

Przyczyny pęknięcia elementów spawanych zbiornika procesowego

Reasons of failure of welded elements in the process tank

Streszczenie

Przyczyny awarii konstrukcji spawanych często związane są z niską jakością wykonanych złączy. Wady wynikają z nieprzestrzegania technologii spawania, zastosowania nieodpowiedniego materiału podstawowego i dodatkowego lub braku kwalifikacji spawaczy. Są jednak przypadki, kiedy przyczyny zniszczenia wynikają ze złego rozwiązania konstrukcyjnego lub niewłaściwej eksploatacji. Analiza pęknięcia złączy spawanych w mieszalniku ze stali austenitycznych wykazała, że proces zniszczenia wiąże się z drganiami generowanymi przez mieszadło podczas pracy. W takich warunkach naprawa złączy spawanych i wzmacnianie konstrukcji chwilowo poprawi sytuację, lecz bez usunięcia przyczyny pęknięć (wpadanie urządzenia w zakres drgań krytycznych) nie wyeliminuje problemu.

Abstract

Reasons of welded constructions breakdown is very often in a low quality of welded joints. Defects are the result of departure from welding technology specification, use of improper filler or base metal or insufficient welder qualifications. There are also cases when reasons of failure are a result of wrong constructional solution or improper exploitation. The analysis of the case of welded joints cracking in mixer of austenitic steel showed that the process of destruction was connected with vibrations generated by stirrer in the work conditions. In such conditions repair of cracks and reinforcement of construction leads temporarily to improvement of situation, but without elimination the root reason of cracking (falling of device into critical range of vibration) can only slow down but not eliminate the problem of cracking.

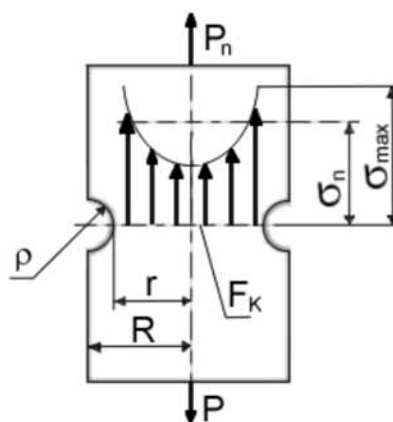
Wstęp

Każdy element konstrukcji ulega zniszczeniu po przekroczeniu określonego naprężenia niszczącego. Wiadomo również, że zniszczenie może nastąpić przy znacznie mniejszych poziomach naprężeń, jeśli tylko mają one charakter oscylacyjny i działają dostatecznie długo [1]. Zjawisko to nosi nazwę *zmęczenia materiału* i należy się z nim zawsze liczyć w drgających elementach maszyn i konstrukcji. Pęknięcia zmęczeniowe rozwijają się przy naprężeniach niższych niż granica plastyczności materiału i bez zauważalnych odkształceń plastycznych.

Wytrzymałość zmęczeniową określają najslabsze miejsca konstrukcji, w których rozpoczyna się pęknięcie – karby geometryczne spiętrzające naprężenia (rys. 1).

Złącza spawane ze względu na niedoskonałości geometrii i procesu spawania zawierają często

niezgodności będące przyczyną spiętrzenia naprężeń. Miarą spiętrzenia naprężeń jest *współczynnik kształtu* $\alpha_k = \sigma_{\max} / \sigma_n$, który opisuje geometrię karbu, a nie zależy od wielkości obciążenia, wymiarów elementu



Rys. 1. Rozkład naprężeń w przecie płaskim z karbem (pręt rozciągany, materiał doskonale sprężysty) [2]

Fig. 1. Stress distribution in notched flat bar (bar stretched, elastic material) [2]

Dr inż. Krzysztof Dutka, dr inż. Jan Stabryła
– Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie.

