

Warszawa, dn. 31.08.2022

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Kowalewski
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
02-106 Warszawa, ul. Pawińskiego 5B

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Kucewicza
pt.**

**Numeryczno-eksperymentalne badania procesu niszczenia i fragmentacji
dolomitu w warunkach obciążeń statycznych i dynamicznych**

wykonana na wniosek Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” w Wojskowej
Akademii Technicznej w Warszawie z dnia 13 lipca 2022 roku

1. Treść i zakres rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Michała Kucewicza osadzona jest tematycznie w zakresie mechaniki skał. Doktorant skupił swoją uwagę na przedstawieniu możliwości modelowania geomateriałów wykorzystując znane modele konstytutywne w odniesieniu do opisu zachowania skały dolomitowej.

Struktura rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Kucewicza obejmuje cztery opublikowane artykuły naukowe w czasopismach o zasięgu międzynarodowym sprzęgnięte w spójną całość przez syntetyczny przegląd ich zawartości oraz dodatkowe opisy zrealizowanych prac stanowiące uzupełnienie elementów pominiętych w artykułach bądź szersze ich omówienie. Wspomniany syntetyczny opis zawiera: streszczenie rozprawy w języku polskim i angielskim, spis treści, wykaz niektórych oznaczeń oraz spis literatury cytowanej w rozprawie zawierający 143 pozycje. Całość opisu zajmuje 70 stron.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawił wykaz publikacji stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej. Są to:

1. Michał Kucewicz, Paweł Baranowski, Jerzy Małachowski, Determination and validation of Karagozian-Case Concrete constitutive model parameters for numerical modeling of dolomite rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 129, 2020, DOI:10.1016/j.ijrmms.2020.104302, Elsevier Ltd.
2. Michał Kucewicz, Paweł Baranowski, Roman Gieleta, Jerzy Małachowski, Investigation of dolomite' rock brittle fracture using fully calibrated Karagozian Case

Concrete model, International Journal of Mechanical Sciences, Volume 221, 2022, DOI:10.1016/j.ijmecsci.2022.107197, Elsevier Ltd.

3. Michał Kucewicz, Paweł Baranowski, Jerzy Małachowski, Dolomite fracture modeling using the Johnson-Holmquist concrete material model: Parameter determination and validation, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 13, Issue 2, Pages 335 – 350, 2021, DOI:10.1016/j.jrmge.2020.09.007, Elsevier Ltd.
4. P. Baranowski, M. Kucewicz, R. Gieleta, M. Stankiewicz, M. Konarzewski, P. Bogusz, M. Pytlik, J. Małachowski, Fracture and fragmentation of dolomite rock using the JH-2 constitutive model: Parameter determination, experiments and simulations; International Journal of Impact Engineering, Volume 140, 2020, DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103543, Elsevier Ltd.

W rozdziale drugim Doktorant omówił cel swojej pracy stwierdzając, że jest nim prezentacja możliwości modelowania numerycznego skał na przykładzie dolomitu jako materiału kruchego. Główny nacisk został położony na proces inicjacji pęknięcia i jego rozwój w badanych materiałach w zakresie szerokiego zakresu obciążenia. Do realizacji tego celu Doktorant wybrał podejście doświadczalno-numeryczne zawierające sześć kolejnych etapów. Wśród nich można wymienić badania doświadczalne skały dolomitowej, opracowanie metodologii kalibracji modeli konstytutywnych, przygotowanie i weryfikacja modeli numerycznych, ich walidacja, a następnie porównanie efektywności trzech wybranych modeli konstytutywnych i propozycja zastosowań modelu, dla którego otrzymano najbardziej obiecujące wyniki.

W rozdziale trzecim Doktorant przedstawił uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej. Rozdział ten stanowi jednocześnie przegląd dostępnej literatury z zakresu recenzowanej rozprawy doktorskiej. Muszę przyznać, że odczuwam pewien niedosyt po analizie treści tej części pracy. Spodziewałem się szerszego opracowania właśnie w opisie syntetycznym rozprawy. Oczywiście brakujące elementy można jednak znaleźć w czterech publikacjach stanowiących podstawę ocenianego doktoratu.

W rozdziale czwartym Doktorant skupił się na opisie przeprowadzonych badań doświadczalnych. Program przewidywał wykonanie charakteryzacji dolomitu z wykorzystaniem między innymi tomografii komputerowej, testu jednoosiowego ściskania w zakresie statycznym i dynamicznym, testu trójosiowego ściskania statycznego z ciśnieniem bocznym, testu statycznego i dynamicznego rozciągania metodą brazylijską oraz innych kilku testów.

