

prof. dr hab. inż. Jerzy Małachowski
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Wojskowa Akademia Techniczna
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warszawa
Tel.: +48 261 839 140
E-mail: jerzy.malachowski@wat.edu.pl

Warszawa, 16.11.2023 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej zatytułowanej w j. polskim

„*Wyznaczanie właściwości mechanicznych materiałów kompozytowych z zastosowaniem hipotezy równoważności energii*”

autorstwa mgr inż. ANNY JERZYŃSKIEJ

1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania stanowi pismo (sygn. M.00-125/2023) Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej asygnowane przez Pana prof. dr hab. inż. JERZEGO A. SŁADKA i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr inż. ANNY JERZYŃSKIEJ pt. „*Wyznaczanie właściwości mechanicznych materiałów kompozytowych z zastosowaniem hipotezy równoważności energii*”. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. HALINA EGNER, a promotorem pomocniczym dr hab. inż. ANETA LIBER-KNEĆ, prof. PK.

2. Omówienie pracy

Recenzowana rozprawa doktorska została napisana w języku polskim, łącznie na 114 stronach maszynopisu formatu A4. W skład jej wchodzi: przedmowa, wykaz ważniejszych oznaczeń, 9 rozdziałów, spis tabel, spis rysunków, dodatek 1, bibliografia, streszczenie w j. polskim i j. angielskim. Tytuły poszczególnych rozdziałów są następujące: (1) Wstęp; (2) Cel, zakres i teza pracy; (3) Koncepcja wyznaczania właściwości mechanicznych materiałów kompozytowych z zastosowaniem hipotezy równoważności energii; (4) Kompozyty izotropowe; (5) Wyznaczanie właściwości mechanicznych kompozytów anizotropowych; (6) Implementacja numeryczna; (7) Badania parametryczne i weryfikacja doświadczalna metody wyznaczania właściwości mechanicznych kompozytów; (8) Przykłady zastosowań; (9) Podsumowanie i kierunki dalszych badań.

Autorka rozprawy doktorskiej zaprezentowała opis nowej metody wyznaczania właściwości mechanicznych materiałów kompozytowych, inspirowanej formalizmem kontynualnej mechaniki uszkodzeń i wykorzystującej hipotezę równoważności energii całkowitej. Ważnym aspektem jest włączenie do tego opisu wpływu zbrojenia na właściwości makroskopowe materiału kompozytowego

poprzez odwzorowanie rzeczywistej konfiguracji wielofazowej (złożonej z matrycy i zbrojenia) w fikcyjny, mechanicznie równoważny materiał jednorodny. Doktorantka do opisu efektywnych właściwości mechanicznych kompozytu, które standardowo wyznacza się na podstawie znajomości właściwości, udziału objętościowego i konfiguracji geometrycznej jego składników, zaproponowała koncepcję równoważności energii. Model konstytutywny materiału kompozytowego dla zakresu pracy sprężysto-plastycznej został opracowany przy użyciu formalizmu termodynamiki procesów nieodwracalnych z wewnętrznymi zmiennymi stanu. Autorka przedstawionej koncepcji wykonała implementację numeryczną w środowisku programu Wolfram Mathematica 11.2. Warty podkreślenia jest przeprowadzenie przez Doktorantkę formy studium parametrycznego badając różne właściwości oraz proporcje materiałów składowych. Kolejnym jakże ważnym i uwiarygadniającym daną koncepcję krokiem był proces jej walidacji, czyli potwierdzenie poprzez dostarczenie obiektywnego dowodu spełnienia określonych wymagań odnośnie do konkretnego użycia lub zastosowania. Proces ten Autorka dysertacji wykonała poprzez porównanie wyników symulacji numerycznych z wynikami innych metod dostępnych w literaturze oraz z własnymi i dostępnymi w literaturze wynikami badań eksperymentalnych. Uzyskane wyniki potwierdziły zgodność z danymi eksperymentalnymi, a zestawienie błędów predykcji rozważanych metod zaprezentowane w rozprawie wykazało, że w zdecydowanej większości przypadków błąd metody jest najmniejszy na tle innych porównań. W części badań doświadczalnych Doktorantka właściwości mechaniczne kompozytów wyznaczała za pomocą standardowych testów mechanicznych zgodnych z ogólnie przyjętymi normami. Uzyskane wyniki umożliwiły Autorce weryfikację postawionej hipotezy badawczej i potwierdziły, że efektywne właściwości materiału kompozytowego mogą być skutecznie wyznaczone na podstawie mechanicznej równoważności między prawdziwym heterogenicznym wieloskładnikowym kompozytem a fikcyjnym materiałem quasi-jednorodnym. Dodatkowym atutem recenzowanej dysertacji jest zaprezentowanie zalet opracowanej metody potwierdzonych na zrealizowanych przykładach obliczeń wytrzymałościowych wybranych elementów konstrukcyjnych zbudowanych z materiałów o funkcyjnie zmiennych właściwościach. W ramach tych przykładów Autorka przedstawiła analizę optymalnego rozkładu zbrojenia w pręcie kołowym poddanym skręcaniu w zakresie sprężystym (optymalizacja poprzez minimalizację jednostkowego kąta skręcenia dla zadanego momentu zewnętrznego przy stałej objętości zbrojenia) oraz analizę wytrzymałościową belki zbudowanej z materiału FGM. Osiągnięte wyniki potwierdziły przydatność opisywanej metody określania efektywnych właściwości izotropowych materiałów kompozytowych do projektowania optymalnych elementów konstrukcyjnych.

