

Prof. dr hab. inż. Mieczysław Kuczma
Instytut Konstrukcji Budowlanych
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań

Poznań, 20.01.2019r.

e-mail: mieczyslaw.kuczma@put.poznan.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. **Macieja RYSIA**

pt.: **Modelling of damage evolution in multiphase engineering materials**

Modelowanie rozwoju uszkodzeń w wielofazowych materiałach inżynierskich

Podstawa opracowania:

Powołanie na recenzenta przez Radę Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej;
pismo Dziekana Mechanicznego Politechniki Krakowskiej – prof. dr. hab. inż. Jerzego
Ślodka, datowane z dnia 29. listopada 2018r.

1. Przedmiot i ogólna charakterystyka pracy

Praca doktorska mgr. inż. Macieja Rysia napisana jest w języku angielskim i zawiera krótkie streszczenie w j. polskim. Przedmiotem pracy jest modelowanie złożonych, sprzężonych procesów deterioracyjnych i przemiany fazowej struktury austenitycznych stali nierdzewnych typu 304 i 316L. Stale te są nie tylko nierdzewne i kwasoodporne (316L), ale cechują się też dobrymi właściwościami mechanicznymi: wysoką wytrzymałością na rozciąganie (rzędu 500 MPa) i dużą ciągliwością (odkształcalnością), a stal 316L jest ponadto odporna na działanie wysokich temperatur. Stale te znajdują różnorakie zastosowania w szerokim zakresie temperatur, m.in. na zbiorniki ciśnieniowe, pojemniki i rury na korozyjne płyny lub substancje chemiczne, jako elementy konstrukcyjne w przemyśle samochodowym. Autor koncentruje swoją uwagę w szczególności na zastosowaniach w zakresie temperatur niskich i kriogenicznych. W przedstawionym modelu teoretycznym, który zbudowany jest w ramach termodynamiki procesów nieodwracalnych ze zmiennymi wewnętrznymi (ukrytymi), Autor



uwzględnia sprzężenia procesów rozwoju plastycznych odkształceń i przemiany fazowej (TRIP – Transformation-induced plasticity) jak również ewolucji uszkodzeń w powstającym ośrodku dwufazowym, w którym zachodzi przemiana fazowa z austenitu (γ) w martenzyt (α') pod wpływem działania obciążeń mechanicznych.

Tematyka badawcza pracy jest aktualna i użyteczna z praktycznego punktu widzenia. Analizowane procesy deformacyjne cechują się wysokim stopniem złożoności. Autor stosuje wyrafinowane koncepcje termodynamiki do sformułowania problemu i nowoczesne metody komputerowe do identyfikacji parametrów materiałowych i analizy numerycznej zagadnień brzegowych.

Rozprawa liczy 80 stron, podzielona jest na 7 numerowanych rozdziałów, zawiera nienumerowane: Abstract, Streszczenie, Spis literatury (References; 99 pozycji, wszystkie w j. ang.) i jeden załącznik. Rozdziały wprowadzające, pierwszy i drugi, mają charakter pomocniczy a główną część pracy stanowią rozdziały od trzeciego do szóstego (str. 22 – 68), w których Autor przedstawia związki konstytutywne modelu materiału o wielu mechanizmach dyssypacyjnych. Część wyników przedstawionych w rozprawie została już opublikowana jako jednoautorskie publikacje Doktoranta oraz artykuły w renomowanych czasopismach, których współautorami są promotor pracy, dr hab. inż. Halina Egner prof. PK, i prof. dr hab. inż. Błażej Skoczeń.

Układ rozprawy jest klarowny i logicznie poprawny. Praca napisana jest zwięźle. Redakcja pracy jest staranna (recenzent zauważył tylko nieliczne pomyłki językowe lub edytorskie). Lektura pracy wskazuje na dobre przygotowanie Doktoranta do prowadzenia badań naukowych na wysokim poziomie z wykorzystaniem zaawansowanego aparatu rachunku tensorowego i koncepcji mechaniki ośrodków ciągłych.

