

ANALIZA WPŁYWU OBRÓBKI TERMICZNEJ NA WYTRZYMAŁOŚĆ POŁĄCZEŃ GWINTOWO-KLEJOWYCH

Jakub SZABELSKI, Jacek DOMIŃCZUK

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań wytrzymałości połączeń gwintowo klejowych uzyskanych na bazie klejów epoksydowych chemoutwardzalnych. Badaniom poddano trzy kleje epoksydowe: Loctite Hysol 9492A&B, kompozycję zbudowaną w oparciu o żywicę epoksydową Epidian 57 i utwardzacz PAC oraz żywicę epoksydową Epidian 57 utwardzaną utwardzaczem Z1. Badania prowadzone były w dwóch układach – w warunkach normalnych utwardzania i w podwyższonych temperaturach. Uzyskane wyniki wskazują, że dotwardzanie termiczne jest zasadne w przypadku kompozycji klejowych charakteryzujących się większą elastycznością. Stwierdzono również, że kleje epoksydowe wykazują podobną wytrzymałość statyczną na luzowanie jak kleje anaerobowe co w połączeniu z ich zdolnością do wypełniania dużych szczelin pozwala skutecznie wykorzystywać je w połączeniach o małej dokładności geometrycznej.

Słowa kluczowe: połączenia gwintowe, kleje epoksydowe, zabezpieczenie przed odkręcaniem, utwardzanie termiczne

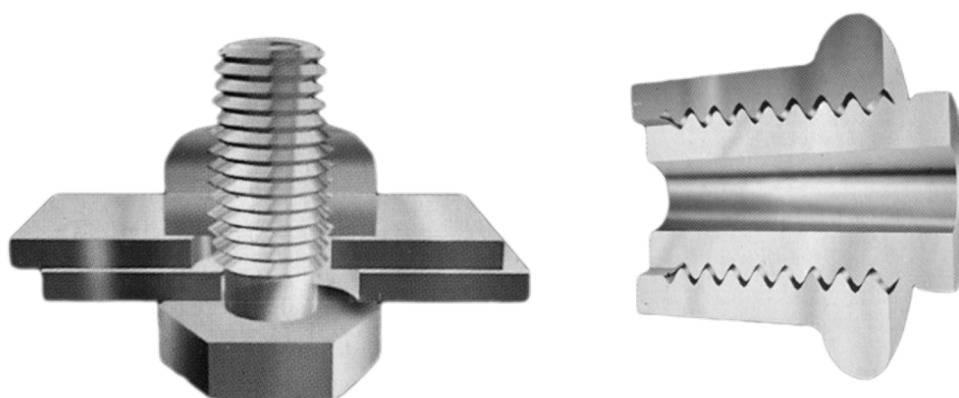
1. Wstęp

Połączenia gwintowe są bardzo często stosowane w inżynierii produkcji i budowie maszyn. Ich zaletą jest łatwość oraz relatywnie niski koszt wykonania. Z zasady połączenia gwintowe dzielą się na dwie grupy ze względu na sposób jego pracy: połączenie spoczynkowe, które pozwala ustalić względem siebie elementy łączone i uniemożliwić ich wzajemny ruch, oraz połączenia ruchome – stosowane np. do przenoszenia napędu, tj. ruchu obrotowego śruby/nakrętki na ruch liniowy wzdłuż osi gwintu.

Rozpatrując niezawodność spoczynkowego połączenia gwintowego rozumieć można ją na dwa sposoby. Klasyczne połączenie śrubowe łączące dwa materiały może ulegać uszkodzeniu w sensie luzowania się złącza, tj. utraty sztywności i stabilności układu śruba/nakrętka, spowodowanego np. długotrwałym obciążeniem dynamicznym lub zmiennymi obciążeniami cieplnymi występującego w sytuacji łączenia materiałów o różnym współczynniku rozszerzalności cieplnej. Proces luzowania w początkowej fazie rozszczelnienia połączenia, w dalszej może skutkować nawet uszkodzeniem elementów łączących i łączonych. Odmienne zadanie mają połączenia gwintowe służące do łączenia elementów rurowych instalacji służących do transportowania czynników ciekłych lub gazowych. W tego typu konstrukcjach gwint jest nacinany lub plastycznie nagniatany na zewnętrznej średnicy mniejszej rury i wewnętrznej średnicy rury większej. Uszkodzenie takiego złącza skutkuje nie tylko rozszczelnieniem w sensie mechanicznym ale i rozszczelnieniem zamkniętej instalacji prowadzącym do wycieku płynu (rys. 1).

