



Lublin, 21.11.2023

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława Nosala

pt. „Modelowanie procesu stopowania tarcowego FSA oraz estymacja
właściwości mechanicznych uzyskanego kompozytu”

promotor: prof. dr hab. inż. Artur Ganczarski

promotor pomocniczy: dr inż. Marek St. Węglowski

1. Podstawa prawna i przedmiot recenzji

Niniejszą recenzję opracowano na zlecenie Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej (uchwała z dnia 20.09.2023).

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Przemysława Nosala pt. „Modelowanie procesu stopowania tarcowego FSA oraz estymacja właściwości mechanicznych uzyskanego kompozytu”, napisana pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Artura Ganczarskiego i dra inż. Marka St. Węglowskiego.

Recenzja zawiera szczegółowo uzasadnioną ocenę spełnienia przez wyżej wymienioną rozprawę warunków podanych w art. 13 ust. 1 Ustawy z dn. 14.03.2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2016 r. poz. 882), zgodnie z §6.3 rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 26 września 2016 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora – Rozdział 1 - Szczegółowy tryb przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich (Dz. U. z dnia 30 września 2016 r., poz. 1586).

2. Opis treści i formy rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska stanowi, w mojej opinii, zgodnie z wymogami Ustawy, oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, jakim jest opracowanie modelu procesu stopowania tarcowego, opartego na metodzie elementów dyskretnych, z uwzględnieniem równań konstytutywnych termo-sprężystości w formie naprężeniowej, zgodnie z teorią Cosseratów. Opis matematyczny poszerzono o zjawisko lepko-plastyczności, zgodnie z modelem Johnsona-Cooka, zjawisko tarcia – według modelu Coulomba oraz rozwój uszkodzenia. Nieliniowy układ równań konstytutywnych rozwiązano wprowadzając do modelu algorytm odwzorowania powrotnego. Jakość modelu oceniono posługując się wynikami obliczeń analitycznych oraz metodą elementów

skończonych. Przeprowadzono też badania doświadczalne pozwalające między innymi na określenie rozkładu nanotwardości w modyfikowanej warstwie materiału. Wykazano możliwość odwzorowania zjawisk cieplnych w procesach zgrzewania tarcowego za pomocą opracowanego modelu, przy czym rozważania ograniczono do fazy zagłębiania narzędzia.

Autor rozprawy wykazał się znaczną wiedzą teoretyczną w inżynierii mechanicznej oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, podkreślając potrzebę opracowania kompleksowego modelu prognozującego zmiany charakterystyk wytrzymałościowych materiału stopowanego tarcowo. Na tle klasycznej mechaniki ośrodków ciągłych, dysertacja odróżnia się uwzględnieniem struktury wewnętrznej materiału, zawierającej nieciągłości; uwzględniono też przepływ ciepła, odpowiednio formułując warunki brzegowe.

Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz trzech dodatków, a także spisu rysunków i tablic. Taki układ pracy należy ze wszelkich miar uznać za poprawny, przejrzysty i zgodny ze współczesnymi standardami sztuki edytorskiej. Objętość pracy jest bardzo wyważona (136 stron), nazewnictwo przemyślane i starannie dobrane, szata graficzna przyjemna dla oka czytelnika – rysunki i wykresy na ogół starannie opracowane. Na pochwałę zasługuje umieszczenie na początku dysertacji bardzo pomocnego spisu skrótów i ważniejszych oznaczeń.

Struktura rozdziałów jest spójna i logiczna, a każdy rozdział i podrozdział opatrzony jest adekwatnym, krótkim wprowadzeniem. Rozdział 1. zawiera wstęp oraz ogólne informacje na temat technologii stopowania tarcowego (FSW/P/A), wynikające z przeglądu literatury, a także tezy, cel i zakres pracy. W rozdziale 2. zamieszczono podstawy teoretyczne modelu materiału sprężysto-lepkoplastycznego z uszkodzeniem. Kolejny – trzeci rozdział zawiera opis implementacji modelu w ujęciu metody elementów dyskretnych (DEM) oraz weryfikację wyników obliczeń w odniesieniu do rozwiązania analitycznego oraz metody elementów skończonych (MES). W rozdziale 4. Autor przedstawia wyniki aplikacji opracowanego modelu TEVP, z uwzględnieniem zjawisk wymiany ciepła, do symulacji etapu zagłębiania narzędzia w czasie stopowania tarcowego, na tle różnych wyników własnych badań doświadczalnych, takich jak przebiegi czasowe siły osiowej wywieranej przez narzędzie, momentu obrotowego oraz pomiary nanotwardości. Rozdział 5. to dyskusja wyników, zaś rozdział 6. – wnioski i perspektywy dalszych badań.

Warto podkreślić, że w spisie literatury odnaleźć można dziesięć opracowań Autora niniejszej dysertacji, przy czym jedna z tych pozycji jest samodzielna.

