

Warszawa, 01.03.2019

Dr hab. inż. Zdzisław Nowak
Instytut Podstawowych Problemów Techniki
Polskiej Akademii Nauk
Zakład Teorii Ośrodków Ciągłych i Nanostruktur
ul. Adolfa Pawińskiego 5B
02-106 Warszawa

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Macieja Rysia (promotorstwa dr hab. inż. Haliny Egner, prof. PK) p.t.:

„Modelling of damage evolution in multiphase engineering materials”

Modelowanie rozwoju uszkodzeń w wielofazowych materiałach inżynierskich

Podstawą formalną opracowania jest pismo Pana Dziekana Wydziału Mechanicznego prof. dr hab. inż. Jerzego A. Sładka z dnia 29.11.2018 w zgodzie z uchwałą Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej z dnia 21 listopada 2018r. z prośbą o ocenę rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Rysia w dyscyplinie mechanika .

1. Obszar problemowy rozprawy

Tematyka przedłożonej do recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Rysia dotyczy ważnego obszaru badawczego w dziedzinie zachowania się metali w temperaturach kriogenicznych wykorzystywanych w przemyśle energetycznym i elektronicznym. Spośród metali stosowanych w takich temperaturach powszechne zastosowanie znalazły austenityczne nierdzewne stale AISI 304 oraz AISI 316L o niskiej granicy plastyczności i wysokiej granicy wytrzymałości na rozciąganie. Te dwa gatunki stali są materiałem badawczym i posłużyły, jako wzorcowe materiały w modelowaniu rozwoju deformacji plastycznych, uszkodzeń i przemian fazowych obserwowanych doświadczalnie. Stal AISI 304 i AISI 316L w warunkach temperatur kriogenicznych podlegają nieciągłemu płynięciu plastycznemu, przemianie fazowej austenitu (γ) w martenzyt (α') wywołanej odkształceniem, temperaturą, naprężeniem oraz powstawaniu mikrouszkodzeń. Procesy te przebiegają w sposób bardzo złożony i niestateczny i mogą przyspieszać proces zniszczenia elementów konstrukcyjnych. Cenne są próby opisu i opracowania modelu konstytutywnego, złożonego zachowania się materiałów z uwzględnieniem sprzężonych ze sobą zjawisk, wywołujących nieodwracalną zmianę struktury sieci krystalicznej przyspieszającą ich zniszczenie.

Rozpatrywana problematyka ma nie tylko znaczenie poznawcze, lecz również praktyczne, jakie niesie szerokie zastosowania najnowszych metod do modelowania i symulacji zjawisk zniszczenia nowych materiałów jak i elementów konstrukcji w niskich temperaturach.

Wybór tematyki rozprawy uważam za trafny, gdyż Autor w recenzowanej rozprawie, nie zaniedbuje żadnego etapu badań i skoncentrował swoją uwagę na zrozumieniu relacji pomiędzy złożonym zachowaniem się materiału i mechanizmami zniszczenia podczas obciążeń quasi-statycznych w temperaturach kriogenicznych. Uważam więc, że rozważane w dysertacji problemy są ważne i aktualne, zarówno dla teorii do rozwiązywania złożonych zagadnień naukowych, jak i przede wszystkim w zastosowaniach praktycznych.

2. Syntetyczny opis pracy

Przedłożona do recenzji praca mgr inż. Macieja Rysia p.t.: „Modelling of damage evolution in multiphase engineering materials”, została zrealizowana pod kierunkiem dr hab. inż. Haliny Egner, prof. PK.

Praca napisana jest w języku angielski i stanowi manuskrypt o łącznej objętości 82 stron. Tekst pracy podzielono na 7 rozdziałów uzupełnionych streszczeniem w języku angielskim i polskim, spisem rysunków i tabel oraz jednym dodatkiem wyjaśniającym podstawowe cechy algorytmu obliczeniowego dla obciążeń quasi-statycznych. Praca zawiera bogaty, przedstawiony na 7 stronach (strony 71-77) spis literatury.

