

Gdańsk, 28.12.2022

dr hab. inż. Ireneusz Marzec, prof. PG  
Katedra Konstrukcji Inżynierskich  
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska  
Politechnika Gdańska  
ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk  
e-mail: ireneusz.marzec@pg.edu.pl

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marzeny Muchy pt. *„Influence of rate-dependence on unstable material response in large strain thermo-plasticity”*

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę formalną wykonania recenzji stanowi pismo nr L0.510.29.4.2018 z dnia 25.10.2022, wystosowane przez Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej, prof. dr hab. inż. Andrzeja Szarotę, w którym informuje o powołaniu mnie przez Radę Naukową Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej na recenzenta w przewodzie doktorskim mgr inż. Marzeny Muchy.

### 2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pod tytułem *„Influence of rate-dependence on unstable material response in large strain thermo-plasticity”*. Tytuł w języku polskim: *„Wpływ prędkości procesu na niestateczne zachowanie materiału w termoplastyczności przy dużych odkształceniach”*. Rozprawa przygotowana na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej przez Panią mgr inż. Marzenę Muchę. Promotorem przedstawionej do recenzji pracy jest Pan prof. dr hab. inż. Jerzy Pamin.

DZIEKANAT  
Wydziału Inżynierii Lądowej

Wpłynęło dnia 03. STY. 2023

L. dz. 60. 510. 29. 6. 2018

podpis [signature]

[signature]

### 3. Opis ogólny rozprawy

Recenzowana rozprawa składa się z 9 Rozdziałów, Streszczenia i Szczegółowego streszczenia w języku polskim. Praca zawiera 136 stron, w tym 110 rysunków, 11 tablic oraz bibliografię.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do badanego problemu lokalizacji deformacji w metalach i stopach metali. Opisane zostały charakterystyczne dla tego typu materiałów zjawiska towarzyszące procesowi deformacji: propagujący front deformacji zlokalizowanych w postaci pasm Luedersa a także efekt Portevin-Le Chatelier (PLC) charakteryzujący się przemieszczającymi, zanikającymi i pojawiającymi się pasmami deformacji zlokalizowanych oraz tzw. seracjami czyli naprzemiennie występującym osłabieniem i wzmocnieniem na wykresie siła–przemieszczenie. W dalszej części rozdziału zawarto przegląd literatury obejmujący zarówno aspekty badań eksperymentalnych jak również modeli materiałowych i symulacji numerycznych dla przedmiotowych zjawisk. W rozdziale zostaje także zdefiniowany cel pracy jakim jest modelowanie zjawisk lokalizacji w materiałach termo-plastycznych oraz wskazane zostają aspekty świadczące o nowości i oryginalności prowadzonych badań.

Rozdział 2 poświęcony jest opisowi modeli dla dużych deformacji ze sprzężeniem termo-mechanicznym lub bez niego. Przedstawione zostały podstawowe założenia dla modeli wykorzystujących trzy różne funkcje plastyczności: Hubera-Misesa-Hencky'ego (HMH), Burzyńskiego-Druckera-Pragera (BDP) oraz Hoffmana. Rozdział zawiera również pobieżny opis implementacji przedstawionych modeli do Metody Elementów Skończonych z zastosowaniem pakietów systemu 'Wolfram Mathematica': 'AceGen' oraz 'AceFEM'. Rozdział 3 prezentuje z kolei bardzo obszerne wyniki symulacji numerycznych dla niestateczności stacjonarnych. Wykorzystano opisane wcześniej modele dla dużych deformacji z opcjonalnym sprzężeniem termo-mechanicznym. Obliczenia wykonano dla płytki rozciąganej z imperfekcją w środku. W symulacjach badano różne konfiguracje (płaski stan naprężenia, płaski stan odkształcenia), różne wymiary próbki i różne wielkości siatki elementów skończonych. Analiza parametryczna obejmowała podstawowe parametry modeli: parametr wzmocnienia, przewodność, kąt tarcia wewnętrznego (model BDP) oraz granicę plastyczności przy rozciąganiu (model Hoffmana).

