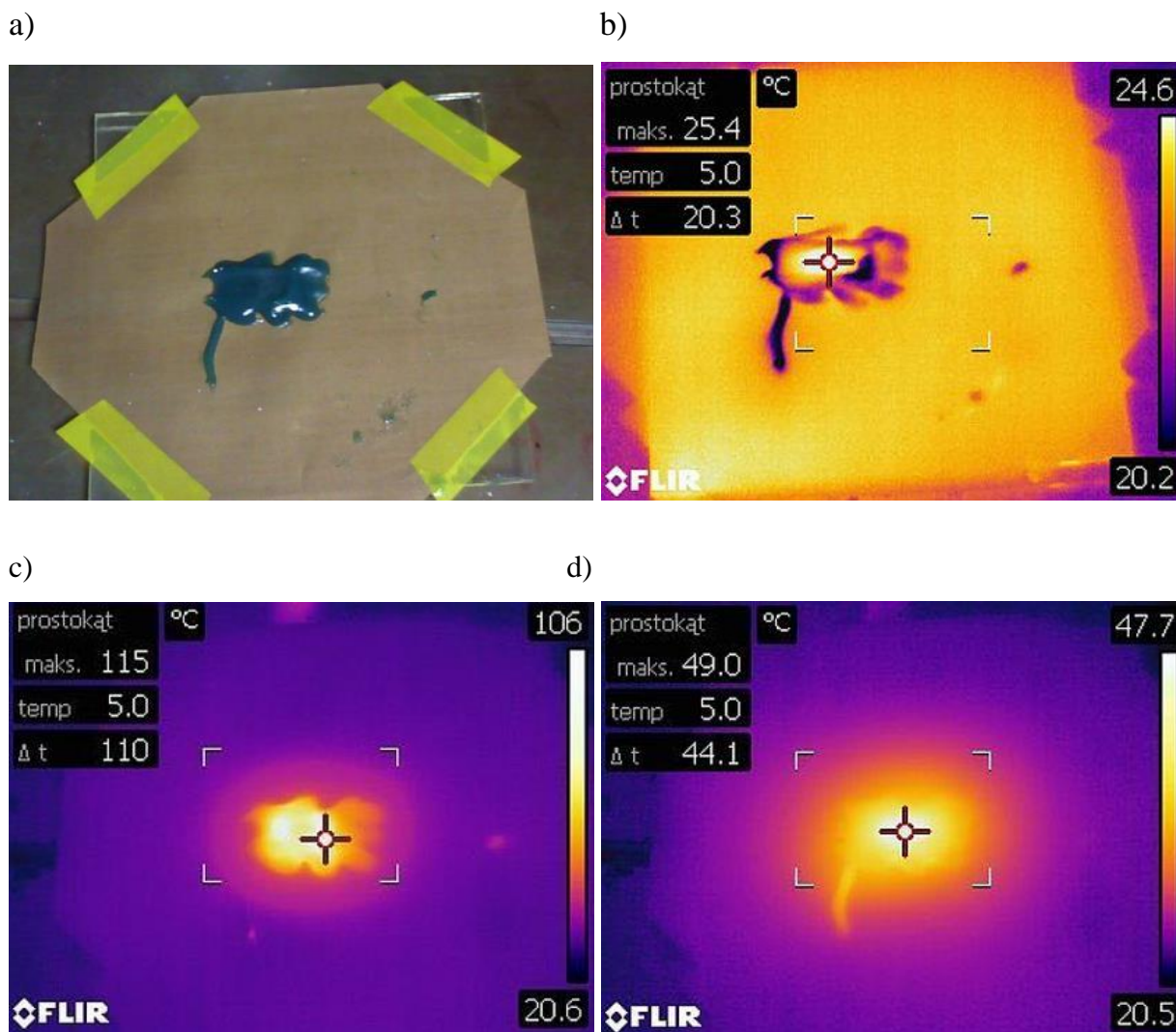
Badanie termowizyjne przeprowadzono analizując zmiany temperatury na powierzchni próbki kleju – wykonując cyklicznie zdjęcia kamerą termowizyjną w odstępach czasowych co 15 sekund. Niewielka ilość kleju, rzędu 5 g, umieszczona została w tym celu na ceracie teflonowej (rys. 49a).

Na rys. 49b, c, d przedstawiono termogramy badanej próbki kleju metakrylowego. Po upływie 1 minuty wiązania wystąpiła wyraźna różnica pomiędzy centralną i skrajną strefą próbki kleju. Maksymalna temperatura osiągnięta została w 12 minucie i wynosiła 115°C na całej powierzchni próbki. Wyrównana temperatura na całej powierzchni utrzymywała się przez cały dalszy proces wiązania, kiedy próbka stygła w sposób równomierny.

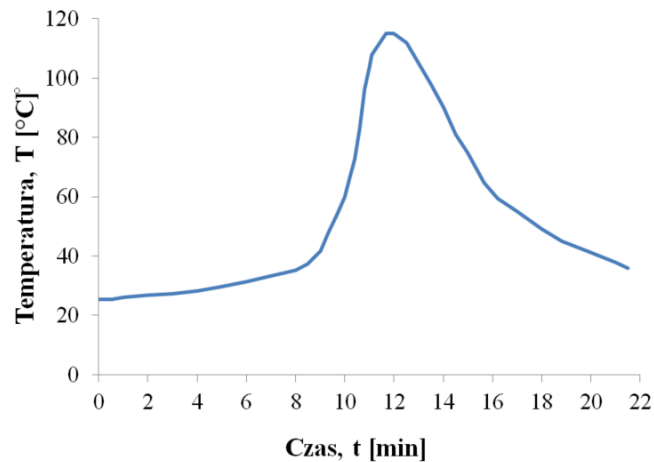
Wykres przedstawiający zmianę temperatury kleju podczas wiązania przedstawiono na rys. 50. Po 9 minutach następuje gwałtowny wzrost temperatury kleju, która w okresie kolejnych 2,5 minuty wzrasta o 73,4°C i utrzymuje się na tym poziomie przez niecałą

minutę. Następnie, już nieco wolniej, następuje spadek temperatury, która po upływie kolejnych 9 minut wynosi już tylko 36°C.

Trzeba tu podkreślić, że opisane wyniki są wiarygodne dla niewielkiej próbki o określonym kształcie, pozostającej w otoczeniu powietrza. Skomentowano to w dalszym tekście.



Rys. 49 Analiza termowizyjna: a) badana próbka, b) obraz po 1 min, c) obraz po 12 min, d) obraz po 18 min [8]



**Rys. 50** Przyrost w czasie temperatury próbki o masie 5 g, na podstawie analizy termowizyjnej [8]

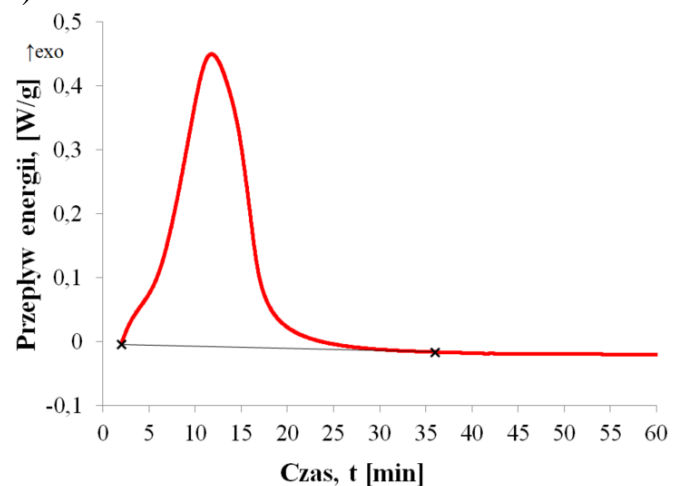
#### 4.2.2. Analiza DSC

Kolejną analizę termiczną wykonano metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej DSC [77], [78]. Aparatura składa się z pieca w którym temperatura jest kontrolowana w trakcie badania, tygla na którym umieszcza się badany materiał, pustego tygla stanowiącego próbę odniesienia oraz sensora pomiarowego z dwoma polami, na których umieszcza się, odpowiednio, próbkę badaną i próbkę odniesienia. Pod polami sensora pomiarowego umieszczone są termopary pozwalające na stały pomiar temperatury próbki i jej otoczenia, a także zmiany strumienia ciepła przepływającego przez próbkę – rys. 51a. Podczas badania DSC, w temperaturze otoczenia 25°C mierzono energię cieplną wydzielaną z próbki kleju podczas sieciowania. Badanie rozpoczęto po upływie 2 minut od uformowania próbki.

a)



b)

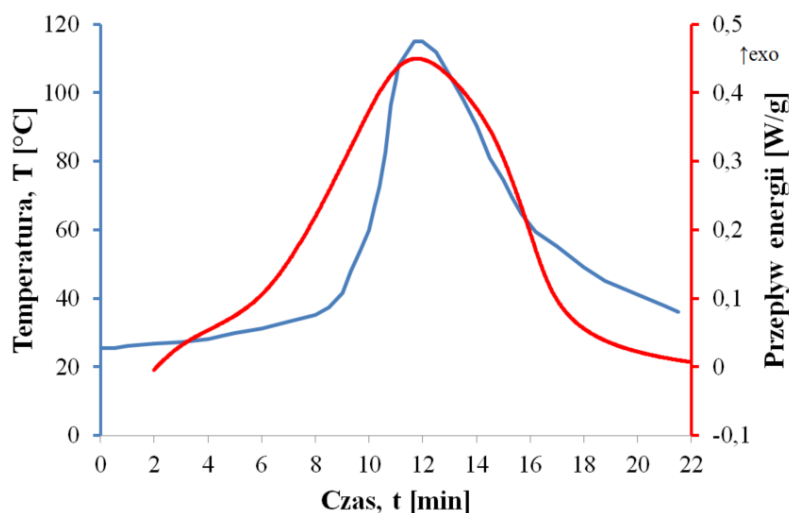


**Rys. 51** Aparat DSC 1 firmy Mettler-Toledo wyposażony w intracooler Huber TC100 MT [8]

Wynikiem analizy DSC jest zmierzona entalpia procesu sieciowania materiału w funkcji czasu. Uzyskaną zależność przedstawiono na rys. 51b. Największa emisja ciepła nastąpiła po upływie 12 minut, natomiast cały proces trwał 36 minut. Oznaczone pole, pod maksymalną wartością reakcji egzoenergetycznej (ograniczone od dołu czarną linią), a więc całkowita zmiana entalpii, wyniosła  $\Delta H = 236,7 \text{ J/g}$ .

#### 4.2.3. Porównanie wyników

Na rys. 52 przedstawiono przebieg zmiany temperatury oraz zmianę entalpii badanych próbek kleju. Po upływie 12 minut zarówno w badaniu termowizyjnym jaki i DSC wystąpiło ekstremum funkcji. W związku z tym, że podczas badania termowizyjnego mierzono parametry tylko na zewnętrznej powierzchni kleju, natomiast w badaniu DSC pomiary wykonywano przy użyciu termopar umieszczonych w tyglu z badaną próbką, przyrost zmiany entalpii w badaniu DSC następuje w sposób łagodniejszy niż powierzchniowy przyrost temperatury kleju. Wynika to z faktu, że temperatura na powierzchni kleju mogła wzrosnąć dopiero po równomiernym rozgrzaniu znacznej objętości całej próbki kleju, w tym wypadku po upływie 9 minut.



Rys. 52 Porównanie przebiegu zmiany temperatury i przepływu energii w czasie [8]

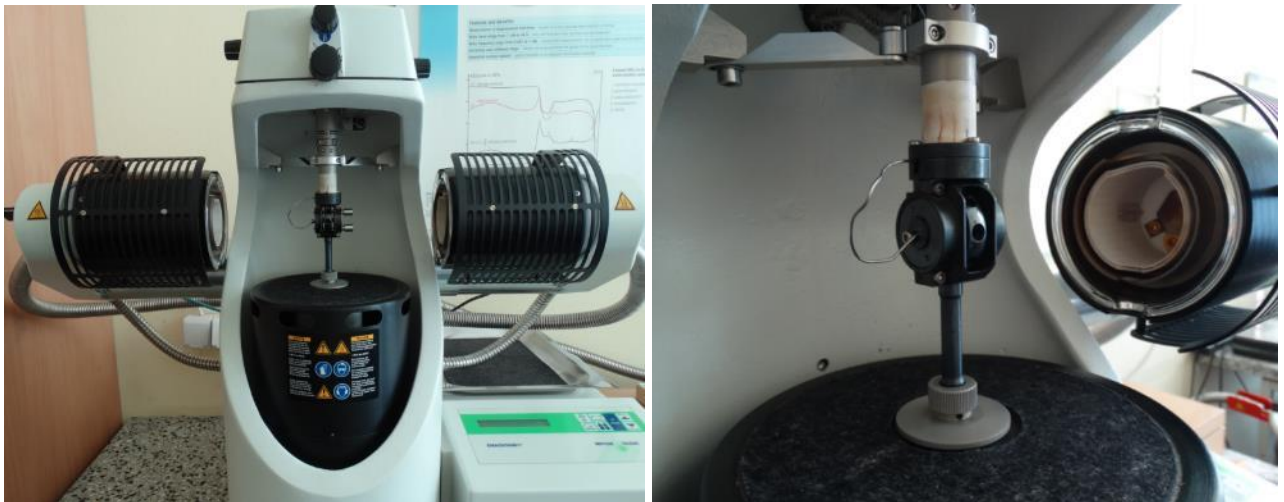
Interpretując uzyskane wyniki należy mieć świadomość, że dotyczą one próbki kleju o określonym kształcie i masie, a nie rzeczywistej warstwy kleju w konstrukcji. W tym drugim przypadku przebieg procesów związanych ze zmianą temperatury jest wyraźnie zależny od proporcji pomiędzy grubością warstwy kleju i grubością oraz materiałem sklejonych warstw konstrukcyjnych. W przypadku analizy pełnego połączenia klejonego

rozkład temperatury kleju podczas wiązania może być silnie zaburzony szybkim przejmowaniem ciepła przez łączone elementy – zwłaszcza stalowe, o grubości znacznie przekraczającej grubość warstwy kleju.

### 4.3. Analiza DMTA – ścinanie próbki [79], [80]

#### 4.3.1. Metodyka badania

Dynamiczno-mechaniczno-termiczna analiza DMTA pozwala na określenie parametrów reologicznych kleju z uwzględnieniem wpływu m.in. temperatury i częstotliwości obciążeń. Badania przeprowadzono w aparaturze DMTA 861e firmy Mettler-Toledo (rys. 53), w której umieszczono próbki kleju i poddano naprężeniom ścinającym, przy zmiennej sile ścinającej o wartości  $\pm 14$  N. Badane próbki były kondycjonowane przez 168 godzin w temperaturze  $23^{\circ}\text{C}$  i wilgotności 50%. Badania przeprowadzono przy różnych (stałych w danym badaniu) częstotliwościach wymuszeń: 1, 2, 5, 10, 20 i 50 Hz. Podczas każdego badania temperatura wzrastała od  $-70$  do  $180^{\circ}\text{C}$ , z prędkością  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .



**Rys. 53 Aparatura badawcza (po lewej) oraz mocowanie próbki podczas badania DMTA (po prawej) [79]**

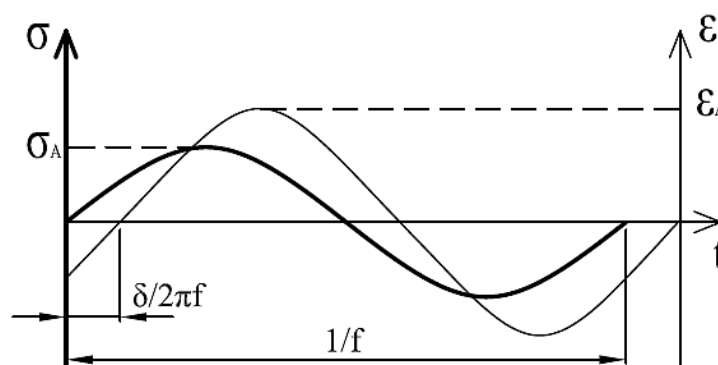
Badanie DMTA pozwala na określenie modułu zachowawczego  $G'$  oraz modułu stratności  $G''$  w funkcji temperatury. Moduł zachowawczy jest proporcjonalny do ilości energii zgromadzonej w próbce poddanej odkształceniom. Moduł stratności z kolei jest proporcjonalny do energii rozproszonej w formie ciepła i tarcia [79], [81], [82]. Iloraz

obydwu modułów, wyrażony równaniem (11), określany jest jako współczynnik stratności i jest stosowany jako miara tłumienia w układzie lepkosprężystym.

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (11)$$

$$G^* = G' + iG'' \quad (12)$$

W czasie badania próbka poddawana jest określonym naprężeniom o przebiegu sinusoidalnym i analizowane są jej odkształcenia. Pomiędzy funkcjami naprężeń i odkształceń powstaje pewne przesunięcie fazowe  $\delta$  (rys. 54). Jeżeli przesunięcie fazowe jest nieznaczne ( $\delta \rightarrow 0$ ) to materiał jest uważany za doskonałe ciało sprężyste, a wraz ze wzrostem przesunięcia fazowego wzrasta lepkość. Zależność tę można odnieść bezpośrednio do wzoru (11), dzięki czemu można zauważyć, że im mniejszy iloraz modułu stratności do modułu zachowawczego, tym bardziej sprężysta jest charakterystyka materiału. Na podstawie analizy możliwe jest wyznaczenie zespolonego modułu ścinania ze wzoru (12), w którym moduł urojony  $i$  opisuje przesunięcie fazowe.



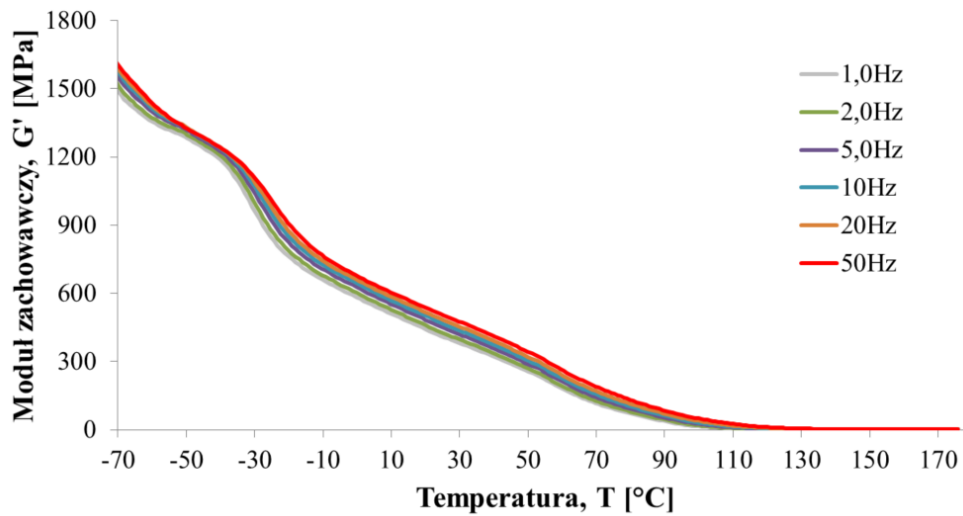
Rys. 54 Przesunięcie fazowe [79]

#### 4.3.2. Wyniki badań

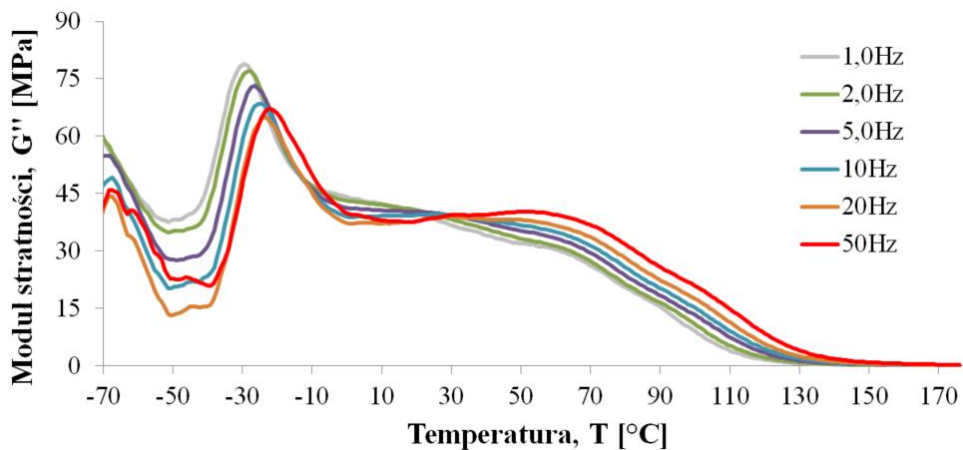
Dane z wykonanych badań, w formie termogramów odczytanych przy użyciu reometru, przedstawiono na rys. 55 i rys. 56. Wartości modułu zachowawczego  $G'$  wzrastają w określonej temperaturze wraz ze wzrostem częstotliwości. Zmiany modułu stratności  $G''$ , przedstawione na rys. 56 pokazują, że w temperaturach mniejszych od  $20^\circ\text{C}$  wraz ze wzrostem częstotliwości następuje jego spadek. Oznacza to, że dla większych



częstotliwości wymuszeń materiał staje się w większym stopniu sprężysty. W wyższych temperaturach ta tendencja się zmienia – co oznacza, że klej jest bardziej sprężysty przy niższych częstotliwościach wymuszeń.



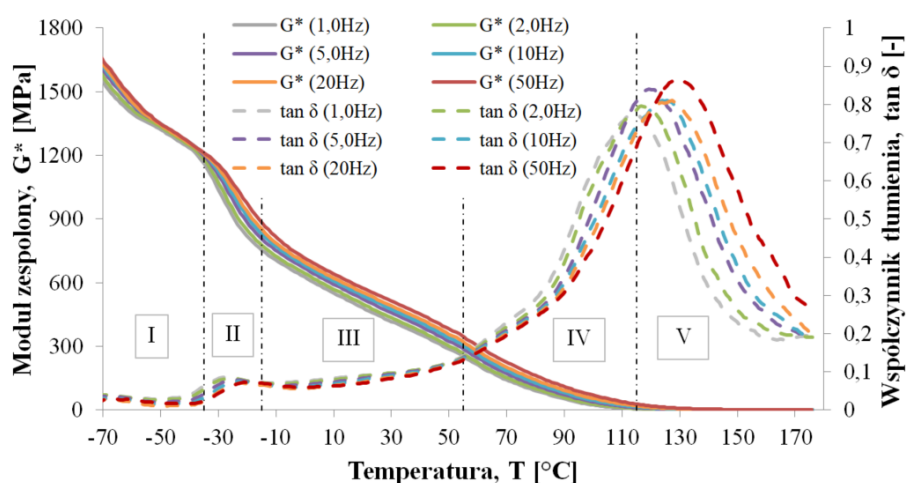
Rys. 55 Zmiany modułu zachowawczego  $G'$  w funkcji temperatury dla rozpatrywanych częstotliwości [80]



Rys. 56 Zmiany modułu stratności  $G''$  w funkcji temperatury dla rozpatrywanych częstotliwości [80]

Na rys. 57 przedstawiono zmianę modułu zespolonego  $G^*$  oraz współczynnika tłumienia w funkcji temperatury w rozpatrywanych częstotliwościach wymuszeń. Moduł  $G^*$ , będący sumą  $G'$  i  $G''$  (z uwzględnieniem przesunięcia fazowego), jak widać niewiele zmienił się w stosunku do modułu  $G'$ . Dodatkowo, na podstawie przebiegu  $G^*$  można wyodrębnić pięć przedziałów zależności modułu od temperatury. Przedział I, a więc zakres temperatur w których klej ma charakterystykę sztywną i kruchą, występuje aż do  $-35^\circ\text{C}$ . Wówczas materiał odkształca się tylko w niewielkim zakresie i to w sposób sprężysty. Później

następuje gwałtowny spadek zespolonego modułu ścinania aż do temperatury  $-15^{\circ}\text{C}$  – jest to zakres nazywany regionem zeszklenia (II przedział). Później następuje zakres w pełni lepkosprężystej pracy materiału – III przedział, gdzie energia ruchu cieplnego makrocząstek i energia oddziaływań międzycząsteczkowych mają zbliżoną wielkość, co oznacza, że odkształcenia sprężyste i lepkie pozostają w równowadze. Spadek modułu nadal następuje, jednak jest on już mniejszy. Powyżej  $55^{\circ}\text{C}$  następuje ponowna intensyfikacja spadku modułu  $G^*$  – przedział IV. W tym stanie dominują odkształcenia lepkie, a polimer ma wówczas postać cieczy o wysokiej sprężystości [83], [84]. Przedział V występuje w momencie przekroczenia temperatury topnienia, która pokrywa się z największą wartością współczynnika stratności  $\tan \delta$  – w badanym przypadku powyżej temperatury około  $115^{\circ}\text{C}$ . Wtedy wartości modułów zaczynają dążyć do zera. W przedziale V dominują odkształcenia lepkie, a klej ma postać zbliżoną do cieczy o wysokiej sprężystości. Zakres poszczególnych przedziałów oznaczono również na rys. 57.

