

Npłynęto 21.10.2021.
dostawiono osobiście per. P
prof. H. Guminiak

Michał Guminiak, dr hab. inż.
Adiunkt
Instytut Analizy Konstrukcji Politechniki Poznańskiej
ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań
e-mail: michal.guminiak@put.poznan.pl

Recenzja dysertacji doktorskiej pt.

Probabilistic analysis of composite materials with hyperelastic components

autorstwa mgr. inż. Damiana Sokołowskiego

przygotowanej pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Marcina Kamińskiego

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzja dysertacji doktorskiej zatytułowanej *Probabilistic analysis of composite materials with hyperelastic components* (tytuł w języku polskim brzmi: *Probabilistyczna analiza materiałów kompozytowych o składnikach hipersprężystych*), której autorem jest mgr inż. Damian Sokołowski, została opracowana na podstawie pisma z dnia 20.09.2021 roku, wystosowanego przez Dziekana Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej prof. dr. hab. inż. Dariusza Gawina zgodnie z Uchwałą Rady ds. Stopni Naukowych z dnia 16.09.2021 roku. Promotorem dysertacji doktorskiej jest prof. dr. hab. inż. Marcin Kamiński, kierownik Zakładu Niezawodności Konstrukcji Katedry Mechaniki Konstrukcji Politechniki Łódzkiej.

2. Opis dysertacji

Dysertacja przygotowana w języku angielskim liczy 204 strony i składa się ze streszczenia w językach angielskim i polskim wraz ze słowami kluczowymi, siedmiu rozdziałów oraz spisu literatury. Dysertacja zawiera rysunki, których numeracja przyporządkowana jest numerom kolejnych rozdziałów. Na początku pracy Autor zamieścił podziękowanie skierowane na ręce Promotora oraz swojej Rodziny.

W rozdziale pierwszym, w którego skład wchodzi cztery podrozdziały, Autor przedstawił przedmiot opracowania, motywację podjęcia pracy nad przedstawioną tematyką, tezy i hipotezy oraz cel i zakres dysertacji.

Rozdział drugi zawiera przegląd literatury poświęconej mechanice materiałów hipersprężystych, opisowi ich stanów deformacji i naprężenia, ujęciom stochastycznym w opisie zachowania takich materiałów, omówieniu tzw. uszkodzeń międzyfazowych materiałów hipersprężystych, opisowi analizy wieloskalowej i homogenizacji oraz efektywnej odpowiedzi materiału poddanego odpowiednim obciążeniom.

W rozdziale trzecim Autor nakreślił podstawy teoretyczne opisu zagadnień przedstawionych w dysertacji, w skład których wchodzi: podstawy teorii homogenizacji w ujęciu propabilistycznym (w tym opis materiałów kompozytowych w ujęciu wieloskalowym), sformułowanie macierzowe opisu mechaniki materiałów charakteryzujących się podatnością na duże deformacje, metody homogenizacji materiałów kompozytowych, sformułowanie zadania mechaniki materiałów hipersprężystych przy zastosowaniu powyższych teorii oraz rozwiązanie zadania metodą perturbacji stochastycznej.

W dalszej części rozdziału trzeciego został zaprezentowany sposób odpowiedzi badanego materiału przy zastosowaniu funkcji odpowiedzi oraz tzw. powierzchniowej metody odpowiedzi.

W rozdziale czwartym Autor przedstawił algorytmy numeryczne służące do rozwiązywania zadań zaproponowanych i opisanych w rozdziale poprzednim, tzn. opisał ogólne zastosowanie metody elementów skończonych, sposób obliczeń przy zastosowaniu ujęcia stochastycznego (w tym obliczenia zgodnie z teorią homogenizacji w ujęciu stochastycznym) oraz charakterystyk stochastycznych uszkodzeń na styku matrycy i zbrojenia materiału hipersprężystego.

Rozdział piąty poświęcony jest badaniom laboratoryjnym służącym do weryfikacji przedstawionych wyników numerycznych. Opisano w nim cel eksperymentu badawczego oraz sposób przygotowania materiału i stanowiska badawczego.

W rozdziale szóstym Autor przedstawia autorski eksperyment numeryczny, stanowiący główny element dysertacji, który zawiera: opis hipersprężystego modelu matrycy materiału kompozytowego, opis własności efektywnych materiału kompozytowego, a także optymalizację funkcji odpowiedzi, obliczenia w ujęciu deterministycznym, charakterystyki stochastyczne uszkodzeń międzyfazowych i obliczenia w ujęciu stochastycznym. W dalszej kolejności Autor definiuje efektywną energię odkształcenia materiału kompozytowego z uszkodzeniami na granicy styków materiałów składowych oraz przedstawia optymalizację tzw. powierzchni odpowiedzi, obliczenia w ujęciu deterministycznym i stochastycznym wraz z oszacowaniem błędu przybliżenia rozwiązania.

W rozdziale tym Autor prezentuje szczegółowy opis objętościowego elementu reprezentatywnego i rozwiązania zadania w ujęciu metody elementów skończonych oraz podaje metody, które zastosował do wyznaczania charakterystyk stochastycznych funkcji stanu. Autor przedstawia również procedurę wyboru hipersprężystych modeli materiału, który tworzy matrycę kompozytu.

Dysertację zamyka rozdział siódmy, w przedstawione są wnioski końcowe i propozycje dalszych badań.

