

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

Badania wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcyjnych połączeń klejowych na oddzieranie

Research of fatigue strength of structural adhesive joints subjected to peel

W pracy przedstawiono wyniki badań określających wpływ modyfikacji kompozycji klejowych oraz modyfikacji konstrukcyjnych złącza na wytrzymałość i trwałość zmęczeniową złącza klejowego obciążonego na oddzieranie. Badaniom poddano próbki sklejone kompozycjami epoksydowymi BISON EPOXY oraz EPIDIAN 57 z utwardzaczem PAC. Modyfikacje klejów polegały na wprowadzeniu w strukturę klejów epoksydowych nanonapełniaczy w postaci nanoprošków materiałów ceramicznych oraz nanorurek węglowych. Zastosowano następujące napełniacze:

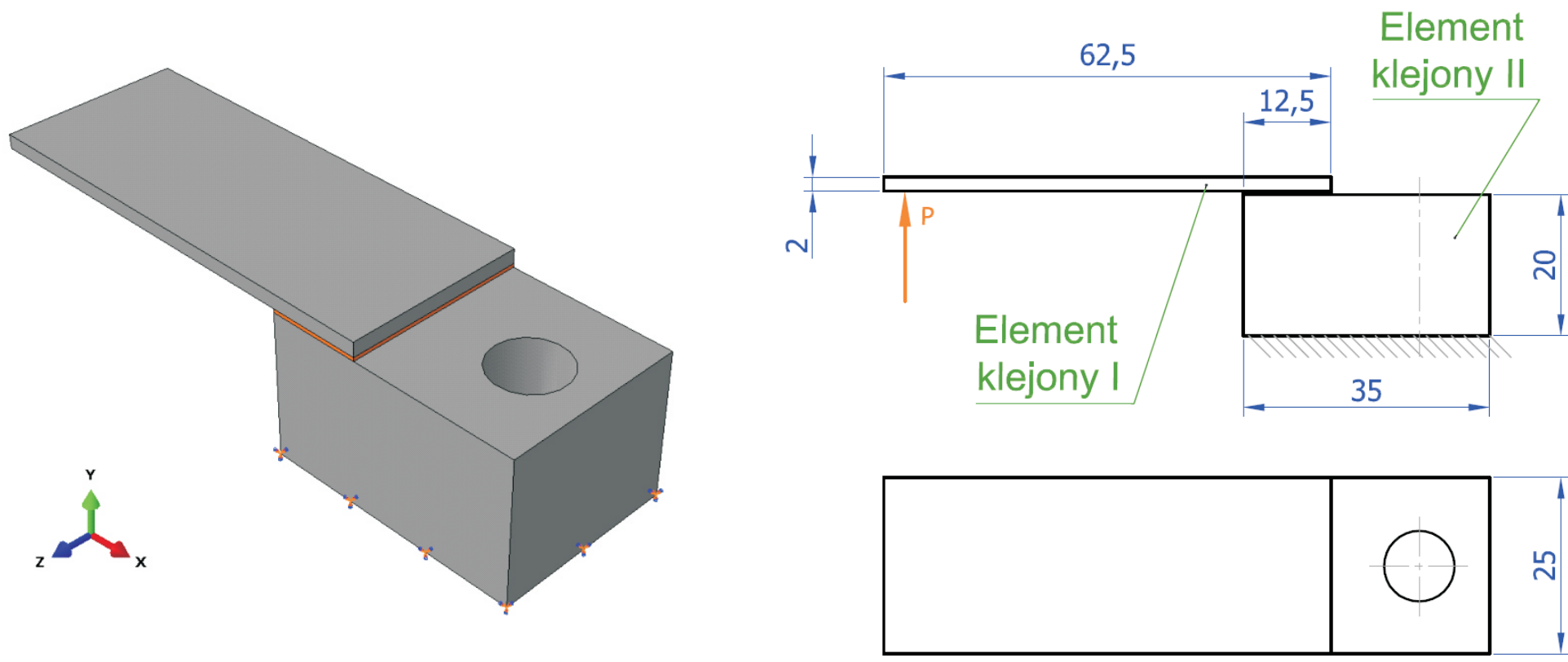
- nanoprošek krzemionki SiO_2 o wielkości cząstek do 10nm,
- nanoprošek Al_2O_3 o wielkości cząstek do 30nm,
- nanorurki węglowe.

Modyfikacje konstrukcyjne elementów klejowych polegały na wykonaniu faz lub promieni celem zwiększenia grubości warstwy kleju w strefie czołowej złącza. Warianty modyfikacji konstrukcyjnych przedstawia rys. 2.

