



Wpływ czynników konstrukcyjnych na trwałość zmęczeniową połączeń klejowych

JAN GODZIMIRSKI, ANDRZEJ KOMOREK*

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Techniki Lotniczej,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

*WSOSP, Katedra Awioniki i Systemów Sterowania,
08-521 Dęblin, ul. Szkoły Podchorążych Lotnictwa 4

Streszczenie. Połączenia klejowe charakteryzuje ograniczona trwałość zmęczeniowa. W pracy przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych połączeń zakładkowych prostych obciążonych na ścinanie, połączeń czołowych obciążonych na odrywanie oraz połączeń czopowych walcowych obciążonych na ścinanie. Próbkę wykonano ze stali St3. Powierzchnie próbek przygotowano do klejenia poprzez piaskowanie i przemywanie benzyną ekstrakcyjną. Próbkę klejono klejem epoksydowym Epidian 57 utwardzanym trietylenotetraaminą w temperaturze 60°C. W badaniach zmęczeniowych próbki obciążano obciążeniem zmiennym o wartości maksymalnej równej 0,5 wytrzymałości doraźnej badanych połączeń. Najwyższą wytrzymałość zmęczeniową wykazały połączenia czopowe walcowe, gorszą zakładkowe, a najmniejszą czołowe. Metodą elementów skończonych obliczono rozkłady naprężeń w spoinach badanych połączeń pod obciążeniem niszczącym i maksymalnym cyklu zmęczeniowego. W obliczeniach uwzględniono nieliniowe właściwości kleju i klejonych elementów. Stwierdzono różniące się rozkłady naprężeń w spoinach badanych połączeń — np. maksymalne naprężenia normalne w spoinach połączeń czopowych walcowych miały wartość ujemną i to mogło być przyczyną dużej trwałości zmęczeniowej takich połączeń. Wykazano, że nie ma liniowej zależności między obciążeniem a wartością maksymalnych naprężeń w spoinach połączeń zakładkowych. Stwierdzono wyraźną zależność trwałości zmęczeniowej spoin klejowych od rodzaju połączenia — kształtu i sposobu obciążenia.

Słowa kluczowe: klejenie, połączenia klejowe, wytrzymałość połączeń klejowych

Symbole UKD: 621.792

Wprowadzenie

Coraz powszechniejsze stosowanie klejenia konstrukcyjnego w budowie maszyn, pojazdów i statków powietrznych [1, 2] oraz wykorzystywanie klejenia w napra-

wach sprzętu [3], w tym także wojskowego [4], wymusza potrzebę umiejętności prognozowania nie tylko wytrzymałości doraźnej takich połączeń [5], ale również ich statycznej trwałości czasowej [6] oraz trwałości zmęczeniowej. Trwałość zmęczeniowa połączeń klejowych zależy od wielu czynników: materiałowych, technologicznych i konstrukcyjnych [7].

Rozkład naprężeń w spoinie klejowej istotnie zależy od kształtu połączenia klejowego oraz sposobu jego obciążenia. Wykonując eksperymentalne badania zmęczeniowe oraz obliczenia numeryczne połączeń zakładkowych, wykazano [8], że nie ma korelacji między wartością obciążenia a stopniem wyężenia spoiny klejowej (wartością naprężeń zredukowanych — maksymalnych głównych). Stwierdzono natomiast, że trwałość zmęczeniowa połączeń klejowych istotnie zależy od wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych występujących w spoinie przy maksymalnej wartości obciążenia cyklu zmęczeniowego. Wynika z tego, że połączenia klejowe w zależności od kształtu i sposobu obciążenia powinny charakteryzować różna trwałość zmęczeniowa przy podobnej maksymalnej wartości obciążenia zmęczeniowego odniesionej do wytrzymałości doraźnej połączenia. W celu sprawdzenia tej tezy postanowiono wykonać odpowiednie badania eksperymentalne i numeryczne.