W Rozdziale 1 określono cel i zakres pracy. Praca jest poświęcona analizie teoretycznej i numerycznej procesu pęknięcia w wielofazowych materiałach inżynierskich. Jako materiały do analiz przyjęto metastabilne nierdzewne stale austenityczne AISI 304 i AISI 316L odporne na korozję oraz posiadające ciągliwość nawet w bardzo niskich temperaturach. Stale te stosuje się, jako elementy elektromagnesów schładzanych do temperatur kriogenicznych używanych w szpitalach oraz w sprzęcie naukowym, takim jak spektrometry masowe, reaktory fuzyjne, akceleratory cząstek oraz w elementach powierzchniowych kompensatorów (metalowych miechów), łączników złączy dylatacyjnych. Mają one zastosowanie tam, gdzie występują ruchy termiczne lub drgania. Podczas tak różnych zastosowań przy różnych obciążeniach w stalach austenitycznych AISI 304 i AISI 316L, oprócz odkształceń plastycznych, zachodzą różne złożone zjawiska dyssypacyjne, które są przedmiotem badań.

W Rozdziale 2 dokonano przeglądu wiedzy i literatury z zakresu modelowania transformacji martenzytycznej spowodowanej odkształceniem plastycznym oraz przyczyn pęknięcia metali. W rozdziale tym omówiono rezultaty opublikowanych prac z współudziałem mgr inż. Macieja Rysia ściśle związanych z tematyką przedłożonej pracy doktorskiej.

W Rozdziale 3 przedstawiono szczegółowo model konstytutywny materiału dyssypatywnego, wykorzystując materiały opublikowane w pracach Egner i inni 2015a, Egner i Rys 2017 oraz z pracy będącej w druku: Ryś i Egner „Energy equivalence based constitutive model of austenitic stainless steel at cryogenic temperatures”, *Int. Journal of Solids and Structures*, 2019 (available online 3 January 2019).

Rozdział 4 poświęcony jest metodzie rozwiązania problemu quasi-statycznej deformacji materiałów dyssypacyjnych. W sformułowaniu zachowania się tych materiałów wykorzystuje się dwie wypukłe przecinające się powierzchnie plastyczności, dla opisu

pęknięcia ciągliwego i kruchego, co powoduje istnienie punktów osobliwych na granicy zakresu sprężystego. W celu rozwiązania układu nieliniowych równań algebraicznych tego problemu, zastosowano dwa algorytmy rzutowania powrotnego na poszczególne powierzchnie plastyczności. I tak dla sformułowania niewrażliwego na prędkość odkształcenia (rate-independent) zastosowano schemat Newtona-Raphsona. Natomiast w drugim algorytmie zastosowano regularyzację problemu niewrażliwego na prędkość odkształcenia poprzez uwzględniając wrażliwość na prędkość odkształcenia (problem rate-dependent), podobnie jak w pracach dotyczących plastyczności kryształów z możliwością występowania wielu kierunków poślizgu na powierzchni płynięcia. Przy takim sformułowaniu w materiale dyssypatywnym od początku procesu odkształcenia jest spełniony warunek obciążania, co ułatwia otrzymanie rozwiązania.

W Rozdziale 5 analizuje się dobór parametrów modelu dla przypadków pęknięcia quasi-kruchego (elasti-brittle model), pęknięcia sprężysto-ciągliwego, sprężysto-plastycznego z przemianą martenzytyczną oraz przypadek mieszany plastyczności, pęknięcia kruchego/ciągliwego oraz przemiany martenzytycznej.