2. Opis i ocena rozprawy

W rozdziale 1., zatytułowanym *Aim and scope of work*, Autor przedstawia przedmiot pracy jako teoretyczne i numeryczne badania dyssypacyjnych procesów odkształceniowych w wielofazowych materiałach inżynierskich. Uwagę koncentruje głównie na austenitycznych stalach typu 304 i 316L, traktowanych jako materiały dwufazowe, w których pod obciążeniem mechanicznym mogą zachodzić trzy sprzężone procesy dyssypacyjne: (1) powstawanie i rozwój odkształceń plastycznych, (2) przemiana fazowa z pierwotnej fazy (austenitu) do nowo powstałej fazy (martenzytu) oraz, (3) degradacja struktury materiału –



powstawanie nieciągłości (pustek, mikropęknięć). Zaproponowany model uwzględnia dwa odmienne mechanizmy degradacji struktury: uszkodzenia typu ciągliwego w fazie austenitu i uszkodzenia typu kruchego w fazie martenzytu.

Autor wymienia następujące cele pracy:

1. Opracowanie modelu konstytutywnego sprężysto-plastycznych uszkodzeń materiału dwufazowego
2. Implementacja numeryczna zaproponowanego modelu
3. Identyfikacja parametrów modelu dla nierdzewnych stali typu 304 i 316L
4. Symulacje numeryczne wybranych elementów konstrukcyjnych.

Rozdział drugi – *State of the art and literature survey*, zawiera przegląd stanu wiedzy w dziedzinie tematu rozprawy. Autor omawia wieloskalowość opisu procesów zachodzących w analizowanym materiale, odwołując się do koncepcji reprezentatywnego elementu objętościowego (ang. RVE). Uzasadnia konieczność wyróżnienia dwóch mechanizmów rozwoju uszkodzeń struktury austenitycznych stali z efektem TRIP, tj. typu ciągliwego i kruchego przywołując wyniki badań, w tym także eksperymentalnych, które otrzymali inni autorzy.

W rozdziale trzecim – *Constitutive model of a multi-dissipative material*, który stanowi główną część pracy, Doktorant przedstawia proponowany model konstytutywny materiału o wielu mechanizmach dyssypacyjnych. Rozpatrywane są dyssypacyjne procesy deformacyjne przebiegające w izotermicznych warunkach i przy małych odkształceniach. Doktorant stosuje ogólne podejście w ujęciu termodynamiki procesów nieodwracalnych i koncepcję stanu lokalnego. Proponowany model bazuje na głównym założeniu, że ciągliwe uszkodzenia matrycy materiału (austenitu) i przemiana fazowa są kontrolowane rozwojem efektów plastycznych, które opisane są pojedynczą uogólnioną powierzchnią plastyczności z mieszanym wzmocnieniem izotropowo/kinematycznym. Z kolei, ewolucja uszkodzeń kruchych nowej fazy (martenzytu) regulowana jest oddzielną powierzchnią uszkodzeń z izotropowym wzmocnieniem. Rozwój uszkodzeń materiału opisany jest tensorami drugiego rzędu $\mathbf{D}^d$ (uszkodzenie ciągliwe) i $\mathbf{D}^b$ (uszkodzenie kruche), co pozwala uwzględnić anizotropowy charakter tego procesu.

Do wyznaczenia efektywnych stałych materiału odkształconego plastycznie, będącego mieszaniną austenitu i martenzytu z (częściowo) uszkodzoną strukturą, Doktorant zastosował hipotezę o równoważności całkowitej energii. W transformacji rzeczywistej konfiguracji (R)