Problem odkręcania się czy luzowania połączenia jest skutkiem zmniejszenia naprężeń wzdłuż osi gwintu. Pomiar stanu napięcia połączenia gwintowego może być realizowany poprzez kontrolę wydłużenia śruby (wymaga dostępu mikrometru do obu końców), pomiar zmiany kąta zacisku (między pozycją pasowania suwliwego, a pozycją po zastosowaniu

napięcia wstępnego), pomiar z zastosowaniem ultradźwięków (napięta śruba wykazuje dłuższy czas odbicia fali). Często jednak dochodzi do sytuacji braku możliwości dokonania oceny stanu złącza, np. z powodów konstrukcyjnych (utrudniony dostęp do połączenia) lub technologicznych (praca w trudnym lub agresywnym środowisku – temperaturze, oleju, itp.). W celu poprawy jakości, a tym samym niezawodności konstrukcji konstruktorzy poszukują metod zapewnienia oczekiwanej wytrzymałości połączenia nie wymagającej ingerencji pracowników czy stosowania automatycznych systemów kontrolnych [1].



Rys. 1. Przykładowe zastosowanie połączenia gwintowego: a) połączenie śrubowe dwóch blach, b) połączenie gwintowe dwóch rur [2]

Często zdarza się, że z powodu braku możliwości dokładnego określenia naprężeń w połączeniu szczególnie w sytuacji konieczności niestabilnej pracy połączenia, pracy pod wpływem znacznych drgań mechanicznych lub znacznych wahań temperatury – konstruktorzy przewymiarowują połączenia gwintowe. W wyniku czego stosowane są znacznie większe niż rzeczywiście potrzebne rozmiary śrub lub niepotrzebnie zwiększa się ich ilości. Obecnie w czasach wzrostu wymagań ekonomicznych stawianych produktom, w erze zapotrzebowania na zachowanie określonych parametrów jakościowych zapewniających określone parametry bezpieczeństwa i wydajności przy zachowaniu wysokiej konkurencyjności produktu jednocześnie przy dbałości o środowisko, konstruktorzy poszukują nowych metod pozwalających na zapewnienie jak najlepszych parametrów połączenia gwintowego [1].

W celu zapobiegania luzowaniu połączenia gwintowego stosowanych jest kilka różnorodnych technik. Znajdują się wśród nich rozwiązania konstrukcyjne, takie jak: dobór gwintów o mniejszym skoku, stosowanie rozwiązań gwintowych z materiałów o wyższym współczynniku tarcia niż zwyczajowo stosowana stal czy zwiększania tarcia między powierzchniami czołowymi śruby i nakrętki, a powierzchnią elementów łączonych poprzez chropowacenie ich, stosowanie podkładek zabezpieczających (sprężynowych, odginanych, itd.) lub zabezpieczanie zawleczką albo nakrętką kontruującą. Rozwiązania technologiczne obejmują z kolei m.in.: zastosowanie znacznych obciążeń wstępnych, stosowanie środków uszczelniających i zabezpieczających stosowanych bezpośrednio na gwint lub między łeb śruby a kołnierz.

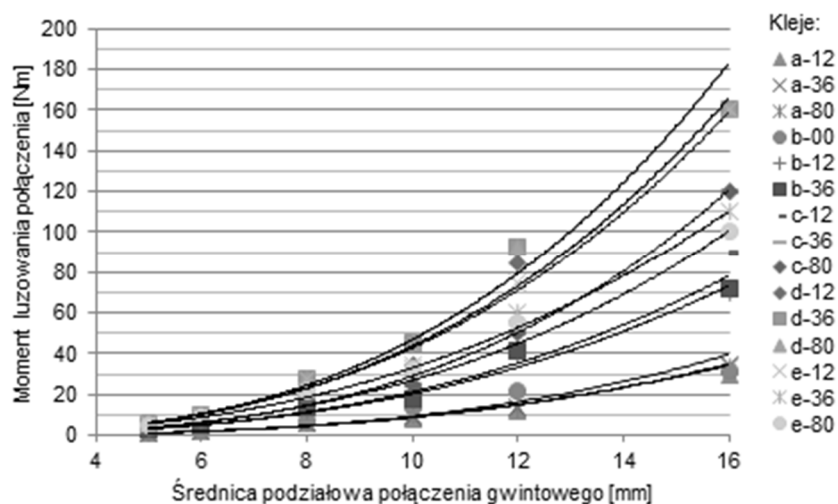
Pierwsze rozwiązania z zakresu uszczelniaczy nanoszonych na powierzchnie łączonych elementów bazowały na wykorzystywaniu środków, np. w postaci kitów, opartych o ołów lub jego tlenki. Ponieważ każdy związek ołowiu jest substancją toksyczną i szkodliwą dla

