

Marek ROŚKOWICZ

Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

WYBRANE PROBLEMY DŁUGOTRWAŁEJ EKSPLOATACJI POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH

Słowa kluczowe

Klejenie, połączenia klejowe, statyczna trwałość czasowa połączeń w podwyższonej temperaturze, modyfikowanie spoiny.

Streszczenie

W pracy przedstawiono wybrane wyniki analizy doświadczalnej dotyczącej statycznej trwałości czasowej spoin klejowych obciążonych długotrwałe w podwyższonej temperaturze. W badaniach wykorzystano kleje epoksydowe oparte na żywicach Epidian 5 i Epidian 57 oraz klejowe kompozyty regeneracyjne z wypełniaczami metalicznymi. Spoiny połączeń klejowych poddano modyfikacji. Stwierdzono, że modyfikowanie spoiny klejowej tkaniną szklaną, elektrokorundem i wypełniaczami metalicznymi istotnie poprawia statyczną trwałość czasową połączenia w podwyższonej temperaturze.

Wprowadzenie

Połączenia klejowe od lat pięćdziesiątych poprzedniego stulecia są z powodzeniem stosowane do łączenia elementów konstrukcji. Przewiduje się, że w najbliższej przyszłości połączenia klejowe będą stanowić około 10% wszystkich rodzajów połączeń stosowanych w budowie maszyn. Taki stan rzeczy wynika z ciągłego postępu w jakości klejów i ich technologii, coraz szerszego wykorzystania w konstrukcjach nowoczesnych materiałów – w tym również i kom-

pozytów – gdzie połączenia klejowe stanowią szczególnie cenne uzupełnienie innych metod łączenia. Nie bez znaczenia są również wyjątkowe cechy tego rodzaju połączeń w porównaniu ze spawaniem, zgrzewaniem, nitowaniem czy połączeniami śrubowymi, między innymi: równomierne rozłożenie naprężeń w łączonych elementach, możliwość łączenia różnego rodzaju materiałów, których połączenie innymi metodami jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe, zmniejszenie (redukcja) ogólnej masy połączenia i kosztów produkcji. Klejenie staje się również niezastąpioną metodą przy naprawach i remontach maszyn i urządzeń, szczególnie wykonywanych w warunkach polowych, gdzie ta metoda łączenia wykorzystywana jest do czasowego wzmacniania konstrukcji lub do pełnego odtwarzania jej wytrzymałości [1, 2, 3].

Jednocześnie należy pamiętać o ograniczeniach związanych z tym sposobem łączenia części maszyn. Połączenia klejowe charakteryzuje ograniczona statyczna trwałość czasowa i zmiana wytrzymałości w czasie (wytrzymałości długotrwałej), szczególnie w podwyższonej temperaturze. Przyjmuje się dwie grupy przyczyn ograniczonej statycznej trwałości czasowej tego rodzaju połączeń. Pierwsza związana jest z procesami starzeniowymi zachodzącymi w samej spoinie klejowej traktowanej jako tworzywo wielkocząsteczkowe – zmiana wytrzymałości kohezynnej – oraz procesami zachodzącymi na granicy faz spoina klejowa – łączony element – zmiana wytrzymałości adhezyjnej. W długotrwałej eksploatacji połączeń klejowych procesy starzenia połączenia związane są przede wszystkim z wpływem środowiska, w jakim połączenie jest eksploatowane. Badania wskazują przede wszystkim na wyraźny związek trwałości oraz wytrzymałości długotrwałej z procesami dyfuzyjnymi wilgoci przebiegającymi na granicy faz (spoina klejowa–łączony element) i co się z tym wiąże, z mechanizmem desorpcji powodującym uwalnianie wiązań adhezyjnych [9]. Istotny wpływ na procesy starzenia ma budowa chemiczna kleju, jak również zdolność do utleniania powierzchni metali. Dotyczy to szczególnie tych metali (np. stali), których tlenki są słabo związane z podłożem i mogą tworzyć „osłabiającą warstwę graniczną” [9]. Skutecznym sposobem pozwalającym w procesie eksploatacji na zabezpieczenie połączeń przed wpływem środowiska i istotnie opóźniającym procesy starzenia jest powlekanie połączenia środkami odpornymi na absorpcję wilgoci.

Druga grupa czynników powodująca ograniczoną trwałość połączenia klejowego i mająca istotny wpływ na zmianę jego wytrzymałości w czasie jest związana z procesami reologicznymi zachodzącymi w samej spoinie klejowej. Spoina klejowa jako tworzywo wielkocząsteczkowe o strukturze przestrzennie usieciowanej, w warunkach długotrwałej eksploatacji pod obciążeniem wykazuje właściwości ciała lepkosprężystego (jednoczesne występowanie właściwości lepkich i sprężystych [13]). Niezupełne usieciowanie wynikające z natury tworzyw sztucznych powoduje występowanie „wolnych przestrzeni” (niedosieciowania lub defekty przestrzennego sieciowania [11], gdzie segmenty makroczą-

