

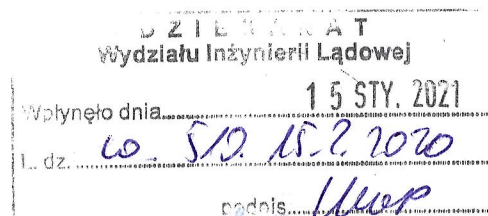
RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Janusza Siuduta

pt. „Prognoza trwałości skorodowanego płaszcza stalowego zbiornika na paliwa płynne”

opracowana na zlecenie Dziekana Inżynierii Lądowej

Politechniki Krakowskiej dr hab. inż. Andrzej Szarata, prof. PK z dnia 27.10.2020 r.



1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

1.1. Ocena tematyki rozprawy

Stalowe zbiorniki na płynne paliwa, szczególnie ropopochodne, stanowią dużą grupę obiektów budowlanych, które mają szczególne znaczenie dla gospodarki i bezpieczeństwa energetycznego większości krajów. Zapewnienie bezpiecznej eksploatacji zbiorników na materiały ropopochodne ma szczególne więc znaczenie, gdyż ich uszkodzenia mogą powodować nie tylko bardzo duże konsekwencje ekonomiczne ale również zagrożenie życia ludzkiego.

Zakładana w projekcie trwałość eksploatacyjna stalowego, walcowego zbiornika o osi pionowej wynosi wg obecnych uregulowań na ogół 50 lat i jej zapewnienie zależy w dużym stopniu od jakości wykonywanych kontroli w stadium projektowania, wykonania i utrzymania zbiornika. Szczególne znaczenie ma w tym przypadku okresowa (na ogół coroczna) kontrola stanu technicznego zbiornika podczas kilkudziesięciu lat eksploatacji, której wykonawcy mają różne doświadczenia zawodowe i dość często się zmieniają. Prognozowana na początku eksploatacji trwałość zbiornika zależy również od sposobu użytkowania (rodzaj paliwa, częstotliwość napełniania i opróżniania), wykonywania renowacji powłok po stronie zewnętrznej oraz od postępu osiadania podłoża gruntowego pod dnem zbiornika.

Podstawowym parametrem w ocenie stopnia zużycia eksploatacyjnego stalowego zbiornika na paliwa płynne jest wartość ubytków korozyjnych blach, szczególnie w płaszczy zbiornika. W praktyce projektowej i eksploatacyjnej przyjmuje się powszechnie linową funkcję zmniejszania się grubości blach w czasie eksploatacji, wynikającą z procesów korozyjnych, głównie od strony wewnętrznej zbiornika. Na ogół przyjmuje się także niezmienną wartość wytrzymałości stali blach zbiornika przez cały okres eksploatacji.

Wykonywane po wielu latach eksploatacji bezpośrednie pomiary ubytków korozyjnych wykazują, że w wielu zbiornikach intensywność procesu korozji jest inna niż zakładano w projekcie. W takiej, nieprzewidzianej lub nawet zgodnej z pierwotnymi założeniami, sytuacji użytkownik zbiornika chce znać prognozę odnośnie pozostającego jeszcze czasu bezpiecznej eksploatacji zbiornika. Aby to zadanie zrealizować potrzebny jest odpowiedni model probabilistyczny, w którym uwzględniona zostanie aktualny i prognozowany postęp korozji oraz stowarzyszona z tym procesem redukcja wytrzymałości i wzrost kruchości stali blach zbiornika. Brak jest, jak dotychczas, takich wiarygodnych i kompleksowych modeli, choć pojawiają się różne częściowe rozwiązania tego zagadnienia. Doktorant podjął dość udaną próbę opracowania modelu probabilistycznego, służącego do dość wiarygodnej predykcji trwałości korozyjnej zbiorników, w tym tych, które były przez niego badane.

Uwzględniając powyższe uwagi należy stwierdzić, że tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej jest aktualna z poznawczego i praktycznego punktu widzenia, a podjęcie tego trudnego tematu przez doktoranta zasługuje na uznanie.

1.2. Charakterystyka zawartości rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska ma charakter teoretyczno-doświadczalny. Jej głównym celem jest opracowanie probabilistycznego modelu do wiarygodnego prognozowania trwałości eksploatowanych zbiorników walcowych o osi pionowej z uwagi na stwierdzone ubytki korozyjne blach ich płaszczy oraz kalibracja parametrów tego modelu na podstawie wyników zebranych przez doktoranta pomiarów inwentaryzacyjnych wybranych zbiorników.

Rozprawa zawiera również inne analizy studialne związane z ogólnie rozumianą trwałością eksploatacyjną stalowych zbiorników na paliwa, w tym stosowaniem różnych rodzajów zabezpieczeń antykorozyjnych, pracami remontowymi i modernizacyjnymi oraz badaniem właściwości skorodowanych blach stalowych w zbiornikach. Trzeba je jednak traktować jedynie jako analizę stanu wiedzy w dziedzinie trwałości zbiorników, gdyż przedstawione wyniki nie są bezpośrednio wykorzystywane w zbudowanym modelu do prognozowania zdatności użytkowej eksploatowanych zbiorników, który to model jest przedstawiony jako podstawowe zadanie naukowe rozprawy.

