

# Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

## Modern material technologies in aerospace industry

### Niekonwencjonalne technologie łączenia elementów konstrukcji lotniczych

### Unconventional technologies of joining of elements of aeronautical constructions

Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Częstochowska, Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk

#### Wprowadzenie Introduce

**Wpływ grubości spoiny klejowej na wytrzymałość statyczną oraz zmęczenie na oddzieranie**

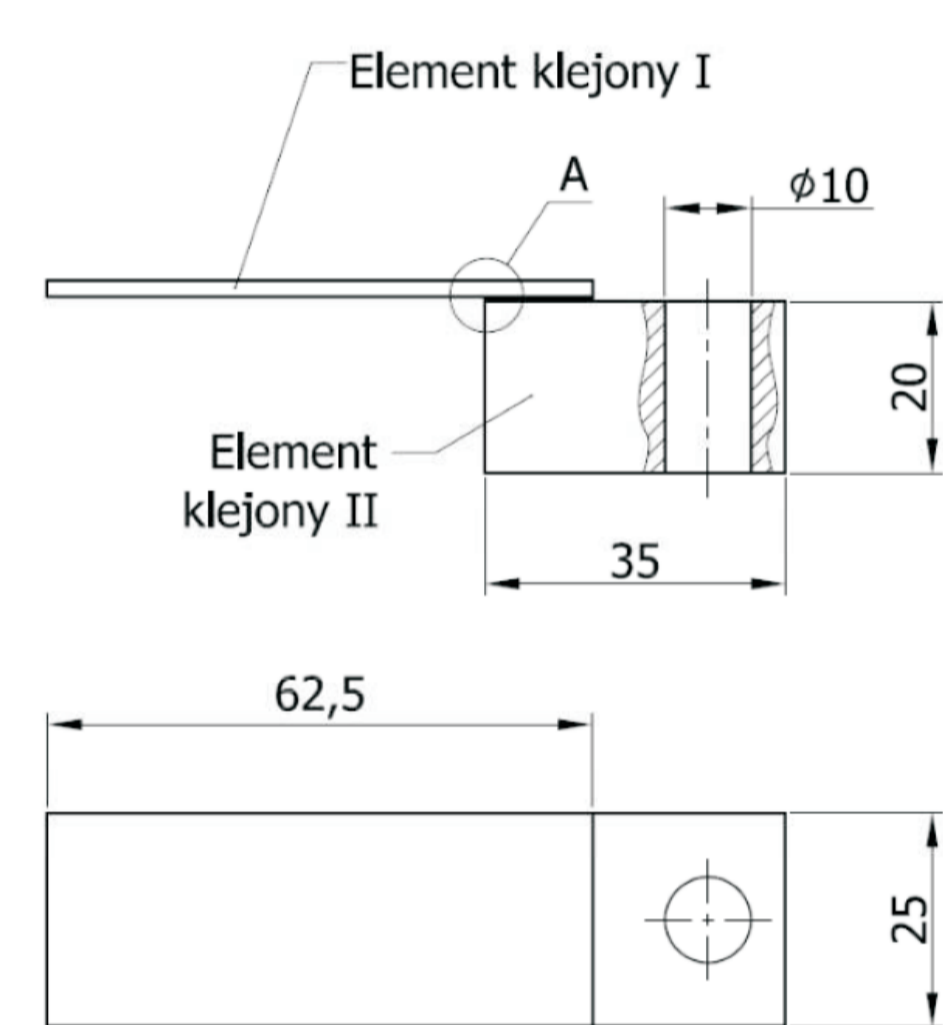
**The influence of the thickness of the adhesive bond strength and fatigue static peel**

#### Streszczenie

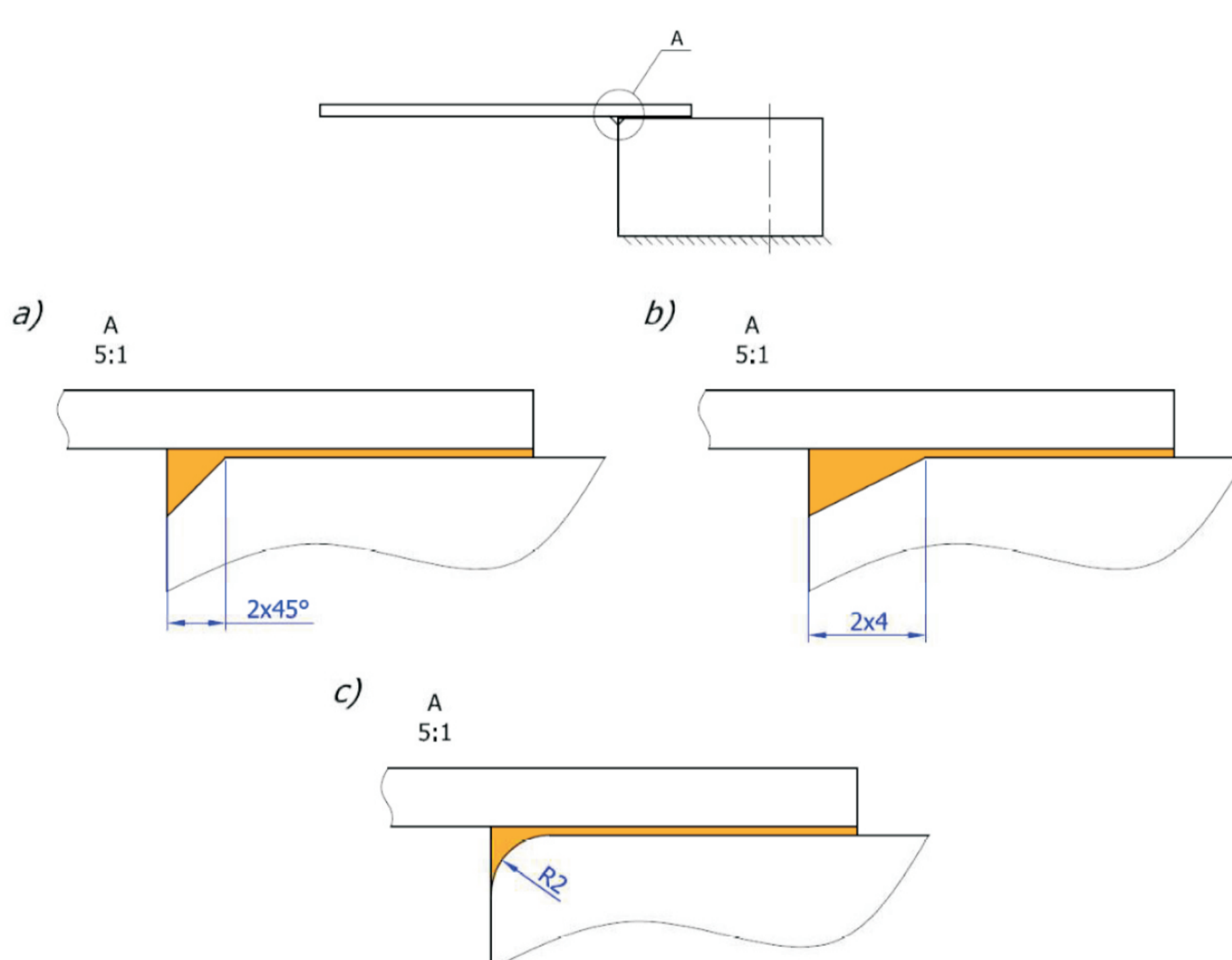
W pracy przedstawiono wyniki badań określających wpływ modyfikacji konstrukcyjnych elementów klejonych na wytrzymałość statyczną oraz wytrzymałość i trwałość zmęczeniową złącza klejowego obciążonego na oddzieranie. Badaniom poddano próbki sklezione kompozycjami epoksydowymi BISON EPOXY oraz EPIDIAN 57 z utwardzaczem PAC. Próbkę klejone poddano modyfikacjom przez wykonanie faz lub promieni w czołowej części złącza, co miało na celu zwiększenie grubości warstwy kleju w strefie przykrawędziowej spoiny klejowej. Badania wytrzymałości statycznej wykazały wzrost nośności złącza. Badania wytrzymałości zmęczeniowej wykazały znaczną poprawę trwałości zmęczeniowej.

