

BADANIE SKUTECZNOŚCI ZABEZPIECZANIA PRZED LUZOWANIEM POŁĄCZEŃ GWINTOWYCH POPRZEZ KLEJENIE

Jakub SZABELSKI, Jacek DOMIŃCZUK

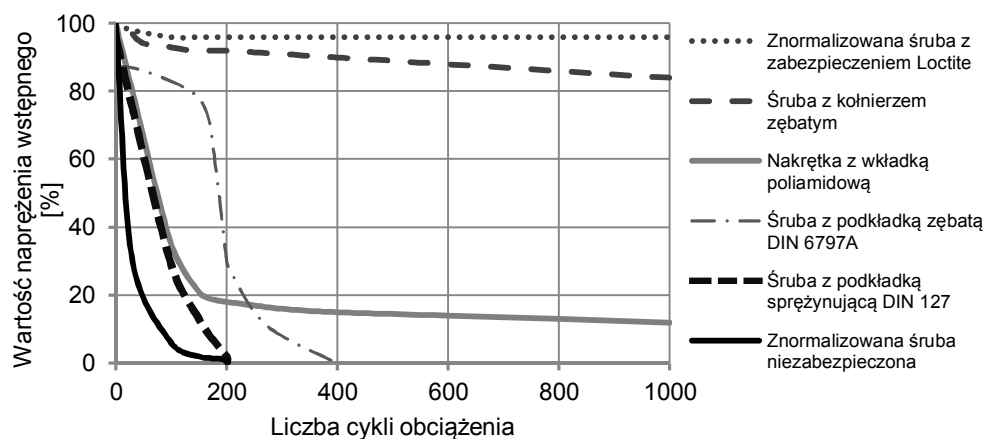
Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań skuteczności stosowania procesu klejenia z wykorzystaniem wybranych środków adhezyjnych do zabezpieczania połączeń gwintowych przed luzowaniem. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem wybranych klejów anaerobowych i epoksydowych dobranych tak, aby różniły się właściwościami wytrzymałościowymi. Badania prowadzone były w warunkach obciążeń statycznych. W pracy zawarto analizę wpływu temperatury na jakość złącza gwintowo-klejowego. W celu weryfikacji opisanych w literaturze zależności w opracowaniu zamieszczono wyniki badań wpływu procesu obróbki termicznej złącza na jej wytrzymałość statyczną. Uzyskane wyniki badań wykazały, że stosowanie klejenia jako sposobu zabezpieczania połączeń gwintowych przed odkręcaniem jest skuteczną metodą, a poprzez odpowiedni dobór środka adhezyjnego istnieje możliwość stosowania tej metody do różnych zastosowań: od połączeń łatwo rozłącznych do połączeń nierozłącznych tworzonych na bazie połączenia gwintowego. Przy doborze kleju do określonej aplikacji, z uwagi na degradację cieplną środka adhezyjnego, należy zwracać szczególną uwagę na warunki termiczne pracy połączenia. Stwierdzono, że wpływ procesu starzenia cieplnego można zmniejszać poprzez stosowanie obróbki cieplnej złącza na etapie jego tworzenia.

Słowa kluczowe: połączenia gwintowe, zabezpieczanie, kleje

1. Wstęp

Zagadnienia związane z uszczelnianiem i zabezpieczaniem przed odkręceniem połączeń gwintowych zarówno śrubowych jak i rurowych są ciągle aktualne i rozwijane z powodu bardzo szerokiego zastosowania tego sposobu wykonywania połączeń oraz z uwagi na rozwój w zakresie wytwarzania nowych materiałów i technologii. Jednym ze sposobów umożliwiających tworzenie szczelnych połączeń rozłącznych jest technologia klejenia wykorzystująca materiały adhezyjne jednocześnie jako łącznik i uszczelniacz. Stabilność i szczelność połączenia jest bardzo istotna zarówno w sytuacji statycznego obciążenia jak i w warunkach zmiennych obciążeń cyklicznych, które prowadzą do utraty szczelności na skutek luzowania połączenia, tj. poprzez zmniejszenia wartości naprężenia w połączeniu. Na rys. 1. przedstawiono zestawienie wyników badań efektywności najczęściej stosowanych metod zabezpieczania połączeń gwintowych przed luzowaniem w funkcji ilości cykli obciążeń. Z zestawienia tego wynika, że skuteczność stosowania środka adhezyjnego jest duża i przewyższa nawet najbardziej efektywne kontaktowe zabezpieczenia mechaniczne. W badanym zakresie liczby cykli obciążenia zabezpieczenie klejowe połączenia gwintowego gwarantowało najmniejszy spadek sił naprężenia w połączeniu. Zauważalny spadek występował jedynie w początkowej fazie obciążania i był niezmienny w trakcie dalszego obciążania. Inne metody, np.: stosowanie podkładek

