



Trwałość zmęczeniowa połączeń klejowych obciążonych na ścinanie

JAN GODZIMIRSKI, ANDRZEJ KOMOREK², ZENON KOMOREK¹

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Techniki Lotniczej,

¹Katedra Zaawansowanych Materiałów i Technologii, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

²WSOSP, Katedra Awioniki i Systemów Sterowania,
09-521 Dęblin, ul. Szkoły Podchorążych Lotnictwa 4

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań trwałości zmęczeniowej jednozakładowych połączeń klejowych blach ze stali konstrukcyjnej i blach ze stopu aluminium klejonych Epidianem 57/Z1 oraz klejowymi masami regeneracyjnymi o nazwach handlowych: Belzona 1111, Chester Metal Super i Chester Metal Rapid. Blachy stalowe przygotowywano do klejenia metodą piaskowania, blachy ze stopu aluminium metodami: piaskowania, trawienia lub szorstkowania papierem ściernym. Wykazano, że połączenia zakładkowe elementów o większej sztywności na rozciąganie (stalowych) cechuje zarówno większa wytrzymałość doraźna, jak i większa trwałość zmęczeniowa. Potwierdzono dane literaturowe dotyczące wpływu grubości spoin na ich trwałość zmęczeniową. Wykazano również istotny wpływ sił adhezji na trwałość zmęczeniową połączeń jednozakładowych — wzrost bezwzględnej trwałości zmęczeniowej, ale jednocześnie spadek względnej trwałości zmęczeniowej.

Słowa kluczowe: klej, połączenia klejowe, trwałość zmęczeniowa połączeń klejowych

Symbole UKD: 621.792

Wprowadzenie

W spoinach połączeń klejowych pod wpływem zmiennych naprężeń zachodzi proces zmęczenia. Powoduje on zmniejszenie wytrzymałości i trwałości połączeń klejowych, a jego skutkiem jest nagłe zniszczenie i to przy obciążeniach maksymalnych o wartości o wiele niższej od wytrzymałości statycznej połączenia.

Problematyka trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych jest obiektem badań doświadczalnych i rozważań teoretycznych [1, 2]. Wynika to z niezupełnego rozpoznania właściwości zmęczeniowych konstrukcyjnych połączeń klejowych

spowodowanego trudnościami w jednoznacznej ocenie wyników badań oraz mechanizmu zniszczenia zmęczeniowego tworzyw wielkocząsteczkowych, którymi są kleje konstrukcyjne. Zagadnieniom wytrzymałości zmęczeniowej połączeń klejowych poświęcono stosunkowo niewiele publikacji, z których wynika, że co prawda klejone struktury charakteryzuje wysoka trwałość zmęczeniowa, przewyższająca trwałość struktur integralnych [3, 4], ale jednocześnie wytrzymałość zmęczeniowa połączeń klejowych jest znacznie mniejsza od ich wytrzymałości doraźnej [5] i nie jest skorelowana z tą wytrzymałością [6].

Istnieje potrzeba lepszego poznania oddziaływania czynników konstrukcyjnych wpływających na trwałość zmęczeniową połączeń klejowych, co umożliwiłoby powszechniejsze i bardziej racjonalne stosowanie takich połączeń. Celem badań było poszukiwanie zależności pomiędzy parametrami konstrukcyjnymi połączeń klejowych (np. gatunkiem klejonych materiałów) i technologicznymi (sposobem przygotowania powierzchni klejonych części) a ich trwałością zmęczeniową.

We współczesnych rozwiązaniach konstrukcyjnych najczęściej stosowanym rodzajem połączeń klejowych są połączenia zakładkowe. W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki badań trwałości zmęczeniowej jednozakładkowych połączeń klejowych obciążonych na ścinanie.

Na potrzeby prezentowanej pracy wprowadzono umowne pojęcia:

- *bezwzględna trwałość zmęczeniowa*, przez którą rozumie się liczbę cykli powodujących zniszczenie połączenia przy maksymalnej wartości obciążenia cyklicznego wyrażonej w jednostkach siły,
- *względna trwałość zmęczeniowa*, przez którą rozumie się liczbę cykli powodujących zniszczenie połączenia przy określonym stosunku maksymalnej wartości obciążenia cyklicznego do wytrzymałości doraźnej.