#### Metodyka badań

Celem opisanych poniżej badań była ocena wpływu modyfikacji konstrukcyjnych w strefie przykrawędziowej na wytrzymałość statyczną oraz zmęczeniową na oddzieranie złącza klejonych przy granicznej liczbie cykli  $2 \times 10^6$ . Kształt i wymiary próbek stosowanych w badaniach wytrzymałości zmęczeniowej na oddzieranie przedstawiono na rys. 1. Obydwa elementy klejone wykonano ze stali S235JR. Dla wszystkich wariantów złącza zastosowano jednakową metodę przygotowania powierzchni oraz utrzymano te same warunki utwardzania kompozycji klejowych. Każda z powierzchni klejonych została poddana obróbce strumieniowo-ścierniej elektrokorundem 95A w następujących warunkach: wielkość ziarna  $wz = 0,27$  mm, ciśnienie powietrza  $p = 0,8 \pm 0,1$  MPa, czas  $t = 60$  s. Proces utwardzania spoin klejowych przebiegał w czasie 24 h w temperaturze pokojowej ( $20 \pm 3^\circ\text{C}$ ) z zastosowaniem stałego nacisku w obrębie spoiny o wartości  $0,1$  MPa. Wypływki kleju w próbkach zostały usunięte bezpośrednio przed badaniem. Zastosowano zmiany konstrukcyjne elementu klejonego mające na celu zwiększenie grubości warstwy kleju w czołowej części złącza, gdzie dochodzi do spiętrzenia naprężeń normalnych. Badaniom poddano warianty zaprezentowane na rys. 2.



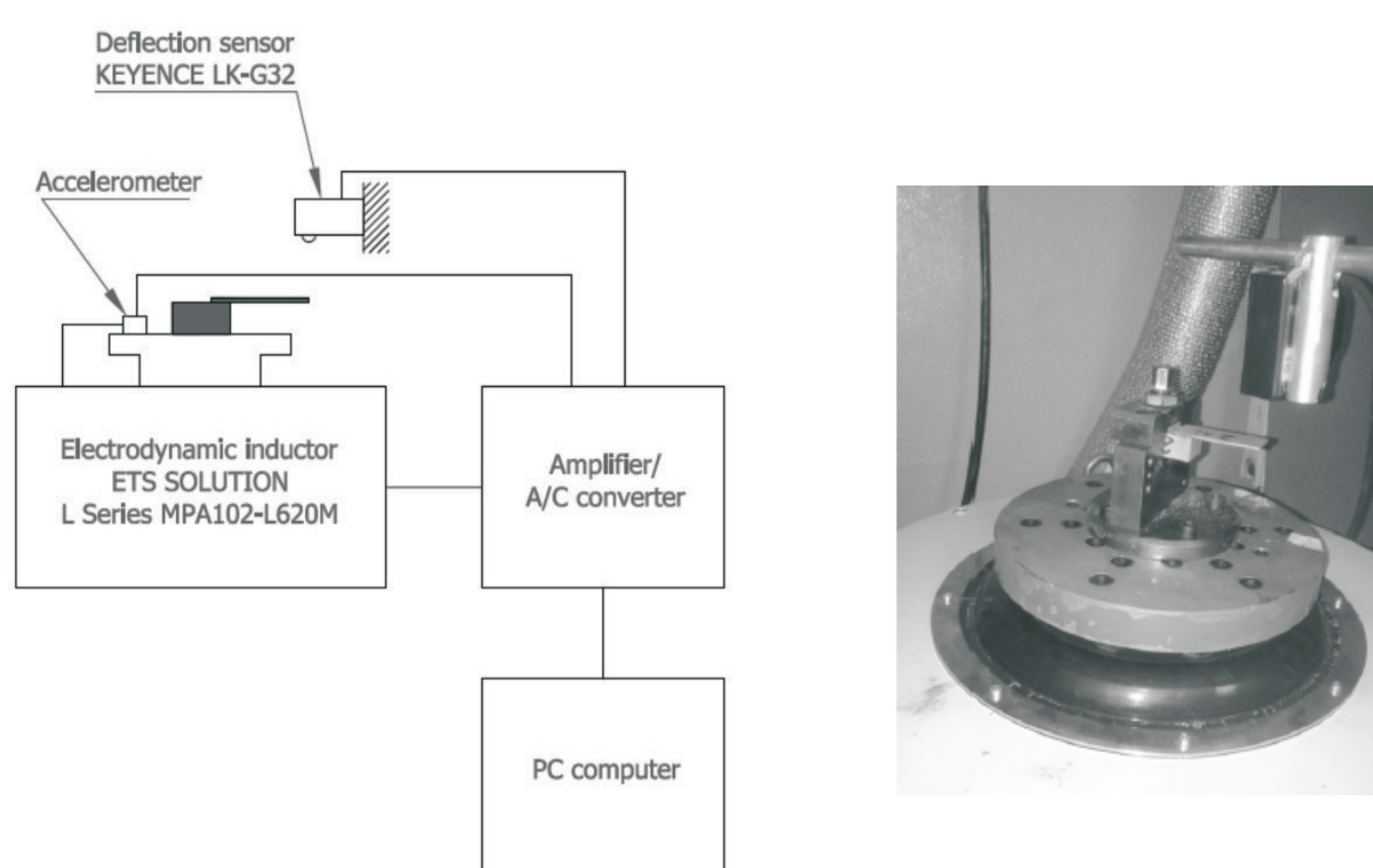
Rys. 1. Próbkę złącza klejowego używaną do badań wytrzymałościowych  
Fig. 1. Specimen of adhesive joint used in strength testing



Rys. 2. Warianty stosowanych modyfikacji próbek klejowych  
Fig. 2. Variants used to modify the structural adhesive samples

Badania wytrzymałości statycznej przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej ZWICK Z100. W celu uzyskania odpowiedniego obciążenia próbki, wykorzystano uchwyt dwuprzegubowy umożliwiając wymuszenie obciążenia z dominacją naprężeń normalnych w spoinie.