zębatach, sprężynujących, wkładek poliamidowych w nakrętkach nie gwarantowały pewności połączenia przy dłuższym obciążaniu. Zastosowanie śrub z kołnierzem zębatym powodowało znaczne zmniejszenie prędkości luzowania połączenia, pozwalając na zachowanie ok. 85% wejściowego naprężenia po 1000 cyklach. Należy tu zauważyć, że połączenie to w całym zakresie przeprowadzanych badań wykazywało tendencję do zmniejszania wartości naprężeń w połączeniu w funkcji ilości cykli co ostatecznie w praktyce może doprowadzić do uszkodzenia połączenia. Z uwagi na potrzebę zgłębiania wiedzy w zakresie możliwości stosowania w warunkach przemysłowych różnych środków adhezyjnych, mogących w różny sposób wpływać na zachowanie połączeń gwintowych, opracowano plan badań, którego celem było wykazanie różnic w zachowaniu się połączenia gwintowego zabezpieczonego środkiem adhezyjnym i obciążonego statycznie. Jako środków adhezyjnych używano klejów anaerobowych i epoksydowych o odmiennych właściwościach. Dodatkowym czynnikiem brany pod uwagę w trakcie badań była technologia wykonywania połączenia, a w szczególności wpływ procesu obróbki termicznej połączenia i jej wpływ na jakość połączenia.

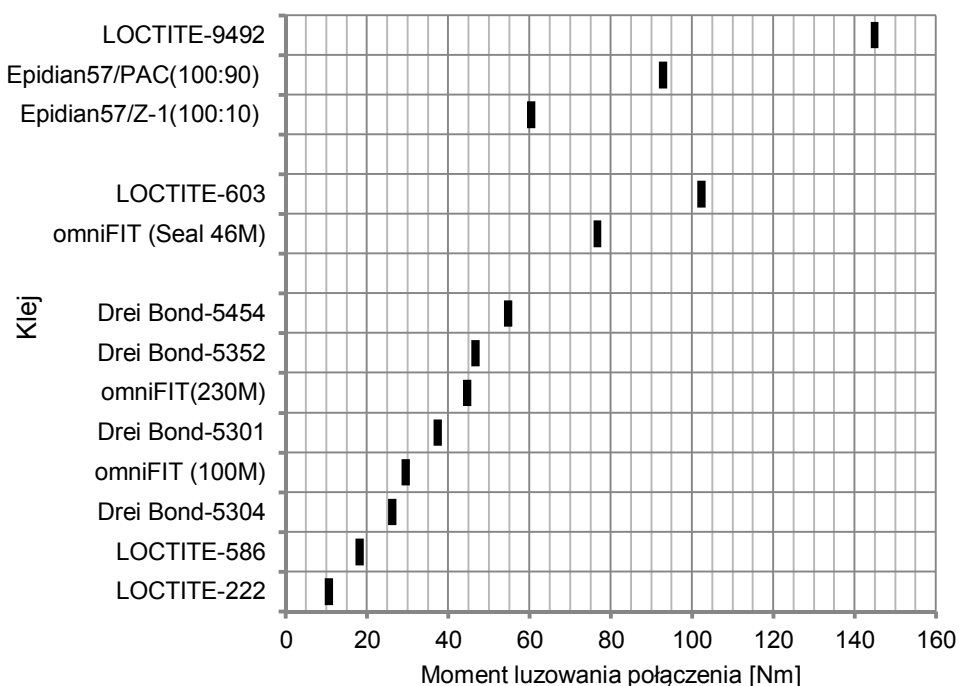


Rys. 1. Skuteczność wybranych metod zabezpieczania połączeń gwintowych przed luzowaniem [1]