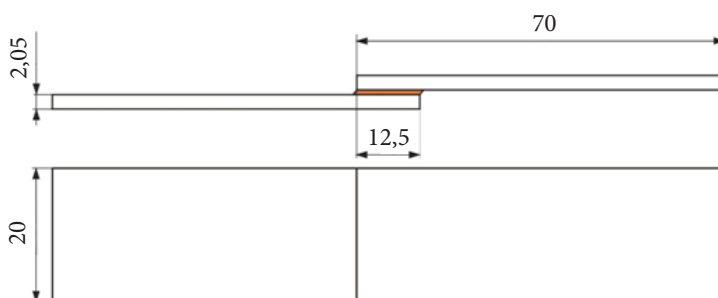
Warunki prowadzenia badań

Badaniom poddawano próbki jednozakładkowe (rys. 1) wykonane z blach: ze stali St3 (S235JR) lub ze stopu aluminium PA7T4 (2024T4). Połączenia klejono kompozycją epoksydową Epidian 57/Z1 (trietylenotetraamina), utwardzaną na ciepło w temperaturze 60°C przez godzinę oraz trzema klejowymi masami regeneracyjnymi znanymi pod handlowymi nazwami: Belzona 1111, Chester Metal Super i Chester Metal Rapie, utwardzanymi w temperaturze otoczenia przez 1 dobę. Próbki każdej partii klejono jednocześnie, w identycznych warunkach, wykonując każdorazowo po 10 próbek każdego typu połączenia.

Powierzchnie elementów klejonych przygotowywano jednym z trzech sposobów:

- trawienie zgodnie z normą PN-69/C-89300,

- schropowacanie papierem ściernym nr 80, przemywanie benzyną ekstrakcyjną i suszenie,
- piaskowanie elektrokorundem, przemywanie benzyną ekstrakcyjną i suszenie.



Rys. 1. Wymiary jednozakładowego połączenia klejowego

Po minimum 24 godzinach od wykonania partii próbek, 5 z nich poddawano statycznej próbie rozciągania. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczano wartość wytrzymałości doraźnej na ścinanie jako średnią arytmetyczną wytrzymałości badanych próbek oraz określano przedział ufności metodą t-Studenta dla poziomu ufności $1 - \alpha = 0,95$. Na pozostałych próbkach przeprowadzono badania zmęczeniowe z częstotliwością 20 Hz, przy której nie występuje przyrost temperatury spoiny wraz z liczbą cykli obciążenia [7].

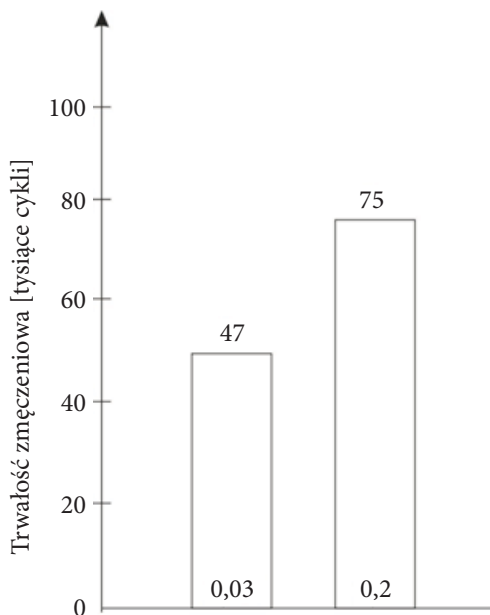
W badaniach stosowano cykl odzerowotętnięcy, a zasadniczo jednostronny o małej (0,1 kN) wartości obciążenia minimalnego. Spowodowane to było potrzebą utrzymania stabilności obciążenia. Badania prowadzono do zniszczenia połączenia lub przerywano po osiągnięciu dużej liczby cykli, rzędu kilkuset tysięcy.