Rozprawa doktorska, przedstawiona jest w formie rękopisu zawierającego łącznie 131 stron i zamieszczono w niej 77 rysunków, 15 tablic, 130 numerowanych wzorów oraz 89 pozycji bibliograficznych, a także wykaz 34 norm i wytycznych projektowania. Dwie pozycje bibliograficzne są materiałami technicznymi (projekt z 1970 roku oraz ekspertyza z 2001 r.). Szkoda, że doktorant nie zauważył w swoim przeglądzie literatury ważnej pozycji naukowej: Biegus A. *Probabilistyczna analiza konstrukcji stalowych*, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa-Wrocław 1999.

Rozprawa podzielona jest na 14 rozdziałów o bardzo zróżnicowanym ciężarze gatunkowym, a mianowicie:

- wprowadzenie, w którym zawarto również tezę i zakres pracy,
- korozja stali w naziemnych zbiornikach wykorzystywanych do magazynowania ropopochodnych paliw płynnych,
- monitorowanie i kontrola postępu korozji w naziemnych zbiornikach paliwowych,
- podwyższanie odporności korozyjnej użytkowanego stalowego zbiornika paliwowego metodą laminowania – możliwości i ograniczenia,
- modernizacja skorodowanego dna użytkowanego zbiornika paliwowego,
- dostosowanie użytkowanego zbiornika stalowego z dachem pływającym do magazynowania paliwa lotniczego typu JET,
- awaryjna wymiana zdegradowanych przez korozję pasów płaszcza użytkowanego zbiornika paliwowego,
- autorskie badania zmian właściwości stali w skorodowanych blachach płaszczy wybranych zbiorników paliwowych,
- wyniki pomiarów grubości skorodowanych powłok płaszcza na wybranych zbiornikach paliwowych,
- numeryczna prognoza trwałości osłabionej korozyjnie stalowej powłoki płaszcza użytkowanego zbiornika paliwowego,
- probabilistyczna weryfikacja warunku bezpieczeństwa skorodowanej blachy płaszcza użytkowanego zbiornika paliwowego,
- szacowanie pozostałego czasu zdatności skorodowanego pasa płaszcza użytkowanego zbiornika stalowego,
- prognoza trwałości skorodowanego pasa płaszcza stalowego zbiornika paliwowego – przykład obliczeniowy,
- podsumowanie i wnioski końcowe wraz z kierunkami dalszych badań

oraz nienumerowane części:

- literatura,
- normy i rozporządzenia,
- streszczenie w języku polskim,
- streszczenie w języku angielskim.

Układ rozprawy doktorskiej jest dość jasny i czytelny, choć uważam się, że powinien w niej znaleźć się rozdział, w którym zaprezentowany byłby syntetyczny opis aktualnego stanu wiedzy, dotyczącej bezpośrednio rozwiązywanego zagadnienia naukowego. Doktorant korzysta z obszernej literatury naukowej i technicznej w różnych częściach swojej rozprawy i poddaje analizom wyniki w niej zawarte. Jednak krótkie podsumowanie aktualnego stanu wiedzy i jej braków, z których wynikało podjęcie przez doktoranta próby rozwiązania konkretnego i oryginalnego zadania naukowego, zwiększyłoby wyrażnie wartość rozprawy. Podejmowanie każdego nowego zadania naukowego wynika przecież z niedostatków wiedzy i potrzeby jej rozwijania.

W części wstępnej pracy (str. 7, 8) doktorant prezentuje swoje duże osiągnięcia zawodowe i przebieg pracy zawodowej oraz rolę kierowniczą w bazie paliwowej, co niewątpliwie podnosi wiarygodność jego uwag w zakresie sposobów utrzymania zbiorników paliwowych w należytych stanie technicznym, ale nie jest to przyjęta praktyka w pracach naukowych, do których należą także rozprawy doktorskie.

Strona graficzna pracy jest na dość dobrym poziomie, choć autor nie ustrzegł się pewnych błędów i nieścisłości o różnym ciężarze gatunkowym, które będą omówione w dalszej części recenzji.

2. Merytoryczna ocena wartości rozprawy doktorskiej

2.1. Przedmiot, cel i zakres rozprawy

We wstępnej części pracy (rozdział 1) zaprezentowane jest ogólnie zadanie naukowe, którego rozwiązania podjął się doktorant. Jest nim mianowicie potrzeba opracowania oryginalnej i efektywnej procedury analizy pozostającego czasu zdatności eksploatowanych już od pewnego czasu stalowych zbiorników na paliwa płynne, głównie ropopochodne. Zawarte w tezie rozprawy sformułowanie, iż wyniki pojedynczej ocena stanu technicznego zbiornika, nawet po ich opracowaniu statystycznym nie dają podstawy do wiarygodnego prognozowania pozostałego czasu zdatności zbiornika prowadzi doktoranta do stwierdzenia, że niezbędna jest w takim przypadku prognoza o charakterze oceny probabilistycznej. Teza, zapisana w p. 1.2 rozprawy, jest skrótowym opisem zadania naukowego, rozwiązywanego w rozprawie. Zakres rozprawy wynika z postawionego celu, którym jest zbudowanie wiarygodnego modelu probabilistycznego do oceny czasu zdatności eksploatowanych zbiorników stalowych na paliwa płynne.