2. Badanie wpływu rodzaju środka adhezyjnego na wytrzymałość statyczną połączenia gwintowego

W celu wyznaczenia zależności pomiędzy rodzajem środka adhezyjnego, a odpornością na luzowanie połączenia śrubowego opracowano dwuetapowy plan badań. W pierwszej części badania prowadzono na połączeniu śruba/nakrętka M16 ocynkowanych bez zastosowania tulei umożliwiającej wywołanie napięcia wstępnego podczas montażu. Badania prowadzono w oparciu o normę PN-EN 15865:2009 Kleje – Oznaczanie wytrzymałości na odkręcanie połączeń gwintowych. Badaniom poddano wybrane kleje anaerobowe: Drei Bond: 5301, 5304, 5352 i 5454, omniFIT: 46M, 100M, 230M, Loctite: 222, 586, 603; oraz epoksydowe: Epidian 57 utwardzany PAC, Loctite 9492, Epidian 57 utwardzany Z-1. Klejone powierzchnie gwintowe, wewnętrzna nakrętki i zewnętrzna śruby zostały oczyszczone z wykorzystaniem preparatu czyszczącego i odtłuszczającego Loctite 7063 poprzez natryskowe naniesienie go i odczekanie do chwili samoczynnego odparowania w warunkach otoczenia. Klej nanoszono na zewnętrzną powierzchnię śruby

i wewnętrzną nakrętki. Wykonano 36 próbek dla każdego kleju, które pozostawiono w temperaturze otoczenia przez okres 48 godzin w celu utwardzenia połączenia. Czas utwardzenia określono w oparciu o analizę kart materiałowych użytych środków adhezyjnych. W wyniku przeprowadzonych badań wyznaczono wartość moment luzowania połączenia rozumiany, jako maksymalną wartość momentu występującą przy odkręcaniu złącza. Badania prowadzono na maszyna wytrzymałościowa MTS Bionix Servohydraulic Test System umożliwiającej pomiar momentu i kąta skręcenia. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 2.

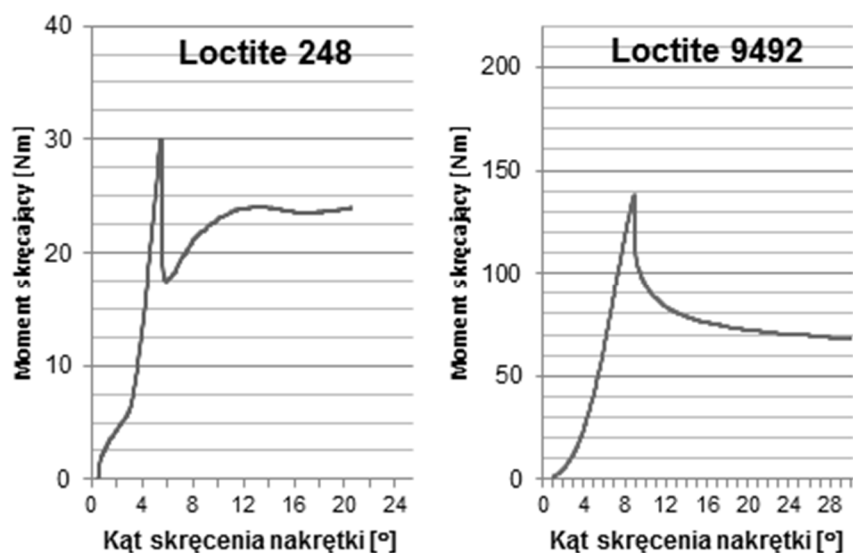


Rys. 2. Momenty luzowania połączenia śrubowego zabezpieczonego wybranymi klejami

Prezentowane wyniki wytrzymałości złącza różnią się istotnie w zależności od zastosowanego środka zabezpieczającego. Należy tu zauważyć, że najwyższą wytrzymałość uzyskano dla materiałów epoksydowych, które są materiałami sztywnymi. Biorąc pod uwagę wartość momentu niezbędnego do luzowania tego typu połączeń należy stwierdzić, że badane kleje epoksydowe mogą być stosowane szczególnie tam, gdzie nie przewiduje się powtórnego demontażu i montażu złącza gdyż w przypadku istnienia naprężenia wstępnego demontaż może okazać się niemożliwy bez zniszczenia połączenia.

Na rys. 3 przedstawiono przykładowe charakterystyki wytrzymałościowe połączenia dla kleju anaerobowego i epoksydowego. Z prezentowanych wykresów wynika, że kleje anaerobowe wykazują większą skuteczność zabezpieczenia przed odkręceniem w funkcji kąta skręcenia nakrętki. Dzięki elastyczności środka adhezyjnego wytrzymałość złącza wykonanego przy użyciu tego środka nie ulega tak dużemu spadkowi jak przy wykorzystaniu kleju epoksydowego. Należy się spodziewać, że dzięki tej właściwości kleje

tego typu będą bardziej skuteczne przy zabezpieczaniu połączeń narażonych na obciążenie cykliczne.

