

Kraków 07.01.2021

dr hab. inż. Jacek Jakubowski, prof. AGH
Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki
Wydział Górnictwa i Geoinżynierii
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgra inż. Janusza Siuduta

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

I. Wprowadzenie

Recenzję rozprawy doktorskiej mgra inż. Janusza Siuduta przygotowałem na podstawie Uchwały Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej o powołaniu mnie na recenzenta w przewodzie doktorskim i pisma Dziekana, prof. dra hab. Andrzeja Szaraty. Promotorem jest dr hab. inż. Mariusz Maślak profesor PK.

II. Tematyka rozprawy

Praca dotyczy nośności i trwałości płaszcza stalowych zbiorników na paliwa płynne o osi pionowej w kontekście ich zużycia korozyjnego, w szczególności modelu ubytku korozyjnego i probabilistycznej metody szacowania pozostałego czasu zdatności skorodowanego płaszcza zbiornika. Zakres pracy poszerzono o przedstawienie i dyskusję praktycznych rozwiązań problemów towarzyszących eksploatacji, modernizacji i naprawom zbiorników. W pracy Autor przedstawił wyniki wytrzymałościowych badań laboratoryjnych, pomiary grubości i geometrii płaszcza zbiornika, wyniki symulacji numerycznej metodą elementów skończonych oraz analityczne rozwiązania problemu niezawodności metodami półprobabilistyczną i probabilistyczną.

Szacowanie nośności i trwałości skorodowanych zbiorników na paliwa płynne jest istotnym problemem inżynierskim, mającym duże znaczenie ekonomiczne. Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej oraz Katedra Konstrukcji Mostowych, Metalowych i Drewnianych mają historycznie i współcześnie duży wkład w rozwój metod analizy niezawodności konstrukcji inżynierskich. Zespół badawczy z którym Autor współpracuje zajmuje się między innymi niezawodnością skorodowanych zbiorników stalowych. Doktorant jest współautorem prac naukowych w tym zakresie i ma, jak można przypuszczać, znaczny wkład w te badania. Ma również praktyczne doświadczenia zawodowe w zakresie eksploatacji zbiorników na paliwa płynne. Podjęcie przez Doktoranta tej tematyki badań i ich realizacja na Wydziale Inżynierii Lądowej PK są zatem uzasadnione i celowe.

Temat rozprawy jest poprawnie sformułowany i nazywa zamierzone, główne osiągnięcie naukowe. Zakres prac przedstawianych przez Autora w rozprawie jest szerszy, ale związany z jej tematyką. Jest ciekawy i ważny zarówno od strony poznawczej jak i praktycznej.

DZIEKANAT	
Wydziału Inżynierii Lądowej	
Wpłynęło dnia	18.01.2021
Lp. dz.	10.510.15.3.2021
podpis	<i>Nowy</i>

III. Treść i układ rozprawy

Praca składa się z czternastu rozdziałów (131 stron), spisu literatury (123 pozycje w tym normy i rozporządzenia), streszczenia w języku polskim i angielskim.

We wprowadzeniu Doktorant uzasadnił podjęcie tematu, przedstawił cele naukowe i praktyczne pracy, tezę pracy oraz zakres badań. Zrobił to w sposób interesujący, zachęcający do dalszego studiowania pracy. Przedstawił też ogólnie zastrzeżenia i ograniczenia związane z bazą pomiarową, metodyką i stosowalnością proponowanych rozwiązań. W tekście pracy Autor nie zachowuje w pełni konsekwentnego stanowiska wobec tych ograniczeń.

W rozdziałach 2, 3 i 4, w oparciu o obszerny przegląd literatury naukowej i technicznej, normy i przepisy oraz o własne materiały i doświadczenia, Autor scharakteryzował problem zużycia korozyjnego stalowych zbiorników na paliwa płynne o osi pionowej, monitorowania ich stanu technicznego w trakcie eksploatacji, projektowania i dopuszczania do użytkowania, metody zabezpieczenia zbiorników przed korozją, możliwości zastosowania laminatów do wzmacniania elementów zbiorników, w szczególności osłabionych korozją. Rozdziały te są bogato ilustrowane zdjęciami pochodzącymi z archiwum i kilku wcześniejszych publikacji Autora.

