

Andrzej Belzowski¹

Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Wydziałowy Zakład Wytrzymałości Materiałów, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław

ZBIORNIKI CHEMOODPORNE Z KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH - OCENA PORÓWNAWCZA PRZEPISÓW KRAJOWYCH I ZAGRANICZNYCH

Przedstawiono analizę porównawczą niektórych ogólnych koncepcji przyjętych w przepisach określających projektowanie i wytwarzanie kompozytowych zbiorników chemooodpornych używanych w przemyśle. Porównując dwie kolejne edycje przepisów krajowych z normami brytyjskimi, francuskimi i amerykańskimi, analizowano opis zabezpieczeń antykorozyjnych, dobór wartości współczynników bezpieczeństwa oraz zasady oceny nowych konstrukcji. Wykazano istotne niedostatki opisu budowy warstw ochronnych zawartego w normach polskich oraz przytoczono przykład ekspertyzy zniszczonego zbiornika, w którym wadliwe warstwy ochronne stanowiły główną przyczynę poważnej awarii (rys. rys. 1 i 2). Przytoczona analiza wartości współczynników bezpieczeństwa wykazała, że przepisy polskie sprzyjają konstruowaniu urządzeń mniej bezpiecznych w porównaniu do wszystkich analizowanych norm zagranicznych. Zasady oceny nowych konstrukcji określone w przepisach polskich nie przewidują statycznych niszczących prób nośności prototypów oraz prób trwałości zmęczeniowej, co jest wymagane w wielu normach zagranicznych. Przeprowadzona analiza wykazała, że w najnowszej edycji polskich przepisów opisujących kompozytowe zbiorniki chemooodporne pozostawiono bez większych zmian wiele rozwiązań już wcześniej sprzyjających większej awaryjności takich urządzeń. Opisany przykład awarii pokazuje możliwe konsekwencje stosowania nieprecyzyjnych i nadmiernie liberalnych przepisów oraz niedostatki wewnętrznej i zewnętrznej kontroli jakości takich urządzeń.

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, laminaty, zbiorniki chemooodporne

POLYMER COMPOSITE CORROSION-RESISTANT TANKS - COMPARATIVE EVALUATION OF POLISH AND FOREIGN DESIGN STANDARDS

A comparative analysis of some basic concepts adopted in standards for design and construction of large-size corrosion-resistant tanks has been presented. The last two editions of Polish standards were compared with the corresponding British, American and French counterparts, the principal attention being paid to anticorrosion coatings, safety factor determination and assessment of newly constructed structures. Significant shortcomings in all the named aspects were found in the Polish codes. The protective layers which are of prime importance in this type of structures are vaguely defined in the documents. A forensic study of a tank whose badly inadequate inner lining was a prime cause of the unrepairable failure (Figs 1, 2) has been presented. The analysis of the safety factor determination approach shows that Polish standards tend to be overly optimistic and thus the resulting designs are less safe than those specified by the foreign codes. For newly constructed tanks the Polish codes require no destructive tests of bearing capacity and no fatigue tests which is contrary to requirements set by many foreign specifications. The presented analysis proves that the last edition of the Polish codes leaves much of the shortcomings unamended. The quoted tank failure study shows in detail how imprecise and vague design standards combined with inadequate inspection policies lead to industrial disasters.

Key words: polymer-matrix composites, laminates, chemical-resistant tanks

WSTĘP

Już w latach 50. ubiegłego wieku wytwarzano w Stanach Zjednoczonych rury i przemysłową aparaturę chemooodporną z żywic poliestrowych wzmocnionych włóknem szklanym [1]. W 1963 roku zainstalowano pierwsze podziemne kompozytowe zbiorniki do paliw [2]. Normę do projektowania chemooodpornych zbiorników kompozytowych [3] opublikowano w USA w 1969 roku. W 1973 roku ukazała się pierwsza wersja znanej normy brytyjskiej BS 4994 [4], wyróżniającej się dobrym dostosowaniem do specyficznych cech kompozytów polimerowych. Doświadczenia na temat przebiegu eksploatacji instalacji chemooodpornych z kompozytów

polimerowych obejmują już okres 50-letni. Ich wymowa jest pozytywna, co potwierdza utrzymująca się tendencja takich zastosowań kompozytów.