środowiska zarówno na etapie aplikacji jak i późniejszego użytkowania jego stosowanie zostało zaniechane w szczególności przy konstrukcjach związanych np. z transportem wody pitnej [3]. Kolejnym materiałem stosowanym w aplikacjach tego typu były różnorodne farby, materiały powlekające i uszczelniacze (np. pochodne celulozy), które po nałożeniu na gwint i odparowaniu rozpuszczalnika tworzyły sztywne uszczelnienie. Niestety dla niektórych zastosowań było ono zbyt sztywne, a więc nieodporne na dynamiczny charakter obciążeń połączeń. Wymienionych wcześniej wad nie posiadają środki określane jako kleje i stosowane jako zabezpieczenie i doszczelnienie połączeń gwintowych. Obecnie najczęściej stosowanymi środkami służącymi do zabezpieczenia przed odkręceniem i służącymi uszczelnieniu połączenia są występujące zarówno w postaci płynnej jak i półstałej środki anaerobowe. Kleje te utwardzają się na skutek odcięcia dostępu do powietrza, tj. przez szczelne zetknięcie łączonych powierzchni [4]. Dużą zaletą tych środków jest powolny proces utwardzania połączenia, które może być w pewnym okresie czasu skręcane czy korygowane. Większość odmian kleju uzyskuje wytrzymałość wstępną po ok. 10 minutach, do pełnego utwardzania wymaga ok. 24 godzin. Podstawowym składnikiem tego typu klejów są metakrylany, pochodne kwasu metakrylowego. Możliwa jest również ich modyfikacja przez zastosowanie odpowiednich wypełniaczy i dodatków, podnoszących wytrzymałość, zwiększających odporność na pracę w podwyższonej temperaturze, zwiększających odporność na działanie olejów i smary, podnoszących zdolność łączenia materiałów o niskich właściwościach adhezyjnych. Zaletą stosowania tego sposobu zabezpieczania gwintów jest odporność na wibracje, odporność chemiczna na typowe gazy i ciecze techniczne i odporność termiczna (nawet do 230°C), a przede wszystkim nietoksyczność, która umożliwia ich stosowanie np. w układach przemysłu żywnościowego [2].

Potrzeba stosowania bardziej niezawodnych połączeń niejednokrotnie wykazujących odporność na ściśle określone warunki pracy powoduje, że ciągle poszukuje się nowych możliwości doskonalenia techniki klejenia nie tylko w oparciu o wprowadzanie nowych materiałów łączeniowych ale również poprzez modyfikację już stosowanych. Jednym z takich rozwiązań jest stosowanie obróbki termicznej połączenia. Dowiedziono, że klasyczne połączenia klejowe w przypadku obciążania na odrywanie i ścinanie wykazują dla części klejów wzrost wytrzymałości połączenia w sytuacji jego obróbki cieplnej. Wyniki badań własnych materiałów przeznaczonych bezpośrednio do stosowania w połączeniach gwintowych szczególnie materiałów anaerobowych wykazują, że ekspozycja złącza w temperaturze podwyższonej może zwiększać moment luzowania połączenia rozumiany jako maksymalną wartość momentu występującą przy odkręcaniu złącza. W oparciu o dane pochodzące z kart danych technicznych klejów anaerobowostykowych dedykowanych do uszczelniania połączeń gwintowych i zabezpieczania przed luzowaniem (Chester Molecular) sporządzono przykładowy wykres (rys. 2) przedstawiający wpływ średnicy podziałowej połączenia gwintowego na wartości wytrzymałości połączenia [5]. Uzyskane wykresy wykazują charakter rosnący w sposób wykładniczy. Linie trendu dla takiego modelu zostały dopasowane bardzo dokładnie – współczynnik determinacji wyniósł powyżej 97%.

Prezentowany wykres pozwala stwierdzić, że odporność połączenia tego typu jest funkcją pola powierzchni kontaktu kleju w strefie formowanej spoiny. Dla klejów anaerobowych jest to zjawisko analogiczne do zależności, którymi charakteryzują się połączenia zakładkowe elementów o dużej sztywności. Należy tu zauważyć, że w literaturze brak jest informacji związanych ze stosowaniem metod dotwardzania termicznego szczególnie w sytuacjach stosowania jako łącznika materiałów epoksydowych.