3. Ocena merytoryczna i dyskusja treści rozprawy

Autor przedmiotowej rozprawy doktorskiej zaprezentował rozszerzenie uogólnionej teorii braci Cosserat o zagadnienia lepko-plastyczne, pozwalające na opis dużych odkształceń materiału, a także uwzględnienie ewolucji uszkodzenia w podwyższonych temperaturach. Opracowany model materiału sprężysto-lepko-plastycznego z uszkodzeniem zawiera sprzężenie cieplno-mechaniczne, pozwalające na opis pola naprężenia w strefie obróbki w procesie zgrzewania tarcowego, przy czym rozważania ograniczono do pierwszego etapu – zagłębiania narzędzia. Modelowanie przeprowadzono z wykorzystaniem metody elementów dyskretnych, wykorzystując otwarty kod źródłowy oprogramowania pn. „Yade - Open Source DEM”. Doktorant przedyskutował przy tym ograniczenia innej metody obliczeniowej, tzn. metody elementów skończonych w przypadku występowania w materiale znacznych odkształceń plastycznych; zastosował więc i wykazał na przykładzie DEM zalety metod bezsiatkowych – nie wymagających, aby materiał był ośrodkiem ciągłym (kontinuum), wprowadzając bezpośredni opis ruchu i wzajemnego oddziaływania cząstek ośrodka. Dzięki temu

możliwe stało się lepsze modelowanie zjawisk kontaktowych przy dużych prędkościach odkształcenia. Zastosowanie metody elementów dyskretnych pozwoliło jednocześnie na uwzględnienie pojawiania się pęknięć w obrabianym materiale.

Poniżej zebrano w kilku punktach pytania i uwagi merytoryczne, o różnym ciężarze gatunkowym, zaś w dalszej części niniejszej recenzji zawarto także pewne uwagi edycyjne.

1. Doktorant sformułował w dysertacji dwie tezy (hipotezy?), choć w świetle obowiązujących przepisów nie jest to wymagane. Teza pierwsza wydaje się jednak trywialna, podczas gdy teza druga niezupełnie została potwierdzona przez wyniki modelowania metodą DEM właściwości materiału zgrzewanego tarciovo. Czy Doktorant mógłby odnieść się do tych spostrzeżeń?
2. W rozdziale 2 brakuje komentarza – interpretacji warunków brzegowych określonych wzorami 2.38 i 2.39; cenne byłoby wyjaśnienie, dlaczego we wzorze 2.91 pominięto swobodną energię powierzchniową. Ważną kwestią jest sformułowanie miary uszkodzenia w postaci skalarnej (tensora rzędu zerowego, por. str. 36) – czy jest to wystarczające wobec spotykanej w praktyce anizotropii uszkodzenia?
3. Implementacja modelu sprężysto-lepko-plastycznego z uszkodzeniem opisana w rozdziale 3. wymaga pewnego doprecyzowania. Jakie zastosowano kryteria zbieżności rozwiązania w kontekście wzoru 3.81? Proszę bliżej wyjaśnić, dlaczego globalne właściwości materiału w sformułowaniu DEM nie pokrywają się z właściwościami w mikroskali. Autor przyjął założenie upraszczające o izotropowość właściwości cieplnych materiału. Jaki byłby wpływ występującej w rzeczywistości anizotropii współczynnika rozszerzalności cieplnej ziaren na powstawanie mikropęknięć w materiałach polikrystalicznych? Szkoda, że krzywych naprężenie – odkształcenie (np. rys. 3.20) nie skorelowano z wartością parametru uszkodzenia. Podobnie, wskazane byłoby, o ile to możliwe, dodatkowe odniesienie do eksperymentu lub rozwiązania analitycznego wyników symulacji DEM i MES. Zastanawiające jest, jakie były kryteria doboru dość specyficznych wartości niektórych zmiennych w modelu, np. siła F równa dokładnie 15.6 kN, prędkość obrotowa $V_n=447$ obr/min; czy wartość współczynnika tarcia $\mu=0,4$ można by zweryfikować doświadczalnie?; jak zmierzyć parametr η (str. 66)?; dlaczego przyjęto tylko dwie, tak skrajnie różne prędkości odkształcenia – 1/s i 1000/s? Jak wyjaśnić fakt, że pominięcie tarcia w modelu DEM daje wyższe naprężenia na rys. 3.21? Czy w kontekście dopuszczonej niewielkiej penetracji cząsteczek objętość modelu DEM można uznawać za stałą?
4. Wyniki badań doświadczalnych przedstawione w rozdziale 4. wymagają pewnego komentarza i dyskusji. Na przykład, łączenie punktów pomiarowych na rys 4.8 nie jest w pełni uzasadnione, tym bardziej, że nie ma tam słupków błędów. W związku z tym, stwierdzenie ze str. 88, jakoby rozkład nanotwardości w warstwie modyfikowanej nie miał cech asymetrii jest dyskusyjne. Jak Doktorant wyjaśni znaczne rozbieżności pomiędzy wynikami symulacji metodą elementów dyskretnych a danymi eksperymentalnymi na rys. 4.13? Czy na pewno było to związane jedynie z uproszczeniem geometrii narzędzia? Czy w symulacjach, gdzie wartość kroku czasowego miała istotne znaczenie, krok ten ustalano automatycznie, czy też kolejne wartości Δt były równe wartości początkowej? Dlaczego najwyższa temperatura występuje na dole elementu przedstawionego na rys. 4.16d (czas 11,58 s)? Wydaje się, że częstotliwość próbkowania/odczytu wielkości przedstawionych na rys. 4.17 mogłaby być mniejsza, z korzyścią dla czytelności wykresów. Jak Autor rozprawy skomentuje słabe dopasowanie krzywych DEM vs eksperyment na rys. 4.18 oraz 4.24?

