

Szczecin, 22.10.2021 r.

Prof. dr hab. inż. Ryszard Buczkowski  
Katedra Mechaniki Konstrukcji  
Wydział Techniki Morskiej i Transportu  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Damiana Sokołowskiego **Probabilistic analysis of composite materials with hyperelastic components (Probabilistyczna analiza materiałów kompozytowych o składnikach hipersprężystych)**, promotor: prof. dr hab. inż. Marcin Kamiński

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę opracowania recenzji stanowiło pismo prof. dr hab. inż. Dariusza Gawina, Dziekana Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej z dnia 20.09.2021 r.

### 2. Opis rozprawy (cel i tezy pracy)

W rozprawie przedstawiono implementację modelu międzyfazowego w celu określania efektywnych właściwości materiału, efektywnej energii odkształcenia i efektywnego naprężenia w hiperelastycznych kompozytach cząsteczkowych ze stochastycznymi defektami na granicy faz.

Głównym celem dysertacji jest określenie efektywnych parametrów materiałowych kompozytów ze stochastycznymi defektami międzyfazowymi z uwzględnieniem materiału hipersprężystego.

Powyższe zagadnienie zostało sformułowane teoretycznie, a algorytmy zastosowano i zweryfikowano w odniesieniu do kompozytu poddanego osiowemu odkształceniu wzdłużnemu. Proponowane rozwiązanie zaprojektowano dla materiału hipersprężystego i użyto dla modeli Mooney-Rivlina, Arruda-Boycea oraz Neo-Hooka. Wprowadzono koncepcję rozszerzonego modelu materiałowego, który uwzględnia zależność parametrów materiałowych od objętości stochastycznych defektów międzyfazowych. Są one przedstawione jednoparametrowo jako frakcja objętościowa defektów w interfazie (jeden wejściowy parametr losowy o rozkładzie Gaussa). Następnie zaproponowano sposób modelowania

właściwości materiałowych hipersprężystej interfazy. Został on użyty do weryfikacji wpływu wejściowej zmiennej losowej na efektywne parametry materiałowe, efektywną energię odkształcenia oraz efektywne naprężenie kompozytu poddanego rozciąganiu wzdłużnemu. Przyjęto podejście deterministyczne oraz stochastyczne. Następnie zaproponowano algorytm numeryczny do określenia estymatorów statystycznych wejściowej zmiennej losowej.

Badania numeryczne przeprowadzone zostały z użyciem stochastycznej metody elementów skończonych. Część deterministyczną obliczono za pomocą metody elementów skończonych na podstawie sześciennego reprezentatywnego elementu objętościowego. Część probabilistyczną obliczono symbolicznie w systemie algebry komputerowej MAPLE. Probabilistyka wykonana została przy użyciu trzech niezależnych metod, iteracyjnej techniki perturbacji stochastycznej, symulacji Monte-Carlo oraz probabilistycznej metody półanalitycznej. W analizie ujęte zostały pierwsze cztery charakterystyki losowe efektywnych własności kompozytu, tj. wartość oczekiwana, współczynnik wariancji, skośność oraz kurtoza. W tym celu przeprowadzono specjalnie zaprojektowane eksperymenty laboratoryjne użyte w zaawansowanych algorytmach homogenizacji probabilistycznej.

Sformułowano następujące tezy:

- (1) Możliwe jest sformułowanie procesu deformacji kompozytów w postaci cząstek z przypadkowymi defektami na granicy faz w przypadku materiału hiperelastycznego.
- (2) Zaproponowany rozszerzony model konstytutywny można z powodzeniem zastosować do rzeczywistego przypadku w oparciu o wybrane hiperelastyczne modele.
- (3) Zaproponowany algorytm pozwala na wyznaczenie estymatorów statystycznych rozłożonego normalnie udziału objętościowego defektów granicznych w tym kompozycie.
- (4) Jest możliwe określenie efektywnych właściwości materiałowych kompozytu ze stochastycznymi defektami na granicy faz wraz z ich charakterystykami stochastycznymi dla wybranych modeli hiperelastycznych w przypadku szerokiego zakresu udziału objętościowego wad w zakresie  $[0,09-0,95]$ .