Badania wytrzymałości zmęczeniowej prowadzono na elektrodynamycznym wzbudniku drgań ETS SOLUTION L Series MPA-102-L620M. Układ pomiarowy wyposażono dodatkowo w zewnętrzne czujniki, jakimi są laserowy czujnik przemieszczenia do pomiaru amplitudy drgań próbki, a także akcelrometr. Cały system pomiarowy sprzężony jest z komputerem PC. Specjalnie napisany program do wspomagania badań umożliwia sterowanie procesem pomiarowym, który polega na utrzymywaniu próbki w drganiach przy jej częstotliwości rezonansowej. Częstotliwość rezonansowa próbki jest automatycznie wyszukiwana przez system pomiarowy w podanym przez użytkownika zakresie częstotliwości. Każdy z wariantów próbek poddawany jest drganiom rezonansowym przy trzech różnych poziomach amplitudy, przy czym liczona jest liczba cykli do momentu niemożności utrzymania próbki przy danym poziomie amplitudy, co świadczy o jej zniszczeniu. Rys. 3 przedstawia schemat układu pomiarowego oraz fotografię rzeczywistego stanowiska.

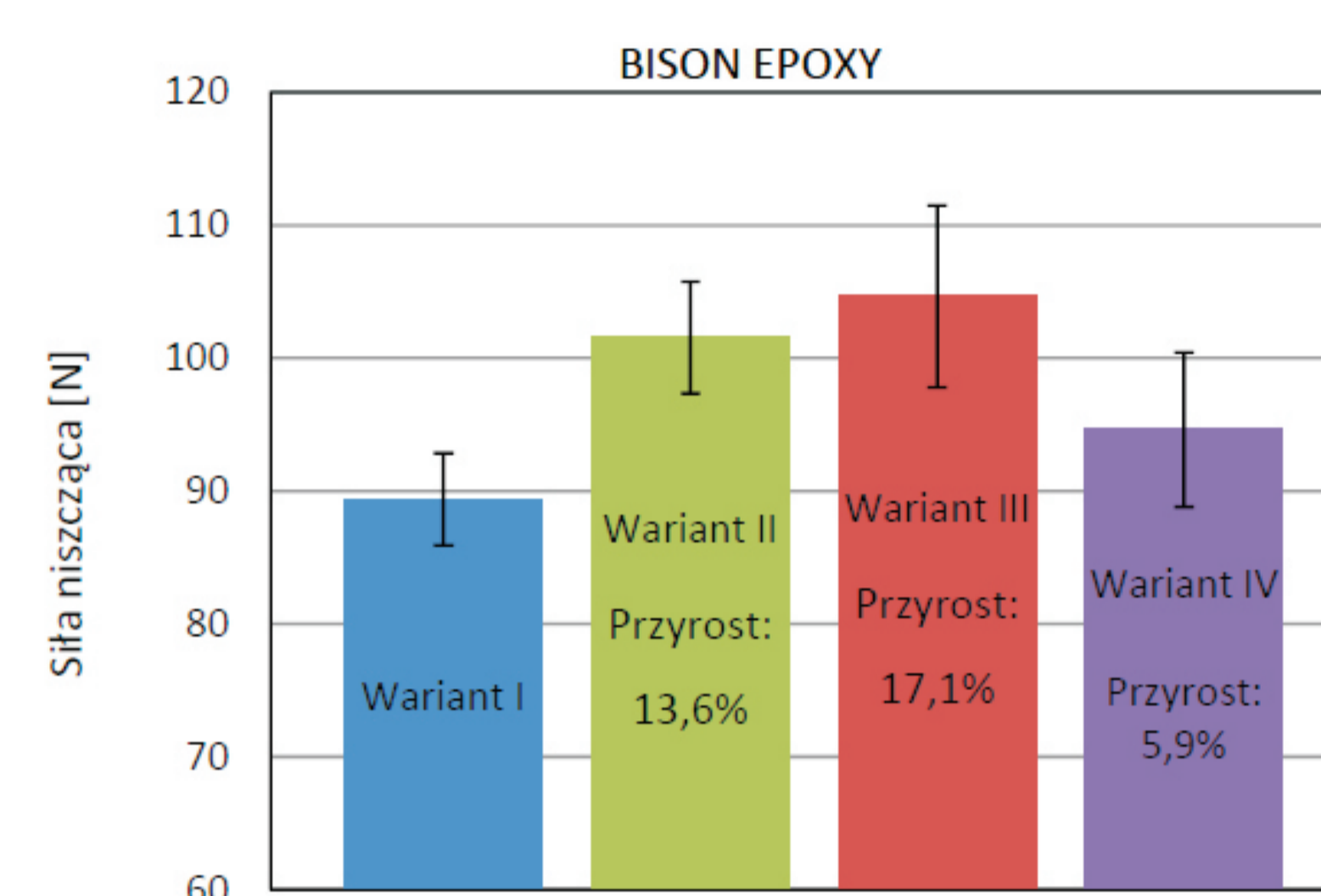


Rys. 3. Schemat stanowiska do badań wytrzymałości zmęczeniowej oraz zdjęcie próbki zamontowanej na stole wzbudnika  
Fig. 3. Diagram of fatigue tests system and photo of sample mounted on inductor