W dalszej części pracy Autor wskazał instytucje, które sfinansowały wykonane badania, oraz podał wykaz projektów badawczych, w których uczestniczył. Są to:

- grant nr 2016/21/N/ST8/01224 finansowany przez Narodowe Centrum Nauki w Krakowie,
- stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców SMN/16/0563/2020,
- stypendium IACM finansujące udział w Kongresie WCCM & ECCOMAS 2020,
- stypendium IASSAR finansujące udział w konferencji ICOSSAR 2017,

- stypendium ECCOMAS finansujące udział w Kongresie ECCOMAS 2016,
 - stypendium Rektora Politechniki Łódzkiej RNN/WFS/27/2018,
 - stypendia Dziekana Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej dla Młodych Badaczy WBAS/17/2021, WBAS/MN/11/2019, WBAS/MN/30/2018,
 - stypendium Erasmus+ na pobyt naukowy we Włoszech w Politecnico di Milano, w 2014 roku,
 - stypendium Erasmus na pobyt naukowy Austrii w Technische Universität Wien, w 2013 roku.
- Pracę kończy obszerny spis literatury cytowanej w dysertacji.

3. Uwagi krytyczne o dysertacji

3.1. Uwagi formalne

Dysertacja ma budowę kanoniczną i jest napisana w sposób bardzo staranny. Autor, posługując się bardzo zaawansowanym słownictwem anglojęzycznym, przedstawił trudne zagadnienia stochastycznego ujęcia mechaniki nieliniowej materiałów poddanych dużym deformacjom w sposób prosty i zrozumiały.

Dysertacja zawiera niezbędny wstęp, na który składają się: streszczenie pracy (w tym streszczenie w języku polskim), wprowadzenie wraz z przedstawieniem i sformułowaniem głównych tez oraz motywacji podjęcia pracy naukowej nad prezentowanym tematem badawczym. Dalej Autor zawarł przegląd literatury, który łącznie z pozycjami cytowanymi w kolejnych częściach dysertacji obejmuje wykaz 336 publikacji związanych z podjętą tematyką badań oraz czterech norm i trzech odnośników do materiałów naukowych.

Kolejne rozdziały dysertacji tworzą zwarty ciąg rozważań naukowych, na który składają się niezbędne podstawy teoretyczne związane z mechaniką ciała hiperprężystego, w tym kompozytu zbudowanego z materiałów o cechach hipersprężystych w ujęciu probabilistycznym, opis sposobu rozwiązania sformułowanych zadań w ujęciu numerycznym, opis doświadczenia laboratoryjnego związanego z zaproponowaną wcześniej teorią oraz symulacje numeryczne, przy czym Autor poparł swoje tezy licznymi przykładami liczbowymi.

Na zakończenie Autor sformułował wnioski oraz propozycje dalszych badań. Dysertację kończy spis cytowanych publikacji, spis rysunków oraz wykaz zastosowanych oznaczeń, przy czym Autor umieścił również podziękowania okazane instytucjom i uczelniom finansującym Jego badania naukowe.

3.2. Uwagi merytoryczne

Głównym celem badawczym, jaki postawił sobie Autor niniejszej dysertacji jest opis stochastyczny procesu deformacji kompozytów ze zmienną losową przy nieliniowo-sprężystym (hipersprężystym) procesie deformacji wraz ze szczegółową weryfikacją numeryczną. Autor zastosował iteracyjną uogólnioną stochastyczną metodę elementów skończonych (*Stochastic Finite Element Method, SFEM*) dla kompozytu wykonanego z osnowy z poliuretanu o wysokiej gęstości (*high density polyuretane, HDPU*) i wzmocnienia z nanocząstek sadzy (*carbon black, CB*). Analizowany kompozyt składa się

z materiału o nazwie Laripur 5020, który tworzy matrycę, i jest wzmocniony materiałem składającym się z fulerenu C60. Zdefiniowany w ten sposób materiał złożony jest w dalszym ciągu pracy nazywany kompozytem (*objective composite*). Autor zaproponowano również probabilistyczny schemat homogenizacji materiału kompozytowego ze stochastycznym opisem uszkodzeń na styku materiałów składowych przy nieliniowym, hipersprężystym opisie deformacji.

Autor zdefiniował następujące główne cele pracy. Są to:

1. Zaproponowanie sposobu modelowania właściwości mechanicznych hipersprężystej strefy przejściowej w przypadku losowego określania uszkodzeń w strefie kontaktu materiałów składowych kompozytu (*interface defects*).
2. Wyznaczenie efektywnych właściwości materiałowych tego kompozytu.
3. Określenie wpływu niepewności udziału objętościowego uszkodzeń na granicy materiałów składowych (granicy faz) na właściwości efektywne i deformację kompozytu przy hipersprężystym prawie fizycznym.
4. Wyznaczenie estymatorów statystycznych udziału objętościowego uszkodzeń na granicy materiałów składowych kompozytu.

Na uwagę zasługuje wykonanie przez Autora eksperymentów laboratoryjnych, a następnie zastosowanie uzyskanych wyników w obliczeniach numerycznych przeprowadzonych zgodnie z zaproponowanymi algorytmami.

Dla procesu deformacji Autor zaproponował jako funkcje stanu efektywne naprężenia i efektywną energię deformacji.