W celu wykazania przydatności tej metody łączenia przeprowadzono badania dla tej grupy materiałów łączeniowych.



Rys. 2. Wpływ zwiększenia średnicy śruby na wytrzymałość połączenia gwintowego uszczelnianego różnymi kompozycjami klejów anaerobowych [5]

2. Badania Eksperymentalne

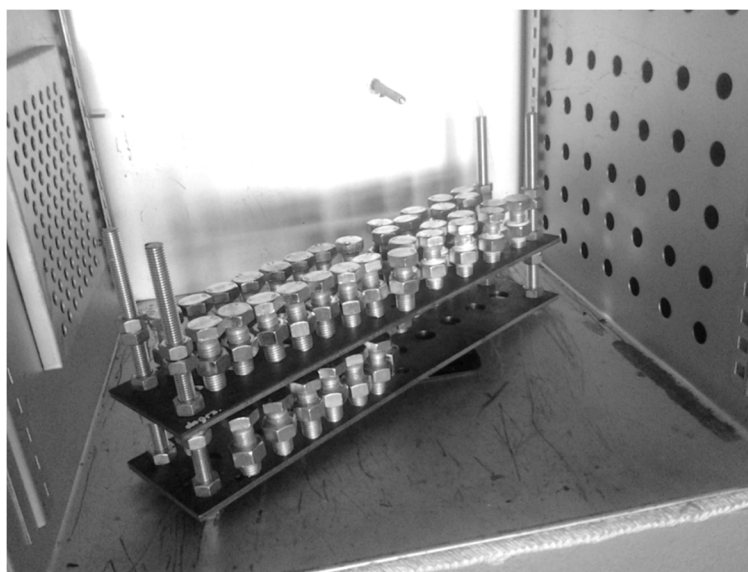
2. 1. Obiekt i Plan Badań

Badaniu poddano śruby M16 klasy 5.8 wykonane ze stali o powierzchni cynkowanej. Badania wpływu obróbki termicznej połączeń gwintowo-klejowych na ich odporność na luzowanie przeprowadzono badania w oparciu o normę PN-EN 15865:2009 Kleje – Oznaczanie wytrzymałości na odkręcanie połączeń gwintowych. W trakcie badania mierzono wartość momentu obrotowego luzującego niezbędną do zerwania połączenia klejowego śruby i nakrętki po jego zabezpieczeniu klejem. Rejestracji poddano również wartości momentu obrotowego pozostającego po wstępnym zerwaniu połączenia.

Badaniu poddano trzy kleje epoksydowe: Loctite Hysol 9492A&B, kompozycję zbudowaną w oparciu o żywicę epoksydową Epidian 57 i utwardzacz PAC oraz żywicę epoksydową Epidian 57 utwardzaną utwardzaczem Z1. Loctite Hysol 9492 jest dwuskładnikowym klejem epoksydowym. Jego uniwersalność polega na możliwości stosowanie w wielu różnorodnych sytuacjach. Producent deklaruje jego użyteczność zarówno w funkcji tradycyjnego kleju, jak i uszczelniacza, a także wskazuje że może on służyć do napraw różnorodnych materiałów (np. do usuwania porów i nierówności z powierzchni odlewów lub odkuwek). Klej dostarczany jest w podwójnych kartuszach przystosowanych do mieszania w zalecanej proporcji objętościowej i wagowej (równe ciężary właściwe żywicy i aminowego utwardzacza) równej 2:1. Kompozycja uzyskana po połączeniu składowych charakteryzuje się największą lepkością spośród badanych klejów, wynoszącą zgodnie z deklaracją producenta 30000 cP. Klej jest białą

nieprzezroczystą pastą o stosunkowo krótkim czasie przydatności od momentu zmieszania, tj. ok. 15 minut. Czas osiągnięcia tzw. wytrzymałości ręcznej (0,1 MPa) wynosi w temperaturze otoczenia ok. 75 minut. Producent dopuszcza możliwość dotwardzania kleju poprzez obróbkę termiczną co ma skutkować podniesieniem wytrzymałości i skróceniem czasu uzyskania przez klej pełnej wytrzymałości.