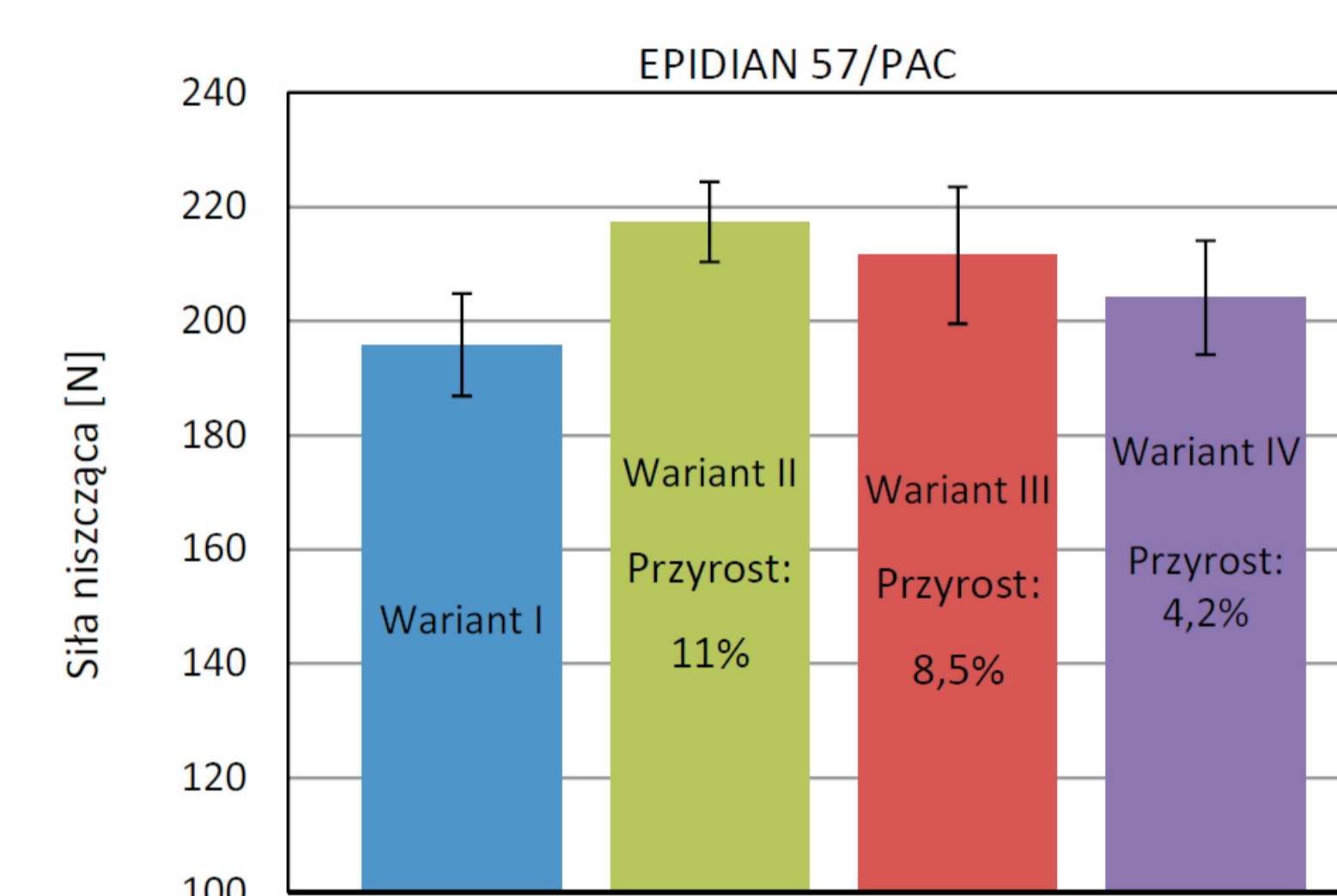
#### Wyniki badań Results

Poniżej przedstawiono wyniki badań wytrzymałości statycznej oraz zmęczeniowej dla wymienionych poniżej wariantów próbek:

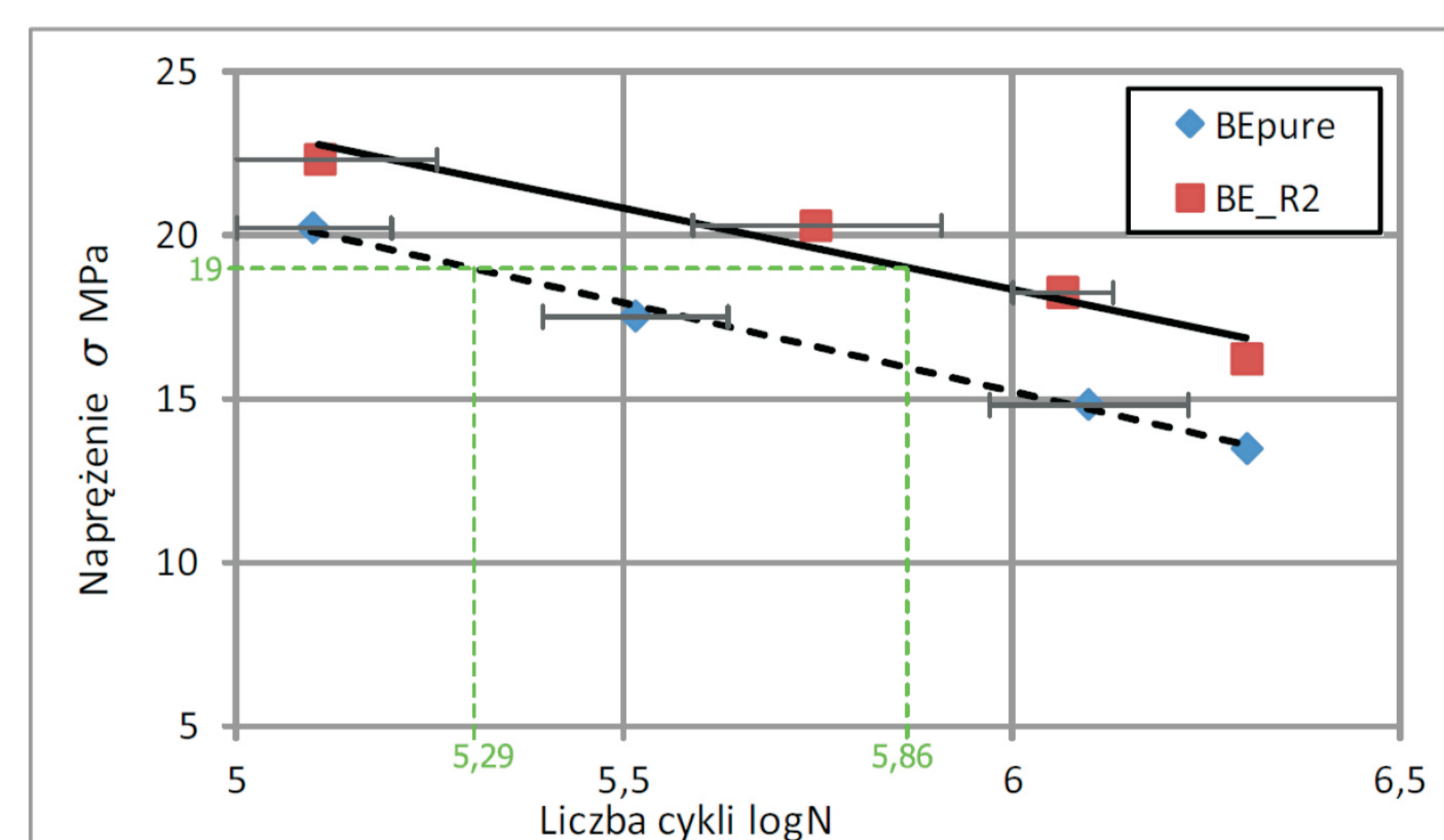
- wariant I: próbka złącza klejowego bez modyfikacji konstrukcyjnych;
- wariant II: próbka złącza klejowego z modyfikacją konstrukcyjną w formie promienia R2 (rys. 2c);
- wariant III: próbka złącza klejowego z modyfikacją konstrukcyjną w formie fazy 2x2 (rys. 2a);
- wariant IV: próbka złącza klejowego z modyfikacją konstrukcyjną w formie fazy 2x4 (rys. 2b);