W Rozdziale 4 przedstawiono teorię rozszerzającą opisane w Rozdziale 2 modele o możliwość symulacji pasm Luedersa. Zaprezentowano podstawowe założenia wzbogacenia modeli o człony „lepkie” lub gradienty wyższego rzędu, opcjonalnie ze

sprężeniem termo-mechanicznym. Zaproponowano różne definicje funkcji wzmocnienia/osłabienia w postaci funkcji wieloliniowych oraz kwadratowych niezależnie dla obu metod regularyzacji. Wyniki symulacji pasm Luedersa zestawiono w Rozdziale 5. Obliczenia wykonano dla trzech rodzajów próbek: rozciąganej płytki z imperfekcją, rozciąganej próbki wiosełkowej oraz próbki ścinanej. Badano wpływ prędkości deformacji i temperatury na formowanie i przemieszczanie się pasm Luedersa. Analizowano wpływ lepkości, długości charakterystycznej, przewodności, prędkości deformacji oraz gęstości siatki.

W kolejnych dwóch rozdziałach (Rozdziały 6 i 7) przedstawiono dalsze rozszerzenie podstawowych modeli termo-plastycznych o możliwość symulacji efektu PLC. Zaproponowano rozszerzenie będące fenomenologicznym opisem zjawiska DSA (Dynamic Strain Aging) odpowiedzialnego za powstanie efektu PLC, oparte na parametrze wewnętrznym  $t_a$ , zwanym czasem starzenia. W tym celu wykorzystano model Estrina-McCormicka (EMC) również z opcjonalnym rozszerzeniem o gradienty wyższego rzędu. Wyniki symulacji numerycznych (Rozdział 7) dla próbki wiosełkowej porównano z dostępnymi w literaturze danymi eksperymentalnymi. Wyniki dla wybranych parametrów charakteryzowały się dobrą zgodnością z eksperymentem. Przeprowadzono analizę parametryczną uwzględniającą lepkość, prędkość procesu, definicję czasu starzenia a także wpływ parametrów podstawowych modelu McCormicka.

Ostatni aspekt pracy obejmujący kolejną modyfikację modelu EMC przedstawiono w Rozdziale 8. Zaproponowana modyfikacja pozwala na uwzględnienie wstępnej fazy procesu obciążania, gdzie widoczne są pasma Luedersa. W tym celu dodano mnożniki przełączające, oparte na funkcji arcus tangens, pozwalające na szybkie włączenie lub wyłączenie wybranych członów w modelu. Model został następnie pozytywnie zweryfikowany w oparciu o wyniki eksperymentalne dla próbki wiosełkowej ze stopu aluminium AW5083. Rozprawę zamyka Rozdział 9, w którym podsumowano przeprowadzone prace i przedstawiono możliwe kierunki dalszych badań.

#### **4. Ocena rozprawy doktorskiej i uwagi krytyczne**

Recenzowana praca doktorska dotyczy niestatecznego zachowania się materiałów termo-plastycznych (metali i stopów metali) w procesie ich obciążania. Jest to zagadnienie istotne i wciąż wymagające dalszych badań. Odzwierciedlenie fenomenu powstawania i rozwoju lokalizacji odkształceń a także towarzyszącym im zmian w globalnej odpowiedzi

próbki jest kluczowe dla prawidłowego symulowania zachowania się metali i stopów metali pod obciążeniem. O aktualności i ważności tematu świadczy także duża ilość pojawiających się nowych publikacji naukowych, z których część została przywołana przez Doktorantkę w rozprawie.