Jednocześnie Autor podał dodatkowe, lecz równie ważne cele pracy. Są to:

1. Teoretyczne sformułowanie zadania homogenizacji probabilistycznej. Rozważania te Autor przedstawił w podrozdziale 3.1.
2. Wprowadzenie metody powierzchni odpowiedzi w ujęciu iteracyjnej stochastycznej metody elementów skończonych będącej rozszerzeniem metody funkcji odpowiedzi. Ujęcie to umożliwia obliczenia stochastyczne niejawnych funkcji celu, które zależą od więcej niż jedna zmiennej i których związek z tą funkcją jest nieznanym, a która może zawierać jedną lub więcej losowych zmiennych wejściowych. Powyższe rozważania Autor przedstawił w podrozdziale 3.2.2.
3. Sformułowanie algorytmu obliczeniowego, za pomocą którego są wyznaczone funkcje stanu efektywnego kompozytu ze stochastycznymi uszkodzeniami na granicy materiałów składowych wraz z ich charakterystykami stochastycznymi, niezależnymi od zasadniczego sformułowania hipersprężystego. Rozważania te Autor przedstawił w podrozdziale 4.1.
4. Wprowadzenie jednowartościowego parametru, który definiuje zakres stochastycznych uszkodzeń interfejsu, zwanego frakcją objętościową uszkodzeń powierzchni styku materiałów składowych oraz zaproponowanie metody wyznaczania estymatorów statystycznych w kompozytach hipersprężystych ze stochastycznymi uszkodzeniami powierzchni styku,

niezależnie od zasadniczego sformułowania hipersprężystego. Rozważania te Autor przedstawił w podrozdziale 4.1.

5. Przeprowadzenie eksperymentów laboratoryjnych obejmujących pojedyncze i cykliczne jednoosiowe rozciąganie składowego materiału jednorodnego Laripur 5020 oraz kompozytu. Rozważania te Autor przedstawił w rozdziale 5.
6. Weryfikacja rodzaju zależności między współczynnikiem zmienności pierwotnego materiału jednorodnego a kompozytem na podstawie wyników eksperymentów laboratoryjnych. Rozważania te Autor przedstawił w podrozdziale 5.2.
7. Określenie dwóch pierwszych charakterystyk stochastycznych naprężenia w pierwotnym materiale jednorodnym i kompozycie w odniesieniu do wielkości odkształcenia na podstawie eksperymentów laboratoryjnych, które obejmują wartość oczekiwaną i współczynnik zmienności obliczony na podstawie wyników eksperymentów laboratoryjnych. Rozważania te Autor przedstawił w podrozdziale 5.3.
8. Wybór najlepszego dopasowania dla stochastycznego modelu składowego (pierwotnego) materiału hipersprężystego i zastosowanie wybranego dopasowania dalszej analizie numerycznej. Rozważania te Autor przedstawił w podrozdziale 6.1.
9. Analiza efektywnych właściwości materiałowych kompozytu dla trzech wybranych opisów materiału hipersprężystego, a także dla zwiększającego się udziału objętościowego uszkodzeń na granicy styku materiałów składowych kompozytu. Rozważania te Autor przedstawił w podrozdziale 6.2.2.
10. Wyznaczenie statystycznych estymatorów udziału objętościowego uszkodzeń na granicy styku materiałów składowych kompozytu. Rozważania te Autor przedstawił w podrozdziale 6.2.3.
11. Zaproponowanie procedury optymalizacji powierzchni odpowiedzi dla efektywnej energii odkształcenia w kompozycie przy jednoosiowym rozciąganiu jego próbki wraz z weryfikacją skuteczności algorytmu optymalizacji funkcji odpowiedzi. Rozważania te Autor przedstawił w podrozdziałach 6.2.4 i 6.2.1.
12. Wyznaczenie charakterystyk stochastycznych efektywnych parametrów materiałowych dla zoptymalizowanych estymatorów statystycznych wejściowego parametru losowego, które mogą być wykorzystane bezpośrednio w analizie probabilistycznej analizowanego kompozytu. Rozważania te Autor przedstawił we wstępie.
13. Zaproponowanie procedury optymalizacji powierzchni odpowiedzi dla efektywnej energii odkształcenia w kompozycie przy jednoosiowym rozciąganiu wraz z weryfikacją jej skuteczności. Rozważania te Autor przedstawił w podrozdziałach 6.3.1 i 6.3.3.
14. Weryfikacja wpływu udziału objętościowego uszkodzeń na styku materiałów składowych na efektywną energię odkształcenia i efektywne naprężenie w analizowanym kompozycie przy jednoosiowym rozciąganiu. Rozważania te Autor przedstawił w podrozdziałach 6.3.2 i 6.4.2.