i rodzaju materiału. *Naprężenie nominalne* $\sigma_n = P/F_K$ określa stosunek siły P do pola przekroju w miejscu karbu F_K (rys. 1). Spośród wszystkich rodzajów złączy spawanych najmniejsze spiętrzenie naprężeń występuje w złączach doczołowych. Wypukłość lica lub wyciek grani spoiny wywołują spiętrzenie naprężeń nawet trzykrotne ($\alpha_k = 1\div 3$), podczas gdy spoina czołowa z usuniętym mechanicznie licem ma współczynnik kształtu $\alpha_k = 1$, jeśli w złączu nie występują niezgodności wewnętrzne. Dla złączy doczołowych ze szlifowanym licem wytrzymałość zmęczeniowa odpowiada wytrzymałości materiału rodzimego. Spiętrzenie naprężeń w spoinach pachwinowych jest znacznie większe: $\alpha_k = 4$ od strony lica i $\alpha_k = 7$ od strony grani [3]. O ile kształt lica można skorygować obróbką mechaniczną, to spiętrzenia graniowego praktycznie nie można zmniejszyć.

Problemy wibracyjne w zbiornikach z mieszadłami mogą pojawiać się przy pewnych prędkościach obrotowych, lecz zjawisko to jest bardzo złożone i zależy również od wymiarów gabarytowych zbiornika i mieszadła, jego usytuowania, odległości od dna. Istotną rolę odgrywa obecność kierownic w zbiorniku, sposób ułożyskowania, stopień wypełnienia zbiornika, temperatura i lepkość surowca. Konieczne jest wyeliminowanie skrzywienia wału i wyważenie wszystkich elementów obrotowych [4]. Drgania mogą występować zarówno podczas cyklu procesowego, jak i w cyklu mycia zbiornika. Parametry pracy mogą powodować powstawanie wiru. Bezpieczna praca mieszadła polega na eksploatacji w zakresie prędkości obrotowej niepowodującej wpadania układu w częstotliwość drgań własnych [5]. Operator urządzenia nie może dopuścić do pracy w zakresie prędkości powodującej wystąpienie częstotliwości drgań krytycznych.

Częstotliwość własna związana z prędkością krytyczną wywołuje problemy, gdy prędkość operacyjna jest zbyt bliska prędkości krytycznej. Długość wału, masa wału i mieszadła oraz moduł sprężystości stali to również czynniki wpływające na poziom częstotliwości, przy której wał wpada w wibracje. Jeśli czynniki zewnętrzne, takie jak prędkość operacyjna mieszadła, są zgodne z częstotliwością własną, zniszczenie o charakterze katastroficznym jest nieuniknione.

Większość mieszalników projektowana jest do pracy poniżej pierwszej naturalnej częstotliwości drgań wału miksera [6]. Typowe prędkości operacyjne ograniczane są ze względu na problemy wibracyjne do poziomu poniżej 85% częstotliwości drgań własnych. Jeśli prędkość obrotowa i częstotliwość drgań własnych są zbyt bliskie, powstające wibracje prowadzą do dużych obciążeń mechanicznych.

Podatne lub zbyt słabe mocowanie wału może być powodem problemów mechanicznych. Uginanie się zamocowania w mieszalniku może prowadzić do zgięcia wału i przyspieszonego zużycia łożyskowania. Może również umożliwiać wibracje powodujące zużycie uszczelnienia. Podatne zamocowanie obniża wartość pierwszej naturalnej częstotliwości krytycznej wału miksera, powodując wystąpienie drgań krytycznych nieuwzględnionych zwykle w projekcie [7].

Cel i zakres badań

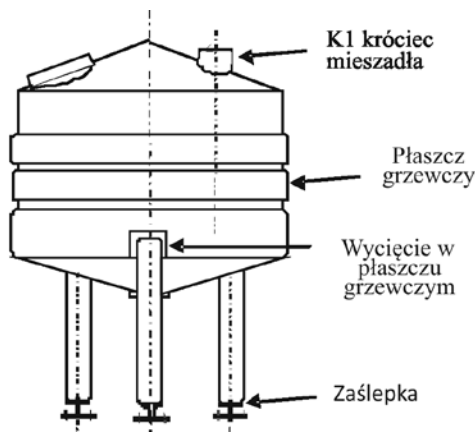
Producent zbudował mieszalnik do syropu, w którym zostało wykorzystane mieszadło dostarczone przez zamawiającego. Mieszadło pracowało wcześniej w innym mieszalniku, którego zbiornik został złomowany z powodu pęknięć. W nowym mieszalniku pojawiły się pęknięcia płaszczu grzewczego po roku eksploatacji. Naprawy gwarancyjne wycieków (pięciokrotnie w ciągu kolejnego roku) nie pozwoliły wyeliminować problemu pęknięć. Użytkownik mieszalnika deklarował poprawność procesu eksploatacyjnego.