Żywica epoksydowa Epidian57 to przezroczysta, żółta, lepka ciecz otrzymywana w reakcji bisfenolu A i epichlorohydryny modyfikowany nienasyconą żywicą epoksydową. Jego lepkość jest ok. połowę mniejszej niż lepkość kleju Loctite Hysol 9492. Poza tradycyjnym zastosowaniem, tj. wykonywaniem połączeń klejowych, żywica wykorzystywana jest również do wytwarzania z włóknem szklanym bardzo wytrzymałych laminatów szklano-epoksydowych. W prezentowanych badaniach jednym z zastosowanych utwardzaczy jest PAC – lepka ciecz koloru bursztynowego o składzie: trietylotetramina w zawartości ok. 8-12% dopełniona nienasyconymi kwasami tłuszczowymi. Drugim utwardzaczem jest Z-1, jest to w 100% czysta (bez dodatków) trietylotetramina o charakterystycznym drażniącym zapachu. Proporcje zalecane przez producenta przy utwardzaniu tymi utwardzaczami Epidianu 57 to kolejno: 100:50-80 dla PAC i 100:10 dla Z-1. Jak wynika z analizy literatury, w niektórych aplikacjach uzyskiwano bardziej korzystne wytrzymałości dla proporcji innych niż zalecane przez producenta, co uwzględniono w prowadzonej analizie [6]. W przypadku utwardzacza PAC zastosowano 90 części wagowych utwardzacza na 100 części żywicy.



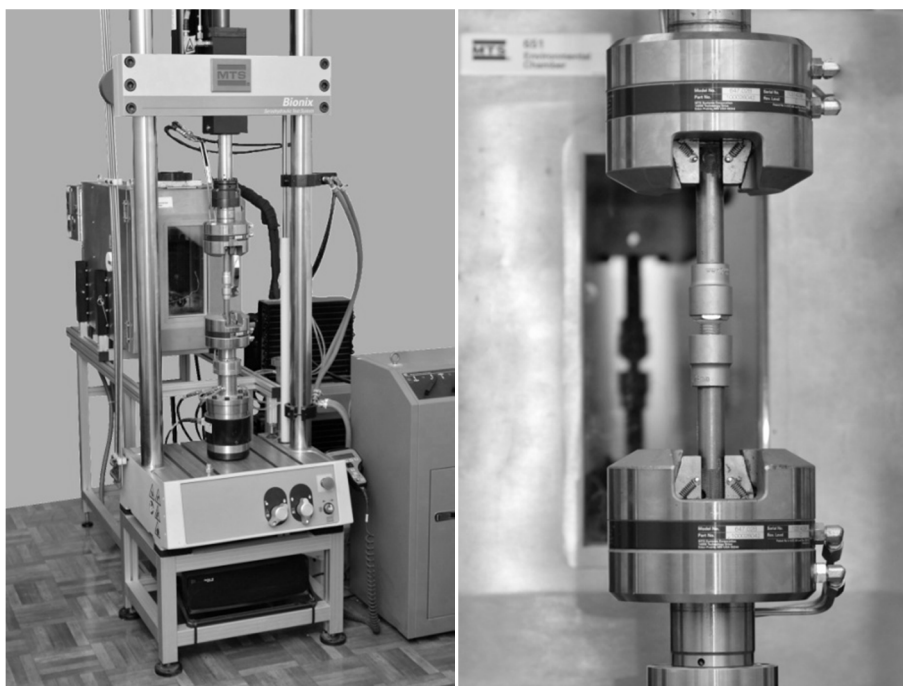
Rys. 3. Badane połączenia gwintowe (śruba/nakrętka) w komorze cieplnej

Klejone powierzchnie gwintowe, wewnętrzna nakrętka i zewnętrzna śruba zostały oczyszczone z wykorzystaniem preparatu czyszczącego i odtłuszczającego Loctite 7063 poprzez natryskowe naniesienie go i odczekanie do chwili samoczynnego odparowania w warunkach otoczenia. Przed wykonaniem połączenia kolejno przygotowano masy klejowe poprzez odmierzenie jednostki masy żywicy i wymieszanie jej z utwardzaczem w założonej proporcji. Tak przygotowaną masę poddawano następnie odgazowywaniu przy

wykorzystaniu komory próżniowej. Wykonanie połączenia polegało na naniesieniu warstwy kleju na powierzchnię wewnętrznego gwintu nakrętki oraz na śrubę na długości przewyższającej wysokość nakrętki tak, aby po zmontowaniu śruba wystawała z nakrętki na długość dwóch zwojów.

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 KC-100/200 rozbudowanej o sterowanie cyfrowe (rys. 3). Czas i temperaturę grzania określono na podstawie zaleceń w kartach produktu i danych literaturowych przyjmując 2 godziny i 50°C dla wszystkich trzech serii próbek.