W rozdziale piątym Doktorant zademonstrował opis wykorzystywanych modeli konstytutywnych. Uwaga została skupiona na następujących modelach: model Karagozian Case Concrete (KCC); model Johnson-Holmquist Concrete (JHC) oraz model Johnson-Holmquist Ceramics (JH-2). Rozdział prezentuje także procedury kalibracji wymienionych modeli. Co jest bardzo przydatne w tym rozdziale, to tabelaryczne zestawienie wszystkich trzech omawianych modeli prezentujące charakterystyczne ich cechy. Najlepszy zdaniem Doktoranta model pod względem efektywności odwzorowywania fragmentacji skał, to model JH-2. Z tego powodu Doktorant zastosował go do prowadzenia analiz pełnowymiarowych metryk strzałowych.

W rozdziale szóstym mgr inż. Michał Kucewicz przedstawił podsumowanie pracy z podaniem głównych wniosków płynących ze zrealizowanego programu badawczego.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

Tematyka pracy doktorskiej mgr inż. Michała Kucewicza dotycząca studium zachowania skał dolomitowych w warunkach różnego typu obciążeń, należy do zagadnień o bardzo istotnym znaczeniu, których rozwiązania znajdują szerokie zastosowanie zwłaszcza w przemyśle wydobywczym oraz budownictwie. Dlatego też podjęcie przez Doktoranta takiej tematyki uważam za słuszny wybór i mający doskonale perspektywy rozwoju.

Do mocnych stron rozprawy, obok wyboru jej tematyki, z pewnością można zaliczyć ciekawy program doświadczalny zawierający bardzo trudne w realizacji, a zarazem kosztowne i czasochłonne badania o charakterze wytrzymałościowym. Na podkreślenie zasługują również podjęte wysiłki Doktoranta związane z modelowaniem numerycznym zaobserwowanych doświadczalnie efektów z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

Dobre wrażenie sprawiają elementy decydujące o wyglądzie pracy pod względem wydawniczym. W tym zakresie szczególnie szata graficzna zamieszczonych w rozprawie rysunków i zdjęć zasługuje na podkreślenie.

Praca ma przede wszystkim charakter doświadczalno-numeryczny i to w tym zakresie moim zdaniem mieści się jej wkład do nauki w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Chociaż modele wykorzystywane w rozprawie do opisu zaobserwowanych efektów nie są autorstwa Doktoranta, to jednak ich implementacja we własnych kodach numerycznych wraz z autorskimi procedurami kalibracyjnymi oraz metodologią określania parametrów modeli należy uznać za poważne osiągnięcie. Za główny wkład Doktoranta do rozwoju nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna uważam:

- (a) Przeprowadzenie wszechstronnego programu trudnych technicznie badań doświadczalnych, pozwalającego określić większość niezbędnych parametrów materiałowych koniecznych do zaimplementowania w części numerycznej rozprawy;
- (b) Przeprowadzenie analizy porównawczej trzech wybranych modeli konstytutywnych, identyfikacji stałych materiałowych na podstawie zrealizowanego programu testów doświadczalnych oraz opracowanie odpowiednich kodów numerycznych z ich implementacją w metodzie elementów skończonych.
- (c) Skuteczne zastosowanie modelu JH-2 do obliczeń strzelań dołowych i wykazanie jego dużej przydatności w ocenie strefy występowania stabilnego pęknięcia wywołanego detonacją ładunku wybuchowego, jak również określania wpływu zastosowanych ładunków wybuchowych na fragmentację i charakter pęknięcia badanej skały.

Podstawą rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Kucewicza są cztery artykuły naukowe opublikowane w czasopiśmie międzynarodowym o bardzo wysokiej renomie, przy czym w trzech z nich Doktorant pełnił rolę pierwszego autora, a procentowy Jego udział, potwierdzony odpowiednimi oświadczeniami współautorów, wynosił sumarycznie blisko 80%. Czwarta praca współautorska powstała przy niższym zaangażowaniu Doktoranta 20%, ale i tutaj Jego wkład w opracowanie modeli numerycznych oraz analizę wyników miał istotne znaczenie i oceniony został na 20% wśród ośmiu współautorów.