W Rozdziale 6 przedstawiono sposób identyfikacji parametrów modelu w oparciu o dane doświadczalne dla próby osiowego obciążania i odciążania dla nierdzewnej stali AISI 304 i AISI 316L opublikowane w pracach Tabin i inni 2017, Garion i inni 2006 oraz Egner i Skoczeń 2010. Do identyfikacji wykorzystano podprogram ISIGHT komercyjnego programu metody elementów skończonych ABAQUS. Model materiału z ustalonymi parametrami dla stali AISI 304 wykorzystano do numerycznej symulacji osiowych cyklicznych obciążeń kompensatora typu-U o geometrii jak w pracy Skoczeń 2004. W symulacjach numerycznych określono rozkłady pęknięć i zawartość martenzytu w kompensatorze. Rezultaty dla rozkładu uszkodzeń z symulacji porównano z danymi doświadczalnymi opublikowanymi w pracy Garion i Skoczeń 2003.

W Rozdziale 7 dokonano podsumowania oraz omówiono najważniejsze elementy i osiągnięcia pracy.

Przedstawiona praca doktorska mgr inż. Macieja Rysia prezentuje model konstytutywny pęknięcia sprężysto-plastycznego materiału dwufazowego, jego implementację numeryczną oraz metodę identyfikacji parametrów modelu dla austenitycznej stali AISI 304 i AISI 316L. Autor analizuje bezdyfuzyjną transformację austenitu w martenzyt generowaną odkształceniem plastycznym i naprężeniem. Kolejnym analizowanym zjawiskiem dyssypacyjnym jest powstawanie i wzrost mikropęknięć i mikropustek generujących pęknięcie ciągliwe lub kruche materiału. Jako rezultat tych zjawisk stale austenityczne posiadają mikrostrukturę dwufazową z fazami o różnych własnościach termomechanicznych. Opracowany model zastosowano do symulacji numerycznej deformacji wybranego elementu konstrukcyjnego kompensatora. Sposób przedstawienia modelu materiału dyssypacyjnego o złożonej strukturze, przeprowadzenie obliczeń i porównania z danymi z doświadczeń opisanych w pracy jest dla mnie jasny i wystarczająco przekonujący.

3. Zakres prowadzonych badań

Wykorzystując sformułowanie termodynamiczne opracowano model konstytutywny materiału charakteryzującym się małym błędem ułożenia, takich jak nierdzewne stale austenityczne AISI 304 i AISI 316L. Model uwzględnia wzajemne powiązania i wpływ pomiędzy zjawiskami fizycznymi w jednolity sposób. W podejściu wykorzystuje się hipotezę ekwiwalentności energii całkowitej materiałów z uszkodzeniami oraz przemianami fazowymi. Bazuje się na konfiguracji rzeczywistej w mikroskali z mikrouszkodzeniami i z równorzędną konfiguracją w mesoskali materiału bez uszkodzeń, jednolitego (bez rozdziału faz). Transformacja ciała rzeczywistego z uszkodzeniami do nowej konfiguracji ciała bez uszkodzeń służy do zdefiniowania efektywnych zmiennych uszkodzenia oraz tensora wpływu. Pozwala to uwzględnić szereg zjawisk dyssypacyjnych w ramach tego samego formalizmu termodynamiki. W celu uwzględnienia anizotropii indukowanej mikropustkami, mikropęknięciami i tworzeniem się twardych cząstek martenzytu w procesie deformacji materiału, wprowadzono do opisu odpowiednie dla tych zjawisk tensory drugiego rzędu. Mikropęknięcia w miękkiej „ciągliwej” fazie austenitu są opisane modelem anizotropowym, poprzez uogólnienie klasycznego izotropowego modelu Lemaitre. W modelu anizotropowym tensor prędkości pęknięcia ciągliwego zależy od części tensora prędkości uwalniania gęstości energii odkształcenia a nie od całości tego tensora tak jak założono w oryginalnym modelu. Ponadto w proponowanym modelu pęknięcia ciągliwego uwzględnia się efekt wynikający z uszkodzeń generowanych stanem naprężenia w twardych cząsteczkach martenzytu. W tym celu wprowadzono do modelu powierzchnie kruche pęknięcia w oparciu o pozostałą część tensora prędkości uwalniania gęstości energii odkształcenia.