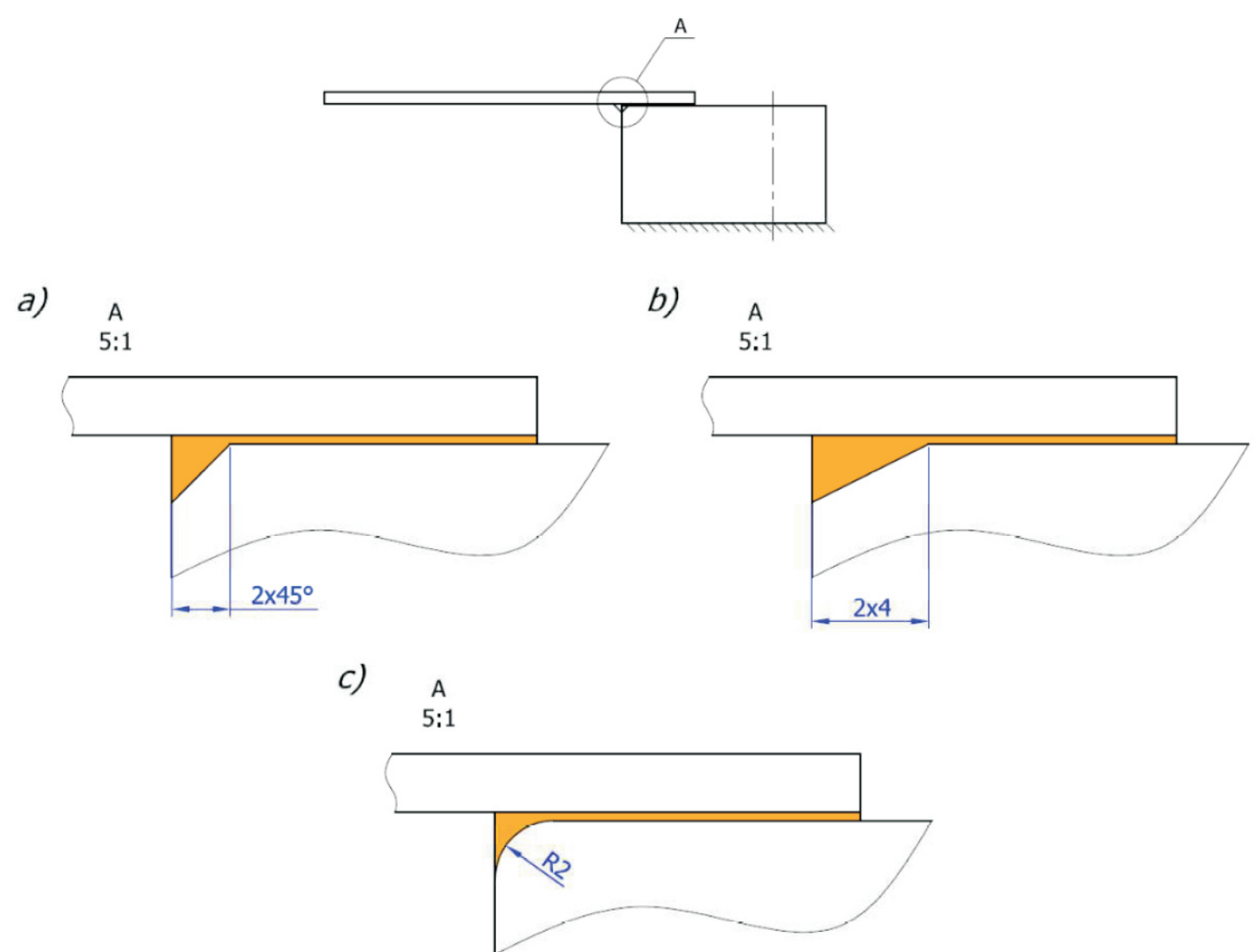
Results of a research aimed at determining the possibility to improve fatigue properties of peel-loaded adhesive-bonded joints of steel parts by nanofillers added to epoxy resins and constructional modification of a joint have been presented. The fatigue strength tests were carried out on electromagnetic 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. Adherents were prepared with steel S235JR. Epoxy resins were modified by filling by nanopowders of ceramic materials like nanosilica and nanoalumina and carbon nanotubes. The paper also presents influence of structural modification on fatigue. 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.

Metodyka badań

Badania prowadzono dla próbek przedstawionych na rys. 1. Dla poszczególnych wariantów przeprowadzono badania wytrzymałości oraz trwałości zmęczeniowej na oddzieranie złącza klejowych przy granicznej liczbie cykli 2×10^6 . Obydwa elementy klejone wykonano ze stali S235JR. Stosowano dwa różne kleje epoksydowe dedykowane do spajania metali tj. Bison Epoxy oraz Epidian 57 z utwardzaczem PAC. Dla wszystkich wariantów złączy zastosowano jednakową metodę przygotowania powierzchni oraz utrzymano te same warunki utwardzania kompozycji klejowych. Każda z powierzchni klejonych została poddana obróbce strumieniowo-ściernej elektrokorundem 95A w następujących warunkach: wielkość ziarna $w_z = 0,27 \text{ mm}$, ciśnienie powietrza $p = 0,8 \pm 0,1 \text{ MPa}$, czas $t = 60 \text{ s}$. 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. Wpływy 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.

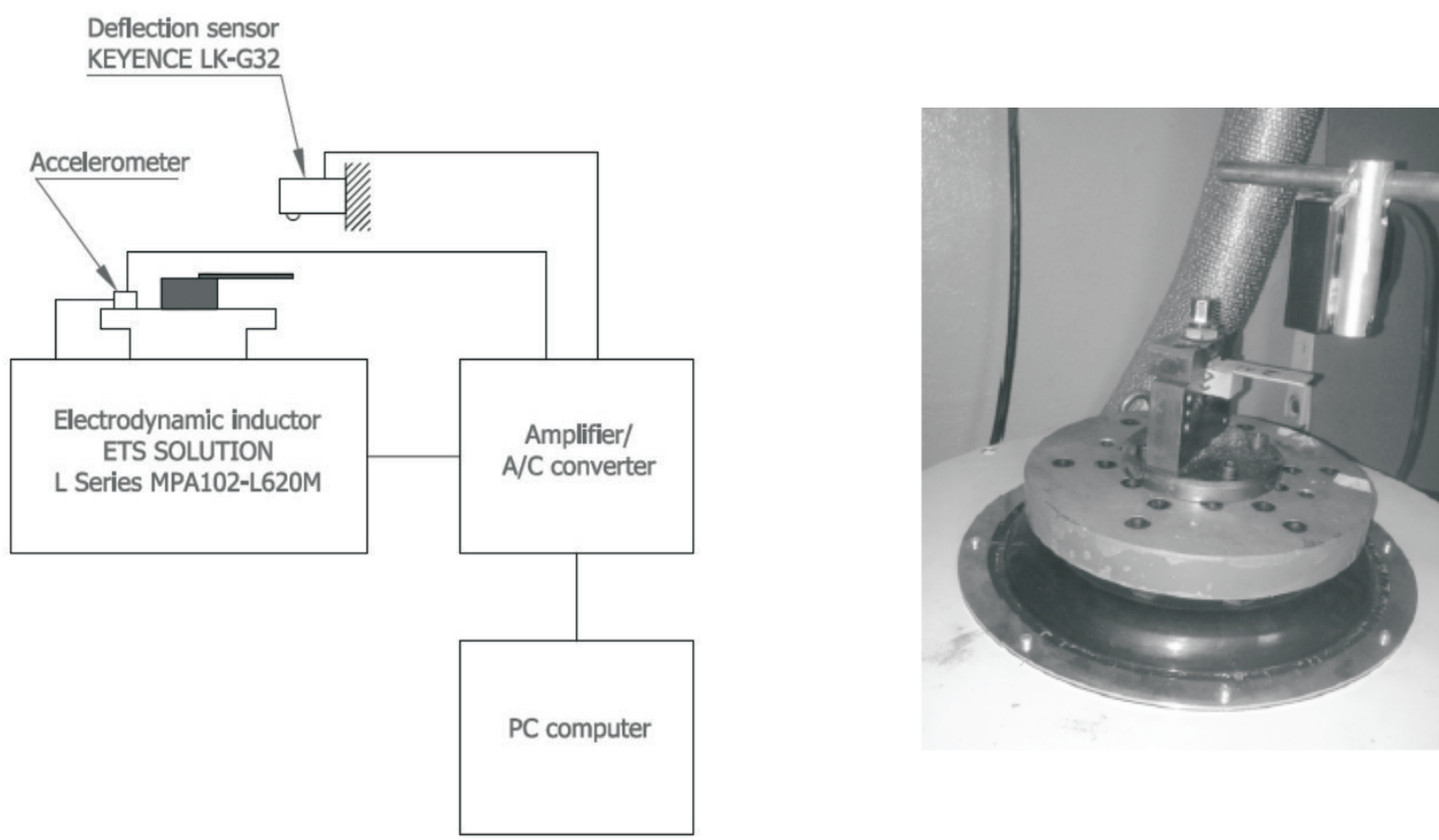


Rys. 1. Próbkę złącza klejowego używaną do badań wytrzymałościowych
Fig. 1. Specimen of adhesive joint used in strength testing