Wyniki badań eksperymentalnych

W pierwszym etapie zbadano dwie partie próbek ze stopu aluminium, klejone Epidianem 57/Z1, różniące się jedynie grubością spoin klejowych, którą określano, wykonując odpowiednie pomiary za pomocą śruby mikrometrycznej. W celu zapewnienia identycznej grubości spoin każdej partii, stosowano jednakowe naciski klejenia, co pozwoliło uzyskać spoiny o grubości $g_k = 0,03$ mm. Umieszczenie dodatkowo w nieutwardzonych spoinach nitek dystansowych i stosowanie jednakowych nacisków klejenia jak w pierwszym przypadku umożliwiło uzyskanie spoin o grubości $g_k = 0,2$ mm. Powierzchnie klejonych elementów zostały przygotowane metodą trawienia.

Wytrzymałość doraźna próbek wynosiła $F_n = 6,50 \pm 0,05$ kN partii o grubości spoiny $g_k = 0,03$ mm oraz $F_n = 6,86 \pm 0,23$ kN partii o grubości $g_k = 0,2$ mm.

W badaniach zmęczeniowych próbki obciążano cyklem o wartości maksymalnej równej 0,35 średniej wytrzymałości doraźnej badanej partii. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wpływ grubości spoiny na średnią trwałość zmęczeniową spoin klejowych próbek zakładkowych wykonanych ze stopu aluminium PA7T4, klejonego klejem Epidian 57/ Z1, utwardzanym w temperaturze 60°C przez 1 godzinę, grubość spoin: 0,2 mm i 0,03 mm

Na podstawie wyników badań stwierdzono, wyraźnie wyższą trwałość zmęczeniową połączeń o większej grubości spoiny.

W dalszej części przeprowadzono badania wpływu rodzaju łączonych elementów oraz zastosowanego tworzywa adhezyjnego na wytrzymałość i trwałość zmęczeniową wykonanych połączeń. Wyniki tych badań przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Wyniki badań eksperymentalnych (statycznych i zmęczeniowych) połączeń klejowych stali konstrukcyjnej oraz stopu aluminium (grubość spoin $g_k = 0,14...0,2$ mm)

Klej	Materiał klejony	Sposób przygotowania powierzchni	Wytrzymałość doraźna F_n [kN]	Maksymalna wartość obciążenia zmęczeniowego [kN]	Liczba cykli	Uwagi
Epidian 57/ Z1, 1 h, 60°C	Stop aluminium	Trawienie	6,25 ± 0,12 6,86 ± 0,23	1,6 (0,26 F_n)	750 000	+
				2,1 (0,30 F_n)	102 537 173 902-37 324	średnia ZN
				2,4 (0,35 F_n)	75 237 80 600-62 108	średnia ZN
				3,1 (0,5 F_n)	8 988 11 020-5 639	średnia ZN
		Piaskowanie	3,19 ± 0,16	1,6 (0,5 F_n)	73 847 85 425-58 722	średnia ZN
				2,1 (0,67 F_n)	4 085 6 483-2 352	średnia ZN
			3,32 ± 0,21	1,3 (0,39 F_n)	171 989	ZN
				1,5 (0,45 F_n)	329 076 859 590	ZN +
	Szorstkowanie	2,18 ± 0,24	1,1 (0,5 F_n)	275 300 337 001-172 865	średnia ZN	
	Stal	Piaskowanie	4,24 ± 0,20	2,1 (0,5 F_n)	427 000 479 881-378 750	średnia ZN
				2,8 (0,6 F_n)	17 330 22 741-12 733	średnia ZN
			4,63 ± 0,20	2,4 (0,54 F_n)	94 648 122 079-67 187	średnia ZN
				1,3 (0,53 F_n)	654 000	+
	Belzona 1111	Stop aluminium	Piaskowanie	2,45 ± 0,25	434 000	+
1,5 (0,6 F_n)					303 000	ZN
302 903					ZN	
1,7 (0,69 F_n)					58 634	ZN

cd. tabeli 1

Chester Metal Super	Stop alu- minium	Piaskowanie	$2,33 \pm 0,25$	$1,3 (0,56 F_n)$	169 718	ZN
					632 050	ZN
					521 500	+
Chester Metal Rapid	Stop alu- minium	Piaskowanie	$1,78 \pm 0,12$	$0,9 (0,5 F_n)$	25 155	ZN
					420 000	+
					194 980	+
				$1,2 (0,66 F_n)$	29 600	ZN
					26 569	ZN