W rozdziałach 5, 6, 7 Autor przedstawił swoje praktyczne doświadczenia i przebieg modernizacji skorodowanego dna zbiornika, dostosowanie konstrukcji zbiornika do magazynowania paliwa lotniczego o innej specyfikacji oraz zaprojektowaną i zrealizowaną przez siebie operację wymiany pasa blach powłoki zbiornika. Rozdziały te są również ilustrowane zdjęciami i komentarzami z jego praktyki zawodowej, co jest ich zaletą.

W rozdziale 8 Autor przedstawił wyniki laboratoryjnych badań stali na próbkach wyciętych z płaszcza zbiornika: statycznych prób rozciągania oraz prób uderzeniowych stali. Przedstawił też wyniki badań metalograficznych, własną interpretację wyników i wnioski dotyczące wytrzymałości i kruchości stali wyciętej ze skorodowanych blach.

W rozdziale 9 Autor opisał wyniki pomiarów grubości blach przeprowadzonych na elementach czterech zbiorników na paliwa płynne o osi pionowej. Pomiary przeprowadzono na różnych elementach konstrukcji zbiornika, w jednym lub dwóch punktach czasowych dla każdego elementu. Wybrane wyniki pokazano w postaci tabel, wykresów i podstawowych statystyk opisowych.

Rozdział 10 zawiera wyniki numerycznej symulacji obciążenia płaszcza wypełnionego zbiornika metodą elementów skończonych w systemie Abaqus. Geometrię modelu w kilku wariantach zbudowano w oparciu o pomiary geodezyjne położenia płaszcza zbiornika, pomiary grubości blach oraz założone, przyszłe grubości blach poddanych korozji. We wnioskach podkreślono duże różnice pomiędzy wynikami otrzymanymi dla liniowych i dla nieliniowych związków geometrycznych.

W rozdziale 11 przedstawiono metody oceny niezawodności płaszcza zbiornika na paliwo dla chwili badania technicznego. Rozważano zbiornik całkowicie wypełniony, obciążony ciśnieniem hydrostatycznym i nadciśnieniem oraz jego awarię na skutek uplastycznienia ściany pasa płaszcza pod działaniem sił rozciągających. Przedstawiono rozwiązanie tego problemu metodą półprobabilistyczną i probabilistyczną, w szczególności zastosowanie współczynników

częściowych, rozdzielonych wskaźników niezawodności, globalnego wskaźnika niezawodności, wskaźnika bezpieczeństwa i prawdopodobieństwa awarii. Przedyskutowano różnice w opisie stanów dopuszczalnych i stanów niezawodnych. Pokazano metodę wskaźników częściowych na tle metody probabilistycznej. Omówiono przyjęte założenia upraszczające co do obciążenia i nośności pasów płaszcza zbiornika oraz inne uproszczenia metody. W przyjętym modelu probabilistycznym zmiennymi losowymi są: obciążenie (założono rozkład i parametry na podstawie normowych współczynników częściowych), granica plastyczności (założono rozkład i parametry na podstawie normowych współczynników częściowych) oraz grubość blachy (na podstawie własnych pomiarów).

W rozdziale 12 przedstawiono postać liniowego modelu postępu korozji w czasie opartego na pomiarach w chwili przeprowadzania oceny (w jednym punkcie czasowym) oraz jego zastosowanie w probabilistycznej ocenie niezawodności metodą przedstawioną w rozdziale 11.3. W ten sposób, łącząc model korozyjnego osłabienia pasa w czasie z probabilistycznym modelem niezawodności, uzyskano metodę prognozy pozostałego czasu zdatności skorodowanego płaszcza zbiornika. Rozdziały 11 i 12 obejmują rozważania teoretyczne. W rozdziale 13 przedstawiono obliczeniowy przykład zastosowania metod pokazanych wcześniej dla oceny stanu technicznego zbiornika w chwili badania oraz dla szacowania pozostałego czasu zdatności zbiornika (pasa płaszcza).

