



BIULETYN WAT
VOL. LV, NR 2, 2006

Analiza MES naprężeń w spoinach klejowych obciążonych zmęczeniowo

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, w tym również zmęczeniowa. Celem przeprowadzonych badań było poszukiwanie zależności między trwałością zmęczeniową połączeń obciążonych na ścinanie a wartością maksymalnych naprężeń występujących w spoinach takich połączeń obciążonych zmęczeniowo. Wyznaczono eksperymentalnie wytrzymałość doraźną i trwałość zmęczeniową połączeń klejowych jedno- i dwuzakładkowych. W badaniach zmęczeniowych, próbki obciążano cyklem odzerowotętniętym, którego maksymalna wartość była równa 0,35 wartości obciążenia niszczącego. Próbki klejono klejem epoksydowym Epidian 57, utwardzanym trietylenotetraaminą w temperaturze otoczenia lub 60°C. Stosowano dwa sposoby przygotowania powierzchni do klejenia: trawienie lub schropowacanie płótnem ściernym oraz dwie grubości spoin klejowych 0,2 i 0,03 mm. Metodą elementów skończonych obliczono naprężenia w spoinach badanych próbek przy obciążeniu niszczącym i maksymalnym cyklu zmęczeniowego. Obliczenia prowadzono przy uwzględnieniu nieliniowych właściwości kleju i klejonych blach. Dla przeprowadzenia takich obliczeń niezbędne było wyznaczenie krzywych naprężenie-odkształcenie kleju i klejonych materiałów. Oceniono, jak zmiana obciążenia wpływa na zmianę maksymalnych naprężeń w spoinach oraz co wpływa na trwałość zmęczeniową połączeń klejowych. Wykazano, że nie występuje proporcjonalna zależność między wartością maksymalnych obciążeń połączenia a wartością maksymalnych naprężeń w spoinie klejowej. Stwierdzono, że trwałość zmęczeniowa spoin klejowych zależy istotnie od rodzaju połączenia, grubości spoiny i wartości maksymalnych naprężeń w spoinie, występujących w trakcie cyklu zmęczeniowego.

Słowa kluczowe: klej, spoina klejowa, połączenie klejowe, trwałość zmęczeniowa
Symbole UKD: 621.792

Wprowadzenie

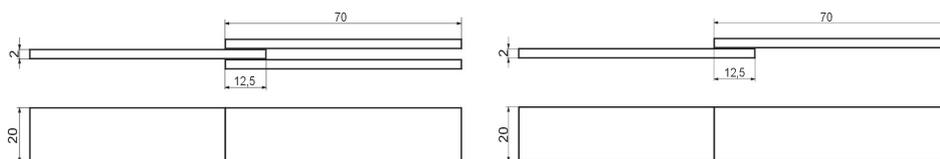
Stosowanie klejenia konstrukcyjnego wymaga umiejętności prognozowania wytrzymałości połączeń klejowych: doraźnej [1], długotrwałej (statycznej trwałości czasowej) [2] i zmęczeniowej. Konstrukcje klejone cechuje wysoka wytrzymałość zmęczeniowa, o ile same spoiny są obciążone znacznie poniżej ich wytrzymałości doraźnej a zastosowanie klejenia umożliwia wyeliminowanie karbów, np. otworów, w łączonych elementach [3, 4]. Nieograniczona wytrzymałość zmęczeniowa połączeń klejowych może wynosić od 0,15...0,5 ich wytrzymałości doraźnej [5] i zależy zarówno od rodzaju zastosowanego kleju, jak i technologii klejenia oraz sposobu obciążenia połączenia.

Przeprowadzone badania [6] wykazały znacznie mniejszą trwałość zmęczeniową spoin klejowych połączeń obciążonych na ścinanie w porównaniu z trwałością kleju w postaci odlewanych próbek walcowych, w których próbki klejone i odlewane z kleju były obciążane cyklem odzerowotętniającym o wartości maksymalnej równej 0,35 wartości ich obciążeń niszczących. Przyczyną tego może być nierównomierny rozkład naprężeń w spoinach połączeń obciążonych na ścinanie i nieliniowa zależność tych naprężeń od obciążeń [7]. W związku z tym, obniżenie obciążenia do poziomu 0,35 obciążenia niszczącego nie musi spowodować obniżenia maksymalnych naprężeń w spoinie w takim samym zakresie. W ścisanych próbkach walcowych rozkład naprężeń jest bardziej równomierny [8] i w tym przypadku zależność naprężeń od obciążeń jest z przybliżeniem proporcjonalna.