Średnia ZN — średnia trwałość zmęczenia partii próbek zniszczonych,

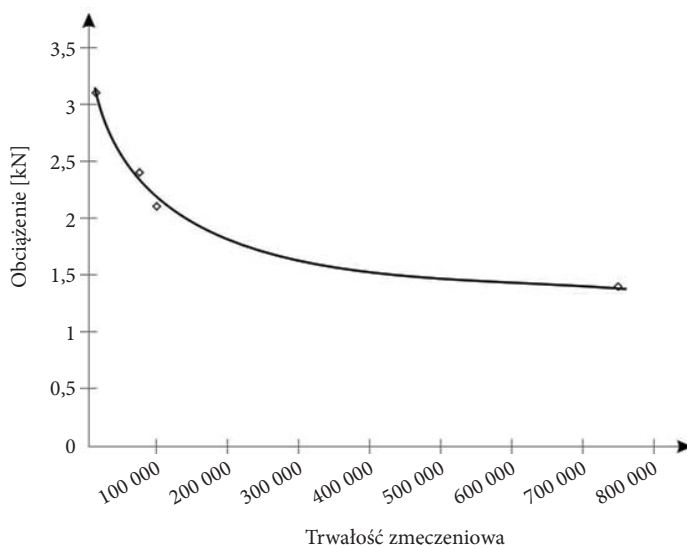
ZN — próbka uległa zniszczeniu podczas badań,

+ — próbka nie uległa zniszczeniu podczas badań (badania przerwano).

Na podstawie danych zestawionych w tabeli 1, przedstawiono zależność trwałości zmęczeniowej połączeń jednozakładkowych blach ze stopu aluminium, klejonych kompozycją Epidian 57/Z1 od ich obciążenia (rys. 3).

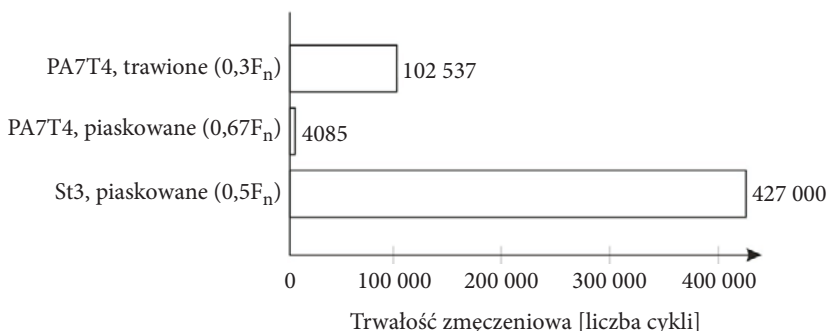
Dla przyjętych poziomów obciążeń wyznaczono ograniczoną trwałość zmęczeniową. Charakter uzyskanej krzywej był podobny do krzywej Whölera, co świadczyło o poprawności przeprowadzonych badań.

Uzyskane wyniki badań wykazały istotny wpływ czynników konstrukcyjnych i technologicznych na wytrzymałość doraźną i trwałość zmęczeniową jednozakładkowych połączeń klejowych. Analizę graficzną wyników badań przedstawiono na rysunkach 4-9.



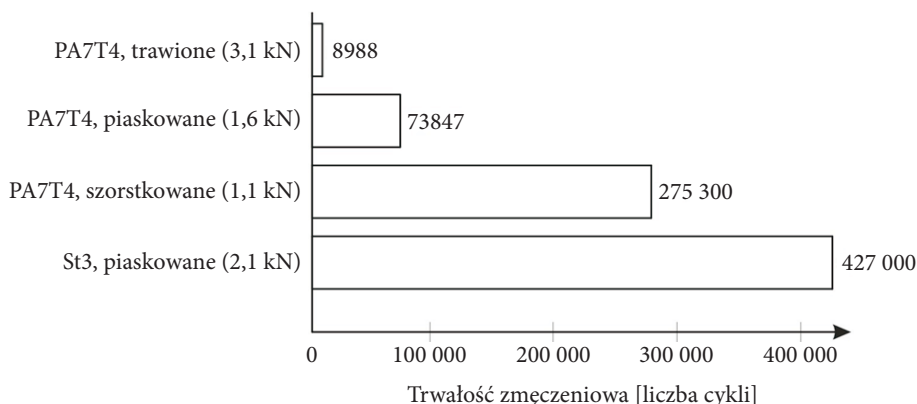
Rys. 3. Trwałość zmęczeniowa połączeń jednozakładkowych ze stopu aluminium, klejonych klejem Epidian 57/Z1, utwardzonym w czasie 1 h w temperaturze 60°C (powierzchnie blach trawione)