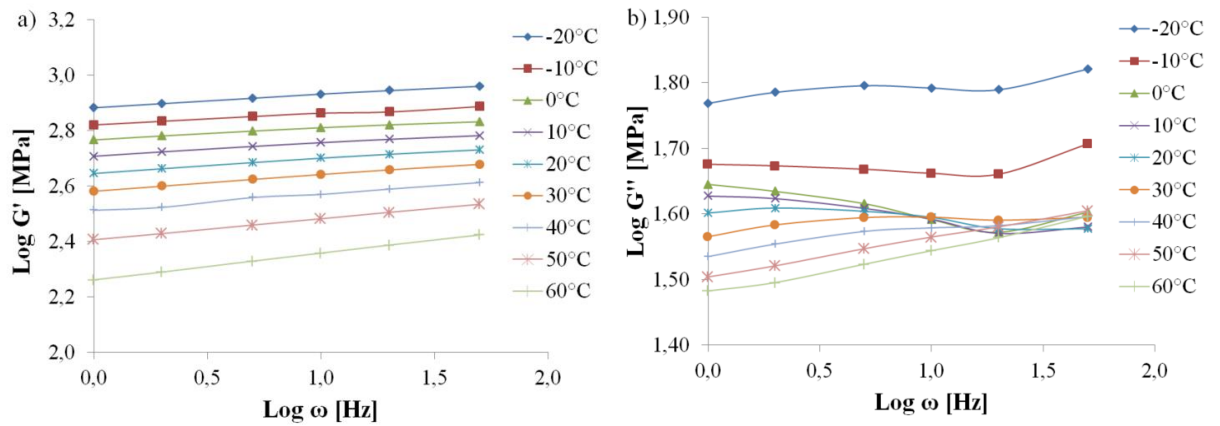


**Rys. 57** Zmiany modułu zespolonego  $G^*$  i współczynnika tłumienia  $\tan \delta$  w funkcji temperatury dla rozpatrywanych częstotliwości [80]

#### 4.3.3. Analiza wyników – krzywe wiodące

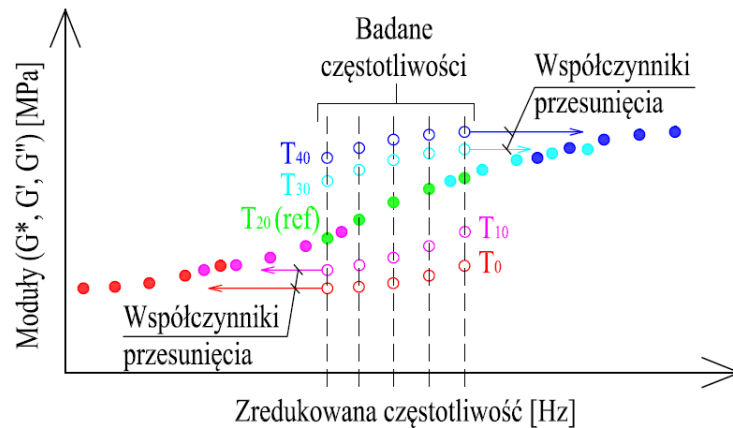
Konstruowanie krzywych wiodących (*master curves*) na podstawie wyników DMTA pozwala na oszacowanie wartości modułów  $G'$ ,  $G''$  i  $G^*$  dla znacznie szerszego spektrum częstotliwości. Krzywe wiodące są konstruowane za pomocą współczynnika przesunięcia (*shift factor*)  $a_T$ . Na rys. 58 przedstawiono wartości modułów zachowawczego i stratności dla wybranych temperatur z zakresu od  $-20$  do  $60^{\circ}\text{C}$ .





Rys. 58 Porównanie modułów: a) zachowawczego  $G'$ ; b) stratności  $G''$  [80]

Tworzenie krzywej wiodącej polega na tym, że w odniesieniu do danej temperatury  $T_{ref}$  wyznacza się współczynniki przesunięcia poziomego dla pozostałych wykresów uzyskanych w innych temperaturach  $T$ . Przykładowy mechanizm tworzenia krzywej wiodącej przedstawiono na rys. 59.



Rys. 59 Mechanizm tworzenia krzywej wiodącej [80]

Do wyznaczenia współczynnika przesunięcia wykorzystano poniższy wzór [85]:

$$\log a_{(T_i, T_{ref})} = \sum_{j=i}^{j=ref} \frac{\log(|G^*(T_j, f)|) - \log(|G^*(T_{j+1}, f)|)}{\delta_{avr}^{(T_j, T_{j+1})}(f)} \cdot \frac{\pi}{2} \quad (13)$$

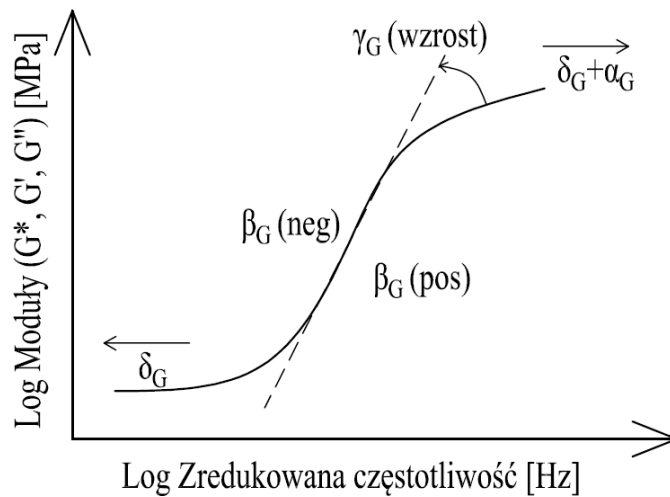
gdzie  $\delta_{avr}(f)$  jest średnim przesunięciem fazowym w określonej częstotliwości dla kolejno rozważanych temperatur,  $G^*(T_j, f)$  jest modułem zespolonym otrzymanym z badania dla określonej częstotliwości i kolejno rozważanych temperatur,  $G^*(T_{j+1}, f)$  jest

przewidywanym (przesuniętym / zmodyfikowanym) modułem zespolonym w stosunku do temperatury odniesienia  $T_j$ .

Utworzenie krzywej wiodącej zostało wykonane przy użyciu GLAM [86]:

$$\log |G_{pre}^*(F, T)| = \delta_G + \frac{\alpha_G}{(1 + \lambda_G \cdot e^{(\beta_G + \gamma_G \cdot (\log f_r))})^{\frac{1}{\lambda_G}}} \quad (14)$$

gdzie  $\delta_G$  jest najniższą asymptotą,  $\alpha_G$  jest różnicą pomiędzy górną i dolną asymptotą,  $\beta_G$  i  $\gamma_G$  są współczynnikami kształtu,  $\lambda_G$  jest współczynnikiem pozwalającym na uzyskanie krzywej asymetrycznego kształtu. Określone współczynniki przedstawiono na rys. 60.

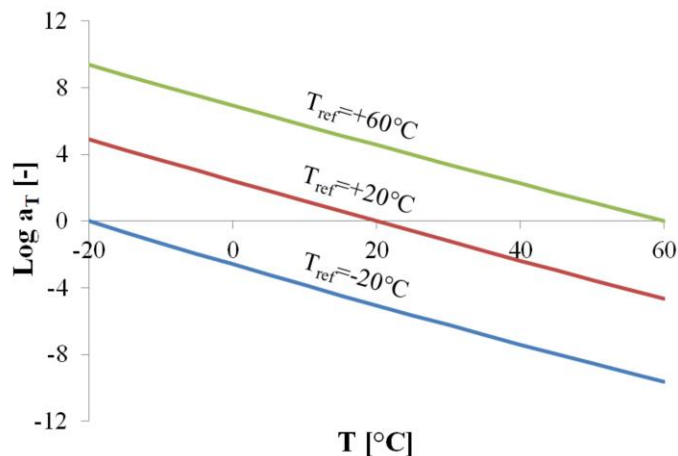


**Rys. 60 Definicja Sigmoidalnej Funkcji [80], [87]**

W celu określenia współczynników równania (14) wykorzystano obliczenia numeryczne przy użyciu metody najmniejszych kwadratów. W tym celu użyto funkcji rozwiązywania równań nadokreślonych dostępną w Solverze programu Microsoft Excel. Ze względu na to, że wykorzystana we wzorze (14) częstotliwość  $f_r$  jest częstotliwością zredukowaną (przesuniętą przez  $a_T$ ), do określenia współczynnika przesunięcia  $a_T$  wykorzystano metodę WLF [88]. Zależność, z której wyznaczane są współczynniki, określona jest poniższym wzorem (15).

Wyznaczenie wartości do równania (14) pozwoliło na obliczenie współczynników przesunięcia przy wykorzystaniu wzoru (13). Poniżej, na rys. 61 przedstawiono obliczone współczynniki  $a_T$ , dla trzech temperatur odniesienia: -20, 20 i 60°C.

$$SSE = \sum \frac{\left( \log|G_{exp}^*(f, T)| - \left( \delta_G + \frac{\alpha_G}{\left( 1 + \lambda_G \cdot e^{\beta_G + \gamma_G \cdot \left( \frac{-C_1 \cdot (T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} + \log f \right)^{\frac{1}{\lambda_G}} \right)} \right) \right)^2}{(\log|G_{exp}^*(f, T)|)^2} \quad (15)$$

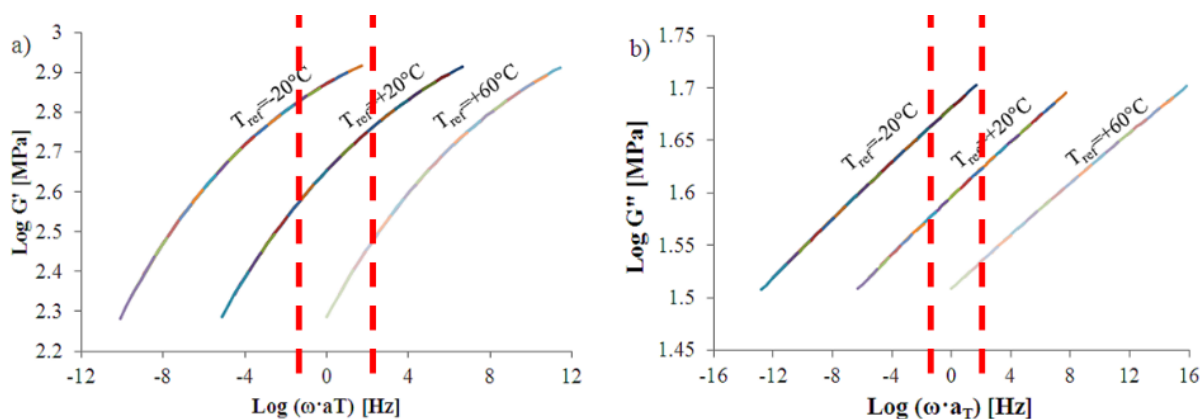


**Rys. 61 Poziome współczynniki przesunięcia  $a_T$  dla rozpatrywanych temperatur odniesienia  $T_{ref}$  [80]**

Bazując na obliczonych współczynnikach przesunięcia  $a_T$  skonstruowano krzywe wiodące również dla trzech temperatur odniesienia: -20, 20 i 60°C; wyniki przedstawiono na rys. 62. Otrzymane w ten sposób wykresy pozwalają na określenie szerokiego spektrum częstotliwości, od  $7,6^{-11}$  do  $6,4^{11}$  Hz. Można jednak przyjąć, że w klejonych połączeniach konstrukcyjnych realnie mogą występować częstotliwości w zakresie od 0,1 do 100 Hz. W częstotliwościach niższych od 0,1 Hz czas działania obciążenia w jednym cyklu jest na tyle długi, że dochodzi do zjawiska relaksacji w kleju, natomiast górny limit częstotliwości określono przy założeniu, że klej zostałby wykorzystany w konstrukcji urządzeń takich jak turbiny, wentylatory czy kompresory, dla których częstotliwość wymuszeń nie przekracza zazwyczaj 100 Hz. Na rys. 62 omówiony zakres zaznaczono czerwonymi, przerywanymi liniami.

Krzywe wiodące pozwalają na określenie charakterystyki kleju w odniesieniu do dwóch zmiennych: temperatury i częstotliwości wymuszeń. Dla próbki kleju w temperaturze -20°C przy niskich częstotliwościach (rzędu 0,1 Hz), moduł zachowawczy osiąga wartość 692 MPa,

podczas gdy w temperaturze 60°C, nawet dla 100 Hz wartość modułu zachowawczego wynosi zaledwie 302 MPa. W temperaturze pośredniej, 20°C, moduł  $G'$  osiąga wartość 395 MPa dla dolnej granicy częstotliwości (0,1 Hz) oraz 563 MPa dla górnej granicy (100 Hz). Analogicznie można interpretować krzywe wiodące dla modułu stratności.



**Rys. 62** Krzywe wiodące otrzymane dla: a) modułu zachowawczego; b) modułu stratności [80]

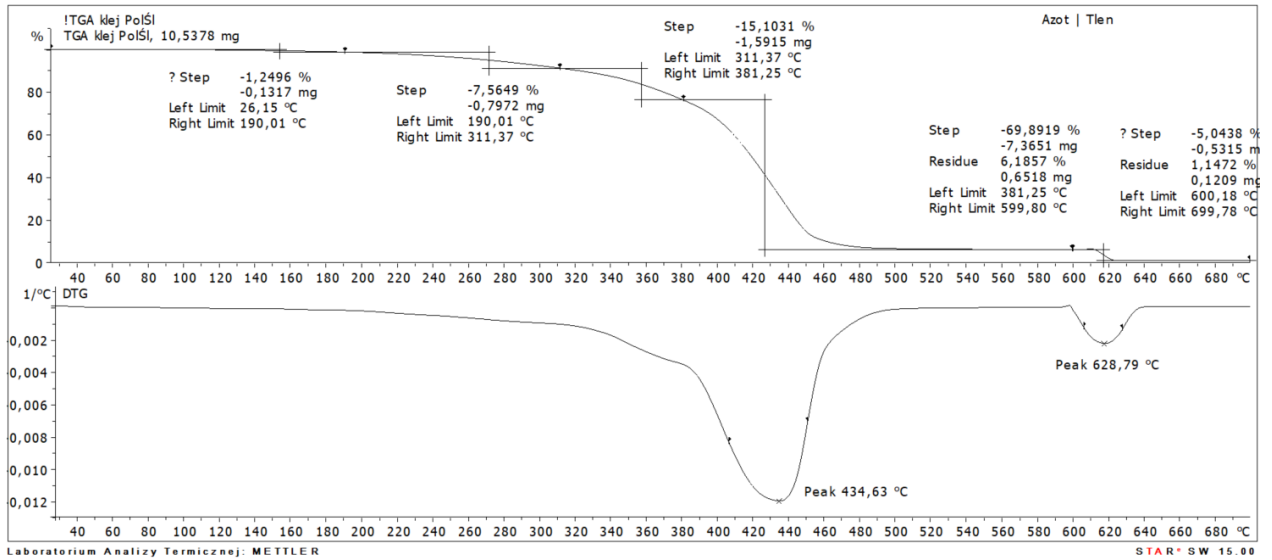
#### 4.4. Analiza TGA

Analiza termograwimetryczna TGA przeprowadzona na próbce związanego kleju pozwoliła na analizę ubytku masy materiału podczas przyrostu temperatury. Badanie to pozwoliło na określenie stabilności kleju w zakresie temperatur od 25 do 700°C. Do 600°C pomiary prowadzono w atmosferze obojętnej ( $N_2$ ), a dalej w atmosferze utleniającej ( $O_2$ ). W badaniach DMTA, przedstawionych w rozdziale 4.3, przedstawiono zmianę właściwości mechanicznych kleju, wraz ze wzrostem temperatury, badanie TGA pozwala natomiast na określenie stabilności kleju w określonym zakresie temperatur.

Związaną próbkę kleju umieszczono w piecyku analizatora termograwimetrycznego i podgrzewano z prędkością 10°C/min. Uzyskane wyniki przestawiono na rys. 63.

Klej był stabilny termicznie, tzn. nie obserwowano istotnej zmiany masy, do wartości temperatury około 190-200°C. Powyżej tych temperatur następowała częściowa degradacja struktury kleju, przejawiająca się ubytkiem masy próbki. Pełna dekompozycja/rozkład materiału zaszła w temperaturze 434,6°C. W temperaturze 600°C pozostałość po rozkładzie wynosiła około 6% pierwotnej masy i stanowiły ją części węglowe i nieorganiczne. Po utlenieniu części węglowych w temperaturze powyżej 600°C, pozostałość oznaczona

w temperaturze 700°C (zawartość składników pochodzenia nieorganicznego) wynosiła 1% początkowej masy próbki.



Rys. 63 Ubytek masy próbki kleju podczas ogrzewania w badaniu TG



## 5. Badania i analizy numeryczne połączeń klejonych

### 5.1. Założenia do numerycznego modelu materiałowego w połączeniach klejonych

#### 5.1.1. Wstęp

W celu prawidłowego zaprojektowania połączeń klejonych najczęściej stosuje się analizy numeryczne, pozwalające na uwzględnienie wielu czynników wpływających na rozkład naprężeń w spoinach. W rozdziale 2.3 przedstawiono kilka możliwych sposobów modelowania i analizy połączeń klejonych. Analizy numeryczne klejów metakrylowych, w przeciwieństwie do klejów epoksydowych, nie były do tej pory obiektem licznych badań i publikacji. Ze względu na różne charakterystyki tych dwóch grup klejów nie da się wprost zastosować modeli opracowanych dla klejów epoksydowych – gdzie, z uwagi na dużą sztywność i kruchość przy zniszczeniu, często wykorzystuje się modelowanie kontynualne lub lokalne przy wykorzystaniu LEFM – CZM [59].

Sztywne kleje konstrukcyjne mają największą efektywność przy grubości z przedziału od 0,1 do 0,2 mm, podczas gdy w przypadku klejów elastycznych jest to zakres od 3 do 4 mm [89]. Zgodnie z normą [67] rozpatrywany klej metakrylowy można zaklasyfikować jako półsztywny, w związku z czym jego optymalna grubość w spoinie powinna być wartością pośrednią – co potwierdzają również badania przedstawione w pracach [15], [41].

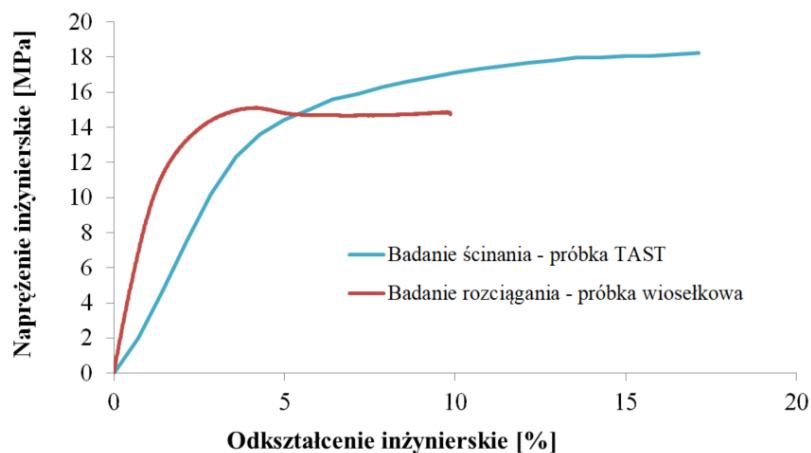
W przeprowadzonych analizach numerycznych warstwa kleju metakrylowego została zamodelowana jako kontinuum wraz z warstwami kontaktowymi. Kryterium uplastycznienia dla kleju przyjęto bazując na wynikach badań [61], w których wykazano, że w przypadku klejów akrylowych najlepszą zbieżność wyników uzyskiwano dla kryterium liniowego uplastycznienia Druckera-Pragera. Ze względu na fakt, że kleje metakrylowe, podobnie jak akrylowe, charakteryzują się dużą odkształcalnością przed zniszczeniem, postanowiono również wykorzystać to kryterium. Warstwy kontaktowe (zerowej grubości) pomiędzy spoiną klejową a elementami stalowymi zamodelowano, nadając charakterystykę adhezyjną dla powierzchni łączonych i stosując model kontaktowy

wykorzystujący LEFM. Elementy stalowe zostały opisane modelem materiałowym o charakterystyce sprężysto-plastycznej, wg kryterium Hubera-Misesa-Hencky'ego.

Celem przedstawionych w rozdziale prac jest, w pierwszej kolejności, wyznaczenie parametrów materiałowych do modelowania spoiny klejowej w numerycznych analizach połączeń klejonych. Następnie, na podstawie wyznaczonych parametrów, wykonano walidację modelu numerycznego. Na koniec przedstawiono wyniki badań wzmocnionych belek dwuteowych wraz z ich analizą numeryczną.

### 5.1.2. Model materiałowy kleju

Podstawą do określenia parametrów materiałowych kleju były wyniki rozciągania próbek wioselkowych (p. 3.2.2) oraz ścinania próbek typu TAST (p. 3.4.2), co potwierdzają również badania [90]. Na rys. 64, przedstawiono średnie wartości z poszczególnych badań, w ujęciu inżynierskim, a więc z pominięciem wpływu odkształceń poprzecznych próbki podczas badania. Model Druckera-Pragera operuje na wartościach rzeczywistych naprężeń i odkształceń, w związku z czym dokonano przekształcenia uzyskanych wyników.



**Rys. 64** Porównanie średnich wartości wyników z badania rozciągania i ścinania

Rzeczywiste naprężenia i odkształcenia na podstawie próby rozciągania obliczono wg poniższych równań:

$$\text{Naprężenia rzeczywiste:} \quad \sigma_T = \frac{\sigma'_T}{(1-\nu'\varepsilon'_T)^2} \quad (16)$$

$$\text{Odkształcenia rzeczywiste:} \quad \varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon'_T) \quad (17)$$

$$\text{Rzeczywiste odkształcenia poprzeczne:} \quad \varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon'_t) \quad (18)$$



Następnie, bazując na wartościach obliczonych ze wzorów (16) – (18), współczynnika Poissona  $\nu' = 0,365$  (p. 3.2.2) i siecznym module Younga  $E = 500$  MPa (p. 3.2.2), wyznaczono opisane niżej parametry.

$$\text{Rzeczywiste odkształcenia plastyczne:} \quad \varepsilon_T^P = \varepsilon_T - \ln\left(1 + \frac{\sigma_T}{E}\right) \quad (19)$$

$$\text{Rzeczywiste plastyczne odkształcenia poprzeczne:} \quad \varepsilon_t^P = \varepsilon_t - \ln\left(1 - \nu' \frac{\sigma_T}{E}\right) \quad (20)$$

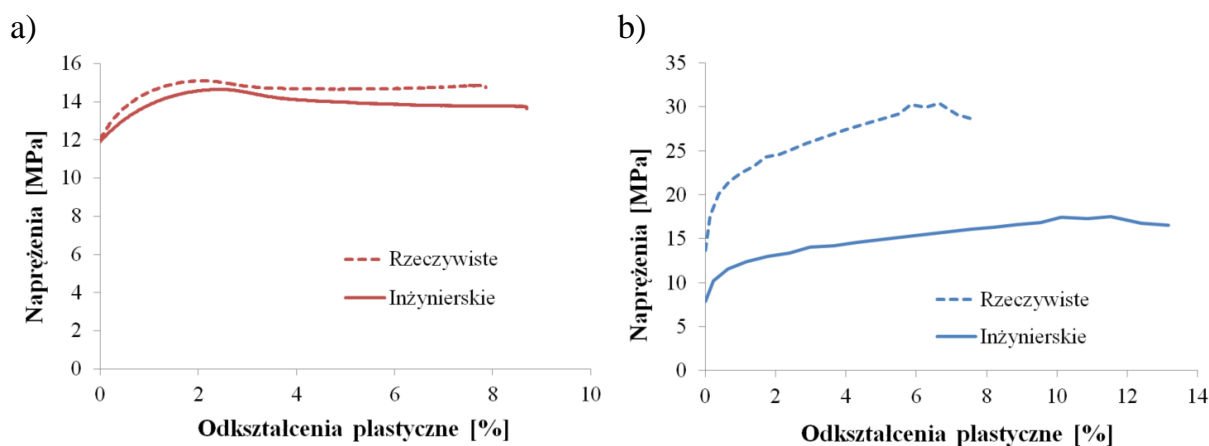
$$\text{Rzeczywisty plastyczny współczynnik Poissona:} \quad \nu^P = -\frac{\varepsilon_t^P}{\varepsilon_T^P} \quad (21)$$

Na podstawie wyników badań TAST oraz przyjętego siecznego modułu ścinania  $G = 300$  MPa (p. 3.4.2) wyznaczono rzeczywiste naprężenia i odkształcenia plastyczne wg równań jak niżej.

$$\text{Odkształcenia plastyczne:} \quad \varepsilon_S^P = \varepsilon_S - \frac{\sigma_S}{G} \quad (22)$$

$$\text{Efektywne naprężenia ścinające:} \quad \sigma_{s,eff} = \sqrt{3}\sigma_S \quad (23)$$

$$\text{Efektywne plastyczne odkształcenia ścinające:} \quad \varepsilon_{s,eff}^P = \frac{\varepsilon_S^P}{\sqrt{3}} \quad (24)$$



**Rys. 65** Porównanie zależności naprężenie-odkształcenie dla wartości rzeczywistych i inżynierskich: a) badanie rozciągania; b) badanie ścinania TAST

Porównawczo wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 65. W modelu materiałowym Druckera-Pragera, wykorzystywanym w programie ABAQUS [65], kryterium uplastycznienia wyrażone jest zależnością:

$$f_{DP} = t_{DP} - d_{DP} - p_{DP} \cdot \tan \beta_{DP} = 0 \quad (25)$$

gdzie  $t_{DP}$  jest naprężeniem efektywnym definiowanym jako składowa naprężeń głównych,  $p_{DP}$  jest średnim naprężeniem hydrostatycznym,  $\beta_{DP}$  jest kątem tarcia wewnętrznego materiału,  $\tan \beta_{DP}$  jest współczynnikiem podatności na uplastycznienie dla naprężeń hydrostatycznych,  $d_{DP}$  jest kohezją, czyli parametrem materiału związanym z naprężeniami uplastyczniającymi przy ścinaniu. Współczynnik podatności na uplastycznienie  $\tan \beta_{DP}$  jest wyznaczany na podstawie dwóch stanów naprężeń – rozciągania oraz ścinania i wyznaczany jest ze wzoru (26):

$$\tan \beta_{DP} = \frac{3 \cdot (\lambda_{DP} - 1)}{(\lambda_{DP} + 1)} \quad (26)$$

gdzie  $\lambda_{DP}$  jest parametrem podatności na ciśnienie hydrostatyczne, wyrażonym ze wzoru:

$$\lambda_{DP} = \frac{\sqrt{3} \cdot (\sigma_S / \sigma_T)}{2 - \sqrt{3} \cdot (\sigma_S / \sigma_T)} \quad (27)$$

Rzeczywiste naprężenia rozciągające  $\sigma_T$  i ścinające  $\sigma_S$ , wykorzystywane we wzorze (27), muszą odpowiadać tej samej wartości odkształceń plastycznych:

$$\sigma_T \cdot \varepsilon_T^P = \sigma_S \cdot \varepsilon_S^P \quad (28)$$

Dopóki naprężenia nie osiągają granicy wyznaczonej wzorem (25), model kleju bazuje na liniowej sprężystości, wykorzystując zależność modułu Younga i sprężystej wartości współczynnika Poissona materiału. Po przekroczeniu tej granicy zaczynają narastać odkształcenia plastyczne, których przyrost jest zależny od parametru umocnienia/płynięcia (*flow parameter*)  $\psi_{DP}$ . Współczynnik ten należy określić na podstawie składowej plastycznej współczynnika Poissona  $\nu_p$ , ze wzoru:

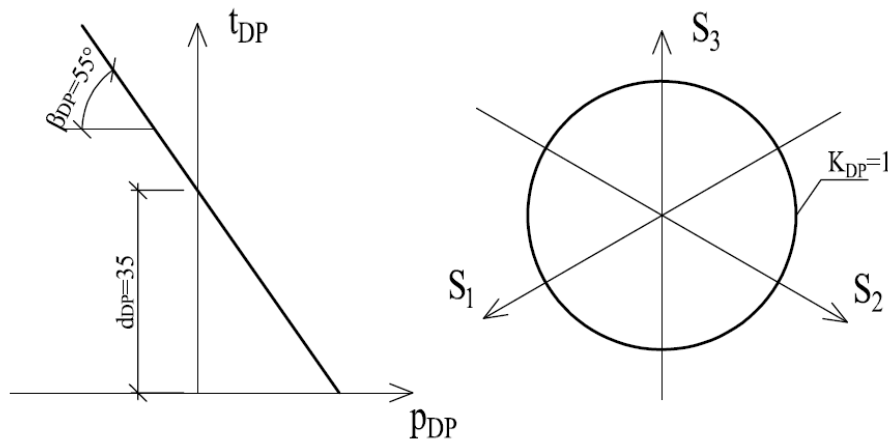
$$\tan \psi_{DP} = \frac{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu_p)}{2 \cdot (1 + \nu_p)} \quad (29)$$

Na podstawie przekształceń wyników przedstawionych na rys. 65 oraz zależności (26) i (29) wyznaczono parametry niezbędne do scharakteryzowania modelu materiałowego

kleju w programie ABAQUS. Parametry wykorzystane w analizie numerycznej zestawiono w tabeli 9, a model materiałowy kleju przedstawiono na rys. 66.

