

---

**RADA NAUKOWA DYSZYPLINY INŻYNIERIA MECHANICZNA**

**ROZPRAWA DOKTORSKA**

**mgr inż. Anna Szymkowiak**

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

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

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH  
DYSZYPLINA: INŻYNIERIA MECHANICZNA

**PROMOTOR PRACY**

dr hab. inż. BOGDAN LIGAJ

Bydgoszcz, październik 2024

---

## 1. Wprowadzenie

Zwiększona wydajność klejenia oraz specjalistyczne funkcje, tj.: elastyczne wypełnianie mikroszczelin, przewodnictwo elektryczne i ciepłe, ochrona antykorozyjna czy zdolność tłumienia wibracji i hałasów, stanowią istotne wyzwanie dla twórców nowoczesnych klejów, które mają sprostać rosnącym wymaganiom przemysłowym i konsumenckim. Dynamiczny rozwój technologii produkcji klejów opiera się na osiągnięciach w dziedzinie chemii supramolekularnej i nanotechnologii, dostępie do bardziej zaawansowanych składników, precyzyjnych urządzeń dozujących i pomiarowych nowej generacji oraz najnowocześniejszych metod utwardzania. W ciągu ostatnich 5 000 lat wiedza o wiązaniach międzymolekularnych rozwinęła się w sposób niezwykle dynamiczny, a jednocześnie rośnie zainteresowanie technologią klejenia.

Dane wskazują na systematyczny wzrost zastosowania połączeń klejonych w budowie maszyn. W wielu przypadkach rozwiązania te zastępują połączenia spawane, lutowane, a także gwintowane i nitowe, co wynika z unikalnych właściwości fizykochemicznych klejów. Prognozy sugerują, że do roku 2100 zastosowanie połączeń klejonych w budowie maszyn może osiągnąć 50%.

Analiza literatury z zakresu badań złączy klejonych wykazała, że:

1. Wybór odpowiedniej metody badań złączy klejonych jest kluczowy, gdyż każda z nich dostarcza szczegółowych informacji o różnych aspektach wytrzymałości. W projektowaniu maszyn, wiedza o właściwościach złączy klejonych pozwala na dokonywanie świadomych wyborów dotyczących użytych materiałów i rodzajów klejów, które najlepiej odpowiadają wymaganiom danej konstrukcji.
2. Opracowywanie nowych metod badawczych stanowi ważny element w odpowiedzi na wyzwania, jakie stawiają współczesne technologie wykorzystywane w budowie maszyn.
3. W kontekście realizacji badań, istotną rolę odgrywa również konstrukcja próbek. Optymalizacja geometrii, grubości oraz struktury materiałowej próbek jest kluczowa dla uzyskania wyników badawczych, które dokładnie odwzorowują zachowanie złączy.
4. Czynniki decydującymi o możliwości uzyskania najwyższej wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej złącza klejonego są operacje technologiczne związane z przygotowaniem powierzchni klejenia oraz warunkami środowiskowymi przebiegu procesu.
5. W literaturze przedstawiane są wyniki badań dotyczące łączenia elementów wykonanych z różnych materiałów. W badaniach stosowane są próbki standardowe lub fragmenty elementów konstrukcyjnych. Na ich podstawie oceniana jest wytrzymałość ( $R_{p0,2}$ ,  $R_m$ ) i trwałość zmęczeniowa połączeń. Wyniki badań przedstawiane są w ujęciu naprężeniowym.

- 
6. Najczęściej badania wytrzymałości złączy klejonych przeprowadza się z użyciem próbek zakładkowych, których postać geometryczna ustalana jest przez zapisy w właściwej normy.
  7. Podstawowym kryterium projektowania złączy klejonych jest kryterium wytrzymałościowe określające wartość dopuszczalnych naprężeń w spoinie klejowej. Analiza dostępnej literatury nie wykazała prowadzenia badań zmierzających do określenia maksymalnych odkształceń elementu/elementów w momencie zniszczenia połączenia. Takie podejście może pozwolić na sformułowanie kryterium sztywnościowego w postaci dopuszczalnych odkształceń konstrukcji.
  8. W literaturze nie odnaleziono wyników badań grubych złączy klejonych wykonanych z zastosowaniem klejów metakrylowych.

### 1.1. Problem badawczy i teza badawcza

Problemem badawczym niniejszej pracy jest doświadczalna weryfikacja opracowanej metody badań złączy klejonych z zastosowaniem próbek typu sandwich w warunkach obciążeń statycznych. Uszkodzenie złącza klejonego następuje, gdy:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \quad (1)$$

a wartość pracy niszczącej (energii niszczącej)

$$\Delta W = W_1 - W_2 \quad (2)$$

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

### 1.2. Teza badawcza

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

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

Dokładne określenie maksymalnych odkształceń elementu/elementów w momencie zniszczenia połączenia ma kluczowe znaczenie w projektowaniu elementów maszyn. Oprócz kryteriów wytrzymałościowych w postaci dopuszczalnych naprężeń, można formułować

---

kryteria sztywnościowe w postaci dopuszczalnych odkształceń konstrukcji, co może mieć bezpośrednie przełożenie na praktyczne rozwiązania inżynierskie.

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

### 1.3. Cel badań

Głównym celem pracy jest doświadczalna weryfikacja możliwości zastosowania próbek typu sandwich do określenia maksymalnej wartości odkształcenia konstrukcji  $\varepsilon_2$  oraz pracy niszczącej połączenie DW w momencie zniszczenia grubych złączy klejonych.

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

Realizacja głównego celu wymaga weryfikacji celów szczegółowych:

- a) ocena wpływu grubości warstwy kleju na wartość odkształceń  $\varepsilon_2$  oraz pracy niszczącej złącze klejone „ $\Delta W$ ” w próbce typu sandwich,
- b) ocena wpływu grubości łączonych elementów na wartość odkształceń  $\varepsilon_2$  oraz pracy niszczącej złącze klejone „ $\Delta W$ ” w próbce typu sandwich,
- c) ocena wpływu rodzaju materiału łączonych elementów na wartość odkształceń  $\varepsilon_2$  oraz pracy niszczącej złącze klejone „ $\Delta W$ ” w próbce typu sandwich,
- d) ocena wpływu grubości warstwy kleju na wartość siły niszczącej  $F_{max}$  oraz pracy niszczącej złącze klejone „ $W$ ” w zakładkowej próbce klejonej,
- e) ocena wpływu grubości łączonych elementów na wartość siły niszczącej  $F_{max}$  oraz pracy niszczącej złącze klejone „ $W$ ” w zakładkowej próbce klejonej,
- f) ocena wpływu rodzaju materiału łączonych elementów na wartość siły niszczącej  $F_{max}$  oraz pracy niszczącej złącze klejone „ $W$ ” w zakładkowej próbce klejonej,
- g) analiza porównawcza wyników badań uzyskanych dla próbek typu sandwich z wynikami dla zakładkowych próbek klejonych.

### 1.4. Zakres badań

Sformułowane cele badawcze wymagały przeprowadzenia następujących badań:

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

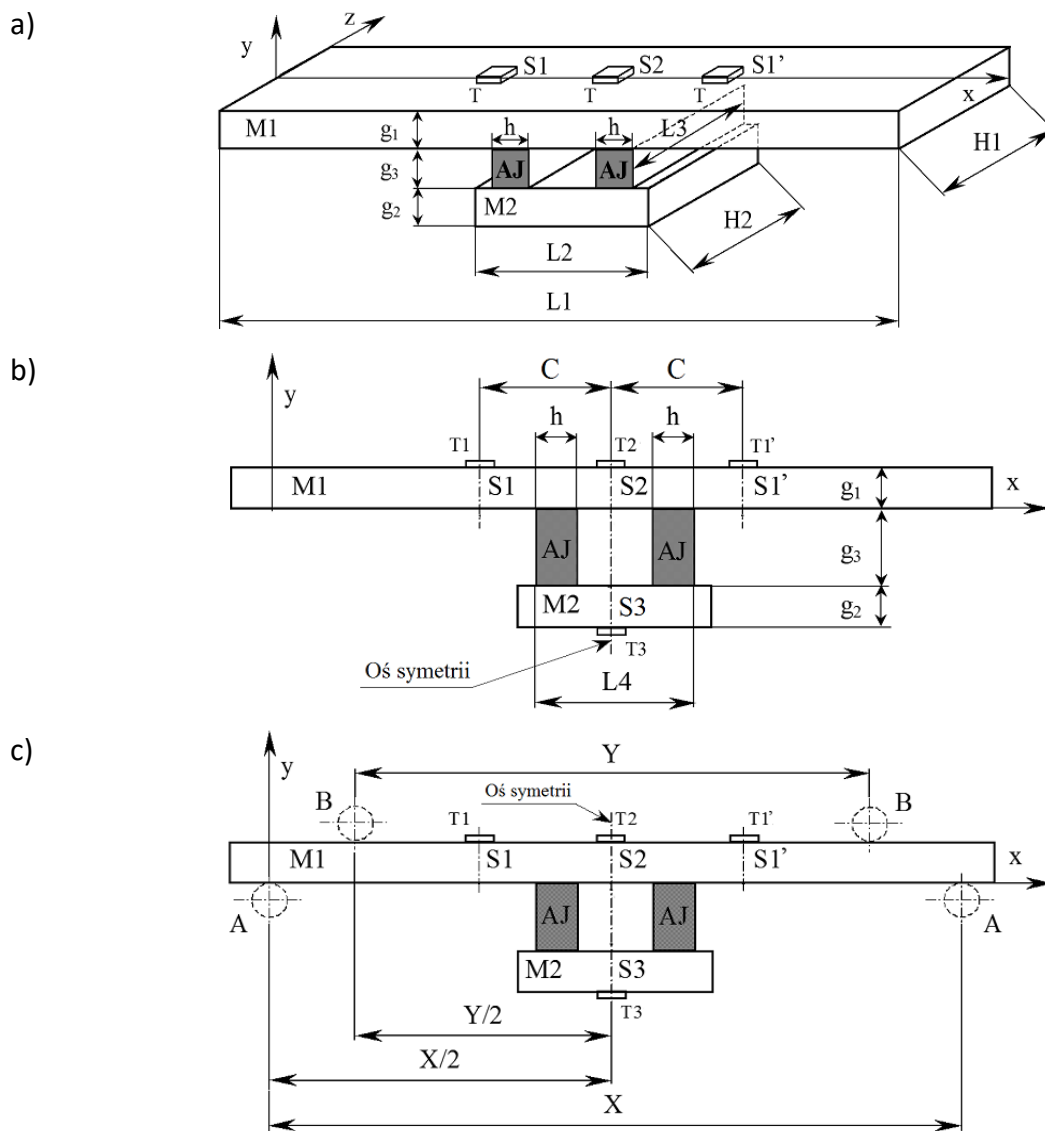
- 
- stal 41Cr4 o grubości  $g_2 = 4$  mm i grubości warstwy kleju  $g_k$ : 2 mm, 3 mm, 4 mm,
  - stal 41Cr4 o grubości  $g_2 = 6$  mm i grubości warstwy kleju  $g_k$ : 2 mm, 3 mm, 4 mm,
  - stopu AW-5754 o grubości  $g_2 = 4$  mm i grubości warstwy kleju  $g_k$ : 2mm, 3mm, 4mm,
  - stopu AW-5754 o grubości  $g_2 = 6$  mm i grubości warstwy kleju  $g_k$ : 2mm, 3mm, 4 mm,
- b) badania zakładkowych próbek klejonych w warunkach obciążeń statycznych wykonanych z płaskownika M1 (stal 41Cr4) o grubości  $g_1 = 4$  mm i płaskownika M2 wykonanego z:
- stal 41Cr4 o grubości  $g_2 = 2$  mm i grubości warstwy kleju  $g_k$ : 2 mm, 3 mm, 4 mm,
  - stal 41Cr4 o grubości  $g_2 = 4$  mm i grubości warstwy kleju  $g_k$ : 2 mm, 3 mm, 4 mm,
  - stal 41Cr4 o grubości  $g_2 = 6$  mm i grubości warstwy kleju  $g_k$ : 2 mm, 3 mm, 4 mm,
  - stopu AW-5754 o grubości  $g_2 = 2$  mm i grubości warstwy kleju  $g_k$ : 2mm, 3mm, 4mm,
  - stopu AW-5754 o grubości  $g_2 = 4$  mm i grubości warstwy kleju  $g_k$ : 2mm, 3mm, 4mm,
  - stopu AW-5754 o grubości  $g_2 = 6$  mm i grubości warstwy kleju  $g_k$ : 2mm, 3mm, 4mm,
- c) wyznaczenie rozkładów naprężeń w elementach próbki typu sandwich w warunkach obciążeń statycznych metodą elementów skończonych przyjmując zmienne parametry:
- geometryczne:
    - grubość belki dolnej (M2)  $g_2$ : 4 mm, 6 mm, 8 mm,
    - grubość spoiny klejonej (AJ)  $g_3$ : 2 mm, 3 mm, 4 mm,
    - kształt krawędzi bocznych spoiny klejonej (AJ): wklęsła, wypukła, płaska,
  - materiałowe:
    - belka dolny M2: stal konstrukcyjna 41Cr4, stop aluminium AW-5754, tworzywo polimerowe ABS.