15. Obliczeniowe określenie pierwszych czterech charakterystyk stochastycznych efektywnej energii odkształcenia i efektywnego naprężenia w kompozycie oraz określenie wpływu wielkości odkształcenia łącznie z wpływem współczynnika zmienności wejściowej zmiennej niepewnej, tzn. udziału objętościowego uszkodzeń na styku materiałów składowych kompozytu. Rozważania te Autor przedstawił w podrozdziałach 6.3.4. i 6.4.2.
16. Analiza zależności pierwszych czterech charakterystyk stochastycznych efektywnej energii odkształcenia i efektywnego naprężenia od odkształcenia wraz z określeniem, czy parametr ten jest niezbędny w dalszych obliczeniach stochastycznych. Rozważania te Autor przedstawił w podrozdziałach 6.3.4. i 6.4.2.
17. Weryfikacja zaproponowanego algorytmu wyznaczania udziału objętościowego estymatorów statystycznych uszkodzeń na granicy materiałów składowych, jak również wprowadzenie koncepcji rozszerzonego modelu materiałowego dla kompozytów ze stochastycznymi uszkodzeniami na pograniczu materiałów składowych. Weryfikacja przeprowadzana jest dla jednoosiowego stanu rozciągnięcia próbki kompozytu. Rozważania te Autor przedstawił w podrozdziale 6.4.3.
18. Zbudowanie rozszerzonego modelu materiałowego dla kompozytu opisanego wybranymi podstawowymi zależnościami hiperesprężystymi a także weryfikacja przydatności zaproponowanego modelu dla efektywnej energii odkształcenia i efektywnych naprężeń w próbce kompozytu poddanej jednoosiowemu rozciąganiu. Rozważania te Autor przedstawił w podrozdziałach 6.3.3 i 6.4.1.
19. Porównanie skuteczności trzech wybranych metod wyznaczania charakterystyk stochastycznych efektywnych własności materiału, efektywnej energii odkształcenia i efektywnego naprężenia, tzn.: metody iteracyjnej i uogólnionej perturbacji stochastycznej, metody półanalizycznej oraz metody symulacji Monte-Carlo. Rozważania te Autor przedstawił w podrozdziałach 6.2.3, 6.3.4, 6.4.2 i 6.4.3.
20. Sprawdzenie zastosowań proponowanego algorytmu do różnych składów materiałów hipersprężystych i porównanie wyników uzyskanych dla trzech wybranych składów materiałów podstawowych. Rozważania te Autor przedstawił w podrozdziałach 6.2 i 6.4.

Głównym elementem innowacyjnym w przedstawionej dysertacji jest propozycja sposobu szacowania stochastycznych uszkodzeń na granicy styku materiałów składowych kompozytu. Na uwagę zasługuje wykorzystanie eksperymentów laboratoryjnych wraz z analizami obliczeniowymi, co pozwala na stochastyczne oszacowanie uszkodzeń powierzchni styku materiałów składowych analizowanego kompozytu dla rozkładu prawdopodobieństwa Gaussa analizowanej wielkości odpowiedzi materiału. Założenie to Autor zaproponował dlatego, że nie ma dowodów na inny niż zgodny z rozkładem Gaussa charakter uszkodzeń strefy styku oraz dlatego, że rozkład prawdopodobieństwa Gaussa jest uważany za jeden z najważniejszych teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa w statystyce, jeśli nie

najważniejszy, przy czym rozkłady prawdopodobieństwa zbliżone do rozkładu normalnego Gaussa można zaobserwować w opisie praw przyrody, o czym świadczy twierdzenie Lindeberga-Lévy'ego, które Autor przytacza, cytując pozycję literaturową [12].

Metody probabilistyczne, które bazują na rozkładach normalnych prawdopodobieństwa, cechują się względną prostotą obliczeń. Rozkład normalny prawdopodobieństwa określają z definicji dwa parametry, którymi są wartość średnia i odchylenie standardowe. Rozkład taki ma zerową skośność (miarę symetrii) i kurtozę (miarę występowania wartości odstających). Stąd wybór takiego rozkładu prawdopodobieństwa, będącego pewnego rodzaju „prawem konstytutywnym” probabilistyki, wydaje się naturalny i jest dobrze umotywowany przez Autora dysertacji (cyt. w tłumaczeniu z języka angielskiego: *rozkład Gaussa umożliwia zestawienie stosunkowo łatwej relacji wyniku do danego współczynnika zmienności niepewnego parametru wejściowego. Dzieje się tak, ponieważ ten parametr jest z natury zawarty w definicji tego rozkładu. Wielkość tego parametru różni się znacznie dla niektórych niewiadomych, jak na przykład w pracy [14]*).

Autor, powołując się na literaturę, przytacza przyczyny, dla których wielkości charakterystyczne opisujące strefę przejściową, tzn. jej grubość, geometria oraz właściwości fizyczne, powinny być definiowane jako losowe. Przedstawia też preferowane metody probabilistyczne stosowane w mechanice, tzn. takie, w których rachunek prawdopodobieństwa jest wykorzystywany do określenia odpowiedzi konstrukcji lub materiału, gdzie dane parametry wejściowe (dane konieczne do przeprowadzenia obliczeń) są określone z niepewnością (losowo).

Ujęcie probabilistyczne zadania z zakresu mechaniki materiałów i konstrukcji można uzyskać, rozważając skończony zbiór rozwiązań (zadań) deterministycznych. Najprostszą ilustracją takiego ujęcia jest rozwiązanie zadania dla przypadku, gdy niepewnością losową obarczony jest jeden parametr wejściowy, ważny z punktu widzenia eksploatacji konstrukcji, np. parametr materiałowy – moduł sprężystości podłużnej lub współczynnik odkształcenia postaciowego. Podobną rolę może pełnić grubość płyty lub powłoki, jak również każdy inny parametr związany z określonym zadaniem mechaniki.