**Tabela 9** Obliczone parametry, wykorzystane do modelu materiałowego kleju

$\beta_{DP}$	55
$K_{DP}$	1,0
$\psi_{DP}$	35



**Rys. 66** Model materiałowy kleju; opis w tekście

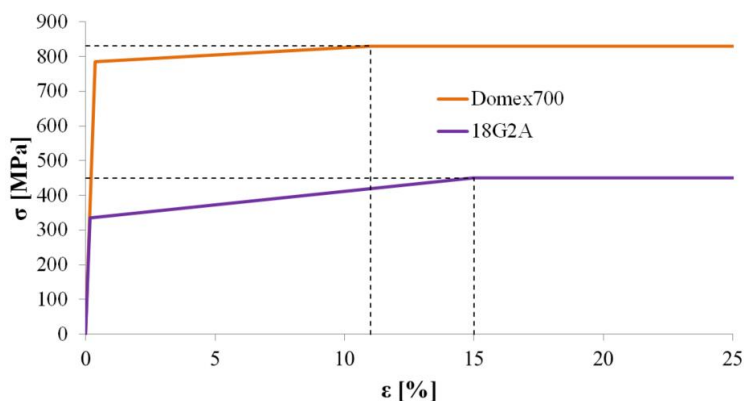
### 5.1.3. Model materiałowy warstwy kontaktowej

Warstwy kontaktowe (zerowej grubości) pomiędzy spoiną klejową a elementami stalowymi zamodelowano za pomocą nadania charakterystyki adhezyjnej dla powierzchni łączonych. Na podstawie wyników badań (p. 3.6.2) przyjęto graniczne naprężenia odrywające jako 21,85 MPa, którą to wartość uzyskano dla stali piaskowanej. Graniczne naprężenia ścinające również przyjęto jako 21,85 MPa, a jako kryterium inicjacji degradacji przyjęto kryterium maksymalnych naprężeń nominalnych, analogicznie jak w pracy [76], wzór (30). Energię pęknięcia przyjęto jako 3,5 kJ/m<sup>2</sup>, jak w analizach w p. 3.6.3, również bazując na opracowaniu [76].

$$\text{MAX} \left( \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}; \frac{t_s}{t_s^0}; \frac{t_t}{t_t^0} \right) = 1 \quad (30)$$

### 5.1.4. Model materiałowy stali

W analizach oraz badaniach laboratoryjnych wykorzystywano dwa gatunki stali: 18G2A oraz Domex700. Charakterystykę materiałową wykorzystanych stali przedstawiono na rys. 67. Parametry stali 18G2A przyjęte zostały na podstawie normy [91], natomiast stali Domex700 na podstawie badań [41]. Nie przyjęto żadnego kryterium zniszczenia stali, natomiast założono, że po przekroczeniu granicznych naprężeń odkształcenia będą wzrastały gwałtownie, co pozwoli na określenie miejsca uplastycznienia w elemencie stalowym. Dla stali Domex700 częściowe uplastycznienie rozpoczyna się po przekroczeniu naprężeń wynoszących 750 MPa, co odpowiada odkształceniom 0,37%, zaś pełne uplastycznienie (nieproporcjonalny przyrost odkształceń) występuje po osiągnięciu 830 MPa dla odkształceń wynoszących 11%. W przypadku stali 18G2A analogiczne punkty charakterystyczne zostały określone dla naprężeń wynoszących 335 MPa (odkształcenia 0,17%) oraz 450 MPa (odkształcenia 15%).



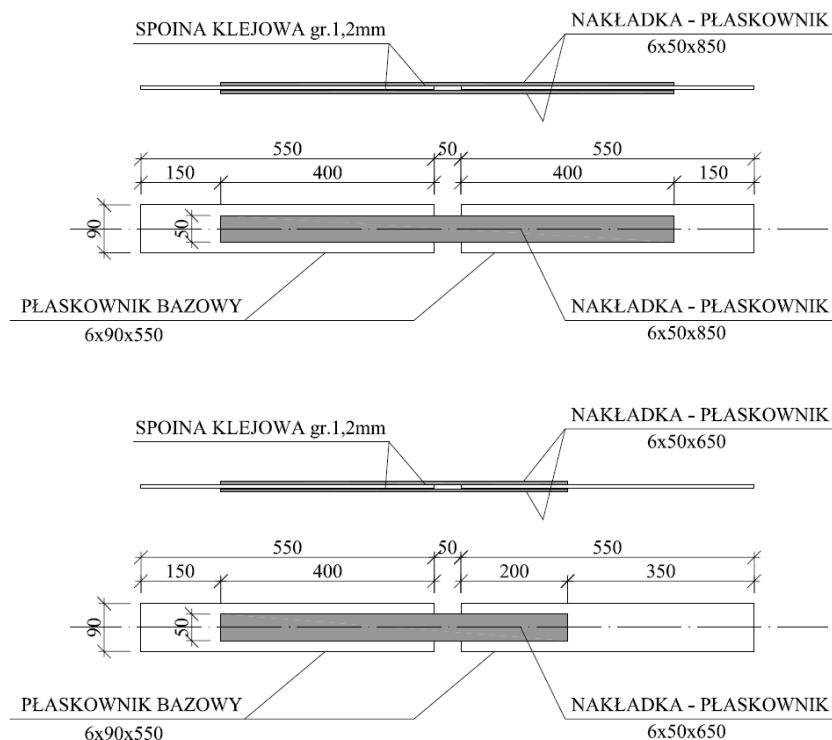
Rys. 67 Modele materiałowe stali

## 5.2. Analiza numeryczna połączenia zakładkowego

### 5.2.1. Charakterystyka złącza

W pierwszym etapie posłużono się wynikami badań przedstawionymi w pracy [41]. Badanie przeprowadzone były na połączeniach zakładkowych, obustronnych, gdzie analizie poddawano, między innymi, wpływ długości złącza na jego nośność. Połączenie składało się ze stalowych płaskowników wykonanych ze stali Domex700. Płaskowniki główne, mocowane w uchwytych maszyny wytrzymałościowej, miały wymiary  $90 \times 6 \times 550$  mm, natomiast obustronne nakładki były wykonane z płaskowników o przekroju poprzecznym  $50 \times 6$  mm; rozpatrywano dwie długości nakładek: 850 i 650 mm. Spoina pomiędzy

płaskownikami zostało wykonana z kleju metakrylowego Plexus MA 420 o grubości 1,2 mm. Geometrię badanych próbek przedstawiono na rys. 68.



**Rys. 68 Geometria badanych połączeń zakładkowych [41]**

### 5.2.2. Badania laboratoryjne [41]

Połączenia były badane w stanie jednoosiowego rozciągania, aż do zniszczenia. Prędkość przyrostu obciążenia wynosiła 1,27 mm/min. W trakcie badania odkształcenia były badane na dwa sposoby: tradycyjnymi tensometrami do stali, naklejanymi na nakładkę stalową oraz metodą optyczną DIC. Na rys. 69 przedstawiono elementy przygotowane do badań.

a)



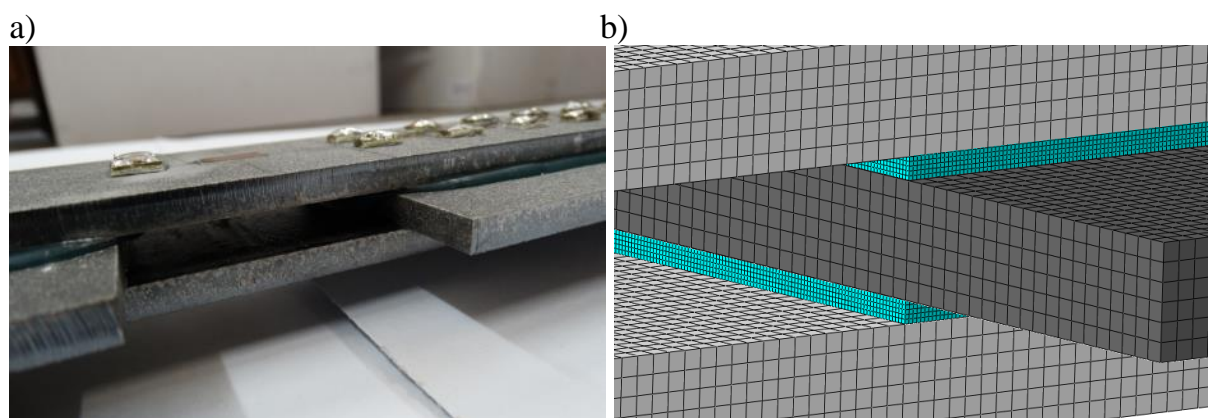
b)



**Rys. 69 Elementy przygotowane do badania: a) długość połączenia 400/200 mm; b) długość połączenia 400/400 mm [41]**

### 5.2.3. Analiza numeryczna

Analizy numeryczne zostały wykonane w przestrzennym stanie naprężenia. Do zamodelowania elementów stalowych i spoiny klejowej wykorzystano elementy skończone typu C3D8 (ośmiowęzłowe elementy sześciennie). Wymiar elementu skończonego przyjęto jako  $1,0 \times 1,0 \times 1,0$  mm w obydwu typach płaskowników oraz  $0,25 \times 0,25 \times 0,25$  mm w kleju – rys. 70. Schemat obliczeniowy założony w analizach numerycznych przedstawiono na rys. 71. Jeden z fragmentów płaskownika bazowego (po prawej stronie) o wymiarach  $100 \times 90$  mm (obustronnie) został utwierdzony poprzez blokadę przemieszczeń w trzech kierunkach, natomiast na analogicznym fragmencie drugiego (po lewej stronie) przyjęto sztywne powiązanie z jednym niezależnym punktem referencyjnym, dla którego zakładano przemieszczenia wzdłuż osi połączenia.



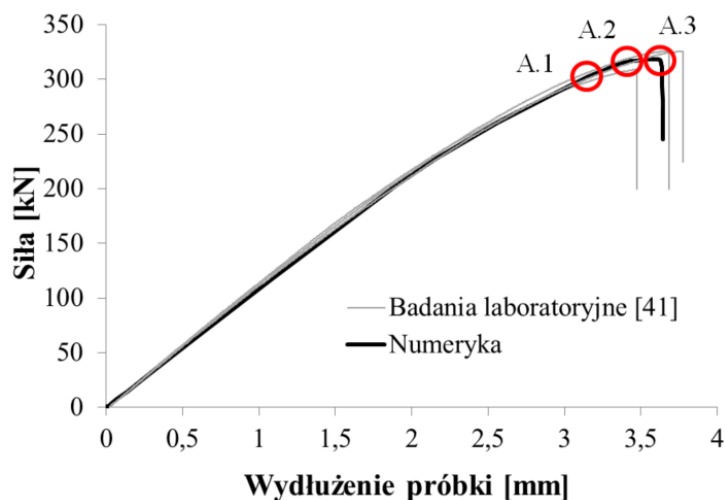
**Rys. 70** Widok połączenia w miejscu nakładek: a) badania laboratoryjne; b) analizy numeryczne



**Rys. 71** Model obliczeniowy rozciągania połączenia zakładkowego przyjęty do analiz numerycznych

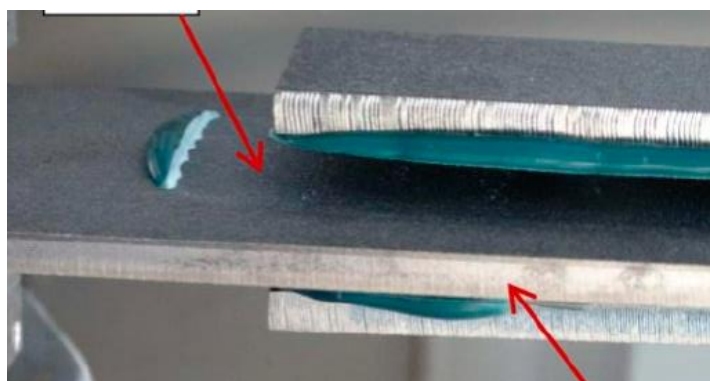
Walidację modelu numerycznego połączenia zakładkowego wykonano przez porównanie zależności siła-przemieszczenie otrzymanej z badań laboratoryjnych oraz analiz numerycznych.

W pierwszym etapie wykonano analizę połączenia zakładkowego o długości 400/200 mm. Porównanie wykresów zależności siła-przemieszczenie z badań modelowych oraz analiz numerycznych pokazano na rys. 72.



**Rys. 72** Porównanie zależności siła-przemieszczenie z badań laboratoryjnych i numerycznych dla połączenia 400-200 mm

Na podstawie obliczeń uzyskano nieco mniejszą wartość nośności, natomiast przebiegi zależności siła-przemieszczenie do momentu zniszczenia pokrywały się ze sobą. Różnica w nośności wynika prawdopodobnie z niedokładności wykonania spoiny klejowej w rzeczywistych połączeniach, gdzie nadmiar kleju został wyparty poza nakładki i utworzył lokalne pogrubienie spoiny (rys. 73). W efekcie tego rzeczywista powierzchnia czynna przy ścinaniu była nieco większa, a rozkład naprężeń krawędziowych łagodniejszy niż w wyidealizowanym modelu numerycznym. Porównanie wartości sił w oznaczonych na rys. 72 punktach przedstawiono w tabeli 10.

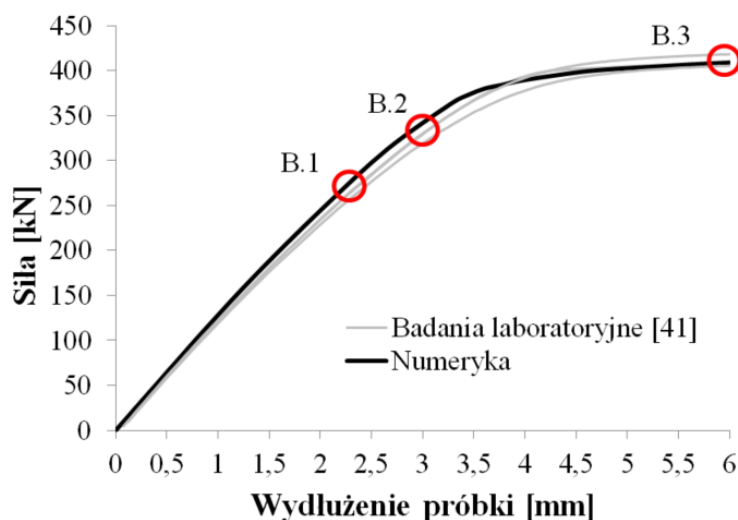


**Rys. 73** Krawędź zniszczonego połączenia

**Tabela 10 Wartości sił w oznaczonych punktach charakterystycznych A.1, A.2 i A.3**

Punkt charakterystyczny	A.1 - przemieszczenie 3,10 mm	A.2 - przemieszczenie 3,35 mm	A.3 - przemieszczenie 3,63 mm
Badanie laboratoryjne <sup>1</sup>	299,0	311,2	319,1
Odchylenie standardowe	3,3	4,3	7,2
Współczynnik zmienności	1,1%	1,4%	2,3%
Analiza numeryczna <sup>2</sup>	298,5	314,0	315,3
Różnica pomiędzy 1 i 2	0,17%	0,90%	1,19%

Analogicznie jak dla połączenia 400/200, wykonano analizę porównawczą wyników obliczeń numerycznych z badaniami [41] dla połączeń 400/400. Na rys. 74 przedstawiono wykresy zależności siła-przemieszczenie – w tym wypadku zbieżność była bardzo znaczna nawet w momencie uplastycznienia połączenia, ponieważ o nośności nie decydowały parametry wytrzymałościowe kleju, lecz stali. Podobnie jak dla połączeń 400/200, również w tym wypadku zestawiono w tabeli 11 wartości sił w oznaczonych na rys. 74.

**Rys. 74 Porównanie zależności siła-przemieszczenie z badań laboratoryjnych i numerycznych dla połączenia 400-400 mm**



**Tabela 11 Wartości sił w oznaczonych punktach charakterystycznych B.1, B.2 i B.3**

Punkt charakterystyczny	B.1 - przemieszczenie 2,31 mm	B.2 - przemieszczenie 2,95 mm	B.3 - przemieszczenie 6,00 mm
Badanie laboratoryjne <sup>1</sup>	264,1	323,1	411,2
Odchylenie standardowe	3,0	4,8	5,3
Współczynnik zmienności	1,1%	1,5%	1,3%
Analiza numeryczna <sup>2</sup>	270,2	332,6	406,2
Różnica pomiędzy 1 i 2	2,31%	2,94%	1,22%

Zależność siła-przemieszczenie uzyskana z obliczeń numerycznych również wykazała, że w momencie osiągnięcia siły  $\sim 375$  kN nastąpił nagły przyrost przemieszczeń, spowodowany uplastycznieniem stali w podstawowym płaskowniku. W tym wypadku różnica pomiędzy przebiegiem wykresu uzyskanego w wyniku obliczeń numerycznych oraz badań laboratoryjnych wynikała głównie z przyjętego biliniowego modelu materiałowego stali – rys. 67. W rzeczywistości uplastycznienie stali zachodzi w sposób łagodniejszy niż w przypadku uproszczonego modelu biliniowego, w związku z czym na rys. 74 widoczna jest większa sztywność modelu numerycznego bezpośrednio przed uplastycznieniem stali. Wpływ na wyniki mogła mieć również reologia samego kleju w stanie plastycznym.

Następnie wykonano analizę odkształceń połączeń stalowych 400/200 w momencie poprzedzającym zniszczenie połączenia – co oznaczono na rys. 72 jako punkt A.2 (dla siły 314,0 kN). Strefa odkształceń uzyskanych w badaniach [41] dla przemieszczenia 3,42 mm, pokazanych na rys. 75a, pokrywa się z wynikami analiz numerycznych – rys. 75b. Odkształcenia w nakładkach na odcinku pomiędzy płaskownikami podstawowymi wyniosły od  $2,7$  do  $3,2 \times 10^{-3}$ , podczas gdy w obliczeniach numerycznych było to  $3,0 \times 10^{-3}$ . Badania numeryczne pozwoliły dodatkowo na analizę naprężeń na elementach stalowych – rys. 75c. W momencie osiągnięcia granicznej siły rozciągającej w połączeniu, naprężenia w płaskownikach  $90 \times 6$  mm są bliskie granicy uplastycznienia i wynoszą 702 MPa. Oznacza to, że nieznaczne wydłużenie nakładek z płaskowników  $50 \times 6$  mm (zwiększenie

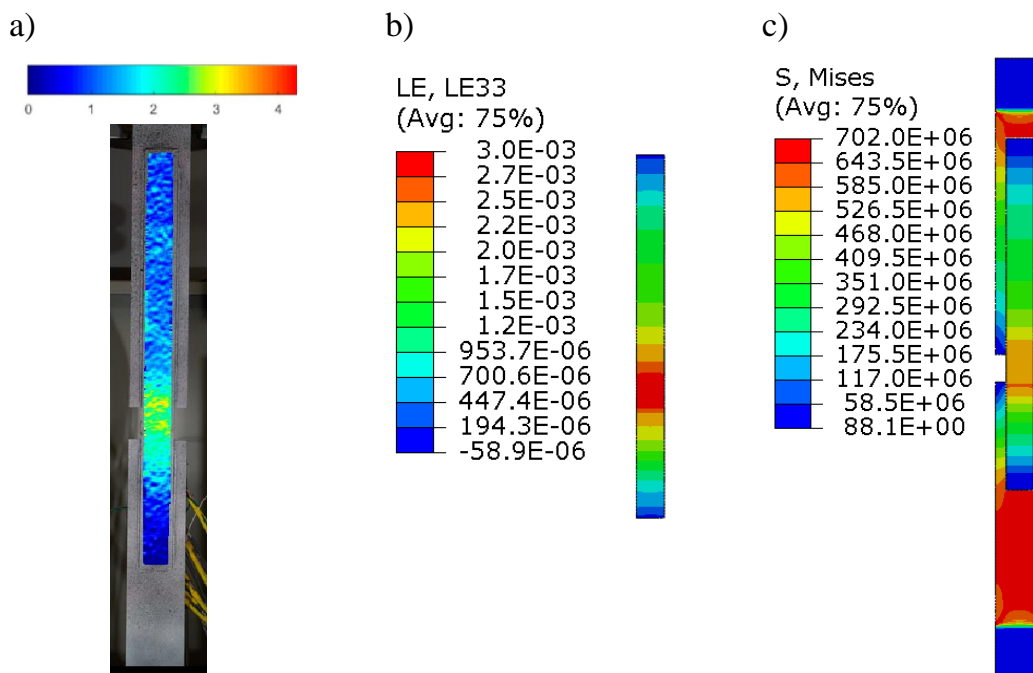
długości połączenia) mogłoby doprowadzić do wcześniejszego zniszczenia podstawowego płaskownika  $90 \times 6$  mm.

Analogiczna analiza dla połączenia 400/400 została przeprowadzona w momencie uplastycznienia połączenia – co oznaczono na rys. 74 jako punkt B.3 (dla przemieszczenia 6,00 mm). Odształcenia nakładki  $50 \times 6$  mm z badań laboratoryjnych, przedstawione na rys. 76a, wskazują na odształcenia w granicy od 5 do  $6 \times 10^{-3}$  w środkowej części nakładki, co potwierdzają również analizy numeryczne – rys. 76b. Na mapie odształceń modelu numerycznego widoczne jest, że do największego wzrostu odształceń dochodzi równocześnie na obydwu końcach elementu, w płaskownikach bazowych. Mapa naprężeń całego połączenia (rys. 76c) pokazuje wyraźną koncentrację naprężeń w rejonie mocowania, co przekłada się na uplastycznienie tej strefy.

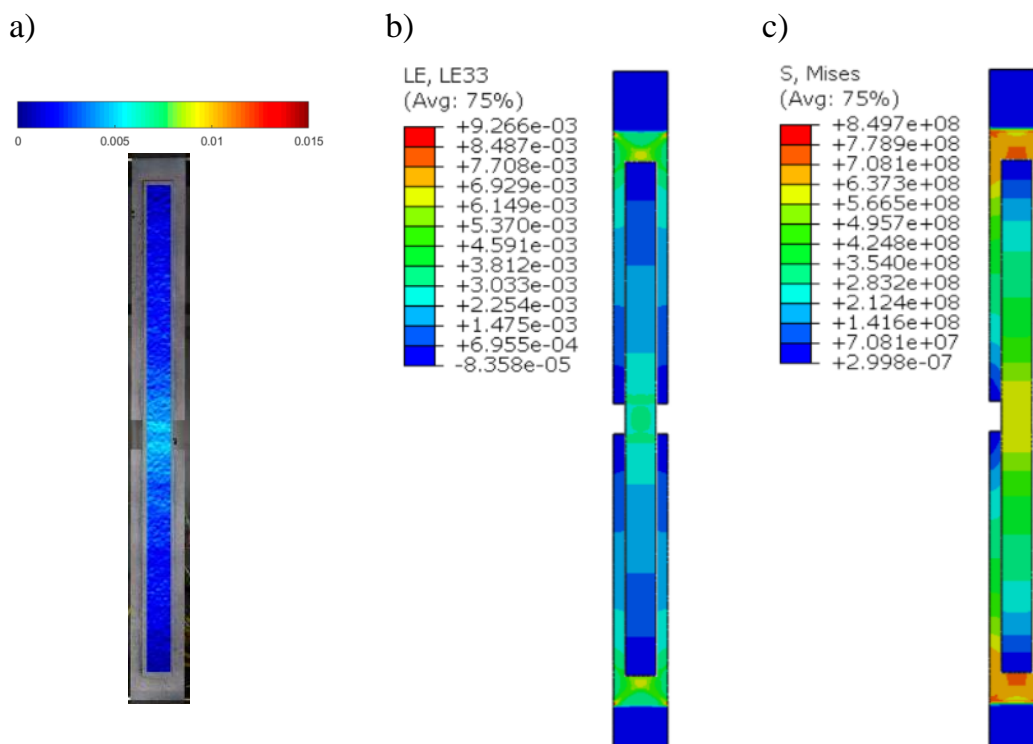
Optyczne odczyty odształceń wykonywane podczas badań laboratoryjnych pozwalały na analizę widocznych powierzchni zewnętrznych. Ze względu na dużą zbieżność wyników laboratoryjnych i analiz numerycznych, zestawiono mapy stref uplastycznionych kleju oraz przyczepności między klejem a płaskownikami  $90 \times 6$  mm i  $50 \times 6$  mm, w punktach oznaczonych jako A.1, A.2 i A.3 na rys. 72 oraz B.1, B.2 i B.3 na rys. 74.