Rozdział 14 zawiera podsumowanie i dyskusję głównych wyników oraz problemów do dalszych badań.

Bezpośrednią realizacją tematu pracy jest metoda obliczeniowa przedstawiona w rozdziale 12. Rozdziały 9, 11 i 13 stanowią dla niej kontekst empiryczny, teoretyczny i przykład obliczeniowy. Rozdziały 8 i 10 zawierają wyniki badań laboratoryjnych i numerycznych, które dotyczą tematu pracy. Rozdziały 4-7 relacjonują inżynierskie prace modernizacyjne i remontowe, które realizował Autor, ogólnie związane z tematyką pracy. Są one przedstawione w pracy jako oryginalne osiągnięcia. Mają wartość poznawczą i inżynierską. Nie są związane z metodą przedstawioną w rozdziale 12 pracy. Rozdziały 2-4 stanowią część wprowadzającą, monograficzną pracy, wzbogaconą praktycznymi relacjami i doświadczeniami zawodowymi Autora. Rozdziały 1 i 14 to odpowiednio wstęp i podsumowanie pracy.

Spis źródeł obejmuje 89 publikacje i 34 normy i rozporządzenia. Dobór źródeł jest dostosowany do zakresu pracy. W części opisowej dominują prace autorów polskich, w pozostałych częściach Autor powołuje się na liczne prace publikowane zagranicą. Wymieniono 19 pozycji, których Doktorant jest współautorem.

Znaczna część pracy jest zestawieniem kilku wcześniejszych publikacji Autora i zespołu naukowego, z którym współpracuje. Współautorem wszystkich tych publikacji jest Promotor, dlatego można przypuszczać, że indywidualny wkład Autora, w zakresie w jakim przedstawiono je w pracy został przez Promotora zweryfikowany.

IV. Uwagi do pracy.

1. We wprowadzeniu do pracy Autor pisze (str. 8, w. 21): „*W niniejszych rozważaniach, z uwagi na szczupłość wykorzystanej przez Autora do tej pory próby statystycznej, wskazany zostanie na tym polu jedynie sam zarys proponowanego algorytmu postępowania, szczegółowa zaś kalibracja wartości wskaźników stanowiących podstawowe parametry tego modelu zostanie przeprowadzona w dalszej kolejności, po uzyskaniu dostępu do większej populacji wyników.*”

Zgadzam się z tym przedstawionym przez Autora na wstępie pracy zastrzeżeniem. Odnoszę je do przedstawionych w pracy danych pomiarowych i budowanych na ich podstawie modeli numerycznych, statystycznych i probabilistycznych. Zakres, liczność i jakość danych nie pozwala na estymację lub kalibrację parametrów modeli ani na jakościową ocenę postaci niektórych z nich. Między innymi ze względu na tę szczupłość posiadanych danych pomiarowych, nie została jeszcze udowodniona praktyczna przydatność modeli a możliwość interpretacji wyników jest na razie ograniczona.

Kilkukrotnie w pracy Autor jasno przedstawia stanowisko podobne do zacytowanego wyżej, jednak nie jest w tym konsekwentny i wielokrotnie wyraża też na ten temat opinie niejednoznaczne.

2. Badania pokazane w rozdziale 8, w opinii Autora „*potwierdziły znaczną degradację podstawowych właściwości stali, powodowaną przez postępujący w czasie proces korozyjny.*” (str. 51)

Mała liczność, dobór i sposób przygotowania próbek oraz wyniki badań nie pozwalają na potwierdzenie tej tezy na podstawie tych badań. Wbrew wzmiankom w pracy, Autor nie uwzględnił wyników tych badań w analitycznym modelu probabilistycznym przedstawionym w rozdziale 12 i 13. Badania w rozdziale 8 dotyczą skorodowanych blach, ale nie opisują osłabienia materiału z czasem, nie pozwalają na szacunki ilościowe w tym zakresie.