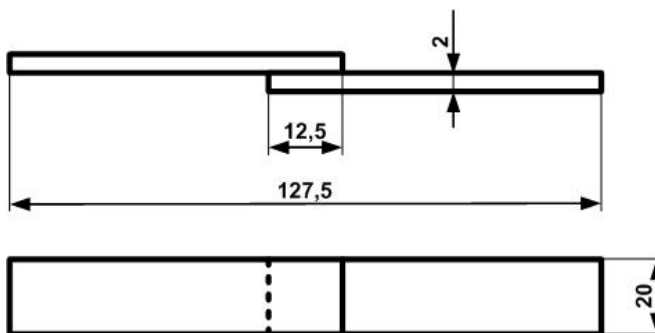
steczek występują w stanie ciekłym (lepka ciecz), podczas gdy makrocząsteczki są w stanie stałym (ciało sprężyste). Lepkosprężyste właściwości tworzyw utwardzalnych charakteryzuje wiele zjawisk, m.in. dotyczących występowania zależności czasowej naprężeń i odkształceń materiału, które w literaturze nazywane są statycznymi efektami czasowymi lub anomaliami czasowymi [4, 13]. Obejmują one m.in. zmiany odkształcenia pod wpływem stałego naprężenia (nawet gdy naprężenie jest bardzo małe), czyli pełzanie materiału. Przyrost odkształceń obciążonego kleju jest już zauważalny w czasie mierzonym w godzinach.

W związku z tym, że połączenia klejowe w procesie eksploatacji zwykle są zabezpieczone przed oddziaływaniem środowiska, co skutecznie osłabia wpływ procesów starzenia na trwałość połączenia, wydaje się, że procesem dominującym w spoinach eksploatowanych długotrwale w warunkach obciążenia statycznego, powodującym ich zniszczenie w ograniczonym czasie jest zjawisko pełzania spoiny klejowej.

Problematyka długotrwałej eksploatacji połączeń klejowych ze względu na czasochłonność prac eksperymentalnych przedstawiana jest w literaturze niedostatecznie. Dlatego też podjęto badania połączeń klejowych obciążonych długotrwale, których celem jest poszukiwanie skutecznych metod podwyższania trwałości tego rodzaju połączeń. Badania powinny również uzupełnić wiedzę o połączeniach adhezyjnych w warunkach długotrwałego obciążenia statycznego.

1. Badania eksperymentalne połączeń klejowych obciążonych na ścinanie

Powszechnie wiadomo, że połączenia klejowe mogą przenosić największe obciążenia, jeżeli są tak zaprojektowane, że w ich spoinach dominują naprężenia normalne ujemne lub styczne [7]. W związku z tym postanowiono przeprowadzić badania połączeń obciążonych na ścinanie, wykorzystując próbki jednozakładowe o kształcie i wymiarach prezentowanych na rys. 1.



Rys. 1. Kształt i wymiary jednozakładowego połączenia klejowego

Różniły się one od próbek zalecanych w normie PN-69/C-89300 szerokością, ze względu na wymiary przyrządów wykorzystywanych do określania ich trwałości [6]. Klejone elementy próbek wykonano ze stopu aluminium PA7 T4. Powierzchnie elementów próbek przygotowano do klejenia metodą piaskowania.

Do badań, ze względu na ich uniwersalność, zostały wytypowane kleje epoksydowe uzyskiwane na bazie żywicy epoksydowej Epidian 5. Kompozycje epoksydowe otrzymywane na podstawie żywicy podstawowej Epidian 5 charakteryzuje duża wytrzymałość mechaniczna i jednocześnie możliwa jest szeroka modyfikacja ich właściwości.

W budowie maszyn konstrukcyjne połączenia klejowe rzadko są obciążane do poziomu przekraczającego połowę wytrzymałości doraźnej [9]. W związku z tym w badaniach postanowiono nie przekraczać obciążenia równego 60% obciążenia niszczącego. Ponadto uwzględniając przewidywane warunki eksploatacji tego rodzaju połączeń, temperaturę badań ograniczono do 70°C.

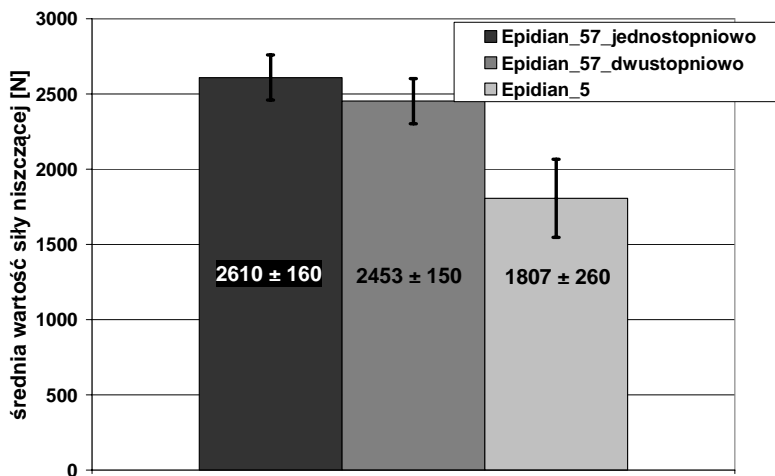
Warunkiem koniecznym przeprowadzenia badań eksperymentalnych trwałości zakładkowych połączeń klejowych było określenie wytrzymałości doraźnej takich połączeń – P_n . Przyjęto, że określona w temperaturze otoczenia wartość wytrzymałości doraźnej zostanie wykorzystana jako wartość odniesienia, na podstawie której będą dobierane obciążenia do badań długotrwałych. Wpływ temperatury na wytrzymałość doraźną Epidianu 57 w przyjętym zakresie jej zmiany (temp. 20°C i 70°C) jest niewielki. Potwierdzają to badania prezentowane w pracy [8], dotyczące kleju Epidian 57.