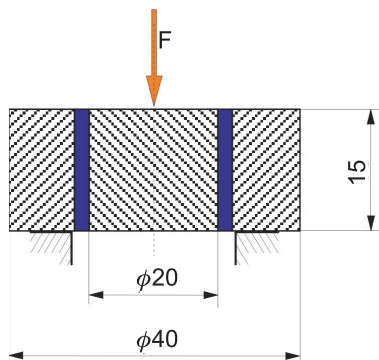
Badania eksperymentalne trwałości zmęczeniowej różnych typów połączeń klejowych

Wykonano badania porównawcze trwałości zmęczeniowej połączeń znacznie różniących się kształtem i sposobem obciążenia, a mających podobne spoiny klejowe — ten sam rodzaj kleju, identyczny sposób przygotowania powierzchni do klejenia, identyczne warunki utwardzania, podobna grubość spoiny.

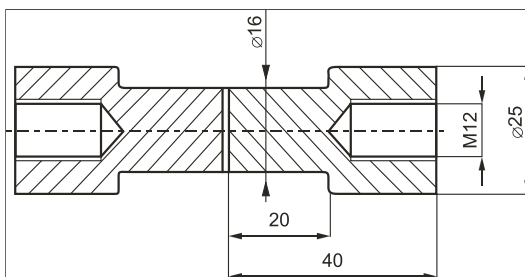
Wszystkie próbki wykonano ze stali St3. Powierzchnie próbek przygotowano do klejenia sposobem piaskowania, a następnie przemywano benzyną ekstrakcyjną i stosowano 15-minutowe suszenie (odparowanie benzyny) w temperaturze 60°C. W badaniach zastosowano próbki:

- czopowe walcowe wyciskane (obciążone na ścinanie) — rysunek 1,
- czołowe rozciągane (obciążone na osiowo-symetryczne odrywanie) — rysunek 2,
- jednozakładkowe rozciągane (obciążone na ścinanie) — rysunek 3.

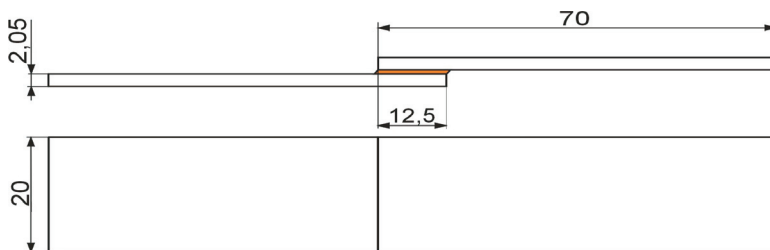
Wszystkie próbki klejono Epidianem 57 utwardzanym Z1 w temperaturze 60°C w czasie 1 godziny. We wszystkich próbkach uzyskano podobną grubość spoin ($\sim 0,1$ mm) stosując odpowiedni luz w próbkach czopowych walcowych oraz nitki dystansowe o określonej grubości w próbkach czołowych i zakładkowych. Sklejono po 9 próbek każdego rodzaju, z których 5 wykorzystano do wyznaczenia wytrzymałości doraźnej badanych połączeń (tabela 1, wyniki podane z przedziałem ufności dla poziomu ufności $1 - \alpha = 0,95$). Pozostałe próbki przeznaczono do badań zmęczeniowych.



Rys. 1. Kształt i wymiary próbki czopowej walcowej obciążonej na ścinanie



Rys. 2. Kształt i wymiary próbki czołowej rozciąganej



Rys. 3. Kształt i wymiary próbki jednozakładkowej rozciąganej, obciążonej na ścinanie

TABELA 1

Wytrzymałość doraźna trzech typów próbek

Rodzaj próbki	Siła niszcząca [kN]
Czopowa walcowa	31,06 ± 3,04
Czołowa	8,83 ± 0,73
Jednozакładkowa	4,24 ± 0,20

Próbki czopowe walcowe

Pierwszą próbkę obciążono cyklem odzerowotętniającym o wartości maksymalnej obciążenia 15,5 kN, tj. wartości równej 0,5 obciążeń niszczących. Po 400 000 cykli maksymalną wartość obciążenia cyklu zwiększono do 18,6 kN, tj. wartości równej 0,6 obciążeń niszczących. Po sumarycznej liczbie cykli obciążeniowych 747 508 badania przerwano. Ze względu na wysoką trwałość badanego połączenia trzy pozostałe próbki obciążano cyklem zmęczeniowym o zwiększonej maksymalnej wartości obciążenia. Wyniki badań zamieszczono w tabeli 2.