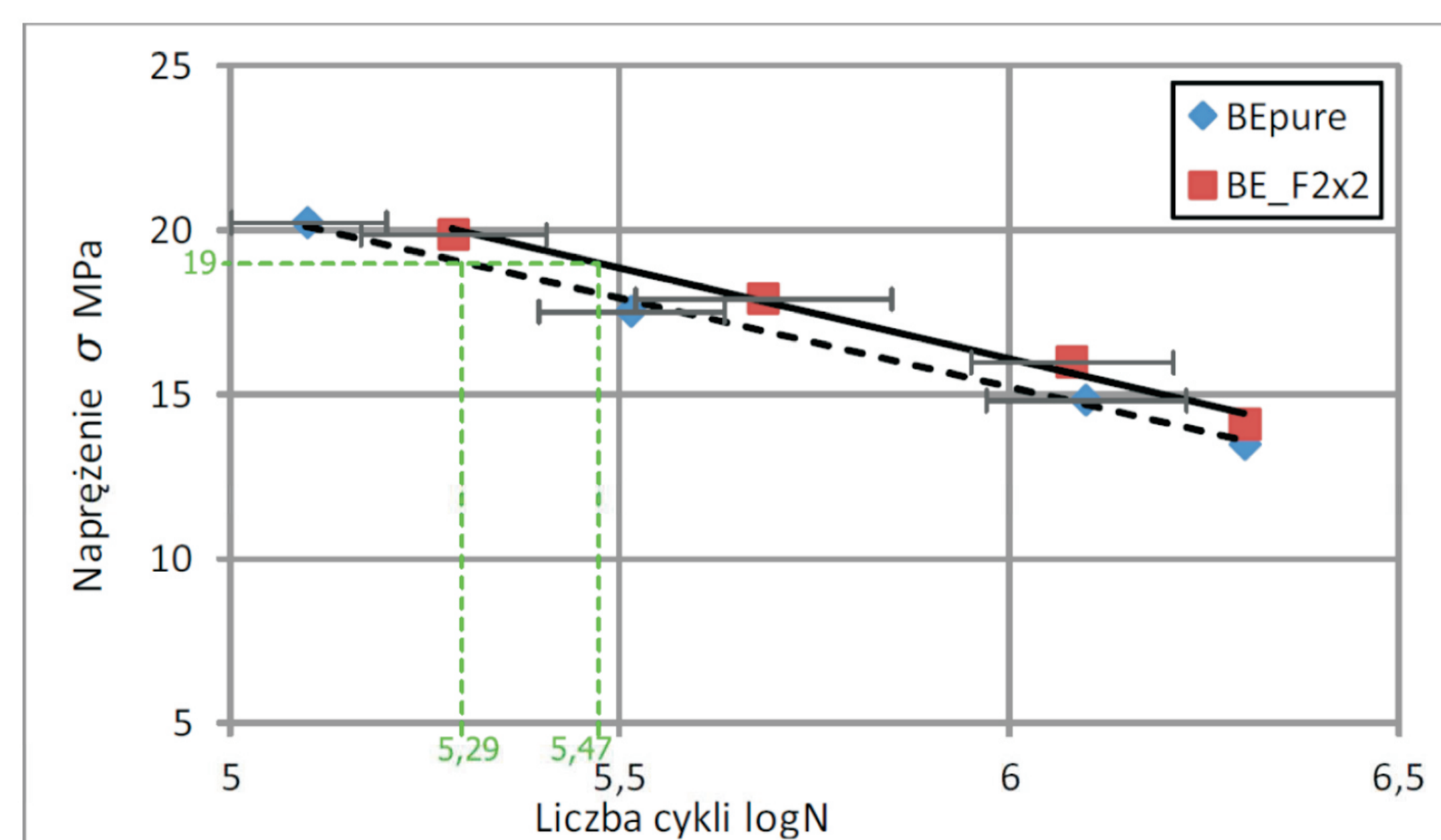
Rys. 4. Porównanie wyników badań wytrzymałości statycznej dla rozpatrywanych wariantów dla kleju Bison Epoxy  
Fig. 4. Comparison of static strength tests results for all considered variants of joints for Bison Epoxy adhesive