Projektując instalacje chemooodporne z materiałów kompozytowych należy w szczególności uwzględnić:

- długotrwałe narażenie materiału na kontakt z substancjami żrącymi (stężone kwasy, zasady),
- stopniowy spadek wytrzymałości i modułów sprężystości, co jest cechą wszystkich laminatów,
- wymagany wysoki poziom niezawodności i bezpieczeństwa eksploatacji instalacji.

¹ dr inż.

Obowiązujące za granicą normy (brytyjskie, francuskie, amerykańskie), określające zasady konstruowania i wytwarzania urządzeń chemooodpornych z kompozytów, cechuje podobieństwo sposobów zapewnienia oczekiwanej trwałości i bezpieczeństwa eksploatacji. Polega to na:

- stosowaniu warstw ochronnych zabezpieczających warstwy nośne urządzenia (np. zbiornika) przed bezpośrednim kontaktem z substancjami znajdującymi się w instalacji [4-8] oraz chroniących konstrukcję przed czynnikami zewnętrznymi (np. promieniowaniem UV, zanieczyszczeniami itp.),
- przyjmowaniu relatywnie wysokich wartości współczynników bezpieczeństwa, wynoszących z reguły nie mniej niż 5-6 [5-8], a często 8 [4] lub jeszcze więcej,
- precyzyjnym określeniu wymagań odnoszących się do jakości wykonania powierzchni wewnętrznej mającej styczność z substancją znajdującą się w instalacji,
- ustaleniu jasnych procedur oceny (walidacji) nowych konstrukcji (badania prototypów itp.) oraz badań i prób odbiorczych egzemplarzy wytwarzanych seryjnie wg zatwierdzonego projektu.

Już w przepisach krajowych [9] wydanych w 1990 roku występowały istotne różnice w porównaniu do koncepcji przyjętych we wspomnianych normach zagranicznych [4-8]. W 2003 roku wydano w Polsce nowe przepisy konstruowania zbiorników ciśnieniowych z tworzyw sztucznych wzmocnionych włóknem szklanym [10]. Okazję do zapoznania się z nimi stworzyła ekspertyza [11] zbiornika do magazynowania kwasu, który uległ przedwczesnej awarii (rys. 1). Zbiornik zaprojektowano i wykonano w kraju.



Rys. 1. Pęknięcie o długości 1,8 m powstałe w dużym zbiorniku kompozytowym [11]

Fig. 1. The 1.8 m long crack in a large composite tank

Problem trwałości, niezawodności i bezpieczeństwa eksploatacji aparatury chemooodpornej zasługuje na podjęcie szerszej dyskusji, ponieważ wiele takich urządzeń od dawna pracuje w krajowym przemyśle, a jednocześnie tematyka ta jest prawie nieobecna w znanych czasopismach branżowych poruszających podobne zagad-

nienia (np. Dozór Techniczny oraz Gaz, Woda i Technika Sanitarna).

WARSTWY OCHRONNE

Zasadniczą cechą struktury laminatów stosowanych w budowie urządzeń chemooodpornych jest wewnętrzna warstwa ochronna, która zabezpiecza warstwy nośne przed kontaktem z substancjami znajdującymi się wewnątrz instalacji. Włókno szklane typu E stosowane do wzmocniania warstw nośnych nie jest dostatecznie odporne na działanie wielu substancji chemicznych (w szczególności kwasów i zasad) [12]. Dlatego warstwy przenoszące obciążenia mechaniczne muszą być chronione przed bezpośrednim kontaktem z medium znajdującym się w instalacji.

Kluczowe znaczenie warstw ochronnych dla zapewnienia trwałości urządzeń chemooodpornych potwierdzają badania rur poliestrowo-szklanych wypełnionych kwasem solnym opisane w [13]. Stosując stałe ciśnienie powodujące odkształcenie 1%, tj. 5-krotnie większe w porównaniu do wartości przyjmowanej w większości norm projektowych [4-10], stwierdzono, że:

- trwałość rur bez warstwy ochronnej wynosiła 200 minut,
- trwałość rur z popękaną warstwą ochronną wynosiła 30 minut,
- trwałość rur z ciągłą warstwą ochronną wynosiła 10^6 minut = 1,9 roku.