Warto podkreślić, że badania i osiągnięte wyniki zrealizowano w ramach projektu badawczego pozyskanego z Narodowego Centrum Nauki (numer UMO-2018/31/N/ST8/01052) pt. „*Nowa metoda określania efektywnych właściwości materiałów kompozytowych*”.

Mgr inż. Anna Jerzyńska (z domu Wiśniewska) jest współautorem 3 publikacji zarejestrowanych w bazie Scopus opublikowanych w czasopiśmie naukowym (dwie w *Materials* (wydawca MDPI) i jeden w *Composites Part B: Engineering* (wydawca Elsevier)). Jest to publikacyjność na poziomie spełniającym wymagania ustawowe. Wykazane powyżej publikacje były już siedemnastokrotnie cytowane.

3. Pytania merytoryczne oraz uwagi dyskusyjne

Po zapoznaniu się z treścią całej rozprawy, Recenzent chciałby otrzymać odpowiedzi/wyjaśnienia na następujące kwestie:

- 1) Dyskusyjne jest stwierdzenie użyte przez Doktorantkę (str. (12) „...że włókna są rozmieszczone w matrycy w sposób okresowy,...”, gdyż sformułowanie „okresowy” odnosi się do jednostki czasu. Czy takie było zamierzenie Autorki dysertacji? Czy może jednak bliższe temu stwierdzeniu byłoby użycie słowa „regularny” lub „usystematyzowany”? Jaka była intencja Autorki dysertacji?
- 2) Jak ten zwrot („Z drugiej strony, RVE powinien być na tyle mały, aby stan naprężenia i odkształcenia można w nim było uznać za jednorodny.”) użyty na str. 18 dysertacji należy interpretować w stosunku do badanych struktur kompozytowych? Brak jest jasno sprecyzowanego kryterium.
- 3) Co Autorka miała na myśli używając stwierdzenia na str. 24, tj. „Zastosowanie liniowej aproksymacji pomiędzy punktami skrajnymi skutkuje opisem parametrów sprężystych kompozytu poprzez wielomiany drugiego stopnia.”?
- 4) Na str. 39 do opisu zależności z zakresu modelowania konstytutywnego Doktorantka użyła stwierdzenia „Równanie stanu”. Jest to nieprawidłowe użycie, gdyż równanie stanu to sposób na reprezentację modelu matematycznego układu dynamicznego. Opis układu za pomocą równań stanu nazywany jest też czasami opisem w przestrzeni stanów lub modelem zmiennych stanu. Z punktu widzenia fizyki to równanie, które wiąże zależność pomiędzy ciśnieniem, masą (gęstością), objętością, temperaturą i zarazem energią wewnętrzną w warunkach obciążeń dynamicznych, a ta sytuacja nie występuje w badanej konfiguracji podczas realizowanych warunków początkowo-brzegowych odnoszących się do zagadnień statyki.
- 5) Na str. 44 Autorka nie dookreśliła, który z parametrów jest brany pod uwagę jako kryterium iteracyjne w metodzie Newtona-Raphsona (przemieszczenie - jego zmiana, działający układ sił czy energia) oraz czy tylko jeden parametr był poddany analizie czy dwa lub więcej dając wówczas tzw. efekt solidnego rozwiązania (ang. *robust solution*)?

- 6) W rozdziale 7 wyniki z badań eksperymentalnych w ujęciu naprężenie-odkształcenie nie dookreślają wg jakich miar te wielkości zostały wyznaczone. Czy dokonane następnie porównanie na bazie danej teorii opisu zachowania materiału kompozytowego w ujęciu energetycznym nie stanowi podstawy do wypracowania miary reprezentowanych wielkości (odkształcenie, naprężenie) mając na względzie spełnienie warunku bilansu energetycznego wynikającego z pracy sił zewnętrznych?
- 7) Na str. 67 zaprezentowane jest porównanie z wynikami badań eksperymentalnych. W opinii Recenzenta brak jest analiz wyników eksperymentalnych w ujęciu statystycznym.

