

Dr hab. inż. Jerzy Podgórski, prof. uczelni
Politechnika Lubelska,
ul. Nadbystrzycka 40, 20-620 Lublin

Lublin, kwiecień 2023r.

WPLYNEŁO
Dnia 08.05.2023
L. cz. II. PW / 200 / 2023

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Inez Kamińskiej**

Przyjęto
08/05/2023
DZIEKAN
Wydziału Inżynierii Lądowej
prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz

**pt. „Modelowanie konstytutywne sprzężenia plastyczności
i degradacji sprężystej materiałów kruchych”**

1. Podstawa opracowania

Recenzja została opracowana na prośbę Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej, dr hab. inż. Konrada Lewczuka, prof. uczelni, wyrażoną w piśmie WTBD.521.DR.236.2022 z dnia 8 marca 2023r, które informuje mnie o uchwale Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej z dnia 6 grudnia 2022, powołującej mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Inez Kamińskiej. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Stanisław Jemioło, a promotorem pomocniczym dr inż. Aleksander Szwed. Przesłana do oceny dysertacja doktorska zawarta jest w tomie liczącym wraz z załącznikami 264 strony.

2. Tematyka i charakterystyka pracy

Treść rozprawy zawarta jest w 8 rozdziałach, do których dołączono 2 załączniki zawierające zestawienia związków wykorzystywanych w pracy oraz bibliografię (94 pozycje). Treść dysertacji poprzedzona jest streszczeniami w języku polskim i angielskim.

Rozdział 1 jest wstępem zawierającym wprowadzenie do tematu rozprawy i motywację podjęcia pracy. W tym rozdziale określono też problemy naukowe, których rozwiązanie doktorantka postawiła sobie, jako cel swoich badań. Główne problemy zostały określone w pracy następująco:

„Celem rozprawy doktorskiej jest zastosowanie” ... „techniki” ... „Houlsby’ego do konstruowania spójnych termodynamicznie modeli materiałowych wykorzystujących funkcje potencjałów energii i dyssypacji” ...”w przypadku materiału kruchego, w szczególności betonu”.

Zadanie to pociąga za sobą konieczność rozwiązania kilku problemów, które autorka dysertacji przedstawia, jako:

- *„dobrać potencjał dyssypacji związany ze zjawiskiem uplastycznienia, by adekwatnie opisać to zjawisko dla materiałów kruchych, w szczególności betonu,*
- *przyjąć potencjał dyssypacji związany z uszkodzeniem, aby odpowiednio opisać zjawiska związane z degradacją sprężystych własności materiałów kruchych,*
- *sposób połączenia tych potencjałów tak aby wypadkowa dyssypacja realistycznie oddawała sprzężenie zjawisk uplastycznienia i uszkodzenia z możliwością swobodnego sterowania stopniem ich udziału w odpowiedzi na obciążenie,*
- *przyjęcie potencjału energetycznego Helmholtza”.*

Rozwiązywanie tych problemów przedstawia doktorantka w kolejnych rozdziałach pracy, której zwieńczeniem jest sformułowane w rozdziale 7 związku konstytutywne betonu uwzględniające plastyczność i uszkodzenie materiału.

Rozdział 2 zatytułowany „Właściwości mechaniczne betonu i wynikające z nich podstawowe cechy modelu konstytutywnego” zawiera opis struktury stwardniałego betonu oraz zestawienie znanych z literatury klasycznych testów 1 i 2-osioowego ściskania i rozciągania próbek betonowych. W trakcie analizy tych testów autorka formułuje wynikające z nich cechy związków konstytutywnych, które zamierza uwzględnić w

swojej pracy. Rozdział kończy zestawienie postulowanych cech geometrycznych powierzchni zniszczenia, jej symetrii i kształtu w przekrojach południkowych i dewiatorowych.

Rozdział 3 zatytułowany „Struktura termodynamicznie konsystentnych relacji konstytutywnych materiałów sprężysto–plastycznych z uszkodzeniem”, zawiera wiadomości teoretyczne wprowadzające do przedstawienia algorytmu formułowania związków konstytutywnych z wykorzystaniem 2 potencjałów: energii swobodnej Helmholtza i energii dyssypacji.