Praca opublikowana w „International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences” dotyczy metodologii kalibracji modelu konstytutywnego Karagozian Case Concrete (KCC) do analizy symulacji zachowania skały dolomitowej. Zaprezentowane w niej wyniki szeregu różnego typu badań doświadczalnych posłużyły do weryfikacji modelu i jednocześnie pokazały dobrą zgodność pomiędzy wynikami doświadczalnymi a przewidywaniami otrzymanymi w drodze symulacji numerycznych testowanego modelu KCC. Warto podkreślić, że ewolucja uszkodzenia skały dolomitowej uzyskana z eksperymentu, zarejestrowana przez szybką kamerę oraz określona na podstawie obliczeń numerycznych wykazywała duży stopień podobieństwa. Artykuł zawiera wiele interesujących szczegółów zarówno w zakresie opisywanych testów doświadczalnych, jak i prowadzonych symulacji numerycznych. Praca ma bogatą bibliografię zawierającą aż 86 różnych pozycji, co wskazuje na bardzo dobre rozeznanie Autorów z zakresu mechaniki skał.

Pogłębieniem rozważań prowadzonych w powyżej wspomnianej pracy jest kolejny artykuł, tym razem opublikowany z „International Journal of Mechanical Sciences”. Artykuł ilustruje procedurę obliczania parametrów modelu konstytutywnego KCC dla materiałów kruchych reprezentowanych przez skały dolomitowe. W pracy określono energię zniszczenia oraz odporność na pękanie testowanej skały na podstawie wyników testów zginania próbki w kształcie przepołowionego walca oraz w teście niebezpośredniego rozciągania w próbie brazylijskiej. Praca opisuje ponadto, nową metodę optymalizacji do prowadzenia efektywnej kalibracji parametrów kruchego zniszczenia. Obliczone optymalne wartości parametrów zostały następnie zwalidowane w drodze wcześniej wymienionych testów oraz testu fragmentacji z użyciem młota opadowego. Wypracowana metodyka zaowocowała skutecznym odzwierciedleniem formy zniszczenia w eksperymencie przez symulacje komputerowe z zastosowaniem własnych kodów numerycznych. Podobnie, jak pierwsza praca, także i ten artykuł ma wiele cytowanych pozycji z literatury światowej, łącznie 80 artykułów.

Trzeci z artykułów wchodzących w skład rozprawy doktorskiej opublikowano w „Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering”, w więc czasopiśmie, które na liście ministerialnej ma najwyższą z możliwych punktację wynoszącą 200 pkt. Praca szczegółowo omawia model konstytutywny JHC, który Autorzy wykorzystali do symulacji zachowania skały dolomitowej. W celu wykalibrowania parametrów modelu przeprowadzono testy zarówno w zakresie quasi-stycznym na standardowej maszynie wytrzymałościowej, jak i dynamicznym z wykorzystaniem stanowiska pręta Hopkinsona. Przeprowadzone badania doświadczalne pozwoliły ustalić stopień wrażliwości badanej skały na prędkość odkształcenia.

Porównanie wyników doświadczalnych w przebiegami uzyskanymi w drodze obliczeń numerycznych pokazały stosunkowo dobrą zgodność, o ile wymiar elementu siatki w MES był dobrany odpowiednio. Wyniki symulacji silnie były uzależnione właśnie od tego wymiaru.

Ostatnia z prac wchodzących w skład rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Kucewicza została opublikowana w czasopiśmie „International Journal of Impact Engineering”. Dotyczy ona kolejnego modelu rozpatrywanego przez Doktoranta, opracowanego przez Johnsona i Holmquista, (JH-2). Struktura tego artykułu jest podobna do pozostałych, z tą różnicą, że większość parametrów modelu została określona na podstawie testów opublikowanych przez innych autorów. Głównym celem Autorów tej pracy były symulacje fragmentacji badanej skały i oceny tych wyników w zestawieniu z danymi

doświadczalnymi. Wiele uwagi zostało poświęcone ustaleniu wpływu wielkości elementów siatki na otrzymywane wyniki doświadczalne. Sporą wrażliwość w tym względzie zaobserwowano w prowadzonych obliczeniach.

Wszystkie z krótko przedstawionych prac łączą się w sposób spójny w jedną całość. Cztery prace napisane są w profesjonalny sposób i reprezentują bardzo dobry poziom zarówno merytoryczny, jak i edytorski. Język angielski jest moim zdaniem bez zarzutu. Muszę przyznać, że znacznie lepiej mi było czytać prace napisane w języku angielskim niż syntetyczny opis dokonań stanowiący kwintesencję z tych prac, będący wkładem Doktoranta, napisany w języku polskim. Niestety, tekst polski opisu nie jest napisany w tak dobrym stylu, jak opublikowane artykuły w czasopiśmie. Wiele jest uchybień natury stylistycznej oraz interpunkcyjnej. Doktorant operuje dość ciężkim językiem budując zbyt długie zdania i aby zrozumieć o co chodzi niektóre fragmenty należy czytać wielokrotnie. Odnosi się wrażenie, że problem rozróżnienia liczby mnogiej od pojedynczej, czy też problemy z deklinacją rzeczowników stanowią dla Doktoranta pewną trudność. Takich uchybień jest sporo, a wszystkie zauważone usterki z tego zakresu zaznaczyłem w dołączonym egzemplarzu rozprawy.