W pierwszym etapie badań przygotowano 3 partie próbek, w których zastosowano klej Epidian 5 (tą samą nazwą określa się wyrób wyjściowy – żywicę do sporządzania kleju oraz wyrób końcowy – klej) oraz Epidian 57. Kleje były utwardzane trietylenotetraminą (TETRA) w stosunku wagowym 10:1. Epidian 57 na potrzeby tego etapu badań został utwardzony dwoma sposobami zalecanymi przez producenta:

- pierwszym, który polegał na utwardzaniu przez okres 7 dób w temperaturze 20°C – utwardzanie jednostopniowe;
- drugim, który polegał na wstępnym utwardzeniu przez 12 h w temperaturze 20°C, a następnie dotwardzeniu w temperaturze 80°C w ciągu 6 h – utwardzanie dwustopniowe. Tym samym sposobem został utwardzony również klej Epidian 57.

Próby wytrzymałości doraźnej przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej ZD-10, zapewniającej zwiększenie obciążenia od zera do wartości siły niszczącej w sposób jednostajny ze stałą prędkością (na poziomie 500 N/s). Badaniom wytrzymałości na ścinanie poddano po 6 próbek losowo wybranych z każdej partii (pozostałe próbki przeznaczono do badań długotrwałych). Wyznaczona w ten sposób wytrzymałość połączeń (P_n) była średnią arytmetyczną z eksperymentu. Przedziały ufności dla każdej próby określono metodą

t-Studenta dla poziomu ufności $1-\alpha = 0,05$ [10]. Wytrzymałość doraźną na ścianie klejów wykorzystywanych w badaniach porównano na rys. 2.

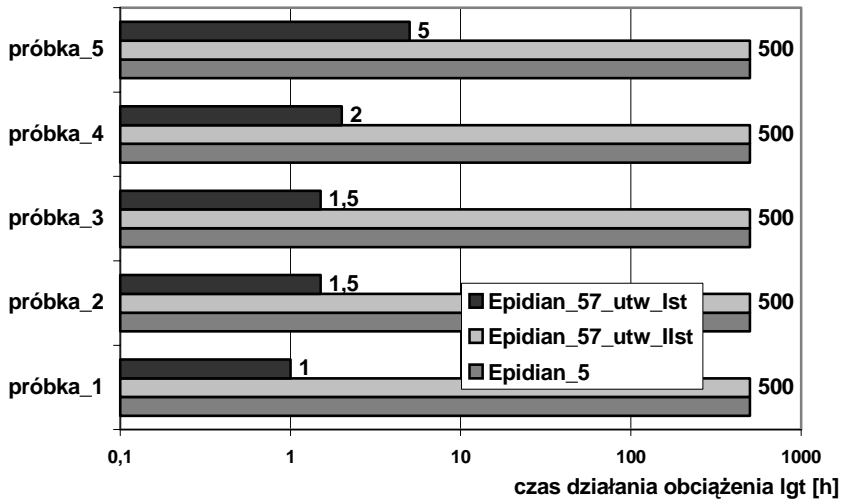


Rys. 2. Porównanie wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych wykonanych z kleju Epidian 5 utwardzanego dwustopniowo i Epidianu 57 utwardzanego dwiema metodami

Największa wytrzymałość doraźna charakteryzowała połączenia wykonane z użyciem kleju Epidian 57 utwardzanego jednostopniowo. W odniesieniu do połączeń wykonanych na bazie kleju Epidian 5 ich wytrzymałość doraźna była o ponad 40% większa. Połączenia wykonane za pomocą kleju Epidian 57 utwardzanego dwiema metodami cechowała porównywalna, w granicach przedziału ufności, wytrzymałość doraźna.

Uzyskane wyniki tego etapu badań stanowiły punkt odniesienia, na podstawie którego dobierano obciążenie do prób długotrwałych. Badania, których celem było określenie trwałości połączeń klejowych przeprowadzono wykorzystując pozostałe próbki z każdej partii, mocując je w specjalnie przygotowanych przyrządach [6], obciążając i umieszczając razem z przyrządami w suszarce laboratoryjnej. Próbkę były utrzymywane w zadanej temperaturze pod stałym obciążeniem, aż do ich zniszczenia. Wielkością mierzoną był czas do zniszczenia poszczególnych próbek. Przyjęto maksymalny czas prowadzenia eksperymentu 500 godzin. Badaniom poddawano jednocześnie 5 próbek obciążonych w identyczny sposób.

Badania rozpoczęto przykładając obciążenie na poziomie 50% średniej wartości wytrzymałości doraźnej (P_n) dla każdej z badanych partii próbek. Temperatura, w jakiej przeprowadzono badania, wynosiła 50°C. Wyniki z tego etapu badań przedstawiono w postaci wykresów kolumnowych, gdzie na osi x odkładano czas do zniszczenia poszczególnych próbek (rys. 3).