W pracy przyjęto, że całkowite zniszczenie materiału jest wynikiem pęknięcia ciągliwego i kruche a ich udział w superpozycji zależy od wielkości liczbowej określonej przez wielkość zmiennej opisującej transformację austenitu w martenzyt. Takie podejście pozwala w sposób naturalny na opisanie różnych wzajemnych oddziaływań pomiędzy prędkością powstawania mikrouszkodzeń i prędkością tworzenia się fazy martenzytu. Uwzględnia się w ten sposób wpływ objętościowy udziału fazy martenzytu na zmianę prędkości pęknięć ciągliwych lub na mniejszą lub większą dominację pęknięć kruchych.

Model materiału został zbudowany przy założeniu, że:

- materiał składa się z matrycy austenitycznej podlegającej odkształceniom ciągliwym, oraz losowo rozłożonych wtrąceniach martenzytu o kształcie elipsoidalnych cząstek pękają w sposób kruchy a w obydwu fazach mikrouszkodzenia opisane są tensorem drugiego rzędu,
- materiał w temperaturach kriogenicznych podlega deformacji quasi-statycznej z pomijalnym wpływem prędkości odkształcenia,
- w zakresie temperatur 4 - 77 K odkształcenia są małe,
- przyjęto wzmocnienie materiału jako izotropowo-kinematyczne z uwzględnieniem wpływu cząstek martenzytu,
- dwufazowy materiał podlega stowarzyszonemu prawu płynięcia.

4. Ocena Rozprawy doktorskiej

Wkładem autora w rozwój mechaniki jest opracowanie i zweryfikowanie modelu konstytutywnego materiału wielofazowego, co umożliwi projektowanie i przewidywanie procesu degradacji własności mechanicznych elementów konstrukcyjnych przy ekstremalnych temperaturach. W przypadku recenzowanej pracy Autor zajął się deformacjami plastycznymi, pękaniem ciągliwym i kruchym oraz przemianą martenzytyczną nierdzewnej stali austenitycznej AISI 304 i AISI316L w temperaturach kriogenicznych.

Najważniejsze moim zdaniem wyniki Autora (Rozdziały 3, 4 i 6) pokazują, że proponowany nowy model materiału wielofazowego istotnie może być użyty, jako model materiałów pracujących w temperaturach kriogenicznych. Uwzględnienie trzech zjawisk dyssypacji energii w proponowanym modelu i przeprowadzona identyfikacja parametrów pozwoliła na otrzymanie zadawalającej zgodności przebiegu krzywych naprężenie-odkształcenie dla stali AISI 304 i AISI 316L w próbie osiowego rozciągania w temperaturze 4.2 K (-268.96 °C). Opracowany model zastosowano do symulacji numerycznej procesu osiowego cyklicznego deformowania kompensatorów ze stali austenitycznej. Z wykresów rysunków 6.3a-b, 6.4a-b, 6.5a-b widać, że model zawiera sprzężenie między trzema zjawiskami dyssypacyjnymi: plastycznym płynięciem, przemianą fazową oraz rozwojem uszkodzeń. Autor uzyskał dobrą zgodność opracowanego modelu z wynikami badań doświadczalnych deformowanych kompensatorów.

Przedstawione w pracy wyniki zostały opublikowane w czasopiśmie z listy filadelfijskiej. Poprawność treści pracy oraz stwierdzenia w niej zawarte wydają się być godne zaufania, co wynika w szczególności z uzasadnień, popartych wynikami przeprowadzonych badań doświadczalnych. Również moja opinia o bibliografii wykorzystanej w pracy oraz jej kompletności jest pozytywna, co również nie wyklucza uwag krytycznych.