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

Badania wytrzymałości zmęczeniowej prowadzono na elektrodynamicznym 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 akcelerator. 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 amplitud, 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.

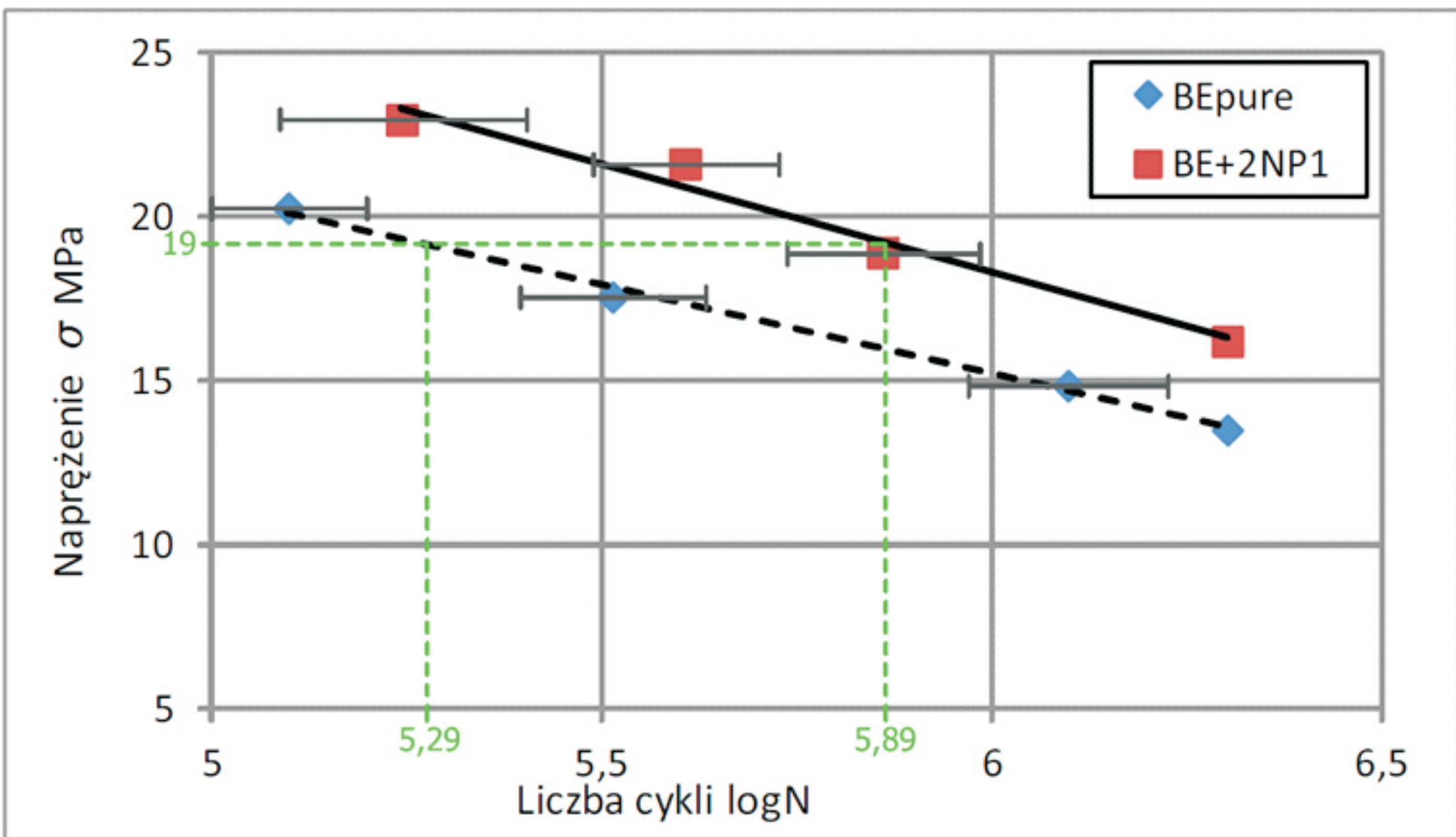


Rys. 3. Schemat stanowiska do badań wytrzymałości zmęczeniowej oraz zdjęcie próbki zamontowanej na stole wzbudnika
Fig. 3. Diagram of fatigue tests system and photo of sample mounted on inductor