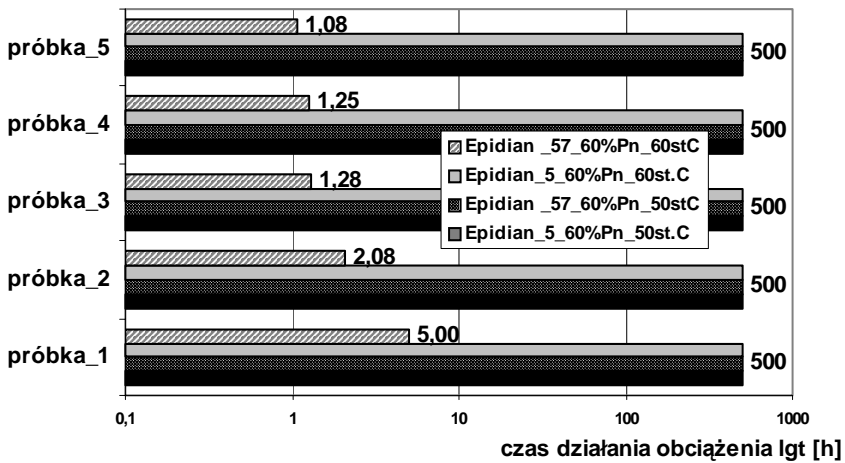


Rys. 3. Porównanie trwałości połączeń pod obciążeniem $0,5 P_n$ w temperaturze 50°C

Trwałość badanych połączeń klejowych okazała się bardzo zróżnicowana. Połączenia wykonane za pomocą kleju Epidian 57, który był utwardzany jedno-stopniowo uległy zniszczeniu w ciągu kilku godzin, natomiast połączenia wykonane za pomocą Epidianu 57 utwardzanego dwustopniowo i Epidianu 5 nie uległy zniszczeniu w ciągu 500 h. W związku z bardzo ograniczoną statyczną trwałością czasową połączeń wykonanych za pomocą Epidianu 57 utwardzanego jedno-stopniowego postanowiono w dalszych badaniach zrezygnować z tego sposobu przygotowania spoiny klejowej (pomimo że połączenia, w których spoiny wykonane za pomocą kleju Epidian 57 utwardzanego jedno-stopniowo charakteryzowała największa wytrzymałość doraźna).

W kolejnym etapie podwyższono temperaturę badań do wartości 60°C nie zmieniając jednocześnie wartości obciążenia. Wszystkie badane próbki, wykonane z Epidianu 5 i Epidianu 57, nie uległy zniszczeniu w założonym czasie, tzn. 500 h. W związku z tym postanowiono wykonać kolejną serię badań zwiększając obciążenie do poziomu 60% wytrzymałości doraźnej. Badania dla tego poziomu obciążenia ponownie wykonano w temperaturze 50°C i dodatkowo 60°C . Wyniki z tego etapu badań przedstawiono na rys. 4.

Analizując otrzymane wyniki warto zauważyć, że tylko połączenia, w których wykorzystano klej Epidian 5 nie uległy zniszczeniu w przyjętych warunkach badań. Połączenia oparte na kleju Epidian 57 przenosiły długotrwałe obciążenie (500 h) na poziomie 60% siły niszczącej w temperaturze 50°C , natomiast po podwyższeniu temperatury badań o 10°C wszystkie z badanych próbek uległy zniszczeniu w ciągu pierwszych godzin eksperymentu.



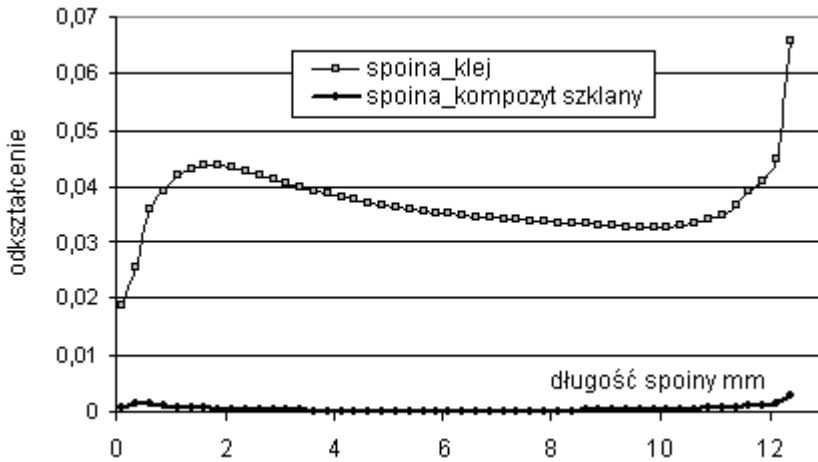
Rys. 4. Porównanie trwałości połączeń wykonanych za pomocą kleju Epidian 5 i Epidian 57, pod obciążeniem $0,6 P_n$ w temperaturze 50°C i 60°C

Przedstawione wyniki badań wskazują na lepsze właściwości wytrzymałościowe kleju Epidian 5 w przypadku jego długotrwałego statycznego obciążenia, w porównaniu z klejem Epidian 57. Jednocześnie jednak należy pamiętać o jego wyraźnie niższej wytrzymałości doraźnej – ponad 35% w odniesieniu do Epidianu 57. Dlatego też w dalszych badaniach zdecydowano się poszukiwać skutecznego sposobu zwiększenia statycznej trwałości czasowej połączeń klejowych o wyższej wytrzymałości doraźnej, tzn. kleju Epidian57.

2. Modyfikowanie spoiny klejowej

Na podstawie analiz numerycznych prowadzonych metodą elementów skończonych (MES), których wyniki prezentowano w pracy [5, 12] stwierdzono, że o statycznej trwałości czasowej połączeń klejowych decydują odkształcenia spoin. Wyniki pracy [5], w której przedmiotem analizy były m.in. modele spoin klejowych, wykonane z samego kleju i modele spoin wzmocnionych tkaniną szklaną wykazały, że spoiny w postaci kompozytu szklano-epoksydowego podlegają mniejszym odkształceniom w czasie (rys. 5). W związku z tym spoiny wzmocnione tkaniną powinna charakteryzować większa trwałość, co postanowiono sprawdzić eksperymentalnie.