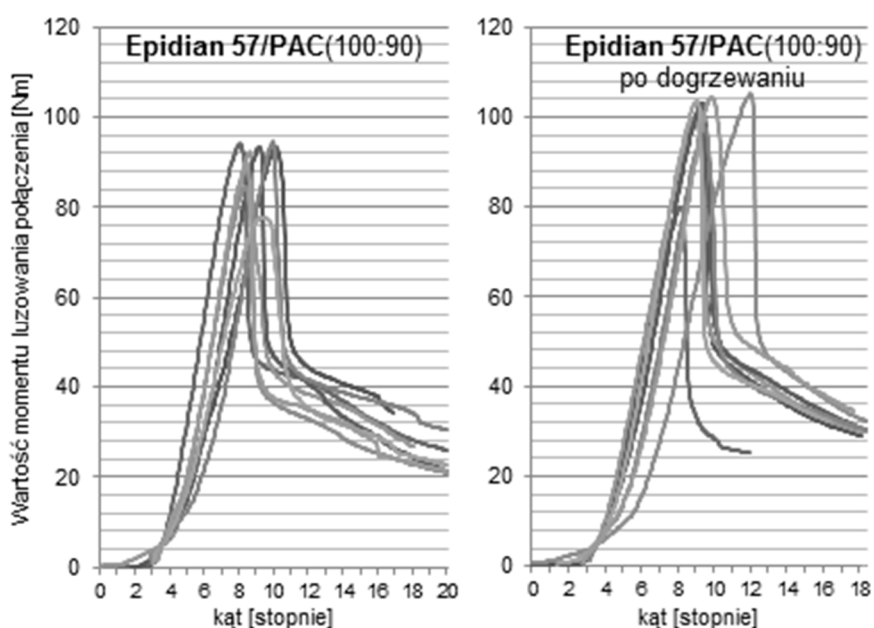
Badania wytrzymałościowe przeprowadzono w temperaturze otoczenia na maszynie MTS Bionix Servohydraulic Test System z możliwością pomiaru momentu i kąta skręcenia (rys 4). Obiekty badań zostały poddane szczegółowym pomiarom i kalibracji w celu zapewnienia jak największej powtarzalności pomiarów.



Rys. 4. a) Maszyna wytrzymałościowa MTS Bionix Servohydraulic Test System z możliwością pomiaru momentu i kąta skręcenia, b) uchwyt z nasadkami do mocowania śrub

2. 2. Wyniki Badań

W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano wyniki ilustrujące wpływ sposobu dotwardzania połączenia na wartość momentu luzującego rozumianego jako maksymalny moment zarejestrowany w czasie badania. Na wykresach tych przedstawiono reakcję połączenia na zadaną wartość przemieszczenia kąтового. Na rys. 5 zaprezentowano przykładowe wyniki porównawcze z pomiarów wykonanych na połączeniach niemodyfikowanych i połączeniach dogrzewanych.



Rys. 5. Wykres wartości momentu przy odkręcaniu połączenia uszczelnionego klejem Epidian57 z utwardzaczem PAC w proporcji 100:90 a) niedogrzewanego, b) dogrzewanego w funkcji kąta skręcenia połączenia

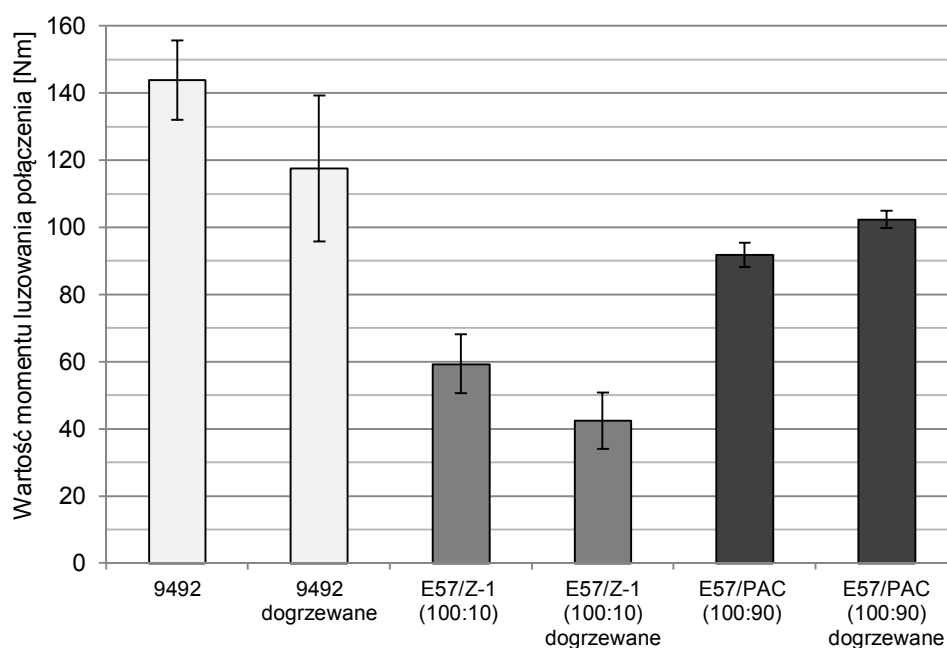
Zestawienie wyników uzyskanych wartości momentów luzowania połączenia próbek uszczelnionych bez dogrzewania i próbek poddanych procesowi obróbki cieplnej pokazano na rys. 6. Wartości liczbowe przedstawiono w tabeli 1 i tabeli 2.