Autorka w sposób zwięzły ale i merytoryczny dokonała przeglądu aktualnego stanu wiedzy w zakresie badań doświadczalnych oraz metod numerycznych stosowanych w opisie przedmiotowego zagadnienia. Na podstawie tej analizy Doktorantka sformułowała cel i zakres własnego programu badawczego. Metody i techniki zastosowane w trakcie realizacji programu badawczego są typowe dla tego typu prac. Obejmowały one implementację matematycznego opisu materiału do Metody Elementów Skończonych (MES) oraz weryfikację stworzonych modeli w oparciu o szereg testów/symulacji i porównanie uzyskanych wyników z danymi eksperymentalnymi. Dodatkowo, przeprowadzana analiza parametryczna pozwalała na zbadanie cech charakterystycznych zaimplementowanych modeli.

Zastosowana metodologia wydaje się logiczna. Doktorantka kolejno wprowadza coraz bardziej złożone modele materiałowe, weryfikując ich poprawność i sprawdza skuteczność.

W Rozdziale 2 przedstawione zostają podstawowe modele termo-plastyczne, dla których zaproponowano trzy stosunkowo proste funkcje plastyczności: Hubera-Misesa-Hencky'ego (HMH), Burzyńskiego-Druckera-Pragera (BDP) oraz Hoffmana. Podstawy teoretyczne przedstawione zostały w sposób zwięzły ale wystarczający. Opis implementacji jest natomiast, moim zdaniem, przedstawiony w sposób zbyt ogólnikowy i mało czytelny. Sprowadza się de facto do kilku akapitów, z których czytelnik dowiaduje się, że przy implementacji zastosowano pakiety 'AceGen' i 'AceFEM' wchodzące w skład środowiska 'Wolfram Mathematica'. Z opisu nie wynika co w procesie implementacji stanowi indywidualny wkład Doktorantki. Zakładam, że ogólne algorytmy iteracyjne służące do znajdowania niewiadomych w zagadnieniach plastyczności czy służące do rozwiązania układów globalnych są zapewniane przez system 'Wolfram Mathematica'. Natomiast, kwestie definiowania własnych praw materiałowych, tworzenia własnych elementów skończonych, czy też wprowadzania metod regularyzacji leżą po stronie użytkownika i stanowiły istotny aspekt pracy Autorki.

Wyniki przedstawione w Rozdziale 3, potwierdzają występowanie niestateczności i zależność uzyskanych wyników od przyjętej siatki elementów skończonych dla modeli bez regularyzacji. Uzasadnienie dla wykorzystania symetrii i prowadzenia obliczeń jedynie dla fragmentu płytki (1/4 lub 1/8) powinno być czytelnie wskazane. Wyniki pokazują, że

w obliczeniach, wielokrotnie uzyskano charakter lokalizacji, który odbiega od spodziewanego (np. Rys. 3.5, Rys. 3.7, Rys. 3.22, Rys. 3.31-3.34). Czy przy zastosowaniu pełnej próbki również uzyskano by podobne artefakty?. Na podstawie wniosków z tego rozdziału dowiadujemy się, że model z funkcją HMH jest najlepszy z punktu widzenia stabilności obliczeń i łatwości uzyskania rozwiązania. Ważne jest, jednak również określenie, który model zapewnia najlepsze odzwierciedlenie rzeczywistego mechanizmu zniszczenia w analizowanych próbkach, szczególnie w kontekście uzyskanego kąta nachylenia pasma ścinania.

Nie do końca rozumiem, z czego wynika konieczność stosowania różnych definicji wzmocnienia/osłabienia (Rys. 4.1) w zależności od tego czy stosujemy model lepko-plastyczny czy model wzbogacony o gradienty czy też model ze sprzężeniem termoplastycznym. Kwestie implementacji szczególnie w kontekście dodawania do modelu członów „lepkich” i gradientów powinny być szerzej opisane. Podobna uwaga dotyczy także Rozdziałów 6 i 8 gdzie, z uwagi na coraz większy stopień złożoności modeli, brak szczegółów implementacyjnych jest coraz bardziej odczuwalny.