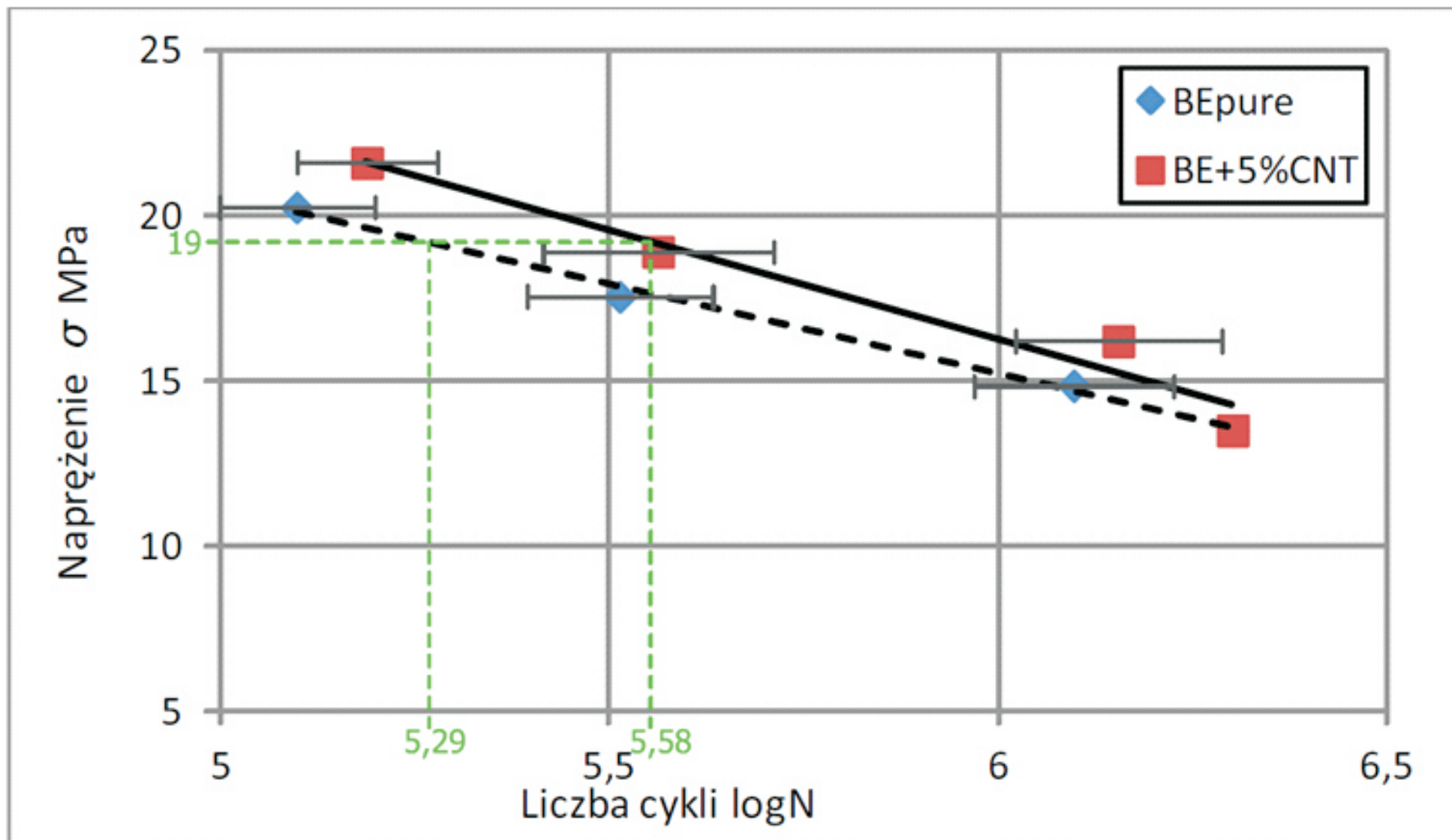
Wyniki badań Results

Wyniki badań przedstawiono dla następujących wariantów złączy:

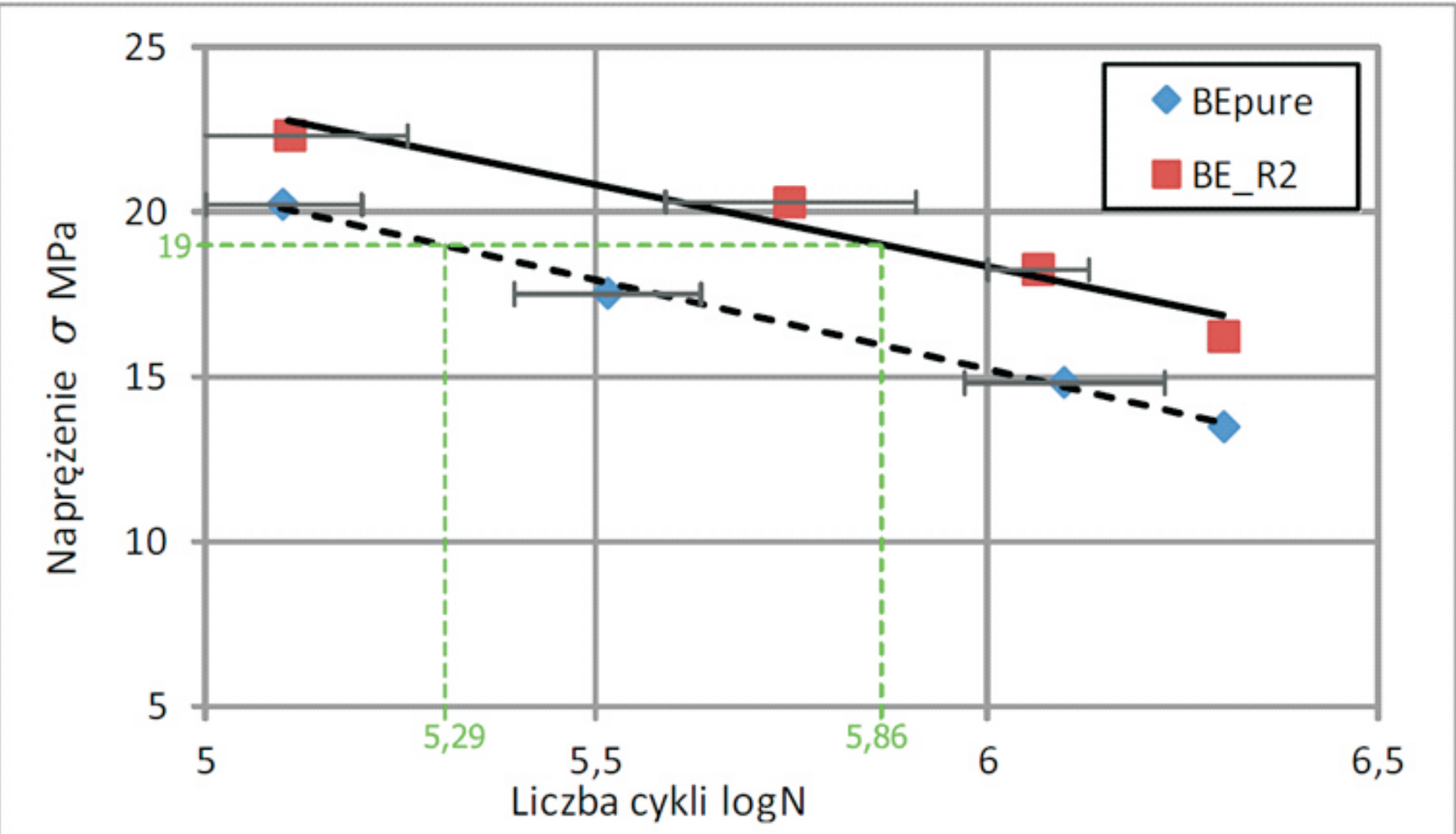
- I **BEpure**: złącze w wariancie podstawowym spajane kompozycją klejową Bison Epoxy,
- II **BE+2NP1**: złącze klejone kompozycją klejową Bison Epoxy z zawartością 2% cz.w. nanoprošku SiO_2 ,
- III **BE+5%CNT**: złącze klejone kompozycją klejową Bison Epoxy z zawartością 5% cz.w. nanorurek węglowych,
- IV **BE_R2**: złącze z modyfikacją konstrukcyjną w formie promienia R2 (rys. 2c) klejone nienapełnioną kompozycją klejową Bison Epoxy,
- V **BE_F2x2**: złącze z modyfikacją konstrukcyjną w formie fazy 2x2 (rys. 2a) klejone nienapełnioną kompozycją klejową Bison Epoxy,
- VI **BE_F2x4**: złącze z modyfikacją konstrukcyjną w formie fazy 2x4 (rys. 2b) klejone nienapełnioną kompozycją klejową Bison Epoxy,
- VII **EP57PACpure**: złącze w wariancie podstawowym spajane kompozycją klejową Epidian 57 z utwardzaczem PAC,
- VIII **EP57PAC+2%NP1**: złącze klejone kompozycją klejową Epidian 57/PAC z zawartością 2% cz.w. nanoprošku SiO_2 ,
- IX **EP57PAC+5%CNT**: złącze klejone kompozycją klejową Epidian 57/PAC z zawartością 5% cz.w. nanorurek węglowych,
- X **EP57PAC_R2**: złącze z modyfikacją konstrukcyjną w formie promienia R2 (rys. 2c) klejone nienapełnioną kompozycją klejową Epidian 57/PAC,