W publikacji [14] opisano badania rur poliestrowych wzmocnionych matą szklaną, które poddawano działaniu długotrwałego ciśnienia o stałej wartości. Rury bez warstw ochronnych były wypełnione kwasem solnym o stężeniu 0,6 mola (tj. kilkanaście razy mniejszym w porównaniu do znajdującego się w uszkodzonym zbiorniku). Po upływie dwóch lat materiał zachował tylko 1/3 wytrzymałości początkowej.

Przytoczone wyniki pokazują, jak duże znaczenie dla trwałości laminatów chemooodpornych mają warstwy ochronne oraz jak szybko może spadać wytrzymałość materiału pozbawionego skutecznej ochrony takich warstw. Na świecie stosuje się dwa rodzaje ochrony antykorozyjnej laminatów:

- a) Warstwa skrajna na powierzchni wewnętrznej utworzona z maty powierzchniowej z włókna szklanego typu C lub ECR* i żywicy - z reguły takiej samej jak żywica warstw nośnych. Gramatura tej maty jest nieduża i wynosi kilkadziesiąt (np. 30) g/m². Niekiedy stosuje się matę z włókna organicznego (np. poliestrowego). Grubość tej najbardziej skrajnej wewnę-

* W cytowanych normach [4-8] wymienia się włókno szklane chemooodporne typu C lub pisze ogólnie o włóknie cechującym się chemooodpornością. Niektórzy producenci wyrobów chemooodpornych (np. brytyjska firma GARLWAY oraz węgierska BUDAPLAST Plastics) podają, że stosują matę powierzchniową z włókna szklanego chemooodpornego typu ECR, ale ten typ włókna nie jest wymieniony w żadnej ze wspomnianych norm.

trzniej warstewki powinna wynosić około $0,25 \pm 0,5$ mm. Pod nią znajdują się warstwy „zaporowe” wzmocnione matą z ciętego włókna E (niekiedy ECR) o gramaturze 300 g/m^2 lub więcej, których zadaniem jest opóźnienie wnikania chemikaliów do wnętrza ścianki. Często podaje się, że łączna grubość tych trzech warstw tworzących zabezpieczenie zintegrowane z warstwami nośnymi powinna wynosić co najmniej 2,5 mm. W przypadku dużej agresywności chemicznej medium zaleca się zwiększenie grubości i odporności warstw ochronnych. Firma Dow Plastics Company zaleca następujące zabezpieczenie antykorozyjne zbiornika do kwasu solnego o stężeniu 33% z rozpuszczalnikami: dwie warstwy maty powierzchniowej z włókna szklanego C - w sumie o grubości do 0,8 mm oraz pod nimi warstwy zaporowe o łącznej grubości minimum 5 mm wzmocnione matą tzw. proszkową z ciętego włókna odpornego chemicznie (zapewne szklanego typu ECR). Sugeruje się wzmocnienie również warstw nośnych włóknem ECR. Zastąpienie włókna E przez droższe chemoodporne włókno ECR zwiększy koszt zbiornika, ale w instalacjach przemysłowych niezawodność i bezpieczeństwo muszą mieć znaczenie priorytetowe.

b) Warstwa skrajna wewnętrzna utworzona z tworzywa termoplastycznego (tj. wyłożenie wnętrza zbiornika wykładziną termoplastyczną). Wiele istotnych szczegółów dotyczących budowy takich zabezpieczeń można znaleźć pod adresem internetowym www.dual-laminate.org/html/dual_laminate_overview.html, gdzie ten typ struktury określa się terminem *dual laminate*. Taki typ zabezpieczenia antykorozyjnego określa się również jako *liner termoplastyczny*. Zbiorniki i rury zabezpieczone linerem termoplastycznym są trudniejsze do wykonania i droższe o $50 \div 600\%$ od konstrukcji z laminatów z zabezpieczeniem „zintegrowanym”, opisanym powyżej jako struktury typu **a** (czyli z warstwami skrajnymi wzmocnionymi matą powierzchniową z włókna chemoodpornego). Wyższy koszt struktur typu *dual laminate* zapewnia jednakże znacznie lepszą odporność na korozję.