Z rysunku 4 wynika, że na trwałość zmęczeniową ma wpływ zarówno rodzaj łączonych materiałów, jak i sposób przygotowania ich powierzchni do klejenia. Połączenia klejowe blach stalowych cechowała najwyższa bezwzględna trwałość zmęczeniowa, co wynika z tego, że przy jednakowym obciążeniu w spoinach próbek stalowych występują mniejsze naprężenia niż w spoinach próbek wykonanych ze stopu aluminium [8]. Zróżnicowana trwałość zmęczeniowa połączeń blach aluminiowych, przygotowanych do klejenia w różny sposób, wskazuje na istotny wpływ sił adhezji na taką trwałość.



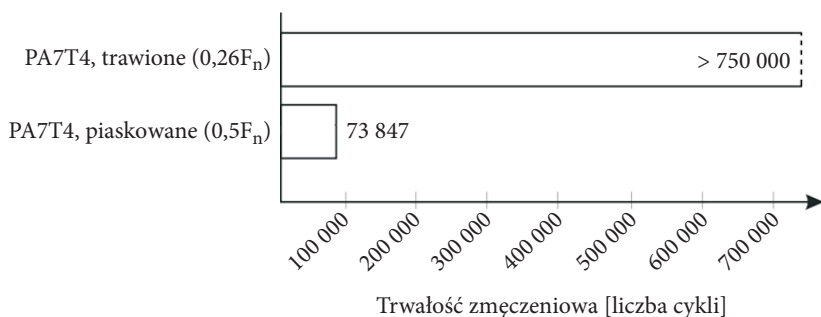
Rys. 4. Trwałość zmęczeniowa połączeń jednozakładkowych, klejonych Epidianem 57/Z1, utwardzonym w czasie 1 h w temperaturze 60°C, obciążonych jednakowym cyklem (0,1... 2,1 kN)

Największą względną trwałość zmęczeniową wykazały próbki stalowe (podobnie jak bezwzględną — rys. 4). Spośród próbek wykonanych ze stopu aluminiowego próbki szorstkowane cechowała największa trwałość względna, jednak obciążenie bezwzględne tych próbek podczas badań było najmniejsze (1,1 kN) (rys. 5).

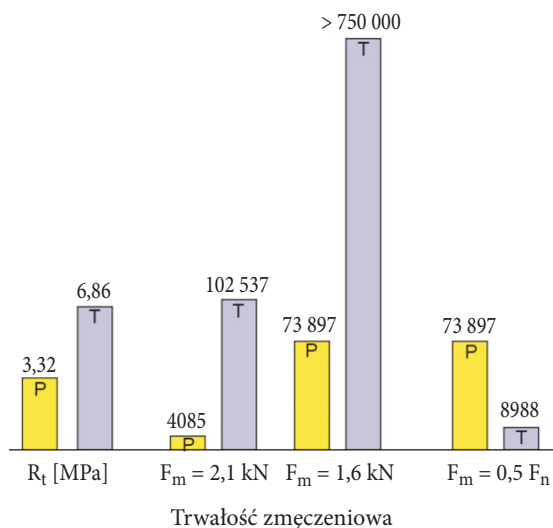


Rys. 5. Trwałość zmęczeniowa połączeń jednozakładkowych, klejonych Epidianem 57/Z1, utwardzonym w czasie 1 h w temperaturze 60°C, przy maksymalnym obciążeniu cyklu zmęczeniowego równym 0,5 wartości siły niszczącej

Przy takiej samej maksymalnej wartości (1,6 kN) obciążenia cyklu zmęczeniowego próbki trawione charakteryzowała większa trwałość (rys. 6), co świadczy o wpływie sił adhezji na trwałość zmęczeniową połączeń klejowych (rys. 7). Adhezja w połączeniach klejowych jest formowana głównie poprzez sposób i jakość przygotowania powierzchni klejonych elementów, należy więc przykładać dużą wagę do właściwego przeprowadzenia tych operacji.