Celem badań było określenie przyczyn pęknięcia elementów konstrukcyjnych mieszalnika. Wykonano analizę rozwiązania konstrukcyjno-materiałowego urządzenia, badania wizualne złączy spawanych oraz badania makroskopowe przelomów.

Rozwiązanie konstrukcyjno-materiałowe

Przedmiotem badań były elementy konstrukcyjne mieszalnika walcowego o osi pionowej z dennicami stożkowymi (rys. 2).

Zbiornik mieszalnika został wykonany ze stali kwasoodpornej 316L (AISI) o grubości ścianki 4 mm. W dolnej części zbiornik okryty jest płaszczem grzewczym. Płaszcz grzewczy stanowią kanały o profilu płaskiego ceownika ze stali 304 o grubości ścianki 2,5 mm przyspawane ramionami do zbiornika. Zbiornik posadowiony jest na 3 nogach przyspawanych bezpośrednio do płaszczu zbiornika w strefie płaszczu grzewczego. Konstrukcja wymagała dokonania wycięć na nogi w najniższym kanale płaszczu grzewczego. Prostokątne otwory szerokości ok. 140 mm wycięte w płaszczu pozwoliły na swobodne przyspawanie nóg do dennicy zbiornika. Do zaślepienia szczelin powstałych między płaszczem grzewczym a zbiornikiem użyto pasków stali, które połączono z płaszczem za pomocą spoin narożnych, a ze zbiornikiem za pomocą



Rys. 2. Widok zbiornika na syrop
Fig. 2. View of the tank into a syrup

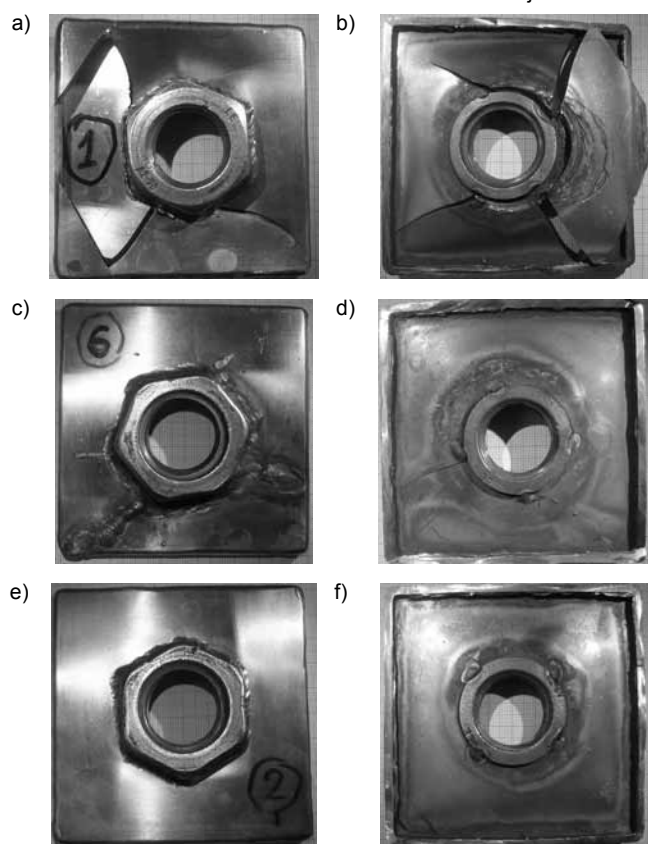
spoin pachwinowych. Nogi zbiornika o przekroju kwadratowym 100x100x3 mm zaślepione zostały od dołu płytkami zamykającymi grubości 5 mm z centralnym otworem. W otworach przyspawano nakrętki umożliwiające wkręcanie śrub (stóp) poziomujących. Konstrukcję spawano metodą TIG. Mieszalnik o pojemności 3000 l i średnicy wewnętrznej zbiornika 1500 mm eksploatowany był w zakładzie przetwórstwa spożywczego (rozpuszczanie cukru na syrop) przy temperaturze pracy 120°C i ciśnieniu roboczym $p_{\max} = 3,5$ bara. Zbiornik został wyposażony w mieszadło pionowe (dostarczone przez zamawiającego) osadzone w króćcu K1 dennicy górnej. Oś mieszadła przesunięta była względem osi zbiornika o ok. 450 mm.