Tab. 1. Wartości średnich momentów luzujących połączenie oraz odchyłeń standardowych uzyskanych wyników i współczynnika zmienności (Loctite 9492 A&B)

klej	Loctite 9492 A&B	
	brak	dogrzewanie
średni moment luzowania	143,85 Nm	117,54 Nm
odchylenie standardowe	11,88 Nm	21,77 Nm
współczynnik zmienności	8,3%	18,5%

Tab. 2. Wartości średnich momentów luzujących połączenie oraz odchyłeń standardowych uzyskanych wyników i współczynnika zmienności (kleje na bazie Epidianu 57)

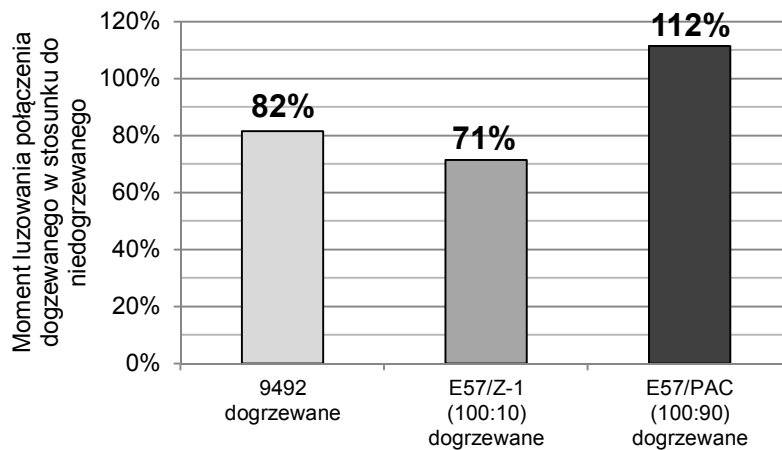
klej	Epidian 57			
	Z-1(100:10)		PAC (100:90)	
utwardzacz / proporcja				
obróbka cieplna	brak	dogrzewanie	brak	dogrzewanie
średni moment luzowania	59,34 Nm	42,42 Nm	91,81 Nm	102,43 Nm
odchylenie standardowe	8,77 Nm	8,44 Nm	3,55 Nm	2,58 Nm
współczynnik zmienności	14,8%	19,9%	3,9%	2,5%



Rys. 6. Wartości momentów luzowania połączeń gwintowych ustalonych klejem epoksydowym dla dogrzewania badanych klejów

Wartości momentów luzowania połączenia uzyskane w drodze badań eksperymentalnych wykazują małe rozrzuty wyników w ramach serii. O przydatności do analizy i powtarzalności uzyskanych wyników świadczą również obliczone wartości odchylenia standardowego i współczynnika zmienności.

Na rys. 7 przedstawiono graficznie zmianę wartości średniej momentu luzowania połączenia po zastosowaniu operacji dogrzewania strefy złącza w stosunku do momentu luzowania złącza niemodyfikowanego. Wszystkie kleje wykazują wyraźną zmianę wytrzymałości po obróbce cieplnej w momencie konstytuowania połączenia klejowego. Dwa spośród nich (Loctite 9492 A&B oraz kompozycja wykonana z utwardzania żywicy Epidian57 utwardzaczem Z1) po dogrzewaniu w warunkach założonych planem badań charakteryzowało się obniżeniem momentu luzowania połączenia o 20 i 30%.