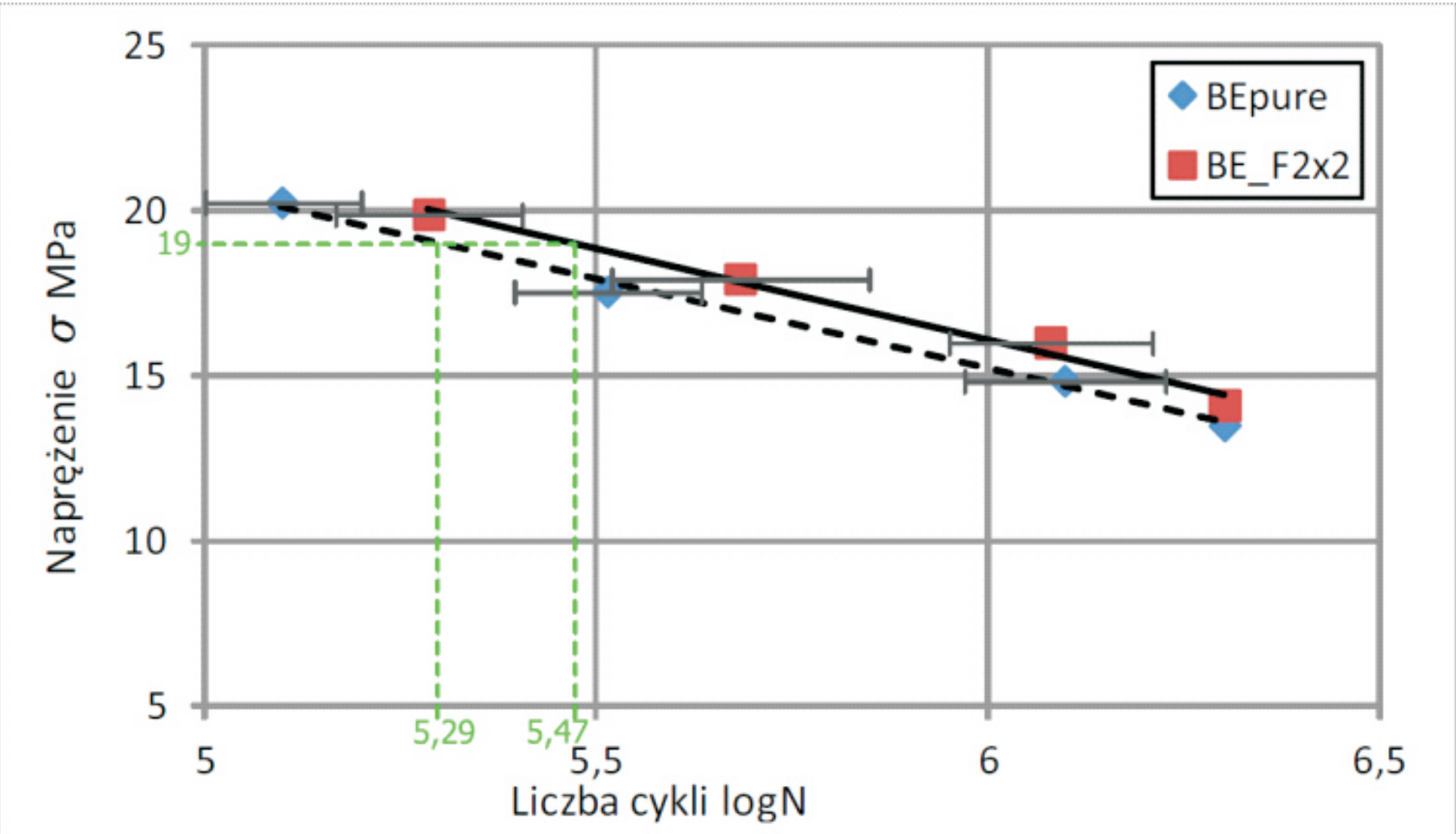
Rys. 4. Porównanie krzywych zmęczeniowych dla próbek klejonych kompozycją Bison Epoxy w wariantach I i II
Fig. 4. Comparison of fatigue curves for Bison Epoxy adhesive variants I and II