Modyfikacja spoin polegała na wprowadzeniu do spoiny jednej warstwy tkaniny szklanej o splocie płóciennym E81, przesyconej stosowanym w badaniach klejem Epidian 57.



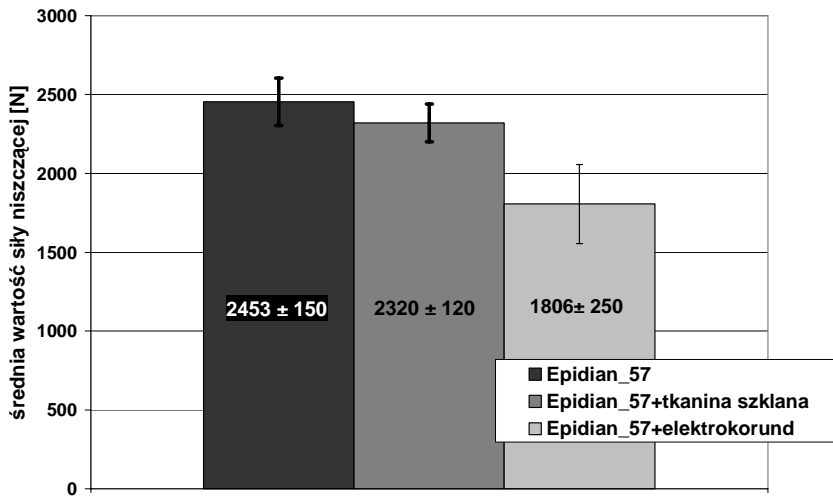
Rys. 5. Rozkład maksymalnych odkształceń głównych wzdłuż spoiny klejowej dla różnych modeli spoiny klejowej po symulowanym czasie obciążenia 120 h [13]

Równocześnie dla celów porównawczych wykonano serię próbek, w których został wykorzystany klej Epidian 57 modyfikowany elektrokorundem o granulacji ziarna F40 dodawany w ilości 50 części masowych na 100 części masowych żywicy.

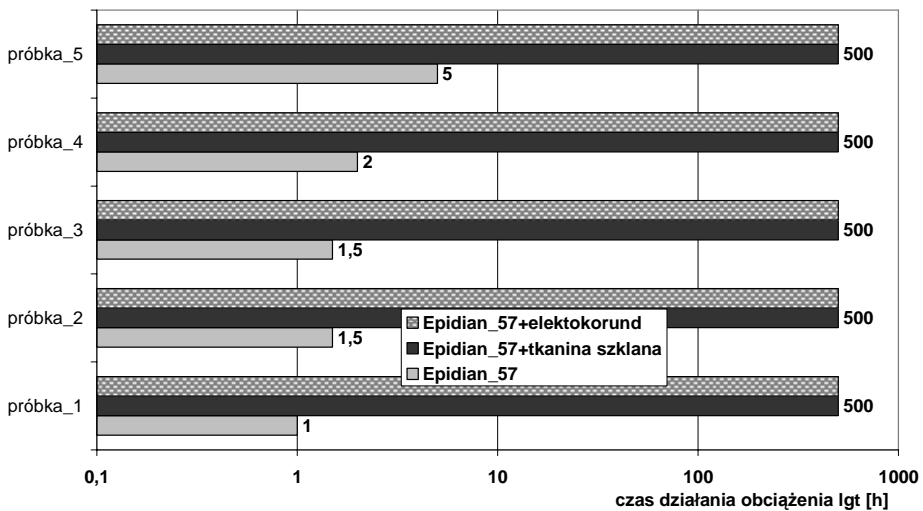
Modyfikowane spoiny utwardzono dwustopniowo. Wykonano próbki zakładkowe identyczne do stosowanych we wcześniejszych badaniach. Powierzchnie klejone przygotowano do klejenia metodą piaskowania. Przed badaniami długotrwałymi ponownie określono wytrzymałość na ścinanie przygotowanych partii, na podstawie sześciu losowo wybranych próbek (rys. 6).

Wytrzymałość doraźna spoin modyfikowanych poprzez wprowadzenie tkaniny szklanej była porównywalna z wytrzymałością doraźną spoin klejowych wykonanych z samego Epidianu 57 (spadek wartości średniej wytrzymałości o ok. 5%). Natomiast wprowadzenie do masy klejowej elektrokorundu spowodowało pogorszenie wytrzymałości doraźnej tak przygotowanych spoin klejowych (spadek wartości średniej wytrzymałości o ok. 35% – wytrzymałość doraźna na poziomie wytrzymałości doraźnej połączeń przygotowanych za pomocą samej żywicy Epidian 5).