## 2. Budowa próbki badawczej typu sandwich

Badania wytrzymałości złączy klejonych można przeprowadzać z zastosowaniem próbek o kształcie przedstawionym na rysunku 1. Budowę próbki zgłoszono jako wynalazek do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej, w którym zarejestrowano go pod numerem P.422884.

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

- a) belka górna (M1):  $L_1$  – długość,  $H_1$  – szerokość,  $g_1$  – grubość,
- b) belka dolna (M2):  $L_2$  – długość,  $H_2$  – szerokość,  $g_2$  – grubość,
- c) złącze klejone (AJ):  $L_3$  – długość,  $h$  – szerokość,  $g_3$  – grubość,
- d) czujnik tensometryczny (T).

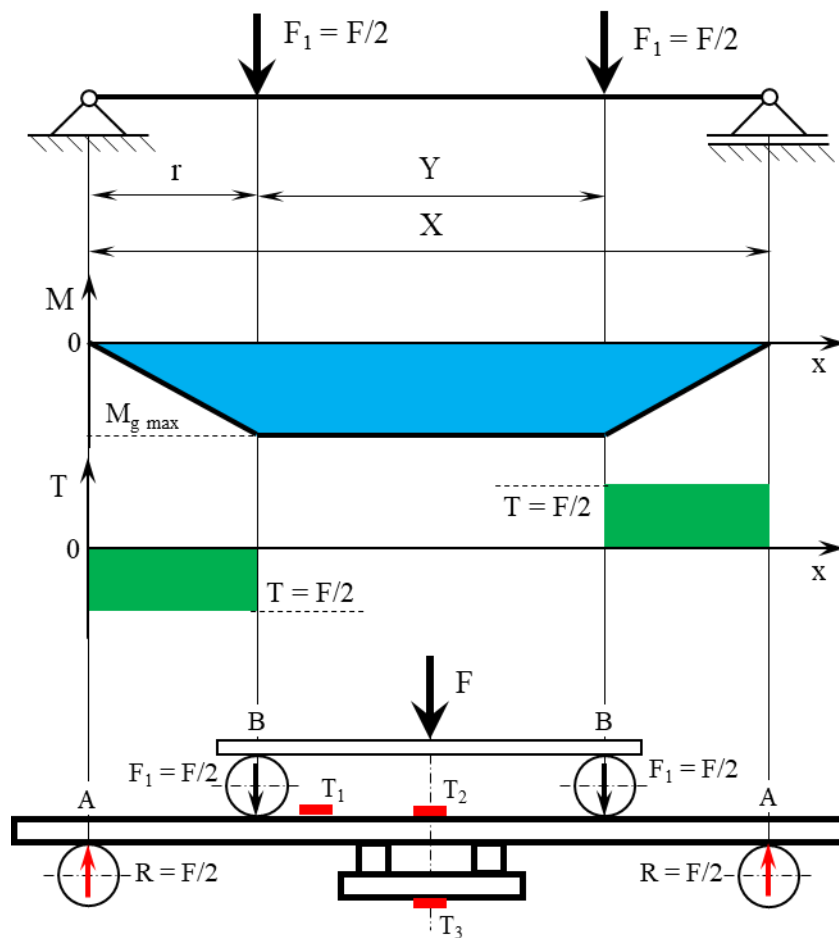


**Rys. 1.** Schemat innowacyjnej próbki do badań wytrzymałości złączy klejonych

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

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

tensometrycznych T jest pomiar odkształceń elementów próbki tj. belki górnej M1 oraz belki dolnej M2.



**Rys. 2.** Sposób obciążenia próbki typu „sandwich” podczas badań w warunkach czteropunktowego zginania

Podczas badań próbka spoczywa na podporach A oddalonych od siebie o wartość  $X$  (rys. 1c, rys. 2). Siły obciążające próbkę  $F/2$  przykładane są w punktach B, oddalonych od siebie o wartość  $Y$ . Punkty przyłożenia obciążenia B położone są symetrycznie względem podpór A. Położenie osi symetrii próbki względem podpór A określa wymiar  $X/2$ . Wartość momentu zginającego obciążającego próbkę zależy od wartości działających sił, a także od wartości wymiarów  $X$  i  $Y$ .

Sztywność belki górnej M1, a także belki dolnej M2 kształtowana jest poprzez dobór: kształtu przekroju poprzecznego, wymiarów geometrycznych oraz rodzaju materiału. Przekrój poprzeczny zastosowanych belek może przyjmować kształt figur prostych (np. prostokąt, kwadrat) lub figur złożonych (np. przekrój „C”, przekrój „L” i inne). Kształt przekroju oraz jego wymiary wpływają na wartość statycznego momentu bezwładności  $I_z$ . Przedstawiona próbka na rysunku 1 zbudowana jest z belki M1 oraz belki M2 posiadających przekrój prostokątny. Wymiary przekroju belki M1 to  $H1 \cdot g_1$ , natomiast belki M2 to  $H2 \cdot g_2$ . O wartości momentu bezwładności każdej z belek decyduje grubość  $g_0$  ( $I_z = (H_0 \cdot g_0^3)/12$ ), gdyż wartości  $H1 = H2$ .

---

Współczynnik sztywność belek M1 i M2 jest iloczynem statycznego momentu bezwładności  $I_z$  i modułu sprężystości podłużnej  $E$  (modułu Younga). Moduł Younga  $E$  jest parametrem charakterystycznym dla materiału belki.

Badanie próbki w warunkach czteropunktowego zginania o monotonicznie narastającej wartości momentu zginającego (rys. 2) polega na pomiarze wartości odkształceń  $\varepsilon$  w punktach pomiarowych:  $T_1$ ,  $T_2$  i  $T_3$ . Na podstawie pomiaru odkształceń  $\varepsilon$  wyznaczana jest wartość naprężeń  $S$ . Punkty pomiarowe  $T_1$  i  $T_2$  znajdują się w miejscach, gdzie wartość momentu zginającego ma stałą wartość. Punkt  $T_1$  położony jest poza złączami klejonymi, a punkt  $T_2$  pomiędzy złączami klejonymi. Zmiana wartości odkształceń  $\varepsilon_1$  w punkcie  $T_1$  jest proporcjonalna do zmiany wartości momentu zginającego  $M_g$ . Moment zginający  $M_g$  dla czteropunktowego zginania wyrażany jest wzorem:

$$M_g = F_1 \cdot r \quad (3)$$

gdzie:

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

W wyniku monotonicznie narastającego obciążenia (rys. 3.a) wzrasta wartość odkształceń w punktach pomiarowych  $T_1$ ,  $T_2$  i  $T_3$ , a tym samym wartość naprężeń ( $S = \varepsilon \cdot E$ ). Odształcający się sprężyste element konstrukcyjny prowadzi do powstania różnych wartości odkształceń w obszarze  $T_1$ ,  $T_2$  i  $T_3$ . Wynika to z usztywnienia belki górnej M1 dodatkowym elementem M2 połączonym za pomocą złączy klejonych AJ. Do chwili uszkodzenia złącza klejonego przebiegi zmian wartości odkształceń  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_2$  są różne. W chwili uszkodzenia złącza następuje gwałtowny wzrost wartości odkształcenia  $\varepsilon_2$  i dalszy jego przebieg zgodnie z przebiegiem  $\varepsilon_1$ . Wartość odkształceń  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$  świadczy o pełnym uszkodzeniu złącza. Zależność  $\varepsilon = f(F)$  można podzielić na dwa obszary (rys. 3.a):

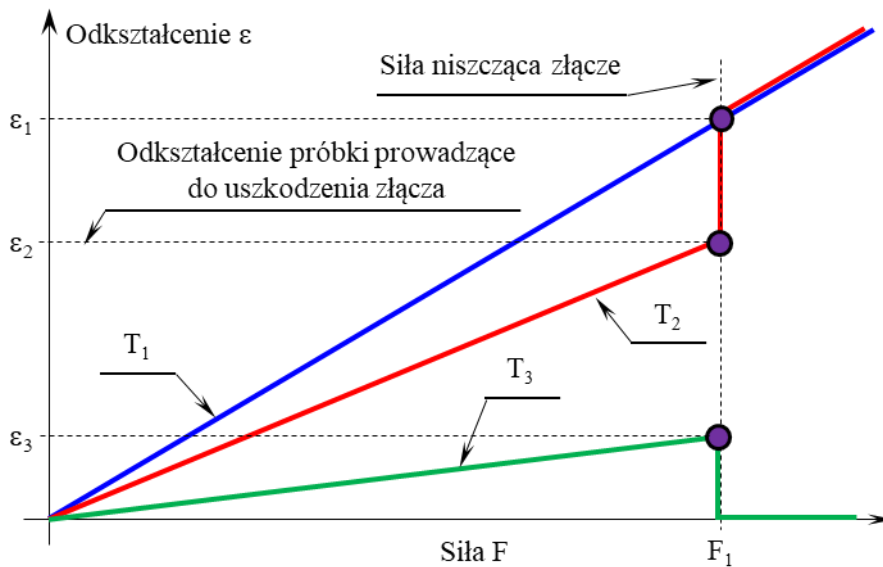
- a) obszar I – proporcjonalnie zmieniającej się wartości odkształceń  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  i  $\varepsilon_3$  względem monotonicznie narastającej wartości obciążenia, co świadczy o braku uszkodzenia złącza,
- b) obszar II – uszkodzenia złącza klejonego przejawiającego się wyrównaniem wartości odkształceń  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_2$  oraz spadkiem wartości odkształceń  $\varepsilon_3$  do zera ( $\varepsilon_3 = 0$ ).

Badania próbki typu sandwich pozwalają na wyznaczenie pracy niszczącej  $\Delta W$  potrzebnej do uszkodzenia złącza klejonego. Ideę wyznaczania pracy  $\Delta W$  przedstawiono na rysunku 3.b. Podstawą wyznaczenia pracy niszczącej złącza klejone  $\Delta W$  jest zależność  $f = f(F)$ . Praca  $\Delta W$  jest różnicą pracy  $W_1$  (teoretycznym ugięciem belki górnej próbki M1 pod działaniem siły niszczącej  $F_1$ ) i pracy  $W_2$  (ugięciem belki górnej M1 pomiędzy złączami klejonymi w chwili uszkodzenia złącza):

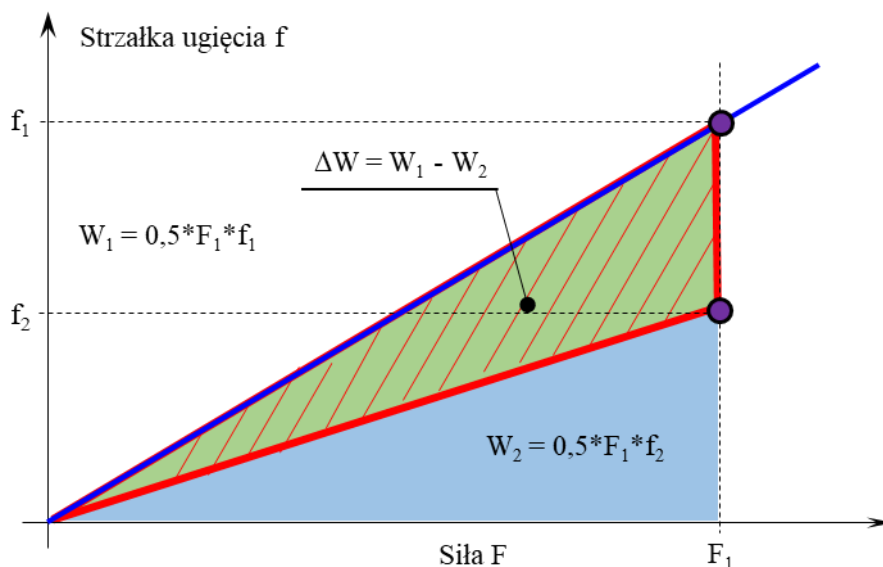
$$\Delta W = W_1 - W_2 \quad (4)$$



a)



b)



**Rys. 3.** Idea oceny uszkodzenia złączy klejonych: a – metoda wyznaczania odkształceń, b – metoda obliczeń pracy

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

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

- a) wyniki dotyczące maksymalnych odkształceń elementów poddanych obciążeniu mogą stanowić kryteria projektowe określające dopuszczalne wartości odkształceń,

którym mogą podlegać elementy konstrukcyjne będące częścią złącza klejonego w warunkach eksploatacyjnych; pozwala to na lepsze dopasowanie parametrów konstrukcji do rzeczywistych warunków pracy,

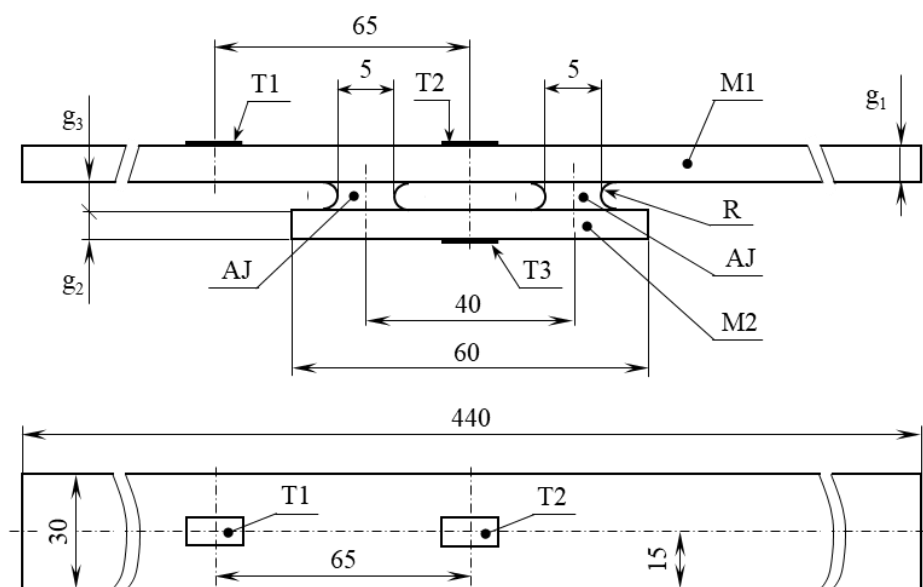
- b) badania grubych złączy klejonych z wykorzystaniem próbek typu sandwich umożliwiają określenie zależności między niszczącym odkształceniem elementu wchodzącego w skład połączenia a grubością warstwy kleju; taka zależność jest istotna przy projektowaniu elementów maszyn, ponieważ umożliwi optymalizację grubości warstwy kleju w kontekście wytrzymałości i trwałości złącza.