W praktyce najczęściej wytwarza się warstwy ochronne typu **a**. Rozwiązanie takie jest opisane szczegółowo między innymi w zagranicznych normach: BS 4994 [4], NFT 57900 [5], ASME Boiler and Pressure Vessel Code - Section X [6], ASTM D3299 [7], ASTM D4097 [8]. Pomimo iż jest ono najszerzej stosowane w USA i Unii Europejskiej, w przepisach UDT wydanych w 1990 roku [9] rozwiązanie **a** nie było opisane, a w wydanych w 2003 roku [10] wspomina się o nim ogólnikowo, bez podawania istotnych szczegółów technicznych budowy warstwy ochronnej.

Rzadziej stosowane rozwiązanie **b** wymienia się w normach BS 4994 i NFT 57900 oraz w przepisach

UDT z 1990 i z 2003 roku. Niekiedy stosuje się równocześnie obydwaj typy warstw ochronnych.

Jedną z zasadniczych różnic przepisów UDT [9] w porównaniu do norm zagranicznych [4-8] polega na tym, że nie opisano w nich warstw ochronnych typu **a**, które są najpopularniejszym sposobem zabezpieczenia antykorozyjnego laminatów chemoodpornych. Równocześnie wiele wskazuje na to, że sposób ten był w kraju powszechnie stosowany, co musiało być zaakceptowane przez Dozór Techniczny.

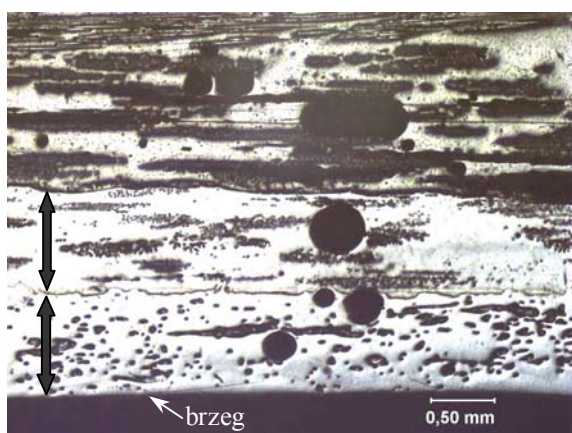
W dokumentach badanego uszkodzonego zbiornika nie było żadnej wzmianki o zastosowaniu w nim charakterystycznych materiałów używanych do wytwarzania warstw ochronnych, takich jak mata powierzchniowa z włókna szklanego C lub ECR oraz wykładziny termoplastyczne (np. PVC, PE, PP). Przebieg eksploatacji zbiornika, oględziny uszkodzeń oraz badania mikroskopowe materiału próbek wyciętych z okolicy głównego pęknięcia potwierdziły dokonanie naprawy polegającej na wytworzeniu warstw ochronnych. Ujawniają to widoczne na rysunku 2 wyraźne granice dwóch warstewek tworzących warstwę ochronną wykonaną podczas dokonanej naprawy (zaznaczone grubymi strzałkami). Naprawa wykonana po roku pracy urządzenia nie zapobiegła awarii, która wystąpiła po kolejnych dwóch latach użytkowania. Nie jest to zaskakujące, ponieważ kilkanaście miesięcy pracy bez właściwego zabezpieczenia antykorozyjnego w obecności medium o wysokiej agresywności (35% HCL z dodatkami rozpuszczalników) musiało spowodować nieodwracalne zmiany degradacyjne warstw nośnych. Z rysunku 2 wynika, że grubość wytworzonej podczas naprawy warstwy ochronnej wynosiła tylko około 1,5 mm wobec minimum 2,5 mm wymaganych w normach [4-8]. Według cytowanych zaleceń Dow Plastics Company, kwas solny o podobnym stężeniu wymaga warstw ochronnych o grubości 5-6 mm oraz zwiększonego stosowania w materiale włókien chemoodpornych typu C i ECR.