dwufazowego materiału o uszkodzonej strukturze na konfigurację fikcyjnego zastępczego materiału ($\hat{F}$), wyróżnia trzy koncepcyjne drogi: (1) bezpośrednie przejście przy połączeniu efektów uszkodzeń i przemiany fazowej, lub poprzez wyróżnione dwie konfiguracje pośrednie: (2) konfigurację $\hat{I}_1$, w której materiał jest dwufazowy ale bez uszkodzeń, albo (3) konfigurację $\hat{I}_2$, w której materiał jest jednofazowy ale z uszkodzeniami. Zakłada się, że każda z w/w dróg prowadzi do tej samej finalnej konfiguracji materiału fikcyjnego o tych samych efektywnych właściwościach. Standardowe podejście termodynamiki procesów nieodwracalnych pozwala uzyskać równania stanu materiału, uzupełnione o zależności definiujące zmienne stanu, które określają uwzględniane, niezależne od czasu procesy dyssypacyjne: plastyczne płynięcie, ciągliwe uszkodzenie, przemianę fazową i kruche uszkodzenie. Procesy dyssypacyjne opisane są odpowiednio: potencjałem plastycznym, potencjałem ciągłych uszkodzeń, potencjałem przemiany fazowej, oraz potencjałem kruchych uszkodzeń fazy martenzytycznej. Odształcenia niesprężyste składają się z czterech składników: plastycznych, wywołanych uszkodzeniem ciągłym, uszkodzeniem kruchym, i przemianą fazową. Prawa ewolucji poszczególnych składowych odształceń oraz innych zmiennych wewnętrznych modelu, przyjęto jako wynikające z reguły normalności do powierzchni potencjałów. Założono przy tym, że uwzględniane cztery mechanizmy dyssypacji są kontrolowane za pomocą dwóch mnożników $\dot{\lambda}^p$ i $\dot{\lambda}^b$, które z definicji powinny być nieujemne i spełniać warunki obciążenia/odciążenia (warunki komplementarności). Włącznikiem/wyłącznikiem ewolucji odształceń plastycznych, odształceń wywołanych ciągłym uszkodzeniem struktury austenitu i odształceń przemiany fazowej jest mnożnik $\dot{\lambda}^p$, natomiast ewolucję odształceń wywołanych kruchym uszkodzeniem, które występują tylko w martenzycie, włącza i wyłącza mnożnik $\dot{\lambda}^b$. Na zakończenie trzeciego rozdziału Autor podaje wzór na moduł styczny (dokładniej – jego odwrotność) materiału sprężysto-plastycznego z uszkodzeniami i przemianą fazową, w którym wyróżnia cztery przypadki w zależności od kombinacji wartości zerowej lub dodatniej mnożników $\dot{\lambda}^p$ i $\dot{\lambda}^b$.

W rozdziale czwartym, *Numerical approach – a fully implicit backward Euler scheme*, Doktorant przedstawia dwa algorytmy numeryczne do rozwiązania badanego nieliniowego zagadnienia, które związane jest z rzutowaniem na zbiór wypukły, dokładniej na dwie wypukłe powierzchnie graniczne plastyczności i uszkodzeń. Opracowany model zachowania się materiału, jest niezależny od czasu w sensie szybkości procesu odształcania (ang. rate independent), ale zależy od kolejności zdarzeń (ang. path dependent). Pierwszy algorytm

oparty jest na metodzie Newtona-Raphsona, natomiast drugi algorytm bazuje na modelu zależnym od szybkości procesu odkształcania, który w sensie matematycznym wprowadza regularyzację pierwszego algorytmu. Proces deformacji ciała analizowany jest przyrostowo i na każdym przyroście stosuje się iteracyjny algorytm składający się z dwóch etapów: najpierw „sprężysty predyktor”, potem „plastyczny korektor” (elastic predictor–plastic corrector), przy czym w etapie drugim aktualizowane są nie tylko aspekty plastyczne, ale także te związane z uszkodzeniem materiału i przemianą fazową. Doktorant trafnie wskazuje tutaj na pułapki i trudności przy wyznaczeniu które ze zmiennych procesu są aktywne a które nieaktywne. Trudności te spowodowane są głównie przez warunkami obciążenie/odciążenie, które zawierają nierównościowe ograniczenia, które regulują ewolucje wielkości związanych z mechanizmami dyssypacyjnymi.