W tabeli 12 przedstawiono zmianę w przyczepności oraz strefy plastyczne w spoinie klejowej o długości 200 mm w połączeniu 400/200.

Na podstawie tabeli 12 zauważyć można, że początkowo dochodzi do prawie całkowitego uplastycznienia spoiny klejowej. Ze względu na możliwość dalszego przyrostu naprężeń w zakresie plastycznej pracy kleju, dochodzi do stopniowej utraty przyczepności pomiędzy płaskownikiem  $90 \times 6$  mm oraz spoiną klejową. W miarę powiększania się stref w których doszło do utraty przyczepności, następuje spadek zasięgu strefy plastycznej kleju, ponieważ w miejscach adhezyjnego zniszczenia klej przestaje przenosić naprężenia. Pomimo, iż ostatecznie widoczne jest zniszczenie adhezyjne, w rzeczywistości mechanizm ten jest złożony i można go określić jako zniszczenie adhezyjne z częściowym uplastycznieniem kleju. Analogiczną analizę przeprowadzono dla połączenia 400/400 – w tym wypadku istotne były przede wszystkim mapy uplastycznienia płaskownika  $90 \times 6$  mm, które przedstawiono łącznie ze strefami plastycznymi spoiny klejowej – tabela 13.



Rys. 75 Mapy odkształceń w połączeniu 400/200: a) badanie laboratoryjne – odkształcenia w nakładce [41]; b) analiza numeryczna – odkształcenia w nakładce; c) analiza numeryczna – naprężenia w całym modelu



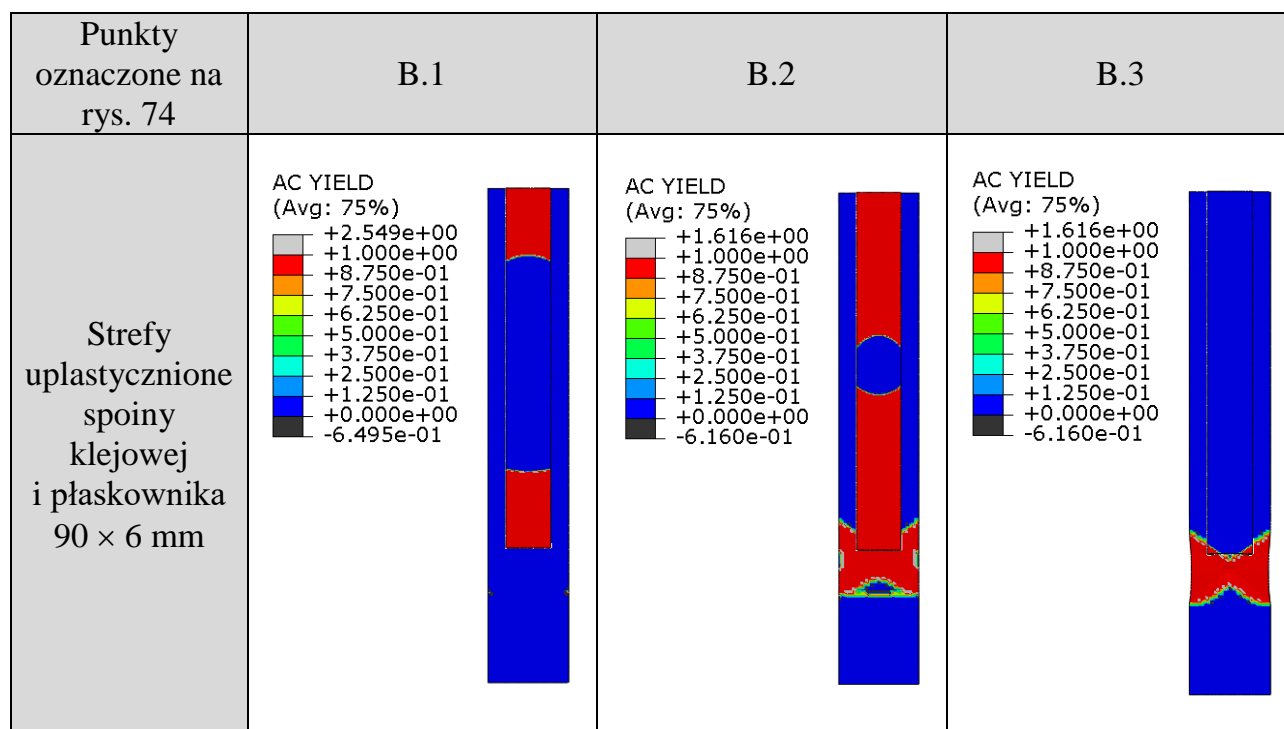
Rys. 76 Mapy dla połączenia 400/400: a) badanie laboratoryjne – odkształcenia w nakładce (33); b) analiza numeryczna – odkształcenia w całym modelu; c) analiza numeryczna – naprężenia w całym modelu

Tabela 12 Mapy przyczepności i stref uplastycznionych w połączeniu 400/200 mm

Punkty oznaczone na rys. 72	Utrata przyczepności: płaskownik 90 × 6 mm – spoina klejowa	Strefy uplastycznione spoiny klejowej	Utrata przyczepności: spoina klejowa – płaskownik 50 × 6 mm
A.1	<p>CSDMG ASSEMBLY_S_SURF.</p>	<p>AC YIELD (Avg: 75%)</p>	<p>CSDMG ASSEMBLY_S_SURF.</p>
A.2	<p>CSDMG ASSEMBLY_S_SURF.</p>	<p>AC YIELD (Avg: 75%)</p>	<p>CSDMG ASSEMBLY_S_SURF.</p>
A.3	<p>CSDMG ASSEMBLY_S_SURF.</p>	<p>AC YIELD (Avg: 75%)</p>	<p>CSDMG ASSEMBLY_S_SURF.</p>

W pierwszej kolejności dochodzi tu do uplastycznienia spoiny klejowej. Podobnie jak w przypadku połączenia 400/200, naprężenia plastyczne nadal narastają do momentu przekroczenia naprężeń w płaskowniku 90 × 6 mm. Naprężenia plastyczne w stali nie mają jednak możliwości znacznego przyrostu, wobec czego w połączeniu przestają przyrastać naprężenia, a wzrastają tylko odkształcenia na skutek uplastycznienia płaskownika.

**Tabela 13 Mapy stref uplastycznionych w połączeniu 400/400 mm**



### 5.2.4. Wnioski

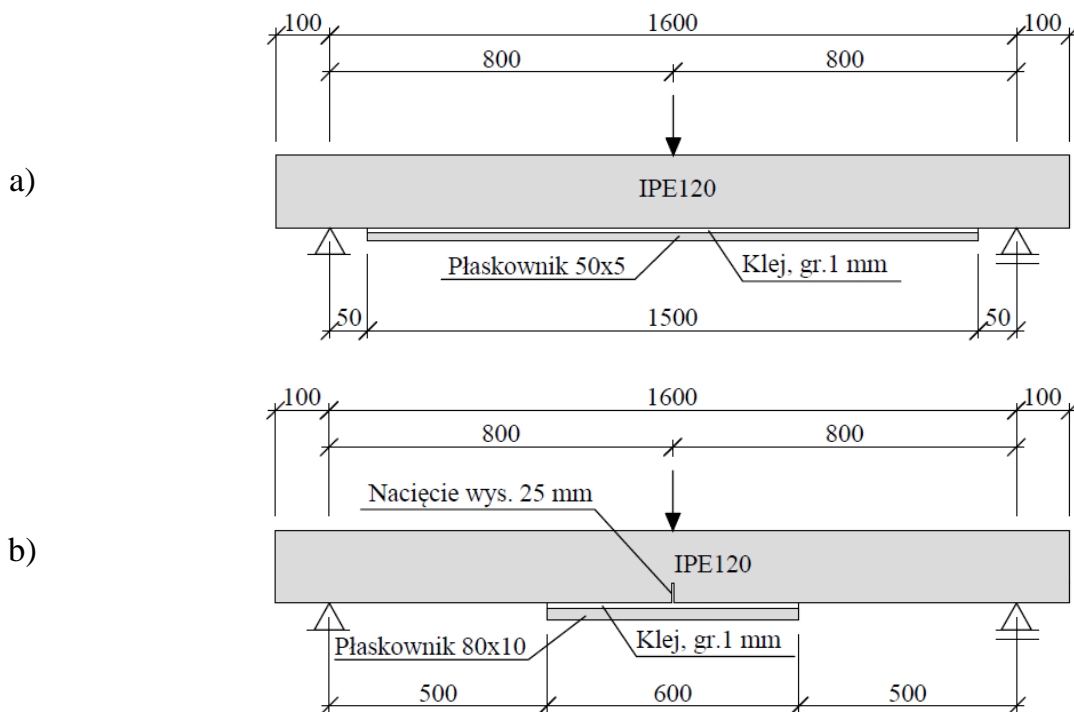
Założenia przyjęte do analiz numerycznych, związane z modelem materiałowym kleju oraz warstwy kontaktowej, pozwoliły na uzyskanie bardzo dobrej zbieżności wyników badań numerycznych z wynikami badań laboratoryjnych – zarówno w zakresie granicznej siły przenoszonej przez połączenia, jak i odkształceń w płaskownikach 50 × 6 mm. Analizy numeryczne pozwoliły również na prześledzenie rozkładów naprężeń oraz przyczepność w chwili poprzedzającej zniszczenie. W obydwu analizowanych typach połączeń w pierwszej fazie widoczne było uplastycznienie zachodzące w spoinie klejowej. Ze względu na możliwość redystrybucji naprężeń na długości spoiny i duży zakres półki plastycznej kleju, finalnie do zniszczenia dochodziło przez utratę przyczepności – w połączeniach 400/200 mm oraz uplastycznienie stali – w połączeniach 400/400 mm.

## 5.3. Wzmocnienie belek stalowych IPE120

### 5.3.1. Charakterystyka złącza

Po walidacji modelu materiałowego (p. 5.2.3) przystąpiono do badań laboratoryjnych wzmocnionych elementów stalowych. Przedmiotem badań były stalowe belki IPE120

wykonane ze stali 18G2A. Przeprowadzono badania trójpunktowego zginania na 12 belkach o rozpiętość między punktami podparcia równej 1,6 m – rys. 78. Belki podzielono na dwie grupy: (A) którą stanowiły belki bez uszkodzeń mechanicznych (karów), wzmocnione od spodu płaskownikiem o wymiarach 1500 × 50 × 6 mm (rys. 77a) oraz (B) którą stanowiły belki z uszkodzonym (naciętym do głębokości 25 mm) pasem dolnym, wzmocnione od spodu płaskownikiem o wymiarach 600 × 80 × 10 mm (rys. 77b). W każdej z grup pozostawiono po jednej belce (0A i 0B) bez wzmocnienia, aby uzyskać poziom odniesienia dla belek wzmocnionych. Płaskowniki wzmacniające wykonane były również ze stali 18G2A.



**Rys. 77 Schemat badania: a) belki z grupy (A); b) belki z grupy (B)**

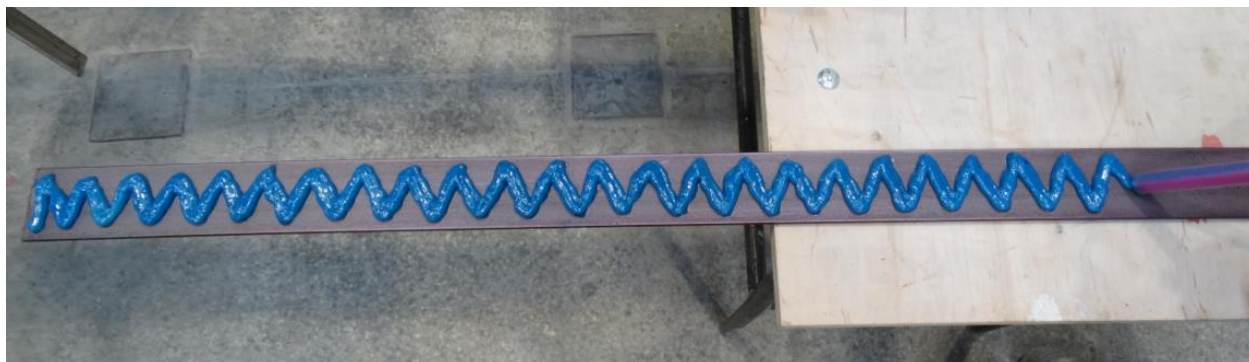
Belki oraz płaskowniki wzmacniające zostały wypiaszkowane, odtuszczone i pokryte warstwą primera. Grubość spoiny klejowej wynosiła 1 mm, co osiągnięto umieszczając w warstwie niezwiązanego kleju stalowe kulki łożyskowe o średnicy 1 mm (rys. 79). Następnie przykładano płaskownik do pasa wzmacnianej belki i dociskano obejmami wykonanymi z zacisków stolarskich, do wyciśnięcia nadmiaru kleju. W takim stanie belki były sezonowane przez 168 godzin przed badaniem.

W celu analizy wpływu czynników reologicznych kleju na złącze, obciążenie belek realizowano na dwa sposoby. Belki niewzmocnione (0A i 0B) oraz po trzy belki

wzmocnione z każdej grupy (1A – 3A oraz 1B – 3B) badano pod doraźnym obciążeniem quasistatycznym przy stałej prędkości przemieszczenia głowicy maszyny wytrzymałościowej 0,8 mm/min. Dwie pozostałe belki wzmocnione z każdej grupy (4A, 5A oraz 4B, 5B) badano pod kątem wpływu relaksacji złącza – obciążano je do pewnego poziomu (w zakresie liniowej zależności przemieszczenie-siła), a następnie blokowano głowicę maszyny, uniemożliwiając dalszy przyrost przemieszczeń i odczytywano wartość siły przez kolejne 30 minut. Po upływie tego czasu ponownie następował przyrost przemieszczeń głowicy maszyny z prędkością 0,8 mm/min. Badania były przerywane w momencie pojawienia się znacznych odkształceń plastycznych.



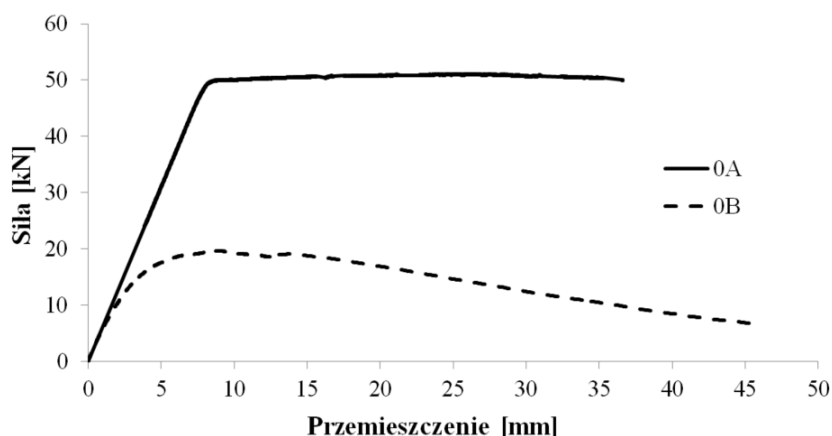
**Rys. 78** Belka przygotowana do badania trójpunktowego zginania



**Rys. 79** Układanie kleju na płaskowniku wzmacniającym

### 5.3.2. Wyniki badań laboratoryjnych

W pierwszej kolejności wykonano badania belek niewzmocnionych; wyniki przedstawiono na rys. 80. W przypadku belki bez nacięcia (0A) uzyskano maksymalną siłę w głowicy maszyny równą 50,97 kN. W momencie przekroczenia przemieszczenia 7,81 mm, przy którym odczytana siła wynosiła 48,03 kN, nastąpiła gwałtowna utrata sztywności belki. W belce z uszkodzonym pasem dolnym (0B) proporcjonalny przyrost siły od przemieszczeń zakończył się po przekroczeniu przemieszczenia 1,72 mm, czemu odpowiadała siła 9,07 kN. Maksymalna siła wyniosła w tym przypadku 19,64 kN.

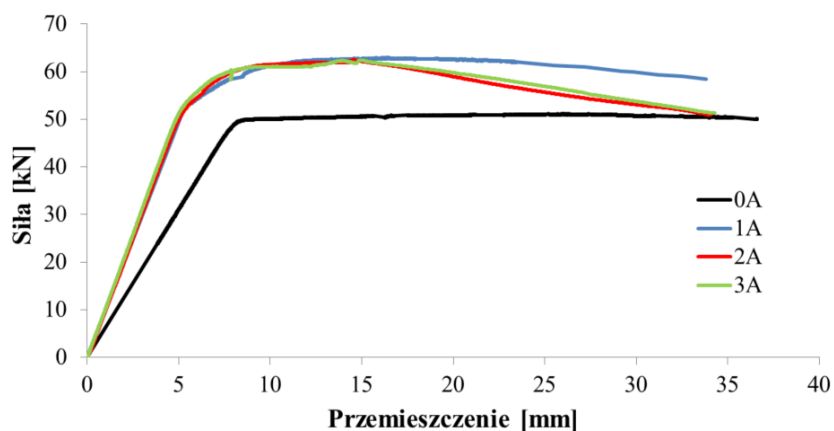


**Rys. 80** Zależność siła-przemieszczenie w przypadku belek niewzmocnionych

Następnie wykonano badania wzmocnionych belek typu A (1A – 3A); wyniki przedstawiono na rys. 81. Wzmocnienie nieuszkodzonych belek IPE120 przyklejonymi płaskownikami o przekroju  $50 \times 6$  mm spowodowało wzrost sztywności giętej EI o 34%, aż do przekroczenia siły 49,38 kN, po którym nastąpiło łagodniejsze niż w przypadku belki niewzmocnionej (0A) przejście do fazy plastycznej. Maksymalna siła jaką osiągnięto w głowicy maszyny wyniosła w przypadku belek wzmocnionych 62,22 kN. Tym samym uzyskano wzrost nośności o około 23%, przy czym sam zakres liniowej proporcjonalności siła-przemieszczenie wzrósł nieznacznie, bo o zaledwie 2,8%. Oznacza to, że wyczerpanie nośności w belkach nastąpiło w części ściskanej (niewzmocnionej). Znajduje to również potwierdzenie w sposobie zniszczenia – pas górny belki niewzmocnionej (0A) został wyraźnie skręcony podczas badania (rys. 82), co świadczyć może o utracie stateczności tej strefy, natomiast zależność dla belki 0A przedstawiona na rys. 80 wskazuje, że utrata nośności miała charakter ciągły, w związku z tym na zniszczenie złożyło się częściowe uplastycznienie i utrata stateczności. W belkach wzmocnionych, co widać zarówno



na rys. 83, jak i na wykresach (rys. 81), doszło tylko do uplastycznienia elementu. Obraz uszkodzonej belki pokazuje również, że do uplastycznienia doszło w niewzmocnionej strefie ściskanej, którą stanowi pas górny i fragment środknika.



**Rys. 81** Zależność siła-przemieszczenie w przypadku belek bez uszkodzenia



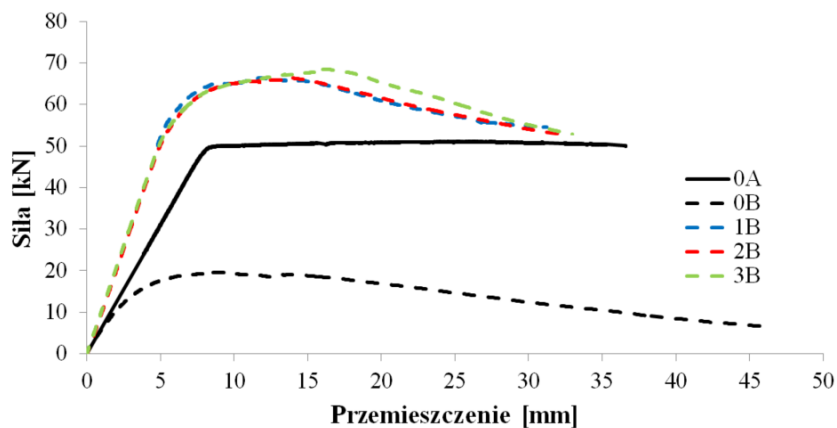
**Rys. 82** Odkształcenia belki niewzmocnionej (0A) po przeprowadzonym badaniu



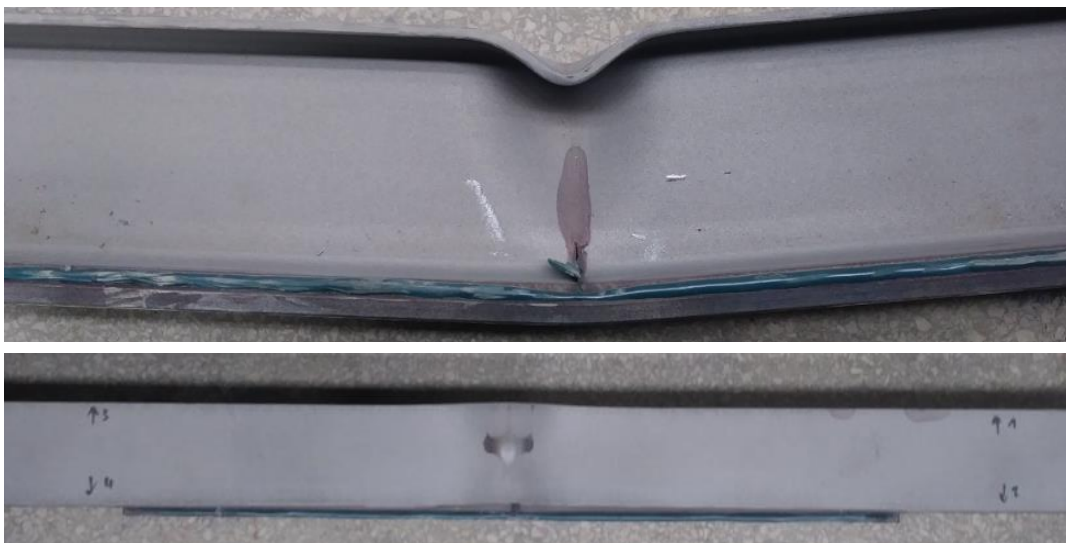
**Rys. 83** Odkształcenia belki wzmocnionej (1A) po przeprowadzonym badaniu

Kolejno badania przeprowadzono na belkach wzmocnionych z nacięciem (1B – 3B). Zależności siła-przemieszczenie przedstawiono na rys. 84. Lokalne wzmocnienie przeciętego pasa dolnego IPE120 na długości 600 mm, płaskownikiem o przekroju  $80 \times 10$  mm, spowodowało, że uszkodzona belka uzyskała nośność większą niż przed

uszkodzeniem. Maksymalna siła przenoszona przez belki ze wzmocnieniem wyniosła 65,90 kN, natomiast zmiana sztywności zaczęła następować po przekroczeniu 49,22 kN. Również w tym wypadku dochodziło do uplastyczniania się pasa górnego oraz środka belek, co pokazano na rys. 85.