Mniejsza w kraju dostępność informacji o technicznych szczegółach zabezpieczeń antykorozyjnych laminatów chemoodpornych nakłada się na ogólnikowe potraktowanie tego zagadnienia w obowiązujących przepisach UDT [9, 10]. W tej sytuacji nasuwają się pytania:

1. Czy wobec widocznego niedostatku przepisów krajowych określono inne (lepsze) wytyczne dla inspektorów sprawujących dozór techniczny instalacji z laminatów chemoodpornych?
2. Jakich standardów muszą przestrzegać wytwórcy aparatury chemoodpornej? Czy ogólne zasady etyki inżynierskiej zobowiązujące ich do wytwarzania urządzeń potencjalnie niebezpiecznych zgodnie ze sprawdzonymi standardami przyjętymi w innych krajach można uznać za wystarczające?

Uwzględniając rok wydania (2003) najnowszych przepisów UDT [10] odpowiedź na pierwsze pytanie nie jest optymistyczna. Odpowiedź na pytanie 2 wymaga re-

fleksji nad ogólnym poziomem rozwoju inżynierii kompozytów polimerowych w Polsce, który w ostatnich kilkunastu latach doznał wielu zakłóceń związanych z finansowaniem prac badawczych, zmianami w systemie kształcenia inżynierów, osłabieniem więzi uczelni z przemysłem itd. Szansa na to, że opisane w przepisach bardzo ogólnie droższe rozwiązania zwiększające trwałość i bezpieczeństwo instalacji zostaną przez wszystkich producentów potraktowane z należytą powagą, jest niewielka. Dodatkowym utrudnieniem jest zdominowanie przetargów przez kryterium cenowe. Dlatego podany w przepisach [9, 10] nieprecyzyjny opis warstw ochronnych laminatów chemooodpornych sprzyja obniżeniu jakości instalacji przemysłowych i może rzutować niekorzystnie na awaryjność takich urządzeń.



Rys. 2. Struktura laminatu badanego zbiornika przy powierzchni wewnętrznej

Fig. 2. Microstructure of the tank wall material near the inner side

WSPÓŁCZYNNIKI BEZPIECZEŃSTWA

Warunkiem chemooodporności laminatu jest ograniczenie infiltracji medium chemicznego znajdującego się w instalacji do wnętrza ścianki, gdzie występują wysokowytrzymałe, ale mało odporne na działanie kwasów i zasad włókna szklane E. Zadanie to spełniają warstwy ochronne, od których ciągłości i szczelności zależy długotrwałe, niezawodne użytkowanie instalacji chemooodpornych.

Wyróżnia się dwa rodzaje wnikania płynów do wnętrza laminatu:

- osmotyczne - uwarunkowane przez strukturę molekularną polimeru tworzącego osnowę laminatu,
- kapilarne - przez nieciągłości warstwy ochronnej i laminatu (pęknięcia, pory). Ten rodzaj infiltracji jest o rząd wielkości szybszy od wnikania przez tworzywo nieuszkodzone.

Infiltracji przez nieciągłości materiału zapobiega się:

- zapewniając odpowiednią jakość warstw ochronnych, tj. ich ciągłość i grubość oraz trwałość,

- eksploatując materiał poniżej progu powstawanie mikropęknięć,
- zabezpieczając instalację przed uderzeniami, które mogłyby uszkodzić warstwę ochronną.

Istotę koncepcji eksploataowania materiału poniżej progu powstawania mikropęknięć opisał Eckold [15-17]. Przyjmuje się, że w laminatach chemooodpornych o wzmocnieniu utworzonym z mat, tkanin rovingowych lub warstw nawijanych jednokierunkowo, uszkodzeniem niebezpiecznym jest pęknięcie poprzeczne warstwy naruszające ciągłość ścianki w kierunku grubości na głębokość około 0,1÷0,5 mm.