Rozprawa doktorska mgr inż. Michała Kucewicza napisana jest w nowej dopuszczonej przez nasze władze formie, a więc złożona jest ze spójnego tematycznie zbioru artykułów uzupełnionego przez opis wskazujący najważniejsze elementy pracy. Przy takiej strukturze rozprawy łatwo jest jednak pominąć niektóre jej ważne elementy. W ocenianej pracy brakuje postawienia tezy naukowej, którą należy udowodnić w trakcie realizacji zaplanowanego programu badawczego. Oczywiście teza w przypadku tej konkretnie ocenianej pracy jest łatwa do sformułowania i co więcej wyniki wskazują na jej udowodnienie. Nie jest jednak rolą czytelników zastanawianie się nad sformulowaniem tezy, jednak to Doktorant powinien tego dokonać. Na obronie rozprawy prosiłbym zatem o sformułowanie takiej tezy.

Pewną niedogodnością ocenianej rozprawy jest brak schematów blokowych kolejnych etapów przy opracowywaniu procedur numerycznych. Oczywiście wszystkie następujące po sobie kroki zostały opisane, ale dla zachowania dobrej przejrzystości pracy warto byłoby opracować graficznie kolejne etapy zastosowanych procedur, zwłaszcza przy określaniu poszczególnych parametrów rozpatrywanych modeli konstytutywnych.

Rozprawa w dużej części ma charakter doświadczalny, z czym mocno wiąże się problem jakości uzyskiwanych wyników, zwykle oceniany na podstawie opracowania wielkości ich rozrzutu. Tego ważnego elementu oceniana rozprawa w ogóle nie podejmuje.

Nie bardzo zatem wiadomo, jakich rozbieżności w wynikach badań doświadczalnych można się spodziewać. Nasuwają się w związku z tym następujące pytania: czy testy były powtarzane, jaki rozrzut im towarzyszył, czy określano poziomy ufności wyznaczanych parametrów, itp?

Praca zawiera pewne niedociągnięcia o charakterze terminologicznym. Więcej uwag na ten temat i inne uchybienia omawiam w kolejnym punkcie recenzji zatytułowanym uwagi szczegółowe.

3. Uwagi szczegółowe

Jak już wcześniej wspomniałem, w rozprawie znajdują się potknięcia terminologiczne i drobniejsze usterki o charakterze zarówno merytorycznym, jak i edycyjnym. Najważniejsze z nich zostaną poniżej wyszczególnione począwszy od niedociągnięć terminologicznych, następnie ogólnych, a kończąc na edycyjnych.

Usterki terminologiczne

1. Doktorant w wielu miejscach rozprawy operuje terminami „naprężenie”, „odkształcenie”, stosując błędnie liczbę mnogą, tj. „naprężenia”, „odkształcenia”. Są to dość istotne błędy terminologiczne. Prawdłowo można mówić o wartościach naprężenia lub odkształcenia, względnie składowych naprężenia lub odkształcenia. Nieporządek jest tutaj spotęgowany faktem, że Doktorant w niektórych punktach swojej pracy bez zastanowienia stosuje wymiennie raz liczbę mnogą, a za chwilę liczbę pojedynczą do tych samych wyżej wymienionych terminów.
2. Doktorant operuje terminem „szybkość odkształcenia”, natomiast w zdecydowanej większości pozycji literaturowych stosowane jest nazewnictwo tego parametru „prędkość odkształcenia”.
3. Niektóre pojęcia Doktorant przetłumaczył na język polski w sposób, który moim zdaniem jest dość ułomny, przykłady zostały wskazane w manuskrypcie rozprawy.
4. Str. 14. Jest: „przyrost odkształceń poprzecznych (obwodowych)”. Składowa odkształcenia poprzecznego, nie powinna być utożsamiana ze składową odkształcenia obwodowego.
5. Str. 19. Jest: „odwzorowanie rentgenowskie”; powinno być: „badania rentgenowskie” lub „badania z użyciem aparatu RTG” lub „obrazowanie rentgenowskie”