TABELA 2

Trwałość zmęczeniowa próbek czopowych walcowych

Nr próbki	Wartość maksymalna obciążenia cyklu zmęczeniowego [kN]	$\frac{P_{\text{maks, zm}}}{P_{\text{niszcz}}}$	Trwałość [liczba cykli]
1	23,1	0,74	3300
2	23,2	0,73	2935
3	20,4	0,66	3242

Przeprowadzone badania wykazały bardzo wysoką trwałość badanego połączenia przy cyklicznym obciążeniu odzerowotętniającym o wartości maksymalnej równej 0,5 i 0,6 obciążenia niszczącego oraz niską dla większych wartości 0,66...0,74.

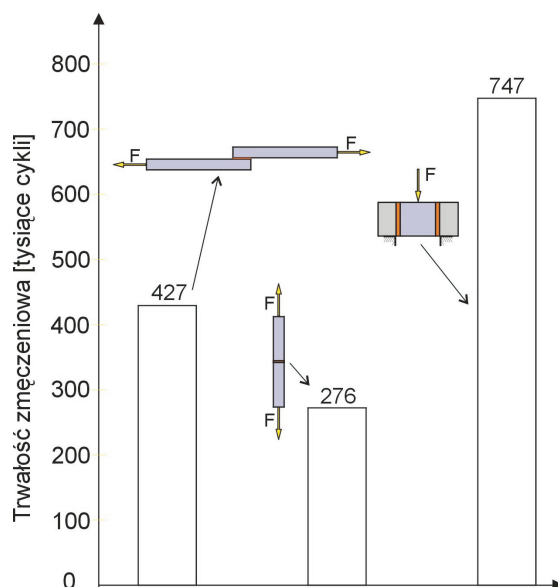
Próbki czołowe

Próbki czołowe obciążono cyklem odzerowotętniającym o wartości maksymalnej obciążenia 4,4 kN, tj. wartości równej 0,5 obciążeń niszczących. Trzy uległy zniszczeniu (adhezyjnemu) po liczbie cykli: 233 768, 298 115 i 297 500. Jedna przeniosła 910 000 cykli i nie uległa zniszczeniu. Próbkę tę zniszczono w próbie statycznego rozciągania, w której osiągnęła wytrzymałość $P = 9123 \text{ N}$, a więc wyższą od średniej wytrzymałości tych połączeń. W badaniach zmęczeniowych była ona obciążona wartością 0,48 obciążeń niszczących.

Próbki jednozakładkowe

Próbki jednozakładkowe obciążono cyklem odzerowotętniającym o wartości maksymalnej obciążenia 2,1 kN, tj. wartości równej 0,5 obciążeń niszczących. Próbki uległy zniszczeniu po liczbie cykli: 479 881, 422 800 i 378 750.

Najbardziej odporne na obciążenie zmęczeniowe okazały się próbki czopowe walcowe, mniej — jednozakładkowe, a najmniej — próbki czołowe (rys. 4).



Rys. 4. Wpływ kształtu próbki i sposobu jej obciążenia na średnią trwałość zmęczeniową połączeń klejowych klejem Epidian 57. Powierzchnie przygotowane do klejenia przez piaskowanie, klej utwardzany w temperaturze 60°C w czasie 1 godziny, grubość spoiny 0,1 mm

Obliczenia numeryczne

Wykonano obliczenia numeryczne w celu wyznaczenia naprężeń w spoinach badanych połączeń klejowych pod obciążeniami niszczącymi i maksymalnymi zmęczeniowego cyklu obciążeniowego. Obliczenia wykonano MES, wykorzystując program NASTRAN for Windows. Obliczenia prowadzono w zakresie nieliniowym, zakładając możliwość plastycznego odkształcania klejonych elementów (zwłaszcza blach) oraz nieliniowość charakterystyk $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ kleju. Krzywą $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ użytych w eksperymencie blach gatunku St3 wyznaczono w próbie rozciągania próbek wiosełkowych wykonanych z tego materiału. Zgodnie z zaleceniami [9], charakterystyki $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ kleju Epidian 57 utwardzanego metodą przyspieszoną (1 godzina w temperaturze 60°C) wyznaczono w próbie ściskania walcowych próbek odlanych z tego kleju o wymiarach: średnica 12,5 mm, długość 25 mm.