Celem przeprowadzonych badań było poszukiwanie zależności między trwałością zmęczeniową połączeń obciążonych na ścinanie a wartością maksymalnych naprężeń występujących w spoinach takich połączeń obciążonych zmęczeniowo.

Badania eksperymentalne

Badaniom poddawano próbki zakładkowe dwustronne (dwuzakładkowe), klejone na zakładkę o długości 12,5 mm, wykonane z blach ze stopu aluminiowego PA7T4 o grubości 2 mm oraz próbki zakładkowe proste (jednozakładkowe), wykonane z tego samego materiału, wzorowane na normie PN-69/C-89300 (różniące się jedynie szerokością — rys. 1).



Rys. 1. Stosowane w badaniach próbki duzakładkowe i jednozakładkowe

Próbki klejono Epidianem 57, utwardzanym trietylenotetraaminą (utwardzaczem Z1), dwiema metodami: 7 dób w temperaturze otoczenia lub metodą przyspieszoną — 1 godzina w temperaturze 60°C. Stosowano dwa sposoby przygotowania powierzchni blach do klejenia: trawienie zgodnie z normą PN-69/C-89300 lub schropowacenie płótnem ściernym nr 80 i przemywanie benzyną ekstrakcyjną. W celu uzyskania różnych grubości spoin klejowych, stosowano albo jednakowe naciski klejenia, co pozwalało uzyskiwać spoiny o grubości $\approx 0,03$ mm, albo, dla uzyskania większych grubości (około 0,2 mm), w nieutwardzonych spoinach umieszczano dodatkowo nitki dystansowe. Z każdej partii próbek, liczącej nie mniej niż 9 sztuk, 5 próbek wykorzystywano do wyznaczenia wytrzymałości doraźnej przy rozciąganiu, a pozostałe do wyznaczenia trwałości zmęczeniowej. Na podstawie wyników badań wytrzymałości doraźnej obliczano wartość średnią tej wytrzymałości oraz określano przedział ufności metodą t Studenta dla poziomu ufności $1 - \alpha = 0,95$. W badaniach zmęczeniowych próbki obciążano cyklem odzerowotętniającym o częstotliwości 20 Hz i wartości maksymalnej siły równej 0,35 średniej wytrzymałości doraźnej badanej partii. Wyniki wykonanych badań zamieszczono w tabeli 1.

TABELA 1
Wyniki badań wytrzymałości doraźnej i trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych

Nr partii	Rodzaj próbki	Sposób przygotowania powierzchni	Warunki utwardzania	Grubość spoiny [mm]	Średnia siła niszcząca [kN]	Maksymalne obciążenie zmęczeniowe [kN]	Trwałość zmęczeniowa [liczba cykli]
1	D	Trawienie	1h 60°C	0,2	14,37±0,96	5	393869 681875-232334
2	D	Trawienie	1h 60°C	0,03	13,13±0,46	4,6	265537 344753-240000
3	J	Trawienie	1h 60°C	0,2	6,86±0,23	2,4	75237 80600-62108
4	J	Trawienie	1h 60°C	0,03	6,50±0,05	2,3	46633 97856-23668
5	D	Płótno ścierne	7 dób	0,2	5,44±1,09	1,9	390000*
6	D	Płótno ścierne	7 dób	0,03	5,49±0,87	1,9	2433000*
7	J	Trawienie	7 dób	0,2	3,95±0,51	1,4	488767 570000-436301
8	J	Trawienie	7 dób	0,03	5,15±0,42	1,8	179413 313486-62833

