

Bydgoszcz, 15.04.2021 r.

Dr hab. inż. Adam Lipski

Profesor uczelni

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji

Al. prof. Sylwestra Kaliskiego 7

85-796 Bydgoszcz

e-mail: Adam.Lipski@utp.edu.pl

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Piotra Jana Sulicha pt.

„Modelowanie procesu niskocyklowego zmęczenia stali w warunkach nieizotermicznych”

Podstawa opracowania recenzji:

Pismo Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej, prof. dra hab. inż.
Jerzego Andrzeja Śładka, nr M.00-520-47/2021 z dnia 23.02.2021 r.

1. Charakterystyka ogólna pracy

Przedstawiona do oceny praca doktorska obejmuje 122 strony, w tym 18 tabel i 74 rysunki. Podzielona jest na 5 rozdziałów. Oprócz nich obejmuje ona spis treści, przedmowę, spisy: oznaczeń i symboli, tabel i rysunków, literatury oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Załączono również 2 dodatki zawierające listingi procedur (Mathematica/AceGen, C++) napisanych na potrzeby realizacji pracy.

Przedmowa (2 strony) zawiera przede wszystkim charakterystykę zawartości pracy.

Rozdział 1 (13 stron) obejmuje tło zagadnienia podjętego w pracy odnoszącego się głównie do aktualnych problemów, z jakimi musi się zmierzyć w najbliższej przyszłości polska energetyka w zakresie modernizacji istniejących bloków energetycznych, szczególnie w odniesieniu do prognozowania ich trwałości. W rozdziale tym przedstawiono również tezę,



cel i zakres pracy. Rozdział kończy przegląd ważniejszej literatury dotyczącej sposobu prowadzenia badań eksperymentalnych w zakresie zmęczenia niskocyklowego oraz termo-mechanicznego, właściwości stali wysokochromowych, do których należy stal P91, modelowania konstytutywnego oraz zagadnień numerycznych, w tym zastosowania metody elementów skończonych do określania trwałości elementów konstrukcyjnych.

Rozdział 2 (25 stron) poświęcono charakterystyce stali P91 oraz opisowi aparatury i badań doświadczalnych: monotonicznego rozciągania, zmęczenia niskocyklowego w warunkach sterowania siłą lub odkształceniem, w warunkach izotermicznych oraz nieizotermicznych.

Rozdział 3 (18 stron) prezentuje podstawowe założenia do modelowania konstytutywnego obejmującego uwzględnienie dwóch zjawisk dyssypatywnych – plastycznego płynięcia oraz rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych. Złożoność modelu ograniczono do istotnego, z punktu widzenia zastosowań inżynierskich, odwzorowania zachowania materiału w warunkach zmęczenia niskocyklowego izotermicznego i nieizotermicznego.

Rozdział 4 (28 stron) stanowi główną część pracy zawierającą opis implementacji numerycznej modelu konstytutywnego, identyfikacji jego parametrów oraz weryfikacji modelowania w warunkach izotermicznych i nieizotermicznych.

Rozdział 5 (3 strony) zawiera podsumowanie i wnioski dotyczące zrealizowanej pracy. Przedstawiono w nim także uwagi do kierunków dalszych badań.

W spisie literatury zamieszczono 107 pozycji, z czego 2 są publikacjami współautorskimi Doktoranta. Wśród nich wyróżnić należy pozycję [28], która ukazała się w 2020 r. w uznanym czasopiśmie *International Journal of Plasticity*. Trochę dziwi natomiast brak w literaturze klasycznej pozycji z zakresu obejmującego tematykę pracy: Stanisław Kocańca, Andrzej Kocańda *Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metali*.

2. Ocena pracy

Oceniając wybór tematu pracy wskazać należy, iż jest on wartościowy i aktualny naukowo, ma duże znaczenie poznawcze i użytkowe nie tylko w odniesieniu do prognozowania trwałości zmęczeniowej elementów bloków energetycznych, na co głównie wskazuje Autor rozprawy, ale ogólniej wszędzie tam, gdzie elementy konstrukcyjne poddane są zmęczeniowemu obciążeniu niskocyklowemu oraz termo-mechanicznemu.