Piętą achillesową kompozytów polimerowych jest ich podatność na wczesne powstawanie mikropęknięć podczas rozciągania w kierunku niekorzystnym (np. prostopadłym) w stosunku do włókien [18]. W konstrukcjach wzmocnionych matą, tkaniną, rovingiem ułożonym jednokierunkowo itp. z reguły zawsze występują takie miejsca, w których materiał jest rozciągany poprzecznie do włókien. Ten trudny do wyeliminowania przypadek stanowi „słabe ogniwo”, determinujące wartości dopuszczalnych odkształceń i naprężeń. Przyjmuje się, że w laminatach poliestrowo-szklanych i winylestrowo-szklanych pęknięcia poprzeczne pojawiają się przy odkształceniu liniowym wynoszącym co najmniej 0,3%. Zakładając współczynnik bezpieczeństwa $X_{th} = 1,5^{**}$ względem tak zdefiniowanego progu uszkodzenia materiału określono, że wartość odkształcenia dopuszczalnego powinna wynosić 0,2% [15]. Jest to 7÷10 razy mniej od odkształcenia niszczącego typowych laminatów chemooodpornych. Dlatego dla zapobieżenia powstaniu w materiale mikropęknięć w całym okresie eksploatacji (wg Eckolda [16, 17] powinien on wynosić 20 lat) w aparaturze chemooodpornej przyjmuje się relatywnie wysokie wartości współczynników bezpieczeństwa.

Jeden ze sposobów ustalania danych materiałowych do projektowania przyjęty w normie BS 4994 [4] określa minimalną wartość globalnego współczynnika bezpieczeństwa $X = 8$. We wcześniejszej wersji tej normy wydanej w 1973 roku przyjęto $X = 6$. W nowszej edycji BS 4994 podano informację, że zwiększenie minimalnej wartości współczynnika X z 6 do 8 wyeliminowało zdarzające się wcześniej przypadki korozji naprężeniowej. W uzasadnionych przypadkach wartości X mogą być bardzo wysokie - opublikowano opisy urządzeń zaprojektowanych wg BS 4994 ze współczynnikami bezpieczeństwa wynoszącymi 15÷30 (!).

W ostatnich latach często analizuje się amerykańską normę „ASME RTP-1 Reinforced thermoset plastic corrosion resistant equipment, 1992”. Według Eckolda [16], przyjęte tam odkształcenie dopuszczalne w kierunku obwodowym powłoki walcowej wynosi 0,1%, co od-

** Symbol X użyty zgodnie z [9, 10]. Wskaźnik th użyty do określania wartości progowej (od *threshold*).

powiada odkształceniowemu współczynnikowi bezpieczeństwa $X \approx 10 \div 20$. Dla kierunku osiowego powłoki przyjęto tam natomiast stały współczynnik naprężeniowy $X = 10$.

W cytowanej normie francuskiej [5] przyjęto wartość minimalną współczynnika bezpieczeństwa $X = 6$, a w normach amerykańskich [7, 8] - wartości podobne do określonych w ASME RTP-1.

W przepisach krajowych [9] podano przedział wartości $4 \leq X \leq 10$. W najnowszej wersji przepisów [10] ograniczenie od dołu utrzymano ($4 \leq X$). Górna granica wartości X nie jest określona w [10], ale podane reguły są podobne do wcześniejszych [9]. W stosunku do norm zagranicznych [4-8] różnice zalecanych w [10] wartości X są oczywiste. Wydaje się, że może to prowadzić do projektowania w kraju urządzeń chemoodpornych o obniżonej niezawodności i mniejszym bezpieczeństwie eksploatacji. Przyczyny przyjmowania w normach zagranicznych dużych współczynników bezpieczeństwa są złożone. Obok podatności laminatów na wczesne powstawanie mikropeęknięć oraz występowania w tych materiałach spadków wartości wytrzymałości i modułów sprężystości, należy jeszcze wymienić możliwość znacznych różnic wyników obliczeń wytrzymałościowych i badań eksperymentalnych. Interesujące dane uświadamiające uzyskiwaną w praktyce zgodność wyników obliczeń i prób wytrzymałości podano w publikacjach [19, 20].