Odpowiedź konstrukcji, elementu konstrukcji lub wybranego materiału, który ją tworzy, można przedstawić w postaci funkcji dyskretnej lub ciągłej, jednej lub wielu zmiennych. Funkcją tą może być jeden z tzw. momentów losowych, np. wartość oczekiwana parametru odpowiedzi, a zmiennymi tej funkcji mogą być momenty losowe parametru wejściowego (o rozkładzie losowym dyskretnym lub ciągłym), np. jego wartość oczekiwana i odchylenie standardowe. Innymi, ważnymi momentami losowymi bardzo często stosowanymi w mechanice probabilistycznej są współczynnik zmienności losowej, skośność i kurtoza.

Bardzo istotnym elementem analizy probabilistycznej jest określenie krzywych (funkcji) dopasowania dla wejściowych danych dyskretnych. Krzywe te mogą być opisane zarówno za pomocą funkcji wielomianowych, jak i np. funkcji sklepanych. Do określania krzywych dopasowania stosuje się

zwykle metodę najmniejszych kwadratów (inną metodą może być zastosowanie wielomianów ortogonalnych).

Najbardziej rozpowszechnionymi metodami umożliwiającymi ujęcie probabilistyczne mechaniki materiałów i konstrukcji są tzw. metody bezpośrednie, metody symulacyjne, metody spektralne i metody perturbacyjne.

Autor w zwięzły sposób zaprezentował przegląd modeli materiałów hipersprężystych, takich jak klasyczne modele Mooneya-Rivlina, Neo-Hookeana, Yeoha, Arruda-Boyce'a i Genta, przy czym jako przyczynę podjęcia takich właśnie dociekań naukowych, podał brak modeli dużych odkształceń, które uwzględniają deformacje, wraz z nieliniowością powyżej poziomu nieskończenie małego. Materiały o powyższych cechach mogą odkształcać się nieliniowo w sposób znaczny po obciążeniu bez pęknięcia, a następnie powracać do swojej początkowej konfiguracji. Autor wyjaśnia przyczynę fizyczną (cyt.: *Taką sprężystość gumy uzyskuje się dzięki bardzo sprężystym cząsteczkom o długim łańcuchu i trójwymiarowej strukturze sieciowej, która powstaje w wyniku usieciowienia lub splątania międzycząsteczkowego. [...] implementacja [takiego modelu materiału] w ramach zastosowania metody elementów skończonych wymaga uwzględnienia dwóch ważnych składników do rozwiązania problemu z wartościami brzegowymi* [tzn. tensora naprężeń Cauchy'ego i stycznego operatora rzędu czwartego]).

Autor dokonał również klasyfikacji modeli materiałów hipersprężystych ze względu na opis, tzn. jako fenomenologicznych i strukturalnych (mikromechanicznych). Klasyfikację tę Autor zilustrował w sposób czytelny na rysunku 2.1. W tym miejscu, tzn. w opisie rysunku, dobrze byłoby również powołać się na prace:

[55] P. Steinmann, M. Hossain, and G. Possart, Hyperelastic models for rubber-like materials: consistent tangent operators and suitability for Treloar's data, *Arch. Appl. Mech.*, 82, 1183–1217, 2012 oraz

[305] M. Hossain and P. Steinmann, More hyperelastic models for rubber-like materials: consistent tangent operators and comparative study, *J. Mech. Behav. Mater.*, 22 (1-2), 27–50, 2013.

Bardzo dobrze, że Autor zwrócił wcześniej (str. 26 dysertacji) uwagę na pracę [55], w której zamieszczony został podobny opis graficzny, i zacytował ją wraz z odpowiednim odniesieniem do rysunku 2.1 zamieszczonego w dysertacji.

Do analiz obliczeniowych Autor wybrał klasyczne modele tzw. niezmiennicze, z uwagi na ich względną łatwość w aplikacji zgodnie z metodą elementów skończonych. Modele te wyróżnił na rysunku 2.1.

Autor umieścił własne badania na tle aktualnej wiedzy związanej z podejściem probabilistycznym, w szczególności do materiałów wielofazowych (kompozytowych), przy czym stwierdził, że dopiero niedawno podjęto wysiłki w celu zdefiniowania hipersprężystego zachowania się takich materiałów, co potwierdza przegląd ostatnich prac z tego zakresu.

W opisie struktury materiału kompozytowego Autor wyraźnie rozróżnił pojęcia opisujące granicę między materiałami składowymi kompozytu (*interface*) i strefę przejściową (*interphase*)

którą można zinterpretować jako osobny materiał tworzący się podczas eksploatacji kompozytu lub w czasie jego procesu produkcyjnego. Wytworzenie się swoistego nowego materiału w strefie przejściowej wpływa znacząco na efektywne właściwości materiałowe wielu kompozytów izotropowych oraz anizotropowych zarówno w ich deterministycznym, jak i stochastycznym opisie, co Autor zaznaczył w dysertacji wraz z podaniem literatury.

Problem modelowania strefy przejściowej opisany został bardzo starannie w pracy E. Oleszkiewicz (*Analiza numeryczna nośności kompozytów włóknistych o osnowie metalowej*. Rozprawa doktorska, promotor: T. Łodygowski, Poznań, 2004). Mgr inż. D. Sokołowski nie ujął tej rozprawy w spisie cytowanej literatury, który jest bardzo obszerny, można jednak zasugerować odniesienie się do tej pozycji w przyszłych badaniach naukowych związanych z modelowaniem strefy przejściowej w ujęciu probabilistycznym.