Podkreślić należy, że modelowanie zagadnień związanych ze zmęczeniem materiałów, szczególnie w zakresie niskocyklowym, gdzie pojawiają się istotnie duże wartości odkształceń plastycznych, należy do zagadnień wyjątkowo trudnych i skomplikowanych. Specyfika procesu zmęczenia, jego probabilistyczny i cykliczny charakter sprawiają, że drobne z pozoru błędy i uproszczenia dokonane na poziomie jednego cyklu obciążenia zmiennego kumulują się wraz z historią obciążenia i w konsekwencji prowadzić mogą do istotnych błędów szacowania trwałości zmęczeniowej. Słusznie Autor rozprawy zauważył, że *„modelowanie konstytutywne materiałów w warunkach obciążeń zmiennych stanowi trudne wyzwanie i wymaga ustalenia dobrego kompromisu pomiędzy złożonością opisu matematycznego, a liczbą związanych z nim parametrów materiałowych”*.

Autor postawił tezę o następującym brzmieniu:

„Uwzględnienie w modelu konstytutywnym zmęczenia niskocyklowego dla stali P91 sprzężonych mechanizmów plastyczności, uszkodzeń zmęczeniowych oraz prędkości zmian temperatury w istotny sposób poprawia zdolności predykcyjne modelu.”

Z jednej strony tak postawiona teza pracy wydaje się stosunkowo oczywista. Z drugiej strony Autor wskazuje na istotną poprawę zdolności predykcyjnych modelu. Należy zadać w tym miejscu pytanie: poprawę w stosunku do jakiego modelu? Nie zostało to jasno w pracy zdefiniowane.

Celem pracy była *„prezentacja kompleksowego modelowania zachowania się stali poddanej zmęczeniu niskocyklowemu w warunkach nieizotermicznych na przykładzie stali martenzytycznej o oznaczeniu P91”*. Wybór żarowytrzymałej stali P91 przez Autora pracy jest jak najbardziej zasadny i związany jest z jej wysoką wytrzymałością na pełzanie i zmęczenie cieplno-mechaniczne. Z tego względu jest ona stosowana na elementy bloków energetycznych, w tym kotłów.

Zdefiniowanemu powyżej celowi została podporządkowana struktura pracy: zaczynając od prezentacji wyników badań doświadczalnych ilustrujących złożoność zachowania się tego materiału w trakcie izotermicznego i nieizotermicznego obciążenia niskocyklowego, poprzez modelowanie konstytutywne materiału oraz jego numeryczną implementację w formie algorytmu obliczeniowego, identyfikację parametrów materiałowych na podstawie wyników badań eksperymentalnych, po weryfikację opracowanego modelu. Uznać ją należy za logiczną i w pełni odpowiadającą wymienionemu wyżej celowi pracy.



Rozprawa zawiera elementy oryginalne. Do najważniejszych należą:

1. Przedstawione w Rozdziale 2 wyniki badań doświadczalnych stali P91 oraz ich analiza.
2. Opracowany model matematyczny zachowania się materiału w trakcie niskocyklowego obciążenia zmęczeniowego w warunkach nieizotermicznych. Podstawowy model typu Armstronga-Fredericka określony jako „model (1)” opisany za pomocą 6 parametrów został rozwinięty o składnik związany ze wzmocnieniem izotropowym do „modelu (2)” opisanego za pomocą 7 parametrów. Ostatecznie „model (3)” rozbudowany o dodatkowe składniki wzmocnienia kinematycznego, izotropowego oraz związane z opisem uszkodzeń zmęczeniowych zawierał 12 parametrów w przypadku uwzględnienia uszkodzeń dyssypatywnych lub 13 parametrów przy uwzględnieniu uszkodzeń ciągliwych.
3. Identyfikacja parametrów modelu w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzona przy wykorzystaniu pakietu SIMULIA-Isight 5.9, w której poszukiwano takiego ich zestawu, w którym osiągnie się minimum różnicy pomiędzy wynikami analiz numerycznych a wynikami badań doświadczalnych. Zastosowana technika opierała się na czterech metodach optymalizacji, w tym na algorytmie genetycznym.