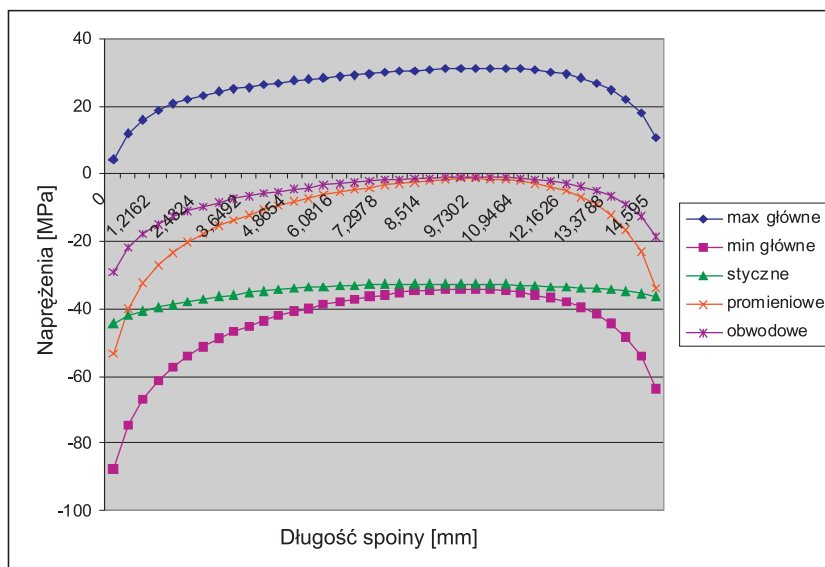
Przyjmując [10], że naprężenia nie zmieniają się istotnie wzdłuż szerokości badanych połączeń klejowych próbek jednozakładkowych, obliczenia prowadzono, traktując zagadnienie jako płaski stan naprężeń. Zbudowano siatki modeli, uwzględniając rzeczywiste wymiary próbek, w tym również grubość spoin. Zgodnie z [11], spoiny modelowano jedną warstwą elementów prostokątnych, dodając na krawędziach spoin elementy trójkątne modelujące wypływki kleju. Próbki czopowe i czołowe modelowano

przestrzenie, rozpatrując ze względu na ich symetrię wycinek o kącie 90° . Właściwości spoin i klejonych elementów opisano wyznaczonymi eksperymentalnie zależnościami $\sigma = \sigma(\varepsilon)$. Zbudowane modele obciążano średnimi wartościami sił niszczących badane próbki oraz wartościami maksymalnych sił obciążających cykli zmęczeniowych. Przy obciążaniu próbek jednozakładkowych uwzględniono ich przemieszczenie wynikające z mocowania w uchwytach maszyny wytrzymałościowej.

