

Jan GODZIMIRSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

Andrzej KOMOREK

Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych, Dęblin

Tomasz SMAL

Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych, Wrocław

BADANIA WŁAŚCIWOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH TWORZYW ADHEZYJNYCH

Słowa kluczowe

Tworzywa adhezyjne, badania właściwości wytrzymałościowych, wytrzymałość adhezyjna.

Streszczenie

W pracy zbadano wytrzymałość adhezyjną klejowych kompozytów regeneracyjnych [1] z grupy tzw. „super metale” oraz „rapid” [2]. Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono właściwości wytrzymałościowe wybranych kompozytów w zależności od rodzaju klejonego materiału oraz warunków utwardzania. Metodą organoleptyczną oceniono również rodzaj zniszczenia badanych spoin. Przedstawione w pracy wyniki umożliwiają porównanie właściwości wytrzymałościowych badanych tworzyw adhezyjnych oraz umożliwią prognozowanie wytrzymałości połączeń wykonanych z ich użyciem wykorzystując metody numeryczne.

Wprowadzenie

Brak wiarygodnych metod prognozowania wytrzymałości połączeń klejowych, wynikający ze złożonego stanu naprężeń w spoinach, nieliniowej zależ-

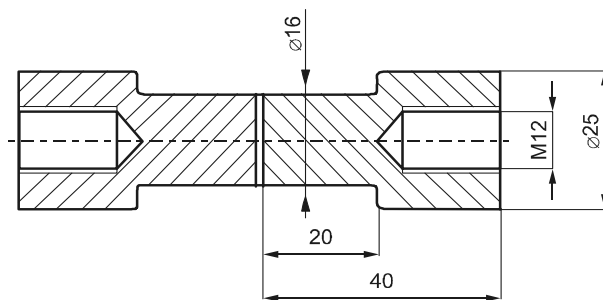
ności naprężeń od odkształceń klejów ($\sigma = \sigma(\epsilon)$) oraz możliwości zarówno kohezyjnego, jak i adhezyjnego zniszczenia spoin, zmusza do poszukiwania nowych sposobów w zakresie obliczania nośności konstrukcji klejonych lub naprawianych metodami klejenia [3–7]. Metody numeryczne (np. metoda elementów skończonych) umożliwiają wyznaczanie rozkładów naprężeń w spoinach klejowych [8] oraz stanów ich wyężenia wg różnych hipotez, co przy znajomości wartości naprężeń niszczących spoiny pozwala wyznaczyć wytrzymałość połączenia. Zastosowanie metod numerycznych wymaga jednak znajomości właściwości mechanicznych materiałów badanego połączenia, a w tym między innymi, zależności kleju $\sigma = \sigma(\epsilon)$ oraz wartości naprężeń kohezyjnych i adhezyjnych niszczących spoiny [9, 10].

Projektując połączenie klejowe należy dążyć do tego, aby ewentualne zniszczenie spoiny klejowej miało charakter kohezyjny. W praktyce często występują jednak zniszczenia adhezyjne spoin, zwłaszcza wtedy, gdy brak jest możliwości zastosowania optymalnych (umożliwiających osiągnięcie maksymalnej wytrzymałości) metod przygotowania powierzchni do klejenia. Z problemem takim mamy często do czynienia na przykład podczas wykonywania awaryjnych napraw sprzętu w warunkach polowych [11]. W porównaniu z procesami produkcyjnymi, technologie remontowe nie zawsze mogą korzystać z najwłaściwszych metod przygotowania powierzchni do klejenia, np. trawienia. W naprawach stosuje się najczęściej mechaniczne metody przygotowania powierzchni do klejenia, które nie zapewniają największej adhezji spoin.

Istnieje zatem problem określenia takich parametrów wytrzymałościowych tworzyw adhezyjnych, które umożliwią prognozowanie wytrzymałości połączeń klejowych metodami numerycznymi. Jednym z takich parametrów jest wartość naprężeń niszczących wiązania adhezyjne spoiny. Określenie i porównanie tej właściwości klejowych kompozytów regeneracyjnych było celem przedstawionej pracy. Obiektem badań były kompozyty klejowe z grupy tzw. „super metale” (Belzona 1111, Unirep 3 i Chester Metal Super) oraz grupy „rapid” (Belzona 1221, Unirep 1 i Chester Metal Rapid), które w dalszej części pracy oznaczano za pomocą symboli.