4. Ważniejsze uwagi edycyjne

- W treści pracy występują dość liczne zapożyczenia, np. estymacja, termiczny, ekwiwalentne, interakcja...
- Jest niewielki błąd składni w tezie 2.: „wstępującego” zamiast „występującego”.
- Odmiana nazwisk – niewłaściwe stosowanie tzw. szkockiego apostrofu, np. „Coulomb’a” pod rys. 1.5, Johnson’a-Cook’a na str. 20 itd.
- Błędy składniowe w rodzaju tzw. analokutów w zdaniach rozpoczynających się od imiesłowu przysłówkowego współczesnego, np. na str. 34: „Wprowadzając..... przyjmuje postać”, albo na str. 49: „Znajdując... będzie równa”; wyrażenia żargonowe, np. „granica topnienia” (str. 13), użycie słowa „waga” zamiast „masa” (str. 15), używanie form osobowych czasowników, np. „możemy” (str. 22), „zależności lepkie” (str. 36), używanie słowa „kierunek” w znaczeniu potocznym, tzn. na określenie zwrotu wektora, wyrażenie „w odniesieniu do układu odniesienia” (str. 44); błędy interpunkcyjne – bardzo częste pomijanie przecinków, np. przed spójnikiem „aby” na str. 15, 69 itd.; niektóre skróty, np. na str. 86, są zapisywane w formie anglojęzycznej, a inne po polsku; to samo tyczy się np. skrótów DEM (ang.) i MES (pol.); czy pomiędzy wzorem 2.101 a 102 nie powinno być zero wektor? – nie można wszak przyrównywać wektora ∇P do skalaru 0.
- Wykresy na rys. 4.8 i 4.24 należało poszerzyć; na wielu rysunkach czcionki opisów są zbyt małe; podpisy pod rysunkami nie powinny być zakończone kropką; czy w nagłówku podrozdz. 2.3 nie pominięto frazy „sprężystości”?; nagłówek 3.2: słowo „lepkoplastycznego” – zapisano bez łącznika (kreski).
- Niektóre passusy, jak np. początek rozdziału 2 mają charakter nadmiernego powtarzania treści z wcześniejszych rozdziałów; z kolei ostatnie zdanie pierwszego akapitu: „W niniejszym rozdziale...” powinno być zdaniem pierwszym. W akapicie na środku str. 50 dwukrotnie wspomniano o skalowaniu masowym. Nazwa rozdziału „Dyskusja” jest trochę nietrafiona, gdyż pierwsze zdanie w tym rozdz. pasuje raczej do wstępu, a pozostała część nosi cechy podsumowania; z opisu na str. 106 trudno wywnioskować, jaki jest cel rozprawy. Z kolei w „Podsumowaniu” nie powinny być zamieszczane rysunki.

5. Wnioski końcowe

Rozprawa doktorska mgra inż. Przemysława Nosala jest oryginalnym i interesującym studium zastosowania metody elementów dyskretnych do modelowania procesów stopowania tarcowego, a uzyskane przez Doktoranta wyniki stanowią cenny wkład w rozwój nauki w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Na szczególne uznanie zasługuje staranne opisanie podstaw naukowych modelu sprężysto-lepko-plastycznego z uszkodzeniem, co świadczy o bardzo dobrej znajomości praw mechaniki i pozwala stwierdzić spełnienie w wysokim stopniu przez Autora niniejszej dysertacji wymagań, stawianych osobom starającym się o nadanie stopnia doktora, opisanych w Ustawie.

W związku z powyższym stwierdzam, iż rozprawa doktorska mgra inż. Przemysława Nosala pt. „Modelowanie procesu stopowania tarcowego FSA oraz estymacja właściwości mechanicznych uzyskanego kompozytu” spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim, wymienione w obowiązującej Ustawie oraz wnioskuje do Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej o dopuszczenie do publicznej obrony.