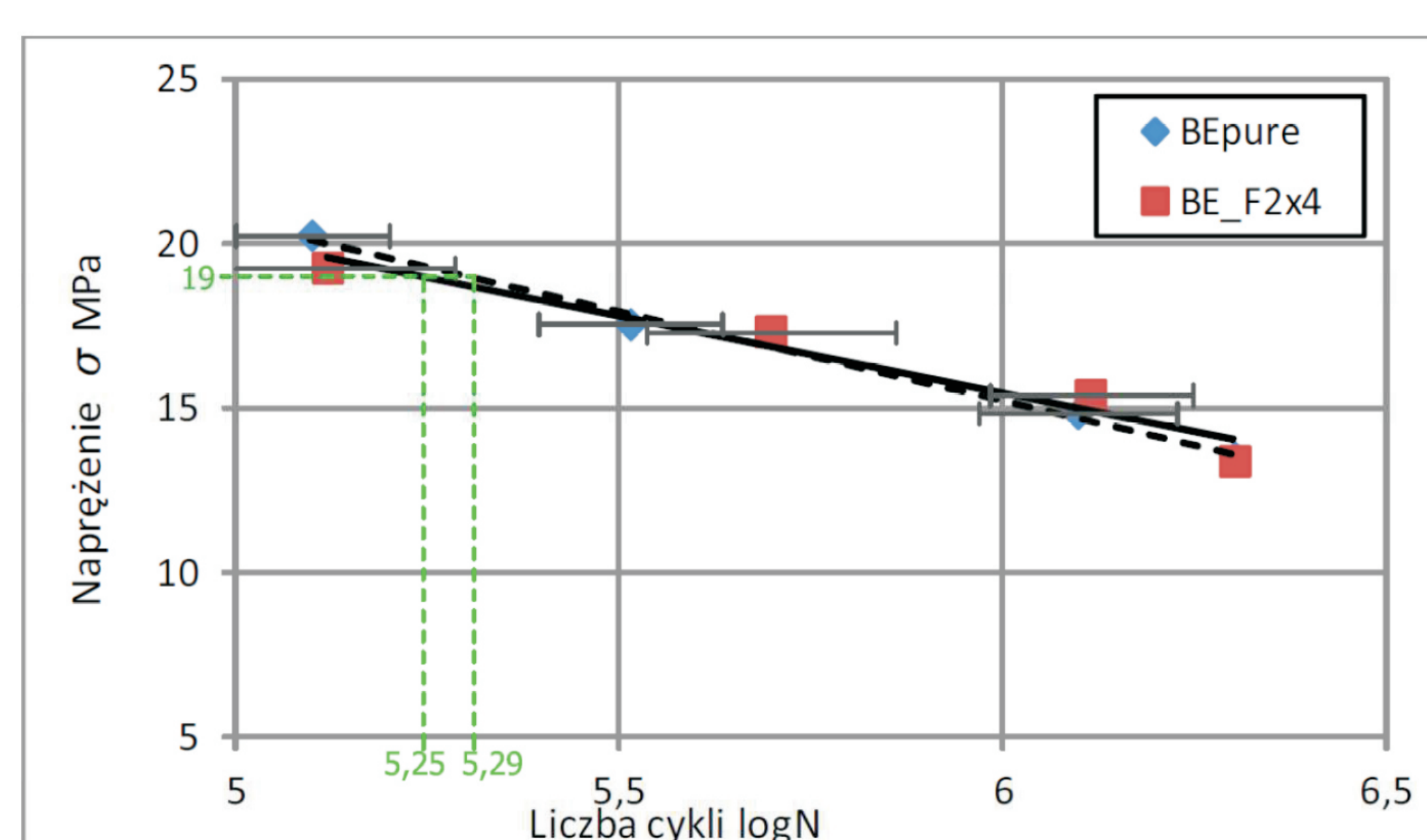
Rys. 5. Porównanie wyników badań wytrzymałości statycznej dla rozpatrywanych wariantów dla kleju Epidian 57/PAC  
Fig. 5. Comparison of static strength tests results for all considered variants of joints for Epidian 57/PAC adhesive



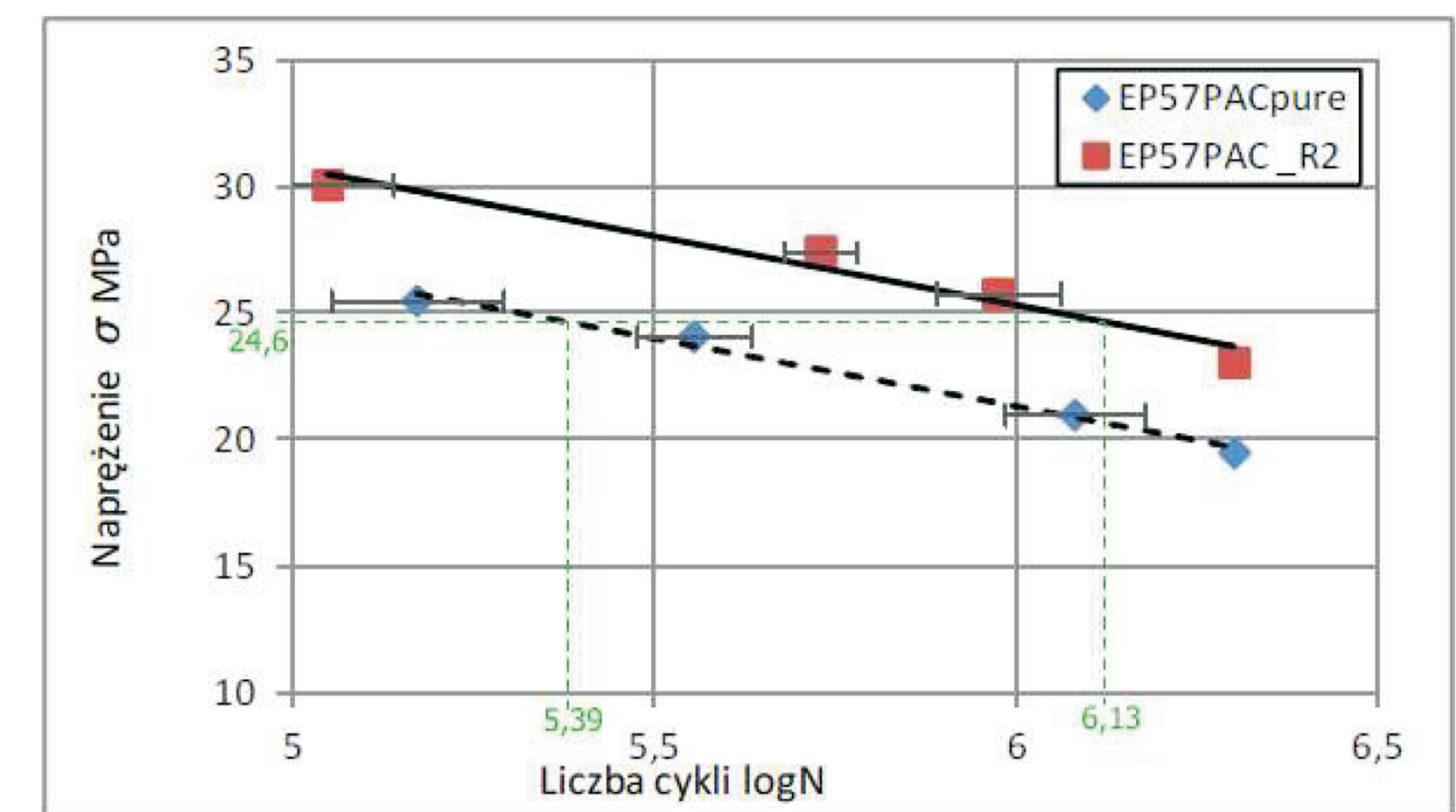
Rys. 6. Porównanie krzywych zmęczeniowych dla próbek klejowych kompozycją Bison Epoxy w wariantach I i II  
Fig. 6. Comparison of fatigue curves for Bison Epoxy adhesive variants I and II