3. Przedstawione w rozdziale 9 dane pomiarowe nie dają podstawy do budowania liniowego, potęgowego, czy innego empirycznego modelu postępu korozji z czasem. Na wstępie rozdziału 9 autor spekulatywnie uzasadnia i przyjmuje założenie wprost proporcjonalności ubytku korozyjnego i czasu. Następnie przedstawia wyniki własnych pomiarów ubytku korozyjnego, które nie potwierdzają, raczej przeczą temu założeniu.

W rozdziale 9 Autor nie przytacza wartości parametrów ani szczegółów estymacji liniowego modelu ubytku korozji z czasem. Nie analizuje niepewności estymacji parametrów takiego modelu.

4. Autor pisze (str. 127, w. 25): „*W rozdziale 10 zamieszczono wyniki numerycznej symulacji postępu korozji przeprowadzanej dla zbiorników, dla których wcześniej zidentyfikowano występujący w praktyce trend korozyjny, zróżnicowany lokalnie w każdym punkcie pomiarowym.*”

Nie znalazłem w pracy tego zidentyfikowanego wcześniej „*trendu korozyjnego*” na podstawie którego ekstrapolowano pomiary po 10 i 20 latach ani sposobu jego aproksymacji.

5. Jak wynika z opisu rysunku 10.1 (str. 70) dane o geometrii płaszcza pochodzą z geodezyjnych pomiarów zbiornika napełnianego, czyli po przyłożeniu obciążenia. Geometrię modelu numerycznego definiuje się na ogół w konfiguracji przed przyłożeniem obciążeń. Nie jest zatem jasne, w jaki sposób dane geodezyjne z pomiarów geometrii obciążonego zbiornika zostały wykorzystane do budowy modelu numerycznego.

6. Autor pisze o modelach pokazanych w rozdziale 10 (str. 116, w. 26): *„Wiarygodność tego rodzaju analizy, nawet przy stosunkowo dużej precyzji odwzorowania stopnia aktualnego i prognozowanego w przyszłości osłabienia korozyjnego, nie może być do końca jednoznaczna. W prezentowanym w pracy przykładzie pokazano bowiem że zasadniczy wpływ na uzyskany finalnie wynik końcowy ma w tym przypadku sam sposób statycznej analizy powłoki, wybierany w dużej mierze subiektywnie przez osobę dokonującą oceny.”*

Dlatego właśnie publikowane modele numeryczne powinny być zwalidowane, tzn. ich wyniki porównywane z rzeczywistością. Przykład obliczeniowy nie stanowi walidacji modelu.

7. W rozdziale 12 Autor pisze (str. 96, w. 9): *„Z doświadczeń Autora wynika, że w przypadku płaszczy zbiorników narastanie średnich ubytków korozyjnych grubości blach t z dostatecznie dużą precyzją opisuje funkcja liniowa [...] Bardziej precyzyjna analiza, oparta o dane zestawione w rozdziale 9 niniejszego opracowania, wymagałaby specyfikacji trendów potęgowych. [...] w opinii Autora, populacja zinwentaryzowanych do tej pory wyników jest jeszcze zbyt mało liczna i statystycznie zbyt słabo jednorodna na to, aby uznać ją za reprezentatywną.”*

Tak jak Autor pisze, przyjętej w rozdziale 12 liniowej postaci modelu postępu korozji w czasie Autor nie opiera na danych pomiarowych przedstawionych w rozdziale 9, tylko na swoim osądzie i nie opisanych w pracy doświadczeniach. Model ten jest dalej wykorzystywany do wyprowadzenia probabilistycznej metody obliczeniowej. Przykład rachunkowy w rozdziale 13 opiera się, jak się wydaje, na danych pomiarowych z rozdziału 9.