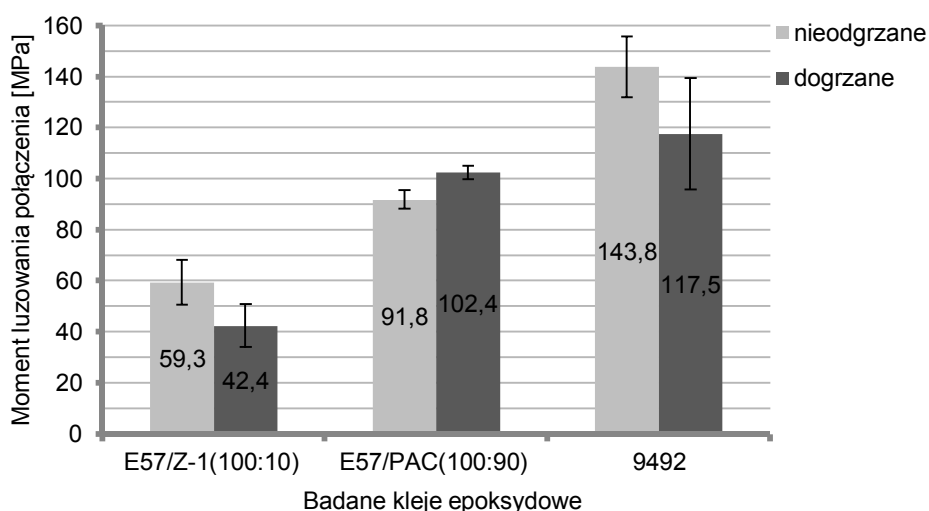


Rys. 3. Przykładowe charakterystyki wytrzymałościowe połączenia dla kleju anaerobowego i epoksydowego

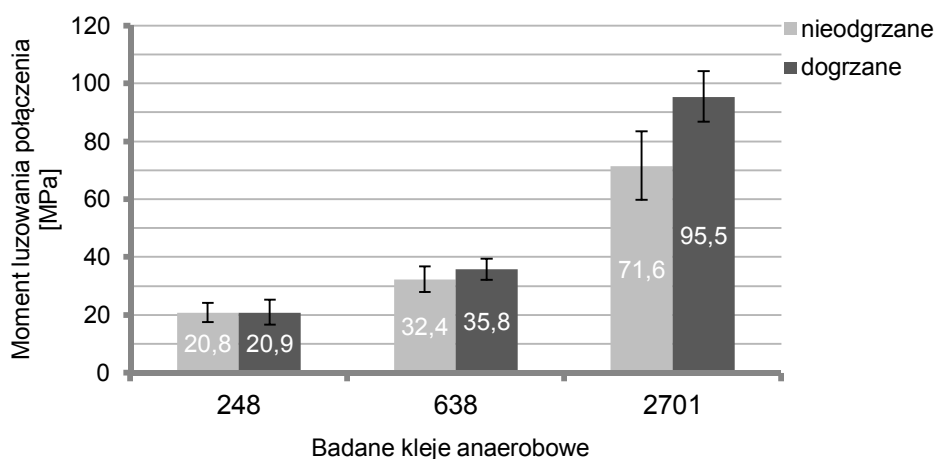
W drugim etapie badań porównano wytrzymałości połączeń gwintowych zabezpieczonych dwoma grupami klejów bez zastosowania dogrzewania cieplnego oraz po zastosowaniu takiej operacji. Badania przeprowadzono na wybranych trzech klejach anaerobowych, oraz trzech klejach epoksydowych. Dwie badane grupy klejów różnią się zarówno pod względem sposobu zestalania jak i pod względem zdolności do wypełniania szczelin między łączonymi materiałami. Taka różnica jest istotna szczególnie ze względu na możliwości ich stosowania do określonych aplikacji. Kleje o większej gęstości mają zdolność do wypełniania większych szczelin, a tym samym mogą być stosowane w połączeniach mało dokładnych i regenerowanych.

Dla każdego kleju wykonano 18 próbek, które podzielono na dwie serie przeznaczone do dalszej obróbki. Pierwsza seria poddana była utwardzeniu w warunkach otoczenia zgodnie z wytycznymi producenta lub dla mas specjalnych zgodnie z danymi literaturowymi [6]. Druga seria poddana była obróbce cieplnej w komorze cieplnej. Czas i temperaturę grzania określono na podstawie zaleceń w kartach produktu i danych literaturowych przyjmując 2 godziny w 50°C dla wszystkich trzech serii próbek. Wyniki przeprowadzonych badań w grupie klejów epoksydowych przedstawiono na rys. 4 zaś w grupie klejów anaerobowych na rys. 5. W przypadku klejów epoksydowych wykazano, że dotwardzanie termiczne połączeń klejowych wykonanych na bazie żywic epoksydowych, które mają być wykorzystane w połączeniach gwintowo-klejowych jest zasadne w przypadku kompozycji klejowych charakteryzujących się większą elastycznością. Dla klejów sztywnych nie wykazano poprawy jakości połączenia w odniesieniu do wytrzymałości statycznej na skręcanie. Dla klejów anaerobowych wykazano wzrost odporności na luzowanie połączenia po procesie dotwardzania cieplnego.