Przedmiotem pierwszych części rozprawy (rozdział 2, 3, 4, 5, 6, 7) są zagadnienia związane z procesami korozyjnymi w stalowych zbiornikach na paliwa płynne, metodami monitorowania postępu korozji i związanej z tymi metodami oceny wartości ubytków korozyjnych. Zawarte są też tam prezentacje zagadnień technicznych, dotyczących zabezpieczeń zbiorników przed korozją metodą laminowania oraz przykład naprawy zużytego korozyjnie dna zbiornika, w tym także przykład przebudowy zbiornika z dachem pływającym. Jest to bardzo interesująca część rozprawy głównie w aspekcie praktycznym, a nieco mniej w zakresie naukowym, choć może być inspiracją dla kolejnych prac badawczych. Przytoczone są tam przepisy dotyczące różnego rodzaju specjalistycznych badań technicznych, którym podlegają stalowe zbiorniki podczas ich wytwarzania i odbiorów technicznych. Przykłady uszkodzeń laminowanych powłok antykorozyjnych w zbiornikach stalowych i analiza ich przyczyn zawarte w rozdz. 4 są cennymi informacjami praktycznymi dla projektantów i użytkowników takich zbiorników. Równie interesujący materiałem technicznym jest przykład modernizacji skorodowanego dna zbiornika (rozdz. 5), przebudowy zbiornika z dachem pływającym (rozdz. 6) oraz wymiany części zużytego korozyjnie płaszcza zbiornika (rozdz. 6).

W dalszej części rozprawy zawarte są wyniki badań zmian własności wytrzymałościowych stali w skorodowanych blachach 3 zbiorników, które doktorant nazywa „autorskimi”. Zaprezentowane w rozdz. 8 wyniki badań wytrzymałościowych są opublikowane w numerze 3/2007 czasopisma Inżynieria i Budownictwo przez trzech współautorów, z których pierwszym jest promotor rozprawy, drugim jest doktorant a trzecim M. Stankiewicz. Być może doktorant miał znaczący udział w tych badaniach ale nie powinien ich nazywać autorskimi bez stosownych oświadczeń współautorów. Wyniki tych badań stanowią ważne, kolejne potwierdzenie zjawiska zmniejszania się wytrzymałości stali i jej udatności wskutek procesów korozyjnych (szczególnie korozji wżerowej), które w zbiornikach na paliwa są nieuniknione.

W rozdziale 9 doktorant przedstawia wyniki pomiarów grubości blach 4 eksploatowanych zbiorników, w tym blach płaszczy, których ubytki grubości determinują pozostały czas zdadności zbiorników do dalszej eksploatacji. Krzywe postępu korozji blach płaszczy badanych przez doktora zbiorników oraz histogramy zmienności losowej tych grubości są podstawowymi parametrami, które mogą być wykorzystane w probabilistycznym modelu oceny pozostającego czasu zdadności eksploatowanych zbiorników stalowych na paliwa płynne. Jest to ważny element ocenianej dysertacji naukowej.

Numeryczna prognoza trwałości osłabionej korozyjnie stalowej powłoki walcowej płaszcza zbiornika paliwowego, zawarta w rozdz. 10, jest interesującą próbą analiz jego nośności obwodowej przy rozciąganiu (stan LS1 wg PN-EN 1993-1-6) z uwzględnieniem zinventaryzowanych szczegółowo imperfekcji geometrycznych. Zastosowano tam analizy liniowe (LA) oraz geometrycznie nieliniowe (GNA) i na ich podstawie przedstawiono wartości naprężeń zastępczych, uwzględniając prognozowane liniowo ubytki korozyjne po 10 i 20 latach eksploatacji od momentu wykonania szczegółowej inwentaryzacji geometrii i grubości blach płaszcza. Rozdział ten składa się z obszernych fragmentów współautorskiej publikacji z roku 2016/2017.: Maślak M., Pazdanowski M., Siudut J., Tarsa K. *Corrosion durability estimation for steel shell of a tank used to store liquid fuels*. *Procedia Engineering* 172 (2017) 723 – 730. Niestety do ocenianej rozprawy doktorskiej nie zostały dołączone oświadczenia współautorów, które mogłyby pozwolić na wyodrębnienie tej części publikacji, która jest samodzielnym dziełem doktoranta. W związku z taką sytuacją rozdział 10 nie jest oceniany jako samodzielny element rozprawy doktorskiej lecz traktowany jest przez recenzenta jako przegląd dotychczasowego stanu wiedzy.

Zasadnicze i oryginalne elementy rozprawy są zawarte w rozdziałach 11, 12 i 13 i są to zagadnienia dotyczące losowej nośności i losowych obciążeń blach płaszcza oraz propozycja w pełni probabilistycznego sposobu oceny osłabionego przez korozję płaszcza zbiornika. Efektem końcowym prowadzonych analiz jest opracowanie probabilistycznego modelu szacowania pozostałego czasu zdadności do eksploatacji skorodowanego pasa płaszcza użytkowanego zbiornika paliwowego, który to model został wykorzystany z powodzeniem do prognozy trwałości jednego z badanych zbiorników. Ocena tej części rozprawy zawarta jest w p. 2.2.

Zakres rozprawy dostosowany jest do jej celu, choć początkowe jej fragmenty są słabo powiązane z tym celem. Zawarto tam sporo informacji czysto technicznych, które są bardzo ważne dla praktyki projektowej i eksploatacji zbiorników i mogły być podstawą do opracowania bardzo potrzebnej na rynku publikacji książkowej dotyczącej projektowania, wykonania, odbiorów i utrzymania stalowych zbiorników na paliwa płynne.

Całość rozprawy zamyka podsumowanie i wnioski końcowe wraz z prezentacją zagadnień, które wymagają dalszych badań.