### 3. Wyniki badań doświadczalnych

#### 3.1. Badania złączy klejonych z zastosowaniem próbek typu sandwich

##### 3.1.1. Próbką badawcza i program badań

Badania złączy klejonych można przeprowadzać z zastosowaniem próbek typu sandwich. Do wykonania próbek użyto płaskowników ze stali 41Cr4 i stopu aluminium AW-5754 o różnych grubościach. Stal 41Cr4 poddano obróbce cieplnej do twardości 48HRC. Do wykonywania połączeń klejonych użyto kleju Multibond-5824, tego samego który zastosowano do wykonania zakładkowych próbek klejonych. Postać próbki badawczej przedstawiono na rysunku 4. Program badań przedstawiono w tabeli 1.



**Rys. 4.** Wymiary geometryczne próbki typu sandwich: M1 – belka górna, M2 – belka dolna, AJ – spoina klejona, T – tensometr, R – promień krawędzi bocznej spoiny klejonej

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

- a) stałe:

- grubość belki  $g_1$  (M1): 4 mm,
- szerokość spoiny klejonej: 5 mm,
- odległość osi spoin klejonych: 40 mm,
- szerokość próbki: 30 mm,
- kształt krawędzi bocznych spoiny klejonej (AJ): wklęsła,
- promień krawędzi bocznej spoiny klejonej R: 3 mm,

b) zmienne:

- grubość warstwy kleju (AJ)  $g_3$ : 2 mm, 3 mm, 4 mm,
- grubość płaskownika (M2)  $g_2$ : 4 mm, 6 mm,
- rodzaj materiałów na elementy próbki: stal 41Cr4, stop AW-5754.

**Tabela 1.** Program badań próbek typu sandwich

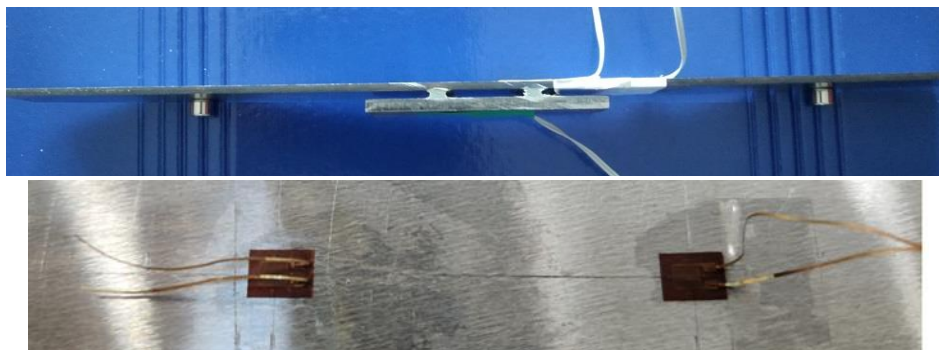
| Lp. | Materiały i ich grubości |       |                  |       |                        | Oznaczenie próbki |
|-----|--------------------------|-------|------------------|-------|------------------------|-------------------|
|     | Belka górna (M1)         |       | Belka dolna (M2) |       | Klej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

### 3.1.2. Metoda przygotowania próbek typu sandwich

Technologia przygotowania elementów na próbki typu sandwich były wytyczne zawarte w normie PN-EN 13887:200. Pierwszą operacją technologiczną obróbki płaskowników była obróbka ścierna na sucho elektrokorundem o wielkości ziaren 80  $\mu\text{m}$ . Kolejną operacją było odtłuszczenie acetonem (metodą zanurzeniową) obrobionej mechanicznie powierzchni powtarzaną trzykrotnie. Trzecią operacją było przecieranie powierzchni rozpuszczalnikiem, którą powtarzano trzykrotnie. Średnia wartość chropowatości powierzchni po wykonanej obróbce wynosiła: dla stali 41Cr4 –  $R_a = 1,83 \mu\text{m}$ , dla stopu aluminium AW-5754 –  $R_a = 3,71 \mu\text{m}$ .

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

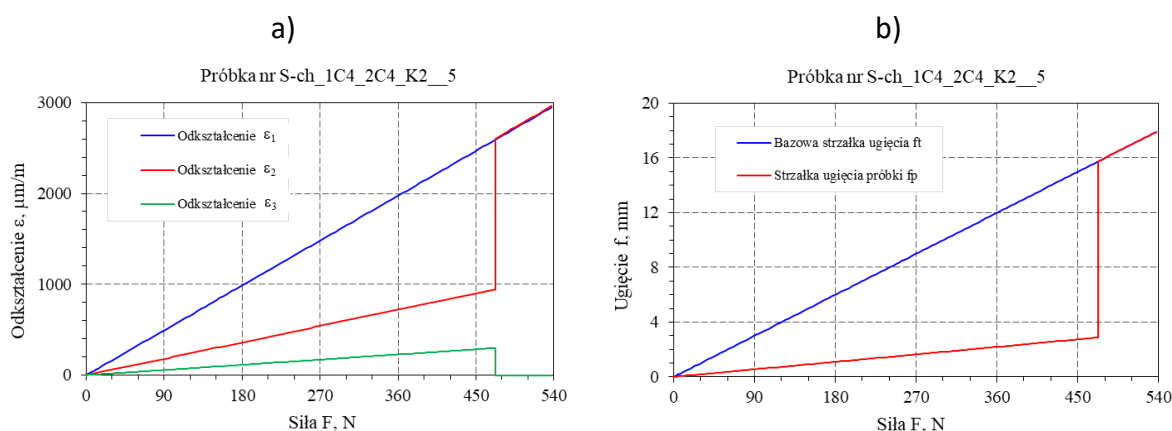
Na wykonane próbki typu sandwich naklejono tensometry oporowe foliowe w miejscach wskazanych na rysunku 4. W badaniach zastosowano tensometry firmy Tenmex typu TF-5 o parametrach:  $k = 2,19 \pm 0,5\%$ ,  $R = 120,2 \pm 0,2\%$ . Przykład próbki z naklejonymi tensometrami przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Przykład próbki typu „sandwich” z naklejonymi tensometrami

### 3.1.3. Wyniki badań doświadczalnych

Na podstawie pomiaru odkształceń w punktach oznaczonych: T1, T2 i T3, istnieje możliwość wyznaczenia wartości odkształceń/naprężeń. Punkty pomiarowe T1 i T2 znajdują się na belce górnej M1 w miejscach, gdzie wartość momentu zginającego ma stałą wartość. Punkt pomiarowy T1 położony jest poza złączami klejowymi, a punkt T2 znajduje się pomiędzy złączami klejowymi. Zmiana wartości odkształceń/naprężeń w punkcie T1 jest proporcjonalna do zmiany wartości momentu zginającego. Punkty pomiarowe T3 znajdują się na belce dolnej M2. Pomiar odkształceń w elementach próbki:  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  i  $\varepsilon_3$ , realizowano metodą tensometrii oporowej. Dla każdego przyjętego wariantu badań (Tabela 1) przeprowadzono (minimum) 5 niezależnych testów, co wskazuje na łączną liczbę badanych próbek wynoszącą 60 sztuk. Przykładowe wyniki badań w postaci zależności:  $\varepsilon = f(F)$  i  $f = f(F)$  dla jednego wariantu, przedstawiono na rysunkach 6. Uśrednione wartości wyznaczonych parametrów przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 6. Przykładowy wynik badań dla próbki typu sandwich o oznaczeniu S-ch\_1C4\_2C4\_K2: a – zależność  $\varepsilon = f(F)$ , b – zależność  $f = f(F)$

**Tabela 2.** Uśrednione wartości parametrów wyznaczonych na podstawie wyników badań próbek typu sandwich w warunkach obciążeń statycznych

| Oznaczenie próbki | Główne parametry $\varepsilon = f(F)$ i $f = f(F)$ |                 |                 |                 |                  |       | Parametry obliczone |                  |                        |
|-------------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-------|---------------------|------------------|------------------------|
|                   | Siła $F_1$   | Odształcenie    |                 |                 | Strzałka ugięcia |       | Praca               |                  |                        |
|                   |  | $\varepsilon_1$ | $\varepsilon_2$ | $\varepsilon_3$ | $f_t$            | $f_p$ | $W_{1\text{sr}}$    | $W_{2\text{sr}}$ | $\Delta W_{\text{sr}}$ |
|                   | N  | $\mu\text{m/m}$ | $\mu\text{m/m}$ | $\mu\text{m/m}$ | mm               | mm    | Nmm                 | Nmm              | Nmm                    |
| S-ch_1C4_2C4_K2   | 469,3  | 2573,78         | 798,44          | 287,14          | 15,65            | 2,69  | 3672,3              | 631,2            | 3041,1                 |
| S-ch_1C4_2C4_K3   | 485,7  | 2661,58         | 1321,83         | 269,22          | 16,19            | 4,46  | 3931,7              | 1083,1           | 2848,6                 |
| S-ch_1C4_2C4_K4   | 472,1  | 2590,24         | 1576,84         | 245,56          | 15,74            | 5,32  | 3715,4              | 1255,8           | 2459,6                 |
| S-ch_1C4_2C6_K2   | 495,9  | 2716,46         | 886,25          | 199,64          | 16,53            | 2,99  | 4098,6              | 741,4            | 3357,2                 |
| S-ch_1C4_2C6_K3   | 475,4  | 2606,70         | 954,20          | 117,88          | 15,85            | 3,22  | 3767,5              | 765,4            | 3002,2                 |
| S-ch_1C4_2C6_K4   | 482,3  | 2645,12         | 1264,75         | 45,78           | 16,08            | 4,27  | 3877,7              | 1029,7           | 2848,0                 |
| S-ch_1C4_2A4_K2   | 479,1  | 2628,66         | 1638,00         | 1165,64         | 15,97            | 5,53  | 3826,1              | 1324,7           | 2501,4                 |
| S-ch_1C4_2A4_K3   | 486,6  | 2667,08         | 2280,74         | 786,38          | 16,22            | 7,69  | 3946,8              | 1871,0           | 2075,8                 |
| S-ch_1C4_2A4_K4   | 462,8  | 2535,36         | 2226,42         | 454,02          | 15,43            | 7,51  | 3570,3              | 1737,8           | 1832,5                 |
| S-ch_1C4_2A6_K2   | 471,5  | 2584,76         | 1222,78         | 515,34          | 15,72            | 4,13  | 3705,8              | 973,6            | 2732,1                 |
| S-ch_1C4_2A6_K3   | 459,7  | 2518,90         | 1398,02         | 355,32          | 15,33            | 4,72  | 3522,7              | 1084,9           | 2437,8                 |
| S-ch_1C4_2A6_K4   | 446,3  | 2447,56         | 1883,45         | 237,30          | 14,88            | 6,36  | 3320,2              | 1419,2           | 1901,0                 |

Ocena postaci zniszczonych próbek typu sandwich wykazała, że próbki przyjęte do badań posiadały uszkodzenia warstwy kleju typu kohezyjno-adhezyjnego. Wyniki badań przedstawione w tabeli 2 pozwoliły na wyznaczenie wartości pracy (rys. 3):  $W_1$ ,  $W_2$  i  $\Delta W$  ze wzorów:

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

$$W_2 = 0,5 \cdot F_1 \cdot f_p \quad (6)$$

$$\Delta W = W_1 - W_2 \quad (7)$$

gdzie:

$\varepsilon_i$  – wartość odkształceń zmierzonych podczas badań,

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

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

$f_t$  – teoretyczna strzałka ugięcia belki górnej (M1) próbki sandwich obliczona wg wzoru:

$$f_t = (2 \cdot F_1 \cdot a^2 \cdot (L - a)^2) / (3 \cdot E \cdot I_x \cdot L),$$

$f_p$  – strzałka ugięcia zmierzona w chwili uszkodzenia złącza klejonego,

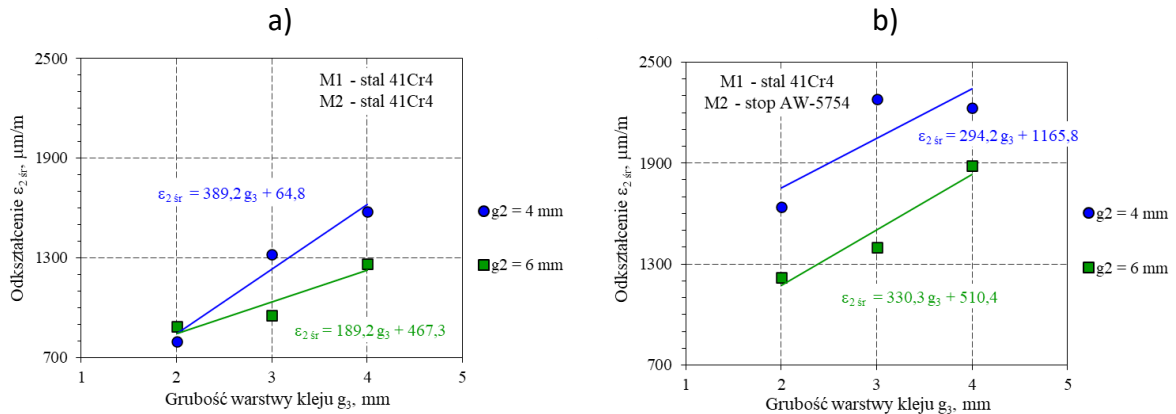
$\Delta W$  – praca niszcząca złącze klejone.