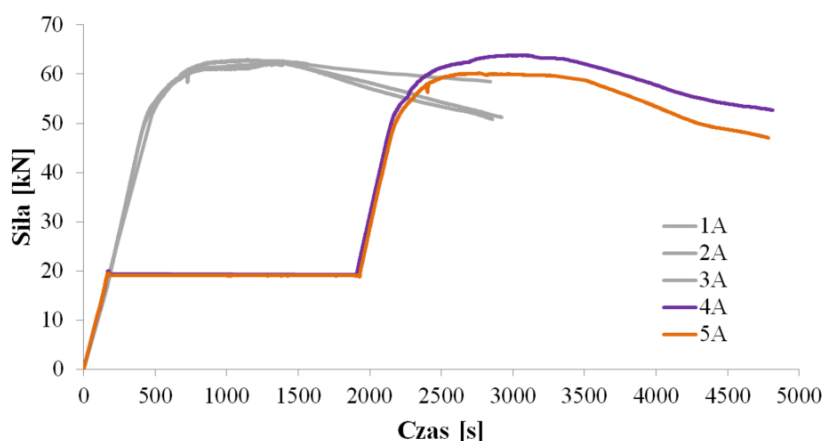
**Rys. 84** Zależność siła-przemieszczenie w przypadku belek uszkodzonych (porównawczo w belce 0A)



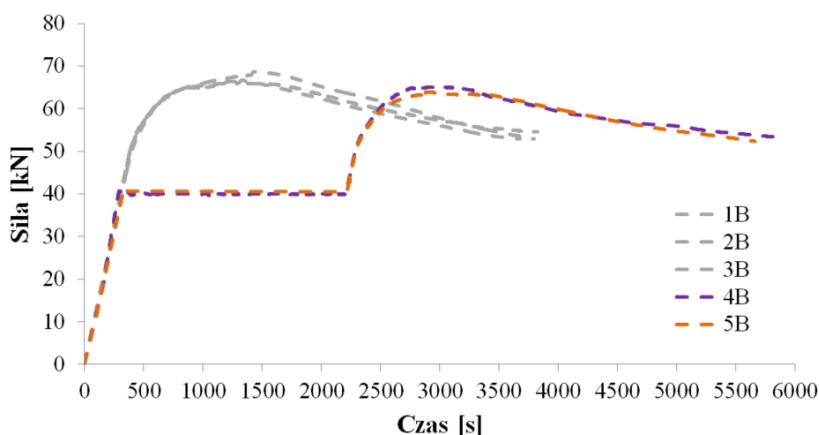
**Rys. 85** Odkształcenia belki wzmocnionej (1B) po przeprowadzonym badaniu

Ostatnim etapem laboratoryjnych badań wzmocnionych belek była analiza relaksacji w elemencie wzmocnionym. Badania przeprowadzono na belkach nieuszkodzonych (4A, 5A) oraz uszkodzonych (4B, 5B), a zależności zmiany sił w głowicy maszyny od czasu przedstawiono odpowiednio na wykresach, na rys. 86 i rys. 87. Jak widać, we wszystkich zbadanych belkach prowadzona przez 30 minut próba relaksacji nie spowodowała spadku sił w głowicy maszyny. Analizę relaksacji w przypadku belek 4A i 5A przeprowadzono przy przemieszczeniu równym 1,82 mm, co odpowiadało sile 19,20 kN. Po upływie

30 minut wartość tej siły spadła zaledwie o 0,19 kN. Po ponownym uruchomieniu przyrostu przemieszczeń w obydwu belkach (4A, 5A) zaobserwowano uplastycznienie się ściskanej strefy belki tak samo jak w belkach 1A – 3A. Zmiana sztywności belek 4A i 5A zaczęła następować po przekroczeniu sił odpowiednio 49,66 kN i 48,35 kN, a maksymalne siły uzyskane wyniosły 63,86 kN i 60,12 kN, co jest zbieżne z wynikami dla belek 1A – 3A. Ze względu na niezauważalny wpływ relaksacji kleju w belkach 4A i 5A przy niskim poziomie wyężenia, w przypadku belek 4B i 5B przeprowadzono podobną analizę, lecz przy większym poziomie obciążenia. Ugięcie belek przy którym rozpoczęto analizę relaksacji wynosiło w tym wypadku 3,9 mm, co odpowiadało sile w głowicy 40,44 kN. Dwukrotny wzrost wyężenia tych belek nie spowodował relaksacji w połączeniu klejowym – również tu dalsze badania belek 4B i 5B po upływie 30 minut pokazało niemal identyczną jak w belach 1B – 3B charakterystykę złączy. Szczegółowe wyniki zestawiono w tabeli 14.



**Rys. 86** Zależność siła-czas w przypadku belek nieuszkodzonych, wzmocnionych 4A, 5A (porównawczo 1A – 3A)



**Rys. 87** Zależność siła-czas w przypadku belek nieuszkodzonych, wzmocnionych 4B, 5B (porównawczo 1B – 3B)

**Tabela 14 Zestawienie wyników badań belek IPE120**

Numer próbki	Granica proporcjonalności		Maksymalna siła [kN]
	Siła [kN]	Przemieszczenie [mm]	
<b>Belka niewzmocniona</b>			
0A	48,03	7,81	50,97
<b>Belki wzmacnione</b>			
1A	50,15	5,05	62,81
2A	49,64	4,95	62,07
3A	49,10	4,77	62,22
4A	49,66	4,84	63,86
5A	48,35	4,78	60,12
Średnia*	49,38	4,88	62,22
Odchylenie standardowe*	0,61	0,11	1,22
Współczynnik zmienności*	1,24%	2,20%	1,96%
<b>Belka niewzmocniona</b>			
0B	9,07	1,72	19,64
<b>Belki wzmacnione</b>			
1B	50,10	4,82	66,35
2B	49,23	4,92	66,21
3B	49,09	4,87	67,95
4B	49,51	5,02	65,14
5B	48,17	4,78	63,83
Średnia*	49,22	4,88	65,90
Odchylenie standardowe*	0,63	0,08	1,37
Współczynnik zmienności*	1,28%	1,71%	2,08%

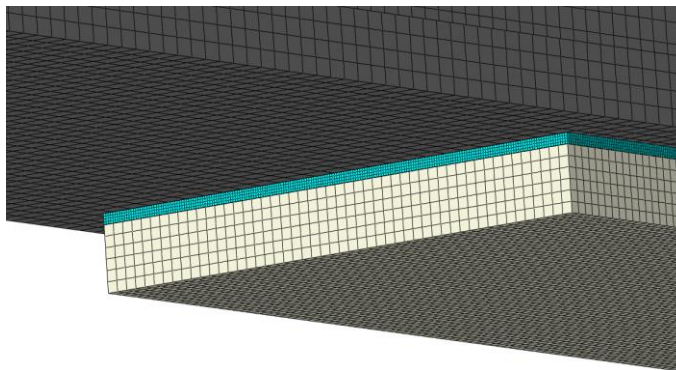
\* wartości dotyczą belek wzmacnionych 1A – 5A i 1B – 5B

### 5.3.3. Analiza numeryczna

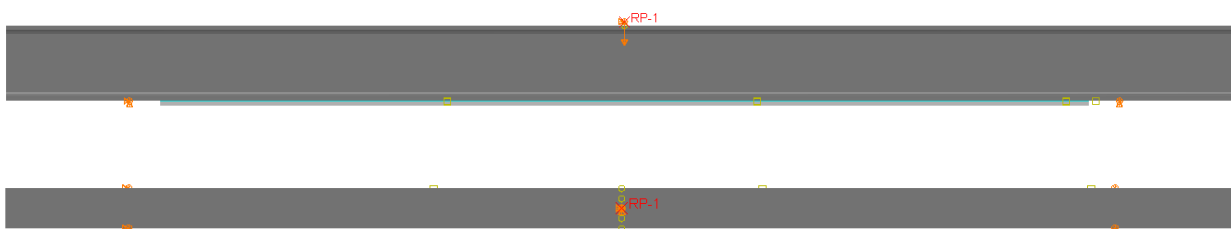
#### 5.3.3.1. Założenia

Analizy numeryczne, podobnie jak w przypadku rozciąganego połączenia (p. 5.2.3), wykonano w złożonym stanie naprężenia, do zamodelowania elementów stalowych i spoiny klejowej wykorzystując elementy skończone typu C3D8 (ośmiowęzłowe elementy

sześcienne). Wymiar elementu skończonego w belce IPE120 przyjęto jako  $2 \times 2 \times 2$  mm, w płaskowniku jako  $1 \times 1 \times 1$  mm, a w kleju  $0,25 \times 0,25 \times 0,25$  mm – rys. 88.



**Rys. 88** Przyjęte siatki elementów skończonych



**Rys. 89** Model obliczeniowy wzmocnienia belki przyjęty do analiz numerycznych

Model materiałowy kleju oraz warstw kontaktowych przyjęto w sposób opisany w p. 5.2.3. Dla elementów stalowych wykonanych ze stali 18G2A przyjęto charakterystykę przedstawioną na rys. 67. Ze względu na przyjęty model materiałowy stali, z niemającą półką plastyczną i bez uwzględnienia degradacji/pęknięcia, w analizach numerycznych sprawdzano, czy przekroczone zostały graniczne odkształcenia plastyczne. W analizach przyjęto graniczną wartość odkształceń równą 0,15, co odpowiada wartości minimalnego wydłużenia przy zniszczeniu stali wg normy [5]. Po przekroczeniu tej umownej granicy obliczenia były nadal prowadzone, co skutkowało dalszym przyrostem odkształceń – wyników tych nie można jednak przyjąć jako w pełni miarodajnych. Na wykresach granicę tę oznaczono pionową czerwoną linią. Zależność siła-ugięcie po przekroczeniu przyjętej granicy pomijano w weryfikacji modelu – oznaczono ją indeksem „\*”.

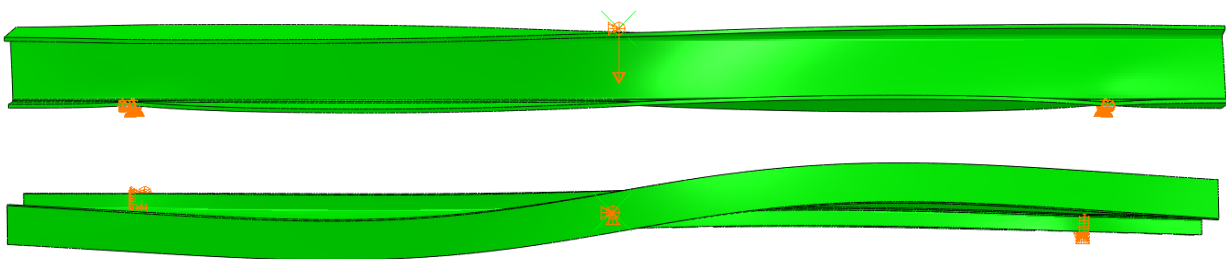
W badaniach numerycznych przyjęto model belki swobodnie podpartej, rys. 89, z podporą nieprzesuwną z jednej strony. We wstępnej analizie sprawdzono zasadność szczegółowego modelowania wałków podporowych – nie prowadziło to widocznych zmian

wyników. Wymuszenie przyłożone zostało do pasa górnego belki, w środku rozpiętości – założono, że w tym miejscu belka nie ma możliwości przemieszczania się ze swojej płaszczyzny.

Każdą analizę obliczeniową podzielona na dwa etapy. W pierwszym wykonano analizę wyboczeniową w celu określenia występujących w modelu form niestateczności. Odształcenia z analizy stateczności skalowano, zadając mogące wystąpić w elemencie normowe imperfekcje wstępne – miało to na celu zaburzenie idealnej symetrii belki, prowadzącej do zniszczenia plastycznego. Analizowana we wstępnych obliczeniach wielkość wstępnej imperfekcji, w zakresie od 0,01 wartości normowej do pełnej wartości normowej, praktycznie nie miała wpływu na wyniki. W drugim etapie analizy sprawdzano, która forma daje najmniejszą nośność elementu, prowadząc ponowne obliczenia przy użyciu metody *arc-length*.

### 5.3.3.2. Obciążenie doraźne modelu N0A

Jako pierwszą przeprowadzono analizę numeryczną belki niewzmocnionej (0A). Na rys. 90 przedstawiono formę niestateczności belki, dającą najmniejszą nośność elementu w rozpatrywanym schemacie statycznym.

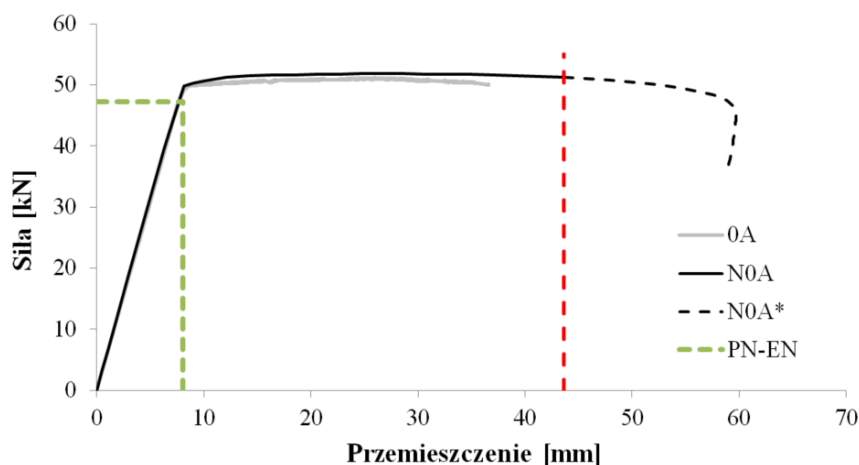


Rys. 90 Forma niestateczności dająca najniższą nośność belki niewzmocnionej (0A)

Wykorzystując wstępną imperfekcję, zgodnie z tab. 5.1 normy [5] wynoszącą 1/200, przystąpiono do analizy GMNIA [92]. Na rys. 91 przedstawiono porównawczo przebieg relacji siła-ugięcie w belce zbadanej w maszynie wytrzymałościowej (0A) oraz w programie obliczeniowym (N0A). Rozbieżności pomiędzy wynikami laboratoryjnymi i efektami analizy numerycznej były nieznaczne. Zakres liniowej proporcjonalności występował aż do osiągnięcia siły 49,2 kN. W zakresie plastycznych odkształceń stali, zależność siła-ugięcie w analizie numerycznej przebiegała równoległe do wyników badań laboratoryjnych, natomiast w analizie numerycznej pokazano również dalszy przebieg tej

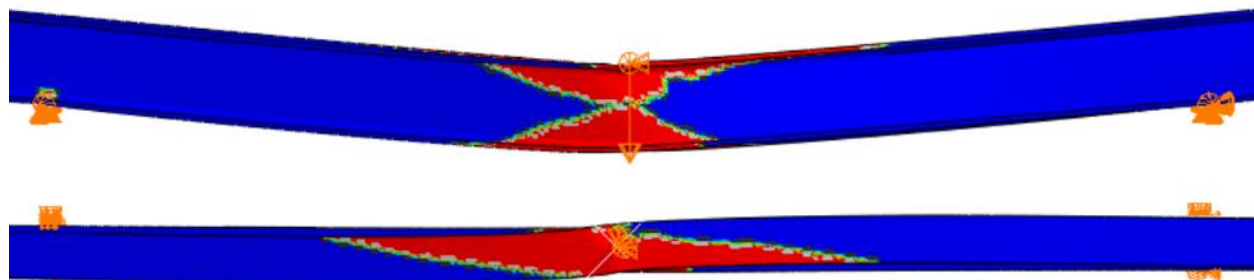


relacji (N0A\*). Maksymalna siła uzyskana metodą numeryczną wyniosła 51,80 kN. Jako odniesienie do obliczeń normowych, na rys. 91 pokazano również zakres nośności i ugięcia belki wyznaczony zgodnie z zapisami normy [5]. Jak widać, w rzeczywistości element stalowy nie miał już dużego zapasu bezpieczeństwa – co wynika z faktu bazowania obliczeń normowych na niezredukowanej wartości wytrzymałości stali; uzyskana wartość nośności wg normy [5] wynosiła 47,2 kN, co skutkuje zapasem nośności zaledwie 2 kN. W zakresie normowym przyjęto maksymalne ugięcie wynoszące 8 mm (w tym wypadku 1/200 rozpiętości pomiędzy podporami).



**Rys. 91** Zależność siła-ugięcie w belce niewzmocnionej: z badań laboratoryjnych, analizy numerycznej i obliczeń normowych

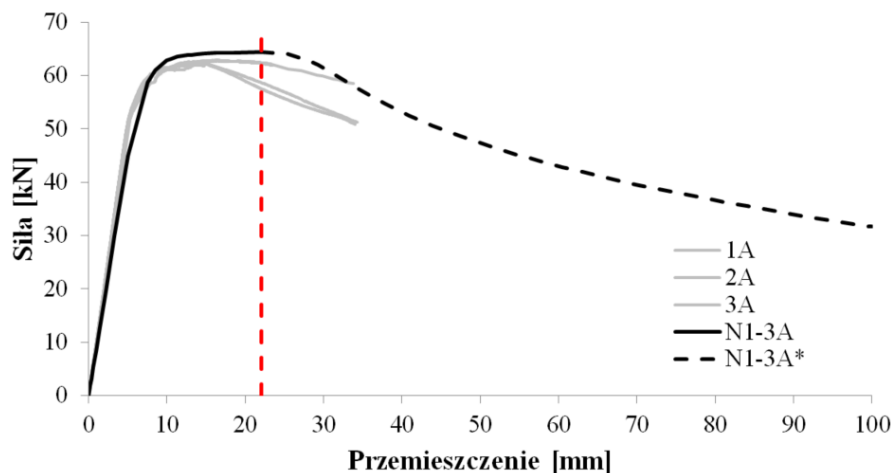
Analiza odkształceń w uplastycznionym elemencie, uzyskanych z analizy numerycznej (rys. 92) i z badań (rys. 82), wykazuje bardzo podobną postać zniszczenia. Wprowadzone do modelu numerycznego wstępne imperfekcje geometryczne spowodowały, że podczas przyrostu naprężeń w belce dochodziło do jej zwichrzenia przez wyboczenie pasa górnego. Wpływ imperfekcji na wynik bardzo dobrze oddaje również normowy współczynnik zwichrzenia  $\chi_{LT}$ , który w tym wypadku wyniósł 0,93.



**Rys. 92** Wizualizacja deformacji belki niewzmocnionej (N0A) przy przemieszczeniu pionowym 35,1 mm – na czerwono oznaczono strefy uplastycznione

### 5.3.3.3. Obciążenie doraźne modelu N1-3A

Analiza GMNIA belki wzmocnionej (N1-3A) wykazała, że wprowadzone wstępne imperfekcje geometryczne z analizy wyboczeniowej nie miały wpływu na nośność elementu, możliwa zatem byłaby sama analiza GMNA [92]. Zależność siła-ugięcie otrzymana z obliczeń numerycznych została przedstawiona na rys. 93 – również w tym wypadku widoczna jest bardzo dobra zbieżność wyników. Nośność belki N1-3A (granica proporcjonalności) wynosi 51,2 kN, natomiast maksymalna siła przenoszona przez belkę to 64,35 kN.



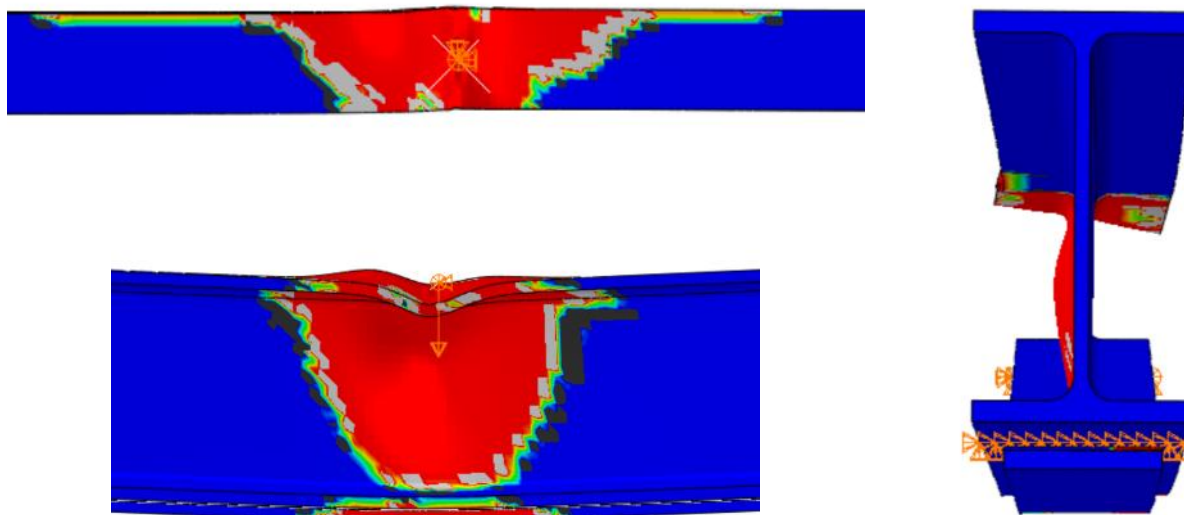
**Rys. 93** Zależność siła-ugięcie w belce wzmocnionej: z badań laboratoryjnych i analizy numerycznej

Wizualizacja odkształceń belki wykazuje uplastycznienie się pasa górnego wraz ze ścisłą częścią środka – jak w badaniach laboratoryjnych. W momencie uplastycznienia środka, dodatkowo doszło do jego lokalnego wyboczenia (rys. 94). W części rozciąganej, a więc w pasie dolnym, kleju oraz płaskownika wzmacniającego uplastycznienie obejmuje znacznie mniejszy obszar.

Analiza numeryczna dostarczyła dodatkowo informacje na temat rozkładu naprężeń w spoinie klejowej. Kolejno na rys. 95 i rys. 96 przedstawiono rozkłady naprężeń ścinających  $\tau_{xy}$ , normalnych (równoległych do wzmocnienia)  $\sigma_{xx}$  oraz poprzecznych (odrywanie/docisk)  $\sigma_{yy}$  przy ugięciach 5,1 i 22,8 mm. W obydwu przypadkach naprężenia ścinające osiągają niewielką wartość, do około 4 MPa, a na większej części połączenia ich rozkład jest równomierny. Jest to bardzo korzystna właściwość kleju metakrylowego, ponieważ regiony koncentracji naprężeń w spoinie, jeśli już występują, to na dosyć długim

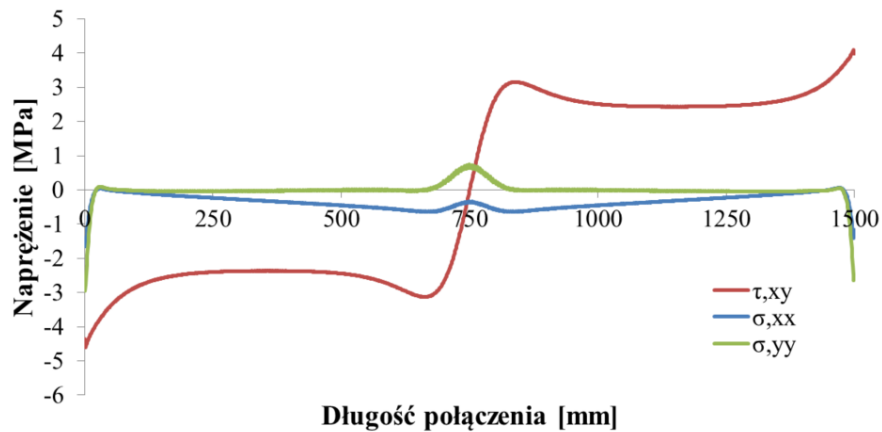


odcinku, przy czym nie dochodzi do dużych dysproporcji pomiędzy strefą krawędziową a pośrednią.

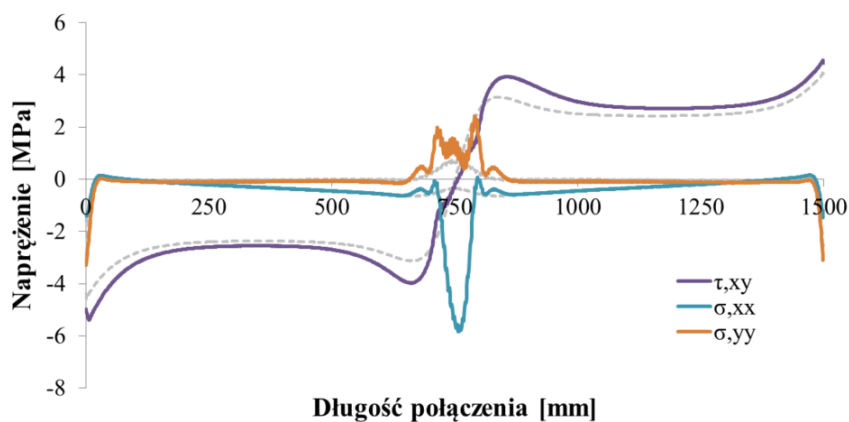


**Rys. 94 Wizualizacja deformacji belki wzmocnionej (N1-3A) przy przemieszczeniu pionowym 22,8 mm – na czerwono oznaczono strefy uplastycznione**

Jak widać na rys. 96, dalszy przyrost obciążenia spowodował niemal równomierny przyrost naprężeń ścinających, co oznacza, że cała powierzchnia spoiny bierze udział w przenoszeniu obciążeń. Widoczna na rys. 96 zmiana naprężeń normalnych  $\sigma_{xx}$  wskazuje na spadek sztywności elementu w środku jego rozpiętości. Ze względu na fakt uplastycznienia pierwotnie ściskanej części przekroju belki IPE120, oś obojętna elementu w środku rozpiętości obniżyła się w kierunku wzmocnienia. Oznaczało to, że występujący moment zginający musiał zostać przeniesiony przez mniejszy przekrój elementu, co doprowadziło do powstania znacznego przyrostu naprężeń rozciągających w kleju, w rejonie powstawania przegubu plastycznego. Naprężenia poprzeczne w momencie działania siły 51,2 kN wykazywały koncentrację naprężeń odrywających na krawędziach wzmocnienia – były to jednak na tyle małe wartości, rzędu 3 MPa, że nie doszło do uplastycznienia kleju w tym rejonie. Gdy siła osiągnęła wartość maksymalną 64,35 kN, wyraźna zmiana rozkładu naprężeń  $\sigma_{yy}$  pojawiła się jedynie w środkowej części połączenia. Było to związane ze zwiększeniem lokalnego docisku środka belki do płaskownika wzmacniającego, na skutek uplastycznienia się pasa dolnego belki.



Rys. 95 Rozkład naprężeń w spoinie klejowej wzdłuż połączenia, przy ugięciu belki 5,1 mm

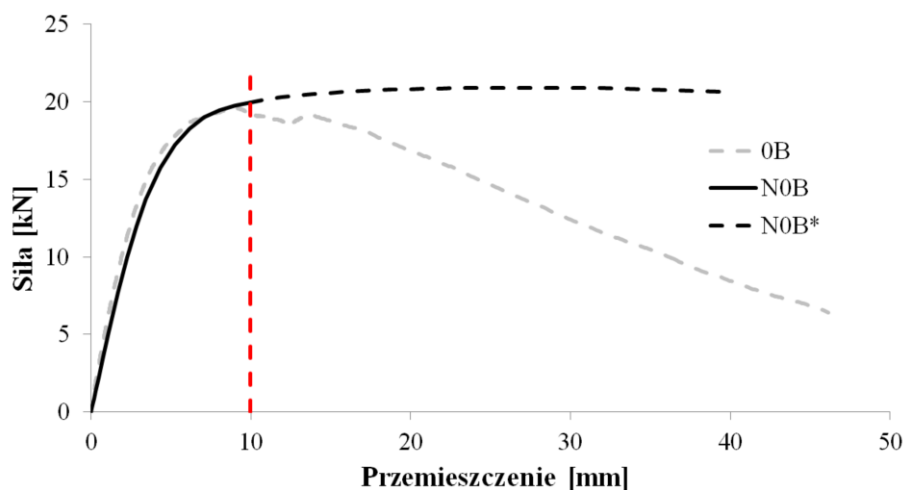


Rys. 96 Rozkład naprężeń w spoinie klejowej wzdłuż połączenia, przy ugięciu belki 22,8 mm

#### 5.3.3.4. Obciążenie doraźne modelu N0B

Kolejno, przeprowadzono analizę numeryczną belki N0B – identycznie jak belki N0A, z niezbędnymi zmianami geometrii. W środku rozpiętości elementu zamodelowano nacięcie o głębokości (wysokości) 25 mm licząc od spodu pasa dolnego, jako płaszczyznę o zerowej grubości. Porównanie wyników laboratoryjnych i numerycznych przedstawiono na rys. 97.