2.2. Ocena realizacji podstawowego zadania naukowego rozprawy doktorskiej

W rozdziale 11 doktorant podjął udaną próbę probabilistycznej weryfikacji warunku bezpieczeństwa eksploatacji skorodowanej blachy płaszcza użytkowanego zbiornika stalowego. Zastosował w pełni probabilistyczne podejście uwzględniające losową nośność badanej blachy walcowego płaszcza zbiornika z warunku zniszczenia plastycznego przy rozciąganiu obwodowym oraz losowe obciążenie obwodowe płaszcza, zakładając przy tym błonowy stan naprężeń w walcowej powłoce płaszcza. Akceptowalne prawdopodobieństwo zawodu (awarii) płaszcza zbiornika wyznaczane jest z uwzględnieniem losowej grubości skorodowanych blach oraz losowej granicy plastyczności stali. W praktyce projektowej uwzględnia się losowe wartości grubości blach płaszczy i wytrzymałości obliczeniowe stali ale ich miarodajne wartości w analizach nośności traktuje się w zasadzie deterministycznie. Nośność i obciążenia płaszcza jako zmienne losowe opisuje się rozkładami lognormalnymi. Przenikanie się tych rozkładów pozwala wyznaczyć ich wspólne pole, które jest miarą prawdopodobieństwa zawodu, czyli awarii, której akceptowalna wartość ustalona jest w przepisach normowych. Doktorant zaproponował w pełni probabilistyczne podejście do analizy bezpieczeństwa eksploatowanego zbiornika stalowego z istniejącymi już ubytkami korozyjnymi wyprowadzając zależność na średni (centralny) współczynnik bezpieczeństwa, którego wartość w rozpatrywanym cza-

sie eksploatacji powinna być nie mniejsza niż wartość dopuszczalna. Współczynnik ten uwzględnia zarówno losowe parametry obciążenia jak i nośności, a więc jest to metoda odmienna do stosowanych w normach metod oddzielnych współczynników częściowych: obciążenia i materiałowego. Jest to wartościowy element zasadniczej części rozprawy, pomimo tego że wykorzystuje się w niej ogólnie znane zasady probabilistycznych analiz konstrukcji stalowych.

Podstawowy element zadania naukowego pracy przedstawiony jest w jej rozdziale 12. Zawarto tam opis oryginalnego probabilistycznego modelu szacowania pozostałego czasu zdatności do bezpiecznej eksploatacji płaszcza zbiornika z ubytkami korozyjnymi licząc od momentu oceny jego stanu technicznego, po znacznym czasie dotychczasowego użytkowania. Przebiegu procesu korozyjnego i ubytków korozyjnych opisany jest funkcją liniową, w której prognozowaną w czasie dalszej eksploatacji wartość ubytku korozyjnego blach płaszcza ustala się na podstawie jednokrotnego pomiaru grubości w chwili badania i nominalnej (projektowanej) wartości grubości tych blach. Jest to z pewnością podejście bezpieczne, choć doktorant w rodz. 9 na str. 55 słusznie zauważa, że intensywność procesu korozyjnego w zbiornikach jest największa w początkowym okresie eksploatacji i maleje z upływem czasu. Brak jest jednak wiarygodnych danych statystycznych, aby do tego modelu wprowadzać w praktycznych zastosowaniach inne niż liniowe funkcje przyrostu ubytków korozyjnych.

W zaprezentowanym modelu przyjmuje się też stałą wartość granicy plastyczności stali, niezależną od postępu korozji. Takie podejście przyjmują także normy projektowania zbiorników. Tymczasem, szczególnie w przypadku korozji wżerowej, granica plastyczności stali zmniejsza się, co wykazał też doktorant w rodz. 8. Nieaktualna już norma, dotycząca projektowania stalowych kominów PN-93/B-03210, uwzględniała częściowo to zjawisko, wprowadzając współczynnik korozyjny α_{kor} , zmniejszający wytrzymałość obliczeniową stali z uwagi na wartość ubytku korozyjnego blach trzonu komina. Doktorant błędnie przypisuje ten współczynnik normie PN-EN 1993-3-2, w której on nie występuje (str. 44 rozprawy). Szkoda, że doktorant nie podjął próby wprowadzenia do swojego modelu dodatkowego parametru, jakim mógłby być współczynnik korozyjny. Zawsze można by w przypadku braku danych przyjąć wartość tego współczynnika równą 1,0. Modyfikacja modelu nie byłaby zbyt skomplikowana.