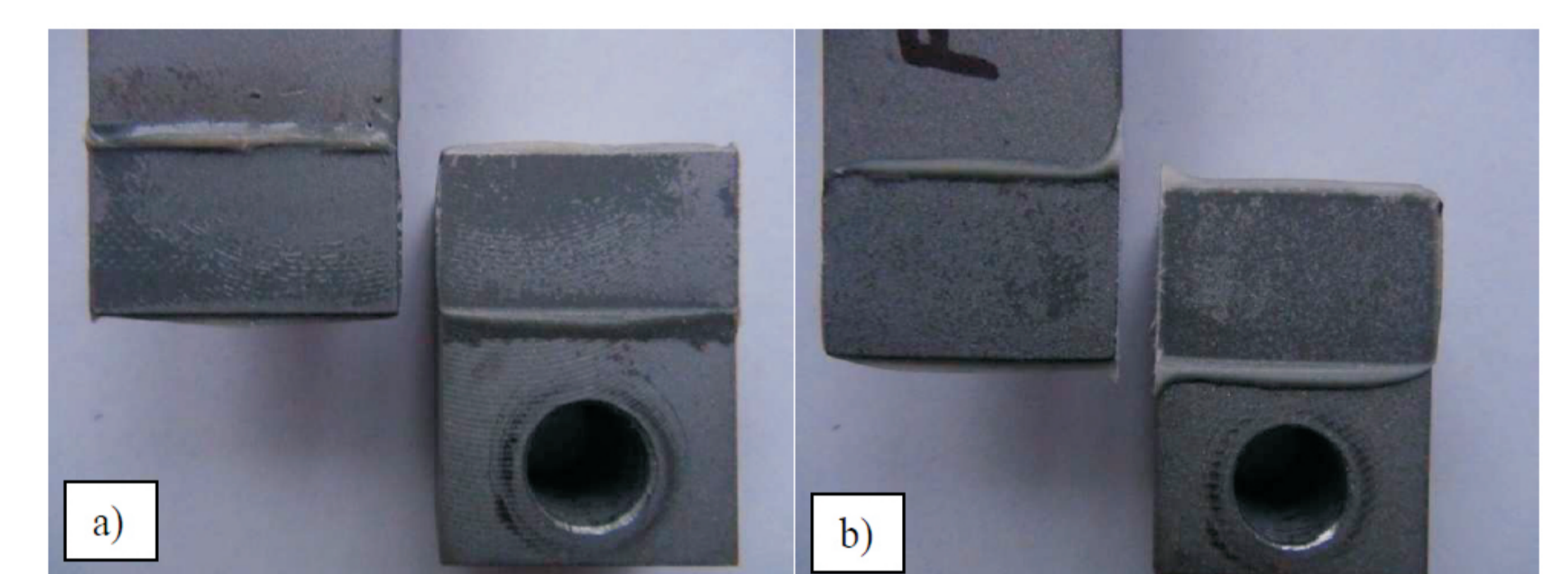
Rys. 7. Porównanie krzywych zmęczeniowych dla próbek klejowych kompozycją Bison Epoxy w wariantach I i III  
Fig. 7. Comparison of fatigue curves for Bison Epoxy adhesive variants I and III



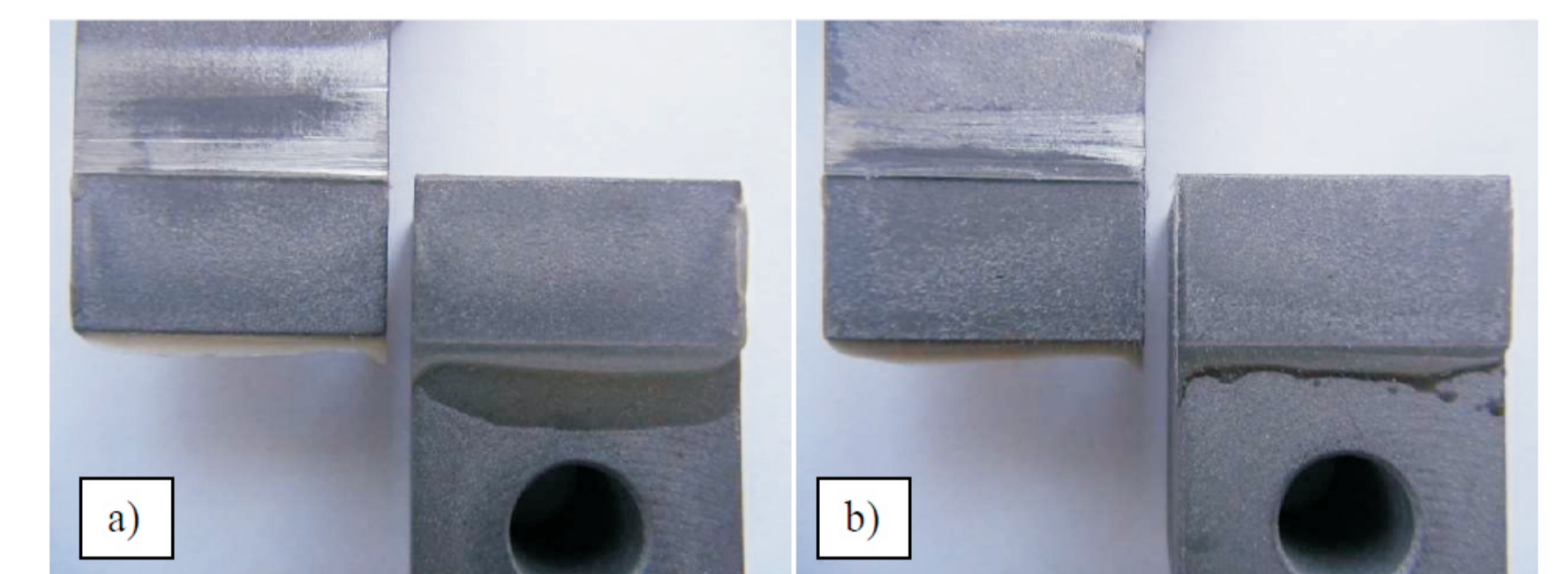
Rys. 8. Porównanie krzywych zmęczeniowych dla próbek klejowych kompozycją Bison Epoxy w wariantach I i IV  
Fig. 8. Comparison of fatigue curves for Bison Epoxy adhesive variants I and IV