Rozdział 4 zatytułowany „Przykłady relacji konstytutywnych sformułowanych na bazie potencjałów Helmholtza i dyssypacji”, zawiera opis wykorzystania algorytmu przedstawionego w rozdziale poprzednim do sformułowania termodynamicznie spójnych relacji konstytutywnych. Podane przykłady zawierają modele konstytutywne poczynając od najprostszego jednowymiarowego do coraz bardziej złożonych zawierających stowarzyszone i niestowarzyszone prawa płynięcia plastycznego.

Rozdział 5 zatytułowany „Warunki plastyczności i potencjały dyssypacji opisujące uplastycznienie betonu” opisuje kilka warunków plastyczności zależnych od 2 i 3 niezmienników tensora naprężenia oraz odpowiadające im funkcje dyssypacji. Analizowany jest warunek Druckera-Pragera z osobliwością w punkcie trójosiowego rozciągania i jego postać wygładzona oraz warunek Misesa-Schleichera z krzywoliniowymi południkami. Jako zależne od 3 niezmienników przedstawiane jest kryterium Ottosena, które też służy do konstruowania przykładowego niestowarzyszonego związku konstytutywnego.

Rozdział 6 zatytułowany „Beton traktowany jako materiał sprężysty z uszkodzeniem przedstawia metody modelowania konstytutywnego betonu jako materiału sprężystego z uszkodzeniem. Sformułowano zależności

konieczne do opisania materiału sprężystego z uszkodzeniem, na podstawie potencjałów Helmholtza i funkcji dyssypacji. Zaproponowane funkcje konstytuują model, dla którego przedstawione są wyniki obliczeń w pozwalają utworzyć związki konstytutywne opisujące proste przypadki testów obciążenia i odciążenia. Zaproponowano też metodę regularyzacji potencjału Helmholtza, ułatwiającej pokonanie trudności wynikających z nieciągłości pochodnych tej funkcji.

Rozdział 7 zatytułowany „Model konstytutywny betonu uwzględniający plastyczność i degradację sprężystą generowany dwoma potencjałami” zawiera sformułowania równań opisujących proponowany model materiałowy betonu. Przedstawiono tu metody doboru parametrów modelu na podstawie wyników prostych badań eksperymentalnych i pokazano wyniki symulacji testów cyklicznego jednoosiowego ściskania oraz ściskania i rozciągania bez wzmocnienia.

Kolejne wykonane symulacje zawierają testy jednoosiowego ściskania i trójosiowego nierównomiernego ściskania przy uwzględnieniu wzmocnienia oraz porównania tych wyników ze znanymi w rezultatach badań eksperymentalnych.

Rozdział ten kończy sformułowanie równań opisujących tensor sztywności stycznej, co może ułatwić implementację modelu w systemie obliczeniowym, np. MES.

Rozdział 8 zatytułowany „Podsumowanie i wnioski” zawiera podsumowanie rezultatów badań i symulacji komputerowych przedstawionych w pracy. Autorka formułuje tu 7 najważniejszych jej zdaniem rezultatów rozprawy doktorskiej, są nimi sformułowania:

- potencjałów dyssypacji zależne od trzech niezmienników walcowych, do których znaleziono dualne warunki plastyczności,

- oryginalnego warunku plastyczności i zamkniętych formuł określających jego parametry,
- postaci energii swobodnej Helmholtza zależnej od trzech parametrów uszkodzenia,
- sposobu połączenia członów potencjału dyssypacji związanych z uszkodzeniem i plastycznością,
- interpretacja fizyczna parametrów uszkodzenia,
- ogólnego modelu materiału sprężystego z uszkodzeniem
- modelu konstytutywnego materiału kruchego z uwzględnieniem sprężysto-plastyczności i uszkodzenia.

Rozdział kończy opis przewidywanych dalszych badań, które doktorantka zamierza prowadzić, są to zagadnienia związane z udoskonaleniem modelu i jego implementacja w komercyjnym systemie Abaqus. Przewidywane udoskonalenia modelu są wymienione w obszarach:

- sposobu sprzężenia plastyczności i uszkodzenia,
- ścieżki odciążenia dla relacji $\sigma_{11} - \varepsilon_{22}$,
- wprowadzenie wzmocnienia,
- wyznaczenie parametrów występujących w równaniach ewolucji uszkodzenia oraz prawie płynięcia.