Płaszcz grzewczy zbiornika uległ rozszczelnieniu po ok. 12-miesięcznej eksploatacji. Uszkodzenia polegały na powstaniu pęknięć w spoinach narożnych wnek płaszczu grzewczego (w strefie mocowania nóg). Nieszczelności były kilkakrotnie naprawiane przez ponowne zespawanie lub wykonanie nakładek.



Rys. 3. Próbkę pobrane z wycięcia w płaszczu grzewczym na nogi zbiornika – widok elementów z pęknięciami w spoinach narożnych

Fig. 3. Samples from the notch in the heating jacket on the feet of the tank – a view of elements with cracks in the corner joints



Rys. 4. Zaślepki nóg zbiornika: a-b) element 1, c-d) element 6, e-f) element 2

Fig 4. Feet caps of tank: a-b) element 1, c-d) element 6, e-f) element 2

W późniejszym okresie wystąpiły pęknięcia w obrębie płytek zamykających nogi zbiornika, w których osadzone były śruby poziomujące. Wytwórca zbiornika dokonał naprawy polegającej na nacięciu i zespawaniu pęknięć w płytkach. Widok elementów z pęknięciami przedstawiono na rysunkach 3 i 4.

Badanie składu chemicznego

Wykonane spektrometrem badania kontrolne składu chemicznego elementów konstrukcyjnych zbiornika oraz spoiny narożnej, w których wystąpiły pęknięcia, potwierdziły zgodność materiału z dokumentacją. Wyniki badań zestawiono w tabelicy I. Numery próbek odpowiadają numerom elementów z rysunków 3 i 4.

Tablica I. Skład chemiczny elementów z pęknięciami

Table I. Chemical composition of components with cracks

Numer i nazwa elementu	Udział wagowy, %					
	Cr	Ni	Mo	Mn	Cu	Fe
1 – zaślepka	16,81	9,79	2,11	1,28	0,45	68,44
2 – zaślepka	16,93	9,43	2,05	1,15	0,34	68,99
3 – spoina narożna	18,21	10,81	1,13	1,72	0,35	66,87
4 – płaszcz grzewczy	18,03	8,38	0,19	1,15	0,54	71,22
5 – nakładka płaszczu	17,97	8,18	0,50	1,75	0,30	70,36
6 – zaślepka	16,66	10,01	2,05	1,36	0,41	68,43

Analiza wykazała, że ze względu na zawartości Cr i Ni (a w zaślepkach nóg – elementach nr 1, 2 i 6 również Mo) blacha odpowiada typowym gatunkom stali austenitycznych. Brak możliwości oceny zawartości C, Si, Ti, Nb czy N oraz zanieczyszczeń nie pozwala na zakwalifikowanie blach na podstawie składu chemicznego do konkretnego znormalizowanego gatunku stali kwasoodpornych. Blacha, z której wykonano zaślepki nóg, zbliżona jest składem chemicznym do stali 316, a blacha użyta na płaszcz grzewczy do stali 304 (AISI). Skład chemiczny spoiny narożnej łączącej blachy płaszczu grzewczego wykazuje zawartość ok. 1,13% Mo. Świadczy to o zastosowaniu do spawania materiału dodatkowego zawierającego molibden i potwierdza poprawność jego doboru.

Badania wizualne elementów z pęknięciami

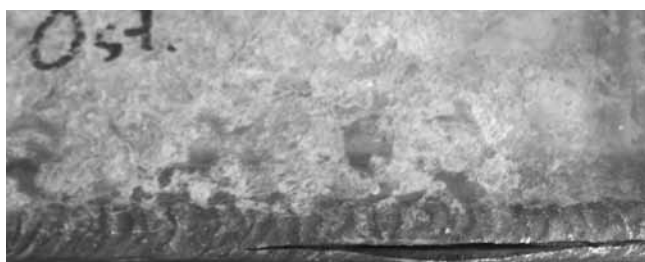
Pomijając w ocenie obecność pęknięć eksploatacyjnych, złącza spawane mieszalnika zostały zakwalifikowane do klasy jakości B (wysoka jakość) wg wymagań normy PN-EN 5817.