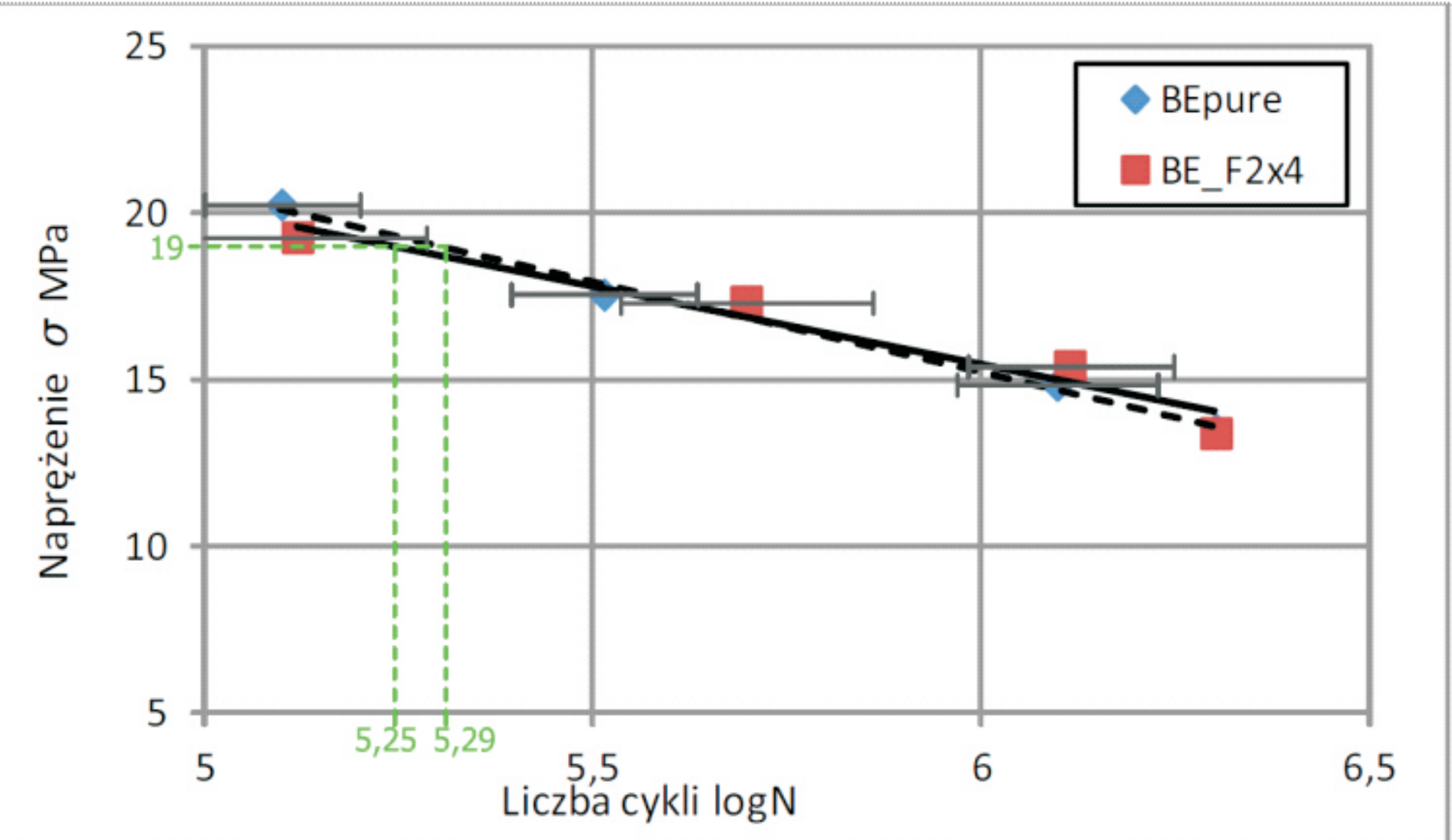
Rys. 5. Porównanie krzywych zmęczeniowych dla próbek klejonych kompozycją Bison Epoxy w wariantach I i III
Fig. 5. Comparison of fatigue curves for Bison Epoxy adhesive variants I and III



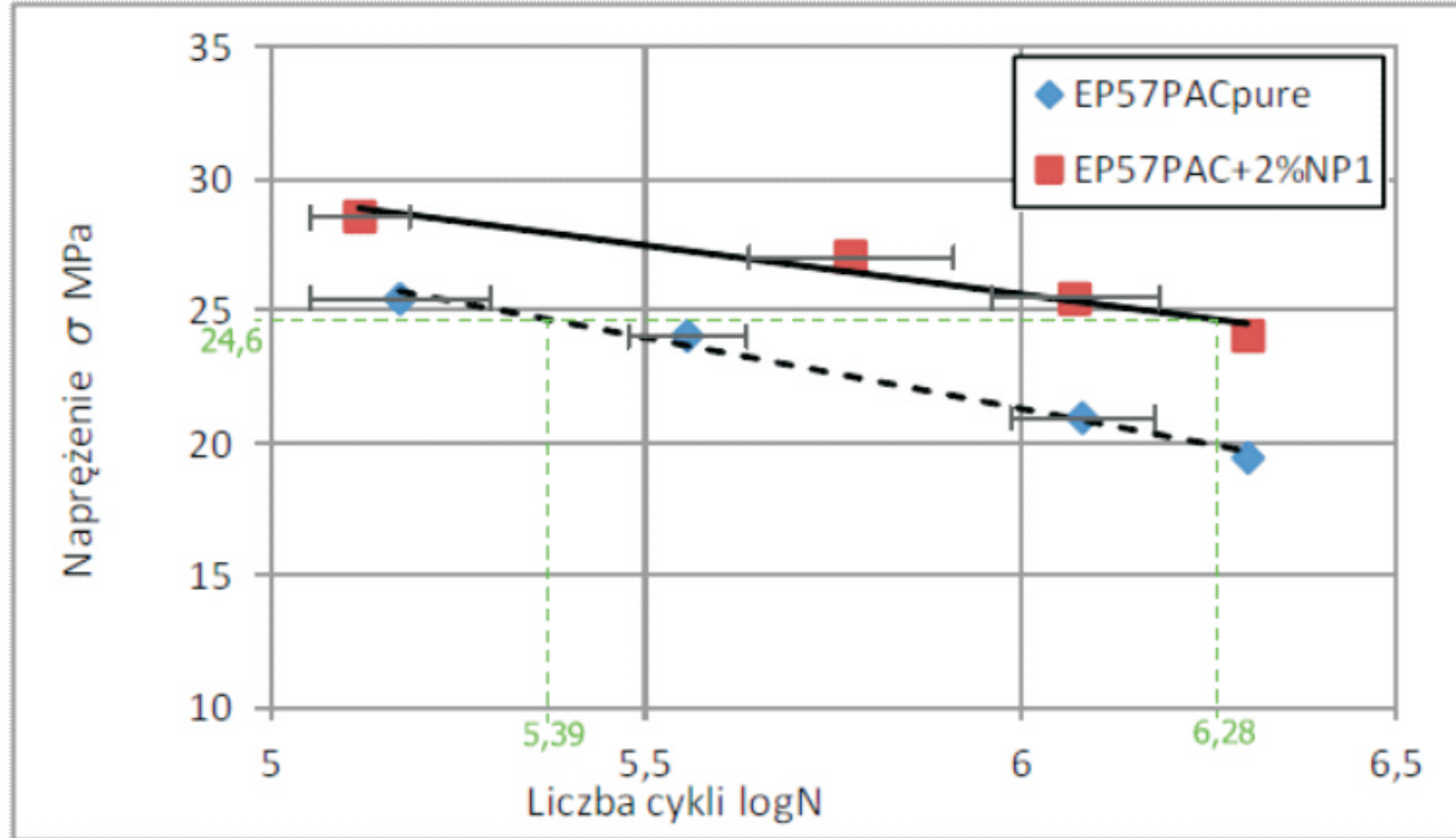
Rys. 6. Porównanie krzywych zmęczeniowych dla próbek klejonych kompozycją Bison Epoxy w wariantach I i IV
Fig. 6. Comparison of fatigue curves for Bison Epoxy adhesive variants I and IV