D — próbki dwuzakładkowe, J — próbki jednozakładkowe

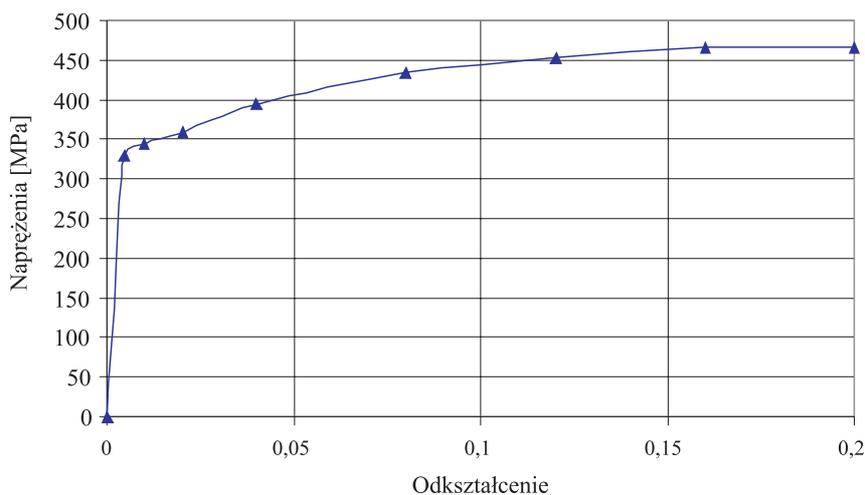
* — badania przerwano ze względu na dużą liczbę cykli

Stwierdzono:

- istotny wpływ sposobu przygotowania powierzchni blach na wytrzymałość doraźną połączeń,
- wyższą trwałość zmęczeniową połączeń dwuzakładkowych,
- wyższą trwałość zmęczeniową połączeń o większej grubości spoin,
- brak korelacji między względną (odniesioną do obciążeń niszczących) wartością maksymalnego obciążenia zmęczeniowego a trwałością zmęczeniową połączeń.

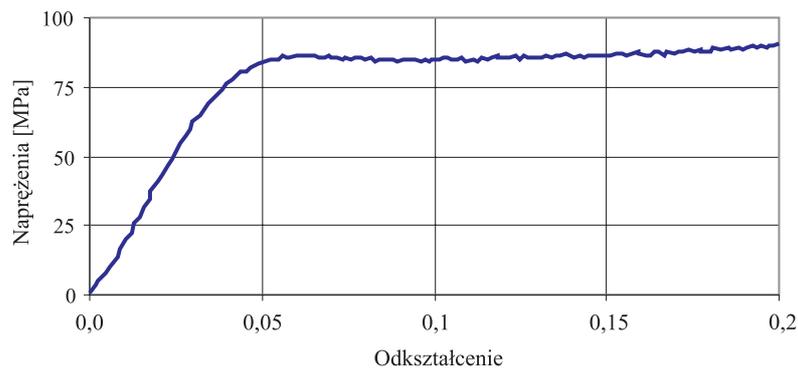
Badania numeryczne

W celu wyznaczenia wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych w spoinach badanych połączeń obciążonych siłami niszczącymi oraz maksymalnymi wartościami obciążeń zmęczeniowych, przeprowadzono obliczenia MES, wykorzystując program NASTRAN for Windows. Obliczenia prowadzono w zakresie nieliniowym, zakładając możliwość plastycznego odkształcania klejonych blach oraz nieliniowość charakterystyk $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ kleju. Krzywą $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ użytych w eksperymencie blach gatunku PA7T4 wyznaczono w próbie rozciągania próbek wiosełkowych, wykonanych z tego materiału (rys. 2). Zgodnie z zaleceniami [8] charakterystyki $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ kleju Epidian 57, utwardzanego w temperaturze otoczenia w czasie 7 dób oraz metodą przyspieszoną (1 godzina w temperaturze 60°C), wyznaczono w próbie ściskania odlanych z tego kleju walcowych próbek o wymiarach: średnica 12,5 mm i długość 25 mm. W zależności

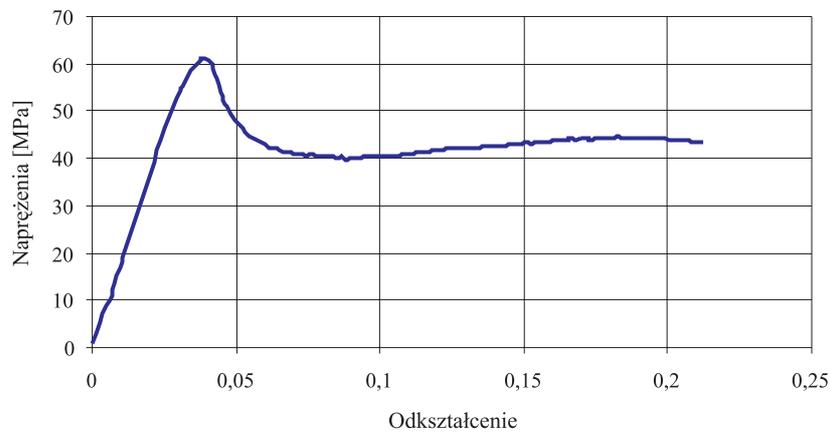


Rys. 2. Krzywa rozciągania blachy ze stopu aluminiowego PA7T4

od sposobu utwardzania, badany klej wykazywał różne właściwości mechaniczne (wartość maksymalnych naprężeń, wartość modułu sprężystości wzdłużnej i kształt krzywej $\sigma = \sigma(\varepsilon)$) (rys. 3 i 4).