Innymi wartymi ujęcia w spisie literatury niniejszej dysertacji pozycjami są dwie prace monograficzne: pierwsza, o charakterze naukowo-dydaktycznym, autorstwa J. Germana pt. *Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych* wydana nakładem Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej oraz druga, o charakterze ściśle naukowym, autorstwa S. Jemioła i C. Suchockiego pt. *Hipersprężystość i jej modyfikacje. Zarys teorii, pseudo-hipersprężystość i quasi liniowa lepkosprężystość* wydana nakładem Oficyny Wydawniczej Politechniki Warszawskiej.

Wyżej wymienione pozycje literaturowe nieujęte przez Autora w niniejszej dysertacji doktorskiej polecane są do zacytowania w przyszłych pracach naukowych lub w monografii książkowej, której wydanie np. w Wydawnictwie Politechniki Łódzkiej lub innym wydawnictwie naukowym sugeruje recenzent.

Autor zdefiniował miary deformacji i odkształcenia, przy czym część zależności została wyprowadzona zgodnie z teorią mechaniki kontinuum materialnego, a część podana. Wyprowadzenia te można odnaleźć w cytowanych pracach, np. [55]. W pracy o charakterze monograficznym jaką jest niniejsza dysertacja doktorska wskazane jest, aby zaprezentować ujęcie całościowo, co Autor niniejszej dysertacji uczynił w stopniu wyczerpującym. Autor zastosował znane zależności opisujące miary deformacji i odkształcenia z zakresu teorii sprężystości, takie jak materialny gradient deformacji, prawy tensor Cauchy'ego-Greena oraz miarę naprężenia w postaci drugiego tensora Pioli-Kirchhoffa i jego odniesienia do tensora naprężeń Cauchy'ego w konfiguracji początkowej. Autor posługuje się również użyteczną miarą w postaci energii odkształcenia objętościowego.

W dysertacji przedstawiono teorię homogenizacji, wychodząc od równania (2.1), które opisuje w sposób ogólny efektywną odpowiedź ośrodka wielofazowego. Dalej Autor definiuje efektywną odpowiedź materiału kompozytowego jako funkcję celu zgodnie z teorią optymalizacji, którą może być np. efektywna właściwość ośrodka (materiału), taka jak tensor sztywności, moduł objętościowy, efektywne naprężenie lub energia odkształcenia. W większości zadań z zakresu homogenizacji takiej zależności nie da się określić analitycznie. Procedura homogenizacji kompozytów zbudowanych z materiałów sprężystych, w przypadku gdy występują w nich uszkodzenia na styku materiałów

składowych, została podana w sposób analityczny przez M. Kamińskiego dla reprezentatywnego elementu objętościowego, co Autor dysertacji przytacza, cytując pozycję [262] zamieszczoną w spisie literatury. Zastosowanie tzw. funkcji odpowiedzi oraz powierzchni odpowiedzi ma za zadanie przybliżenie rzeczywistych relacji funkcji celu za pomocą modelu zastępczego materiału. Funkcja odpowiedzi może być zdefiniowana jako względnie prosta relacja dla jednego argumentu, natomiast powierzchnia odpowiedzi może być rozumiana jako funkcja dwóch lub więcej zmiennych.

W przypadku nieliniowego zachowania się ośrodka kompozytowego stosowane są dyskretne procedury numeryczne. Autor rozszerza teorię na hipersprężyste zachowanie się materiału kompozytowego i rozważa niepewną odpowiedź hipersprężystą materiału jednorodnego, a następnie rozwiązuje zadanie stochastycznej odpowiedzi materiału kompozytowego z uszkodzeniami powierzchni styku materiałów składowych w ujęciu probabilistycznym.

Procedury optymalizacja funkcji odpowiedzi i powierzchni odpowiedzi wykonane przez Autora dysertacji należą do zadań programowania kwadratowego. Autor przytacza wyprowadzenia algorytmów optymalizacyjnych w podrozdziale 3.2.

Na uwagę zasługuje staranny opis procedury homogenizacji probabilistycznej, którą Autor przedstawił w rozdziale 3. Algorytm obliczeniowy tej procedury Autor zaprezentował w rozdziale 4 oraz zilustrował na rysunku 4.5. Uszkodzenia na granicy materiałów składowych Autor zdefiniował za pomocą zbioru niezależnych twórców objętościowych (*semi-bubbles*) opisanych zależnością (3.2).

W części opisującej badania laboratoryjne Autor analizuje zestaw próbek materiału jednorodnego wykonanego z poliuretanu o wysokiej gęstości Laripur LPR 5020 (rysunek 5.2) oraz zestaw próbek materiału Laripur LPR 5020 wzmocnionego 5% cząsteczkami sadzy (rysunek 5.3). Dalej Autor przedstawia krzywe opisujące relację naprężenie normalne – odkształcenie podłużne ε_{11} dla próbek powyższych materiałów oraz krzywe opisujące wartości oczekiwane laboratoryjnego naprężenia normalnego i jego współczynnik zmienności losowej oraz różnicę współczynników zmienności losowej naprężenia normalnego dla obu analizowanych typów materiału.