Badania elementów odciętych od zbiornika podczas napraw wykazały obecność pęknięć o charakterze kruchym, tj. pęknięć praktycznie bez odkształceń plastycznych w ich rejonie. Pęknięcia zarówno w płaszczu grzewczym, jak i w płytkach zaślepiających nogi zbiornika rozchodzą się w różnych kierunkach, nie wykazując

związku z włóknistością stali, czyli kierunkiem walcowania. Fakt, że charakter pęknięć jest identyczny, a część zniszczonych elementów nie miała kontaktu z czynnikiem roboczym czy grzewczym (para wodna) oraz substancjami stosowanymi do dezynfekcji, wyklucza korozyjne podłoże przyspieszonego zniszczenia. Widok płytek zaślepiających nogi zbiornika od strony wewnętrznej wskazuje na związek pęknięć ze spoinami szczipnymi wykonanymi do ustalenia położenia nakrętek w otworach płytek zaślepiających przed ich połączeniem z nogami (rys. 4b, d, f). Stan rozwoju pęknięć w płytkach każdej z trzech nóg jest inny. W płytce oznaczonej numerem 1 nastąpiło wielokierunkowe pęknięcie z doprowadzeniem do oddzielenia fragmentu płytki zaślepiającej (rys. 4a, b). Sposób zniszczenia, którego skutkiem jest całkowite oddzielenie fragmentu płytki zamykającej, jest silnym argumentem wskazującym na to, że przyczyn zniszczenia należy poszukiwać w drganiach wibracyjnych konstrukcji. Od strony zewnętrznej płytki zaślepiającej nr 6 widoczne są ściegi naprawcze nałożone w miejscach pęknięć (rys. 4c). Widok płytki zaślepiającej od strony wewnętrznej (rys. 4d) wskazuje, że spoiny naprawcze wykonane zostały powierzchniowo, co zatrzymało ich rozwój, lecz nie zahamowało procesu powstawania nowych pęknięć w istniejących warunkach eksploatacyjnych. W płytce nr 2 brak jest pęknięć od strony zewnętrznej i wewnętrznej (rys. 4e, f). Różny stopień uszkodzeń występujący w płytkach każdej z nóg wskazuje, że istotna jest ich lokalizacja w stosunku do układu obrotowego mieszalnika generującego pęknięcia. Od usytuowania nogi zależeć będzie amplituda drgań, a więc i stopień jej zniszczenia.

Pęknięcie spoin narożnych wokół wycięć na nogi w płaszczu grzewczym (rys. 3a, b) doprowadziło do wycieku czynnika grzewczego. Przykładowe pęknięcie przedstawiono na rysunku 5.

Spoina narożna (położona na brzegu ustawionych pod kątem prostym blach) jest miejscem, w którym



Rys. 5. Pęknięcie w spoinie narożnej wnęki płaszcza
Fig. 5. A fracture occurring in the corner weld in the cavity of the heating jacket



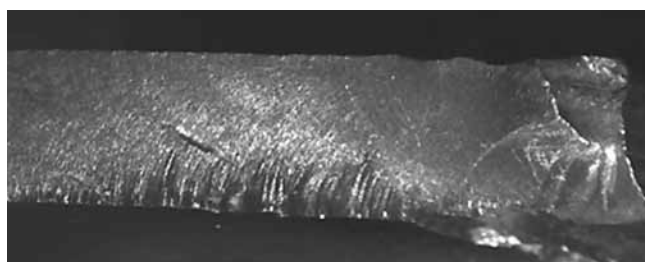
Rys. 6. Pęknięcie w nakładce wykonanej podczas naprawy nieuszczelnienia
Fig. 6. A crack in the overlay weld done during repair of the leaks