Autorka wymienia tu również najważniejsze osiągnięcie zawarte w dysertacji jako „ogólność zawartych w niej rozważań” i „wskazanie ram, w których można się poruszać, żeby relatywnie łatwo dopasować model do charakterystyki wybranego materiału”.

3. Merytoryczna ocena pracy

Doktorantka podjęła w pracy niezwykle istotny i jednocześnie trudny temat jakim jest modelowanie konstytutywne materiałów kruchych, charakteryzujących się silnie nieliniowym związkiem konstytutywnym.

Połączenie cech sprężystych, plastycznych z jednoczesną degradacją materiału stawia przed badaczami niezwykle złożone zadanie przy konstruowaniu modeli materiałowych. Droga prowadząca do sformułowania związków konstytutywnych, która wybrała mgr Kamińska, jest dodatkowo utrudniana przez konsekwentne stosowanie zasady spójności termodynamicznej w algorytmach prowadzących do otrzymywania końcowych zależności. Większość używanych obecnie modeli materiałowych opisujących np. beton i skały została utworzona bez zwracania uwagi na ta spójność, co znajduje swój obraz w monumentalnym dziele N. S. Ottosena i M. Ritsmaa'y „The mechanics of constitutive modeling”, gdzie opis termodynamicznych zasad tworzenia związków konstytutywnych zajmuje tylko ok. 1/4 objętości dzieła. Konsekwencja drogi termodynamicznej widoczna jest w publikacjach (7) współautorstwa mgr Inez Kamińskiej, które cytowane są w monografii.

Do treści pracy nie mam poważnych uwag, znalazłem tylko trzy problemy, na które warto zwrócić uwagę przy późniejszych publikacjach autorki.

A. Parametr czasu występujący w kilku rozdziałach pracy nie jest „czasem” w sensie mechaniki Newtona, ale parametrem sterującym przyrostami odkształcenia. Tradycyjne użycie „kropki” na oznaczanie przyrostów jest tu pewną konwencją, którą usprawiedliwia zbliżona natura przyrostów odkształcenia i prędkości. Sama autorka w spisie oznaczeń wyjaśnia: *„parametr materiałowy związany z proponowanym” ... „warunkiem uszkodzenia/plastyczności”*. W dalszej części pracy, gdzie prezentowane są wyniki symulacji komputerowych znika to umowne znaczenie czasu, gdyż systemy MES w celu ujednoczenia podejścia do zagadnień nieliniowych i dynamiki, stosują to sztuczne rozumienie czasu, np. w zadaniach statyki dużych przemieszczeń, które wymagają iteracyjnego

procesu poszukiwania równowagi. Oglądając rysunek 7.33, gdzie na osi poziomej odłożony jest czas mierzony w sekundach, można odnieść wrażenie, że obserwujemy wykres reakcji ciała o lepkiej charakterystyce, lub że proces degradacji trwa tu 10 minut. Z pewnością potrzebne są tu objaśnienia dotyczące umownej skali „czasowej”.

- B. Pojęcie „funkcja kształtu” pojawiające się najpierw w streszczeniu, spisie oznaczeń i w rozdziale 5, bez wyjaśnienia, a później już prawidłowo jako „*funkcja kształtu przekroju dewiatorowego*”. To określenie w dobie szeroko spopularyzowanej w inżynierskich zastosowaniach Metody Elementów Skończonych, gdzie funkcje kształtu są podstawowymi pojęciami, wymaga „mocnego komentarza” na wstępie pracy, lub użycia tego określenia wyłącznie w wersji rozwiniętej, aby nie stwarzać okazji do nieporozumienia. Funkcja, której użył w swoim warunku Ottosen, została prawdopodobnie po raz pierwszy użyta w roku 1972 (podejrzewam, że nieświadomie) w pracy doktorskiej Poula Lade, który rozważał warunek stanu granicznego ośrodka sypkiego w postaci: $(I_1)^3/I_3 = \text{const}$. W roku 1976 Hajime Matsuoka zaproponował podobny warunek w postaci: $I_1 I_2/I_3 = \text{const}$. Nils Ottosen w roku 1977 rozważał ściśle geometryczny kształt wypukłej powierzchni granicznej, której przekrój dewiatorowy zmieniałby się w sposób gładki i ciągły od trójkątnego w wierzchołku do okrągłego dla dużych ciśnień. Wybrał funkcję, która jest warstwicą membrany trójkątnej poddanej stałemu ciśnieniu. Jak się okazało jest to ten sam kształt, który uzyskali bez rozważania geometrii Lade a później także Matsuoka. Mam więc pewien niepokój, czy można ją nazwać funkcją Ottosena, ale ze względu na jej świadomy wybór przez autora, zapewne tak.
- C. Pewien niedosyt też budzi przyjęcie w potencjale plastyczności funkcji opisującej kształt przekroju dewiatorowego powierzchni granicznej,