W części poświęconej symulacji numerycznej niniejszej dysertacji Autor przedstawił związane przykłady obliczeniowe. W graficznej interpretacji wyników Autor skupił się na wykonaniu wykresów w postaci zależności współczynnika zmienności losowej w postaci np. efektywnego naprężenia normalnego

w funkcji współczynnika zmienności losowej udziału objętościowego uszkodzeń międzyfazowych i współrzędnej tensora odkształcenia ε_{11} . Wybór ten wynika najprawdopodobniej z dominującego charakteru tego odkształcenia w procesie deformacji. Dobrze jest wskazać, jaki tensor odkształcenia (i w jakiej konfiguracji) reprezentuje składowa ε_{11} , gdy mamy do czynienia z dużymi deformacjami. Można zadać pytanie również o to, jak zachowują się inne współrzędne tensora odkształcenia w konfiguracji zdeformowanej np. dla próbki kompozytu, której rozmiary opisujące jej geometrię są do siebie zbliżone.

Elementem, na który warto zwrócić uwagę, jest zaproponowany przez Autora sposób obliczania efektywnych własności materiałowych kompozytów ze stochastycznymi uszkodzeniami na styku materiałów składowych zgodnie z opisem rozszerzonego modelu materiału hipersprężystego.

Autor wykonał obliczenia probabilistyczne przy zastosowaniu trzech niezależnych metod symulacji: iteracyjnej techniki perturbacji stochastycznej, techniki Monte-Carlo oraz metody półanalitycznej. Autor określił pierwsze cztery charakterystyki probabilistyczne własności efektywnych analizowanego materiału kompozytowego, tzn. wartość oczekiwaną, współczynnik zmienności, skośność oraz kurtozę.

W prezentowanej dysertacji Autor przedstawił implementację numeryczną modelu międzyfazowego odkształcenia i naprężenia efektywnego dla kompozytów wykazujących cechy hipersprężyste z uszkodzeniami na granicy faz (materiałów składowych kompozytu) w ujęciu stochastycznym.

Autor zaproponował również teoretyczne sformułowanie homogenizacji dla rozważanego kompozytu wraz z oryginalnymi algorytmami obliczeniowymi oraz obszerną analizę zależności otrzymanych rozwiązań od udziału objętościowego uszkodzeń na granicy materiałów składowych kompozytu, wielkości odkształcenia i potencjału hipersprężystego.

Wykazał również, że wykorzystanie uogólnionego iteracyjnego podejścia stochastyczno-perturbacyjnego w połączeniu z metodą elementów skończonych pozwala na wiarygodne wyznaczenie pierwszych czterech charakterystyk probabilistycznych trzech funkcji stanu w kompozytach wykazujących cechy hipersprężyste.

3.3. Główne elementy oryginalne przedstawione w dysertacji

W niniejszej dysertacji można wyróżnić następujące główne oryginalne elementy zaproponowane przez Autora:

- określenie relacji naprężenie normalne–odkształcenie podłużne w eksperymencie laboratoryjnym dla zestawu próbek dwóch materiałów składowych wraz z podaniem charakterystyk probabilistycznych,
- określenie wpływu niepewności udziału objętościowego uszkodzeń na granicy materiałów składowych (granicy faz) na właściwości efektywne oraz deformację kompozytu przy hipersprężystym prawie fizycznym,
- sposób obliczania efektywnych własności materiałowych kompozytów ze stochastycznymi uszkodzeniami na styku materiałów składowych,
- oryginalne algorytmy obliczeniowe.

3.4. Uwagi, sugestie i pytania

Na zakończenie warto wskazać kilka elementów do dalszej dyskusji, ewentualnie do wykorzystania np. w przyszłych badaniach naukowych przez Autora.

1. Wskazanie przesłanek jakimi kierował się Autor przy wyborze przedstawionego materiału wykazującego cechy hipersprężyste.

2. Zastosowanie izoparametrycznego 20-węzłowego, trójwymiarowego elementu skończonego wraz z procedurami całkowania. Jakim kryterium wyboru elementu skończonego, poza wyborem związanym z lepszym opisem deformacji między węzłami elementu, kierował się Autor. Czy inny, prostszy typ elementu skończonego można efektywnie zastosować do symulacji dużych deformacji próbki materiału hipersprężystego.
3. Obliczanie pochodnych potencjału hipersprężystego w celu określenia prawa konstytutywnego. Czy Autor stosował standardowe procedury programu ABAQUS.
4. Opis zjawiska kontaktu na granicy materiałów składowych kompozytu, w szczególności w strefie przejściowej dla modelu materiału heterogenicznego w ujęciu deterministycznym i probabilistycznym przy zastosowaniu współczynników kary i mnożników Lagrange'a. Czy Autor rozważał takie podejście.
5. Analiza dynamiki układów z elementami hipersprężystymi w ujęciu deterministycznym oraz probabilistycznym. Na jakie aspekty Autor zwróciłby uwagę.
6. Określenie parametrów (współczynników) niezawodności układu.
7. Określenie maksymalnych odkształceń, dla których można stosować zaproponowaną teorię.
8. Wpływ temperatury na wielkości opisujące materiał hipersprężysty. Zaproponowanie prawa fizycznego wiążącego naprężenia i odkształcenia w funkcji temperatury jako zmiennej losowej.
9. Wpływ temperatury na własności fizyczne materiałów hipersprężystych.
10. Wpływ temperatury na zjawisko kontaktu między materiałami składowymi kompozytu. Zaproponowanie odpowiedniego modelu kontaktu.
11. Czy można zaproponować prostszy, ale efektywny model metody elementów skończonych opisujący zachowanie się strefy przejściowej, tzn. połączenie elementów skończonych typu solid opisujących matrycę i włókna wzmacniające z elementami niższej klasy. Taki model mógłby znacząco wpłynąć na redukcję liczby stopni swobody.
12. Inżynierskie zastosowania materiałów hipersprężystych. W jakich elementach konstrukcyjnych (urządzeniach) można zastosować proponowane przez Autora rozwiązania.
13. Jak zachowuje się siatka elementów skończonych podczas symulacji procesu deformacji. Czy jest potrzeba jej regeneracji podczas procesu deformacji.
14. Jak zachowują się naprężenia na styku materiałów składowych kompozytu, w szczególności gdy próbka doznaje dużych deformacji. Czy Autor zaobserwował znaczne ich przyrosty w wybranych punktach analizowanej próbki kompozytu w stosunku do stanu umiarkowanych deformacji.
15. Oszacowania czasu koniecznego do przeprowadzenia obliczeń numerycznych.