PROTOTYPY I ZBIORNIKI WYTWARZANE SERYJNIE

Cytowane normy zagraniczne [4-8] można podzielić na dwie grupy:

- Obszerne opracowania [4-6] (≥ 100 stron), zawierające opisy różnych konstrukcji zbiorników. Wyróżnia się w nich fazę projektowania i walidacji nowej konstrukcji. Polega to na badaniach prototypów potwierdzających słuszność obliczeń i wyboru technologii. Według normy francuskiej [5], badanie nowej konstrukcji zbiornika otwartego polega na dokonaniu 10 napełnień i szybkich opróżnień prototypu. Ostatnie napełnienie utrzymuje się przez 1000 godzin. Następnie przeprowadza się próbę, w której ciśnienie w najniższym punkcie musi przekroczyć trzykrotnie ciśnienie eksploatacyjne. Nie mniej wymagająca jest norma brytyjska [4], według której dla oceny konstrukcji zbiorników ciśnieniowych należy przeprowadzić próbę ciśnieniową (statyczną) prototypu z osiągnięciem 6-krotnego przekroczenia ciśnienia użytkowego oraz ewentualnie próbę zmęczeniową z wykazaniem 10-krotnego przekroczenia liczby cykli ciśnienia przewidzianych w okresie eksploatacji. Ponadto we wszystkich normach [4-10] przewiduje się próby odbiorcze wyprodukowanych zbiorników - próbę napełnienia

zbiorników otwartych i próbę ciśnieniową (np. z 1,3-krotnym przeciążeniem) zbiorników zamkniętych.

- Krótkie, kilkustronicowe normy [7, 8], określające metodę projektowania danego typu zbiorników wykonywanych przy zastosowaniu określonej technologii. W tych opracowaniach nie wymaga się walidacji nowych konstrukcji. Wynika z tego, iż podane tam zasady projektowania i kontroli uznaje się za wystarczające do uzyskania wymaganej niezawodności urządzeń chemoodpornych.

W polskich przepisach [9, 10] nie przewiduje się badań prototypów, co niewątpliwie obniża koszty i ułatwia produkcję nowych urządzeń chemoodpornych. Realizacja 10^5 cykli ciśnienia (co jest wymagane wg [5, 6]) w zbiorniku o objętości kilku metrów sześciennych byłaby kosztowna i trudna technicznie. Ponadto przypuszczalnie w Polsce nie ma laboratorium dysponującego sprzętem do takich prób. Próby prototypów służące do określenia rzeczywistej nośności statycznej lub trwałości zmęczeniowej konstrukcji są najlepszym sposobem wykrywania wad projektu, co ma kluczowe znaczenie dla niezawodności urządzeń.

PODSUMOWANIE

Wiele instalacji chemoodpornych używanych w przemyśle może stworzyć duże zagrożenie dla otoczenia. Znany przypadek awarii instalacji przemysłowej (stalowej) w Indiach spowodował tysiące ofiar. W wielu zakładach w Polsce eksploatuje się zbiorniki kompozytowe zawierające dziesiątki, a niekiedy nawet setki ton toksycznych i żrących substancji chemicznych. W badanym przez autora zbiorniku znajdowało się kilkadziesiąt ton stężonego kwasu solnego. Stwierdzono między innymi:

- zmniejszenie grubości ścianki powodujące 2,6-krotny wzrost naprężeń zginających obwodowych,
- wadliwe warstwy ochronne, rażąco odbiegające od standardów opisanych w normach [4-8],
- zamianę zalecanej żywicy na inną, bez rzetelnego porównania własności obydwu materiałów.

Główną przyczyną awarii zbiornika była niska jakość jego wykonania, co nie zostało wychwycone przez kontrolę wewnętrzną i zewnętrzną. Jest to szczególnie niepokojące w konstrukcji podlegającej dozorowi. Największy wpływ na przebieg wydarzeń miało wadliwe zabezpieczenie antykorozyjne (szczególnie jego brak w początkowym okresie eksploatacji). Oceniając zabezpieczenie antykorozyjne zbiornika, z powodu luk w przepisach krajowych [9] oraz ich lakoniczności [10], trzeba było korzystać z norm zagranicznych, w których jasny opis tego zagadnienia z reguły zajmuje kilkanaście wierszy tekstu. Niewątpliwie lakoniczność przepisów [9, 10] w ich części odnoszącej się do budowy warstw ochronnych sprzyja lekceważeniu tego zagadnienia, ma-