Rozdział 5 zawiera ciekawą i dostarczającą użytecznych informacji analizę numeryczną powstawania i rozwoju pasm Luedersa w próbkach rozciąganych i ścinanych. Kilka kwestii wymaga jednak dodatkowego komentarza:

- a) Czym podyktowane było zastosowanie funkcji HMH, a nie BDP lub Hofmana?
- b) Porównując model lepko-plastyczny z modelem termo-lepko-plastycznym widać, że uwzględnienie przewodności cieplnej prowadzi do mniejszych oscylacji na wykresach (np. Rys. 5.29 i Rys. 5.32). Z kolei, w przypadku modelu plastycznego z gradientami i modelu termo-plastycznego z gradientami otrzymano efekt przeciwny. Dodanie przewodności powoduje wzrost oscylacji (Rys. 5.21 i 5.26 oraz Rys. 5.29 i 5.33). Z czego wynika fakt, że dodanie sprzężenia termo-mechanicznego powoduje różne odpowiedzi dla tych dwóch typów regularyzacji.
- c) W testach zakładane są arbitralnie wartości parametru lepkości oraz parametru długości charakterystycznej w odniesieniu do przyjętego w obliczeniach czasu trwania testu (prędkości obciążania) oraz wielkości siatki. W mojej opinii w analizie brakuje jednak sprawdzenia/określenia przy jakich wartościach tych parametrów można już uznać, że wyniki są niezależne od przyjętej siatki ES. W przypadku modelu gradientowego użyteczna byłaby w tym kontekście informacja ile powinna wynosić relacja pomiędzy długością charakterystyczną a wymiarem elementu

skończonego. W przypadku modelu lepko-plastycznego mogłaby to być zależność parametru lepkości od prędkości procesu.

W omówieniu wyników przedstawionych w Rozdziale 7 można przeczytać:

- strona 95: *“There are no significant differences between the plots for different values of viscosity in the examined range of values, however in the case when the viscosity  $\xi$  is equal to 0 (not displayed here) the computation stops at the beginning of the process.”*
- strona 97: *“There are no significant differences for the values of internal length larger than 0. The diagrams are close to the diagram obtained for the thermo-visco-plastic model.”*
- i dalej na stronie 97: *“The band travels through the process zone of the sample in a similar way irrespective of the assumed internal length. The plots do not show the expected influence of the length scale on the widths of the propagating localization zones.”*

Może to sugerować, że zastosowana regulacja jest albo niewystarczająca albo odnosi się do zmiennych, które nie są decydujące w odpowiedzi próbki. Tutaj również pomocna byłaby analiza proponowana w uwagach do Rozdziału 5 (punkt (c))

Jestem pod wrażeniem wyników przedstawionych w Rozdziale 8 i ich zgodności z danymi eksperymentalnymi. Zachowanie próbek zależne jest od prędkości deformacji. Efekt ten został także w pewnym stopniu odzwierciedlony w symulacjach co jest logiczne w przypadku stosowania modeli, w których występuje parametr lepkości. Pytanie, czy stosowanie stałej wartości tego parametru dla różnych prędkości procesu jest tutaj uzasadnione. Ciekawy aspekt, który można byłoby szerzej omówić dotyczy także kwestii wyboru wielkości poddanej uśrednianiu. W odróżnieniu od poprzednich modeli, gradienty wyższych rzędów zastosowano tutaj do uśredniania pola temperatur a nie odkształceń.

Reasumując, zastosowana w pracy metoda badawcza, polegająca na kolejnych modyfikacjach modeli w celu symulacji coraz bardziej złożonych procesów przy jednoczesnej weryfikacji wyników na poszczególnych etapach, stanowi spójną całość prowadzącą ostatecznie do rozwiązania postawionego problemu. Przedstawione w Rozdziałach 3, 5, 7 i 8 wnioskowanie jest zasadniczo prawidłowe i logiczne.

Problem naukowy (jakim jest modelowanie zjawisk lokalizacji w materiałach termoplastycznych) został w pracy jasno określony, a przedstawiona do recenzji rozprawa zawiera jego oryginalne rozwiązanie. Można zatem uznać, że cel pracy został osiągnięty.