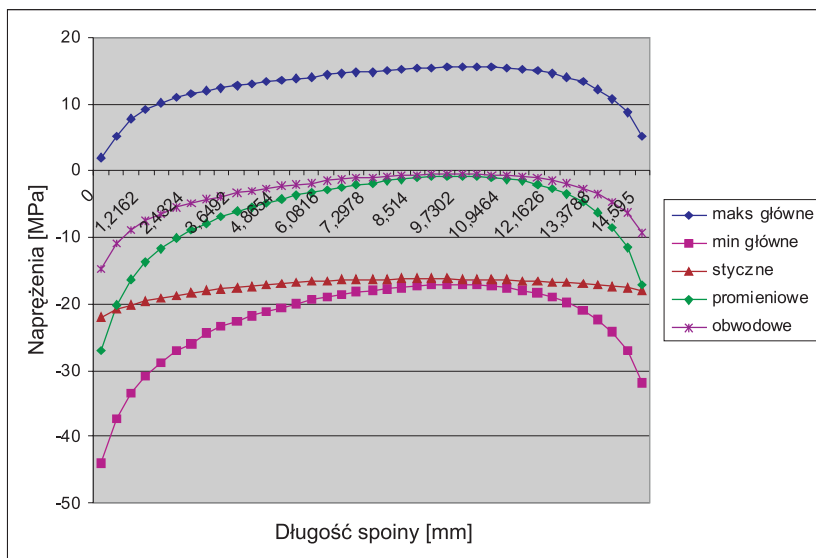
Wyniki obliczeń numerycznych próbek czopowych walcowych obciążonych na wyciskanie przedstawiono na rysunkach 5 i 6.

Z przeprowadzonych obliczeń numerycznych wynika, że w spoinach badanych połączeń czopowych walcowych obciążonych na wyciskanie występują niewiele zmieniające się wzdłuż długości spoiny naprężenia styczne oraz ujemne naprężenia promieniowe i obwodowe. Wartości naprężeń głównych minimalnych są ujemne (ściskające), ich maksymalne wartości występują na końcach spoiny i znacznie przewyższają wartości naprężeń głównych maksymalnych, które mają wartości dodatnie i największe wartości osiągają w środku spoiny. Należy sądzić, że zniszczenie spoiny połączenia czopowego spowodowane jest naprężeniami normalnymi ujemnymi (ściskającymi) lub naprężeniami stycznymi. Taki stan wyężenia spoiny klejowej może być przyczyną jej wysokiej trwałości zmęczeniowej.

Z przedstawionych wyników obliczeń numerycznych wynika również, że zmiana obciążeń powoduje w przybliżeniu proporcjonalną zmianę naprężeń w spoinach analizowanych połączeń czopowych.



Rys. 5. Rozkład naprężeń wzdłuż spoiny połączenia czopowego walcowego pod obciążeniem niszczącym



Rys. 6. Rozkład naprężeń wzdłuż spoiny połączenia czopowego walcowego pod obciążeniem maksymalnym cyklu zmęczeniowego

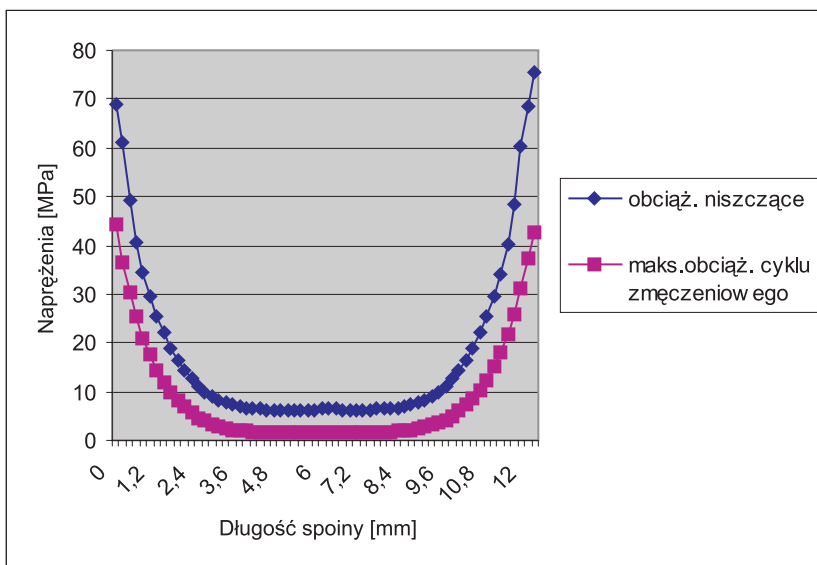
Podobne obliczenia numeryczne wykonano dla stalowych próbek jednozakładkowych rozciąganych obciążonych na ścinanie (rys. 7 i 8).