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie w tematykę. Przedstawiono tu przedmiot, cele i zakres pracy. W rozdziale 2 przedstawiono przegląd literatury. Zakres pracy obejmuje tematykę materiałów hiperelastycznych, analizy probabilistycznej, analizy wieloskalowej oraz metody homogenizacji. Zawiera również przegląd typowych sposobów wprowadzania defektów interfejsu i wyjaśnia koncepcję interfazy. W rozdziale 3 przedstawiono matematyczne

sformułowanie problemu probabilistycznej homogenizacji kompozytów ze stochastycznymi defektami na granicy faz. Opisano ponadto metody stosowane do przybliżania efektywnej odpowiedzi obiektywnego kompozytu

Rozdział 4 poświęcony jest analizie komputerowej. Składa się z trzech części. Pierwsza przedstawia szczegóły wybranego reprezentatywnego elementu objętości. Druga opisuje specyfikę metod stosowanych do wyznaczania cech stochastycznych funkcji stanu. Część trzecia wyjaśnia główne algorytmy zaproponowane w tej rozprawie. Służą one do wyznaczania efektywnych funkcji stanu i udziału objętościowego defektów granicznych w kompozytach cząstek stałych, a także do obliczania ich charakterystyk stochastycznych.

Rozdział 5 zawiera opis, wyniki i wnioski z eksperymentów laboratoryjnych przeprowadzonych dla pierwotnego materiału jednorodnego i kompozytu przedmiotowego. Obejmują one jednoosiowe rozciąganie 10 próbek pod obciążeniem pojedynczym i cyklicznym. Rozważane estymatory statystyczne obejmują wartość oczekiwaną, odchylenie standardowe i współczynnik zmienności naprężenia dla odkształcenia zmiennego. W tym rozdziale zestawiono wyniki dla pierwotnego materiału jednorodnego i obiektywnego kompozytu. Wskazano na ich podobieństwa, a także różnice. Obserwacje płynące z tej analizy są ściśle istotne dla dalszych eksperymentów numerycznych. Rozdział 6 jest w całości poświęcony eksperymentom numerycznym. Składa się z czterech części i przedstawia główne wyniki tej rozprawy. Pierwsza część podsumowuje proces selekcji hiperelastycznych modeli matrycy. Drugi poświęcony jest efektywnym właściwościom materiału. Trzecia część opisuje obliczenia efektywnej energii odkształcenia, a czwarta – efektywnego naprężenia.

Ostatnia sekcja poświęcona jest wyznaczaniu efektywnego naprężenia kompozytu przy jednoosiowym rozciąganiu. Po pierwsze, przedstawia szczegółowo sposób obliczania tej funkcji stanu i analizuje stosunek naprężenia efektywnego do odkształcenia i udziału objętościowego defektów na granicy faz. Następnie dostarcza analizy i interpretuje wyniki stochastycznych charakterystyk tego naprężenia dla trzech wybranych podstawowych sformułowań materiałowych. Na koniec weryfikuje skuteczność zaproponowanego podejścia do wyznaczania efektywnego naprężenia obiektywnego kompozytu w porównaniu do wyników eksperymentów laboratoryjnych. Odbywa się to na podstawie jednoosiowego rozciągnięcia i dwóch estymatorów statystycznych, tj. wartości oczekiwanej i współczynnika zmienności. Wszystkie obliczenia stochastyczne są wykonywane trzema niezależnymi metodami, tj. perturbacją stochastyczną, metodą półanalityczną i klasyczną analizą Monte-Carlo. Charakterystyki stochastyczne są obliczane dla trzech wybranych podstawowych modeli materiałów.

Rozdział 7 zawiera podsumowanie, wnioski i perspektywy rozwoju dalszych badań.

### **3. Uwagi i spostrzeżenia**

1. Wszystkie obliczenia stochastyczne zostały tutaj wykonane przy użyciu trzech niezależnych metod stochastycznych. Są to uogólniona iteracyjna uogólniona perturbacja stochastyczna, metoda półanalityczna i klasyczna symulacja Monte-Carlo. Zgodność wyników jest bardzo wysoka dla efektywnych właściwości materiału i nie jest idealna dla efektywnej energii odkształcenia i efektywnego naprężenia przy jednoosiowym rozciąganiu.