### 3.1.4. Analiza wyników badań próbek typu sandwich

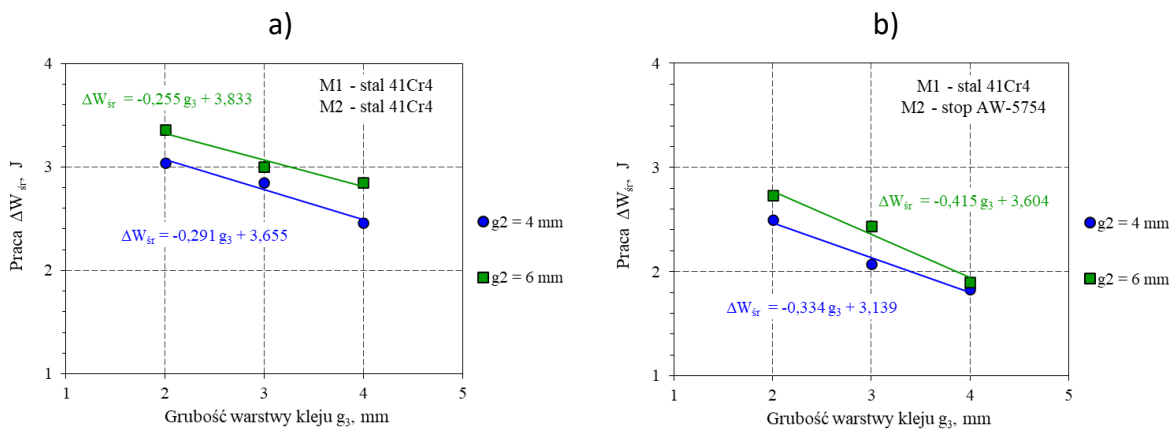
Na podstawie wartości odkształceń  $\varepsilon_{2\text{sr}}$  oraz pracy  $\Delta W_{\text{sr}}$ , zamieszczonych w tabeli 2, opracowano zależności:

- a)  $\varepsilon_{2\text{sr}} = f(g_3)$  dla stałej grubości płaskownika  $g_2$  w próbkach sandwich wykonanych w całości ze stali 41Cr4 (rys. 7.a),

- b)  $\varepsilon_{2\text{sr}} = f(g_3)$  dla stałej grubości płaskownika  $g_2$  w próbkach sandwich wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754 (rys. 7.b),
- c)  $\Delta W_{\text{sr}} = f(g_3)$  dla stałej grubości płaskownika  $g_2$  w próbkach sandwich wykonanych w całości ze stali 41Cr4 (rys. 8.a),
- d)  $\Delta W_{\text{sr}} = f(g_3)$  dla stałej grubości płaskownika  $g_2$  w próbkach sandwich wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754 (rys. 8.b).



**Rys. 7.** Zależność  $\varepsilon_{2\text{sr}} = f(g_3)$  dla stałej grubości płaskownika  $g_2$  w próbkach sandwich wykonanych: a – w całości ze stali 41Cr4, b - ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754



**Rys. 8.** Zależność  $\Delta W_{\text{sr}} = f(g_3)$  dla stałej grubości płaskownika  $g_2$  w próbkach sandwich wykonanych: a – w całości ze stali 41Cr4, b - ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754

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

- a) na wytrzymałość próbek typu sandwich wpływa: grubość warstwy kleju  $g_3$  oraz sztywność łączonych elementów (wynikająca z grubości płaskownika  $g_2$  i zastosowanego materiału),
- b) najwyższe wartości odkształcenia  $\varepsilon_{2\text{sr}}$  uzyskano: dla grubości warstwy kleju  $g_3 = 4$  mm oraz grubości płaskownika  $g_2 = 4$  mm dla próbek Is (M1 - stal 41Cr4 – M2 - stal 41Cr4) oraz dla grubości warstwy kleju  $g_3 = 3$  mm i  $g_3 = 4$  mm oraz grubości płaskownika  $g_2 = 4$  mm dla próbek typu IIs (M1 - stal 41Cr4 – M2 - stop AW-5754), co jest związane

---

z niską sztywnością łączonych elementów i dużą grubością spoiny klejowej wpływającą na wzrost siły odrywającej w złączu klejonym podczas obciążenia,

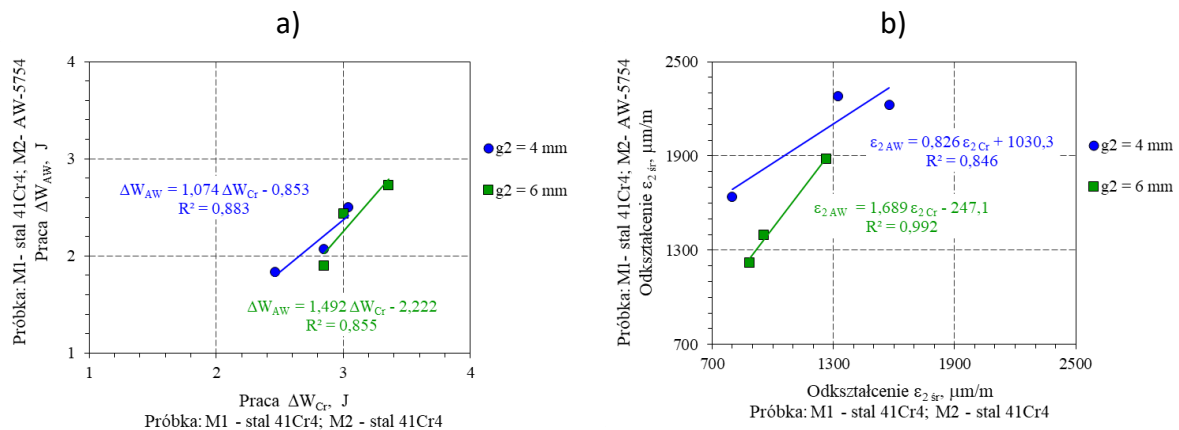
- c) wpływ sztywności łączonych elementów na wartość odkształceń  $\varepsilon_{2\text{sr}}$  jest zauważalny, gdy porównamy wyniki badań uzyskane dla próbek typu Is (M1-stal 41Cr4 – M2-stal 41Cr4) z wynikami uzyskanymi dla próbek typu IIs (M1-stal 41Cr4 – M2-stop AW-5754), niższe wartości odkształceń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

W badaniach doświadczalnych stosowano próbki typu sandwich wykonane w całości ze stali 41Cr4 (typ Is) oraz próbki wykonane jednocześnie ze stali 41Cr4 i stopu aluminium AW-5754 (typ IIs). Wszystkie cechy geometryczne próbek typu Is i typu IIs były takie same. Wskazane założenia pozwoliły na wyznaczenia relacji pomiędzy wynikami uzyskanymi podczas badań dla przyjętych typów próbek, które przedstawiono na rysunku 9.

Na rysunku 9.a przedstawiono zależności  $\Delta W_{\text{AW}} = f(\Delta W_{\text{Cr}})$  wyznaczone na podstawie wartości  $\Delta W_{\text{sr}}$  dla przyjętych typów próbek dla stałej grubości płaskownika  $g_2$ . Symbolem  $W_{\text{Cr}}$  oznaczono wartości pracy obliczonej dla próbek typu Is, natomiast symbolem  $W_{\text{AW}}$  oznaczono wartości pracy obliczonej dla próbek typu IIs. Zbliżoną korelację wyników badań uzyskano dla grubości płaskownika  $g_2 = 4$  mm i  $g_2 = 6$  mm, o czym świadczy współczynnik determinacji  $R^2 > 0,85$ . Rozkład wyników wskazuje, że większą pracę należy użyć do uszkodzenia złącza klejonego próbkach wykonanych w całości ze stali 41Cr4.

Rysunek 9.b przedstawia zależności  $\varepsilon_{2\text{AW}} = f(\varepsilon_{2\text{Cr}})$  wyznaczone dla stałej grubości płaskownika  $g_2$  w próbkach zakładkowych. Analiza ułożenia danych oraz wartości współczynników determinacji  $R^2$  wskazuje na wysoką korelację wyników uzyskanych dla

grubości płaskownika  $g_2 = 6$  mm, o czym świadczy współczynnik determinacji  $R^2 = 0,992$ . Dla grubości  $g_2 = 4$  mm wartości współczynnika determinacji  $R^2 < 0,9$ .



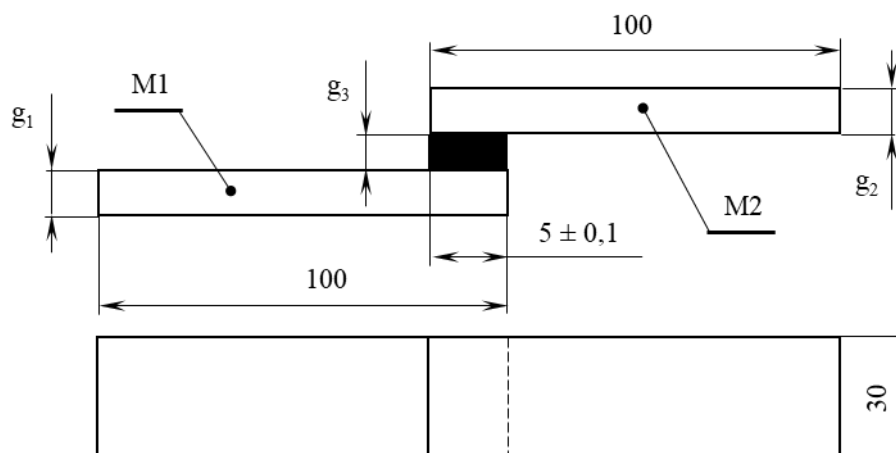
**Rys. 9.** Wykresy zależności: a –  $\Delta W_{AW} = f(\Delta W_{Cr})$  dla stałej grubości płaskownika  $g_2$  w próbkach sandwich, b -  $\varepsilon_{2,AW} = f(\varepsilon_{2,Cr})$  dla stałej grubości płaskownika  $g_2$  w próbkach sandwich

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

### 3.2. Badania zakładkowych połączeń klejonych

#### 3.2.1. Próbką badawczą i program badań

Badania zakładkowych połączeń klejonych zrealizowano z zastosowaniem próbek wykonanych na podstawie normy PN-EN 1465-2009 (rys.10).



**Rys. 10.** Wymiary próbki zakładkowego połączenia klejonego zgodnie z PN-EN 1465-2009

Do wykonania próbek użyto płaskowników ze stali 41Cr4 (poddanej obróbce cieplnej do twardości 48HRC) i stopu aluminium AW-5754 o różnych grubościach. Do wykonywania połączeń klejonych użyto kleju Multibond-5824.

Czynnikami zmiennymi w badaniach zakładkowych próbek klejonych były:



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

Szczegółowy program badań przedstawiono w tabeli 3.