1. Metodyka badań

Zgodnie z [10] w badaniach stosowano próbki klejone czołowo, obciążone osiowo-symetrycznie (rys. 1). W spoinach takich próbek występuje stan naprężenia zbliżony do jednoosiowego rozciągania. W zależności od rodzaju zniszczenia spoiny klejowej (adhezyjnego lub kohezyjnego) można, wykonując badania takich próbek, określić wartość uogólnionych niszczących sił adhezji lub wytrzymałość kohezyjną badanego materiału spoiny (wytrzymałość doraźną na rozciąganie).



Rys. 1. Próbką zastosowaną do badania wytrzymałości klejów na odrywanie

Elementy próbek wykonano ze stopu aluminium PA6T4¹, stali St3 oraz mosiądzu. Jako podstawowy sposób przygotowania powierzchni próbek do klejenia przyjęto obróbkę strumieniowo-ścierną elektrokorundem, a następnie przemywanie benzyną ekstrakcyjną, którą odparowywano w suszarce laboratoryjnej w temperaturze 60°C w czasie 10 minut. Taki sposób przygotowania powierzchni do klejenia będzie najczęściej stosowany w remoncie, a jednocześnie wg danych literaturowych zapewnia dostatecznie dobrą adhezję [1,12].

Klejenie próbek realizowano bezpośrednio po przygotowaniu ich powierzchni. W badaniach klejowych kompozytów regeneracyjnych z grupy „super metale” stosowano następujące warunki utwardzania:

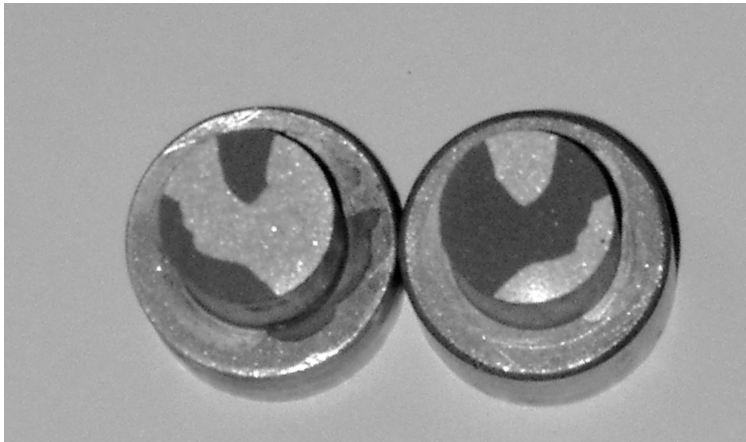
1. Trzy doby w temperaturze około 18°C.
2. Dwie godziny w temperaturze 80°C.

Kompozyty klejowe z grupy „rapid” utwardzano w temperaturze pokojowej (około 18°C) i badano po od 3 do 20 godzinach od czasu sklejenia. W badaniach materiału Belzona 1111 zastosowano różne grubości spoiny około 0,1...0,14 mm – wynikające z dociśnięcia klejonych powierzchni, oraz około 0,2...0,23 mm uzyskane przez wprowadzenie do spoin nitki dystansowych o takiej grubości. Zabieg ten miał na celu sprawdzenie, czy badane tworzywo cechuje istotna zależność wytrzymałości od grubości spoiny, charakterystyczna dla klejów.

Wyniki badań podano w formie tabelarycznej, prezentując średnie naprężenie niszczące (iloraz siły i pola powierzchni spoiny klejowej) obliczone na podstawie średniej siły niszczącej, uzyskanej dla co najmniej sześciu próbek, wraz z przedziałem ufności obliczonym dla poziomu ufności $1-\alpha = 0,95$. Organoleptycznie określono również rodzaj zniszczenia spoin (por. rys. 2 i 3)².

¹ PA6T4 – stop aluminium z miedzią (duraluminium) przesycony i poddany naturalnemu starzeniu w celu uzyskania lepszych właściwości wytrzymałościowych takiego stopu.

² Doświadczenia z realizowanych do tej pory badań wskazują, że do oceny rodzaju (charakteru) zniszczenia spoin klejowych w przypadku klejowych kompozytów regeneracyjnych, w zupełności wystarcza badanie organoleptyczne takich spoin po ich zniszczeniu.



Rys. 2. Przykład typowo adhezyjnego zniszczenia połączenia klejowego



Rys. 3. Przykład kohezyjnego zniszczenia połączenia klejowego

2. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań klejenia próbek ze stopu aluminiowego zamieszczono w tabeli 1.

Cieńsze spoiny materiału S1 charakteryzowała nieco większa wytrzymałość, mieszcząca się jednak w granicach przedziału ufności i w związku z tym badania pozostałych materiałów wykonano głównie dla grubości spoin $\delta_k \sim 0,1$ mm.