występuje szczególnie silne spiętrzenie naprężeń, sprzyjające inicjowaniu i rozwojowi pęknięcia jej środkiem. Podczas naprawy pęknięć płaszcz grzewczygo w niektórych wariantach wyeliminowano złącze ze spoiną narożną, zastępując je elementem giętym (nakładką na płaszcz – bez spoiny). Dalsza eksploatacja zbiornika po naprawie spowodowała pęknięcie przebiegające wzdłuż krawędzi gięcia nakładki, a więc w identycznym miejscu, w którym przed naprawą była spoina narożna (rys. 6). W tym przypadku pęknięcie przebiegało w materiale giętym (bez spoiny) po linii gięcia, co świadczy o tym, że pęknięcie powstaje niezależnie od obecności czy braku spoiny narożnej. Zmęczeniowy charakter zniszczenia wskazuje, że powodem pęknięcia są warunki eksploatacji, a nie jakość złącza spawanego.

Na rysunku 7 przedstawiono przykład powierzchni z pęknięciami stwierdzonymi w elementach konstrukcyjnych zbiornika. Charakter pęknięcia z liniami przestankowymi potwierdza jego zmęczeniowe podłoże. Spoiny szczipne lub niepełny przetop w spoinach narożnych działały jako koncentratory naprężeń, a więc miejsca, w których następowała inicjacja pęknięcia zmęczeniowego.

Linie pęknięcia na powierzchni przetomu płytki zaślepiającej określają kierunek pęknięcia (rys. 7). W tym przypadku układ prążków wskazuje, że źródłem pęknięcia były spoiny szczipne, a pęknięcie przemieszczało się promieniowo od nakrętki na zewnątrz płytki (rys. 8).

W realizowanej technologii spawania nóg zbiornika spoiny szczipne (4 na obwodzie nakrętki) pozostają nieprzetopione, gdyż właściwa spoina mocująca nakrętkę wykonana jest od strony zewnętrznej zaślepki. W przypadku występowania drgań eksploatacyjnych spoiny szczipne stają się szczególnie silnymi inicjatorami pęknięcia zmęczeniowego. Wskazane jest więc wykonywanie złącza nakrętki z pełnym przetopem lub przetopienie spoin szczipnych przez położenie spoiny na całym obwodzie przed zaślepieniem nogi.



Rys. 7. Widok powierzchni z pęknięciami zaślepki nogi zbiornika. Widoczne prążki wskazują na zmęczeniowy charakter pęknięcia
Fig. 7. View of surface cracks in the boiler feet cap. Visible bands indicate the fatigue cracking character



Rys. 8. Promieniowe pęknięcia od spoin szczipnych nakrętki
Fig. 8. Radial cracks in the weld of the nut

Podsumowanie

Spoiny narożne są powszechnie stosowane podczas łączenia elementów konstrukcyjnych płaszczy grzewczych przez producentów zbiorników procesowych. Mimo założonego konstrukcyjnie niepełnego przetopu, charakterystycznego dla tego rodzaju złączy, w typowych warunkach pracy nie stanowią one problemu eksploatacyjnego, ale w warunkach obciążeń dynamicznych stają się silnymi koncentratorami naprężeń i miejscem powstawania pęknięć.

Przeprowadzone badania i analizy wskazują, że pęknięcia elementów konstrukcyjnych mieszalnika mają charakter zmęczeniowy. Jako pierwsze ujawniły się pęknięcia wzdłuż spoin narożnych w wycięciach na nogi płaszcza grzewczego, które spowodowały wyciek czynnika grzewczego. Naprawa nieuszczelności przez odtworzenie złączy narożnych była skuteczna na krótki okres eksploatacji. Naprawa polegająca na wykonaniu nakładki formowanej metodą obróbki plastycznej okazała się tylko nieznacznie lepsza. Miejscem powstania pęknięć w nakładce była krawędź gięcia, gdzie w wyniku odkształcenia nastąpiło pogorszenie plastyczności. Pęknięcia rozwijały się dalej w materiale rodzimym poza strefą deformacji. Eksperyment potwierdził, że powtarzające się pęknięcie wywołane jest warunkami eksploatacji, a nie jakością złączy. Pęknięcia powstawały również w płytach zaślepiających nogi zbiornika, a zaczynały się w spoinach szczepnych ułożonych po stronie wewnętrznej nogi. W materiale płytki pęknięcie rozwijało się w różnych kierunkach w sposób charakterystyczny dla pęknięć zmęczeniowych, wykazując brak związku z kierunkiem walcowania blachy. W jednej z zaślepek proces pęknięcia doprowadził do całkowitego oddzielenia fragmentu płytki, co jest charakterystyczne dla zniszczenia wywołanego przez drgania. Powierzchnia przełomów wskazuje na zmęczeniowy charakter pęknięć.