Pozostały średni czas bezpiecznej eksploatacji zbiornika od chwili badania jego stanu technicznego (pomiarów grubości blach) można wyznaczyć z warunku (12.23), który stanowi, że wartość średniego (centralnego) współczynnika bezpieczeństwa γ w przyszłym czasie eksploatacji powinna być nie mniejsza niż wartość dopuszczalna γ_{ult} . Czas ten określa się wprowadzając do wyprowadzonych zależności na te współczynniki kolejne coraz większe wartości czasu „ τ ” przewidywanej dalszej eksploatacji, aż do momentu, kiedy rzeczywista i dopuszczalna wartość współczynnika będą sobie równe, a więc osiągnie się stan maksymalnie akceptowalnego prawdopodobieństwa zawodu (awarii). W miarę wzrostu czasu eksploatacji prawdopodobieństwo zawodu rośnie, co przedstawiono graficznie na rys. 12.1. W tym miejscu należy podkreślić, że opracowany przez doktoranta w pełni probabilistyczny model szacowania pozostałego czasu zdatności płaszcza zbiornika do eksploatacji jest istotnym osiągnięciem naukowym, które ma również duże znaczenie aplikacyjne. Tej oceny nie umniejszają w zasadniczym stopniu uwagi krytyczne wymienione wyżej i dość trudne do spełnienia założenia wstępne. Zakłada się bowiem, że eksploatacja zbiornika w przewidywanym czasie zdatności będzie miała identyczny przebieg jak do chwili badania stanu technicznego, a w zbiorniku nie będzie żadnych prac remontowych. Takie założenie jest oczywiście zrozumiałe przy budowie nowego modelu. Trzeba także zauważyć, że choć doktorant wspomina bardzo ogólnie, że nośność płaszcza wyznacza tylko z warunku nośności przy rozciąganiu obwodowym płaszcza (stan LS1 wg PN-EN 1993-1-6), to trzeba by to ograniczenie zapisać bardzo wyraźnie w opisie modelu i w podsumowaniu rozprawy. Zmniejszanie się grubości blach płaszcza wskutek korozji może skutkować realnym zagrożeniem awaryjnym wskutek utraty stateczności (stan LS3) przy pustym zbiorniku i oddziaływaniu wiatru oraz wystąpieniu podciśnienia wewnętrznego. Niestateczność obwodowa płaszcza może być często najważniejszym czynnikiem zwiększającym istotnie ryzyko awarii zbiornika. Dodanie jednego lub dwóch pierścieni w płaszczu jest w takim przypadku bardzo prostym i skutecznym sposobem wzmocnienia osłabionego korozyjnie zbiornika. Doktorant wprowadza też do swojego modelu współczynnik redukujący wytrzymałość spoin czołowych α_{\perp} o pełnym przetopie, który nie wystę-

puje już we współczesnym normach projektowania (Eurokodach), choć we wcześniejszych normach PN był on stosowany.

Aplikacyjną wartość opracowanego modelu wykazana została w rozdziale 13, który oceniony został w p. 2.3 niniejszej recenzji. Jest to ważne podsumowanie pracy nad budową probabilistycznego modelu do szacowania pozostającego czasu bezpiecznej eksploatacji badanego zbiornika z pomierzonymi ubytkami korozyjnymi z uwagi na nośność jego płaszcza przy rozciągnięciu obwodowym.

2.3. Ocena prognozy trwałości płaszcza zbiornika przeprowadzona w rozdziale 13 rozprawy

Doktorant w rozdziale 13 rozprawy pokazał praktyczne zastosowanie opracowanej przez siebie probabilistycznej metody prognozowania trwałości, wykorzystując ją dla blachy dolnej cargi ($t_{nom} = 7$ mm) płaszcza stalowego zbiornika z dachem pływającym, służącym do magazynowania produktów naftowych i eksploatowanym już przez 27 lat. W przypadku zastosowanej stali S235 (prawdopodobnie dawna stal St3SY – str. 37) odchyłki hutnicze grubości blach uwzględniono stosując skorygowany łączny wskaźnik zmienności o wartości 0,10, wynikający ze współczynnika zmienności granicy plastyczności (8%) i zmienności grubości blachy (6%). Uzyskano w ten sposób wartość mediany losowej granicy plastyczności stali 317,22 MPa, zastępczą obliczeniową wytrzymałość stali o wartości 249,53 MPa, a więc większą niż normowa wartość obliczeniowa, wynosząca 235 MPa. Obliczona według wzorów 13.21) i 13.24) nośność obliczeniowa skorodowanego pasa o wartości $N_{Rd} = 1559,65$ kN/m, a więc ma praktycznie taką samą wartość jak przy zastosowaniu jedynie wzoru 13.21) z wykorzystaniem normowej wytrzymałości obliczeniowej stali $f_d = 235$ MPa. Czy więc zastosowana procedura wyznaczania mediany losowej granicy plastyczności wg zależności 13.16), 13.17) i 13.18) jest potrzebna?

Doktorant dysponował wynikami badań materiałowych ze zbiorników nr 3 i 4, a wszystko wskazuje na to, że jeden z tych zbiorników był przedmiotem analiz obliczeniowych w tym rozdziale, co wynika pośrednio z analiz rysunków 7.1 i 8.1. W tab. 8.1 i 8.2 pokazano wpływ ubytków korozyjnych i korozji wżerowej na spadek granicy plastyczności stali. Dlaczego nie podjęto próby uwzględnienia realnej wartości wytrzymałości skorodowanej stali w przypadku prognozy trwałości zbiornika oraz realnego współczynnika zmienności granicy plastyczności stali? Prawdopodobnie doktorant opracował ogólny model uwzględniający powszechnie występujące sytuacje, w których badania statystyczne wytrzymałości blach skorodowanego zbiornika nie są możliwe.