Mgr inż. Maciej Ryś podjął się zadania polegającego na opracowaniu, i weryfikacji nowego modelu zachowania się materiału w zakresie temperatur kriogenicznych. W szczególności, Autor zajął się technicznie ważnym badaniem deformacji stali austenitycznych w temperaturach kriogenicznych. Zastosowany w pracy model nawiązuje do modeli plastyczności metali z uwzględnieniem pękania lub plastyczności z przemianą martenzytyczną znanych w literaturze. Tematyka pracy doktorskiej jest więc adekwatna z punktu widzenia możliwych zastosowań, szczególnie w kontekście quasi-statycznych obciążeń.

Sformułowane przez Autora cele zostały osiągnięte, a wyniki pracy przedstawiono w formie klarownej i uporządkowanej. Zwraca uwagę przejrzystość struktury pracy oraz warto także podkreślić sprawne poruszanie się przez Autora w literaturze światowej, oraz stosunkowo dużą liczbę cytowanych pozycji literaturowych w zakresie problematyki poruszanej w pracy doktorskiej.

Oprócz wielu walorów i mocnych stron Rozprawa zawiera jednak elementy skłaniające do polemiki lub budzące wątpliwości, które przedstawiono jako uwagi krytyczne natury ogólnej i szczegółowej.

4.1 Uwagi krytyczne natury szczegółowej

Stronia 28, pierwsze zdanie Podrozdziału 3.3 jest niejasne.

Strona 51, ostatni akapit opisujący przejście z opisu wrażliwego na prędkość odkształcenia poprzez wartości parametru m do modelu niewrażliwego na prędkość wymaga sprecyzowania.

Strona 62, odwołanie do rysunku 6.2 jest niewłaściwe.

Strona 64, ostatnie zdanie na dole, odwołanie do Rozdziału 1.2 jest niewłaściwe.

Rysunek 5.9a i 5.9b przedstawiają rezultaty dla wzmocnienia izotropowego i kinematycznego w funkcji odkształcenia niesprężystego ε_{11} . Dlaczego dla wzmocnienia izotropowego rezultaty przedstawiono dla tak dużych wartości odkształcenia niesprężystego.

4.2 Uwagi krytyczne natury ogólnej

Metoda identyfikacji parametrów (Rozdział 6) jest przedstawiona w zbyt zwięzły sposób i wymaga podania dodatkowych informacji. Wynik identyfikacji parametrów zależy od przyjętych wartości początkowych i założonego przedziału dopuszczalnych zmian wartości parametrów. Postać minimalizowanego funkcjonału błędów i kryterium stopu procedury minimalizującej są równie istotne. Brakuje uzasadnienia, dlaczego wybrano dany zestaw parametrów materiałowych. Wszystkie te szczegóły musiały być określone w momencie uruchomienia podprogramu ISIGHT i Doktorant zapewne ma świadomość ich wagi jednak je pominał. Do identyfikacji wykorzystuje się trzy typy danych doświadczalnych jednak odwołanie się do nich na stronie 62 jest niewłaściwe. Dane te zamieszczono w pracy na rysunku 6.3 i 6.4 dopiero na stronach 64 i 65.

Równie skromnie jest opisany proces numerycznej symulacji obciążania i deformacji kompensatora z wykorzystaniem programu ABAQUS w Rozdziale 6.3. Schemat warunków brzegowych, rodzaj elementów i sposób obciążania zapewne można omówić bardziej precyzyjnie.

Model zniszczenia stali austenitycznej zapewne można poprawić lub zmodyfikować. Doktorant ma dużą wiedzę w tym zakresie. Wartościowym wzbogaceniem pracy byłoby podanie informacji o nieniszczących metodach doświadczalnych określania objętościowego udziału faz przed i po deformacji.