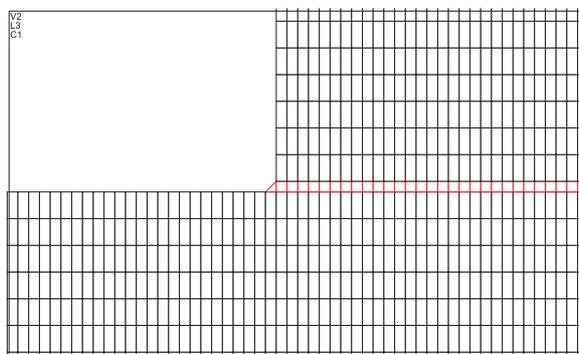


Rys. 3. Krzywa ściskania kleju Epidian 57, utwardzanego w temperaturze 60°C w czasie 1 godziny



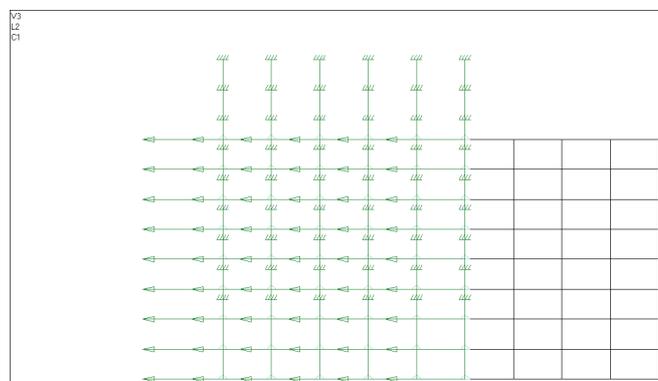
Rys. 4. Krzywa ściskania kleju Epidian 57, utwardzanego w temperaturze otoczenia w czasie 7 dób

Przyjmując [9], że naprężenia nie zmieniają się istotnie wzdłuż szerokości badanych połączeń klejowych (próbek dwuzakładkowych i jednozakładkowych), obliczenia prowadzono, traktując zagadnienie jako płaski stan naprężeń. Zbudowano siatki modeli, uwzględniając rzeczywiste wymiary próbek, w tym również grubość spoin. Zgodnie z [10], spoiny modelowano jedną warstwą elementów prostokątnych, dodając na krawędziach spoin elementy trójkątne, modelujące wypłytki kleju (rys. 5).



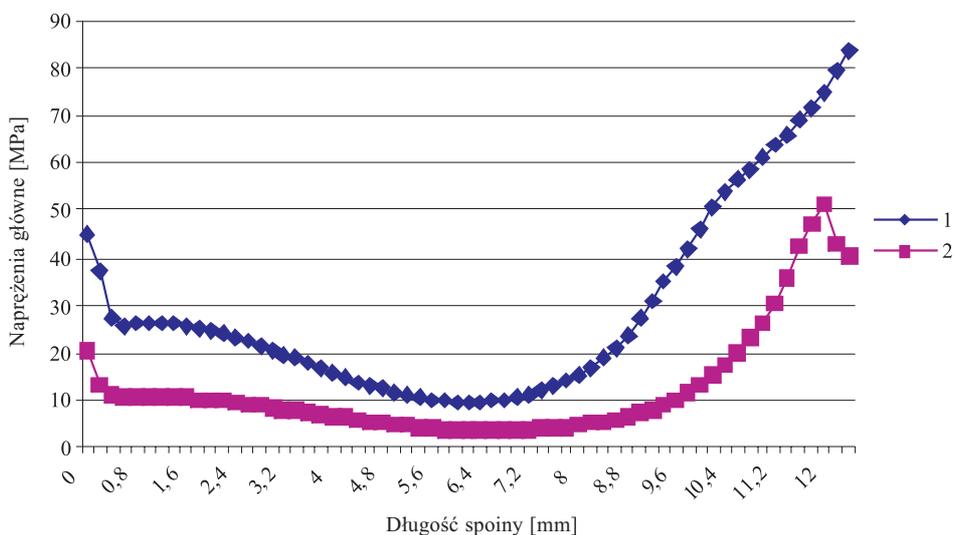
Rys. 5. Sposób modelowania spoiny klejowej

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 (rys. 6).