Tabela 1. Porównanie wytrzymałości na osiowo-symetryczne odrywanie klejowych kompozytów regeneracyjnych (materiał próbek: stop aluminium PA6T4, powierzchnie próbek przygotowywane do klejenia metodą piaskowania)

Rodzaj kompozytu	Grubość spoiny [mm]	Warunki utwardzania	Naprężenia niszczące [MPa]	Rodzaj zniszczenia
S1	0,2	3 doby 18°C	23,2±0,7	kohezyjne
		2 godziny 80°C	34,2±2,1	kohezyjne
	0,1	2 godziny 80°C	36,9±3,1	kohezyjne
		3 doby 18°C	30,82±1,90	kohezyjne
S2	0,1	3 doby 18°C	27,94±2,84	kohezyjne
		2 godziny 80°C	24,84±2,61	kohezyjne
S3	0,1	3 doby 18°C	24,37±0,91	kohezyjne
		2 godziny 80°C	20,3±2,6	kohezyjne
R1	0,1	20 godzin 18°C	12,6±2,71	adhezyjne
			9,2±1,43	adhezyjne
R2	0,1	20 godzin 18°C	5,89±0,56	adhezyjne
			6,97±0,70	adhezyjne
R3	0,1	4 godziny 20°C	25,4±1,9	kohezyjne
		24 godziny 15°C	27,2±1,1	adhezyjne

Analizując otrzymane wyniki, stwierdzić można, że wszystkie spoiny wykonane z klejowych kompozytów regeneracyjnych z grupy „super metale” uległy zniszczeniu kohezyjnemu, co świadczy, że zastosowany sposób przygotowania do klejenia powierzchni stopów aluminium, polegający na ich piaskowaniu, jest właściwy dla tych materiałów. Dla wszystkich badanych kompozytów klejowych tej grupy uzyskano stosunkowo wysoki poziom naprężeń niszczących. Największą wytrzymałość kohezyjną wykazał kompozyt S1 utwardzany w temperaturze 80°C. Utwardzanie tego materiału w podwyższonej temperaturze pozwala zwiększyć jego wytrzymałość o około 30%. Pozostałe dwa materiały z grupy „super metale” wykazały większą wytrzymałość kohezyjną po utwardzaniu w temperaturze otoczenia – największą S2. Należy sądzić, że zastosowana temperatura utwardzania 80°C była dla nich zbyt wysoka i mogła prowadzić do termicznej degradacji tworzywa [13].

Spoiny klejowych kompozytów regeneracyjnych z grupy „rapid” uległy zniszczeniu adhezyjnemu, co świadczy o ich wyraźnie gorszych właściwościach adhezyjnych do stopów aluminium. Jedynie kompozyt R3 uległ zniszczeniu kohezyjnemu przy krótkim czasie utwardzania. Kompozyt ten charakteryzuje ponadto wyraźnie wyższa wytrzymałość na odrywanie, która jest porównywalna z tworzywami z grupy „super metale”.

W kolejnym etapie badań wykonano badania wytrzymałościowe wykorzystując próbki klejone czołowo, obciążone osiowo-symetrycznie wykonane ze stali St3 oraz mosiądzu (tab. 2). Zastosowano identyczny sposób przygotowania

powierzchni do klejenia oraz podobne warunki utwardzania spoin klejowych. Celem badań było sprawdzenie, w jaki sposób wytrzymałość kohezyjna i adhezyjna spoin będzie zależała od rodzaju klejonych materiałów oraz czy piaskowanie jest równie efektywnym sposobem przygotowania do klejenia stali i mosiądzu, jak stopów aluminiowych.

Tabela 2. Porównanie wytrzymałości na osiowo-symetryczne odrywanie klejowych kompozytów regeneracyjnych (powierzchnie próbek przygotowywane do klejenia metodą piaskowania)

Rodzaj kompozytu	Klejony materiał	Grubość spoiny [mm]	Warunki utwardzania	Naprężenia niszczące [MPa]	Rodzaj zniszczenia
S1	Stal St3	0,2	3 doby 18°C	21,7±1,2	kohezyjne
		0,1	3 doby 18°C	25,1±2,0	kohezyjne
S2		0,1	3 doby 18°C	21,6±2,1	adhezyjne
S3		0,1	3 doby 18°C	32,9±2,65	kohezyjne
R1		0,1	20 godzin 18°C	24,9±3,0	koh-adhezyjne
R2		0,1	20 godzin 18°C	23,0±1,91	koh-adhezyjne
R3		0,1	24 godzin 18°C	32,91±3,60	punktowe koh-adhezyjne
S1	Mosiądz	0,1	3 doby 18°C	26,29 (19,52-34,41)	adhezyjne lub adh-kohezyjne
S2		0,1	3 doby 18°C	37,12±2,11	adh-kohezyjne
S3		0,1	3 doby 18°C	29,84±3,01	koh-adhezyjne
R1		0,1	20 godzin 18°C	8,36±0,58	adhezyjne
R2		0,1	20 godzin 18°C	16,15±1,87	adhezyjne
R3		0,1	20 godzin 18°C	27,70±1,97	adhezyjne