5. Dobór literatury

Doktorant zacytował w pracy wiele pozycji literaturowych obejmujących problematykę związaną z treścią pracy. Doktorant w pracy zamieszcza materiały, które były opublikowane przez niego w innych pracach jednak wszędzie powołuje się na te pozycje. Warto także podkreślić sprawne poruszanie się przez Autora w literaturze światowej, oraz stosunkowo dużą liczbę cytowanych pozycji literaturowych w zakresie problematyki poruszanej w pracy doktorskiej.

6. Wniosek końcowy

Cel rozprawy został jasno sprecyzowany. Doktorant poprawnie sformułował zagadnienie i poprawnymi metodami je rozwiązał i zinterpretował. Rozwiązania są nowe, a rezultaty interesujące. Mają duże znaczenie poznawcze, a również znaczenie przy zastosowaniach przemysłowych. Mają znaczenie dla właściwego zrozumienia zachowania się stalowych elementów konstrukcyjnych w bardzo niskich temperaturach. Pozwalają na racjonalne projektowanie takich elementów.

Praca stanowi istotny i oryginalny wkład Autora w rozwój metod nieliniowego modelowania zachowania się materiałów z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

Wysoko oceniam komplementarność całego przedsięwzięcia badawczego, obejmującego stworzenie analitycznego modelu zjawiska, precyzyjnego modelu numerycznego oraz weryfikację doświadczalną tych modeli. Istotną rolę odgrywa tu wykorzystanie przez Autora swego bogatego dorobku w zakresie modelowania polegającego na wprowadzeniu do opisu zjawiska kilku parametrów nieznanych, opisujących wielkości obdarzone największym stopniem niewiedzy i ich identyfikacja, jako miara rozbieżności odpowiedzi modeli: numerycznego i doświadczalnego.

Praca ma charakter nowoczesny, zawiera mocne podłoże teoretyczne i wartościową numeryczną analizę zachowania się kompensatora ze stali AISI 304. Wymiar użyteczny pracy jest godny podkreślenia. Wyniki pracy mogą być wykorzystane do przewidywania zachowania się stali austenitycznych w temperaturach kriogenicznych. Wyrażone powyżej uwagi krytyczne nie umniejszają wartości pracy, służą jedynie pogłębieniu jej klarowności i wyjaśnieniu wątpliwości wynikających z nieprecyzyjnych sformułowań lub skrótowego ujęcia.

Różne sposoby powstawania i wzrostu pęknięć posiada bogata literatura w postaci setek publikacji oraz wielu opracowań monograficznych. Choć bardzo wiele już zrobiono, zagadnienia te nie są do końca poznane i wymagają jeszcze wielu prac badawczych. Należy pozytywnie ocenić bogaty przegląd aktualnego stanu wiedzy w zakresie opisu przemiany martenzytycznej i powstałych mikrouszkodzeń, biegłość doktoranta przy przeprowadzeniu obliczeń numerycznych oraz fakt, że rozprawa napisana jest starannie pod względem redakcyjnym.

Teza postawiona w pracy została wykazana w sposób jakościowy i została zweryfikowana doświadczalnie. Uzyskane wyniki są istotne dla opisanego procesu zachowania

się stali AISI 304 oraz AISI 316L przy obciążeniach quasi-statycznych w temperaturach kriogenicznych i zostały opublikowane w pracach z listy filadelfijskiej. Rozprawa prezentuje dobry poziom naukowy i zawiera oryginalne treści naukowe. Stwierdzam zatem, że stanowi ona wartościowe, oryginalne i godne uwagi studium z zakresu mechaniki.

Wnioski wyciągnięte z analizy przedłożonej rozprawy jednoznacznie upoważniają mnie do stwierdzenia, że w świetle obowiązującej Ustawy o stopniach i tytułach naukowych spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i stanowi ona podstawę do ubiegania się o nadanie stopnia Doktora Nauk Technicznych.

Wnoszę o przyjęcie Rozprawy mgr inż. Macieja Rysia i dopuszczenie Kandydata do publicznej obrony pracy doktorskiej.

SNOWAK