Rys. 7. Wartości zmian momentu luzowania złącza gwintowo klejowego w stosunku do wytrzymałości złącza nie obrabianego termicznie

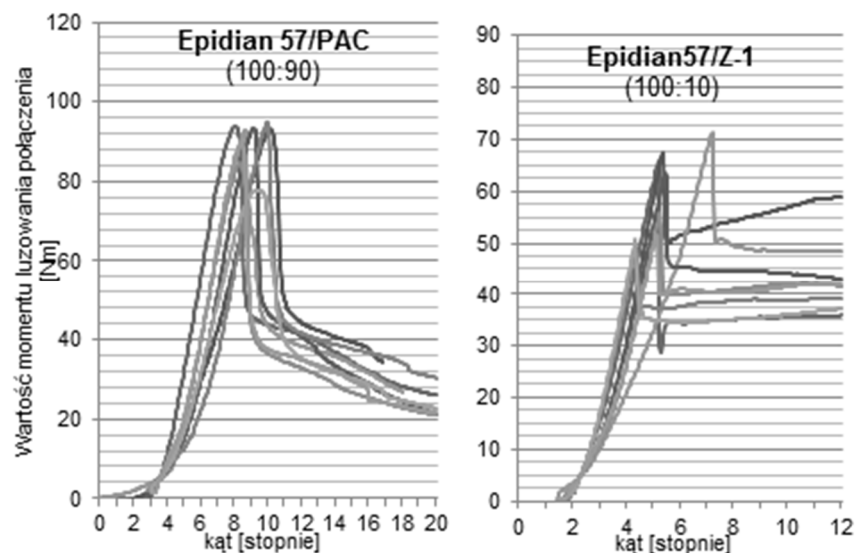
3. Wnioski

W oparciu o wyniki przeprowadzonych badań można stwierdzić, 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. Niewątpliwie interesującym było by poznanie i zestawienie również innych parametrów jakościowych takich jak np. wytrzymałość dynamiczna, która jest istotnym parametrem w przypadku tego typu połączeń. Analizując wytrzymałość klejów epoksydowych w zestawieniu z klejami anaerobowymi należy zauważyć, że kleje te wykazują podobne wytrzymałości (moment luzowania) (rys. 2).

Dla połączeń gwintowo-klejowych uzyskane wyniki dla kleju 9492 i kompozycji E57/Z1 świadczą o spadku wytrzymałości. Należy tu jednak zauważyć, że połączenia zakładkowe czy doczołowe wykonane w oparciu o procedurę dotwardzania termicznego są mniej czułe na odstępstwa od zalecanych technologicznie proporcji kleju i utwardzacza co jest istotne w nielaboratoryjnych warunkach stosowania. Należy również spodziewać się, że tego typu kompozycje dotwardzone termicznie będą bardziej odporne na szoki termiczne gwarantując tym samym wysoką jakość połączenia w warunkach dużych zmian temperatury w strefie złącza.

Badane kleje charakteryzuje również odmienne zachowanie się w fazie odkręcania połączenia. Jest to istotne szczególnie w aplikacjach, gdzie zależy na jak najdłuższym zachowaniu sprzężenia mechanicznego łączonych elementów. W tym przypadku kleje sztywne wykazują wyższą skuteczność (rys. 7).

Zaletą stosowania klejów epoksydowych w połączeniach gwintowych w porównaniu z klejami anaerobowymi jest niewątpliwie ich zdolność do wypełniania dużych wolnych przestrzeni co sprawia, że mogą one być stosowane w elementach regenerowanych, gdzie nie jest możliwe dokładne dopasowanie powierzchni gwintów w skutek ich zużycia.



Rys. 7. Wykres wartości momentu luzującego połączenie uszczelnione z udziałem kleju Epidian57: a) z utwardzaczem PAC w proporcji 100:90, b) z utwardzaczem Z-1 w proporcji 100:10 w funkcji kąta skręcenia połączenia

Literatura

1. Bolted Joints Design <http://www.fastenal.com/web/en/61/bolted-joint-design-analysis>
2. Loctite Worldwide Design Handbook. (1998), LOCTITE Europe Group München
3. Valitsky R.: Thread Sealing 101: Consider your options when choosing a method of sealing pipe joints, Plant Services magazine, 2008
4. Lescarbeau D.: Beyond threadlocking: Anaerobic adhesives improve reliability. Machine Design 82 (13), 2010, str.42-45
5. Karty Danych Technicznych klejów anaerobowych Chester Molecular (chester.com.pl/POL/produkty/Kleje_anaerobowe/3/)
6. Godzimirski J.: Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych. 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
 e-mail: j.szabelski@pollub.pl
j.dominczuk@pollub.pl