Indeks (wskaźnik) niezawodności, oznaczany w pracy jako $\mu_0(\tau)$, powinien wynosić wg PN-EN 1990 dla konstrukcji o klasie niezawodności RC2 co najmniej 4,7 dla rocznego okresu odniesienia oraz 3,8 dla 50 letniego okresu. Wskaźnik niezawodności o wartości 4,7 odpowiada prawdopodobieństwu awarii o wartości 10^{-6} . Takie właśnie graniczne wartości przyjął doktorant na rys. 13.2 i 13.3, gdzie wyznaczał szacowany czas zdatności zbiornika do eksploatacji, uzyskując aż 77 letni całkowity okres bezpiecznej eksploatacji, gdy nie będzie potrzeby wykonywania próby wodnej. Wydaje się jednak, że analizowany zbiornik na paliwa powinien być zaliczony do klasy konsekwencji CC3 zgodnie z normą PN-EN 1993-4-2 p. 2.2(3), a więc do najwyższej klasy niezawodności RC3 z wymaganym wskaźnikiem niezawodności o wartości 5,2 zgodnie z PN-EN 1990 (tab. B.2), a w takim przypadku prawdopodobieństwu awarii ma wartości 10^{-7} . W takim przypadku prognozowany czas zdatności będzie co najmniej o 10 lat krótszy od obliczonego. Te wątpliwości w sprawie przyjętego indeksu niezawodności, powinien wyjaśnić doktorant podczas publicznej obrony, gdyż w rozprawie ta sprawa nie jest wyjaśniona jednoznacznie w nawiązaniu do PN-EN 1990.

Uzyskany czas zdatności zbiornika do eksploatacji 77 lat, jeśli pominie się próbę wodną, byłby znacznie krótszy gdyby zastosowano wymagania normy PN-EN 14015, cytowanej w spisie norm. Przyjęte w obliczeniach nadciśnienie $p_E = 2,15$ kPa wynikające z ciężaru dachu i 100 mm słupa wody opadowej na tym dachu jest znacznie zaniżone w stosunku do wymagań PN-EN 14015 (p. D3.2), gdzie zaleca się przyjmować na dachu wartość wysokości wody opadowej $h = 250$ mm. W takim przypadku nadciśnienie będzie miało wartość charakterystyczną 3,65 kPa, co wpłynie istotnie na wyłączenie blach płaszcza zbiornika i zmniejszenie jego prognozowanego czasu zdatności do eksploatacji.

Innym wymaganiem, stawianym w p. 9.1.1(a) normy PN-EN 14015, jest warunek, aby dopuszczalne naprężenia obliczeniowe w blachach płaszcza nie przekraczały wartości $2/3$ granicy plastyczności stali, a więc 156,66 MPa. W takim przypadku można w przybliżeniu szacować, że wyznaczony łączny czas zdatności zbiornika do eksploatacji będzie znacznie krótszy i prawdopodobnie nie przekroczy zakładanego w projekcie 50-letniego okresu.

Redukcja poziomu naprężeń, wymagana przez normę PN-EN14015, ma swoje bardzo istotne uzasadnienie. W dolnej części płaszcza występuje bowiem realny stan zgięciowy, który może wywoływać cykliczne uplastycznianie się blach. Norma PN-EN 1993-4-2, tak jak i inne normy PN-EN 1993, przewiduje wykorzystanie nośności plastycznej blach, a jeśli takie cykliczne uplastycznienia podczas napełniania i opróżniania zbiornika mają miejsca, to decydującym stanem granicznym nośności walcowej powłoki płaszcza może być stan graniczny LS2 nieprzystosowania plastycznego, zwanego stanem niskocyklowego zmęczenia. Jeśli powłoka płaszcza zbiornika pracuje tylko w stanie sprężystym, to bardzo niebezpieczny dla eksploatacji stan LS2, związany z pęknięciami zmęczeniowymi, można pominąć. Wskaźnik zginania w stanie sprężystym dla blachy ma wartość dwóch trzecich wskaźnika zginania w stanie plastycznym, stąd dla zwiększenia poziomu bezpieczeństwa eksploatacji zbiorników i rezygnacji z bardzo złożonych analiz stanu granicznego LS2 norma PN-EN 14015 stawia takie ostre wymagania odnośnie redukcji poziomu naprężeń błonowych w płaszczech zbiorników walcowych na cieczy.

Pomierzone ubytki korozyjne dolnej cargini płaszcza zbiornika, analizowanego w rozdz. 13, są dość niskie i ich intensywność wynosi 0,01585 mm/rok. W praktyce projektowej przyjmuje się ubytki w zakresie 0,04 – 0,06 mm/rok. Recenzent spotkał się również w swojej praktyce eksperckiej z przypadkami bardzo małych ubytków korozyjnych, które w przypadku magazynowania ługu sodowego NaOH nie przekraczały wartości odchyłek hutniczych nawet po 35 latach eksploatacji. W tym przypadku jednak wysoki odczyn zasadowy ($\text{pH} = 12-13$) miał zasadnicze znaczenie.

Uwagi krytyczne dotyczące założeń oraz wyników analiz czasu zdatności eksploatowanego zbiornika do eksploatacji, przedstawionych w rozdz. 13 rozprawy, są elementem niezbędnej dyskusji naukowej i technicznej, dotyczącej sposobu wykorzystania zaawansowanego probabilistycznego modelu zaprezentowanego w rozdz. 12 rozprawy. Jeśli doktorant i inni specjaliści uznają, że uwagi recenzenta są słuszne, to można je bez problemu uwzględnić w przyszłości modyfikując zbudowany przez doktoranta probabilistyczny model.