8. W rozdziale 12 Autor pisze (str. 96, w. 5): *„Podstawowym wymogiem dokonania w miarę wiarygodnej prognozy stanu bezpieczeństwa każdej konstrukcji stalowej jest znajomość postępu procesu korozyjnego w czasie przy określonej lokalizacji obiektu. Zakłada się przy tym, że parametry takie jak warunki klimatyczne, zanieczyszczenie atmosfery itp., jakkolwiek o losowych wartościach chwilowych, w dłuższym przedziale czasu nie ulegają zmianie (mogą być opisane wąskopasmowym, stacjonarnym procesem losowym).”*

Wydaje się jednak, że w rozdziale 12 Autor nie traktuje szybkości (intensywności) korozji A jako średniej wartości stacjonarnej zmiennej losowej, tylko jako stałą w sensie deterministycznym. Nie uwzględnia losowej zmienności A w czasie i jej rozrzutu w czasie wokół wartości średniej. Szacuje parametry modelu liniowego z dwóch punktów czasowych, jak dla zależności deterministycznej. Nie uwzględnia (również teoretycznie), niepewności estymacji parametrów liniowego modelu korozji w czasie i jej wpływu na niepewność prognozy pozostałego czasu zdatności.

9. W rozdziale 1.3 „*Proponowany zakres pracy*”, Autor pisze (str. 8, w. 17): „*Czynniki mające wpływ na postęp korozji, wykazane w towarzyszących pracy badaniach doświadczalnych, zostaną zaproponowane do uwzględnienia w budowanym niezależnie modelu analitycznym przez odpowiednie współczynniki korekcyjne, a ich rozrzut statystyczny będzie sumowany z wariancjami granicy plastyczności i wymiarów geometrycznych.*”

Nie znajduję w pracy doświadczalnych badań czynników mających wpływ na postęp korozji. Nie uwzględniono też takich czynników w zaproponowanym w pracy modelu analitycznym.

10. Autor omawia w pracy modernizację i naprawę skorodowanych zbiorników, między innymi przez wymianę blach zbiorników, napawania, wzmocnienia laminatowe, powłoki malarskie. Czy zaproponowana metoda szacowania pozostałego czasu zdatności pasów zbiornika może być zmodyfikowana w taki sposób, żeby miała zastosowanie do zbiorników, które w przeszłości były lub w przyszłości będą takim pracom poddawane?

11. Znaczna część pracy jest zestawieniem publikacji zespołu naukowego, z którym Autor współpracuje. Proszę o określenie indywidualnego wkładu Autora w zakresie rozdziałów 8-13 rozprawy. Proszę o potwierdzenie przez Promotora, że wkład Autora w badania, które są raportowane jako osiągnięcia Autora, jest odpowiednio istotny.

12. W pracy Autor zbyt często używa fraz przysłóvkowych „*w miarę*”, „*dość*” oraz innych niejednoznacznych sformułowań stopniujących. Na przykład: *w miarę jednoznaczne wyniki; w miarę wiarygodne wyniki; są jedynie dość znacznym przybliżeniem; chyba jednak dość znacznie zwiększone ryzyko; wiarygodność analizy nie może być do końca jednoznaczna; w miarę wiarygodne wartości; w miarę dokładnie odwzorowanie; w miarę precyzyjne odwzorowanie; w miarę wiarygodna prognoza; stosunkowo wiarygodna ocena; w miarę precyzyjne szacowanie; uległa relatywnemu zwiększeniu; mniej więcej do tych samych miejsc.*