4. Wnioski końcowe i podsumowanie

Tematyka naukowa podjęta przez mgr. inż. Damiana Sokołowskiego, której rezultatem jest niniejsza dysertacja, stanowi aktualny, bardzo ciekawy i nowy element gałęzi mechaniki związanej ze stochastycznym opisem zachowania materiałów i konstrukcji.

Zakres przedstawionych analiz jest bardzo szeroki. Na uwagę zasługują precyzyjnie sformułowane główne tezy przygotowanej dysertacji oraz towarzyszące im tezy dodatkowe, towarzyszące. Wszystkie tezy Autor weryfikuje przy udziale symulacji numerycznych z uwzględnieniem oryginalnych danych otrzymanych na drodze doświadczalnej.

Autor dysertacji wykazał się szeroką wiedzą związaną z trudnymi zagadnieniami nieliniowej mechaniki materiałów wykazujących cechy hipersprężyste, modelowania wielkoskalowego i teorii materiałów kompozytowych. Autor niniejszej dysertacji w bardzo umiejętny sposób wykorzystał tę wiedzę do rozwiązania szeregu trudnych zagadnień mechaniki probabilistycznej.

Na szczególną uwagę zasługuje szereg publikacji naukowych których współautorem jest Doktorant, a które ukazały się w renomowanych czasopismach naukowych. Można śmiało sformułować tezę, że aktywność publikacyjna Doktoranta znacznie wykracza poza zwykłą, tzn. obowiązkową aktywność twórczą (publikacyjną) pracownika naukowego.

Wskaźniki bibliometryczne Doktoranta są następujące:

- baza Scholar Google: indeks Hirscha $H = 4$ oraz 81 cytowań. Najczęściej cytowaną publikacją jest praca: D. Sokołowski, M. Kamiński, *Homogenization of carbon/polymer composites with anisotropic distribution of particles and stochastic interface defects*, *Acta Mechanica* 229 (9), 3727–3765, 2018 (32 cytowania),
- baza Scopus: index Hirscha $H = 3$ oraz 81 cytowań, gdzie rozpoznano 14 publikacji Doktoranta,
- baza Research Gate: index Hirscha $H = 4$, bez autocytowań dla 21 pozycji, które składają się z 11 artykułów naukowych, 4 rozdziałów w monografiach oraz 6 referatów konferencyjnych.

Temat rozważań naukowych podjęty przez Autora jest bardzo ambitny, a przedstawiona dysertacja stanowi wartościowe dzieło naukowe. Autor dysertacji, mgr inż. Damian Sokołowski, wykazał się wysokimi umiejętnościami badacza, o czym świadczy płynne poruszanie się w dziedzinie teorii oraz praktyki, tzn. algorytmizacji i programowania zadań z zakresu stochastycznej nieliniowej mechaniki materiałów kompozytowych. Mgr inż. Damian Sokołowski jest w mojej opinii w pełni przygotowany do prowadzenia samodzielnych badań naukowych.

Stwierdzam również, że cel dysertacji został przez jej Autora w pełni osiągnięty, a sformułowane tezy udowodnione, oraz że wkład Autora niniejszej dysertacji w rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria Lądowa i Transport w obszarze stochastycznej nieliniowej mechaniki materiałów poddanych dużym deformacjom jest znaczący.

Uwagi krytyczne i pytania zawarte w niniejszej opinii mają charakter dociekań naukowych i nie obniżają dużej wartości naukowej przedstawionej dysertacji.

Recenzent sugeruje, aby Autor przedstawił swoje oryginalne badania naukowe w formie książkowej nakładem Wydawnictwa Politechniki Łódzkiej lub innego wydawnictwa naukowo-technicznego.

GŁÓWNY WNIOSEK KOŃCOWY

Przedstawione w dysertacji zagadnienia wyczerpują z dużym naddatkiem wszystkie kryteria stanowiące podstawę do ubiegania się przez mgr. inż. Damiana Sokołowskiego o stopień naukowy doktora nauk technicznych w myśl Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. z 2018 r., poz. 1668 z późn. zm.).

Wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport o przyjęcie niniejszej dysertacji doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

WNIOSEK DODATKOWY

Biorąc pod uwagę bardzo wysoki poziom naukowy przedstawionych zagadnień oraz ponadprzeciętną aktywność publikacyjną wnioskuję o wyróżnienie niniejszej dysertacji doktorskiej.

Michał Guminiak