3. Niektóre uwagi krytyczne

3.1. Uwagi merytoryczne

Większość uwag merytorycznych została przedstawiona już w p. 2.2 i 2.3 niniejszej opinii. Dodatkowo podkreślić należy pewien niedosyt, wynikający z braku przeglądu literatury w zwartej formie, który by wykazał potrzebę opracowania autorskiego modelu probabilistycznego prognozowania trwałości eksploatowanych od dłuższego czasu walcowych zbiorników o osi pionowej na paliwa płynne z uwagi na stosowane w praktyce metody prognozowania trwałości, mające spore niedostatki. W tym przypadku bardzo dobrym argumentem na wykazanie różnic pomiędzy oboma metodami byłoby wykonanie dodatkowych klasycznych, półprobabilistycznych obliczeń czasu trwałości zbiornika i porównanie ich wyników z uzyskanymi wynikami w rozdz. 13. Doktorant nie wykonał takiego porównania, choć jest ono dość proste. Jeśli weźmie się pod uwagę, że minimalna bezpieczna wartość grubości blachy w badanym pasie zbiornika wynosi 4,34 mm (równanie (4.34)) i $t_{\text{nom}} = 7$ mm to dopuszczalny ubytek korozyjny blachy wynosi: $7 - 4,34 = 2,66$ mm. Przy liniowym postępie korozji 0,0158 mm/rok (równanie (13.53)) uzyskuje się czas całkowitej eksploatacji równy ilorazowi $2,66 / 0.0158$, a więc 168 lat. To proste porównanie pozwala dodatkowo zaprezentować wyraźne osiągnięcie naukowe rozprawy i praktyczną przydatność oryginalnego modelu doktoranta, którego zastosowanie pozwala uzyskać realniejszy, bo tylko 77 letni okres eksploatacji. Trzeba mieć nadzieję, że doktorant przedstawi swój pogląd na ten praktyczny aspekt modelu podczas publicznej obrony.

Doktorant nie zajmuje stanowiska w odniesieniu do nasuwającego się pytania, czy w przypadku oszacowania czasu zdatności zbiornika do eksploatacji, który w przykładzie z rozdz. 13 wynosi nawet 77 lat, nie należy zalecić kolejnej oceny stanu technicznego i kolejnej prognozy czasu zdatności

do eksploatacji po pewnym kolejnym okresie eksploatacji, na przykład po 10-20 latach. Czy wynik uzyskany na podstawie jednokrotnego pomiaru ubytków korozyjnych można traktować jako ostateczny i miarodajny?

W podsumowaniu na str. 116 doktorant zaznacza, że „*numeryczna analiza zbiornika ze skordowaną powłoką stalową o nieidealnej geometrii to, w zamierzeniu Autora, trzeci oryginalny filar prezentowanej rozprawy.*” Zagadnienia, których dotyczy to sformułowanie, prezentowane są w rozdziale 10 rozprawy. Nie można jednak uznać, że jest to oryginalne osiągnięcie wyłącznie doktoranta, gdyż rozdział ten jest prezentacją dużych fragmentów wartościowej publikacji w *Procedia Engineering* 172 (2017) 723 – 730 i na konferencji w Wilnie w 2016 r., której doktorant jest jednym z 4 współautorów. Prezentowane w tej pracy analizy nie mają jednak charakteru probabilistycznego, a więc trudno by je też było bezpośrednio zaliczać do realizacji zadania naukowego, wymienionego w tezie rozprawy na str. 7.

Wyniki pomiarów ubytków korozyjnych blach płaszczy eksploatowanych przez długi okres zbiorników paliwowych oraz obliczane na ich podstawie prognozy postępu korozji w kolejnych latach mogą być w praktyce obciążone dużym błędem jeśli w podczas realizacji zastosowano w dolnym lub wyższym paśmie grubszą blachę niż przewidziana w projekcie. Uwzględniając odchyłki hutnicze różnice realnych grubości pomiędzy blachą $t = 11$ mm i $t = 12$ mm mogły być trudne do zauważenia w przypadkach zbiorników realizowanych przed 30-40 laty. Czy taka sytuacja nie miała miejsca w przypadku przedstawionym na rys. 9.5 i w tab. 9.1, gdzie w pasie dolnym ($t = 11$ mm) zbiornika nr 1 nie stwierdzono żadnych ubytków korozyjnych po 20 latach eksploatacji. W kolejnych 10 latach eksploatacji postęp korozji nabral jednak wyraźnego tempa (rys. 9.5), co dość trudno uznać za w pełni wiarygodną ocenę postępu procesji korozji, jeśli na jej podstawie prognozowano by czas zdadności do eksploatacji. Trzeba by wprowadzić dodatkowe wymagania praktyczne w zakresie oceny realnego prognozowanego postępu korozji i przyjmowanych ubytków w opracowanym przez doktoranta modelu probabilistycznym, gdzie prognoza ubytków korozyjnych jest podstawowym jego parametrem.

Szkoda, że doktorant nie podjął próby wykonania dodatkowej analizy czasu zdadności do eksploatacji zbiornika prezentowanego w rozdz. 13 na podstawie uzyskanych przez siebie wyników badań wytrzymałościowych stali (tab. 8.1 i 8.2), które wskazują na spadek tej wytrzymałości pod wpływem korozji. Nie zawsze ma się do dyspozycji takie wyniki badań, które miał do dyspozycji doktorant, a ich uwzględnienie wniosło by do pracy bardzo ważny element związany z bezpieczeństwem eksploatacji stalowych zbiorników, który jest na ogół pomijany w praktyce.