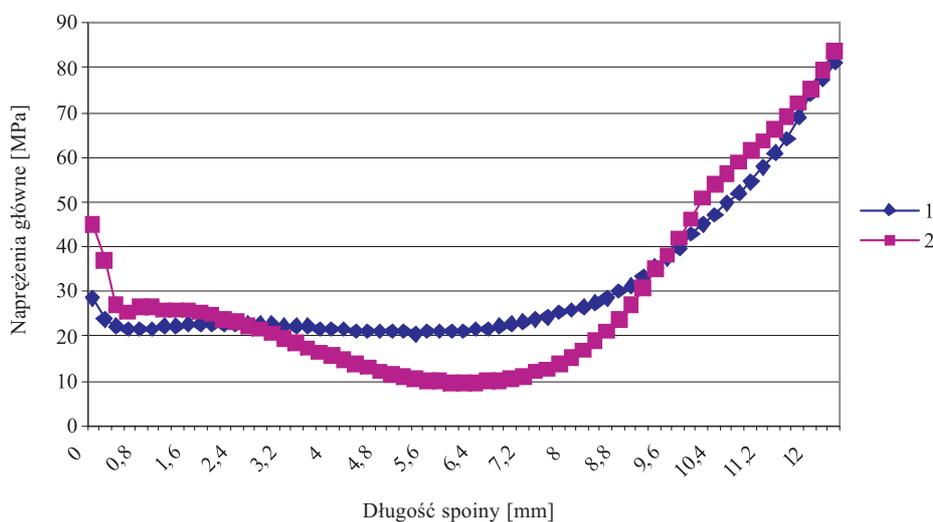


Rys. 6. Sposób obciążenia modelu próbki jednozakładkowej siłą i przemieszczeniem

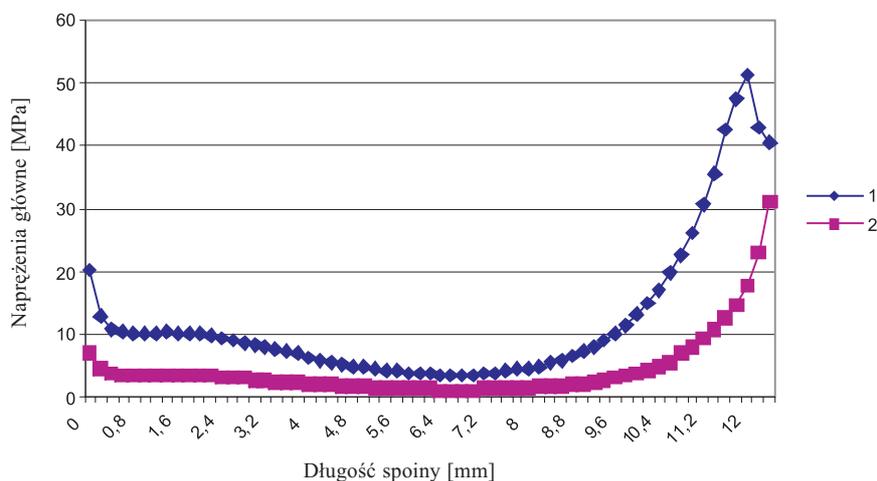
Przeanalizowano rozkłady maksymalnych naprężeń głównych w spoinach, przyjmując, że hipoteza maksymalnych naprężeń głównych dobrze opisuje wyteżenie spoin klejowych. Wybrane przykłady zmiany tych naprężeń w spoinach badanych połączeń przedstawiono na rysunkach 7-12.