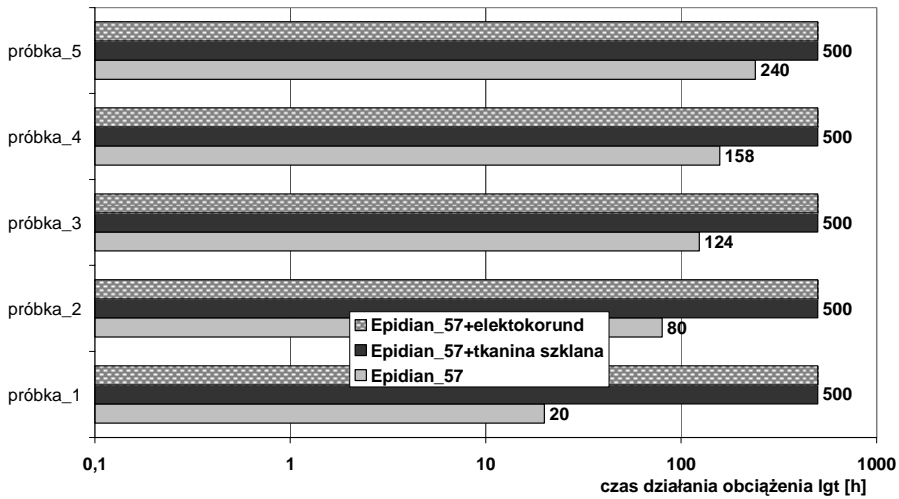
Badania długotrwałe przeprowadzono w warunkach, w których połączenia wykonane za pomocą samego kleju Epidian 57 wykazały niską trwałość, tzn. dla obciążenia $0,6 P_n$ w temperaturze 60°C . Dodatkowo na potrzeby tego etapu badań wykonano również badania długotrwałe w temperaturze 70°C pod obciążeniem $0,5 P_n$ zarówno dla połączeń, w których spoiny wykonano z samego kleju, jak i dla połączeń ze spoinami modyfikowanymi. Wyniki przedstawiono na rys. 7 i rys. 8.



Rys. 6. Porównanie wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych, których spoiny wykonano z samego kleju Epidian 57, kleju Epidian 57 wzmocnionego tkaniną i tego samego kleju modyfikowanego elektrokorundem



Rys. 7. Porównanie trwałości połączeń, których spoiny wykonano z kleju Epidian 57, Epidianu 57 wzmocnionego tkaniną oraz z dodatkiem elektrokorundu, badanych pod obciążeniem $0,6 P_n$ w temperaturze 60°C

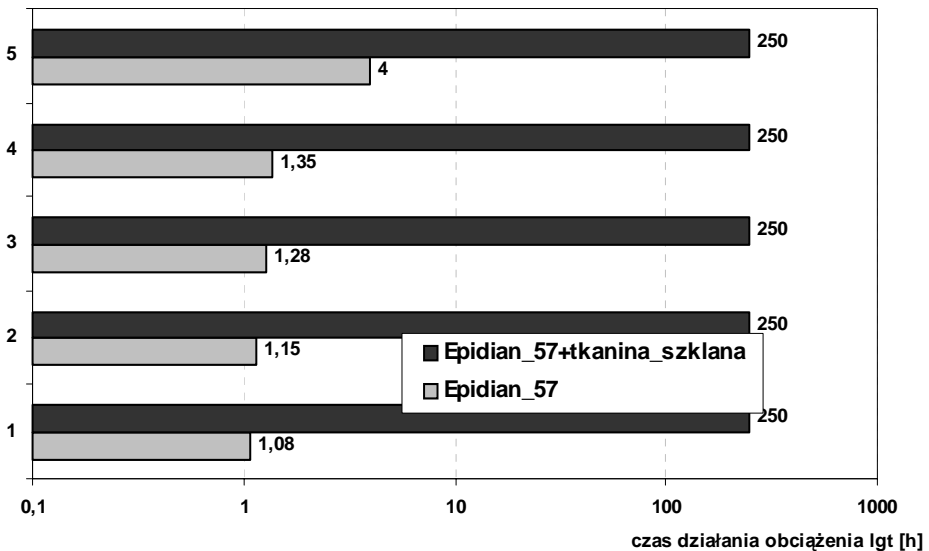


Rys. 8. Porównanie trwałości połączeń, których spoiny wykonano z kleju Epidian 57, Epidianu 57 wzmocnionego tkaniną oraz z dodatkiem elektokorundu, badanych pod obciążeniem $0,5 P_n$ w temperaturze 70°C

Przedstawione na rys. 7 i 8 wyniki obrazują istotny wpływ modyfikacji spoiny na jej statyczną trwałość czasową. Większość z badanych próbek o modyfikowanej spoinie nie uległa w ciągu 500 h zniszczeniu w warunkach prowadzenia próby. Szczególnie istotny przyrost trwałości zaobserwowano dla próbek poddanych obciążeniu $0,6 P_n$ w temperaturze 60°C . Trwałość z poziomu kilku godzin, dla spoin wykonanych z samego Epidianu 57, zwiększyła się do kilkuset dla spoin poddanych modyfikacji.

Aby potwierdzić dobrą trwałość modyfikowanych spoin, wykonano dodatkowe doświadczenia. Dla spoin modyfikowanych elektokorundem zwiększono obciążenie do wartości 1471,5 N (co odpowiadało 60% obciążenia dla spoin wykonanych z Epidianu 57 i ok. 80% obciążenia dla połączeń wykonanych z Epidianu 57 modyfikowanego elektokorundem) zachowując wartość temperatury 60°C . Następnie wykonano próbę trwającą 500 h. Żadna z badanych próbek w przyjętym czasie nie uległa zniszczeniu.