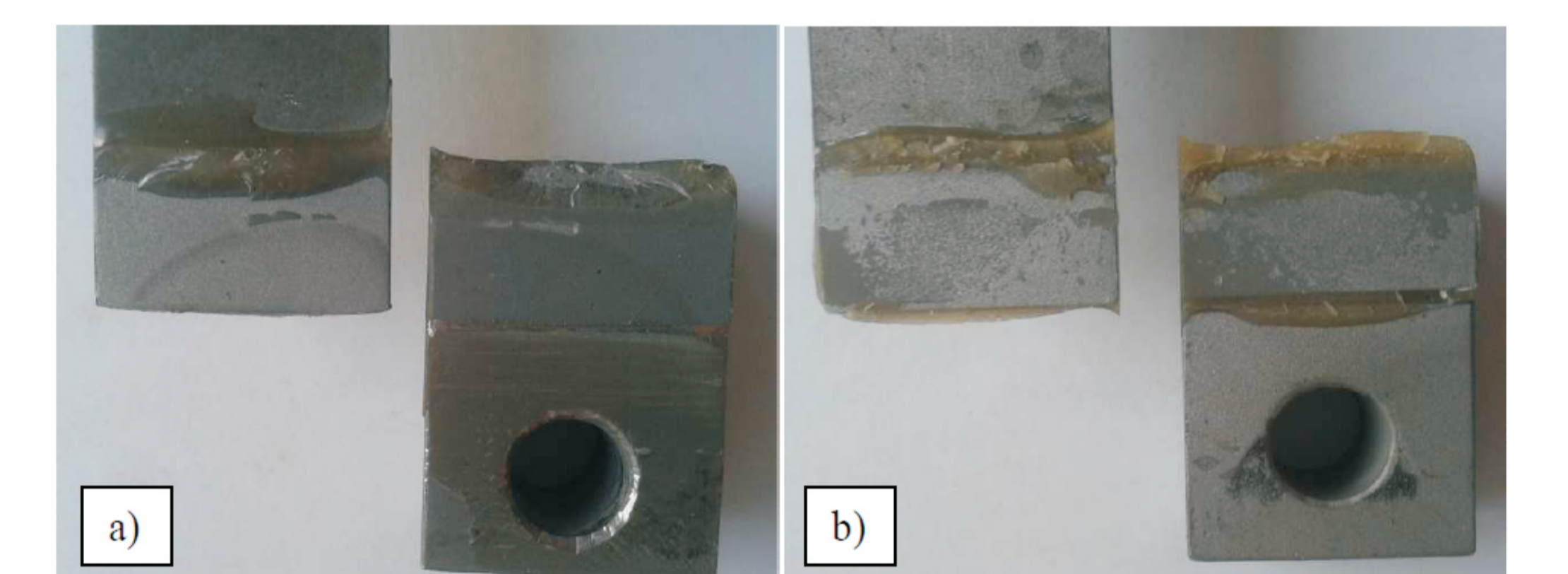
Rys. 9. Porównanie krzywych zmęczeniowych dla próbek klejowych kompozycją Epidian 57/PAC w wariantach I i II  
Fig. 9. Comparison of fatigue curves for Epidian 57/PAC adhesive variants I and II



Rys. 10. Powierzchnie złomów po badaniach wytrzymałości statycznej dla próbek klejowych kompozycją Bison Epoxy  
Fig. 10. Failure surface of specimen subjected to static peel for Bison Epoxy adhesive



Rys. 11. Powierzchnie złomów zmęczeniowych dla próbek klejowych kompozycją Bison Epoxy  
Fig. 11. Failure surface of specimen after fatigue tests for Bison Epoxy adhesive



Rys. 12. Powierzchnie złomów zmęczeniowych dla próbek klejowych kompozycją Epidian 57/PAC  
Fig. 12. Failure surface of specimen after fatigue tests for Epidian 57/PAC adhesive

#### Wnioski Conclusions

Zwiększenie grubości spoiny klejowej w strefie przykrawędziowej złącza adhezyjnego korzystnie wpływa na wytrzymałość statyczną oraz zmęczeniową na oddzieranie. W przypadku wytrzymałości statycznej odnotowano wzrost nośności na oddzieranie o ok. 20%. Badania wytrzymałości zmęczeniowej wykazały jej wzrost o 16,2% dla kompozycji Bison Epoxy oraz o 13,9% dla kompozycji Epidian 57/PAC. Zmiany konstrukcyjne wprowadzone w strefie przykrawędziowej przyczyniły się również do znacznego wzrostu trwałości zmęczeniowej badanych połączeń klejowych. Trwałość zmęczeniowa połączeń adhezyjnych sklejenych kompozycją klejową Bison Epoxy zwiększyła się o 265%, natomiast połączeń sklejenych kompozycją Epidian 57/PAC o 450%.

The paper presents results of a research aimed at determining the possibility to improve static strength and fatigue properties of peel-loaded adhesive-bonded joints by constructional modification of a joint. The fatigue strength tests were carried out on electromagnetic inductor at the adhesive-bonded joint specimen's resonance frequency. The tests were carried out on specimens bonded by means of the BISON EPOXY and EPIDIAN 57 epoxy compositions with the PAC hardener. Joined elements were modified by carrying out chamfer or fillet to enlarge of an adhesive layer thickness which aim was to reduce stress concentration in frontal part of a joint. Mentioned modification is a result of research that confirms an existence of stress concentration on short section of adhesive joint frontal part. That phenomenon can lead to quick initiation of adhesive joint destruction. Fatigue strength tests revealed significant improvement of fatigue endurance and static strength.

#### Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

#### Referaty

1. Zielecki W., Kubit A.: **Wpływ proszkowych nanonapełniaczy ceramicznych na wytrzymałość statyczną połączeń klejowych**; III Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Połączenia Montażowe Konstrukcje i Technologie, Rzeszów – Hoczew, 21–24 maja 2013 r.
2. W. Zielecki, Kubit A.: **Badania statyczne wytrzymałości na oddzieranie połączeń klejowych**; VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Modułowe Technologie i Konstrukcje w Budowie Maszyn, Rzeszów – Łódź, 22–25 maja 2012 r.
3. Zielecki W., Kubit A.: **Wpływ modyfikacji konstrukcyjnych na wytrzymałość zmęczeniową połączeń klejowych**; IV Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Technika i Technologia Montażu Maszyn; Rzeszów- Berezka, 27-30 maja 2014 r.

#### Publikacje

1. Zielecki W., Kubit A.: **Wpływ proszkowych nanonapełniaczy ceramicznych na wytrzymałość statyczną połączeń klejowych**; Technologia i Automatyka Montażu 4/2013, s. 45-48;
2. Zielecki W., Kubit A.: **Badania statyczne wytrzymałości na oddzieranie połączeń klejowych**; Technologia i Automatyka Montażu 4/2012, s. 37-40
3. Zielecki W., Kubit A.: **Wpływ modyfikacji konstrukcyjnych na wytrzymałość zmęczeniową połączeń klejowych**; Technologia i Automatyka Montażu 4/2014, s. 61-64;

#### Prace mgr, dr, hab. Prace doktorskie

Tytuł: **Determinanty wytrzymałości połączeń klejowych na oddzieranie**  
Autor: mgr inż. Andrzej Kubit  
Promotor: dr hab. inż. Władysław Zielecki, prof. Prz  
Status: *W trakcie opracowania wydawniczego*