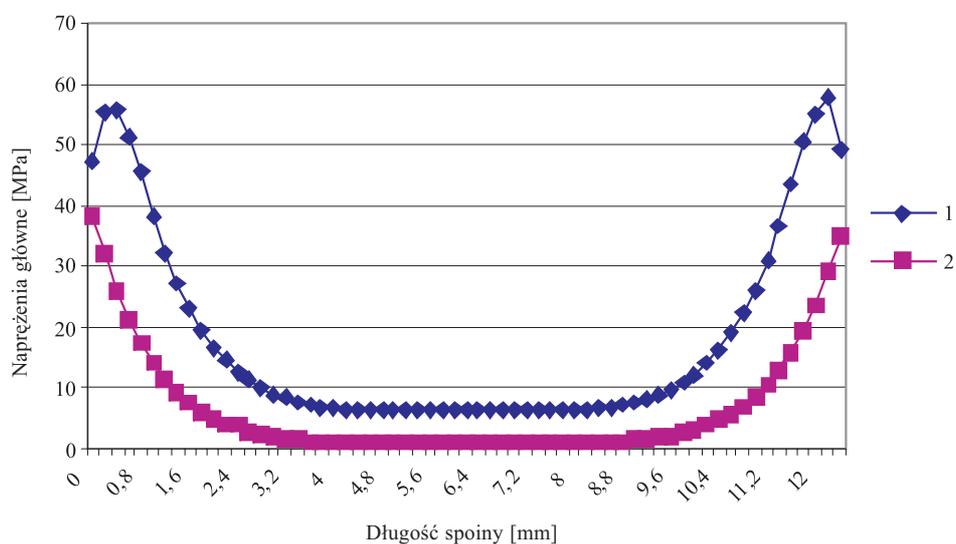
Rys. 7. Rozkład naprężeń maksymalnych głównych wzdłuż spoin próbek dwuzakładkowych klejonych Epidianem 57, obciążonych siłami niszczącymi: 1 — 13130 N (utwardzanie 1 h w temperaturze 60°C, powierzchnie trawione); 2 — 5490 N (utwardzanie 7 dób w temperaturze otoczenia, powierzchnie chropowate)



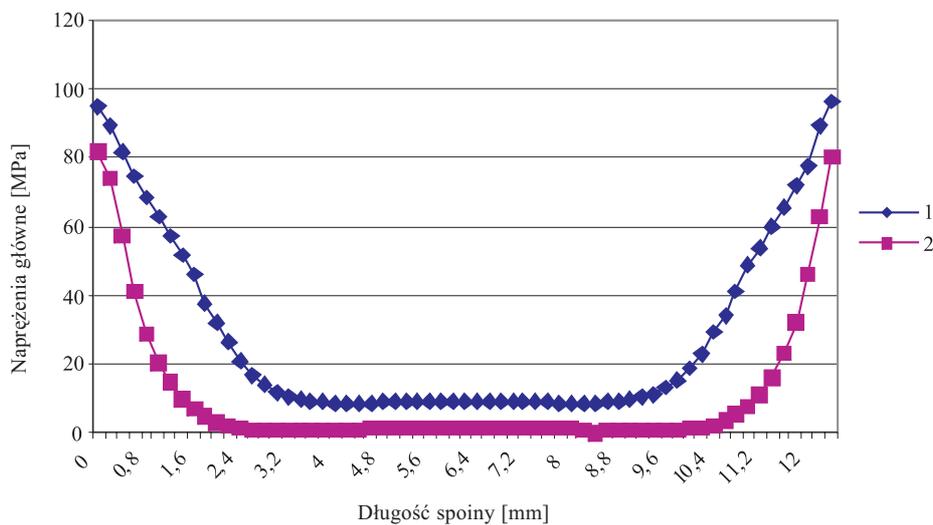
Rys. 8. Rozkład naprężeń maksymalnych głównych wzdłuż spoin próbek dwuzakładkowych obciążonych siłami niszczącymi, klejonych Epidianem 57, utwardzonym 1 h w temperaturze 60°C: 1 — grubość spoiny 0,2 mm, obciążenie 14370 N; 2 — grubość spoiny klejowej 0,03 mm, obciążenie 13130 N (powierzchnie blach trawione)