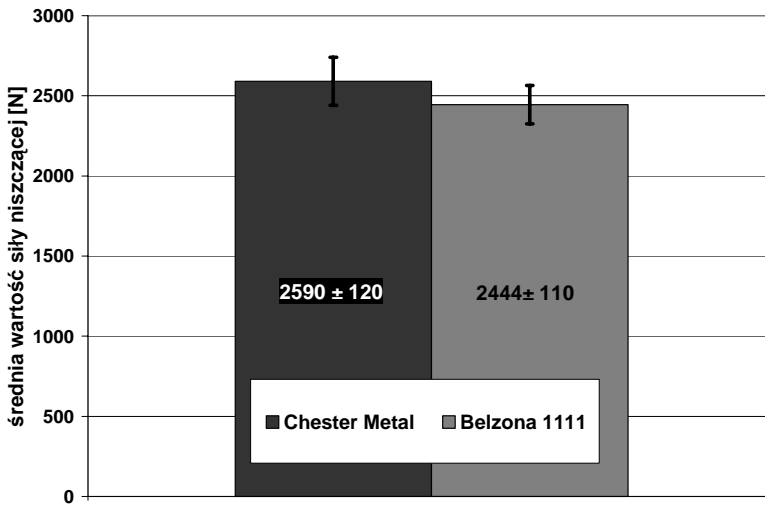
W przypadku spoin wzmacnianych tkaniną szklaną wykonano dodatkowe doświadczenie, które polegało na oznaczeniu ich trwałości w temperaturze 70°C dla poziomu obciążenia równego $0,6 P_n$. Wykonano próbę trwającą 250 h. W celach porównawczych przeprowadzono jednocześnie eksperyment w identycznych warunkach z próbkami, gdzie spoiny były wykonane z samego kleju Epidian 57. Żadna z badanych próbek z modyfikowaną spoiną, w przyjętym czasie badań, nie uległa zniszczeniu – rys. 9.



Rys. 9. Porównanie trwałości połączeń, których spoiny wykonano z kleju Epidian 57 wzmocnionego tkaniną oraz kleju Epidian 57, badanych pod obciążeniem $0,6 P_n$ w temperaturze 70°C

Modyfikowanie spoin połączeń klejowych poprzez wprowadzenie wypełniaczy w postaci tkaniny szklanej i elektrokorundu istotnie polepszyło statyczną trwałość czasową tak przygotowanych połączeń. Pozwoliło to sądzić, że również kompozycje klejowe z wypełniaczami metalicznymi (klejowe kompozyty regeneracyjne) zastosowane w połączeniach powinny wykazywać w warunkach długotrwałej eksploatacji trwałość na poziomie co najmniej kilkuset godzin. W tym celu wykonano serię badań stosując kompozycje klejowe oparte na żywicach epoksydowych z wypełniaczami metalicznymi o handlowych nazwach Belzona 1111 angielskiej firmy Belzona Polymeric Ltd. oraz produkt krajowy firmy Chester Molecular – Chester Metal. Próbkę miały kształt i wymiary identyczne z wcześniej stosowanymi – rys. 1. Powierzchnie do klejenia ponownie przygotowano metodą piaskowania stosując do ich odfuszczenia środki zalecane przez producentów. Próbkę obciążono na ścinanie. Wyniki wytrzymałości doraźnej badanych połączeń przedstawiono na rys. 10.

Badania długotrwałe przeprowadzono w temperaturze 60°C dla poziomu obciążenia równego $60\% P_n$ i $80\% P_n$. Wszystkie badane próbki w tak przyjętych warunkach wytrzymały 500-godzinną próbę (po tym czasie przerwano eksperyment).



Rys. 10. Porównanie wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych, których spoiny wykonano z kompozycji klejowej Belzona 1111 i Chester Metal

Podsumowanie

Połączenia klejowe charakteryzuje niekorzystna cecha, która nie dotyczy połączeń mechanicznych – ograniczona statyczna trwałość czasowa. Oznacza to, że połączenie klejowe może ulec zniszczeniu pod wpływem stałego obciążenia niższego od wyznaczonego w próbie badania wytrzymałości doraźnej, po upływie określonego czasu. W połączeniach mechanicznych podobne zjawiska mogą występować w podwyższonej temperaturze i związane są z pełzaniem metali. Należy jednak zaznaczyć, że w połączeniach mechanicznych problem ograniczonej trwałości statycznej jest uwzględniany w analizie konstrukcji wtedy, kiedy przewiduje się obciążenie konstrukcji w temperaturze powyżej 30% temperatury topnienia metalu. Natomiast w połączeniach klejowych problem ograniczonej statycznej trwałości czasowej daje się już zauważyć w temperaturze zbliżonej do temperatury otoczenia.

Poszukiwanie bezpośredniej zależności pomiędzy wytrzymałością doraźną klejów i ich statyczną trwałością czasową jest zawodne. Potwierdzają to prezentowane w pracy wyniki badań klejów Epidian 5 i Epidian 57. Połączenia wykonane za pomocą kleju Epidian 57 cechowała znacznie lepsza wytrzymałość doraźna niż połączeń wykonanych z użyciem kleju Epidian 5. Natomiast przy porównywaniu ich trwałości okazało się, że w przypadku tego pierwszego jest ona znacznie mniejsza.

Bardzo ważnym czynnikiem technologicznym procesu klejenia jest sposób utwardzania spoiny klejowej. Zagadnienie to ma istotny wpływ na właściwości

połączeń, w tym również na statyczną trwałość czasową połączeń. W badaniach własnych stwierdzono, że metody utwardzania Epidianu 57 – jednostopniowa lub dwustopniowa – nie mają większego wpływu na wytrzymałość doraźną połączeń klejowych obciążonych na ścinanie, ale istotnie wpływają na ich statyczną trwałość czasową w podwyższonej temperaturze. Wydaje się, że ma to związek ze stopniem usieciowania spoiny klejowej. Prawdopodobnie na skutek gęstszego usieciowania spoiny utwardzanej dwustopniowo temperatura, w jakiej zachowuje ona swoją przydatność konstrukcyjną, jest wyższa. Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować ogólne zalecenie o utwardzaniu spoin klejów opartych na żywicach epoksydowych w podwyższonej temperaturze. Jeżeli termiczne warunki utwardzania spoiny klejowej nie są dokładnie sprecyzowane przez producenta kleju, utwardzanie spoiny należy zrealizować w przewidywanej temperaturze eksploatacji połączenia.