Przechodząc do uwag krytycznych, w dużej mierze dyskusyjnych, poniżej wymieniono ważniejsze z nich w kolejności ich powstawania podczas analizy niniejszej rozprawy doktorskiej:

1. W pracy znak równości postawiono pomiędzy stalą P91, T91 oraz X10CrMoVNb9-1. Nie jest to jednak dokładnie ten sam materiał, na co wskazuje choćby cytowana pozycja *ThyssenKrup Materials International* z 2011 roku. Znalazło to swoje odzwierciedlenie w różnych wartościach parametrów opisujących właściwości wytrzymałościowe stali P91 (Rozdział 2.1 – Tab. 2).
2. W badaniach nie wykorzystano próbek rurowych, natomiast materiał na próbki walcowe został pobrany z rury. Błędnie również określono część pomiarową próbki mianem „baza pomiarowa” (Rozdział 2.3).
3. W Rozdziale 2.4 wskazano, że badania przeprowadzono na 5 poziomach odkształcenia całkowitego oraz 5 poziomach naprężenia. Przywołana w tym miejscu Tab. 5 zawiera jedynie poziomy odkształcenia całkowitego. Brak jest zdefiniowanych poziomów naprężeń.
4. W Rozdziale 2.4.1 zamieszczono wyniki prób monotonicznego rozciągania. Próby te nie



były realizowane przy sterowaniu odkształceniem, na co wskazywałby tytuł tego rozdziału, w związku czym uzasadnione wydaje się umieszczenie tej części pracy w osobnym podrozdziale. Dobrze by było zestawić wyniki opracowania wykresów rozciągania (Rys. 13) z danymi literaturowymi poprzez umieszczenie ich w Tabeli 6. Autor pracy nie odniósł się do dużej rozbieżności w wynikach zamieszczonych w tej tabeli, a spowodowanych zapewne różnym kierunkiem pobierania próbek oraz różną grubością rury, z której pobrano materiał do badań. Pewnym utrudnieniem dla czytelnika pracy jest sposób podawania różnych wartości wyznaczonych parametrów jako ciągu liczb rozdzielonych ukośnikami wraz z oznaczeniem literowym źródła.

5. Na Rys. 19 oraz Rys. 23 wykres dla temperatury 400 °C kończy się bez wyraźnego przejścia od etapu II do etapu III. Wskazanie kryterium końca niskocyklowej próby zmęczeniowej lub odpowiedni komentarz mogłyby ułatwić interpretację zamieszczonych wyników.
6. Rys. 28 zawiera nieprawidłowe dane dla amplitudy odkształcenia całkowitego wynoszącego 0,25% i temperatury 20 °C (por. Tab. 7, Rys. 19, Rys. 30). Rysunek ten został również nieprawidłowo podpisany, gdyż prezentuje wyniki dla pięciu poziomów amplitudy odkształcenia całkowitego, a nie jedynie dla poziomu $\varepsilon_{ac} = 0,5\%$.
7. Na Rys. 37 prezentującym przesunięcie pętli histerezy dla wybranych cykli obciążenia o amplitudzie naprężenia $\sigma_a = 508$ MPa i temperatury 20 °C ostatnia pętla histerezy osiąga maksymalną wartość odkształcenia ε_c wynoszącą ok. 5%. Na Rys. 32 zmiana ε_{max} dla ostatniej pętli przekracza wartość 10%. Z czego to wynika? Podobne spostrzeżenie przynosi porównanie Rys. 38 i Rys. 39.
8. Tab. 13 przedstawia parametry wyznaczone dla „modelu (1)”, Tab. 14 dla „modelu (2)”, natomiast Tab. 15 dla „modelu (3)”. W pracy nie sprecyzowano czy parametry te wyznaczono dla wszystkich analizowanych poziomów amplitudy obciążenia całkowitego ε_{ac} , a tabele przedstawiają jedynie przykładowe wyniki ich szacowania, czy też wyznaczono je wyłącznie dla wybranych poziomów. Jeśli prawdziwe jest to ostatnie, to jakie było kryterium wyboru tych poziomów?
9. Opracowany w ramach pracy model matematyczny zawierał do 13 parametrów, których identyfikacja w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych jest wyjątkowo złożonym i trudnym zagadnieniem. Należy ona do szczególnie cennych fragmentów przedstawionej rozprawy i szkoda, że to zagadnienie nie zostało przedstawione szerzej. W znaczący sposób podniosłoby to jej użyteczną wartość.



10. W Rozdziale 4.6 przedstawiono weryfikację przedstawionych modeli. W Tab. 17 zamieszczono ich ocenę. Na jakiej podstawie jej dokonano? Czy była to jedynie ocena jakościowa, czy oparto się na jakimś kryterium weryfikacji?
11. Weryfikacja modeli została przeprowadzona w oparciu o dane dla tego samego poziomu amplitudy obciążenia całkowitego $\varepsilon_{ac} = 0,5\%$, na podstawie którego wyznaczono ich parametry otrzymując jakościowo dobrą zgodność. Czy opracowane modele tak samo dobrze opisują dane eksperymentalne dla innych poziomów ε_{ac} ?
12. Czy istnieje możliwość opracowania ilościowego kryterium dopasowania wyników obliczeń za pomocą poszczególnych modeli do wyników eksperymentalnych np. w oparciu o pole wyznaczonych pętli histerezy?