W rozdziale 5. – *Parametric studies*, Autor przedstawia wyniki analiz parametrycznych trzech odosobnionych przypadków szczególnych: model sprężysto-kruchy, model sprężysto-plastyczny z ciągłymi uszkodzeniami w odniesieniu do modelu sprężysto-plastycznego z przemianą fazową (przy pominięciu kruchych uszkodzeń w martenzycie), oraz jako trzeci przypadek model plastyczności, mieszanego ciągłego/kruchego uszkodzenia i przemiany fazowej. Jak pokazują otrzymane wyniki analiz zilustrowane wieloma wykresami, dotyczące lokalnego zachowanie się cząsteczki materiału (zachowanie w punkcie materialnym), przebieg zależności naprężenie-odkształcenie jest nieliniowy i w sposób istotny może być sterowany parametrami modelu, których wartości wpływają też na wzajemne interakcje procesów dyssypacyjnych.

Rozdział szósty – *Identification of model parameters for 316L and 304 stainless steels*, zawiera wyniki kalibracji parametrów modelu stali 316L i 304 na podstawie laboratoryjnych jednowymiarowych testów rozciągania z odciążaniem. Identyfikację parametrów wykonano w programie Isight. Otrzymane wyniki zilustrowano wykresami a wyznaczone parametry modelu zestawiono w tabeli (Tab. 6.1). W tym rozdziale Doktorant przedstawia także wyniki symulacji fragmentu elementu konstrukcyjnego w postaci kompensatora ze stali nierdzewnej 304, pracującego w warunkach niskich temperatur. Założono izotropowy model uszkodzeń. Uzyskane wyniki dobrze pokazują rozkład charakterystycznych wielkości w kompensatorze, tj. mnożników λ^p i λ^b , uszkodzeń D i frakcji martenzytycznej ξ , po 100 cyklach wymuszenia kinematycznego. Szkoda, że Doktorant nie podał tutaj informacji na temat przeprowadzonych obliczeń, przede wszystkim, jakie elementy skończone zastosował do dyskretyzacji elementu konstrukcyjnego i jaki użył algorytm do rozwiązywania tego zagadnienia brzegowego.

Rozdział siódmy – *Summary*, stanowi podsumowanie przeprowadzonych badań.

Załącznik A zawiera wybrane wyniki przykładowej symulacji obciążania kwadratowej tarczy wymuszeniem kinematycznym. Tarczę stanowi jeden czworoboczny element skończony o liniowych funkcjach kształtu. Wykresy obrazują iteracyjny proces wyznaczania mnożników λ^p i λ^b (legends wykresów na rys. A.5b i A.6b zawierają błędnie opisane mnożniki), który jak widać cechuje się dużą złożonością wskutek nierównościowych ograniczeń i sprzężeń między mechanizmami dyssypacyjnymi.

Ocena merytoryczna i uwagi

Podsumowując, na podstawie szczegółowej lektury rozprawy i wyżej przedstawionego opisu jej treści i zakresu, chciałbym podkreślić wysoki stopień złożoności zaproponowanego modelu deformacji dwufazowego ośrodka o wielu mechanizmach dyssypacyjnych. Głównym oryginalnym elementem pracy jest, moim zdaniem, jednolite ujęcie na gruncie termodynamiki procesów nieodwracalnych kilku sprzężonych procesów dyssypacyjnych. Na uwagę zasługuje także zakres pracy, obejmujący sformułowanie teoretyczne modelu, propozycje algorytmów do wyznaczania rozwiązań numerycznych oraz opracowanie procedur komputerowych (procedura VUMAT do programu ABAQUS/Explicit bazującego na metodzie elementów skończonych) i symulacje komputerowe kilku przykładowych zadań. Lektura pracy wskazuje na dużą samodzielność i pasję badawczą Doktoranta.