który występuje w warunkach Ottosena, ale także Ladego i Matsuoki. Zrozumieć można powód, który autorka opisuje następująco: „*formuły analogiczne do otrzymanych dla funkcji Ottosena można by wyprowadzić dla*” innych „*potencjałów dyssypacji,*”...*”jednak wynikowe wzory byłyby znacznie bardziej złożone”,* jednak szkoda, że doktorantka nie podjęła tego trudu. Wynikiem przyjęcia kształtu powierzchni plastyczności, który zaproponował Ottosen jest bowiem znacząca niedokładność prognozowanych przez tę funkcję wartości w obszarze $\sigma_2/\sigma_1=1/2$, a kątem Ladego $\vartheta=30^\circ$. Niedokładność o tyle groźna, że przewiduje zawyżoną wytrzymałość, lub granicę plastyczności w stosunku do wyników eksperymentów w płaskim stanie naprężenia. Widać to doskonale na rysunku 5.12, gdzie wyniki symulacji komputerowych porównywane są z badaniami Kupfera. Niestety ten fakt pozostaje bez komentarza. Jak doktorantka w podsumowaniu pracy pesymistycznie twierdzi, że: „*nie da się stworzyć modelu, który dobrze opisuje wszystkie aspekty odpowiedzi dowolnego materiału na obciążenie*”, ale z pewną nadzieją kończy: „*naszym celem było nie tylko wskazanie konkretnego warunku plastyczności*” ... „*ale także wskazanie ram, w których można się poruszać, żeby relatywnie łatwo dopasować model do charakterystyki wybranego materiału*” i dalej „*ten cel, przynajmniej częściowo, został osiągnięty*”, i tu muszę się z nią w pełni zgodzić.

Uwagi te nie pomniejszają mojej wysokiej oceny pracy mgr inż. Inez Kamińskiej. Praca przygotowana jest bardzo starannie zarówno pod względem edytorskim jak też pod względem językowym. Układ pracy jest czytelny i logiczny. Dołączone indeksy (spis treści, spis oznaczeń) pomagają w czytaniu pracy. Kilka niewielkich usterek (np. brakująca litera) warto poprawić przy ewentualnej ponownej publikacji.

4. Wniosek końcowy

Podsumowując recenzję stwierdzam, że rozprawa doktorska magister inżynier Inez Kamińskiej pt. "Modelowanie konstytutywne sprzężenia plastyczności i degradacji sprężystej materiałów kruchych" jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego i potwierdza jej wiedzę w dziedzinie mechaniki ciała stałego, a w szczególności w modelowaniu konstytutywnym materiałów o nieliniowej charakterystyce. Doktorantka przedstawiła rozwiązanie postawionych problemów naukowych. Dysertacja spełnia tym samym wymóg art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Należy też wysoko ocenić przydatność praktyczną analiz i zaproponowanych w pracy modeli konstytutywnych, które mogą być wykorzystane bezpośrednio, lub być wskazówką dla badaczy tworzących związki konstytutywne materiałów o charakterystyce zbliżonej do betonu.

Przygotowanie symulacji numerycznych służących kalibrowaniu modeli materiałowych i zarysowana perspektywa przyszłych prac, a w tym obietnica zaimplementowania do systemu "Abaqus" własnych procedur UMAT jest godnym podkreślenia faktem potwierdzającym wysokie kwalifikacje doktorantki.

Stawiam wniosek do przyjęcie dysertacji doktorskiej mgr inż. Inez Kamińskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony pracy, oraz do ubiegania się o uzyskanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport.