Redakcję przedstawionej pracy należy ocenić pozytywnie, chociaż niektóre elementy z pewnością mogłyby być przedstawione w sposób bardziej czytelny. Ważniejsze uwagi redakcyjne zamieszczono poniżej:

1. W zestawieniu oznaczeń i symboli zamieszczonych na początku pracy warto stosować formatowanie poprawiające czytelność i ułatwiające znajdowanie opisywanych oznaczeń przez Czytelnika pracy.
2. W pracy stosuje się zapis jednostek parametrów geometrycznych i materiałowych w nawiasach kwadratowych, co jest niezgodne z *Rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 5 czerwca 2020 r. w sprawie legalnych jednostek miar* (Dz.U. 2020 poz. 1024). Dotyczy to również pisania łącznego wartości liczbowej temperatury i jej jednostki, np. „650°C” zamiast „650 °C”, czy ilorazu oznaczeń jednostek, np. „33 W/mK” zamiast „33 W/(m·K)”.
3. W pracy często podaje się zakres wartości niektórych parametrów jako zestaw liczb rozdzielonych znakiem ukośnika np. „33/34%”, a w każdym razie podejrzewać można, że taka jest intencja Autora. Może to jednak wprowadzać czytelnika w błąd, gdyż taki zapis potraktować można jako zapis dotyczący dzielenia.
4. Błędnie w pracy zapisuje się liczebniki porządkowe, np. „w latach 70tych”. Po liczebnikach porządkowych zapisanych cyframi arabskimi stosuje się kropkę, a nie końcówki fleksyjne.
5. Na Rys. 12b błędnie oznaczono chropowatość powierzchni.
6. W Tab. 6 stosuje się różne separatory części dziesiętnej w zamieszczonych wynikach.
7. Brak linii dla poziomu 0,25% na Rys. 14.
8. Niejasny w pracy jest sposób wykorzystania oznaczenia „N” (por. Tab. 5, Rys. 16).



9. W legendzie na Rys. 28 zabrakło symbolu „%” przy poziomach amplitudy odkształcenia całkowitego.
10. Dobrym zwyczajem jest, w przypadku podziału równania na kilka wierszy, kończenie wiersza zawierającego fragment równania odpowiednim znakiem sygnalizującym jego kontynuację w wierszu następnym (np. (24)).
11. Zależność służąca do wyznaczania modułu Young’a zamieszczona na Rys. 53 może wprowadzać w błąd, gdyż w przypadku wyrażenia wartości odkształcenia ε^E w procentach, jak to sugeruje opis osi odciętych, otrzyma się 100-krotnie zaniżoną wartość tego modułu.
12. Brak jest korelacji pomiędzy oznaczeniami na Rys. 48 i jego podpisem.
13. Co oznaczają cyfry w indeksie amplitudy odkształcenia całkowitego zamieszczone w podpisach Tab. 13÷15?
14. Na Rys. 62 błędnie opisano najniższy poziom temperatury.
15. Na Rys. 65÷67 ostatnie pętle histerezy otrzymane eksperymentalnie przedstawiono za pomocą linii kropkowej a nie kreskowej. Dlaczego?
16. Wskazać należy, że zamieszczone w dodatkach do pracy listingi procedur są mało czytelne.

4. Podsumowanie

Na podstawie analizy przedstawionej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że analizy w niej zaprezentowane wykonane zostały na poziomie naukowym odpowiednim dla prac doktorskich. Zamieszczone w pracy uwagi krytyczne i redakcyjne, w dużej mierze dyskusyjne, mogą zostać wykorzystane przez Autora w realizacji przyszłych badań naukowych lub publikacji dotychczas uzyskanych wyników. Co najważniejsze nie obniżają one ogólnej pozytywnej oceny pracy.

Nie mam wątpliwości, że przedstawiona do recenzji praca spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim przez *Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach naukowych i tytule naukowym w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r.* (Dz.U. z 2016 r. poz. 882) i powinna być dopuszczona do publicznej obrony, a mgr inż. Piotr Jan Sulich może ubiegać się o stopień naukowy doktora w dziedzinie *nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna*.

