

Warszawa, 12.02.2021

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Burczyński, czł. rzecz. PAN  
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN  
ul. Pawińskiego 5B  
00-106 Warszawa  
e-mail: [tburczynski@ippt.pan.pl](mailto:tburczynski@ippt.pan.pl)

**Recenzja rozprawy doktorskiej**  
**mgr inż. Martyny Poręby-Sebastjan**  
**pt.**  
**„Modelowanie wieloskalowe materiałów hipersprężystych”**

## 1. Wstęp

Recenzowana rozprawa doktorska powstała w Katedrze Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Wacław Kuś, prof. PŚ.

Głównym celem rozprawy jest zastosowanie modelowania wieloskalowego niesprężonego do wyznaczenia zastępczych parametrów materiałowych kompozytów hipersprężystych przy wykorzystaniu obliczeń ewolucyjnych.

Biorąc pod uwagę treść i zakres pracy oraz zastosowane metody, można ją z całą pewnością zakwalifikować do dyscypliny **inżynieria mechaniczna**, w obszarze mechaniki materiałów z zaawansowanym zastosowaniem metod obliczeniowych.

## 2. Zakres i treść rozprawy

Rozprawa zajmuje 150 stron i składa się z spisu treści, wykazu stosowanych symboli, siedmiu rozdziałów, spisu literatury spisu rysunków i tabel oraz streszczeń w j. polskim i angielskim. Wprowadzenie do rozprawy, zawierające cel i zakres pracy, tezę, dotychczasowy stan wiedzy, uzasadnienie podjęcia problemu badawczego, znaczenie wyników badań dla rozwoju dyscypliny naukowej oraz przegląd treści rozprawy przedstawiła Doktorantka w rozdziale 1.

Rozdział 2. poświęcony jest opisowi metody elementów skończonych (MES) w teorii hipersprężystości. Opisane są m.in. modele Mooney-Rivlina, neo-Hooke'a, Ogdena, Yeoha oraz Arruda-Boyce.

Rozdział 3. zawiera opis koncepcji modelowania wieloskalowego i homogenizacji. Doktorantka przedstawiła różne koncepcje homogenizacji i skupiła swoją uwagę na podejściu hierarchicznym, w którym informacja między skalami makro-mikro nie jest przekazywana naprzemiennie, jak jest w podejściu sprzężonym, ale opartej na modelu zastępczym w skali

mikro i wykorzystuje się ją w skali makro z uwzględnieniem możliwych nieliniowości. Koncepcja ta nazywa się w literaturze metodą homogenizacji niesprężonej i bazuje ona na założeniu, że każda skala analizowana jest niezależnie.

W rozdziale 4. Doktorantka przedstawiła opis algorytmów ewolucyjnych, które używa do wyznaczenia zastępczych parametrów modelu w skali mikro, do rozwiązania zagadnienia optymalizacji.

Własną oryginalną koncepcję połączenia metody homogenizacji niesprężonej dla materiałów hipersprężystych z obliczeniami ewolucyjnymi przedstawiła Doktorantka w rozdziale 5.

W rozdziale 6. przedstawione są przykłady zastosowania opracowanej metodologii wieloskalowej niesprężonej do zagadnień inżynierskich.

Podsumowanie rozprawy przedstawiła Doktorantka w rozdziale 7.

Bibliografia zawiera 126 pozycji, z tego 3 pozycje literaturowe są autorstwa lub współautorstwa Doktorantki.

### 3. Ocena merytoryczna pracy

Cel pracy jaki postawiła sobie Doktorantka było opracowanie wieloskalowej metody homogenizacji niesprężonej opartej na obliczeniach ewolucyjnych.

Doktorantka stawia tezę, że *„metoda homogenizacji niesprężonej z użyciem algorytmu ewolucyjnego skutecznie pozwala na wyznaczenie zastępczych parametrów modeli materiałów hipersprężystych w skali niższej (zazwyczaj mikro) i wykorzystanie ich w skali wyższej (zazwyczaj makro).”*

Główną zaletą opracowanej metody może być znaczne skrócenie czasu obliczeń w stosunku do wersji niesprężonej, przy zachowaniu dopuszczalnej dokładności homogenizacji. Zapewne to miała Doktorantka na myśli pisząc w tezie rozprawy, że metoda homogenizacji niesprężonej jest *skuteczna*. Główną cechą metody jest fakt, że analiza prowadzona jest w każdej skali oddzielnie, a pojedyncze wyznaczenie parametrów modelu po homogenizacji możliwe jest do wykorzystania w skali makro.