Zawarte wyżej uwagi krytyczne należy traktować jako uwagi o charakterze dyskusyjnym, dające możliwość doktorantowi zaprezentowania własnego poglądu lub krytycznej refleksji na poruszane zagadnienia podczas publicznej obrony. Zbudowany probabilistyczny model oceny czasu zdadności zbiorników do eksploatacji i zaprezentowany w rozdz. 12 jest modelem podstawowym, który łatwo może być rozbudowany o dodatkowe elementy, o których mowa wyżej.

3.2. Uwagi formalne i językowe

Praca jest napisana poprawnie pod względem redakcyjnym, a zawarte w niej opisy analiz oraz prezentacja ich wyników są zrozumiałe, choć autor nie ustrzegł się dość nielicznych błędów redakcyjnych. Tak jak to już zaznaczono wcześniej w rozprawie brak jest wyraźnie sformułowanego problemu naukowego, którego rozwiązania podjął się Doktorant. Problem ten można wprawdzie rozpoznać po lekturze rozprawy ale byłoby lepiej, gdyby był on jasno sformułowany w pierwszej części rozprawy.

Błędy reakcyjne o różnym ciężarze gatunkowym występują w różnych częściach rozprawy. Kilka wybranych wymieniono poniżej:

- na str. 57 w wierszu 10 od dołu zapis „na zbiornikach ..” powinien brzmieć „W zbiornikach ..”,
- na str. 57 w wierszu 8 od dołu zapis „Dla zbiornika nr 1 widać nawet,” powinien brzmieć „W przypadku zbiornika nr 1 widać nawet,” ,
- na str. 69 na rys. 9.5 na osi poziomej wykresu zaznaczony jest m.in. rok 2001 jako rok pomiarów grubości, a w tablicy 9.1 zapisany jest rok 2006, co nie odpowiada temu wykresowi oraz wykresom na rys. 9.6 – 9.7,

- na str. 82 w wierszu 7 od góry wewnątrz tekstu jest równanie, które powinno mieć swój numer,
- na str. 83 dwa różne równania mają ten sam numer (11.8), podobnie jak i na str. 85 (11.12) i (11.13) oraz innych częściach rozdziału 11,

Zauważone usterki redakcyjne i nieścisłości sformułowań w różnych fragmentach pracy nie mają istotnego znaczenia dla merytorycznej oceny wartości opiniowanej rozprawy.

4. Podsumowanie

W podsumowaniu recenzji stwierdzam, że:

- Rozprawa dotyczy ważnego i aktualnego zagadnienia jakim jest prognozowanie trwałości eksploatowanych walcowych zbiorników o osi pionowej do magazynowania paliw płynnych z uwagi na stwierdzone ubytki korozyjne blach ich płaszczy. Rozprawa zawiera także profesjonalne analizy zagadnień związanych z realizacją i utrzymaniem oraz kontrolą stanu bezpieczeństwa eksploatacyjnego takich zbiorników, a także bardzo cenne wnioski praktyczne.
- Doktorant miał konkretny cel i dostosowany do niego zakres rozprawy, który w dostatecznym stopniu zrealizował za pomocą badań stanu technicznego realnych zbiorników oraz zaawansowanych analiz teoretycznych, dotyczących probabilistycznych ocen nośności konstrukcji zbiorników.
- Doktorant w swej rozprawie zawarł oryginalne rozwiązanie problemu naukowego jakim jest opracowanie probabilistycznego modelu do wiarygodnego prognozowania trwałości eksploatowanych zbiorników walcowych o osi pionowej z uwagi na stwierdzone ubytki korozyjne blach ich płaszczy oraz kalibracja parametrów tego modelu na podstawie wyników zebranych przez doktoranta pomiarów inwentaryzacyjnych wybranych zbiorników.
- Zaprezentowany w rozprawie probabilistyczny model szacowania trwałości eksploatacyjnej eksploatowanych i częściowo zużytych korozyjnie zbiorników stalowych jest modelem podstawowym, który może być rozbudowywany o kolejne elementy, mające wpływ na trwałość zbiorników. Doktorant nie wykorzystał jednak możliwości uwzględnienia własnych wyników badań wytrzymałościowych stali skorodowanych blach do oszacowania trwałości analizowanego zbiornika. Nie wykonał również analiz porównawczych czasów zdadności badanego zbiornika do eksploatacji, uzyskanych z zastosowaniem własnego modelu probabilistycznego i metody półprobabilistycznej, aby wykazać jednoznacznie zalety swojego modelu.
- Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego formułowania celów pracy badawczej, wykonywania zaawansowanych badań doświadczalnych stalowych konstrukcji zbiorników oraz ich analiz teoretycznych, a także krytycznej oceny wyników tych badań i analiz. Wykazał się więc umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych i dowiódł, że posiada specjalistyczną wiedzę, którą potrafi twórczo rozwijać.

5. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę zarówno pozytywne jak i krytyczne oceny badań stanu technicznego zbiorników i teoretycznych probabilistycznych analiz ich trwałości eksploatacyjnej, a także ogólne i szczegółowe uwagi o charakterze krytycznym i dyskusyjnym, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Janusza Siuduta pt. *„Prognoza trwałości skorodowanego płaszcza stalowego zbiornika na paliwa płynne”* stanowi ważny wkład do rozwoju nauki w zakresie konstrukcji inżynierskich oraz spełnia w stopniu dostatecznym wymagania stawiane pracom doktorskim zawarte w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. nr 65 z późn. zmianami) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Dr hab. inż. Eugeniusz Hotała, prof. uczelni