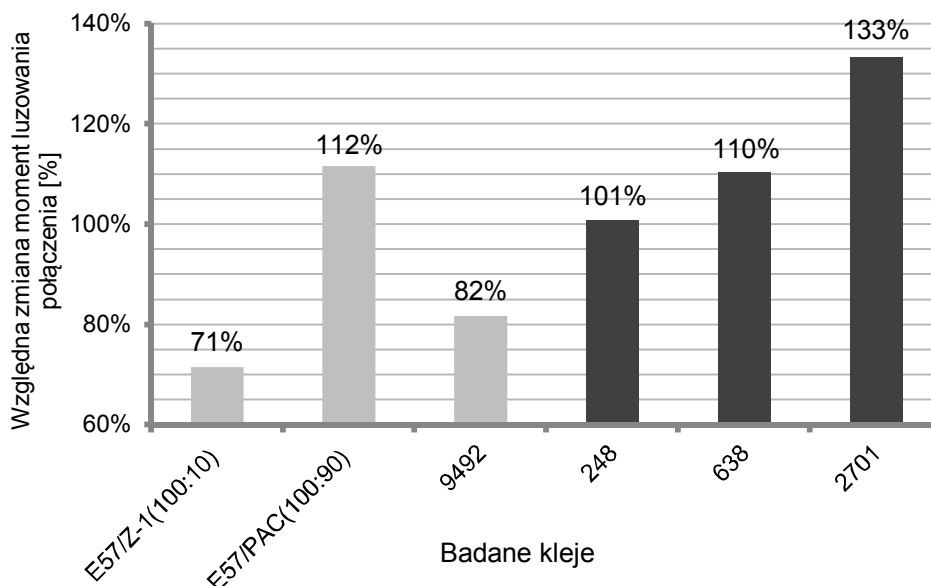
Na rys. 6 przedstawiono zbiorczo względną zmianę momentu luzowania połączenia po zastosowaniu operacji dogrzewania na etapie utwardzania połączenia. Z przedstawionych charakterystyk wynika, że najkorzystniej dotwarzanie cieplne wpływa na klej anaerobowy 2701 oraz klej epoksydowy o najniższej sztywności. W przypadku klejów epoksydowych takich jak 9492 czy E57/Z-1(100:10) dotwarzanie termiczne prowadzi do obniżenia wytrzymałości doraźnej połączeń gwintowo-klejowych.



Rys. 4. Porównanie momentów luzowania połączeń śrubowych zabezpieczonego wybranymi klejami epoksydowymi dotwarzanych i nie dotwarzanych cieplnie



Rys. 5. Porównanie momentów luzowania połączeń śrubowych zabezpieczonego wybranymi klejami anaerobowymi dotwarzanych i nie dotwarzanych cieplnie



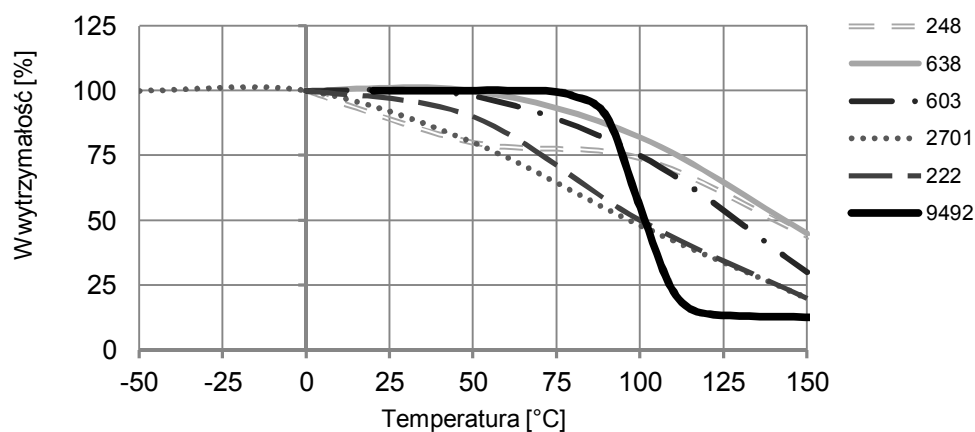
Rys. 6. Porównanie momentów luzowania połączeń śrubowych zabezpieczonego wybranymi klejami po dotwardzaniu cieplnym w stosunku do wartości momentu uzyskanego bez stosowania dotwardzania stanowiącą 100% wytrzymałości