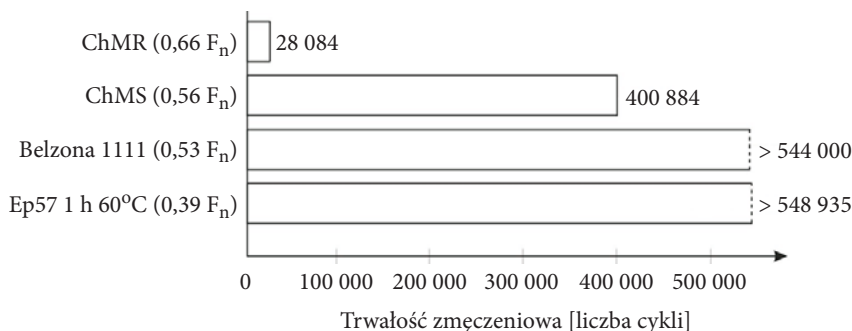


Rys. 6. Trwałość zmęczeniowa połączeń jednozakładkowych ze stopu aluminiowego, klejonych Epidianem 57/Z1, utwardzonym w czasie 1 h w temperaturze 60°C , przy maksymalnym obciążeniu cyklu zmęczeniowego 1,6 kN



Rys. 7. Wpływ sposobu przygotowania do klejenia (P — piaskowanie, T — trawienie) powierzchni blach ze stopu aluminium na wytrzymałość doraźną na ścinanie R_t oraz względną i bezwzględną trwałość zmęczeniową połączeń jednozakładkowych klejonych Epidianem 57/Z1

Na rysunku 8 porównano trwałość zmęczeniową próbek łączonych różnymi tworzywami adhezyjnymi, obciążonych podobnym cyklem.



Rys. 8. Porównanie trwałości zmęczeniowej na ścinanie (maksymalne obciążenie cyklu zmęczeniowego 1,3 kN, ChMR 1,2 kN) różnych tworzyw adhezyjnych (próbki jednozakładowe ze stopu aluminium, powierzchnie przygotowane do klejenia metodą piaskowania)



Rys. 9. Porównanie względnej trwałości zmęczeniowej na ścinanie (maksymalne obciążenie cyklu zmęczeniowego równe ~0,66 wartości siły niszczącej) różnych tworzyw adhezyjnych (próbki jednozakładowe ze stopu aluminium, powierzchnie przygotowane do klejenia metodą piaskowania)

Najniższą trwałość wykazały próbki klejone materiałem Chester Metal Rapid, jednak ich obciążenie względne było największe. Belzonę 1111 i Epidian 57/Z1 cechowała stosunkowo wysoka trwałość zmęczeniowa, ale obciążenie względne Epidianu 57/Z1 było znacznie niższe.

Względna trwałość zmęczeniowa próbek klejonych materiałem Belzona 1111 okazała się większa niż klejonych Epidianem 57/Z1, co prawdopodobnie wynika z większej odporności na pęcznienie Belzony 1111 [6].

Z badań wynika, że obciążanie zmęczeniowe połączeń wykonanych tworzywem Chester Metal Rapid i Epidian 57/Z1 na poziomie 0,66 wartości siły niszczącej jest niedopuszczalne ze względu na ich niską trwałość.