Jak wytłumaczyć więc fakt, że charakterystyki (wartość oczekiwana i współczynnik zmienności) są prawie zawsze bardzo dobrze aproksymowane przez wszystkie metody, a te wyższe (współczynnik skośności i kurtozy) mają znacznie mniejszą zgodność pomiędzy wybranymi metodami. Ta zgodność jest również coraz gorsza wraz ze wzrostem współczynnika rozrzutu losowego nakładu, a także wzrostem jego wartości oczekiwanej. Jest to szczególnie widoczne w przypadku naprężeń efektywnych, niezależnie od bazowego modelu materiału. Duża rozbieżność metody półanalitycznej jest widoczna w przypadku wyższych stochastycznych charakterystykach efektywnego odkształcenia i efektywnego naprężenia. W przypadku średnich i wyższych współczynników losowej dyspersji danych wejściowych wskazuje, że metoda półanalityczna nie jest doskonale dostosowana do kompozytów hiperelastycznych.

2. Charakterystyki probabilistyczne wyższego rzędu obliczone techniką perturbacji stochastycznych, nawet w trybie iteracyjnym, nie pokrywają się idealnie ze statystycznymi estymatorami skośności i kurtozy obliczonymi za pomocą klasycznej metody Monte-Carlo. Wyniki odbiegają od siebie przy jednoczesnym zwiększeniu wejściowego współczynnika zmienności parametru międzyfazowego, w szczególności w przypadku obliczanej kurtozy. Jak to wytłumaczyć i co można zaproponować w celu zmniejszenia istniejących różnic.

### **4. Podsumowanie**

W rozprawie przedstawiono implementację modelu międzyfazowego w celu określania efektywnych właściwości materiału, efektywnej energii odkształcenia i efektywnego naprężenia w hiperelastycznych kompozytach cząsteczkowych ze stochastycznymi defektami na granicy faz.

Pewnym nowym ujęciem jest zaproponowanie sposobu obliczania efektywnych właściwości materiałowych kompozytów za pomocą rozszerzonego modelu materiałowego. Koncepcja ta wprowadza nową zmienną do oryginalnej formuły materiałów hiperelastycznych. Ta zmienna jest określana jako ułamek objętości defektów interfejsu. Jego wprowadzenie pozwala na określenie procesu deformacji kompozytu z wadami powierzchniowymi.

Wnioski są bardzo obszerne, zawarte w 17 punktach. Najważniejsze z nich są następujące: w niniejszej rozprawie przedstawiono implementację modelu międzyfazowego w celu określania efektywnych właściwości materiału, efektywnej energii odkształcenia i efektywnego naprężenia w hiperelastycznych kompozytach cząsteczkowych ze stochastycznymi defektami na granicy faz. Proponowana koncepcja rozszerzonego modelu materiałowego pozwala na obliczenie efektywnych właściwości, efektywnych odkształceń i efektywnego naprężenia w tym kompozycie, który ma dowolną liczbę defektów powierzchniowych. Co ważne, rozszerzony model materiałowy może być zastosowany do dowolnego bazowego modelu hiperelastycznego ze zmienną liczbą parametrów materiałowych.

Dobór przykładów obliczeniowych jest właściwy a odpowiedni komentarz do uzyskanych wyników jest obszerny i zrozumiały. Na podkreślenie zasługuje bardzo dobry dorobek publikacyjny doktoranta.

## **5. Wniosek końcowy**

Ponieważ praca jest rzetelna oraz z uwagi na fakt, że zawiera ona elementy nowości, uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Damiana Sokołowskiego *Probabilistic analysis of composite materials with hyperelastic components* spełnia wymagania stawiane w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 nr 65 poz. 595 ze zmianami) i może stanowić podstawę o ubieganie się przez niego o stopień naukowy doktora w dyscyplinie naukowej inżynieria lądowa i transport, wnoszę zatem o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.