Oryginalnym elementem opracowanej metody jest zastosowanie algorytmu ewolucyjnego do poszukiwania parametrów modelu konstytutywnego poprzez rozwiązanie zadania optymalizacji. Zaproponowane podejście daje duże prawdopodobieństwo znalezienia rozwiązania globalnego zadania optymalizacji, które polega na minimalizacji błędu względnego pomiędzy odpowiedzią modelu ze strukturą niejednorodną oraz modelu homogenicznego dla wszystkich przypadków obciążeń.

Otrzymane wyniki Doktorantka porównała z wynikami metody homogenizacji Mori-Tanaki wskazując na zbliżone wyniki dla modelu pełnego MES.

Opracowana metoda została zastosowana do modelowania wielkoskalowego materiałów hipersprężystych. W rozprawie przedstawiono kilka przykładów zastosowania metody do kompozytów zbudowanych także z materiałów sprężystych. Badano kompozyty z wtrąceniami w postaci sferycznej, z wtrąceniami w postaci włókien, a także model wieloskalowy dla substancji białej mózgu.

Doktorantka posłużyła się profesjonalnym kodem obliczeniowym MES - Comsol Multiphysics do rozwiązania zagadnienia brzegowego.

Do wymiany informacji pomiędzy programem MES, a algorytmem ewolucyjnym oraz obliczania wartości funkcji celu zastosowany został język Java.

Rozprawa ma charakter teoretyczno-numeryczny, ponieważ opiera się na procesie budowy modelu wieloskalowej niesprężonej homogenizacji opartej na obliczeniach ewolucyjnych.

Struktura pracy jest logiczna i praca napisana jest jasno i przejrzysto.

### **Uwagi dyskusyjne**

- (i) Doktorantka nie uzasadnia dlaczego wybrała algorytmy ewolucyjne do rozwiązania zadania optymalizacji, a nie np. inne algorytmy optymalizacji globalnej jak sztuczne systemy immunologiczne, algorytmy rojowe lub algorytmy hybrydowe (np. algorytmy memetyczne).
- (ii) Doktorantka porównała dokładność metody homogenizacji niesprężonej z metodą teorii średniego pola dla materiału hipersprężystego o parametrach neo-Hooke'a dla osnowy jak i wtrąceń sferycznych. Otrzymany błąd wskazuje na dużą dokładność metody niesprężonej. Pozostaje jednak pytanie, czy taka duża dokładność będzie zachowana także dla innych materiałów hipersprężystych. Szkoda także, że Doktorantka nie porównała czasu obliczeń za pomocą tych metod. To byłoby bardzo interesujące z punktu widzenia efektywności metody niesprężonej. Co prawda na str. 91 Doktorantka podaje pewne dane dotyczące skrócenia czasu obliczeń numerycznych (nawet 54 krotne), ale problem efektywności numerycznej z punktu widzenia czasu obliczeń nie wybrzmiał w rozprawie należycie.
- (iii) Osobnym problemem jest stosowanie kodów komercyjnych w badaniach naukowych. Kody takie, w tym także kod MES - Comsol Multiphysics nadają się przede wszystkim do obliczeń inżynierskich. W przypadku stosowania ich w zaawansowanych obliczeniach naukowych należy zachować dużą ostrożność z uwagi na to, że nie zawsze wiadomo przy jakich fizycznych założeniach modelowych został on zbudowany. Ponadto profesjonalne kody nie zawierają zwykle podejścia adaptacyjnego typu *hp* i dlatego trudno jest ocenić i zweryfikować dokładność uzyskanych wyników numerycznych.
- (iv) We wnioskach końcowych brak jest szerszych perspektyw rozwoju zaproponowanego podejścia do homogenizacji sprężonej z algorytmem ewolucyjnym i potencjalnych planów dalszych badań.

#### 4. Wniosek końcowy

Problematyka badawcza ocenianej pracy doktorskiej poświęcona jest opracowaniu metodologii modelowania wielkoskalowego niesprężonego do wyznaczenia zastępczych parametrów materiałowych kompozytów hipersprężystych przy wykorzystaniu obliczeń ewolucyjnych.

Praca jest na dobrym poziomie naukowym, cechuje się zaawansowanym aparatem obliczeniowym i ma także wymiar inżynierski, na co wskazują przedstawione w pracy przykłady numeryczne homogenizacji niesprężonej.

Doktorantka wykazała się dużą umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a osiągnięte wyniki są niewątpliwym jej wkładem do modelowania wieloskalowego.

Praca spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę i dlatego proponuje przyjęcie jej przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej i dopuszczenie do publicznej obrony.



---

Tadeusz Burczyński