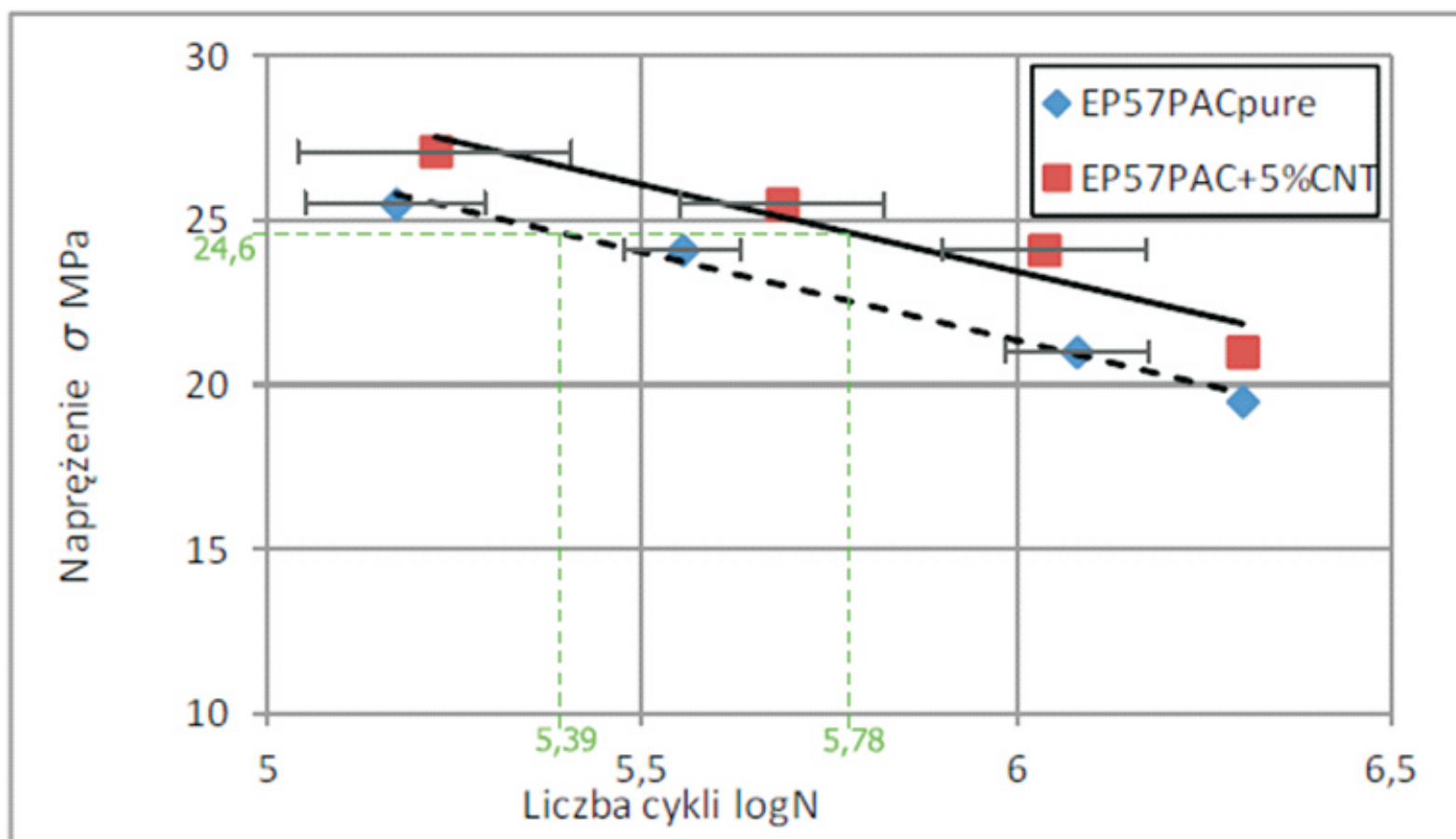
Rys. 7. Porównanie krzywych zmęczeniowych dla próbek klejonych kompozycją Bison Epoxy w wariantach I i V
Fig. 7. Comparison of fatigue curves for Bison Epoxy adhesive variants I and V