Przed osiągnięciem granicy dopuszczalnych odkształceń w stali, wykresy uzyskane z badań laboratoryjnych i analizy numerycznej były ze sobą zbieżne, co pozwoliło na kontynuację dalszych analiz, związanych ze wzmocnieniem uszkodzonej belki. Dalsza rozbieżność w wykresach wynika z przyjętego modelu materiałowego stali, dla którego założono niemalejącą półkę plastyczną, podczas gdy w rzeczywistości po przekroczeniu dopuszczalnych odkształceń w stali dochodzi do mikropęknięć i degradacji materiału. Jak już wspomniano, zakres ten nie jest analizowany z uwagi na opisane uproszczenia materiałowe.

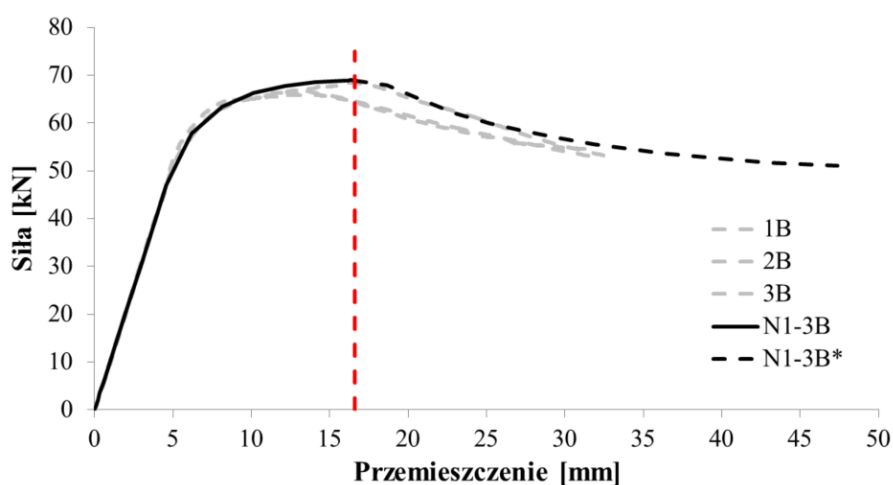


Rys. 97 Zależność siła-ugięcie w uszkodzonej belce niewzmocnionej: z badań laboratoryjnych i analizy numerycznej

### 5.3.3.5. Obciążenie doraźne modelu N1-3B

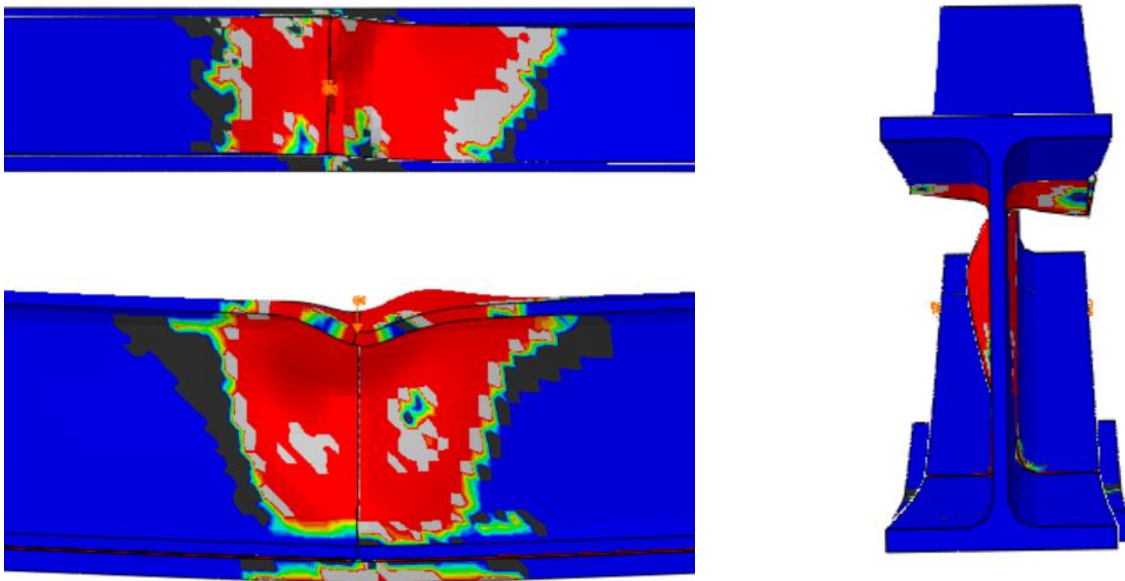
Kolejno, przeprowadzono analizę numeryczną belki uszkodzonej, ze wzmocnieniem przyklejonym od spodu płaskownikiem  $80 \times 10$  mm o długości 600 mm. Na rys. 98 przedstawiono porównanie zależności uzyskanych w badaniach laboratoryjnych oraz numerycznych N1-3B. Podobnie jak w poprzednich analizach, tak i tu zbieżność wyników była bardzo dobra. Nośność belki N1-3B (granica proporcjonalności) wynosi 47,30 kN, natomiast maksymalna siła przenoszona przez belkę to 68,93 kN.

Odształcenia elementu uzyskane z analizy numerycznej, rys. 99 wskazują, że uplastycznieniu uległ w głównej mierze ściskany pas górny i środek w rejonie przyłożenia wymuszenia do belki. Pas dolny belki, z uwagi na wprowadzoną nieciągłość (uszkodzenie), nie został uplastyczniony.



Rys. 98 Zależność siła-ugięcie w belce uszkodzonej i wzmocnionej: z badań laboratoryjnych i analizy numerycznej

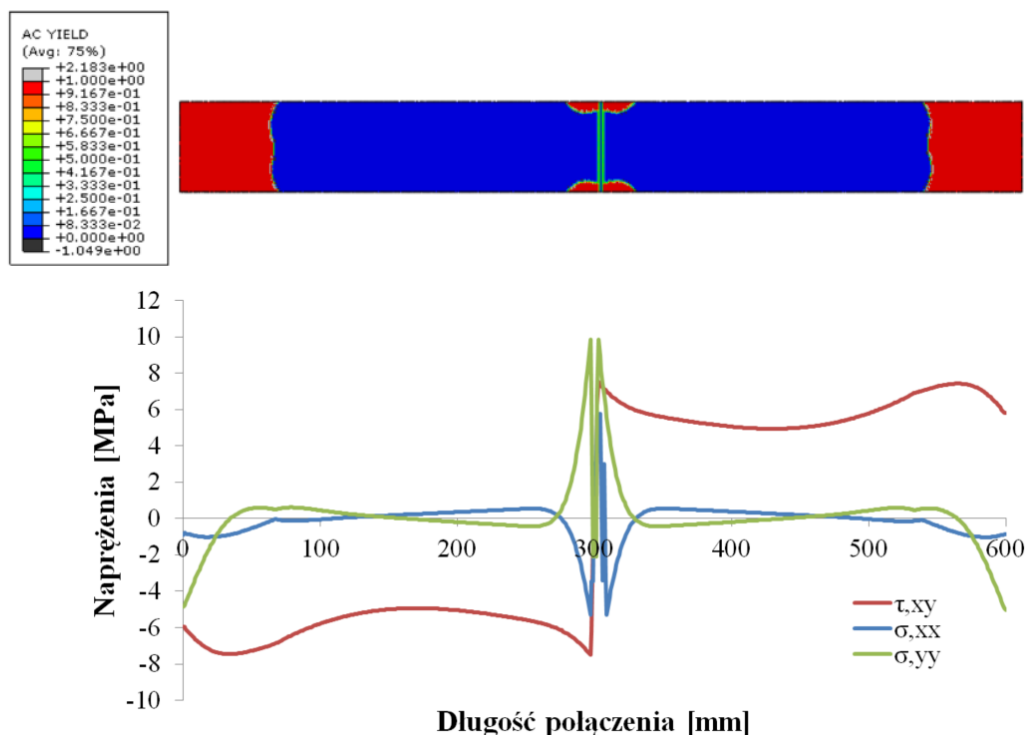
Naprężenia rozciągające w elemencie były przenoszone przez płaskownik wzmacniający pas dolny od spodu. Jak widać na wizualizacjach w niewielkim zakresie uległ on również uplastycznieniu, natomiast ze względu na znaczny przekrój wzmocnienia ( $800 \text{ mm}^2$ ) znajdującego się na większym ramieniu w stosunku do wyłączanej powierzchni belki spowodowanej rozcięciem ( $507 \text{ mm}^2$ ), wzmocnienie spowodowało nie tylko przywrócenie pierwotnej nośności elementu, ale nawet jej zwiększenie, co również jest widoczne na rys. 98.



**Rys. 99 Wizualizacja deformacji belki wzmocnionej (N1-3B) przy przemieszczeniu pionowym 22,8 mm – na czerwono oznaczono strefy uplastycznione**

Na rys. 100 i rys. 101 przedstawiono, podobnie jak w przypadku analizy N1-3A, rozkłady naprężeń w spoinie klejowej, odpowiednio przy ugięciu 5,0 i 16,3 mm. W odróżnieniu od elementu N1-3A, gdzie powierzchnia spoiny wynosiła  $750 \text{ cm}^2$ , w elemencie N1-3B było to już tylko  $384 \text{ cm}^2$ . Nad każdym z wykresów pokazano mapę przedstawiającą rejony uplastycznione w spoinie, przy danym poziomie ugięcia belki. Ze względu na wspomnianą już, dużą dysproporcję powierzchni spoin, w belce N1-3B przy ugięciu 5,0 mm widoczne jest uplastycznienie około 25% spoiny, a przy 16,3 mm klej uplastyczniony jest na prawie całej powierzchni. Możliwość powstawania odkształceń plastycznych w kleju ma w tym wypadku bardzo korzystny wpływ na nośność połączenia, ponieważ dochodzi do redystrybucji naprężeń na pozostałą część spoiny, a dodatkowo, co widać na rys. 101, w uplastycznionym rejonie nadal wzrastają naprężenia ścinające.

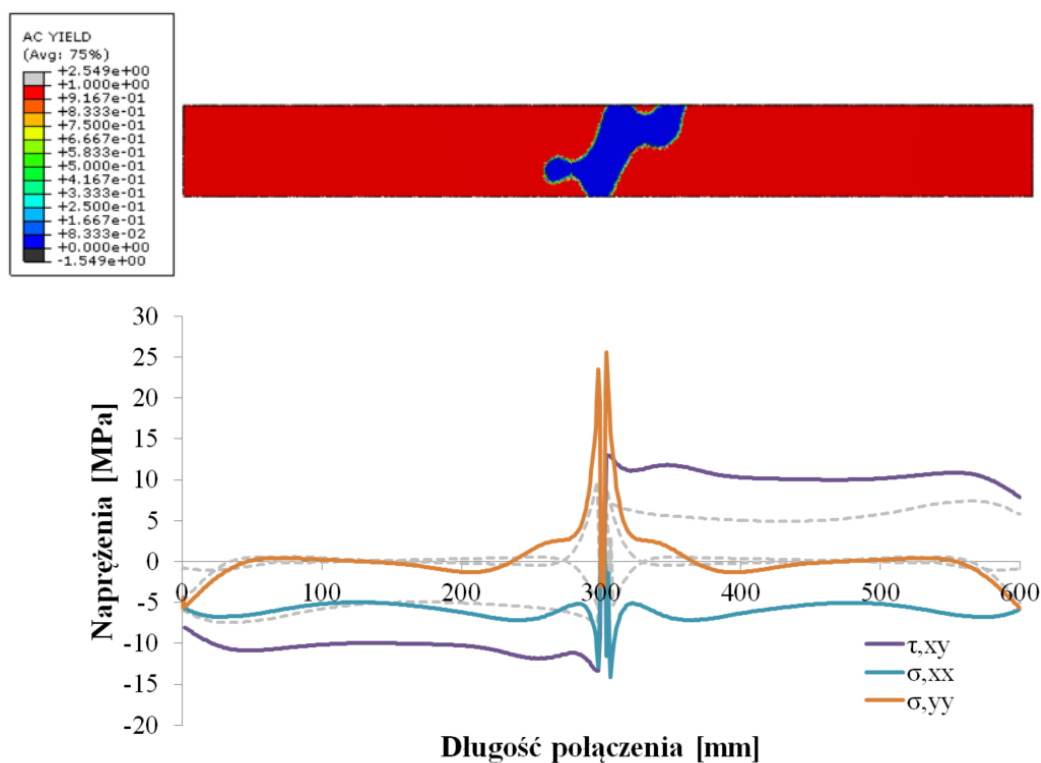
Przy mniejszym z analizowanych ugięć belki, naprężenia ścinające mieściły się w granicach od 4,9 do 7,4 MPa. Wraz ze wzrostem obciążeń, rozkład naprężeń ścinających na długości spoiny wyrównywał się i przy ugięciu 16,3 mm naprężenia  $\tau_{xy}$  wynosiły średnio około 10,7 MPa. Przebieg naprężeń normalnych  $\sigma_{xx}$  na długości spoiny, przedstawiony na rys. 100, wskazuje, że poza środkową częścią połączenia spoina nie jest w znacznym stopniu rozciągana czy ściskana.



**Rys. 100** Rozkład naprężeń w spoinie klejowej wzdłuż połączenia, przy ugięciu belki 5,0 mm; powyżej mapa przedstawiająca rejony uplastycznione w spoinie klejowej

Dalszy przyrost obciążeń, powodujący uplastycznienie górnego pasa wzmacnianej belki sprawia, że w spoinie, na znacznej jej długości występują równomierne naprężenia rozciągające (rys. 101). Występujące w obydwu przypadkach zaburzenie naprężeń normalnych w strefie uszkodzonego dwuteownika spowodowane jest faktem nagłego wzrostu sztywności elementu, na skutek wprowadzonego wzmocnienia – jak widać jest to efekt lokalny występujący na odcinku około 10 mm. Naprężenia poprzeczne  $\sigma_{yy}$  poza środkową częścią połączenia zmieniały się w niewielkim stopniu w zależności od działającego obciążenia. Naprężenia odrywające na krawędziach wynosiły 5,2 MPa i zanikały na odcinku około 40 mm. Gwałtowny wzrost naprężeń prostopadłych następował dopiero w rejonie osłabienia dwuteownika, gdzie jego pasy dolne wywierały bardzo duże

naprężenia spowodowane dociskiem. Docisk w środkowej części wzmocnienia był silnie zależny od obciążenia działającego na belkę i przy ugięciu 5,0 mm wynosił 9,8 MPa (rys. 100), natomiast przy ugięciu 16,3 mm było to już 25,6 MPa (rys. 101).

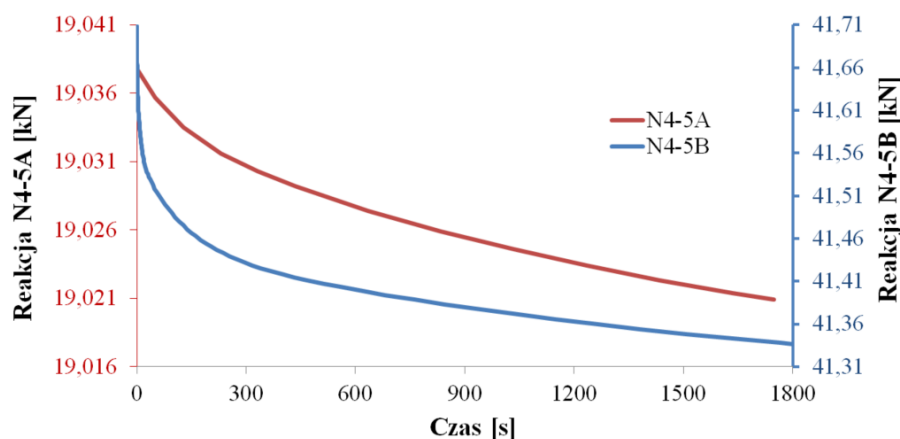


**Rys. 101** Rozkład naprężeń w spoinie klejowej wzdłuż połączenia, przy ugięciu belki 16,3 mm; powyżej mapa przedstawiająca rejony uplastycznione w spoinie klejowej

### 5.3.3.6. Badanie relaksacji modeli N4-5A i N4-5B

Ze względu na założenie modelu materiałowego kleju z liniową lepkosprężystością, na potrzeby analiz numerycznych przyjęto pewne uproszczenia. Ponieważ spoina na swojej długości nie zawsze jest wyężona równomiernie, przyjęto współczynniki Prony dające największą wartość relaksacji, na podstawie badań przedstawionych w rozdziale 3.3. Na potrzeby analiz numerycznych ograniczono również zakres badań, które trwały aż do momentu zakończenia relaksacji. Modele numeryczne obciążane były do ustalonej wartości, a następnie następowało zatrzymanie wymuszenia (w formie przemieszczeń) działającego na model i prowadzono analizę przez kolejne 1800 s. Dalszy przyrost ugięć nie był już prowadzony, ponieważ prowadziłoby to do m.in. uplastycznienia spoiny klejowej (co miało miejsce w modelach N1-3A i N1-3B). Ograniczenia w programie ABAQUS nie pozwalają na łączenie modelu lepkosprężystego z modelem uwzględniającym uplastycznienie [65].

W pierwszej kolejności porównano zmianę wartości siły w miejscu wymuszenia przemieszczeń. Zmiany w modelach N4-5A i N4-5B przedstawiono na rys. 102. Uzyskane wyniki są zbieżne z otrzymanymi z badań laboratoryjnych, a więc nie zaobserwowano istotnego spadku siły („odprężenia”) działającej na cały element N4-5A i N4-5B. Spadek siły w przypadku belki N4-5A wyniósł 0,02 kN; w belce N4-5B było to 0,37 kN.



**Rys. 102 Spadek siły, w miejscu wymuszenia, w trakcie prowadzenia badania relaksacji na belkach N4-5A i N4-5B**

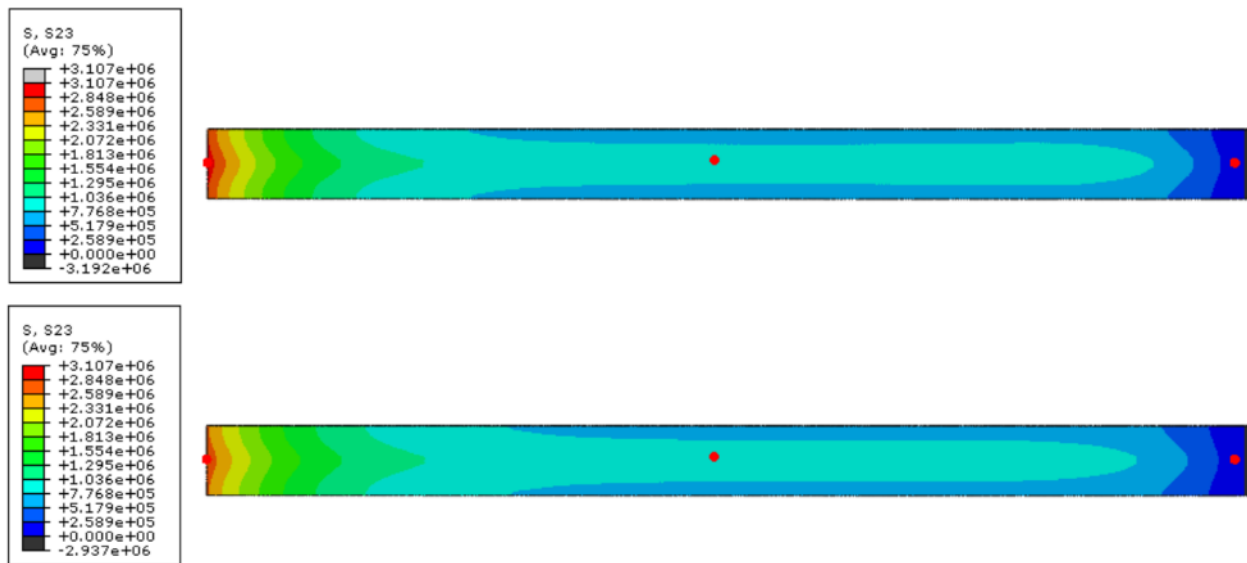
Dzięki analizie numerycznej sprawdzono również relaksację naprężeń w spoinie klejowej. Na rys. 103 i rys. 104 pokazano porównanie map rozkładu naprężeń ścinających przed i po upływie 1800 s relaksacji, w obydwu badanych belkach. Mapy przedstawiają połowę powierzchni spoiny (po lewej – strefa krawędziowa; po prawej – środek połączenia). Na mapach umieszczono również po trzy punkty, w których szczegółowo przedstawiono wykresy zmiany naprężeń w czasie (rys. 105).

W belce N4-5A największy spadek naprężeń zaobserwowano lokalnie, na krawędzi połączenia; w pozostałej części spoiny zmiany były pomijalne. Na rys. 105a widać łagodny spadek naprężeń na krawędzi – od wartości 3,05 MPa do 2,81 MPa.

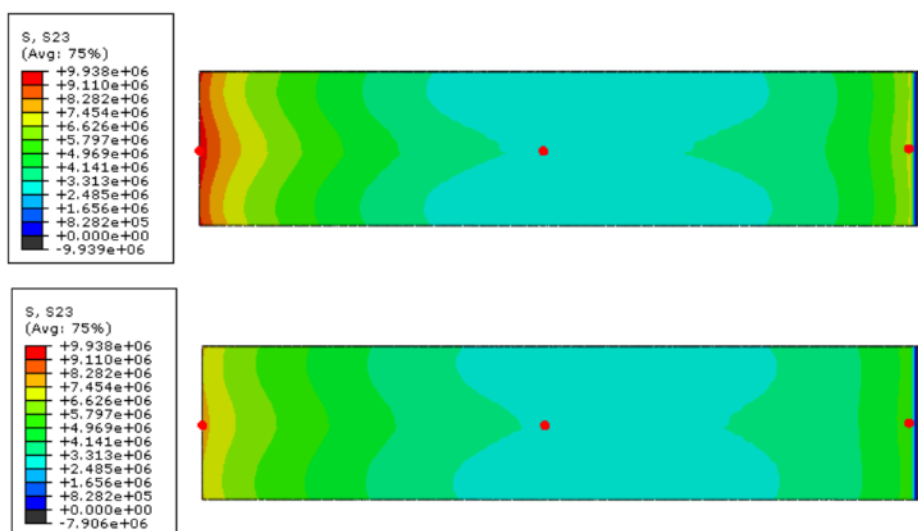
W belce N4-5B, analizę prowadzono w innych warunkach, przy znacznie większym wyężeniu elementu. Powierzchnia spoiny była niewielka, a nieciągłość pasa dolnego dwuteownika powodowała konieczność włączenia spoiny do współpracy w dwóch punktach: na końcu nakładki i w punkcie przecięcia pasa dolnego. Jest to wyraźnie widoczne na rys. 104. Naprężenia ścinające mają tu równomierny rozkład na całej powierzchni spoiny, co przekłada się na spadek naprężeń podczas relaksacji w krawędziowym i środkowym punkcie (rys. 105b). W tym wypadku spadek naprężeń



w punkcie krawędziowym wyniósł 1,92 MPa, w punkcie środkowym 1,45 MPa, a w punkcie pośrednim był pomijalny (0,06 MPa). W belce N4-5B największa zmiana naprężeń nastąpiła już w początkowej fazie relaksacji – po upływie zaledwie 18 s uzyskano 50% całego spadku naprężeń w punktach krawędziowym i środkowym, podczas gdy w belce N4-5A 50% spadku naprężeń w punkcie krawędziowym uzyskano dopiero po upływie 310 s.

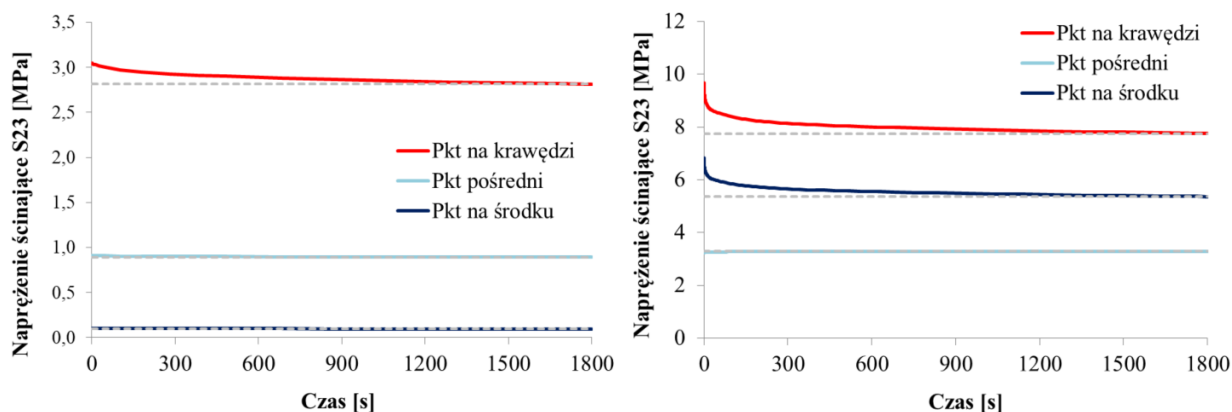


**Rys. 103** Mapy naprężeń głównych kleju w belce N4-5A (u góry przed, na dole po upływie 1800 s relaksacji)



**Rys. 104** Mapy naprężeń głównych kleju w belce N4-5B (jak wyżej)





**Rys. 105** Zmiana naprężeń kleju w trakcie relaksacji, w wybranych punktach belki:  
a) N4-5A; b) N4-5B

Parametry reologiczne zbadane na próbkach kleju (rys. 17) wskazywały na znaczny spadek naprężeń wskutek relaksacji. Zgodnie z uzyskanymi wynikami (p. 3.3.2), po upływie 1800 s powinna nastąpić redukcja naprężeń do poziomu 60% wartości wstępnych. Tymczasem, w przypadku analizy belek, redukcja ta dotyczyła tylko niektórych obszarów spoiny, a naprężenia wstępne spadły do 92% w przypadku belki N4-5A oraz 79% w belce N4-5B. Tak duże różnice są jednak oczywiste wobec skrajnie różnych schematów badań – próbka kleju ma pełną swobodę odkształceń poprzecznych, podczas gdy cienka spoina klejowa ograniczona jest przez bardzo sztywne elementy stalowe. Istotny w tym przypadku jest również fakt nierównomiernego rozkładu naprężeń w spoinie.