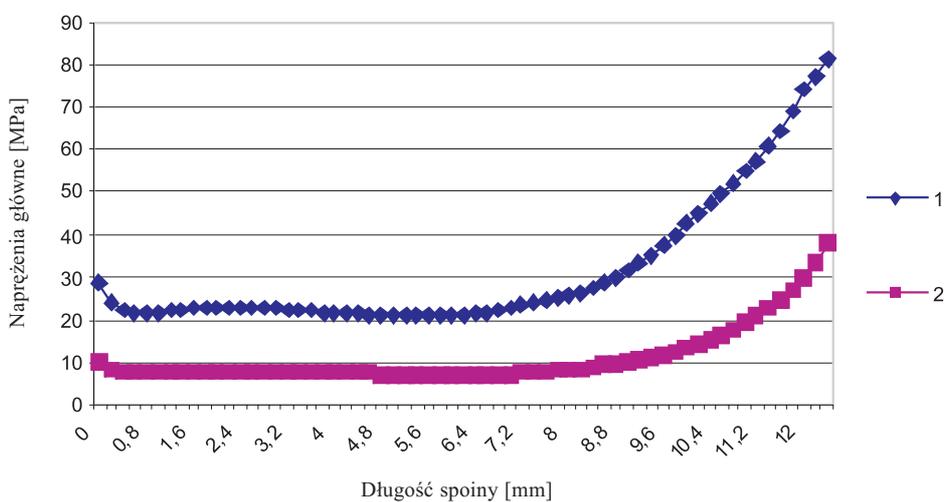
Rys. 9. Rozkład naprężeń maksymalnych głównych wzdłuż spoin próbek dwuzakładkowych obciążonych: 1 — siłą niszczącą 5490 N; 2 — maksymalną wartością siły cyklu zmęczeniowego 1920 N (klej Epidian 57 utwardzany 7 dób w temperaturze otoczenia, grubość spoin 0,03 mm, powierzchnie blach schropowacane płótnem ściernym)



Rys. 10. Rozkład naprężeń maksymalnych głównych wzdłuż spoin próbek jednozakładkowych obciążonych: 1 — siłą niszczącą 3950 N; 2 — maksymalną wartością siły cyklu zmęczeniowego 1400 N (klej Epidian 57 utwardzany 7 dób w temperaturze otoczenia, grubość spoin 0,2 mm, powierzchnie blach trawione)



Rys. 11. Rozkład naprężeń maksymalnych głównych wzdłuż spoin próbek jednozakładkowych obciążonych: 1 — siłą niszczącą 6500 N; 2 — maksymalną wartością siły cyklu zmęczeniowego 2275 N (klej Epidian 57 utwardzany 1 h w temperaturze 60°C, grubość spoin 0,03 mm, powierzchnie blach trawione)



Rys. 12. Rozkład naprężeń maksymalnych głównych wzdłuż spoin próbek dwuzakładkowych obciążonych: 1 — siłą niszczącą 14370 N; 2 — maksymalną wartością siły cyklu zmęczeniowego 5030 N (klej Epidian 57 utwardzany 1 h w temperaturze 60°C, grubość spoin 0,2 mm, powierzchnie blach trawione)

Przeprowadzone obliczenia numeryczne pozwoliły stwierdzić, że obliczone wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych w spoinach próbek jednozakładkowych osiągały większe wartości niż w spoinach próbek dwuzakładkowych. Mogło to być spowodowane nadmiernym obciążeniem modeli tych próbek i przemieszczeniem równym grubości blachy plus grubość spoiny (w rzeczywistości przemieszczenie to może być nieco mniejsze, ze względu na pewne luzy uchwytów maszyny wytrzymałościowej).

W tabeli 2 zestawiono obliczone MES wartości wybranych, charakterystycznych naprężeń w spoinach badanych połączeń oraz ich trwałość.

TABELA 2

Wartości maksymalnych naprężeń głównych w spoinach badanych połączeń, obliczone MES dla obciążeń: niszczących i maksymalnych cyklu zmęczeniowego oraz trwałość zmęczeniowa tych połączeń

Nr partii	Utwardzanie	Rodzaj próbki	Przygotowanie powierzchni	Grubość spoiny [mm]	$\sigma_{\text{maks niszczące}}$	$\sigma_{\text{maks zmęczeniowe}}$	$\frac{\sigma_{\text{maks*zm}}}{\sigma_{\text{maks*nisz}}}$	Liczba cykli
1	1 h 60°C	D	Trawienie	0,2	82	40	0,49	393 863
2		D		0,03	85	70	0,82	265 573
3		J		0,2	83	60	0,72	75 237
4		J		0,03	95	80	0,84	46 632
5	7 dób	D	Chropowacenie	0,2	38*	26,5	0,7	3 900 000
6		D		0,03	53	31,5	0,59	2 433 000
7		J	Trawienie	0,2	58	40	0,69	488 767
8		J	Trawienie	0,03	57	45	0,79	179 413

D — dwuzakładkowa, J — jednozakładkowa

* — niska wartość naprężeń niszczących świadczy o adhezyjnym zniszczeniu połączenia

Wnioski

Analiza uzyskanych wyników badań pozwoliła stwierdzić, że:

- wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych w spoinach, obliczone dla obciążeń niszczących, okazały się porównywalne z maksymalnymi naprężeniami, uzyskanymi podczas ściskania walcowych próbek odlanych z kleju, co pozwala stwierdzić, że zastosowano poprawne modele obliczeniowe;
- wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych w cienkich spoinach połączeń obciążonych siłami niszczącymi osiągały nieco większe wartości niż w spoinach grubszych, co potwierdza teorię i wyniki badań [7] stwierdzających, że wartości naprężeń niszczących cienkich spoin są większe;

- w cienkich spoinach połączeń obciążonych na ścinanie występuje większe spiętrzenie naprężeń (większa nierównomierność rozkładu) niż w spoinach grubszych, co może być, obok występowania w nich większych wartości naprężeń maksymalnych, jedną z przyczyn mniejszej trwałości zmęczeniowej spoin cienkich;
- obniżaniu wartości obciążeń połączeń klejowych może towarzyszyć różny spadek maksymalnych naprężeń w spoinach klejowych, zależny od rodzaju połączenia, grubości spoiny klejowej oraz właściwości mechanicznych kleju (spoiny), z czego wynika, że nie ma korelacji między wartością maksymalnych naprężeń cyklu zmęczeniowego spoiny a wartością maksymalnego obciążenia zmęczeniowego;
- trwałość zmęczeniowa spoin klejowych istotnie zależy od wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych, występujących w spoinie przy maksymalnej wartości obciążenia cyklu zmęczeniowego.

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

Artykuł wpłynął do redakcji 21.12.2005 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w kwietniu 2006 r.

LITERATURA

- [1] J. GODZIMIRSKI, *Prognozowanie wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych*, Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, vol. 22, nr 3, 1998, 5-24.
- [2] M. ROŚKOWICZ, *Wytrzymałość długotrwała połączeń klejowych*, Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 2004.
- [3] H. PTAKOWSKA-WYŻANOWICZ, *Klejenie metali*, PWT, Warszawa, 1961.
- [4] R. ŚWITKIEWICZ, *Trwałość zmęczeniowa elementów konstrukcji o strukturze warstwowej klejonej*, Rozprawa doktorska, PW, Warszawa, 1972.
- [5] J. GODZIMIRSKI, J. KOZAKIEWICZ, J. ŁUNARSKI, W. ZIELECKI, *Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 1997.
- [6] J. GODZIMIRSKI, A. KOMOREK, Z. KOMOREK, *Badania trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych*, Biuletyn WAT, vol. LIV, nr 5-6, 2005.
- [7] J. GODZIMIRSKI, *Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych*, WNT, Warszawa, 2002.
- [8] J. GODZIMIRSKI, S. TKACZUK, *Określanie właściwości mechanicznych spoin klejowych*, Technologia i Automatyzacja Montażu, nr 3-4, 2004, 95-97.
- [9] W. KOTLARZ, *Analiza wpływu temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych*, Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 1996.
- [10] J. GODZIMIRSKI, S. TKACZUK, *Numeryczne modelowanie spoin klejowych połączeń obciążonych na ścinanie*, Biul. WAT, vol. 54, nr 4, 2005.

J. GODZIMIRSKI, A. KOMOREK

FEM analysis of stresses in under pulsating load adhesive layers

Abstract. The glued joints are characterized by limited durability and limited fatigue life. The search of relationship between fatigue life of joints subjected to shear and the values of maximal strengths in adhesive layers were the object of investigations. The immediate strength and the fatigue life were determined in experimental tests by means of simple single lap joints and simple double lap joints. In fatigue tests, the samples were loaded with pulsating load which maximal value was equal to 0.35 of the breaking load. The samples were glued with the epoxide adhesive Epidian 57 cured in room temperature or temperature 60°C. Two procedures of glued surfaces preparation (pickling or roughening by means of abrasive paper) and two thicknesses of adhesive layers were applied. 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 sheets were taken into consideration for calculations. It was required to determine load-extension curves of adhesive and glued materials for these calculations. It was evaluated how the load change affected the change of maximal stresses in adhesive layers and what had an effect on fatigue life of glued joints. It was pointed out that it is not linear dependence between maximal load values of joints and maximal stress values in adhesive layers. It was found that the fatigue life of adhesive layers was essentially dependent on a joint type, adhesive layer thickness, and the maximal stress values in adhesive layers during fatigue stress cycle.

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

Universal Decimal Classification: 621.792