13. W pracy można znaleźć drobne nieścisłości. Na przykład:

- W pracy nie przeprowadzono „*numerycznej symulacji postępu korozji*” jak pisze Autor (str. 8, w. 7). Przeprowadzono numeryczną symulację obciążenia skorodowanego płaszcza.
- W streszczeniu Autor wspomina (str. 127, w. 31) „*obliczenia liniowe czy też materiałowo i geometrycznie nieliniowe*”, jednak w pokazanych w pracy symulacjach numerycznych Autor nie zastosował nieliniowości materiałowej. Dla oceny stanu granicznego LS1 (utrata nośności na skutek uplastycznienia), EC3 zaleca stosowanie analizy LA, MNA lub GMNA.
- Autor w rozdziale 10 uznaje, że „*miarodajne w analizie bezpieczeństwa stają się zastępcze naprężenia obwodowe rozciągające powłokę*” (str. 69, w. 44). Obserwuje i podaje wyniki tylko dla naprężeń Hubera. Nie mam zastrzeżeń co do ich zastosowania, ale pozostaje nieścisłość terminologiczna.

- W pracy określenie „*lokalny*” o modelu lub pomiarze grubości płaszcza jest używane w trzech znaczeniach: dla punktu, dla blachy i dla pasa płaszcza, co utrudnia zrozumienie intencji Autora.
- Autor nie wyjaśnił co ma na myśli przez „*uogólnioną analizę numeryczną*” (str. 69, w. 27).
- „*Pole powierzchni przekroju poprzecznego próbek określono każdorazowo z uwzględnieniem maksymalnej wartości losowej na długości pomiarowej grubości blachy.*” (strona 47, w. 10) Maksymalnej czy może minimalnej? O wytrzymałości decyduje przecież najsłabszy przekrój.
- W tabelach 9.3, 9.4, 9.5 (str. 67, 68) podawane są statystyki z pomiarów bez liczności próby. W tabelach 9.4 i 9.5 podano statystyki dla górnego pontonu dachu pływającego, nie podano dla płaszcza.
- Nie znalazłem informacji o numerach zbiorników pomierzonych w rozdziale 9, których dotyczą przykłady obliczeniowe w rozdziałach 10 i 13.
- Gumbel nie Gumbell (str. 17).
- Separator dziesiętny i format referencji są stosowane w treści pracy niejednolicie.
- Źródła wielu rysunków pochodzących z wcześniejszych publikacji nie są podane w podpisach, lub są podane jako „archiwum autora”.

V. Ocena rozprawy

Rozprawa Pana mgr inż. Janusza Siuduta dokumentuje cykl badań dotyczących wpływu korozji na nośność i trwałość stalowych zbiorników na paliwa płynne i oceny ich stanu technicznego. Jej zakres dotyczy ważnego, praktycznego problemu inżynierskiego. Temat jest sformułowany prawidłowo, jest istotny i aktualny. Doktorant od wielu lat współpracuje z zespołem badawczym Promotora i jest współautorem wielu publikacji naukowych.

Wśród wielu narzędzi wykorzystanych przed Doktoranta znalazły się badania polowe, laboratoryjne, numeryczne, teoretyczne i studia literaturowe wzbogacone doświadczeniami z praktyki zawodowej. Autor wykazał umiejętność planowania i przeprowadzania badań, wyboru narzędzi i praktycznego posługiwania się nimi. Przedstawił znaczny zakres badań, wskazał ograniczenia stosowanych metod i osiągniętych rezultatów. Poczynił znaczne postępy na drodze do osiągnięcia celu naukowego i wykazania tezy postawionej we wstępie rozprawy. Uzupełnienia wymaga charakterystyka indywidualnego wkładu Autora w przedstawione w rozprawie osiągnięcia.

Praca pokazuje oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wdrożeniowego oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Świadczy o posiadaniu wiedzy i znajomości metod badawczych wykorzystywanych w inżynierii lądowej. Biorąc pod uwagę powyższe, pozytywnie oceniam przedłożoną mi do recenzji rozprawę.

VI. Wniosek końcowy

Przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Janusza Siuduta pod tytułem „*Proгноza trwałości skorodowanego płaszcza stalowego zbiornika na paliwa płynne*” spełnia wymagania ustawy „*O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*” z dnia 14.03.2003 z późniejszymi zmianami. Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

dr hab. inż. Jacek Jakubowski, prof. AGH