Dokładna lektura tekstu rozprawy skłania też do przedstawienia uwag, które wskazują na pewne pomyłki edycyjne lub aspekty, które wymagałyby dodatkowych wyjaśnień lub komentarza ze strony Autora:

1. Brakuje formalnego sformułowania tezy pracy.
2. Czym podyktowane jest przyjęte założenie (str. 22), że ilość nowej fazy (martenzytu) nie przekracza 80-90%?
3. Co oznaczają równości trzecie i czwarte w równaniach (3.22)-(3.24) wobec pierwszych i drugich równości w tych równaniach?
4. Zapis $\int_t f dt$, np. na str. 36, 59, 64, gdzie f oznacza funkcję podcałkową, nie jest zgodny z przyjętą konwencją.

5. Stwierdzenie na str. 47 powyżej wzoru (4.20): „The total strain, ϵ_j , at the current time step is also known...” jest nieprecyzyjne i może wprowadzać zamieszanie, lepiej byłoby je zamienić np. na ‘...is assumed to be known...’
6. Wyjaśnienia wymaga podany przez Doktorant fakt, że z jednej strony stosuje program ABAQUS/Explicit a w rozdziale czwartym i w załączniku A omawia w pełni niejawną schemat (ang. fully implicit backward Euler scheme) rozwiązywania zadania.
7. Wyniki analiz parametrycznych w rozdziale piątym są interesujące, jednak opisy analizowanych przypadków są niewystarczające, aby czytelnik mógł jednoznacznie stwierdzić, jakie dokładnie zadania zostały rozwiązane. Doktorant nie podaje jakie układy wszystkich równań i nierówności definiujących dany przypadek rozwiązywał, jakie algorytmy z wcześniej omówionych zastosował. Rozpatrywane są tu bowiem przypadki szczególne, a wówczas ogólne zależności definiujące proponowany model, które podane są w poprzednich rozdziałach, ulegają uproszczeniu. Brak tych informacji utrudnia czytelnikowi analizę przedstawionych wyników i ocenę wpływu wzajemnych interakcji poszczególnych składowych modelu. Uwagi te odnoszą się także w znacznej mierze do rozdziału szóstego.
8. W pracy, m.in. we wzorze (3.8) i na rysunkach 6.4 i 6.5 przedstawiających wyniki symulacji komputerowych użyto oznaczenia RVE (ang. representative volume element). Co dokładnie Doktorant rozumie pod pojęciem RVE?
9. Recenzent zauważył kilkanaście literówek/błędów językowych, z których tylko na jeden chciałby tutaj zwrócić uwagę Doktoranta: zwroty „...it allows to achieve...(str. 25), „...employing the fully implicit backward Euler scheme allows to rewrite...(str. 46), „Solving ... allows to obtain...(str. 50), i podobne w innych miejscach w pracy, są gramatycznie niepoprawne – poprawna składnia w tym przypadku jest następująca: ‘to allow somebody/something to do something’.

Chcę jednak wyraźnie zaznaczyć, że poczynione uwagi i pytania nie obniżają mojej wysokiej oceny rozprawy. Uważam, że Doktorantowi udało się pomyślnie zrealizować trudne cele rozprawy, które sformułował na początku pracy.

3. Wniosek końcowy

Reasumując całość stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Rysia stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i potwierdza Jego dużą wiedzę w dziedzinie mechaniki materiałów i konstrukcji, spełnia tym samym wymóg art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Aktualność i złożoność tematyki rozprawy, zakres i praktyczną użyteczność badań oceniam wysoko. Autor pracy wykazał, że posiada rozległą wiedzę w zakresie teoretycznego opisu i komputerowej symulacji złożonych procesów deformacyjnych materiałów wielofazowych, ulegających sprzężonym procesom dyssypacyjnym rozwoju odkształceń plastycznych i przemian fazowych oraz uszkodzeń mikrostruktury materiału. Zamieszczone wyniki analiz numerycznych dobrze ilustrują umiejętności i wiedzę Doktoranta, a jednocześnie wskazują na dużą złożoność i specyfikę badanych procesów deformacyjnych oraz trudności wyznaczania rozwiązania badanych zagadnień brzegowych.

Stawiam wniosek o przyjęcie pracy i dopuszczenie Kandydata do publicznej obrony i ubiegania się o stopień naukowy doktora w dyscyplinie *Mechanika*.



prof. Mieczysław Kuczma