Wnioski

1. Trwałość zmęczeniowa połączeń klejowych zależy od grubości spoin. Połączenia klejowe, których spoiny mają większą grubość (0,2 mm) cechuje większa trwałość zmęczeniowa w porównaniu ze znacznie cieńszymi (0,03 mm). Przyczyną tego są większe wartości naprężeń w spoinach o mniejszej grubości połączeń zakładkowych obciążonych identycznymi siłami [8].
2. Klejowe połączenia zakładkowe elementów o większej sztywności na rozciąganie (np. stalowych) charakteryzuje zarówno większą wytrzymałość doraźną, jak i większą trwałość zmęczeniową w porównaniu z połączeniami elementów o mniejszej sztywności (np. ze stopów aluminiowych). Spowodowane jest to mniejszymi wartościami naprężeń w spoinach łączących bardziej sztywne elementy [6].
3. Wartość sił adhezji istotnie wpływa na trwałość zmęczeniową połączeń klejowych. Wraz ze wzrostem sił adhezji wzrasta bezwzględna trwałość zmęczeniowa połączeń (wzrasta wartość obciążenia, przy którym połączenie przenosi określoną liczbę cykli), ale spada ich względna trwałość zmęczeniowa (spada wartość obciążenia odniesionego do wytrzymałości doraźnej połączenia, przy którym połączenie przenosi określoną liczbę cykli). Tak więc stosowanie zabiegów podwyższających wytrzymałość adhezyjną połączeń jest zawsze wskazane, ale należy zdawać sobie sprawę, że połączenia o większej wytrzymałości, wynikającej z bardziej efektywnego przygotowania powierzchni do klejenia mogą być obciążane zmęczeniowo mniejszymi względnymi wartościami sił, niż połączenia o niższej wytrzymałości.
4. Aby uzyskać trwałość zmęczeniową na poziomie 100 000 cykli, którą można uznać za wystarczającą w doraźnych (polowych) naprawach sprzętu wojskowego, połączenia zakładkowe wykonane tworzywami z grupy klejowych mas regeneracyjnych nie powinny być obciążane cyklem zmęczeniowym, którego wartość maksymalna przekracza 0,5 ich wytrzymałości doraźnej. Połączenia łączone klejem Epidian 57/Z1 mogą być obciążane w mniejszym zakresie. Wyższa względna trwałość zmęczeniowa klejowych mas regeneracyjnych wynika, prawdopodobnie, z ich mniejszej skłonności do pęcznienia w temperaturze otoczenia.

Artykuł wpłynął do redakcji 24.11.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w styczniu 2009 r.

LITERATURA

- [1] W. ZIELECKI, Ocena zależności między statyczną a zmęczeniową wytrzymałością na oddzieranie połączeń klejowych, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, nr 130, Mechanika, z. 43, 1994.
- [2] K. HARSAN, Wpływ czynników konstrukcyjnych i technologicznych na wytrzymałość zmęczeniową klejowych połączeń czopowo-tulejowych, rozprawa doktorska, Politechnika Rzeszowska, 1997.

- [3] H. РТАКОВСКА-ВУЖАНОВИЧ, *Klejenie metali*, PWT, 1961.
- [4] R. ŚWITKIEWICZ, *Trwałość zmęczeniowa elementów konstrukcji o strukturze warstwowej*, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 1972.
- [5] А. С. ФРЕЙДИН, *Прочность и долговечность клеевых соединений*, Химия, Москва, 1981.
- [6] А. КОМОРЕК, *Badania trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 2008.
- [7] J. GODZIMIRSKI, А. КОМОРЕК, Z. КОМОРЕК, *Badania trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych*, Biul. WAT, 5-6, Warszawa, 2005.
- [8] J. GODZIMIRSKI, А. КОМОРЕК, *Analiza MES naprężeń w spoinach klejowych obciążonych zmęczeniowo*, Biul. WAT, 2, Warszawa, 2006.

J. GODZIMIRSKI, А. КОМОРЕК, Z. КОМОРЕК

Fatigue life of glued joints subjected to shear

Abstract. The paper presents the result of fatigue research of simple single lap joints subjected to shear. The samples were made of steel sheet and duralumin sheet. The samples were glued the epoxide adhesive Epidian 57/Z1 and glue regenerative composites: Belzona 111, Chester Metal Super and Chester Metal Rapid. The glued surfaces of steel samples were prepared for gluing by sand blasting and duralumin samples by: sand blasting, abrasive paper grinding or pickling. It was found that lap joints of more longitudinal rigidity elements (steel) characterize both larger strength and longer fatigue life. The literature data regarding adhesive layer thickness impact on fatigue life of glued joints have been verified.

It was pointed out that there is essential dependence of simple lap joints fatigue life upon adhesive forces — increase in absolute fatigue life but simultaneously decrease in relative fatigue life.

Keywords: adhesive, glued joints, glued joints fatigue life

Universal Decimal Classification: 621.792