### 5.3.4. Wnioski

Przeprowadzone na belkach stalowych IPE120 badania laboratoryjne wykazały istotny wpływ wykonanych wzmocnień na zachowanie się belek w obydwu badanych grupach. Wzmocnienie nieuszkodzonych belek przyklejonym do pasa dolnego płaskownikiem stalowym skutkowało wyraźnym wzrostem sztywności i nośności, a wzmocnienie belek uszkodzonych (z naciętym pasem dolnych) skutkowało odtworzeniem pierwotnej nośności, a nawet pewnym jej wzrostem. W obydwu zbadanych typach belek osiągnięto graniczne naprężenia w ściskanej (górnej) części – gdzie zaobserwowano podczas badań znaczne odkształcenia plastyczne stali. W badanych elementach ze wzmocnieniem nie zaobserwowano rejonów, w których doszłoby do utraty ciągłości spoiny klejowej czy utraty przyczepności.

Badanie relaksacji na wzmocnionych belkach stalowych nie wykazały istotnych zmian w pomiarze sił w głowicy maszyny. Dodatkowo, dalszy przyrost przemieszczeń po wznowieniu badań (to jest po upływie 1800 s) wykazał zbieżną zależność siła-przemieszczenie w stosunku do elementów obciążanych w sposób doraźny.

Analizy numeryczne, w pierwszej kolejności przeprowadzone na stalowych belkach niewzmocnionych, potwierdziły założenia przyjęte do analizy GMNIA. Ze względu na uproszczony model materiałowy stali, nieuwzględniający degradacji materiału, do dalszych analiz przyjmowano tylko wyniki uzyskane przed osiągnięciem odkształceń plastycznych w stali, przyjętych normowo jako 0,15.

Przyjęte do analiz numerycznych założenia dotyczące modelu materiałowego kleju (na podstawie rozdziału 5.1) pozwoliły na uzyskanie dla wzmocnionych belek bardzo dobrej zbieżności wyników badań numerycznych i laboratoryjnych (tabela 15). W belkach N1-3A oraz N1-3B, badanych w sposób doraźny, dochodziło do uplastycznienia pasa górnego i górnej części środka belki IPE120. Analizy numeryczne dodatkowo pozwoliły na szczegółowe zbadanie rozkładu naprężeń na długości każdego połączenia. Jak wynika z wykonanych obliczeń, naprężenia ścinające w spoinie klejowej nie koncentrują się na krótkich odcinkach w narożach połączenia, tylko rozkładają się na większych obszarach spoiny – co wynika z właściwie dobranej sztywności spoiny. Dzięki znacznemu zakresowi półki plastycznej kleju, przy dużym wyężeniu połączenia możliwa jest redystrybucja naprężeń na mniej wyężone obszary spoiny, a zatem częściowe ich wyrównanie.

Przeprowadzone, w ograniczonym zakresie, badania numeryczne relaksacji w elementach N4-5A i N4-5B wykazały pomijalny spadek wartości siły w miejscu przyłożonego wymuszenia – co zgodne jest z wynikami badań modelowych. Rozpatrywany klej metakrylowy, pomimo znacznej relaksacji wyznaczonej na podstawie badania pojedynczych próbek (p. 3.3), w rzeczywistej spoinie pomiędzy dwoma sztywnymi elementami stalowymi nie miał możliwości swobodnych odkształceń, co bardzo ograniczało możliwości relaksacji. Przyjęty w badaniach numerycznych lepkosprężysty model materiałowy kleju wydaje się więc odpowiedni dla tego typu połączeń, w zakresie małego i średniego stopnia wyężenia spoin.

**Tabela 15 Zestawienie wyników przeprowadzonych analiz numerycznych oraz porównanie ze średnimi wartościami uzyskanymi z badań laboratoryjnych**

Numer próbki Numeryka (Lab.)	Granica proporcjonalności		Maksymalna siła [kN]
	Siła [kN]	Przemieszczenie [mm]	
<b>Belki niewzmocnione</b>			
N0A (0A)	49,22 (48,03)	8,01 (7,81)	51,80 (50,97)
N0B (0B)	9,98 (9,07)	2,24 (1,72)	19,97 (19,64)
<b>Belki wzmacnione</b>			
N1-3A (1-5A)	51,27 (49,38)	5,31 (4,88)	64,35 (62,22)
N1-3B (1-5B)	47,30 (49,22)	4,55 (4,88)	68,93 (65,90)



## 6. Podsumowanie i wnioski

Niniejsza praca była poświęcona badaniom i analizom doświadczalnym i numerycznym wybranego kleju metakrylowego (MMA) – Plexus MA-420 w aspekcie jego zastosowaniu w połączeniach elementów stalowych.

W pracy przedstawiono krótki przegląd literatury tematu dla badania mechanicznych właściwości próbek kleju, takich jak: wytrzymałość na rozciąganie, wytrzymałość na ścinanie (na różnych typach próbek), wytrzymałość na ściskanie, parametry reologiczne i przyczepność do wybranych typów powierzchni. Dodatkowo wykonano badania związane ze zmianą właściwości kleju w warunkach różnych temperatur oraz częstotliwości wymuszeń. W pracy wykonano również walidację modelu numerycznego na podstawie badań wytrzymałościowych kleju oraz porównano wyniki analiz numerycznych wybranych połączeń elementów stalowych z wynikami badaniami modelowych [41]. Na potrzeby pracy przeprowadzono także badania laboratoryjne pełnowymiarowych, wzmocnionych belek stalowych IPE120 oraz ich analizę numeryczną.

Na podstawie badań mechanicznych wybranego kleju metakrylowego (Plexus MA-420) sformułować można następujące wnioski:

- wybrany klej charakteryzuje się dużą zależnością wytrzymałości i sztywności od prędkości przyrostu obciążenia, co świadczy o cechach lepkosprężystych,
- badania prędkość przyrostu wytrzymałości pokazały, że już po 1 godzinie od momentu uformowania próbki klej osiąga 50% swojej docelowej wytrzymałości; wraz z upływem czasu następuje skracanie się pólki plastycznej oraz wzrost sztywności i wytrzymałości,
- wielkość relaksacji jest zależna od wartości naprężeń wstępnych – im większa jest ich wartość początkowa, tym większy jest spadek z upływem czasu,
- na podstawie wyznaczonych współczynników Prony i analizy numerycznej wykazano, że relaksacja próbki kleju zanika po upływie około 1 godziny,
- dla rozpatrywanego kleju metakrylowego najbardziej miarodajnym badaniem wytrzymałości na ścinanie jest badanie TAST na sztywnych i grubych elementach stalowych, ukształtowanych w sposób minimalizujący mimośród w spoinie,
- podczas ściskania klej charakteryzuje się plastycznym zniszczeniem,

- największą przyczepność uzyskano w przypadku powierzchni stalowej wypiaskowanej oraz malowanej bez wad fabrycznych; najmniejszą wartość uzyskano na stali ocynkowanej,
- na podstawie analiz numerycznych badania przyczepności wykazano, że grubość blachy podstawy z zakresu od 3 do 40 mm nie ma istotnego wpływu na wyniki.

Przeprowadzone badania termiczne kleju Plexus MA-420 pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- czas wiązania kleju wynosi 36 minut i procesowi temu towarzyszy wydzielanie się znacznych ilości ciepła (temperatura powierzchni około 115°C),
- w zakresie temperatur od -70 do -35°C klej jest bardzo sztywny i kruchy; zeszklenie zachodzi w przedziale -35 do -15°C; powyżej tej temperatury, aż do 55°C materiał ma charakter lepkosprężysty; wyższa temperatura sprawia, że w kleju zaczynają dominować odkształcenia lepkie, aż do osiągnięcia w temperaturze 115°C cech cieczy z wysoką sprężystością,
- na podstawie DMTA określono zależność trzech zmiennych: temperatury odniesienia, częstotliwości wymuszeń oraz modułów zachowawczego lub stratności; niskie temperatury odniesienia sprawiają, że klej już przy niewielkich wartościach częstotliwości osiąga większy moduł zachowawczy, natomiast w wyższych temperaturach potrzebna jest dużo większa wartość częstotliwości aby osiągnąć porównywalne wartości modułów,
- analiza TGA wykazała, że klej jest termicznie stabilny aż do temperatury 190°C.

Badania na pełnowymiarowych połączeniach umożliwiły analizę kleju w złożonym stanie naprężeń, dzięki czemu można przedstawić następujące wnioski:

- przyjęty dla kleju model materiałowy Druckera-Pragera wraz z warstwami kontaktowymi pomiędzy spoiną i elementami stalowymi, w analizach numerycznych wykazał bardzo dużą zgodność z badaniami połączeń zakładkowych oraz z badaniami wzmocnionych belek stalowych;
- analiza numeryczna spoiny klejowej w połączeniach zakładkowych pozwoliła na określenie zakresu uplastycznienia kleju, zależnego od stopnia wyężenia

połączenia, a także na zobrazowanie przyrostu powierzchni na której nastąpiła utrata przyczepności; tym samym możliwe było opisanie procesu zniszczenia,

- wzmocnienie nieuszkodzonych oraz uszkodzonych belek IPE120 spowodowało znaczny wzrost nośności i sztywności elementów; zniszczenie wzmocnionych belek miało za każdym razem charakter plastyczny, na skutek wyczerpania się nośności w ściskanej części dwuteownika; w żadnym ze zbadanych modeli nie zaobserwowano oderwania się wzmocnienia od belki,
- badania relaksacji na wzmocnionych belkach nie wykazały spadku mierzonej siły w miejscu przyłożonego wymuszenia, a wznowienie badań po upływie 1800 s nie skutkowało zmianą nośności elementów,
- analizy numeryczne wzmocnionych belek IPE120, zarówno w zakresie badań statycznych jak i z uwzględnieniem relaksacji, wykazały dobrą zbieżność z wynikami badań modelowych,
- przyjęta metoda analizy GMNIA, bazująca na imperfekcjach geometrycznych i wykorzystująca nieliniowość materiału, pozwoliła na uzyskanie obrazów zniszczenia spójnych z obserwowanymi w badaniach modelowych,
- mała sztywność kleju metakrylowego oraz możliwość uplastycznienia się spoin pozwoliły na redystrybucję naprężeń na dłuższych odcinkach spoin, co pozwoliło na współpracę połączonych elementów na długich odcinkach.

Nawiązując do tez przedstawionych w rozdziale 1.4., sformułować można następujące wnioski:

- w zadanych warunkach brzegowych, to jest w temperaturze otoczenia  $\sim 23^{\circ}\text{C}$ , przy kondycjonowaniu przez 168 godzin możliwe jest wykonywanie skutecznych doraźnych wzmocnień elementów stalowych przy użyciu wybranego kleju metakrylowego,
- analizowane połączenia charakteryzowały się plastycznym zniszczeniem, a zatem wysoką nośnością poawaryjną, co świadczy o możliwości bezpiecznego użytkowania tego typu złączy,
- przedstawione założenia do opisu modelu numerycznego oraz zgodność wyników analiz MES i badań modelowych świadczą o możliwości wiarygodnego

modelowania zachowania się wzmocnionych przyklejonymi nakładkami belek stalowych pod obciążeniem statycznym krótkotrwałym i długotrwałym.

Należy tu zastrzec, że wszystkie przedstawione wyżej wnioski uzyskano na podstawie określonych badań, wykonanych na krótkich seriach próbek lub elementów, z wykorzystaniem jednego typu kleju. Tym samym są one ograniczone do zakresu objętego wykonanymi badaniami i analizami.

W związku z powyższym planuje się poszerzenie zakresu badań o następujące prace:

- badania wytrzymałościowe innych rodzajów klejów metakrylowych, w tym prowadzone we współpracy z jednym z producentów, co daje możliwość wprowadzania modyfikacji wybranych cech,
- analiza starzenia się kleju, polegająca na badaniu wytrzymałości na ścinanie próbek poddanych cyklicznemu działaniu zmiennych temperatur,
- szczegółowe badania przyrostu wytrzymałości w czasie, z uwzględnieniem możliwości modyfikacji tej cechy,
- wyznaczenie parametrów niezbędnych do opisu modelu nieliniowo-lepkoplastycznego,
- badania DMTA zginanych próbek kleju, w celu wyznaczenia modułu zachowawczego  $E'$  oraz stratności  $E''$ ,
- badania zmęczeniowe wybranych połączeń konstrukcyjnych,
- wyznaczenie energii pęknięcia przy ścinaniu i rozciąganiu.



## Bibliografia

Bibliografię uszeregowano w kolejności cytowania w tekście.

- [1] Mays G.C., Hutchinson A.R.: Adhesives in civil engineering. Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
- [2] Gleich D.: Stress analysis of Structural Bonded Joints. Delft University of Technology, 2002.
- [3] Floor J.H.J.: Structural Adhesive Bonded Steel-to-Steel Connections. An Introduction for Structural Engineering. Delft University of Technology, 2014.
- [4] Adams R.D., Comyn J., Wake W.C.: Structural Adhesive Joints in Engineering. Chapman & Hall, 1997.
- [5] PN-EN 1993-1-1: 2006. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [6] PN-EN 1993-1-8: 2006. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów.
- [7] Stowarzyszenie FME-CWM: Lijmen algemeen. VM 86, Zoetermeer, 2008.
- [8] Chmielnicki B., Jurczyk S., Bula A., Hulimka J.: Analiza termiczna kleju metakrylowego podczas procesu wiązania. Przetwórstwo tworzyw, Tom 24: 6, 2018.
- [9] Orłoś Z.: Wytrzymałość materiałów. Wyd. XIV. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1976.
- [10] Higgins A.: Adhesive bonding of aircraft structures. International Journal of Adhesion and Adhesives, vol. 20, 367-376, 2000.
- [11] Łagoda M.: Wzmacnianie mostów przez doklejanie elementów. Politechnika Krakowska, Kraków, 2005.
- [12] Karbhari V.M.: Rehabilitation of Metallic Civil infrastructure using Fiber-reinforced Polymer (FRP) Composites. Woodhead Publishing, Amsterdam, 2014.
- [13] Kubieniec G.: Nośność blachownic stalowych wzmacnianych z zastosowaniem klejenia. Praca doktorska. Politechnika Krakowska, Kraków, 2008.
- [14] [Online] COST European Cooperation in Science & Technology. [Dostęp: 23.03.2020.] <https://www.cost.eu/actions/CA18120/#tabs|Name:overview>.
- [15] Kałuża M., Hulimka J., Kubica J.: Effectiveness of adhesive CFRP/steel joints – double-lap static tests. Brittle Matrix Composites 11, Warszawa, 2015.
- [16] Kałuża M., Hulimka J.: Methacrylate adhesives to create CFRP laminate-steel joints – preliminary static and fatigue tests. Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2016, 2016.

- [17] McBain J.W., Hopkins D.G.: On Adhesives and Adhesive Action. *The Journal of Physical Chemistry*, 29: 88, 1925.
- [18] Pizzi A., Mittal K.L.: *Handbook of Adhesive Technology*. Taylor & Francis Group, LLC, Nowy Jork, 2003.
- [19] Gent A.N., Schultz J.: Effect of Wetting Liquids on the Strength of Adhesion of Viscoelastic Material. *The Journal of Adhesion*, 3:4, 1972.
- [20] Da Silva L.F.M., Ochsner A., Adams R.D.: *Handbook of Adhesion Technology*. Second Edition. Springer, Berlin, 2011.
- [21] PN-EN ISO 4624:2016. Farby i lakiery. Próba odrywania do oceny przyczepności.
- [22] Rudawska A.: *Wybrane zagadnienia konstytuowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych*. Politechnika Lubelska, Lublin, 2013.
- [23] Czaplicki J., Ćwikliński J., Godzimirski J., Konar P.: *Klejenie tworzyw konstrukcyjnych*. WKiŁ, Warszawa, 1987.
- [24] Van Straalen I.J.: *Development of Design Rules for Structural Adhesive Bonded Joints - A Systematic Approach*, in *Civil Engineering and Geosciences*. Delft University of Technology, Delft, 2001.
- [25] Ebnesajjad S.: *Adhesives Technology Handbook*. 2nd Edition. William Andrew, Norwich, 2008.
- [26] Strong A.B.: *Fundamentals of Composite Manufacturing: Materials, Methods and Applications*. Society of Manufacturing Engineers, 2007.
- [27] Baldan A.: *Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composites materials: Adhesives, adhesion theories and surface pretreatment*. *Journal of Materials Science*, vol.39, 1-49, 2004.
- [28] DeGarmo E.P., Black J.T., Kohser R.A.: *Materials and Processes in Manufacturing*, 9th edition. Wiley, 2003.
- [29] ITW Engineered Polymers: *Technical Data Sheet - PLEXUS MA420*. Irlandia, 2017.
- [30] Pielichowski J., Puszyński A.: *Chemia Polimerów*. WNT, Kraków, 2004.
- [31] Pielichowski J., Puszyński A.: *Przetwórstwo Tworzyw Sztucznych*. WNT, Kraków, 1994.
- [32] Rudawska A., Araźna M.: *Wytrzymałość i odkształcalność wybranych kompozycji epoksydowych, w tym w badaniach zakładkowych połączeń blach stalowych*. *Przetwórstwo Tworzyw*. Wyd. 2 (marzec-kwiecień), 2017.
- [33] Godzimirski J., Tkaczuk S.: *Metoda prognozowania wytrzymałości kohezijnej*. *Biuletyn WAT*. vol. LV, nr 4, 2006.

- [34] Rudawska A., Semeniuk M.: Wpływ rodzaju żywicy epoksydowej i utwardzacza na wytrzymałość połączeń klejowych blach stalowych. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 4, 2014.
- [35] Pasternak H., Kubieniec G., Piekarczyk M.: Adhesives in strengthening of steel structures. *Engineering Structures and Technologies*, 2(2), 45-50, 2010.
- [36] Bordes M., Davies P., Cognard J.Y., Sohier L., Sauvant-Moynot V., Galy J.: Prediction of long term strength of adhesively bonded steel/epoxy joints in sea water. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29, 595–608, 2009.
- [37] Pasternak H., Schwarzlos A., Schimmack N.: The application of adhesives to connect steel members. *Journal of Constructional Steel Research*, 60, 649–658, 2004.
- [38] De Morais A.B., Pereira A.B., Teixeira J.P., Cavaleiro N.C.: Strength of epoxy adhesive-bonded stainless-steel joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 27, 679–686, 2007.
- [39] Jensen M.K., Love B.J., Grant J.W., Cotton J., Keiser J.R., Wilson D.F.: Comparison study of dicyandiamide-cured epoxy bonded steel joints and polyamidoamine-cured epoxy bonded steel joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 20, 437-444, 2000.
- [40] Lu Z., Wang P., Lin J., Wang L., Li G.: Effect of moisture content in uncured adhesive on static strength of bonded galvanized DP600 steel joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31, 202–208, 2011.
- [41] Hulimka J., Kałuża M.: Preliminary tests of steel-to-steel adhesive joints. *Procedia Engineering*, 172, 2017.
- [42] Kałuża M., Hulimka J., Kubica J., Tekieli M.: The Methacrylate Adhesive to Double-Lap Shear Joints Made of High-Strength Steel – Experimental Study. *Materials*, 12, 120, 2019.
- [43] Kozłowski M., Bula A., Hulimka J.: Determination of mechanical properties of methyl methacrylate adhesive (MMA). *Architecture, Civil Engineering, Environment (ACEE)*, 3, 2018.
- [44] Bula A., Kozłowski M., Hulimka J., Chmielnicki B.: Analysis of methyl methacrylate adhesive (MMA) relaxation with non-linear stress-strain dependence. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 94, 2019.
- [45] Bula A.: Analiza numeryczna wzmocnionej belki stalowej. XIX Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa, Gliwice, 2019.
- [46] Sihm S., Miyano Y., Nakada M., Tsai S.W.: Time- and Temperature-Dependent Failures of a Metal-to-Composites Bonded Joint with PMMA Adhesive Material. *Journal of COMPOSITE MATERIALS*, vol. 37, no. 1, 2003.

- [47] Yildiz S., Shaffren D., Jahnke D., Delale F., Andreopoulos Y.: Characterization of adhesive joints under shock-wave loading. Proceedings of the ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2016. Phoenix, Arizona, USA, 2016.
- [48] Maćkowiak P., Ligaj B., Płaczek D., Jasińska A.: Metody badania właściwości mechanicznych kleju metakrylowego stosowanego w budowie pojazdów. *Autobusy*, 12, 2017.
- [49] Petrov C., Serafimov B., Kotzev D.L.: Strength, deformation and relaxation of joints bonded with modified cyanoacrylate adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol.8, no.4, 1988.
- [50] Rezaifard A.H., Hodd K.A., Tod D.A., Barton J.M.: Toughening epoxy resins with poly(methyl methacrylate)-grafted-natural rubber, and its use in adhesive formulations. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 14, no. 2, 1994.
- [51] Chen N.N.S., Niem P.I.F., Lee R.C.: Experimental Investigation of Epoxy Bonded Polymethylmethacrylate Joints. *The Journal of Adhesion*, 31:2-4, 161-176, 1990.
- [52] Niem P.I.F., Lau T.L., Kwan K.M.: The effect of surface characteristics of polymeric materials on the strength of bonded joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 10:4, 361-372, 1996.
- [53] Singh V., Misra A., Marangos O., Park J., Ye Q., Kieweg S.L., Spencer P.: Viscoelastic and fatigue properties of model methacrylate-based dentin adhesives. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 95(2), 283–290, 2010.
- [54] Da Silva L.F.M., Adams R.D.: Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 27, 216–226, 2007.
- [55] Nakagawa F., Sawa T., Nakano Y., Katsuo M.: A two-dimensional finite element thermal stress analysis of adhesive butt joints containing some hole defects. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 13:3, 309-323, 1999.
- [56] Adams R.D., Harris J.A.: The influence of local geometry on the strength of adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol.7, no.2, 1987.
- [57] Wahab M.A., Ashcroft I., Crocombe A.D., Smith P.A.: Finite element prediction of fatigue crack propagation lifetime in composite bonded joints. *Composites: Part A*, 35, 213–222, 2004.
- [58] He X.: A review of finite element analysis of adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31, 248–264, 2011.

- [59] Da Silva L.F.M., Campilho R.D.S.G.: *Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints*. Springer Briefs in Computational Mechanics, 2012.
- [60] Özer H., Özkan Ö.: The use of the exponential drucker-prager material model for defining the failure loads of the mono and bi-adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 76, 17-29, 2017.
- [61] Dean G.D., Read B.E., Duncan B.C.: *An Evaluation of Yield Criteria for Adhesives for Finite Element Analysis*. NPL Report CMMT(A)117, Project PAJ2, Report No 7, 1999.
- [62] Chaing M.Y.M., Chai H.: Plastic deformation analysis of cracked adhesive bonds loaded in shear. *International Journal of Solids and Structures*, 31, 18, 2477-2490, 1994.
- [63] De Sousa C.C.R.G., Campilho R.D.S.G., Marques E.A.S., Costa M., Da Silva L.F.M.: Overview of different strength prediction techniques for single-lap bonded joints. *Journal of Materials: Design and Applications*, 231(1–2), 210–223, 2017.
- [64] Bula A.: Modelowanie numeryczne zakładkowych połączeń klejonych w płaskim stanie odkształcenia. XVII Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa, Gliwice, 2017.
- [65] Hibbitt Karlsson, Sorensen, Inc. ABAQUS documentation v. 6.3.1, m. in: *Getting Started with ABAQUS/Standard: Interactive Version; ABAQUS/Standard User's Manual; ABAQUS/CAE User's Manual; ABAQUS Example Problems Manual; ABAQUS Theory Manual*, 2002.
- [66] Stuparu F.A.: Combined XFEM-cohesive finite element analyses of single-lap joints. *The Journal of Adhesion*, 92, 7-9, 535-552, 2016.
- [67] PN-EN ISO 527-1:2012. Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu – Część 1: Zasady ogólne .
- [68] PN-EN ISO 527-2:2012. Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu – Część 2: Warunki badań tworzyw sztucznych przeznaczonych do różnych technik formowania.
- [69] ASTM D638-14:2014. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.
- [70] Falahatgar S.R., Salehi M.: Dynamic Relaxation Nonlinear Viscoelastic Analysis of Annular Sector Composite Plate. *Journal of Composite Materials*, 43, 03, 2009.
- [71] Brinson H.F., Brinson L.C.: *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity. An Introduction*. Springer, Boston, 2008.
- [72] Chen T.: Determining a Prony Series for a Viscoelastic Material From Time Varying Strain Data. NASA/TM-2000-210123, ARL-TR-2206, Virginia, 2000.