Analiza badań zamieszczonych w części pierwszej tabeli 2 wynika, że tylko spoiny wykonane z klejowych kompozytów regeneracyjnych z grupy „super metale” S1 i S3 uległy zniszczeniu kohezyjnemu, co świadczy, że tylko w przypadku tych kompozytów zastosowany sposób przygotowania do klejenia powierzchni stali St3 można uznać za właściwy. Spoiny wykonane z kompozytu klejowego S2 uległy zniszczeniu adhezyjnemu, a spoiny dwóch klejowych kompozytów regeneracyjnych z grupy „rapid” uległy zniszczeniu kohezyjno-adhezyjnemu, a jednej (R3) adhezyjnemu. Uzyskane wyniki świadczą, że zastosowany sposób przygotowania powierzchni stali St3 nie pozwala na uzyskanie właściwego poziomu wytrzymałości adhezyjnej tych kompozytów w przypadku przyjętego sposobu ich obciążania.

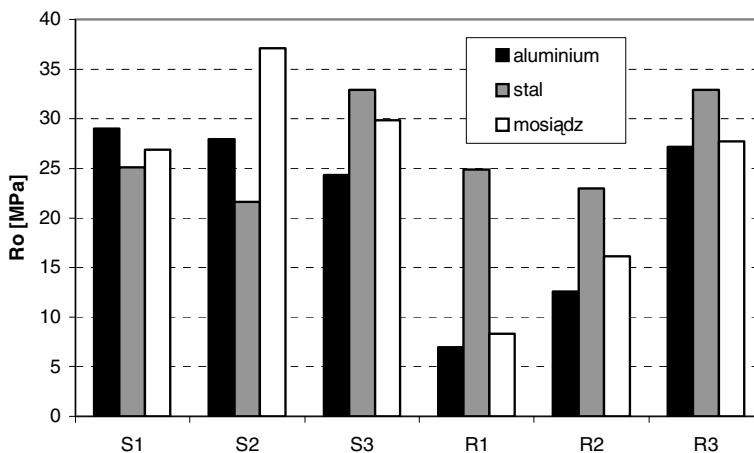
Pomimo że w przypadku większości badanych kompozytów klejowych następowało adhezyjne lub kohezyjno-adhezyjne niszczenie spoin, to uzyskano stosunkowo wysoki poziom naprężeń niszczących. Największą wytrzymałość na osiowo-symetryczne odrywanie uzyskano dla materiałów S3 i R3. Okazało się również, że klejowe kompozyty regeneracyjne grupy „rapid” cechuje zdecydowanie lepsza adhezja do stali niż do stopu aluminiowego.

Kompozyt R3 utwardzany 24 godziny w 18°C w połączeniach części stalowych uległ zniszczeniu adhezyjnemu przy naprężeniach normalnych $32,91 \pm 3,60$ MPa. Ten sam kompozyt utwardzany 4 godziny w 20°C w połączeniach części ze stopu aluminium uległ zniszczeniu kohezyjnemu przy naprężeniach normalnych $25,4 \pm 1,9$ MPa, co może świadczyć albo o niepełnym utwardzeniu spoiny w czasie 4 godzin, albo o istotnym wpływie sił adhezyjnych na jej wytrzymałość kohezyjną. W powtórzonych badaniach przy dłuższym utwardzaniu spoiny wystąpiło zniszczenie adhezyjne przy większym poziomie naprężeń $27,2 \pm 1$ MPa, a więc należy sądzić, że w ciągu 4 godzin nie nastąpiło całkowite usieciowanie tego kompozytu.

W przypadku klejenia próbek mosiężnych (druga część tabeli 2) dla żadnego z badanych kompozytów nie uzyskano wyłącznie kohezyjnego zniszczenia spoiny klejowej. Pomimo to, dla kompozytów z grupy „super metale”, uzyskano wyższe poziomy naprężeń niż uzyskane dla próbek duraluminiowych i stalowych. Świadczyć to może o tym, iż w przypadku mosiężnego materiału podłoża znaczną rolę w uzyskaniu odpowiednio wysokiej adhezji odgrywa adhezja specyficzna, która w mniejszym stopniu zależy od właściwego rozwinięcia powierzchni klejonego podłoża, a w większym od rodzaju klejonego materiału. Wśród kompozytów z grupy „rapid” najlepsze właściwości wytrzymałościowe ponownie charakteryzują materiał R3, którego wytrzymałość na odrywanie jest porównywalna z kompozytami klejowymi z grupy „super metale”.

Wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań dla celów porównawczych zamieszczono na wykresie (rys. 4).



Rys. 4. Wytrzymałość na odrywanie klejowych kompozytów regeneracyjnych dla różnych materiałów podłoża

Przeprowadzone badania i analiza otrzymanych wyników upoważnia do sformułowania następujących wniosków:

1. Zastosowane w badaniach próbki czołowe obciążone osiowo-symetrycznie na odrywanie umożliwiają organoleptyczną ocenę rodzaju zniszczenia spoiny.
2. Badane tworzywa adhezyjne, przy przygotowaniu powierzchni do klejenia metodą piaskowania, wykazują różną wytrzymałość adhezyjną do różnych stopów metali.
3. Charakterystyczny jest fakt, że każdy z rozpatrzonych kompozytów klejowych z grupy „super metale” cechuje największa wytrzymałość dla innego materiału podłoża. Nie można zatem wskazać w tym przypadku najlepszego kompozytu klejowego, ponieważ z trzech rozpatrzonych kompozytów z tej grupy wszystkie wykazują porównywalne właściwości adhezyjne. Kompozytem, który wykazuje najbardziej zbliżoną wytrzymałość dla wszystkich zastosowanych materiałów podłoża jest S1.
4. Wśród kompozytów z grupy „rapid” można wskazać jeden (R3), który wykazuje znacznie lepsze właściwości adhezyjne w stosunku do pozostałych badanych tworzyw. R3 charakteryzuje ponadto, podobnie jak S1, najbardziej wyrównana wytrzymałość dla trzech rozpatrzonych materiałów podłoża.
5. Rozwinięcie powierzchni podłoża poprzez jej piaskowanie wydaje się być właściwym sposobem jej przygotowania do klejenia w przypadku stosowania kompozytów klejowych z grupy „super metale”.

Bibliografia

1. Materiały reklamowe i katalogi napraw produktów: Chester Molecular, Belzona, Unirep.
2. Smal T., Jakubczak M.: Chemoutwardzalne kompozyty klejowe w naprawach bitewnych i awaryjnych Uzbrojenia i Sprzętu Wojskowego. Zeszyty Naukowe WSO WL nr 2(128), Wrocław 2003, 148–154.
3. Godzimirski J.: Prognozowanie wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń vol. 22, 3/1998.
4. Kuczmaszewski J.: Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali. Rozprawa habilitacyjna, Politechnika Lubelska, Lublin 1995.
5. Prolongo S. G., Rosario G., Urena A.: Comparative study on the adhesive properties of different poxy resins. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 26 (2006), 125–132.
6. Kohli D. K.: Improved 121stC curing epoxy film adhesive for composite bonding and repair applications: FM 300-2 adhesive system. *Adhesion and Adhesives* 19 (1999), 231–242.

7. Sargent J.P.: The influence of inclusions on the strength of adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 26 (2006), 151–161.
8. Godzimirski J., Tkaczuk S.: Ocena przydatności metod numerycznych do obliczania wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych. *Biuletyn WAT* 9/1998, 111–120.
9. Godzimirski J., Tkaczuk S.: Określanie właściwości mechanicznych spoin klejowych. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 3–4/2004, 95–97.
10. Godzimirski J., Tkaczuk S.: Numeryczne modelowanie adhezji połączeń klejowych. *Przegląd Mechaniczny*, 9/2005, 32–34.
11. Smal T.: Naprawy sprzętu wojskowego z wykorzystaniem kompozytów klejowych. *Przegląd Wojsk Lądowych*, 3/2005, 41–44.
12. Smal T.: Badanie klejowych mas regeneracyjnych dla potrzeb napraw polowych sprzętu wojskowego. Praca doktorska. WAT, Warszawa 2000.
13. Kotlarz W.: Analiza wpływu temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych. Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 1996.

Recenzent:

Jacek W. KACZMAR

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

Research of strength features of adhesive material

Key words

Adhesive material, research of strength features, adhesion strength.

Summary

The paper presents research into adhesion strength of adhesive materials from the groups “super metal” and “rapid”. Strength features of selected adhesives materials were researched depending on the sort of glued metal and setting conditions. The type of adhesive joints was researched. The presented tests enable comparisons between the strength features of the tested adhesive materials and make it possible to predict the strength of adhesive joints by using numeric methods.