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że przy obciążeniu niszczącym w spoinach połączeń zakładkowych występują zastępcze naprężenia (maksymalne główne) dodatnie o znacznych wartościach (≈ 75 MPa) i one prawdopodobnie decydują o zniszczeniu połączenia. Zmniejszenie obciążenia nie powoduje proporcjonalnego spadku naprężeń w spoinach klejowych, co może być, obok dominacji w spoinach tego rodzaju połączeń naprężeń normalnych dodatnich, przyczyną ich mniejszej trwałości zmęczeniowej w porównaniu z czopowymi.

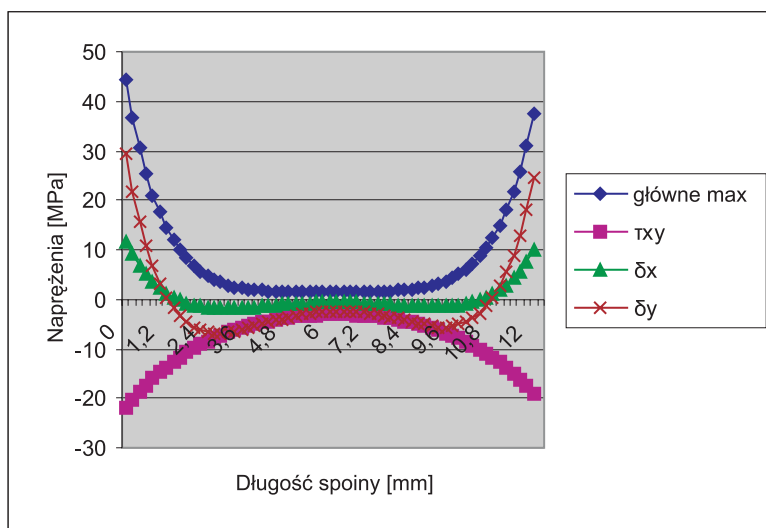
Z analizy naprężeń występujących w spoinie pod maksymalnym obciążeniem cyklu zmęczeniowego (rys. 8) wynika, że naprężenia maksymalne główne osiągnęły wartość rzędu 44 MPa, a naprężenia normalne prostopadłe do klejonych powierzchni — około 30 MPa.

Obliczenia numeryczne naprężeń w spoinach próbek czołowych obciążonych na odrywanie wykazały, że zgodnie z oczekiwaniami występuje w nich w przybliżeniu równomierny rozkład naprężeń (rys. 9). Przy maksymalnym obciążeniu cyklu zmęczeniowego maksymalne naprężenia główne w spoinie takiego połączenia osiągnęły wartość 23,5 MPa i były one bliskie maksymalnym wartościom naprężeń normalnych prostopadłych do klejonych powierzchni.

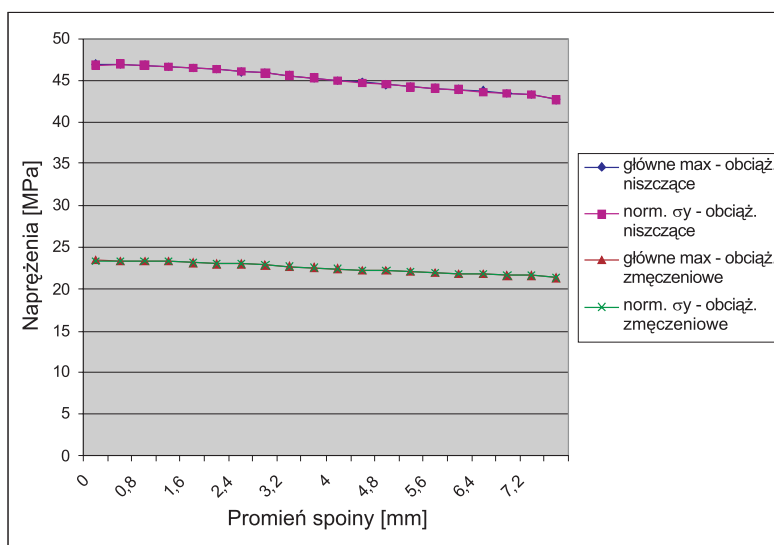
Przy obciążeniach niszczących w spoinach badanych połączeń klejowych wystąpiły różne rozkłady naprężeń oraz różne wartości maksymalnych naprężeń