- [73] EN 1465:2009. Adhesives - Determination of tensile lap-shear strength of bonded assemblies.
- [74] ISO 11003-2:2001. Adhesives - Determination of shear behaviour of structural adhesives - Part 2: Tensile test method using thick adherents.
- [75] ASTM D732-99:2003. Standard Test Method for Shear Strength of Plastics by Punch Tool.
- [76] Moller J., Hunter R., Molina J., Vizan A., Perez J., Da Silva L.F.M.: Influence of the temperature on the fracture energy of a methacrylate adhesive for mining applications. *Applied Adhesion Science*, 3, 14, 2015.
- [77] Menczel J.D., Ludovits L., Prime R.B., Bair H.E., Reading M.: Thermal analysis of polymers: Fundamentals and applications. Chapter 2: Differential Scanning Calorimetry (DSC). John Wiley & Sons, Hoboken, 2009.
- [78] Jenninger W., Schawe J.E.K., Alig I.: Calorimetric studies of isothermal curing of phase separating epoxy networks. *Polymer*, 41, 4, 1577-1588, 2000.
- [79] Bula A., Jurczyk S., Hulimka J., Kozłowski M.: Dynamiczno-mechaniczna analiza termiczna kleju metakrylowego. *Przetwórstwo tworzyw*, 24, 4, 2018.
- [80] Bula A., Jurczyk S., Chmielnicki B., Hulimka J., Kozłowski M.: Multi-frequency dynamic-mechanical thermal analysis of methyl methacrylate adhesive (MMA). *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 24, 2, 169-177, 2019.
- [81] Andrzejewski J., Szostak M.: Ocena jakości polietylenowych elementów konstrukcyjnych z wykorzystaniem klasycznych badań wytrzymałościowych oraz analizy termicznej. *Przetwórstwo tworzyw*, 5, 18, 397-403, 2012.
- [82] Budzynowski T., Kucharczyk W.: Wpływ obróbki cieplno-chemicznej i cieplnej na właściwości dynamiczno-mechaniczne staliwa stopowego. *Autobusy*, 17, 6, 817-820, 2016.
- [83] Haponiuk J.: Polimery amorficzne. Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2011.
- [84] Menczel J.D., Prime R.B.: Thermal Analysis of Polymers. Fundamentals and Applications. Wiley-Interscience, New Jersey, 2009.
- [85] Chailleux E., Ramond G., Such C., De la Roche C.: A Mathematical-based Master Curve Construction Method Applied to Complex Modulus of Bituminous Materials. *Road Materials and Pavement Design*, 7, 1, 75-92, 2006.
- [86] Rowe G., Baumgardner G., Sharrock M.: Functional Forms for Master Curve Analysis of Bituminous Materials. Proceedings of 7th International RILEM Symposium ATCBM09 on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, 2009.

- [87] Pellinen T.K., Witczak M.W., Bonaquist R.F.: Asphalt Mix Master Curve Construction using Sigmoidal Fitting Function with Non-Linear Least Squares Optimization Technique. Proceedings of the 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, New York, 2002.
- [88] Williams M.L., Landel R.F., Ferry J.D.: The Temperature-Dependence of Relaxation Mechanism in Amorphous Polymer and Other Glass-Forming Liquids. Journal of the American Chemical Society, 77, 14, 3701-3707, 1955.
- [89] Dillard D.A.: Advances in structural adhesive bonding. Woodhead Publishing Limited, New York, 2010.
- [90] Marques E.A.S., Da Silva L.F.M.: Joint Strength Optimization of Adesively Bonded Patches. The Journal of Adhesion. 84, 11, 915-934, 2008.
- [91] PN-90-B-03200. Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [92] PN-EN 1993-1-6: 2009. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-6: Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych.
- [93] Turi E.A.: Thermal Characterization of Polymeric Materials. Academic Press, New York, 1997.
- [94] Cowie J.M.G., Arrighi V.: Polymers: chemistry and physics of modern materials. 3rd edition. Nelson Thornes, Cheltenham, 2007.
- [95] ASTM D3528-96. Standard Test Method for Strength Properties of Double Lap Shear Adhesive Joints by Tension Loading.
- [96] Wong E.H., Liu J.: Design Analysis of Adhesively Bonded Structures. Polymers, 9, 664, 2017.
- [97] [Online] Shanghai Horse Construction Co., Ltd., [Dostęp: 27.03.2020] <https://es.horseen.com/index/solution/content/id/245>.
- [98] Kałuża M., Bartosik T.: Wzmacnianie konstrukcji budowlanych materiałami kompozytowymi FRP. Inżynier budownictwa, 5, 2015.





## Spis rysunków

Rys. 1 IBM Travelling Pavilion [1] .....	1
Rys. 2 a) wypełnienie porów materiałowych przez klej; b) oznaczenie kąta kontaktu.....	10
Rys. 3 Adhezyjne i kohezyjne siły występujące w warstwie kleju.....	10
Rys. 4 Rodzaje zniszczenia spoiny klejowej: a) kohezyjne; b) adhezyjne; c) adhezyjno-kohezyjne .....	11
Rys. 5 Schematyczny model struktury molekularnej polimerów: a) liniowa; b) rozgałęziona; c) usieciowana; d) przestrzenna .....	11
Rys. 6 Schemat reakcji polimeryzacji metakrylanu metylu.....	14
Rys. 7 Rozkład naprężeń wzdłuż próbki w chwili uplastycznienia [43] .....	16
Rys. 8 Zależność siła-ugięcie w belce niewzmocnionej i wzmocnionej [45].....	16
Rys. 9 Przykładowe kształtowanie krawędzi połączeń: a) proste; b) spoina przykrywająca element łączony; c) niewielkie poszerzenie spoiny; d) ukosowanie spoiny i elementu łączonego .....	19
Rys. 10 Przykład trójkątnej zależności ciągnienie-separacja [59], [64] .....	20
Rys. 11 Wizualizacje mechanizmu zniszczenia połączenia zakładkowego, w zależności od metody modelowania połączenia: a) model kontinuum; b) zależność kontaktowa; c) zastosowanie XFEM [64].....	22
Rys. 12 Rozciąganie próbki wioselkowej: a) geometria badanej próbki zgodnie z [68]; b) stanowisko badawcze – oznaczenie współczynnika Poissona; c) punkty charakterystyczne na przewężonej części próbki .....	26
Rys. 13 Zależność naprężenie-odkształcenie przy różnych prędkościach badania próbek .....	27
Rys. 14 Punkty charakterystyczne uproszczonego modelu sprężysto-plastycznego....	28
Rys. 15 Zmienność współczynnika Poissona w zależności od odkształceń podłużnych .....	29
Rys. 16 Zależność naprężenie-odkształcenie dla próbek badanych z prędkością 1 mm/min w zależności od czasu, który upłynął po uformowaniu próbki.....	30
Rys. 17 Funkcje relaksacji kleju $R(t)$ uzyskane na podstawie współczynników Prony (kolor czarny) i na podstawie badań (kolor szary): a) 3,4 MPa; b) 5,9 MPa; c) 8,4 MPa; d) 10,9 MPa.....	33
Rys. 18 Porównanie funkcji relaksacji kleju $R(t)$ uzyskanych na podstawie współczynników Prony .....	34

Rys. 19 Model obliczeniowy przyjęty do analiz numerycznych.....	34
Rys. 20 Mapy rozkładu naprężeń w próbce dla naprężeń wstępnych 3,4 MPa w czasie: a) 0 s; b) 3600 s.....	35
Rys. 21 Zależność naprężenia-czas uzyskana w analizach numerycznych (kolor czarny) i w badań laboratoryjnych (kolor szary), w zależności od wartości naprężeń wstępnych.....	36
Rys. 22 Efekt wpływu naprężeń wstępnych na funkcję relaksacji, opis w tekście .....	37
Rys. 23 Geometria połączenia zakładkowego SLJ [73]; wymiary w [mm].....	38
Rys. 24 Badanie SLJ: a) zależność naprężenie-odkształcenie; b) przykład typowego zniszczenia próbki.....	39
Rys. 25 Badania TAST: a) geometria połączenia zakładkowego [74] – wymiary w [mm]; b) próbka podczas badania.....	40
Rys. 26 Badania TAST: a) zależność naprężenie-odkształcenie; b) przykład zniszczenia próbki.....	40
Rys. 27 Geometria próbki w uchwycie do badania punch-tool [75]; wymiary w [mm] .....	41
Rys. 28 Próbka kleju przed badaniem .....	41
Rys. 29 Badanie punch-tool: a) zależność naprężenie-odkształcenie; b) próbka kleju po badaniu .....	42
Rys. 30 Porównanie zależności naprężenie-odkształcenie w przeprowadzonych badaniach wytrzymałości na ścinanie, na podstawie tabeli 6.....	42
Rys. 31 Model obliczeniowy TAST przyjęty do analiz numerycznych.....	45
Rys. 32 Model obliczeniowy SLJ przyjęty do analiz numerycznych.....	45
Rys. 33 Rozkład naprężeń wzdłuż połączenia, w środku grubości warstwy kleju, w badaniu: a) TAST; b) SLJ.....	46
Rys. 34 Rozkład naprężeń wzdłuż połączenia, w warstwie kontaktowej kleju, w badaniu: a) TAST; b) SLJ.....	47
Rys. 35 Mapa naprężeń w połączeniu TAST: a) ścinających; b) odrywających – skalę ograniczono do 13 MPa.....	47
Rys. 36 Mapa naprężeń w połączeniu SLJ: a) ścinających; b) odrywających – skalę ograniczono do 13 MPa.....	47
Rys. 37 Zależność naprężenie-odkształcenie w badaniach ściskania.....	49
Rys. 38 Badanie ściskania: a) schemat badania; b) widok próbek po badaniu .....	50
Rys. 39 Próbki (od lewej) na podłożu ze stali piaskowanej, stali ocynkowanej i stali malowanej (dwa elementy).....	51
Rys. 40 Wyniki badań odrywania na podłożu ze stali piaskowanej.....	52

Rys. 41 Wyniki badania na podłożu ze stali ocynkowanej.....	52
Rys. 42 Wyniki badania na podłożu ze stali malowanej: a) próbka z przeciętnie wykonaną warstwą malarską; b) próbka z bardzo dobrze wykonaną warstwą malarską.....	52
Rys. 43 Model obliczeniowy badania pull-off przyjęty do analiz numerycznych: z nasadą urządzenia – po lewej oraz z ukrytą nasadą – po prawej (dla lepszej widoczności stempla pomiarowego) .....	54
Rys. 44 Wykres zależności siły zrywającej od grubości podłoża.....	54
Rys. 45 Zależność siły od przemieszczenia stempla pomiarowego .....	55
Rys. 46 Mapa degradacji kleju podczas badania przy grubości podłoża 3 mm, dla przemieszczenia równego 0,039 mm (widoczne deformacje przeskalowano stukrotnie) .....	56
Rys. 47 Mapa degradacji kleju podczas badania przy grubości podłoża 40 mm, dla przemieszczenia równego 0,039 mm (widoczne deformacje przeskalowano stukrotnie) .....	56
Rys. 48 Mapa degradacji kleju podczas badania przy grubości podłoża 5 mm, dla przemieszczenia równego 0,039 mm (widoczne deformacje przeskalowano stukrotnie) .....	56
Rys. 49 Analiza termowizyjna: a) badana próbka, b) obraz po 1 min, c) obraz po 12 min, d) obraz po 18 min [8] .....	60
Rys. 50 Przyrost w czasie temperatury próbki o masie 5g, na podstawie analizy termowizyjnej [8] .....	61
Rys. 51 Aparat DSC 1 firmy Mettler-Toledo wyposażony w intracooler Huber TC100 MT [8].....	61
Rys. 52 Porównanie przebiegu zmiany temperatury i przepływu energii w czasie [8] .....	62
Rys. 53 Aparatura badawcza (po lewej) oraz mocowanie próbki podczas badania DMTA (po prawej) [79] .....	63
Rys. 54 Przesunięcie fazowe [79] .....	64
Rys. 55 Zmiany modułu zachowawczego $G'$ w funkcji temperatury dla rozpatrywanych częstotliwości [80] .....	65
Rys. 56 Zmiany modułu stratności $G''$ w funkcji temperatury dla rozpatrywanych częstotliwości [80] .....	65
Rys. 57 Zmiany modułu zespolonego $G^*$ i współczynnika tłumienia $\delta$ w funkcji temperatury dla rozpatrywanych częstotliwości [80].....	66
Rys. 58 Porównanie modułów: a) zachowawczego $G'$ ; b) stratności $G''$ [80].....	67

Rys. 59 Mechanizm tworzenia krzywej wiodącej [80] .....	67
Rys. 60 Definicja Sigmoidalnej Funkcji [80], [87] .....	68
Rys. 61 Poziome współczynniki przesunięcia $a_T$ dla rozpatrywanych temperatur odniesienia $T_{ref}$ [80] .....	69
Rys. 62 Krzywe wiodące otrzymane dla: a) modułu zachowawczego; b) modułu stratności [80] .....	70
Rys. 63 Ubytek masy próbki kleju podczas ogrzewania w badaniu TG .....	71
Rys. 64 Porównanie średnich wartości wyników z badania rozciągania i ścinania .....	74
Rys. 65 Porównanie zależności naprężenie-odkształcenie dla wartości rzeczywistych i inżynierskich: a) badanie rozciągania; b) badanie ścinania TAST .....	75
Rys. 66 Model materiałowy kleju, opis w tekście .....	77
Rys. 67 Modele materiałowe stali .....	78
Rys. 68 Geometria badanych połączeń zakładkowych [41] .....	79
Rys. 69 Elementy przygotowane do badania: a) długość połączenia 400/200 mm; b) długość połączenia 400/400 mm [41] .....	79
Rys. 70 Widok połączenia w miejscu nakładek: a) badania laboratoryjne; b) analizy numeryczne .....	80
Rys. 71 Model obliczeniowy rozciągania połączenia zakładkowego przyjęty do analiz numerycznych .....	80
Rys. 72 Porównanie zależności siła-przemieszczenie z badań laboratoryjnych i numerycznych dla połączenia 400-200 mm .....	81
Rys. 73 Krawędź zniszczonego połączenia .....	81
Rys. 74 Porównanie zależności siła-przemieszczenie z badań laboratoryjnych i numerycznych dla połączenia 400-400 mm .....	82
Rys. 75 Mapy odkształceń w połączeniu 400/200: a) badanie laboratoryjne – odkształcenia w nakładce [41]; b) analiza numeryczna – odkształcenia w nakładce; c) analiza numeryczna – naprężenia w całym połączeniu .....	85
Rys. 76 Mapy dla połączenia 400/400: a) badanie laboratoryjne – odkształcenia w nakładce (33); b) analiza numeryczna – odkształcenia w całym elemencie; c) analiza numeryczna – naprężenia w całym elemencie .....	85
Rys. 77 Schemat badania: a) belki z grupy (A); b) belki z grupy (B) .....	88
Rys. 78 Belka przygotowana do badania trójpunktowego zginania .....	89
Rys. 79 Układanie kleju na płaskowniku wzmacniającym .....	89
Rys. 80 Zależność siła-przemieszczenie w przypadku belek niewzmocnionych .....	90

Rys. 81 Zależność siła-przemieszczenie w przypadku belek bez uszkodzenia .....	91
Rys. 82 Odkształcenia belki niewzmocnionej (0A) po przeprowadzonym badaniu ....	91
Rys. 83 Odkształcenia belki wzmocnionej (1A) po przeprowadzonym badaniu .....	91
Rys. 84 Zależność siła-przemieszczenie w przypadku belek uszkodzonych (porównawczo w belce 0A) .....	92
Rys. 85 Odkształcenia belki wzmocnionej (1B) po przeprowadzonym badaniu .....	92
Rys. 86 Zależność siła-czas w przypadku belek nieuszkodzonych, wzmocnionych 4A, 5A (porównawczo 1A – 3A) .....	93
Rys. 87 Zależność siła-czas w przypadku belek nieuszkodzonych, wzmocnionych 4B, 5B (porównawczo 1B – 3B) .....	93
Rys. 88 Przyjęte siatki elementów skończonych .....	95
Rys. 89 Model obliczeniowy wzmocnienia belki przyjęty do analiz numerycznych.....	95
Rys. 90 Forma niestateczności dająca najniższą nośność belki niewzmocnionej (0A).....	96
Rys. 91 Zależność siła-ugięcie w belce niewzmocnionej: z badań laboratoryjnych, analizy numerycznej i obliczeń normowych.....	97
Rys. 92 Wizualizacja deformacji belki niewzmocnionej (N0A) przy przemieszczeniu pionowym 35,1 mm – na czerwono oznaczono strefy uplastycznione.....	97
Rys. 93 Zależność siła-ugięcie w belce wzmocnionej: z badań laboratoryjnych i analizy numerycznej .....	98
Rys. 94 Wizualizacja deformacji belki wzmocnionej (N1-3A) przy przemieszczeniu pionowym 22,8 mm – na czerwono oznaczono strefy uplastycznione.....	99
Rys. 95 Rozkład naprężeń w spoinie klejowej wzdłuż połączenia, przy ugięciu belki 5,1 mm.....	100
Rys. 96 Rozkład naprężeń w spoinie klejowej wzdłuż połączenia, przy ugięciu belki 22,8 mm.....	100
Rys. 97 Zależność siła-ugięcie w uszkodzonej belce niewzmocnionej: z badań laboratoryjnych i analizy numerycznej.....	101
Rys. 98 Zależność siła-ugięcie w belce uszkodzonej i wzmocnionej: z badań laboratoryjnych i analizy numerycznej.....	101
Rys. 99 Wizualizacja deformacji belki wzmocnionej (N1-3B) przy przemieszczeniu pionowym 22,8 mm – na czerwono oznaczono strefy uplastycznione.....	102

Rys. 100 Rozkład naprężeń w spoinie klejowej wzdłuż połączenia, przy ugięciu belki 5,0 mm; powyżej mapa przedstawiająca rejonu uplastycznione w spoinie klejowej .....	103
Rys. 101 Rozkład naprężeń w spoinie klejowej wzdłuż połączenia, przy ugięciu belki 16,3 mm; powyżej mapa przedstawiająca rejonu uplastycznione w spoinie klejowej .....	104
Rys. 102 Spadek siły, w miejscu wymuszenia, w trakcie prowadzenia badania relaksacji na belkach N4-5A i N4-5B.....	105
Rys. 103 Mapy naprężeń głównych kleju w belce N4-5A (u góry przed, na dole po upływie 1800 s relaksacji).....	106
Rys. 104 Mapy naprężeń głównych kleju w belce N4-5B (jak wyżej) .....	106
Rys. 105 Zmiana naprężeń kleju w trakcie relaksacji, w wybranych punktach belki: a) N4-5A; b) N4-5B.....	107

## Spis tabel

Tabela 1 Średnie wartości punktów charakterystycznych zależności naprężenie-odkształcenie.....	28
Tabela 2 Wartości deklarowane przez producenta kleju [29].....	29
Tabela 3 Wartości średnie funkcji relaksacji $R(t)$ w zależności od naprężeń wstępnych oraz charakterystycznych punktów czasowych.....	32
Tabela 4 Obliczone współczynniki Prony .....	33
Tabela 5 Wybrane wartości funkcji relaksacji $R(t)$ z badań laboratoryjnych (L) i z analiz numerycznych (N).....	36
Tabela 6 Zestawienie wyników przeprowadzonych badań wytrzymałości na ścinanie .....	43
Tabela 7 Porównanie modułów sprężystości .....	44
Tabela 8 Podsumowanie wyników.....	53
Tabela 9 Obliczone parametry, wykorzystane do modelu materiałowego kleju .....	77
Tabela 10 Wartości sił w oznaczonych punktach charakterystycznych A.1, A.2 i A.3.....	82
Tabela 11 Wartości sił w oznaczonych punktach charakterystycznych B.1, B.2 i B.3 .....	83
Tabela 12 Mapy przyczepności i stref uplastycznionych w połączeniu 400/200 mm .....	86
Tabela 13 Mapy stref uplastycznionych w połączeniu 400/400 mm.....	87
Tabela 14 Zestawienie wyników badań belek IPE120 .....	94
Tabela 15 Zestawienie wyników przeprowadzonych analiz numerycznych oraz porównanie ze średnimi wartościami uzyskanymi z badań laboratoryjnych .....	109





## Streszczenie

Pomimo coraz lepszych cech wytrzymałościowych i szerokiej gamy dostępnych produktów, kleje wciąż mają w konstrukcjach budowlanych jedynie niszowe zastosowanie, ograniczone zwykle do systemowych rozwiązań wzmocnień z użyciem taśm lub mat z włókien niemetalicznych. Jednym z podstawowych powodów takiego stanu rzeczy jest brak norm projektowych, a kolejnym zbyt mała liczba danych technicznych ujawnianych przez producentów oraz ich nieprecyzyjny charakter.

W obecnym stanie techniki obliczeniowej najlepszym narzędziem wspomagającym projektowanie nietypowych konstrukcji jest dostępne komercyjnie oprogramowanie, pozwalające na wykonywanie zaawansowanych analiz, także w stanie pozasprężystym. Warunkiem koniecznym jest jednak wiarygodne rozpoznanie szeregu cech materiałowych (w tym przypadku klejów), a następnie walidacja modeli numerycznych na podstawie wyników badań modelowych.

Planując zastosowanie danego kleju w węźle konstrukcji budowlanej należy wziąć pod uwagę rzeczywiste wymiary spoiny, narzucające konieczność współpracy materiału w relatywnie długiej spoinie – co wymaga dobrania grubości warstwy kleju i jego odkształcalności w sposób gwarantujący uzyskanie optymalnej nośności i sztywności połączenia. Analiza dostępnej literatury wskazuje, że w przypadku konieczności łączenia elementów konstrukcyjnych ze stali warunki takie zapewniają kleje metakrylowe.

Bazując na dostępnych publikacjach i normach, w ramach pracy doktorskiej przebadano wybrany klej metakrylowy – Plexus MA-420. Zakres badań podzielono na kilka etapów. W pierwszej kolejności wykonano badania wytrzymałościowe kleju, określając jego wytrzymałość na rozciąganie, ścinanie (w kilku schematach) i ściskanie, a także relaksację oraz przyczepność do różnego rodzaju podłoży metalowych. Każdemu z badań towarzyszyły analizy numeryczne w celu uzyskania odpowiednich modeli materiałowych do dalszych, bardziej złożonych obliczeń. Następnie wykonano analizy termiczne pozwalające na określenie charakteru zmian parametrów kleju wraz ze wzrostem temperatury. Kolejno wykonano analizy numeryczne złączy zakładkowych, wcześniej przebadanych na pełnowymiarowych modelach przez niezależny zespół (z udziałem

Promotora pracy). Przyjęte w analizach numerycznych założenia do modelu materiałowego kleju, bazujące na kryterium Druckera-Pragera oraz warstwie kontaktowej, umożliwiające degradację zgodnie z zasadami mechaniki pęknięcia, wykazały bardzo dobrą zbieżność z rezultatami badań laboratoryjnych.

Jako ostatnie wykonano badania belek dwuteowych z doklejonymi płaskownikami (w dwóch wersjach – ze wzmocnieniem elementów nieuszkodzonych oraz elementów z wykonanym karbem mechanicznym). W obydwu przypadkach uzyskano wyraźne zwiększenie nośności doraźnej, przy zachowaniu pełnej integralności spoiny klejowej. Analizy numeryczne badanych belek pozwoliły na precyzyjne określenie mechanizmu zniszczenia, łącznie z oceną obszarów uplastycznienia kleju.

Wykonane badania i analizy pozwoliły na udowodnienie możliwości precyzyjnego modelowania klejonych połączeń elementów stalowych. Oczywiście wnioskowanie należy ograniczyć do zakresu badanych przypadków konstrukcyjnych i jednego typu kleju metakrylowego – stąd konieczne jest rozszerzenie analiz o kolejne przypadki konstrukcyjne, inne kleje oraz o ocenę trwałości w aspekcie czynników środowiskowych.

## Abstract

Despite continuously improved strength characteristics and a wide range of products available on the market, adhesives still are only used in niche applications in civil engineering. The application of adhesives is usually limited for reinforcing existing structures using non-metallic fiber tapes or mats. One of the main reasons for this situation is lack of design approaches and standards as well as limited imprecise or technical data, which is commonly disclosed by manufacturers.

In the current state of computing technology, the most efficient tool supporting the design of non-standard structures is commercially available software. It enables performing advanced analyses, also in the non-elastic state. A necessary condition is, however, reliable recognition of a number of material characteristics of adhesives, and then a verification of numerical models by results of laboratory tests.

While considering an application of a given adhesive in a building structural connection, the actual dimensions of the joint should be taken into account. That imposes the necessity of material collaboration in a relatively long joint - which requires the selection of the thickness of the adhesive layer and its deformability in such a way that it guarantees optimal load-bearing capacity and rigidity of the connection. Analysis of the available literature references indicates that when steel structural elements need to be joined, such conditions are met by using methacrylic adhesives.

Based on the available publications and standards, a selected methacrylic adhesive (Plexus MA-420) was tested as a part of the doctoral dissertation. The research was divided into several stages. Firstly, adhesive strength tests were performed to determine its tensile, shear (in several schemes) and compressive strengths, as well as relaxation parameters and adhesion to various types of metal substrates. Each study was accompanied by numerical analyses in order to obtain appropriate material model parameters for further, more complex simulations. Secondly, thermal analyses were performed to determine the variation of adhesive parameters in increased temperature. Then, numerical analyses of lap joints based on the previous study on full-size models conducted by an independent team (with the participation of the Supervisor), were performed. Assumptions for the adhesive material

model (adopted in the numerical analyses), were based on the Drucker-Prager criterion and the contact layer, enabling simulations of degradation in accordance with the principles of fracture mechanics. This approach showed very good correspondence with the results of laboratory tests.

Finally, additional tests were performed on steel, I-shaped beams strengthened by flat bars located in the tensile zone. The experiments were conducted in two options – undamaged beams and beams with a mechanically produced notch, both reinforced by a steel plate using the adhesives for the bond between the elements. In both cases, a clear increase in the load-bearing capacity was found and full integrity of the adhesive joint was maintained. Numerical analyses of the tested beams allowed for an extensive investigation of the damage mechanisms, including the assessment of areas of plastic deformation of the adhesive.

Tests and analyses performed proved the possibility of accurate modelling of adhesive joints of steel elements. It should be emphasised, however, that the conclusions are limited to the investigated construction cases and one type of methacrylic adhesive. Hence, it is necessary to extend the research by including further construction cases, other types of adhesives and assess their durability in the aspect of environmental factors.