**Tabela 3.** Program badań zakładkowych połączeń klejonych

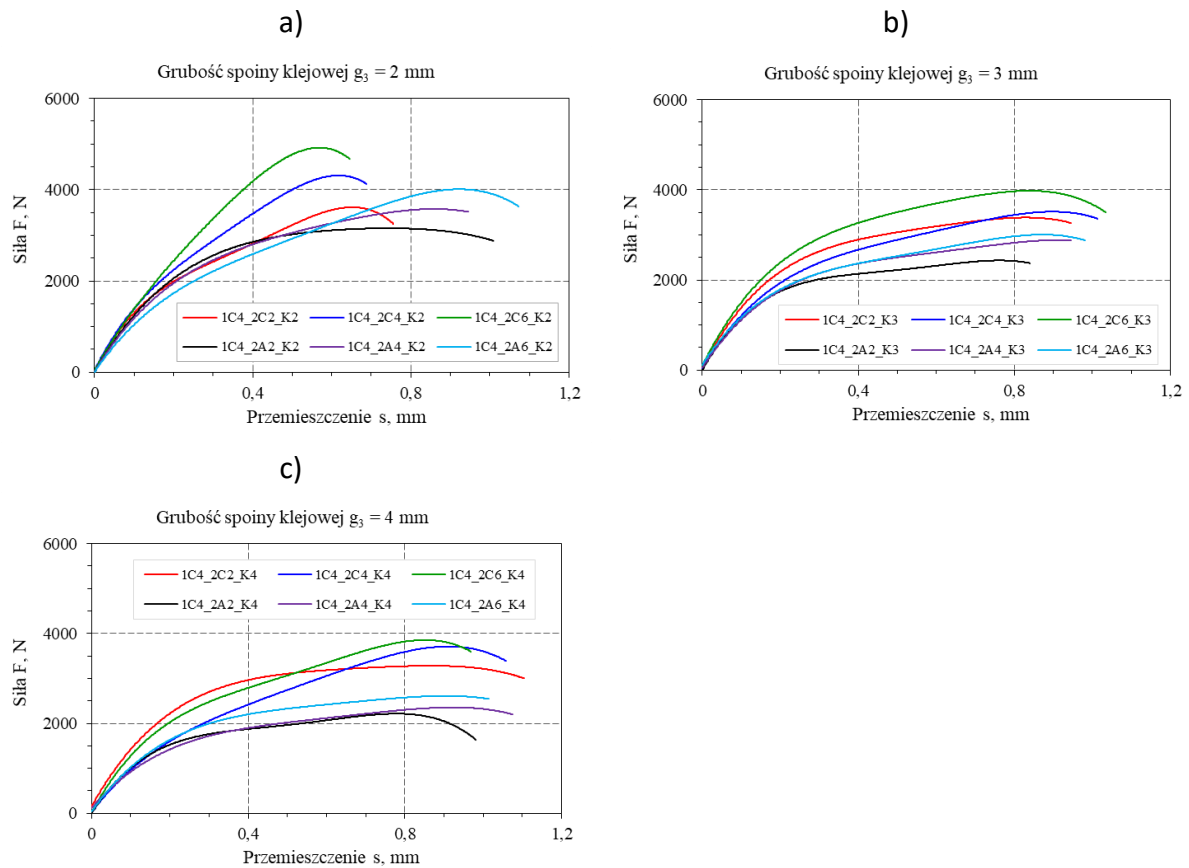
| Lp. | Materiały i ich grubości |       |                   |       |                        | Oznaczenie próbki |
|-----|--------------------------|-------|-------------------|-------|------------------------|-------------------|
|     | Element nr 1 (M1)        |       | Element nr 2 (M2) |       | Klej<br>Multibond-5824 |                   |
|     | Materiał                 | $g_1$ | Materiał          | $g_2$ | $g_3$                  |                   |
|     | ---                      | mm    | ---               | mm    | mm                     |                   |
| 1   | Stal 41Cr4               | 4     | Stal 41Cr4        | 2     | 2                      | 1C4_2C2_K2        |
| 2   |                          |       |                   | 2     | 3                      | 1C4_2C2_K3        |
| 3   |                          |       |                   | 2     | 4                      | 1C4_2C2_K4        |
| 4   |                          |       |                   | 4     | 2                      | 1C4_2C4_K2        |
| 5   |                          |       |                   | 4     | 3                      | 1C4_2C4_K3        |
| 6   |                          |       |                   | 4     | 4                      | 1C4_2C4_K4        |
| 7   |                          |       |                   | 6     | 2                      | 1C4_2C6_K2        |
| 8   |                          |       |                   | 6     | 3                      | 1C4_2C6_K3        |
| 9   |                          |       |                   | 6     | 4                      | 1C4_2C6_K4        |
| 10  |                          |       | Stop AW-5754      | 2     | 2                      | 1C4_2A2_K2        |
| 11  |                          |       |                   | 2     | 3                      | 1C4_2A2_K3        |
| 12  |                          |       |                   | 2     | 4                      | 1C4_2A2_K4        |
| 13  |                          |       |                   | 4     | 2                      | 1C4_2A4_K2        |
| 14  |                          |       |                   | 4     | 3                      | 1C4_2A4_K3        |
| 15  |                          |       |                   | 4     | 4                      | 1C4_2A4_K4        |
| 16  |                          |       |                   | 6     | 2                      | 1C4_2A6_K2        |
| 17  |                          |       |                   | 6     | 3                      | 1C4_2A6_K3        |
| 18  |                          |       |                   | 6     | 4                      | 1C4_2A6_K4        |

Powierzchnie elementów użytych do wykonania próbek zakładkowych przygotowano według wytycznych normy PN-EN 13887:2005. Pierwszą operacją technologiczną obróbki płaskowników była obróbka ścierna na sucho elektrokorundem o wielkości ziaren 80  $\mu\text{m}$ . Kolejną operacją było odtłuszczenie acetonem (metodą zanurzeniową) obrobionej mechanicznie powierzchni powtarzane trzykrotnie. Trzecią operacją było przecieranie powierzchni rozpuszczalnikiem, którą również powtarzano trzykrotnie. Średnia wartość chropowatości powierzchni po wykonanej obróbce wynosiła: dla stali 41Cr4 –  $R_a = 1,83 \mu\text{m}$ , dla stopu aluminium AW-5754 –  $R_a = 3,71 \mu\text{m}$ .

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

### 3.2.2. Wyniki badań doświadczalnych

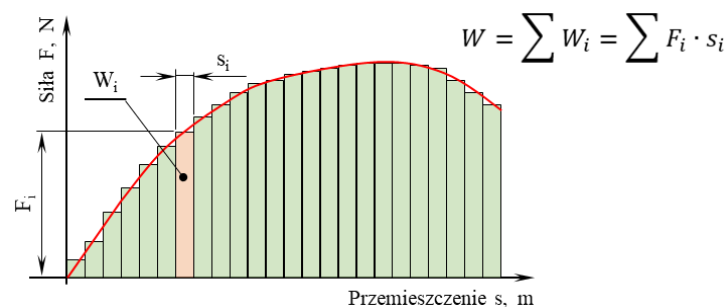
Przeprowadzone badania wytrzymałości statycznej zakładkowych próbek klejonych pozwoliły na wyznaczenie zależności  $F = f(s)$  dla każdej badanej próbki. Przykładowe przebiegi zmian  $F = f(s)$  dla każdego wariantu próbek przedstawiono na rysunku 11. Zestawienie wartości  $F_{\max}$  przedstawiono w tabeli 4.



**Rys. 11.** Przykładowe przebiegi zależności  $F = f(s)$  dla zakładkowych próbek klejonych o grubości warstwy kleju: a –  $g_3 = 2$  mm, b –  $g_3 = 3$  mm, c –  $g_3 = 4$  mm

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

Uzyskane w wyniku badań przebiegi zależności  $F = f(s)$  dla zakładkowych próbek klejonych pozwoliły na wyznaczenie pracy  $W$  potrzebnej do ich uszkodzenia. Metodę wyznaczania pracy „ $W$ ” przedstawiono na rysunku 12. Wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 5.



**Rys. 12.** Schemat wyznaczania pracy  $W$  prowadzącej do zniszczenia próbki

**Tabela 4.** Zestawienie wartości maksymalnych sił niszczących  $F_{max}$  zakładkowych połączeń klejonych

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

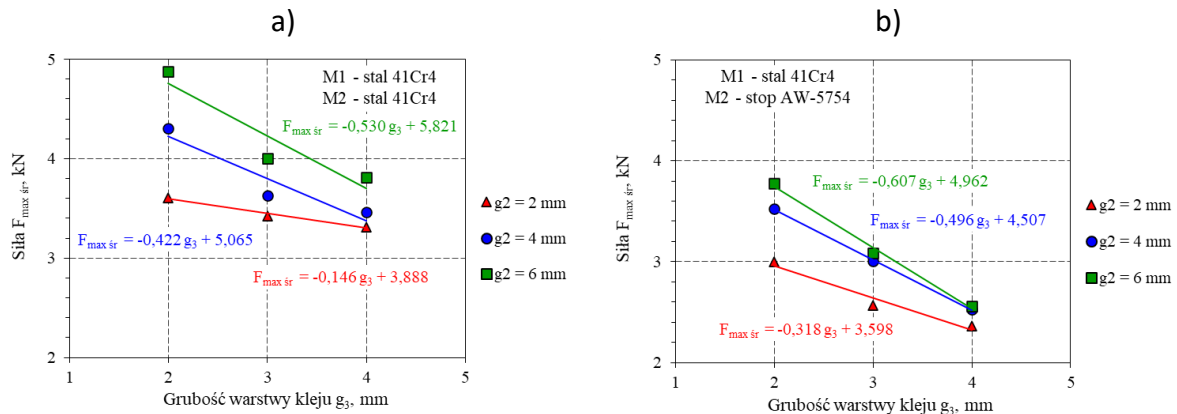
**Tabela 5.** Zestawienie wartości pracy  $W$  dla zakładkowych połączeń klejonych

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

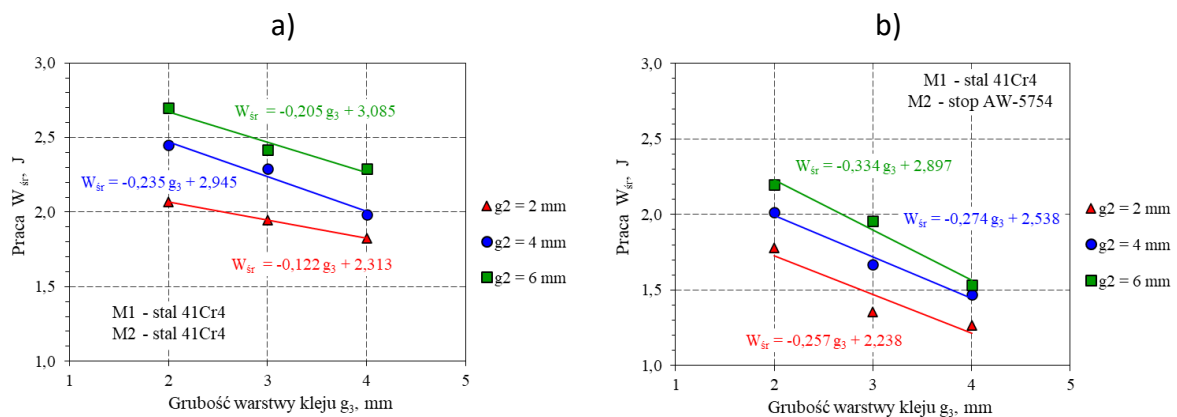
### 3.2.3. Analiza wyników badań zakładkowych próbek klejonych

Na podstawie wartości  $F_{max\ \acute{s}r}$  i  $W_{\acute{s}r}$ , zamieszczonych w tabeli 5.2 i 5.3, opracowano zależności:

- $F_{\max \text{ śr}} = f(g_3)$  dla stałej grubości płaskownika  $g_2$  w próbkach zakładkowych wykonanych w całości ze stali 41Cr4 (rys. 13.a),
- $F_{\max \text{ śr}} = f(g_3)$  dla stałej grubości płaskownika  $g_2$  w próbkach zakładkowych wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754 (rys. 13.b),
- $W_{\text{śr}} = f(g_3)$  dla stałej grubości płaskownika  $g_2$  w próbkach zakładkowych wykonanych w całości ze stali 41Cr4 (rys. 14.a),
- $W_{\text{śr}} = f(g_3)$  dla stałej grubości płaskownika  $g_2$  w próbkach zakładkowych wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754 (rys. 14.b).