3. Analiza wpływu temperatury na połączenie klejowe

Temperatura może na wiele sposobów oddziaływać na kleje anaerobowe jak i kleje epoksydowe stosowane m.in. do uszczelniania połączeń gwintowych. Jego efekt może być różny w zależności od tego, na jakim etapie przygotowania czy eksploatacji połączenia występuje wpływ strumienia ciepła, jaki ma on charakter, jak długo połączenie jest wystawione na działanie ciepła [2]. W przypadku połączeń gwintowo-klejowych narażonych na wpływ temperatury w zależności od fazy ekspozycji zaobserwowano zarówno wzrost odporności połączenia na luzowanie jak i jej spadek. Z uwagi na trudność stałego monitorowania warunków pracy połączenia szczególnie narażonego na cykliczne zmiany temperatur pracy, konieczne jest prowadzenie badań mających na celu wyznaczenie pewnych granic możliwości stosowania danego typu środka adhezyjnego.

Jednym z istotnych parametrów charakteryzujących połączenie adhezyjne jest wytrzymałość termiczna. Parametr ten określa stopień spadku wytrzymałości złącza klejowego w sytuacji pracy w podwyższonej temperaturze [3]. Przyczyną takiej reakcji kleju jest rozrywanie łańcuchów polimerowych w jego wewnętrznej strukturze. Zjawisko to może być do pewnego stopnia odwracalne, tj. nie powodujące trwałej degradacji kleju. Po osiągnięciu warunków krytycznych (zależnych od wartości temperatury) uszkodzenie termiczne kleju będzie miało charakter stały, tzn. obniżenie temperatury do temperatury otoczenia (lub temperatury wyjściowej pracy złącza) nie będzie skutkowało zachowaniem początkowej wytrzymałości, a trwałym osłabieniem. Wartość tego parametru jest różna dla poszczególnych kompozycji klejowych. Dla poszczególnych klejów jego wartość często przedstawiana jest w kartach technicznych (rys. 2) i w znacznej mierze zależy od dodatków stosowanych w procesie wytwarzania klejów. W przypadku klejów epoksydowych

dodatkami mogą to być nityle, fenole, nylony, żywice polisiarczkowi, uretany z bocznymi grupami epoksydowymi czy np. regenerat gumowy odzyskany z recyklingu [4]. W głównej mierze za podniesienie progu wytrzymałości termicznej kleju odpowiada domieszka żywic fenolowych. Wytrzymałość cieplną można rozpatrywać w kilku przedziałach zmian temperatury. W trakcie podnoszenia temperatury pracy złącza pierwszym stopniem, który jest charakterystyczny ze względu na wpływ ciepła na wytrzymałość, jest temperatura graniczna do osiągnięcia, której nie rejestruje się zmiany wytrzymałości złącza. Najczęściej jest ona obserwowalna na poziomie 40-50°C i jest zależna od rodzaju i składu kleju. Po przekroczeniu tej wartości następować będzie spadek wytrzymałości połączenia. Jego charakter może być nagły lub łagodny i długotrwały. Dla klejów anaerobowych graniczną temperaturą stosowania podawaną przez producentów jest 150°C. Również i przy tej temperaturze kleje różnią się między sobą wytrzymałością najczęściej między 20 a 40% wytrzymałości początkowej w temperaturze otoczenia. Ostatnim stopniem będzie temperatura całkowitego, nieodwracalnego uszkodzenia struktury polimerowej masy klejowej. Jej określenie następuje przede wszystkim w rezultacie badań materiałowych kleju, nie konieczne prób wytrzymałościowych. W przypadku klejów anaerobowych ich skład chemiczny determinuje tę wielkość i wynosi ona około 400°C. Warto zauważyć, że nie tylko podwyższona temperatura jest czynnikiem mogącym wpływać na wytrzymałość kleju. Kleje reagują również na obniżone temperatury spadkiem ich wytrzymałości. Z uwagi na opisane zmiany właściwości kleju w funkcji zmian temperatury, istnieje potrzeba właściwego doboru kleju do pracy w określonych warunkach termicznych czy też stosowania technologii jego utwardzania poprawiających ich charakterystyki termiczne nawet kosztem obniżenia maksymalnej wytrzymałości doraźnej. Na rys. 7 przedstawiono przykładowe charakterystyki termiczne wybranych klejów.