Skutecznym sposobem podwyższania statycznej trwałości czasowej połączeń klejowych jest modyfikowanie ich spoin. Wydaje się, że takie rozwiązanie skutecznie ogranicza przyrost odkształceń spoin w podwyższonej temperaturze, a przez to zwiększa ich trwałość. W badaniach własnych szczególnie dobre rezultaty uzyskano po wzmocnieniu spoiny tkaniną szklaną. Obserwowano istotny przyrost statycznej trwałości czasowej tak przygotowanych połączeń przy niewielkim spadku ich wytrzymałości doraźnej. Modyfikowanie spoiny klejowej poprzez wprowadzenie elektrokorundu również istotnie podwyższyło trwałość połączeń, ale jednocześnie spowodowało istotny spadek ich wytrzymałości doraźnej. Na podstawie przeprowadzonych badań własnych można sformułować ogólne zalecenia dla połączeń klejowych obciążonych na ścinanie wykonanych na bazie Epidianu 57:

- połączenia wykonane z zastosowaniem kleju Epidian 57 utwardzanego dwustopniowo mogą być długotrwale obciążane w temperaturze do 60°C obciążeniem nieprzekraczającym połowy ich wytrzymałości doraźnej określonej w temperaturze około 20°C;
- połączenia wykonane z zastosowaniem kleju Epidian 57, których spoiny dodatkowo wzmacniano tkaniną szklaną mogą być długotrwale obciążane w temperaturze do 70°C obciążeniem nie przekraczającym 60% ich wytrzymałości doraźnej określonej w temperaturze około 20°C;
- połączenia wykonane z zastosowaniem kleju Epidian 57 modyfikowanego elektrokorundem mogą być długotrwale obciążane w temperaturze do 60°C obciążeniem na poziomie około 80% ich wytrzymałości doraźnej określonej w temperaturze około 20°C.

Problem ograniczonej trwałości połączeń klejowych jest istotną cechą, nie zawsze docenianą przez stosujących klejenie jako metodę łączenia. Nieuwzględnianie jej może doprowadzić do zniszczenia zaprojektowanego połączenia i w konsekwencji do zniechęcenia konstruktora do stosowania klejenia

jako metody łączenia. Również producenci klejów nie określają odporności swoich wyrobów na długotrwałe obciążenie. Istnieje potrzeba opracowania prostej metody szacowania zdolności klejów do przenoszenia długotrwałych obciążeń. Obiecujące wyniki w jakościowej analizie porównawczej klejów przewidzianych do długotrwałego obciążenia, niesie ze sobą metoda prognozowania trwałości połączenia oparta na analizie podatności na pełzanie kleju w postaci utwardzonego tworzywa.

Bibliografia

1. Baker A.A., Jones R.: Bonded repair of aircraft structures. Martinius Nijhoff Publ. Dortrecht–Boston – Lancaster 1988.
2. Baker Bonded composite repair of fatigue – cracked primary aircraft structure. *Composite Structures* 47 1997, 431–443.
3. Chester R.J., Walker K.F., Chalkley P.D.: Adhesively bonded repairs to primary aircraft structure. *International Journal of Adhesion and Adhesives* nr.19, 1999, 1–8.
4. Ferry J.D.: *Lepkosprężystość polimerów*. WNT, Warszawa 1965.
5. Godzimirski J., Rośkowicz M.: Analiza MES połączeń klejowych obciążonych długotrwałe. *Przegląd Mechaniczny* nr 12, 2005, s. 33–39.
6. Godzimirski J., Rośkowicz M.: Wytrzymałość długotrwałe połączeń klejowych. *Biul. WAT* Nr 8, 2001.
7. Godzimirski J.: Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych. WNT, Warszawa 2002.
8. Kotlarz W.: Analiza wpływu temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych. *Rozprawa doktorska*. WAT, Warszawa 1996.
9. Kuczmaszewski J.: *Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń klejowych*, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1995.
10. Lewiński J., Lindemann Z., Linke R., Misiak J., Orsetti W., Puciłowski K.: *Mechanika techniczna-laboratorium*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996.
11. Łączyński B.: *Mechanika tworzyw wielkocząsteczkowych*. WPW, Warszawa 1977.
12. Rośkowicz M.: Analiza wytrzymałości długotrwałej połączeń klejowych, *Rozprawa doktorska*. WAT, Warszawa 2004.
13. Wilczyński K.: *Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych*. WNT, Warszawa 2001.

Recenzent:
Janusz SEMPRUCH

The adhesive joint – the chosen problems of static service life

Summary

In the paper there are presented some experimental results concerning static service life of adhesive-bonded joint loaded long-lasting at elevated temperature. Epoxy adhesives based on Epidian 5, Epidian 57 and adhesively regeneration composites with metallic filler, on account of them universality, were chosen for experimental study. The adhesive-bonded joints were modified. It has been found, that modifying adhesive-bonded joint glass fabric, alundum and metallic filler improving significantly static service life of the adhesive joint at elevated temperature.