Bardzo krótki okres eksploatacji zbiornika do momentu wystąpienia nieuszczelności oraz kolejne pęknięcia powstające mimo kilkakrotnych starannych napraw wskazują, że w mieszalniku podczas pracy występują drgania rezonansowe. Skutkiem drgań są liczne, różnokierunkowe pęknięcia w węzłach związanych z posadowieniem zbiornika (strefą mocowania nóg do zbiornika i strefą zetknięcia nóg z podłożem).

Zastosowane w mieszalniku rozwiązanie konstrukcyjne i technologiczne wydaje się być zrealizowane na poziomie jakości stosowanym w tego typu urządzeniach. Niedociągnięcia wytwórcze mogły być przyczyną nieuszczelności pierwotnej, lecz usunięte podczas naprawy gwarancyjnej powinny pozwolić na wieloletnią eksploatację zbiornika, o ile naprężenia powstające podczas pracy pod względem rodzaju i wartości byłoby zgodne z założonymi w projekcie.

Drgania rezonansowe, w które może wpadać zbiornik eksploatowany przy niewłaściwych parametrach, mogą być powodem szybkiego zniszczenia bardzo sztywnych, wytrzymałych i perfekcyjnie wykonanych

konstrukcji. W warunkach obciążeń dynamicznych złącza spawane są zawsze najsłabszym ogniwem pod względem zarówno ciągliwości, jak i podatności do propagowania pęknięć – w związku z tym są one narażone na zniszczenie w pierwszej kolejności.

Drgania elementów obrotowych przenoszą się na elementy konstrukcyjne zbiornika (płaszcz wewnętrzny i grzewczy oraz nogi) i prowadzą do pęknięć w miejscach, w których amplituda drgań jest największa, a przekrój najmniejszy.

Wnioski

Rozwiązanie konstrukcyjno-technologiczne mieszalnika odpowiada pod względem jakościowym wykonawstwa poziomowi stosowanemu w tego typu konstrukcjach.

Pęknięcie elementów konstrukcyjnych mieszalnika z plastycznej stali austenitycznej następowało w wyniku procesów zmęczeniowych.

Występowanie pęknięcia kruchego w materiale rodzimym w strefie gięcia i z dala od zmian wywołanych procesami cieplnymi czy odkształceniem plastycznym potwierdza zmęczeniowy charakter pęknięć.

Na zmęczeniowy mechanizm pęknięcia wskazuje charakterystyczna powierzchnia przełomów z obecnością prążków i linii przestankowych.

Sposób pęknięcia wskazuje na eksploatację zbiornika w warunkach generujących drgania rezonansowe.

Wskazane jest przeprowadzenie diagnostyki wibroakustycznej zbiornika podczas eksploatacji.

Literatura

- [1] Cempel C.: Wibroakustyka stosowana. Wydanie internetowe na podstawie Wyd. 2 zmien. Warszawa 1989, PWN. Rozdział 3.4 Wpływ hałasu i drgań na konstrukcje i maszyny.
- [2] Ferenc K.: Spawalnictwo. WNT, Warszawa 2007.
- [3] Ferenc K., Ferenc J.: Konstrukcje spawane, Projektowanie połączeń. WNT, Warszawa 2000.
- [4] Khemani H.: Vibration in machinery – their causes and identification. <http://www.brighthub.com/engineering/mechanical/articles/8079.aspx#ixzz1K0UiGCCz>
- [5] Dickey D.S.: Mechanical Design of Mixing Equipment Handbook of Industrial Mixing, John Wiley & Sons, . 2004.
- [6] Delaney K., Sutton C.: Dirty Dozen "Bad Actor" Mixing Problems: Part I PUMPS & SYSTEMS, 11/2003, s. 30-36.
- [7] Delaney K., Sutton C.: Dirty Dozen "Bad Actor" Mixing Problems: Part II PUMPS & SYSTEMS, 12/2003, s. 28-30.