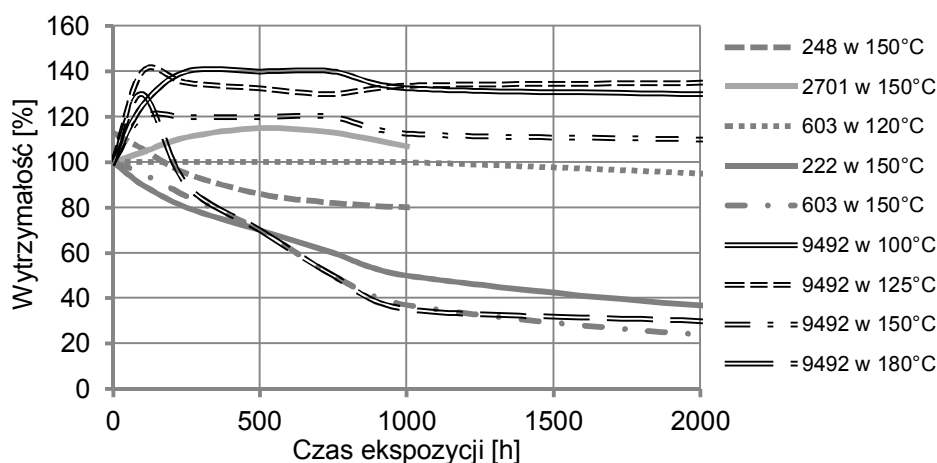


Rys. 7. Charakterystyki termiczne wybranych klejów [5]

Przedstawiony sposób oddziaływania temperatury na wytrzymałość połączenia klejowego nie uwzględniał czasu ekspozycji, a jedynie chwilowe podniesienie temperatury złącza w celu przeprowadzenia badania w tej temperaturze. W warunkach rzeczywistych

częste są sytuacje pracy złącza klejowego w tym również gwintowo-klejowego w warunkach trwale podwyższonej temperatury. Z rys. 7. wynika, że w najwyższej badanej temperaturze 150°C wytrzymałości połączenia dla kleju epoksydowego wynosi ok. 15% wytrzymałości uzyskanej w temperaturze otoczenia, a dla badanych klejów anaerobowych wynosi ona od 20 do 40% wytrzymałości pierwotnej. Należy się tu spodziewać, że dłuższa ekspozycja złącza w temperaturach powodujących zauważalny spadek wytrzymałości w temperaturach podwyższonych będzie powodowała dodatkowe obniżenie wytrzymałości wraz z upływem czasu [7]. Jak wykazują badania jest to szczególnie zauważalne dla klejów anaerobowych (rys.8), dla których już krótkotrwałe poddanie podwyższonej temperaturze trwale uszkadza połączenie. Należy przy tym pamiętać, że kleje te wykazują znaczną chwilową odporność termiczną. Nieco odmienne zachowanie wykazują kleje epoksydowe, dla których w początkowej fazie ekspozycji można zauważyć zjawisko umocnienia kleju. Po dłuższym czasie ekspozycji kleje te również tracą wytrzymałość. Należy tu zauważyć, że dynamika utraty wytrzymałości zależna jest od temperatury ekspozycji. Można przy tym przyjąć, że istnieje wyznaczalna wartość temperatury stałej ekspozycji umożliwiająca utrzymanie niezmiennego wartości wytrzymałości połączenia.

Zjawisko początkowego dotwardzania kleju świadczy o kolejnym sposobie oddziaływania ciepła na kleje. Jest nim utwardzanie połączenia klejowego na etapie konstituowania złącza poprzez zastosowanie dogrzewania. Powodem takiego zachowania się klejów jest zmiana reaktywności termicznej związków zawartych w kleju. Obecnie znane są metody badania reaktywności termicznej pozwalające na wyznaczenie krzywej wpływu temperatury utwardzania. I tak dla żywicy epoksydowej możliwa jest ocena szybkości reakcji utwardzania zależnej od reaktywności układu żywica/utwardzacz i od temperatury utwardzania [8].



Rys. 8. Zmęczenie termiczne połączenia wykonanego klejami anaerobowymi i epoksydowymi w funkcji czasu ekspozycji (złącze badane w temperaturze otoczenia) [5]

Innymi metodami konstituowania właściwości wytrzymałościowych połączenia klejowego związanych z wpływem temperatury jest odpowiednie ogrzewanie warstwy wierzchniej łączonych materiałów w celu zwiększenia zdolności do zwilżania powierzchni przez klej oraz w celu zwiększenia pracy adhezji i energii powierzchniowej. Takie działanie

powinno skutkować wzrostem wytrzymałości doraźnej połączenia, a tym samym poszerzeniem zakresu temperaturowego stosowania połączenia.