**Rys. 13.** Zależność  $F_{\max \text{ śr}} = f(g_3)$  dla stałej grubości płaskownika  $g_2$  w próbkach zakładkowych wykonanych: a – w całości ze stali 41Cr4, b – ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754



**Rys. 14.** Zależność  $W_{\text{śr}} = f(g_3)$  dla stałej grubości płaskownika  $g_2$  w próbkach zakładkowych wykonanych: a – w całości ze stali 41Cr4, b – ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754

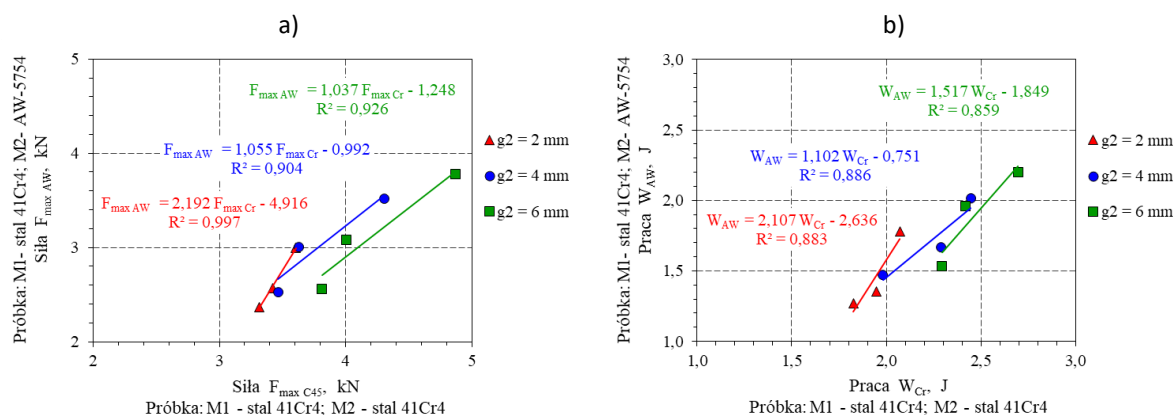
Analiza wyników badań zakładkowych próbek klejonych pozwala na sformułowanie następujących spostrzeżeń:

- na wytrzymałość zakładkowych próbek klejonych wpływa: grubość warstwy kleju  $g_3$  oraz sztywność łączonych elementów (wynikająca z grubości płaskownika  $g_2$  i zastosowanego materiału),
- najwyższe wartości siły  $F_{\max \text{ śr}}$  uzyskano dla grubości warstwy kleju  $g_3 = 2$  mm oraz grubości płaskownika  $g_2 = 6$  mm dla każdego typu próbek zakładkowych, co jest związane z wysoką sztywnością łączonych elementów wpływającą na ograniczenie siły odrywającej podczas obciążenia,

- c) wpływ sztywności łączonych elementów na wartość  $F_{\max \text{ } \acute{s}r}$  jest zauważalny, gdy porównamy wyniki badań uzyskane dla próbek typ I (M1-stal 41Cr4 – M2-stal 41Cr4) z wynikami uzyskanymi dla próbek typu II (M1-stal 41Cr4 – M2-stop AW-5754),
- d) najniższe wartości siły  $F_{\max \text{ } \acute{s}r}$  uzyskano dla grubości warstwy kleju  $g_3 = 4$  mm oraz grubości płaskownika  $g_2 = 2$  mm dla każdego typu próbek zakładkowych, co jest związane z najniższą sztywnością łączonych elementów wpływającą na możliwość wystąpienia siły odrywającej o najwyższej wartości,
- e) wartości siły  $F_{\max \text{ } \acute{s}r}$  dla zakładkowych próbek klejonych o grubości warstwy kleju  $g_3 = 3$  mm mieszczą się pomiędzy wynikami uzyskanymi dla  $g_3 = 2$  mm a  $g_3 = 4$  mm,
- f) wyznaczone wartości różnic pomiędzy wynikami  $F_{\max \text{ } \acute{s}r}$  dla określonych typów próbek wykazały mniejsze zakresy zmian dla próbek typu I, co jest związane z większą sztywnością płaskownika  $g_2$  wykonanego ze stali 41Cr4 w porównaniu do płaskownika ze stopu AW-5754,
- g) najwyższe wartości pracy  $W_{\acute{s}r}$  uzyskano dla grubości warstwy kleju  $g_3 = 2$  mm oraz grubości płaskownika  $g_2 = 6$  mm dla każdego typu próbek zakładkowych, co jest zbieżne ze sformułowanym spostrzeżeniem dla analizy wyników siły  $F_{\max \text{ } \acute{s}r}$ ,

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

Na rysunku 15 przedstawiono zależności  $F_{\max \text{ } AW} = f(F_{\max \text{ } Cr})$  wyznaczone na podstawie wartości  $F_{\max \text{ } \acute{s}r}$  dla przyjętych typów próbek dla stałej grubości warstwy kleju  $g_3$ . Symbolem  $F_{\max \text{ } Cr}$  oznaczono wartości siły uzyskane dla próbek typu I, natomiast symbolem  $F_{\max \text{ } AW}$  oznaczono wartości siły uzyskane dla próbek typu II. Najwyższą korelację wyników badań uzyskano dla grubości warstwy kleju  $g_3 = 2$  mm, o czym świadczy współczynnik determinacji  $R^2 = 0,982$ . Dla grubości warstwy kleju  $g_3 = 3$  mm i  $g_3 = 4$  mm wartości współczynnika determinacji  $R^2$  są znacząco niższe, co świadczy o niskiej korelacji wyników badań.



**Rys. 15.** Wykres zależności: a –  $F_{\max AW} = f(F_{\max Cr})$  dla stałej grubości płaskownika  $g_2$  w próbkach zakładkowych, b –  $W_{AW} = f(W_{Cr})$  dla stałej grubości płaskownika  $g_2$  w próbkach zakładkowych

Rysunek 15.a przedstawia zależności  $F_{\max AW} = f(F_{\max Cr})$  wyznaczone dla stałej grubości płaskownika  $g_2$  w próbkach zakładkowych. Analiza ułożenia danych oraz wartości współczynników determinacji  $R^2$  wskazuje na wysoką korelację wyników uzyskanych dla grubości płaskownika  $g_2 = 2$  mm, o czym świadczy współczynnik determinacji  $R^2 = 0,997$ . Dla grubości  $g_2 = 4$  mm i  $g_2 = 6$  mm wartości współczynnika determinacji  $R^2 > 0,9$ , a linie aproksymacyjne można uznać na równoległe dla analizowanego zakresu sił.

Rysunek 15.b przedstawia zależności  $W_{AW} = f(W_{Cr})$  wyznaczone dla stałej grubości płaskownika  $g_2$  w próbkach zakładkowych. Analiza ułożenia danych oraz wartości współczynników determinacji  $R^2$  wskazuje na niską korelację wyników uzyskanych dla wszystkich grubości płaskowników, o czym świadczy współczynnik determinacji  $R^2 < 0,9$ .

Analiza wyników badań wykazały, że wpływ na wartość pracy niszczącej  $W_{\text{śr}}$  zakładkowe próbki klejone wpływa: grubość warstwy kleju  $g_3$ , rodzaj materiału płaskownika M2 oraz grubość płaskownika  $g_2$ . Uzyskane wyniki stanowią punkt odniesienia do weryfikacji metody badań wytrzymałości złączy klejonych z zastosowaniem próbek typu sandwich.

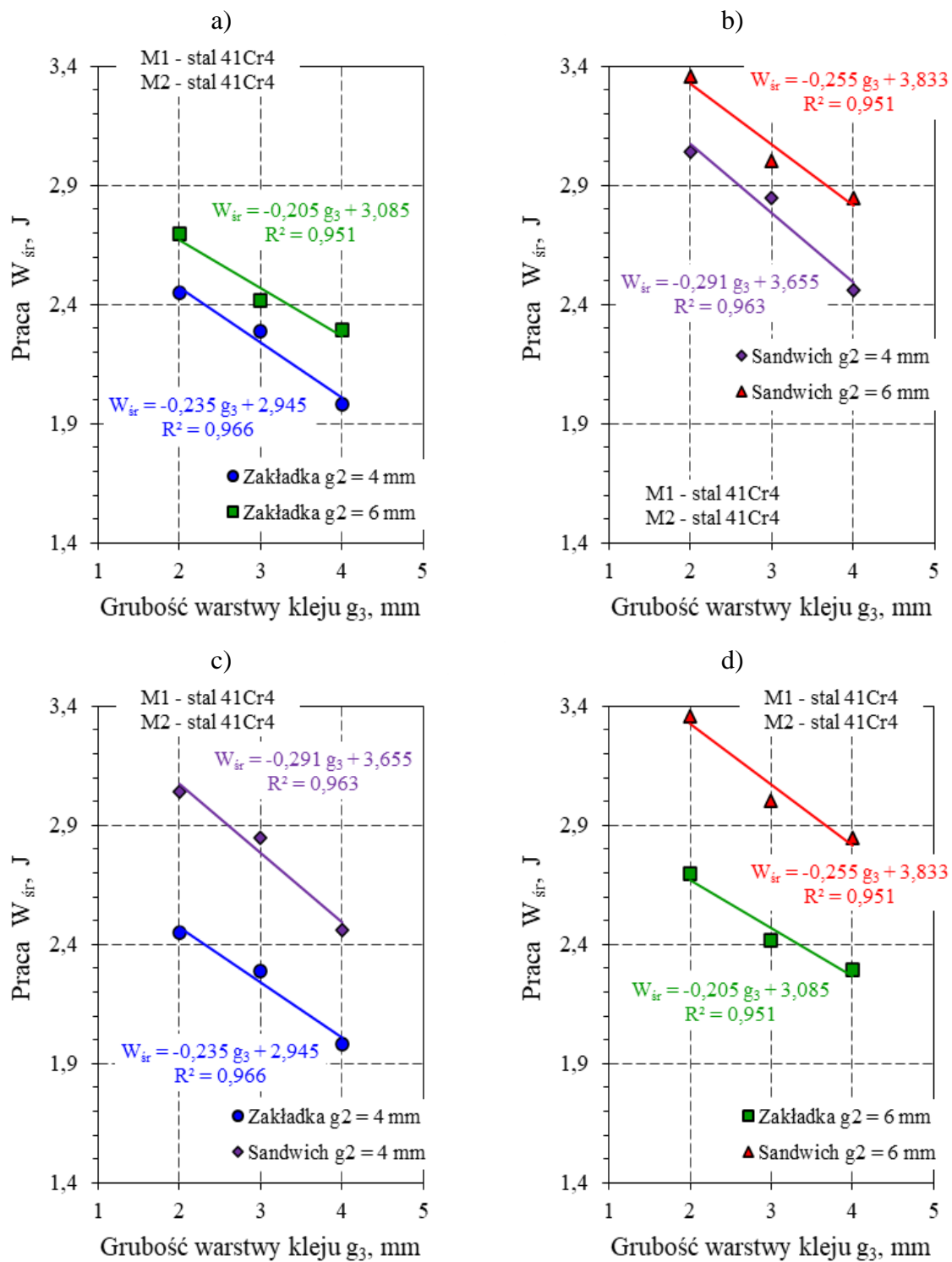
#### 4. Analiza wyników badań

Szczegółowej analizie poddano wartości pracy niszczącej  $W$  połączenia klejone próbek zakładkowych i próbek sandwich. Na rysunkach od 16 do 19 zestawiono wyniki badań, dla których wyznaczono równania funkcji liniowej oraz wartości współczynnika determinacji  $R^2$ . Analizę statystyczną danych przeprowadzono stosując test U Manna-Whitney'a oraz test t Studenta. Warianty analizy danych przedstawiono w tabeli 6.

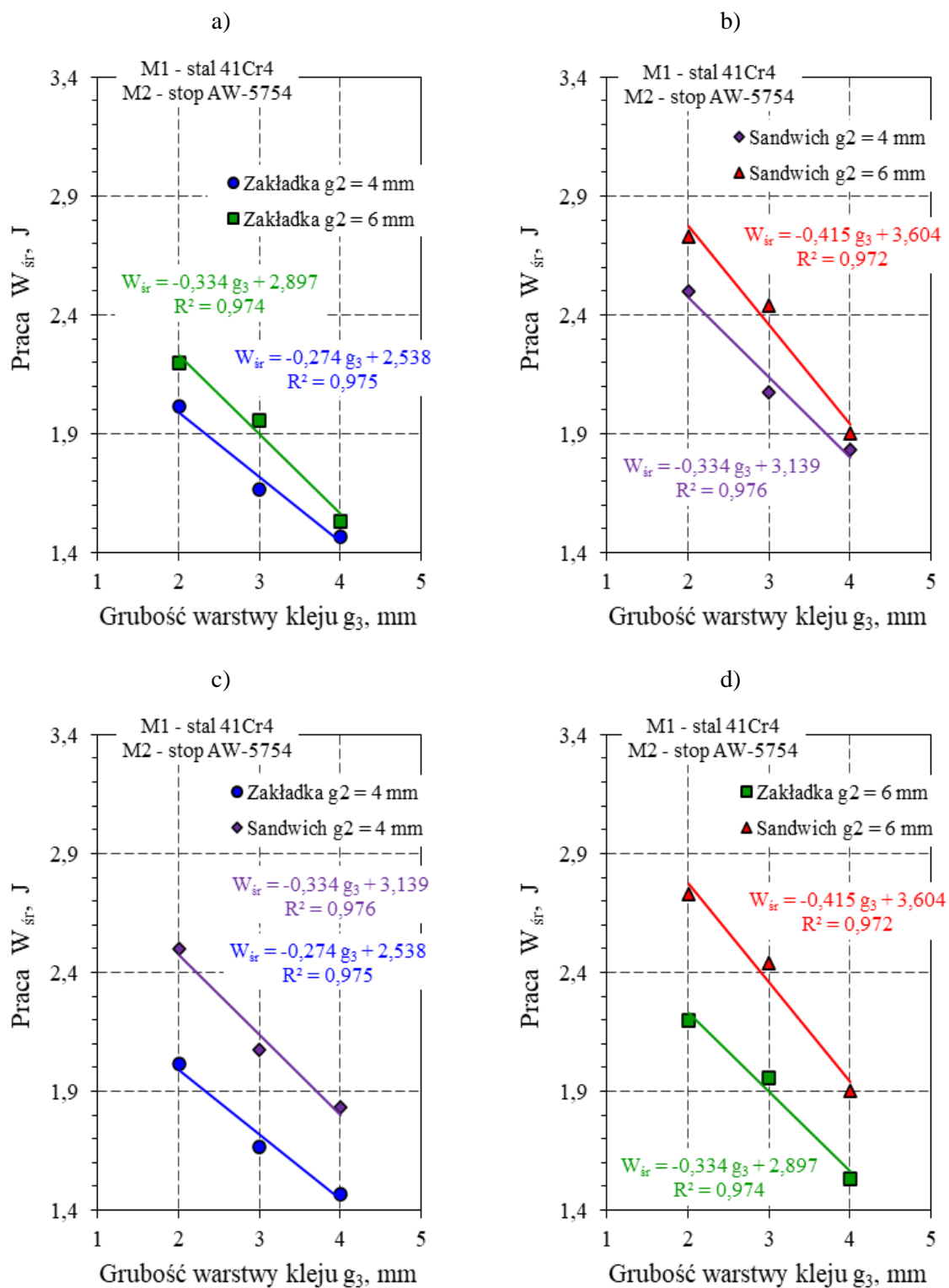
**Tabela 6.** Zestawienie wyników obliczeń w zakresie statystyki opisowej oraz parametrów dla test U Manna-Whitney'a i test t Studenta