Rys. 7. Rozkład naprężeń maksymalnych głównych wzdłuż spoiny połączenia jednozakładkowego pod obciążeniem niszczącym i maksymalnymi obciążeniami cyklu zmęczeniowych



Rys. 8. Rozkład naprężeń wzdłuż spoiny połączenia jednozakładkowego pod maksymalnym obciążeniem cyklu zmęczeniowego



Rys. 9. Rozkład naprężeń wzdłuż promienia spoiny połączenia czołowego pod obciążeniem niszczącym oraz maksymalnym cyklu zmęczeniowego

zredukowanych, które mają decydujący wpływ na zniszczenie kohezyjne spoin. O zniszczeniu adhezyjnym spoiny klejowej w dużym stopniu decydują naprężenia normalne dodatnie prostopadłe do powierzchni klejonych elementów (σ_y w połączeniach zakładkowych i czołowych oraz σ_r w czopowych). W tabeli 3 przedstawiono obliczone numerycznie wybrane wartości naprężeń występujących w spoinach pod obciążeniami niszczącymi i maksymalnymi cyklu zmęczeniowego.

TABELA 3

Maksymalne wartości wybranych naprężeń w spoinach badanych próbek pod obciążeniami niszczącymi i maksymalnymi cyklu zmęczeniowego

Rodzaj połączenia		Czopowe	Zakładkowe	Czołowe
P_{maks} niszczące	$\sigma_{mks\ gl}$ ($\sigma_{min\ gl}$)	32 (-88)	78	47
	$\sigma_{y\ mks}$, $\sigma_{r\ mks}$	-55	44	47
P_{maks} zmęczeniowe	$\sigma_{maks\ gl}$ ($\sigma_{min\ gl}$)	16 (-44)	50	23,5
	$\sigma_{y\ mks}$, $\sigma_{r\ mks}$	-27,5	30	23,5

Z porównania naprężeń występujących w spoinach badanych połączeń pod obciążeniami niszczącymi wynika, że w połączeniach czopowych walcowych wystąpiło

kohezyjne zniszczenie spoin, w połączeniach czołowych adhezyjne, a w połączeniach jednozakładkowych mogło wystąpić kohezyjne lub adhezyjne.

Na podstawie badań numerycznych można stwierdzić, że w spoinach połączeń czopowych dominowały naprężenia normalne ujemne i to mogło być przyczyną ich wysokiej trwałości zmęczeniowej. W spoinach połączeń czołowych występowały mniejsze naprężenia niż w spoinach połączeń zakładkowych, a pomimo to spoiny połączeń czołowych wykazały mniejszą trwałość zmęczeniową. Mogło to być spowodowane tym, że, jak wynika z przedstawionych rozkładów naprężeń, w połączeniach czołowych obciążona jest równomiernie cała spoina (rys. 9), a w połączeniach zakładkowych obciążone są głównie jej krawędzie (rys. 8). Występowałoby tu zjawisko podobne do stwierdzonego w badaniach zmęczeniowych metali [12] polegające na tym, że wytrzymałość zmęczeniowa metali na zginanie jest wyższa od ich wytrzymałości na rozciąganie (przy zginaniu maksymalnymi naprężeniami obciążone są powierzchnie badanej próbki, a przy rozciąganiu cały przekrój obciążony jest równomiernie).

Wnioski

Połączenia klejowe różniące się kształtem i sposobem obciążenia może charakteryzować różna trwałość zmęczeniowa przy zbliżonej wartości maksymalnego obciążenia cyklu zmęczeniowego odniesionej do wytrzymałości doraźnej połączenia.