Wnioski

Przeprowadzone badania skuteczności stosowania klejów zarówno z grupy anaerobowych jak i epoksydowych do zabezpieczania połączeń gwintowych przed luzowaniem pozwalają stwierdzić, że technologia klejenia daje szerokie możliwości konstituowania określonych parametrów jakościowych połączenia. Dzięki właściwemu doborowi środka adhezyjnego możemy tworzyć połączenia gwintowe od połączeń łatwo rozłącznych do nierozłącznych. Należy przy tym pamiętać, że odporność na luzowanie takiego połączenia w dużej mierze uwarunkowana jest warunkami pracy, a szczególnie zależy od wpływu temperatury. Jak wykazują badania, wysokie temperatury powodują spadek wytrzymałości połączenia klejowego, a przez to obniżają wartość momentu powodującego luzowanie się złącza. Interesujący jest również przebieg zmian momentu luzującego połączenie w funkcji kąta skręcenia nakrętki. Z uzyskanych wykresów wynika, że klej nawet po utracie ciągłości wiązań (zerwaniu mechanicznym) nadal stanowi barierę dla samoczynnego luzowania się połączenia w skutek wypełniania wolnych przestrzeni w strefie złącza i oddziałując siłami tarcia jak wkładka polimerowa. Zdolność kleju do jego modyfikacji w procesie obróbki termicznej na etapie budowy złącza może być również z powodzeniem wykorzystywane w przypadku zabezpieczania połączeń gwintowych przed odkręcaniem. Badane kleje anaerobowe wykazały wzrost momentu luzowania połączenia po poddaniu ich procesowi dotwarzania termicznego. Również w przypadku klejów epoksydowych o niższej sztywności wykazano korzystny wpływ procesu dotwarzania termicznego. Z uwagi na brak badań odporności badanych połączeń na obciążenia cykliczne nie jest możliwe na obecnym etapie analiz jednoznaczne stwierdzenie czy proces dogrzewania klejów epoksydowych o wyższej sztywności jest procesem korzystnym. W oparciu o uzyskane charakterystyki luzowania złącza można stwierdzić, że kleje o większej sztywności powodują zachowanie wysokiego momentu po zerwaniu wiązań adhezyjnych, co powodowane jest mechanicznym blokowaniem się sztywnych cząstek kleju pomiędzy zwojami współpracujących gwintów.

Przeprowadzone badania dają podstawy do wnioskowania, że odpowiednią wytrzymałość połączeń można uzyskiwać nie tylko w drodze rozwijania geometrycznego warstwy wierzchniej łączonych materiałów, dbania o jego czystość czy odpowiedni dobór kleju, ale również poprzez stosowanie procesów technologicznych sprzyjających zwilżaniu warstwy wierzchniej, takich jak dogrzewanie złącza w trakcie zestalania kleju, czy też podgrzewanie powierzchni łączonych materiałów.

Literatura

1. Zabezpieczanie gwintów – przewodnik, Henkel KGaA, 2008.
2. Kuczmaszewski J.: Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali, Wydawnictwo Uczelniane, Politechnika Lubelska, 1995.
3. Szabelski J.: Heat Resistance of Selected Two Component Epoxy Adhesives, Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Прогрессивные направления развития

- машиноприборостроения, транспорта и экологии”, 20 - 23 maja 2013, Sewastopol, Ukraina, str. 183-184.
4. Gerace M.: Surface Activated Rubber Particles Improve Structural Adhesives, Adhesives Age, XII 1995.
 5. Karty danych technicznych LOCTITE.
 6. Godzimirski J.: Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych. WNT. Warszawa, 2002.
 7. Domińczuk J.: Wpływ Wybranych Czynn timerów Konstrukcyjnych i Technologicznych na Wytrzymałość Połączeń Klejowych. Postępy Nauki i Techniki, Nr 10, 2011, str. 14-26.
 8. Czub P. i inni: Chemia i Technologia Żywic Epoksydowych, WNT, Warszawa 2002.

Mgr inż. Jakub SZABELSKI

Dr inż. Jacek DOMIŃCZUK

Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych

Wydział Mechaniczny

Politechnika Lubelska

20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36

tel.: 81 538 45 85

e-mail: j.szabelski@pollub.pl

j.dominczuk@pollub.pl