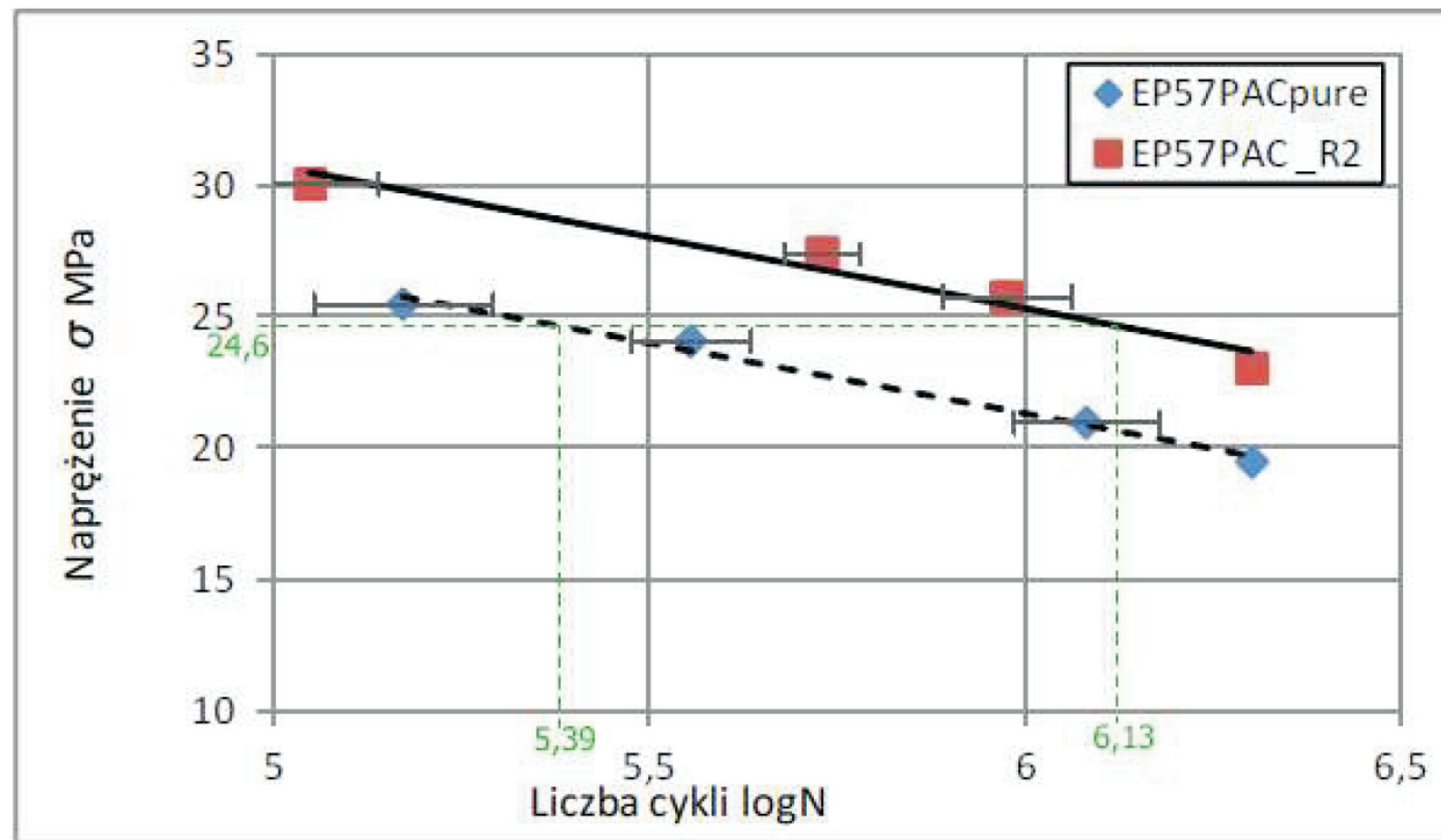
Rys. 8. Porównanie krzywych zmęczeniowych dla próbek klejonych kompozycją Bison Epoxy w wariantach I i VI
Fig. 8. Comparison of fatigue curves for Bison Epoxy adhesive variants I and VI



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



Rys. 10. Porównanie krzywych zmęczeniowych dla próbek klejonych kompozycją Epidian 57/PAC w wariantach VII i IX
Fig. 10. Comparison of fatigue curves for Epidian 57/PAC adhesive variants VII and IX



Rys. 11. Porównanie krzywych zmęczeniowych dla próbek klejonych kompozycją Epidian 57/PAC w wariantach VII i X
Fig. 11. Comparison of fatigue curves for Epidian 57/PAC adhesive variants VII and X

Wnioski Conclusions

Wykazano pozytywny wpływ wybranych nanonapełniaczy na wysokocyklową wytrzymałość oraz trwałość zmęczeniową. W przypadku kompozycji klejowej Bison Epoxy w najkorzystniejszym wariancie tj. klej z dodatkiem nanoprošku SiO_2 w ilości 2% cz.w. wykazano wzrost wytrzymałości zmęczeniowej z poziomu 13,98 MPa (w wariancie podstawowym) do wartości 16,27 MPa, co przekłada się na wzrost o 16,4%. Trwałość zmęczeniowa przy obciążeniu 19 MPa wzrosła w stosunku do wariantu podstawowego z poziomu ~195 000 cykli do ~776 000 cykli. Dla kompozycji klejowej Epidian 57/PAC także najkorzystniejszy wynik uzyskano dla 2%-owej zawartości nanokrzemionki. W tym wariancie wytrzymałość zmęczeniowa wzrosła z poziomu 19,53 MPa (w wariancie podstawowym) do poziomu 24,06 MPa (wzrost o 23,2%). Znacząco wzrosła trwałość zmęczeniowa dla poziomu naprężeń 24,5 MPa z poziomu ~245 000 cykli (wariant podstawowy) do ~1 905 000 cykli. Także zmiany konstrukcyjne wykazały znaczący wzrost wytrzymałości oraz trwałości zmęczeniowej. Dla obydwu kompozycji klejowych najkorzystniejsze wyniki uzyskano dla wariantu z promieniem R2. Dla kompozycji klejowej Bison Epoxy wykazano wzrost wytrzymałości zmęczeniowej o 16,1% tj. z poziomu 13,98 MPa (wariant podstawowy) do wartości 16,24 MPa. Trwałość zmęczeniowa dla poziomu naprężeń 19 MPa wzrosła z poziomu ~195 000 cykli do ~725 000 cykli.

The results of a research aimed at determining the possibility to improve fatigue properties of peel-loaded adhesive-bonded joints by nanofillers added to epoxy resins and constructional modification of a joint have been presented. 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. Epoxy resins were modified by filling by nanopowders of ceramic materials like nanosilica and nanoalumina and carbon nanotubes. That modifications reveal possibilities of improve fatigue strength and fatigue life of adhesive joints. The best results obtained for variants with 2% weight content of nanosilica. For case od Bison Epoxy adhesives obtained increase of fatigue strength about 16,4% and fatigue life about 298%. 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. Best results were obtained for case with fillet for Epidian 57/PAC adhesive. Fatigue strength were increase from 19,53 MPa to 22,22 MPa it is about 13,8%. And fatigue life for this case increased from 245 000 cycles to 1 349 000 cycles.

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 – Łodyna, 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 Automatykacja Montażu 4/2013, s. 45-48;
 2. Zielecki W., Kubit A.: **Badania statyczne wytrzymałości na oddzieranie połączeń klejowych**; Technologia i Automatykacja Montażu 4/2012, s. 37-40
 3. Zielecki W., Kubit A.: **Wpływ modyfikacji konstrukcyjnych na wytrzymałość zmęczeniową połączeń klejowych**; Technologia i Automatykacja 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*