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

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

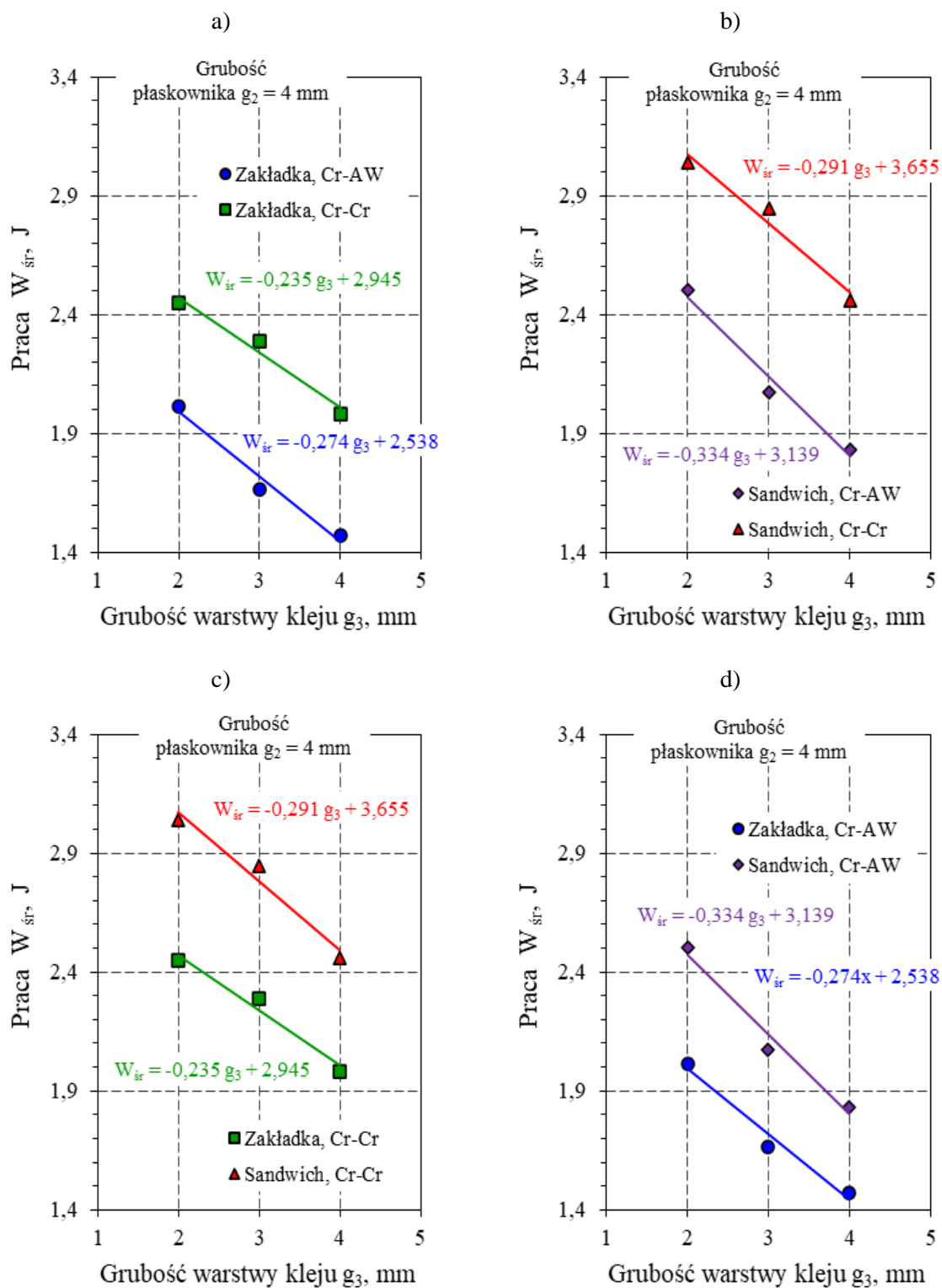


**Rys. 16.** Zestawienie zależności  $W_{sr} = f(g_3)$  dla wyników badań próbek (stal 41Cr4-stal 41Cr4): a – zakładkowych próbek klejonych, b – próbek typu sandwich, c – dla grubości płaskownika  $g_2 = 4$  mm obydwu typów próbek, d – dla grubości płaskownika  $g_2 = 6$  mm obydwu typów próbek

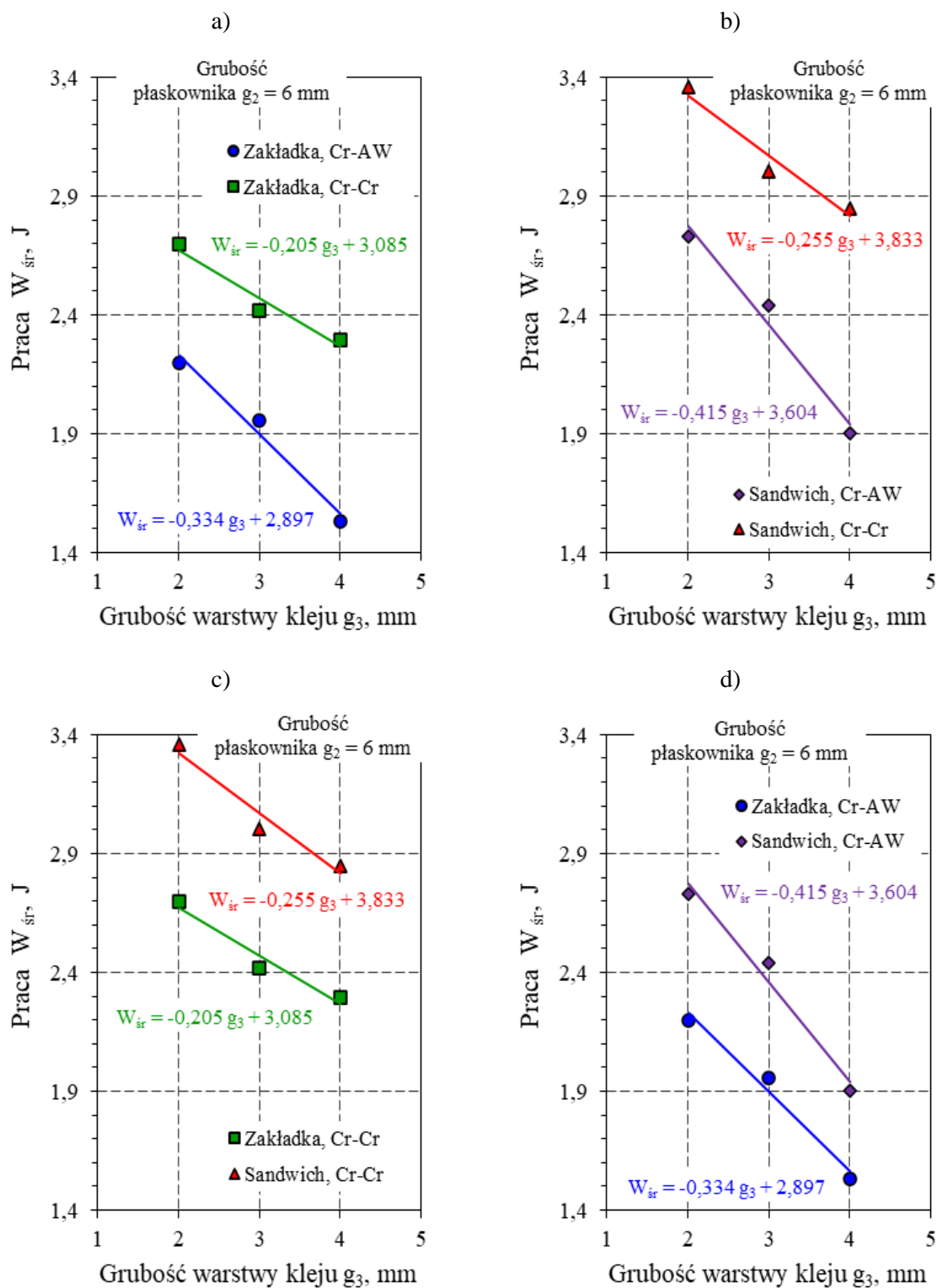


**Rys. 17.** Zestawienie zależności  $W_{sr} = f(g_3)$  dla wyników badań próbek (stal 41Cr4-stop AW-5754): a – zakładkowych próbek klejonych, b – próbek typu sandwich, c – dla grubości płaskownika  $g_2 = 4$  mm obydwu typów próbek, d – dla grubości płaskownika  $g_2 = 6$  mm obydwu typów próbek





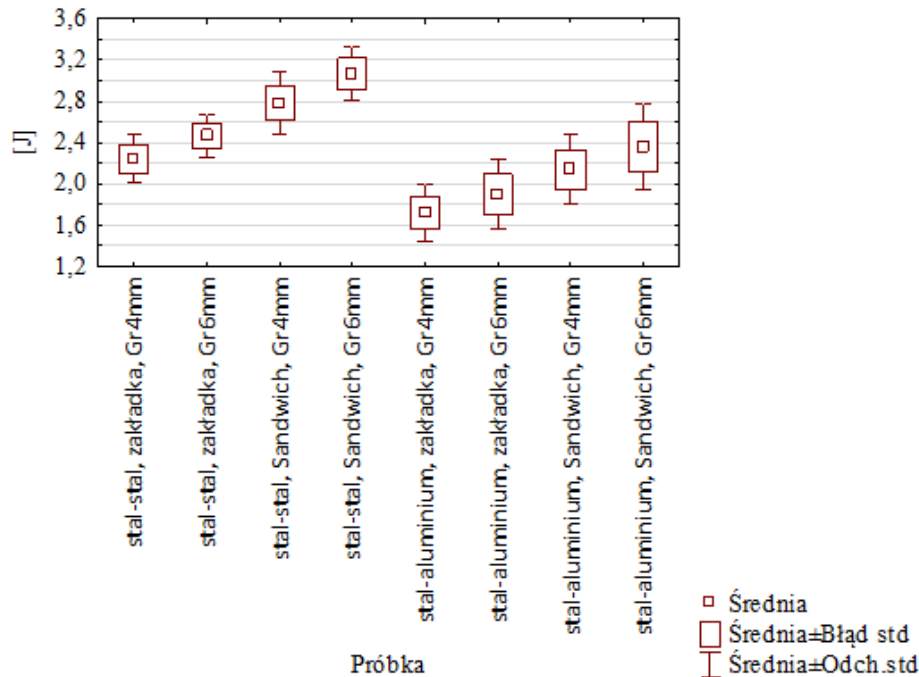
**Rys. 18.** Zestawienie zależności  $W_{sr} = f(g_3)$  dla wyników badań próbek w ujęciu grubości płaskownika  $g_2 = 4$  mm: a – zakładkowych próbek klejonych, b – próbek typu sandwich, c – dla obydwu typów próbek stal 41Cr4-stal 41Cr4, d – dla obydwu typów próbek stal 41Cr4-stop AW-5754



**Rys. 19.** Zestawienie zależności  $W_{sr} = f(g_3)$  dla wyników badań próbek w ujęciu grubości płaskownika  $g_2 = 6$  mm: a – zakładkowych próbek klejonych, b – próbek typu sandwich, c – dla obydwu typów próbek stal 41Cr4-stal 41Cr4, d – dla obydwu typów próbek stal 41Cr4-stop AW-5754

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

Dodatkowym elementem było porównanie uzyskanych wyników w konfiguracjach jednowymiarowych (rys. 20) wynikających z typu próbek (próbka zakładkowa vs. próbka sandwich), jak również rodzaju materiału płaskownika M2 (Cr-Cr vs. Cr-AL), a także grubości zastosowanego materiału na płaskownik M2 (4mm vs. 6mm).