Należy również podkreślić, że praca napisana jest bardzo starannie i charakteryzuje się wysokim poziomem edytorskim. Ewentualne błędy edytorskie są nieliczne i nie wpływają

negatywnie na ogólny odbiór pracy. Wyniki przedstawiono czytelnie, w sposób umożliwiający ich dokładną analizę. Zamieszczone w pracy odsyłacze do materiałów uzupełniających w postaci animacji obrazujących procesy deformacji stanowią dodatkowy atut podkreślający jakość prezentowanych rezultatów.

## 5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Celem pracy jest modelowanie zjawisk lokalizacji z uwzględnieniem wpływu prędkości procesu. Autorka stosuje modele termo-plastyczne dla dużych deformacji, które następnie rozszerza o możliwość symulacji pasm Luedersa oraz efektu PLC. Praca ma charakter przede wszystkim aplikacyjny, tzn. skupia się na kompleksowej weryfikacji zaimplementowanych modeli materiałowych dla szerokiego spektrum zmienianych parametrów i warunków brzegowych. Aspekt implementacyjny jest w pracy potraktowany marginalnie, co stanowi w mojej ocenie główną niedoskonałość przedstawionej rozprawy.

Elementy oryginalne zawarte w pracy, które należy uznać za czytelny wkład Autorki w rozwój badań nad zjawiskiem powstawania i propagacji lokalizacji to przede wszystkim:

- A. Wzbogacenie przedstawionych modeli termo-plastycznych o lepko-plastyczność lub/oraz gradienty wyższych rzędów, umożliwiające uśrednianie odkształceń plastycznych lub temperatury, oraz zaproponowanie dla nich różnych funkcji wzmocnienia/osłabienia w celu symulowania pasm Luedersa,
- B. Modyfikacja modelu termo-lepko-plastycznego z dużymi deformacjami w celu uzyskania w obliczeniach efektu PLC, a także jego regularyzacja,
- C. Zaproponowanie połączenia modelu termo-lepko-plastycznego z multi-liniowym wzmocnieniem z modelem Estrina-McCormicka dla uzyskania pełnego opisu zachowania próbki pod obciążeniem z uwzględnieniem zarówno efektów fazy wstępnej (pasma Luedersa) jak i efektu PLC.

Na uwagę zasługuje fakt, że wyniki większości symulacji zamieszczonych w pracy zostały opublikowane w czasopismach naukowych o ugruntowanej pozycji (*Archives of Civil and Mechanical Engineering, Archives of Mechanics, Computer Methods in Materials Science*). Świadczy to o ich pozytywnej weryfikacji i dużej wartości poznawczej.

Podsumowując, moja ocena jest pozytywna. Autorka wykonała cały szereg eksperymentów numerycznych, które pozwoliły na zbadanie wpływu prędkości procesu a także ocenę innych istotnych parametrów modeli materiałowych na niestateczne zachowanie materiału w warunkach termo-plastycznych przy dużych odkształceniach.



Doktorantka wykazała się wystarczającą wiedzą teoretyczną w zakresie objętym tematem, a także umiejętnością zaplanowania i przeprowadzenia badań skutkujących rozwiązaniem postawionego problemu. Przedstawione w recenzji wątpliwości i uwagi krytyczne nie umniejszają wartości pracy i jej wysokiej ocenie merytorycznej. Stanowią one raczej przyczynek do dyskusji, pomoc w doskonaleniu warsztatu naukowego i ewentualny punkt wyjścia do dalszej pracy badawczej.

Biorąc pod uwagę powyższe, stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa pod tytułem „*Influence of rate-dependence on unstable material response in large strain thermo-plasticity*” spełnia wymagania opisane w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym z 14 marca 2003 r. z późn. zm. i wnoszę o dopuszczenie Pani mgr inż. Marzeny Muchy do publicznej obrony.