Recenzent stwierdza, że zaprezentowana Przez Autorkę dysertacji metodologia badawcza pokazująca sprzężenie badań analitycznych oraz numerycznych z testami eksperymentalnymi jest jak najbardziej prawidłowa. Przedłożone powyżej uwagi mają w dużej mierze charakter pytań (czasami wątpliwości), ale mogą także stanowić dla Doktorantki podstawę do wytyczenia i rozwijania nowych wątków badawczych oprócz tych przedstawionych jako dalsze kroki badawcze zamieszczone w recenzowanej dysertacji.

4. Ocena końcowa przedłożonej rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska posiada przede wszystkim ważny aspekt naukowo-poznawczy. Autorka zaproponowała nową metodę wyznaczania właściwości mechanicznych kompozytów. Takie ujęcie pozwala uwzględnić wpływ zbrojenia na właściwości makroskopowe kompozytu, a wyznaczanie właściwości mechanicznych kompozytu odbywa się z uwzględnieniem właściwości materiałów składowych oraz udziału objętościowego zbrojenia w reprezentatywnym elemencie objętościowym. Na podstawie wykonanych przez Doktorantkę badań i analiz wypracowanych zostało także szereg wartościowych wniosków, pokazujących zalety zaproponowanego oryginalnego rozwiązania problemu naukowego, do których, powtarzając za Autorką, można niewątpliwie m.in. zaliczyć następujące stwierdzenia, że:

- właściwości materiałów kompozytowych w makroskali można jednoznacznie otrzymać jako jawne funkcje udziału objętościowego zbrojenia,
- może być stosowane zarówno do materiałów kompozytowych izotropowych, jak i anizotropowych
- można wyznaczyć zarówno właściwości sprężyste, jak i plastyczne materiału kompozytowego.

Pani mgr inż. Anna Jerzyńska dzięki zrealizowanej rozprawie zaprezentowała szereg interesujących i cennych nowych wyników badawczych wynikających z zaproponowanej nowej

i oryginalnej metody. Doktorantka wykazała się umiejętnością stworzenia i realizacji badań zarówno analitycznych, numerycznych, jak też eksperymentalnych w skali laboratoryjnej, czym potwierdziła, że zdobyła nie tylko wiedzę na poziomie ogólnym, ale także szczegółowym w zakresie teoretyczno-numerycznego rozwiązywania problemu implementując stosowne prawa konstytutywne i rozwijając oryginalną metodykę modelowania w celu udowodnienia postawionej tezy, która brzmiała: „*Wykorzystanie hipotezy równoważności energii całkowitej pomiędzy rzeczywistym, niejednorodnym materiałem kompozytowym oraz fikcyjnym materiałem pseudojednorodnym pozwoli na wyznaczenie właściwości mechanicznych szerokiej gamy materiałów kompozytowych, w tym przypadków izotropowych i nieizotropowych, zarówno w zakresie sprężystym, jak i plastycznym.*”.

Zarówno osiągnięte wyniki zaprezentowane w niniejszej dysertacji, już opracowane i opublikowane artykuły oraz powiązane z nimi przeprowadzone badania analityczno-numeryczne, a także testy eksperymentalne potwierdziły, że Autorka rozprawy doktorskiej uzyskała wiedzę niezbędną do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Bardzo ważnym aspektem podkreślającym powyższe stwierdzenie jest także zaplanowanie kolejnych etapów prac badawczych, które niewątpliwie wytyczają nowe kierunki dalszego rozwoju. Za szczególnie ważne i celowe Recenzent uznaje podjęcie działań poznawczych i prac obejmujących m.in. kontynuację opisu kompozytów anizotropowych z zastosowaniem zagadnień ukierunkowanych na uwzględnienie w opisie procesu plastyczności oraz rozwoju uszkodzeń w analizowanej materii. Recenzent widzi także dalszy potencjał badawczy w zakresie wykorzystania opracowanych modeli w zakresie niedeterministycznego opisu cech materiałowych oraz np. zmiennych warunków początkowo-brzegowych przy możliwych analizach pod kątem aplikacyjnym.

5. Wniosek końcowy

Recenzent stwierdza, że przedstawiona dysertacja doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez stosowną *Ustawę* i stawia wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony rozprawy przez mgr inż. ANNĘ JERZYŃSKĄ. Przedstawiona do recenzji praca doktorska mieści się w zakresie dziedziny nauk inżynierijno-technicznych w dyscyplinie naukowej *inżynieria mechaniczna*.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę zaprezentowane badania modelowe, opisy analityczne, analizy numeryczne oraz wykonanie badań eksperymentalnych dla potrzeb walidacyjnych, Recenzent wnioskuje do Rady o wyróżnienie niniejszej dysertacji.