6. Str. 29. Jest: „szerokość lokalizacji pęknięcia”; powinno być: „szerokość pęknięcia w miejscu lokalizacji”.
7. Str. 29. Jest: „H to dodatkowa bez jednostkowa funkcja tabularyczna skalująca ciśnienie”; powinno być: „H to dodatkowa bezwymiarowa funkcja tabelaryczna do skalowania ciśnienia”.
8. Str. 31. Oznaczenia zastosowane w równaniu (14) nie zgadzają się z oznaczeniami tych samych parametrów na rys. 5.
9. Str. 32. Jest: „W modelu tym dwie powierzchnie zniszczenia: nienaruszona i w pełni uszkodzona”; powinno być: „W modelu tym dwie powierzchnie zniszczenia reprezentujące: początkowy stan materiału bez uszkodzeń i stan materiału zniszczonego”.
10. Str. 41. Jest: „...w pracy założono zdefiniowanie uogólnionej krzywej rozciągania..”; powinno być: „...w pracy przyjęto definicję uogólnionej krzywej rozciągania..”.
11. Str. 59. Jest „ilość bloków”, „ilość usuniętych elementów”; Powinno być: „liczba bloków”, „liczba usuniętych elementów”. Rzeczowniki policzalne wymagają zastosowania słowa „liczba”.

Usterki o charakterze ogólnym

12. Dobrym zwyczajem przy pisaniu rozpraw doktorskich, habilitacyjnych lub książek jest zachowanie jednolitego języka, albo jest to język polski, albo inny, najczęściej angielski. Skoro Doktorant zdecydował się na język polski w syntetycznym opisie prac stanowiących rozprawę, to bardzo dziwi fakt zastosowania języka angielskiego na wielu zamieszczonych w pracy rysunkach.

Usterki o charakterze edycyjnym

13. Jakość większości rysunków jest dobra, ale są wyjątki, np. rys.5 - zbyt małe opisy; rys. 7 potknięcia edycyjne w opisach.
14. Na stronie 23 wymienia się 4 prędkości odkształcenia, ale na rysunku 3 przedstawiono wyniki tylko dla trzech wartości tego parametru, dlaczego?
15. Na rys. 14 zestawiono wyniki otrzymane z wykorzystaniem stanowiska pręta Hopkinsona, ale brakuje informacji o wartości prędkości odkształcenia.

Pozostałe uchybienia dotyczące głównie usterek językowych, względnie komentarze odnośnie drobnych spraw zaznaczyłem w dostarczonym egzemplarzu rozprawy.

4. Wniosek końcowy

Mgr inż. Michał Kucewicz jest autorem rozprawy doktorskiej, która dotyczy istotnych problemów współczesnej techniki w zakresie mechaniki skał lokującym ją w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Wkład Doktoranta do tej dyscypliny obejmuje moim zdaniem:

- (a) Przeprowadzenie bardzo trudnych technicznie badań w celu określenia podstawowych właściwości mechanicznych skał dolomitowych.**
- (b) Przeprowadzenie analizy porównawczej trzech modeli konstytutywnych mechaniki skał, identyfikacji ich stałych materiałowych na podstawie zrealizowanego programu testów doświadczalnych lub danych literaturowych oraz opracowanie zaawansowanych kodów numerycznych z ich implementacją w metodzie elementów skończonych.**
- (c) Skuteczne zastosowanie modelu JH-2 do obliczeń strzelań dołowych i wykazanie jego dużej przydatności w ocenie strefy występowania stabilnego pęknięcia wywołanego detonacją ładunku wybuchowego, jak również określania wpływu zastosowanych ładunków wybuchowych na fragmentację i charakter pęknięcia badanej skały.**

Analiza wszystkich dokonań Doktoranta uzyskanych w ramach realizacji zadań związanych z rozprawą doktorską wskazuje, że zarówno od strony doświadczalnej, jak i numerycznej Doktorant dysponuje bardzo dobrym przygotowaniem i ma odpowiednie umiejętności. Zwłaszcza w pracach o charakterze symulacyjnym wykazał się dużą swobodą w zakresie posługiwania się procedurami numerycznymi dotyczącymi identyfikacji parametrów i ich implementacji we własnych kodach numerycznych wykorzystywanych w metodzie elementów skończonych.

Uwagi krytyczne przedstawione w niniejszej recenzji mają charakter w większości porządkowy oraz stanowiący pewne wskazówki dla przyszłych prac naukowych mgr. inż. Michała Kucewicza i nie wpływają w sposób znaczący na wysoką ocenę całokształtu Jego osiągnięć zawartych w rozprawie.

Biorąc pod uwagę wszystkie wymienione aspekty uważam, że praca w aktualnej formie spełnia w stopniu ponad dobrym wszystkie wymagania ustawy o tytule

naukowym i stopniach naukowych z dnia 14 marca 2003 roku z uwzględnieniem późniejszych zmian i dlatego stawiam wniosek o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Lewalski