Zarówno w statycznej próbie wytrzymałości przy obciążeniu niszczącym, jak i w badaniach zmęczeniowych przy maksymalnym obciążeniu cyklu zmęczeniowego równym połowie obciążenia niszczącego, w spoinach badanych połączeń wystąpiły różne rozkłady naprężeń oraz ich wartości maksymalne. Spoiny badanych połączeń nie były więc identycznie wyczerpane w badaniach zmęczeniowych.

Z przeprowadzonych badań eksperymentalnych wynika, że niewielka zmiana obciążenia może istotnie zmienić trwałość zmęczeniową połączenia klejowego. Wyniki badań zmęczeniowych połączeń klejowych cechują ponadto duże rozrzuty, co wynika między innymi również z dużych rozrzutów wytrzymałości doraźnej takich połączeń.

Mniejszą trwałość zmęczeniową wykazują spoiny, w których podobne wartości naprężeń występują w całej ich objętości, niż spoiny, które charakteryzuje nierównomierny rozkład naprężeń.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005-2007 jako projekt badawczy 0 T00B 008 29.

Artykuł wpłynął do redakcji 7.12.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lutym 2007 r.

LITERATURA

- [1] J. ŁUNARSKI, *Połączenia klejowe w procesach montażu*, Technologia i Automatyzacja Montażu, 2, 1994, 2-5.
- [2] C. V. CAGLE, *Kleje i klejenie*, WNT, Warszawa, 1977.
- [3] R. SIKORA, *Tworzywa epoksydowe w naprawie maszyn*, WNT, Warszawa, 1971.
- [4] T. SMAŁ, *Badanie klejowych mas regeneracyjnych dla potrzeb napraw połowych sprzętu wojskowego*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 2000.
- [5] J. GODZIMIRSKI, *Prognozowanie wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych*, Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, vol. 22, 3, 1998, 5-24.
- [6] M. ROŚKOWICZ, *Wytrzymałość długotrwała połączeń klejowych*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 2004.
- [7] J. GODZIMIRSKI, J. KOZAKIEWICZ, J. ŁUNARSKI, W. ZIELECKI, *Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 1997.
- [8] J. GODZIMIRSKI, A. KOMOREK, *Analiza MES naprężeń w spoinach obciążonych zmęczeniowo*, Biul. WAT, LV, 2, 2006.
- [9] S. TKACZUK, *Prognozowanie wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 2006.
- [10] W. KOTLARZ, *Analiza wpływu temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 1996.
- [11] J. GODZIMIRSKI, S. TKACZUK, *Numeryczne modelowanie spoin klejowych połączeń obciążonych na ścinanie*, Biul. WAT, LIV, 4, 2005.
- [12] J. DIETRICH, S. KOCANĀ, W. KOREWA, *Podstawy konstrukcji maszyn*, WNT, Warszawa, 1969.

J. GODZIMIRSKI, A. KOMOREK

Influence of constructional factors on glue joints fatigue life

Abstract. The glue joints are characterized by limited fatigue life. The paper presents the results of fatigue research of simple butt joints subjected to shear, simple butt joints subjected to tension, and cylindrical pin joints subjected to shear. The samples were made of St3 steel. The glued surfaces were prepared for gluing by sand blasting and extraction naphtha washing. The samples were glued the epoxide adhesive Epidian 57 cured at a temperature 60°C. In fatigue tests, the samples were loaded with pulsating load which maximal value was equal to 0.5 of the breaking load. The cylindrical pin joints proved the prime fatigue life, lesser simple single lap joints, and the worst simple butt joints. The stresses in adhesive layers of the tested samples were calculated for destructive load and maximal pulsating load by means of finite elements method. The nonlinear properties of adhesive and glued materials were taken into consideration in the calculations. It was found that varied stresses distribution was in adhesive layers of the examined joints. The maximal normal stresses in adhesive layer of cylindrical pin joint were negative and it possibly was a cause of good fatigue life of such joints. It was pointed out that there is no linear dependence between maximal load values of joints and maximal stress values in adhesive layers of simple single lap joint. It was found that the fatigue life of adhesive layers was essentially depended on a type of joint – on shape and loading type.

Keywords: adhesive, adhesive layer, glued joint, fatigue life

Universal Decimal Classification: 621.792