Rys. 20. Zestawienie wyników średnich dla rezultatów z podziałem na utworzone grupy

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

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

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

Dane przedstawione na rysunkach od 16 do 19 poddano regresji wielorakiej, której wyniki przedstawiono w tabeli 7. W regresji wielorakiej wykorzystano trzy wymiary jako zmienne niezależne, tj. rodzaj materiału (Cr-Cr – 1; Cr-AL – 0) oraz typ próbki (Zakł. – 1; Sand. – 0), jak i grubość materiału płaskownika M2 (G4mm – 1; G6mm – 0). Zmienną zależną w tym wielowymiarowym układzie była praca niszcząca  $W$  [J].

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

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

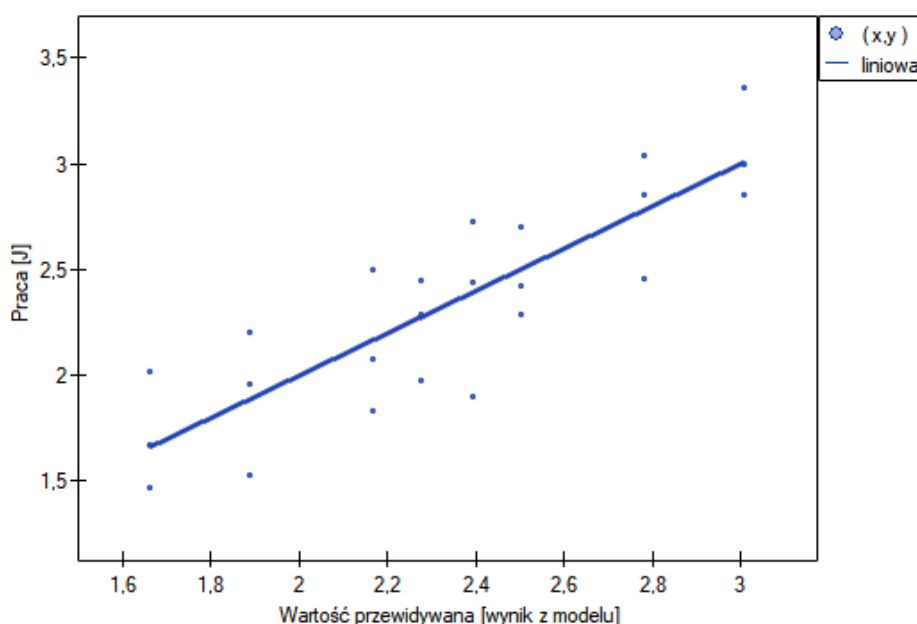
**Tabela 7.** Zestawienie wyników obliczeń regresji wielorakiej

| Zmienne                            | Wartości parametrów |        |         |         |         |           |
|------------------------------------|---------------------|--------|---------|---------|---------|-----------|
|                                    | Wsp. b              | Błąd b | -95% CI | +95% CI | Stat. t | Wartość p |
| Wyraz wolny                        | 1,709               | 0,298  | 1,088   | 2,330   | 5,740   | <0,001    |
| Materiał (Cr-Cr – 1; Cr-AL. – 0)   | 0,613               | 0,113  | 0,379   | 0,848   | 5,450   | <0,001    |
| Typ próbki (Zakł. – 1; Sand. – 0)  | 0,505               | 0,113  | 0,740   | 0,270   | 4,487   | <0,001    |
| Grubość $g_2$ (G4mm – 1; G6mm – 0) | 0,114               | 0,056  | -0,003  | 0,232   | 2,029   | 0,056     |

Oznaczenie:

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

Graficzne przedstawienie wyników rzeczywistych pracy niszczącej W względem utworzonego modelu obliczeniowego zawarto na rysunku 21.



**Rys. 21.** Zestawienie zależności pracy wykonanej podczas próby względem wartości przewidywanej uzyskanej z modelu regresji wielorakiej

Analizując wyniki badań przedstawione na rysunkach 16÷19 można stwierdzić, że na wartość pracy niszczącej W złącze klejone wpływa grubość warstwy kleju dla każdego wariantu wykonania próbek. Obliczenia wartości różnic względnych dla poszczególnych przypadków obiektów badań przedstawiono w tabelach: tabela 8 (rys. 16), tabela 9 (rys. 17), tabela 10

(rys. 18) i tabela 11 (rys. 19). Obliczenia różnic względnych przeprowadzono według zależności przedstawionych w tabelach 8÷11 w kolumnach 6÷9.

**Tabela 8.** Wartości różnic pomiędzy wynikami badań próbek wykonanych w całości ze stali 41Cr4

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

**Tabela 9.** Wartości różnic pomiędzy wynikami badań próbek wykonanych ze stali 41Cr4 i stopu AW-5754

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

**Tabela 10.** Wartości różnic pomiędzy wynikami badań próbek o grubości płaskownika  $g_2 = 4$  mm

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

**Tabela 11.** Wartości różnic pomiędzy wynikami badań próbek o grubości płaskownika  $g_2 = 6$  mm

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

---

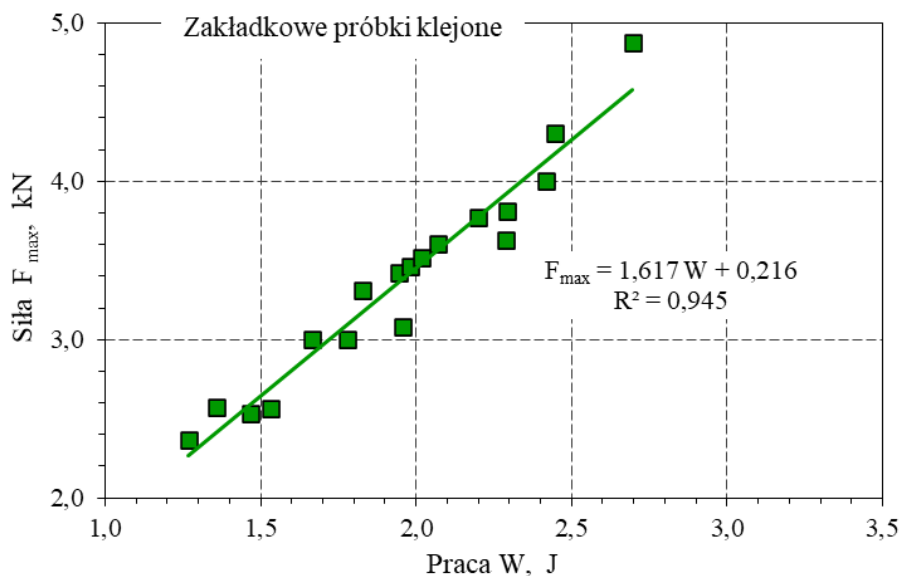
Analizując wartości różnic przedstawione w tabelach 8÷11 można stwierdzić, że dla przyjętych grubości kleju  $g_3$  wartości wynoszą:

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

Wartości różnic względnych wskazuje, że dla obydwu typu próbek na wartość pracy niszczącej połączenie klejone ma wpływ: rodzaj materiału płaskownika M2, jego grubość oraz grubość warstwy kleju  $g_3$ . Najwyższe wartości pracy uzyskano dla: grubości warstwy kleju  $g_3 = 2$  mm, płaskownika M2 wykonanego ze stali 41Cr4 o grubości  $g_2 = 6$  mm. Natomiast najniższe wartości wyznaczono dla: grubości warstwy kleju  $g_3 = 4$  mm, płaskownika M2 wykonanego ze stopu aluminium AW-5754 o grubości  $g_2 = 4$  mm. Wartości pracy dla grubości  $g_3 = 3$  mm mieściły się pomiędzy wartościami dla  $g_3 = 2$  mm i  $g_3 = 4$  mm. Zastanawiająca jest zbieżna wartość różnic dla obydwu typu próbek. Można ją wytłumaczyć jedynie dużą starannością wykonywania próbek, podobnym okresem sezonowania oraz poprawnością wykonania badań doświadczalnych.

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

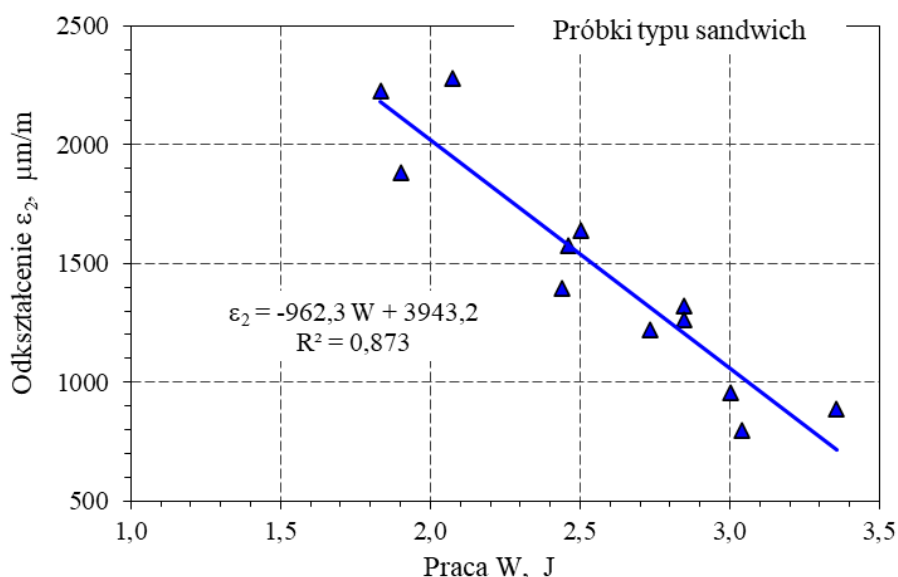
Na rysunku 22 przedstawiono zależność pomiędzy maksymalną siłą niszczącą połączenie zakładkowe a pracą niszczącą „W”. Do wyznaczenia zależności  $F_{\max} = f(W)$  wykorzystano wszystkie wyniki uzyskane podczas badań.



**Rys. 22.** Zależność  $F_{max} = f(W)$  wyznaczona na podstawie wyników badań zakładkowych próbek klejonych

Aproksymacja liniowa wyników badań (rys. 22) wskazuje na występowanie zależności pomiędzy siłą  $F_{max}$  a pracą niszczącą „W”, o czym świadczy bardzo wysoka wartość współczynnika determinacji  $R^2 = 0,945$ .

Na rysunku 23 przedstawiono zależność pomiędzy odkształceniem  $\varepsilon_2$  a pracą niszczącą „W”. Do wyznaczenia zależności  $\varepsilon_2 = f(W)$  wykorzystano wszystkie wyniki uzyskane podczas badań.



**Rys. 23.** Zależność  $\varepsilon_2 = f(W)$  wyznaczona na podstawie wyników badań próbek typu sandwich

Aproksymacja liniowa wyników badań (rys. 23) wskazuje na występowanie zależności pomiędzy odkształceniem  $\varepsilon_2$  a pracą niszczącą „W”, o czym świadczy wysoka wartość współczynnika determinacji  $R^2 = 0,873$ .

---

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

## 5. Posumowanie i wnioski

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

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

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

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

- a) zastosowanie w badaniach próbek typu sandwich pozwala na określenie maksymalnej wartości odkształcenia elementów prowadzących do uszkodzenia złącza klejonego oraz wartość pracy niszczącej to złącze,
- b) najniższe wartości odkształcenia  $\varepsilon_2$  osiągnięto dla grubości warstwy kleju  $g_3 = 2$  mm i najwyższej sztywności płaskownika M2, co wynika z wyznaczonych zależności  $\varepsilon_{2\ \acute{s}r} = f(g_3)$ ,
- c) na wartość pracy niszczącej DW złącze klejone w próbkach typu sandwich wpływa: grubość warstwy kleju  $g_3$ , grubość i rodzaj materiału płaskownika M2, co wynika z wyznaczonych zależności  $\Delta W_{\acute{s}r} = f(g_3)$ ,
- d) najwyższe wartości siły  $F_{\max}$  uzyskano dla zakładkowych próbek klejonych o: grubości warstwy kleju  $g_3 = 2$  mm oraz grubości płaskownika M2 wynoszącej  $g_2 = 6$  mm, co wynika z wyznaczonych zależności  $F_{\max\ \acute{s}r} = f(g_3)$  oraz  $F_{\max\ \acute{s}r} = f(g_2)$ ,



- 
- e) na wartość pracy niszczącej „W” zakładkowe próbki klejone wpływa: grubość warstwy kleju  $g_3$ , grubość i rodzaj materiału płaskownika M2, co wynika z wyznaczonych zależności  $W_{sr} = f(g_3)$  i  $W_{sr} = f(g_2)$ ,
  - f) badania wykazały liniową zależność pomiędzy parametrami będącymi wynikiem testów ( $e_2 = f(W)$  i  $F_{max} = f(W)$ ), które uzyskano dla ściśle określonych: cech geometrycznych próbek, sposobu ich wykonania i warunków realizacji badań.

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

Należy także zauważyć, że belka M1 próbki typu sandwich musi być wykonana z materiału, który podczas obciążeń będzie odkształcał się w zakresie obowiązywania prawa Hooke’a. W innym przypadku, uzyskane wyniki nie pozwolą na właściwą ocenę parametrów uszkodzenia złącza klejonego.

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

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

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