jącego kluczowe znaczenie dla niezawodności i trwałości urządzeń chemooodpornych. Mniejsze współczynniki bezpieczeństwa zalecane w normach krajowych oraz różnice procedur oceny nowych konstrukcji mogą obniżać niezawodność zbiorników chemooodpornych konstruowanych w Polsce wg przepisów [9, 10], ale w przypadku analizowanej awarii [11] nie miało to decydującego znaczenia.

LITERATURA

- [1] Mallinson J.H., Chemical plant design with reinforced plastics, Mc Graw Hill, 1969.
- [2] Bogner B., Survey of long term durability of fiberglass reinforced plastics tanks and pipes, Reinforced plastics durability, Woodhead Pub. 1999, 267-281.
- [3] NBS Voluntary Standard PS 15-69, Custom Contact-molded Reinforced Polyester Chemical-resistant Process equipment, US Department of Commerce, 1969.
- [4] BS 4994 Specification for design and construction of vessels and tanks in reinforced plastics, 1987.
- [5] NFT 57900 Réservoirs et appareils en matières plastiques renforcées, 1987.
- [6] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section X, Fiber-Reinforced Plastic Pressure Vessel 1992.
- [7] ASTM D3299 Standard Specification for Filament-Wound Glass-Fiber-Reinforced Thermoset Resin Corrosion-Resistant Tanks, 1995.
- [8] ASTM D4097 Specification for Contact-Molded Glass-Fiber-Reinforced Thermoset Resin Corrosion-Resistant Tanks, 1995.
- [9] URZĄD DOZORU TECHNICZNEGO, Warunki techniczne dozoru technicznego. Stałe zbiorniki ciśnieniowe z tworzyw sztucznych, DT-UC-90/ZT, 1990.
- [10] URZĄD DOZORU TECHNICZNEGO, Warunki Urzędu Dozoru Technicznego. Urządzenia ciśnieniowe. Stałe zbiorniki ciśnieniowe z tworzyw sztucznych wzmocnionych włókniem szklanym, WUDT-UC-UTS/01, 2003.
- [11] Bełzowski A., Badanie uszkodzeń zbiornika z laminatu wzmocnionego włókniem szklanym, Politechnika Wroclawska, W10/Z01, Raport SPR, nr 9, 2004.
- [12] Królikowski W., Kłosowska-Wołkowicz Z., Penczek P., Żywice i laminaty poliestrowe, WNT, Warszawa 1986.
- [13] Quinn J.A., Composites - Design Manual, 3rd ed., James Quinn Associates Ltd, 2002.
- [14] Gatward C.H., Hogg P.J., Hull D., Proce J.N., Stress Corrosion of Chopped Strand Pipe, COMPOSITE STRUCTURES 3, Elsevier, 1985, 717-732.
- [15] Eckold G.C., A design method for filament wound GRP pressure vessels and pipework, Composites 1985, 16, 1, 41-47.
- [16] Eckold G.C., Failure criteria for use in the design environment, Composites Science and Technology 1998, 58, 1095-1105.
- [17] Eckold G.C., Failure criteria for use in the design environment, Composites Science and Technology 2002, 62, 1561-1570.
- [18] Bełzowski A., O praktycznych aspektach badań nad kinetyką rozwoju pęknięć poprzecznych w kompozytach warstwowych, I Konf. Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne, Kozubnik 95, SIMP, Gliwice 1995, 95-101.
- [19] Kitching R., Mayer P., Failure of GRP pipe under out-of plane flexure with and without pressure, Proc. Instn. Mech. Eng., Vol. 207, Part E, J. of Process Mech. Eng. 1993, 133-141.
- [20] Soden P.D., Kaddour A.S., Hinton M.J., Recommendations for designers and researchers resulting from the worldwide failure exercise, Composites Science and Technology 2004, 64, 589-604.

Recenzent
Zbigniew Rosłaniec