

Warszawa, dn. 30.05.2019

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

## **RECENZJA**

### **rozprawy doktorskiej mgr inż. Damiana Szubartowskiego pt. Modelowanie grubych konstrukcji typu FGM poddanych obciążeniom termomechanicznym**

wykonana na wniosek Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej im.  
Tadeusza Kościuszki w Krakowie z dnia 20 marca 2019

#### **1. Treść i zakres rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Damiana Szubartowskiego dotyczy zagadnień związanych z modelowaniem nowoczesnych kompozytów w postaci materiałów gradientowych w wybranych elementach konstrukcyjnych. Funkcjonalne materiały gradientowe wraz z nowoczesnymi metodami ich wytwarzania są współcześnie jedną z bardziej rozwijanych dziedzin nauki o materiałach. Jest to stosunkowo nowa grupa materiałów, która charakteryzuje się stopniową zmianą przestrzenną składu chemicznego i struktury. Zwykle są to materiały kompozytowe, o strukturze gradientowej, która może być wytworzona w tworzywach tradycyjnych, monolitycznych, początkowo jednorodnych za pomocą różnorodnych sposobów przetwarzania i zastosowania odpowiednich czynników zewnętrznych.

Praca podzielona została na sześć rozdziałów i pięć dodatków, zawierające łącznie 32 rysunki, spis treści, wykaz literatury obejmujący 77 pozycji, spis wybranych oznaczeń. Łącznie rozprawa liczy 130 stron.

W rozdziale pierwszym po syntetycznym wprowadzeniu przedstawiono motywację, krótki przegląd literatury, następnie cel oraz zakres pracy. Jednym z zadań do rozwiązania przez Doktoranta było opracowanie modelu fenomenologicznego dla materiałów niejednorodnych, stosowanych w konstrukcjach charakteryzujących się dużą grubością i zawierających warstwę materiału gradientowego, ograniczającego zużycie, szczególnie w zakresie znacznie podwyższonej temperatury. W dalszej kolejności Doktorant zaplanował

przeprowadzenie obliczeń numerycznych dla przykładowych elementów konstrukcyjnych w postaci grubej płyty, cylindra oraz sfery.

Rozdział drugi ujmuje koncepcję dotyczącą budowy funkcjonalnych materiałów gradientowych jako barier termicznych prowadzących do ograniczenia zużycia elementów konstrukcyjnych wskutek obciążeń eksploatacyjnych, zwięźle omówienie sposobów wytwarzania tego rodzaju materiałów. Następnie Doktorant omówił problemy związane z homogenizacją właściwości termo-mechanicznych materiałów funkcjonalnych i występujące problemy numerycznego modelowania takich materiałów. Przedstawiane w pracy zagadnienia brzegowe zostały podzielone na dwie kategorie. Pierwsza opisywana układami równań różniczkowych zwyczajnych, druga układami równań różniczkowych cząstkowych. W pierwszym przypadku rozwiązania numeryczne uzyskiwane są w drodze całkowania równań metodą strzału, w drugim wykorzystuje się metody różnic skończonych oraz elementów skończonych.

W rozdziale trzecim Doktorant przedstawił ogólne sformułowanie zagadnienia termosprężystego dla przypadku trójwarstwowego ośrodka ograniczonego dwiema równoległymi płaszczyznami, odpowiadającego strukturze materiału produkowanego z wykorzystaniem technologii natrysku plazmowego. Problem został sformułowany w ujęciu przemieszczeniowym.

Rozdział czwarty został poświęcony analizie możliwości redukcji problemu wielowymiarowego do zagadnienia odpowiadającego warunkom płaskiego stanu naprężenia.

W rozdziale piątym Doktorant zaprezentował przykłady modelowania grubościennych elementów konstrukcyjnych. Rozważone zostały między innymi: (a) przypadek grubej płyty poddanej płaskiemu stanowi naprężenia; (b) przypadek swobodnej deformacji liniowego interfejsu FGM wskutek oddziaływania jednorodnego pola temperatury; (c) przypadek cylindra zawierającego interfejs z materiału FGM; (d) przypadek sfery zawierającej interfejs z materiału FGM.

W rozdziale szóstym przedstawiono główne osiągnięcia pracy oraz omówiono kierunki dalszych badań.

## **2. Ocena merytoryczna rozprawy**

Mgr inż. Damian Szubartowski podjął się moim zdaniem ważnego i jednocześnie ambitnego zadania teoretycznego zamodelowania wybranych grubych konstrukcji zbudowanych z materiałów o zmieniających się właściwościach termomechanicznych po ich grubości. Zadanie ściśle wiąże się z rozwiązywaniem zagadnień brzegowych dla materiałów

gradientowych oraz numeryczną implementacją w ramach metody elementów skończonych. Należy podkreślić, że jest to tematyka aktualna ze względu na fakt, że kompozyty gradientowe to materiały ciągle jeszcze uważane jako stosunkowo nowe i dalej szeroko wprowadzane w wielu elementach konstrukcyjnych. Istnieje zatem konieczność prowadzenia intensywnych badań zarówno o charakterze teoretycznym, jak i doświadczalnym w celu rozpoznania optymalnych właściwości gwarantujących bezpieczną, a jednocześnie długotrwałą eksploatację konstrukcji, w których materiały funkcjonalne gradientowe znalazły zastosowanie. Z tego względu praca Doktoranta może być uznana jako potrzebna, szczególnie z uwagi na fakt opracowania nowych modeli teoretycznych przyczyniających się do postępu głównie w dyscyplinie „mechanika” lub według nowego nazewnictwa dyscyplin naukowych „inżynieria mechaniczna”.

Problemy teoretyczne przedstawione w rozprawie mają potencjał aplikacyjny, ponieważ odnoszą się do wielu rzeczywistych elementów konstrukcyjnych w lotnictwie, w rozwiązaniach dla przemysłu związanego z podbojem kosmosu, motoryzacji, medycynie, energetyce, czy też elektronice i elektrotechnice. Jako typowe przykłady zastosowań przemysłowych materiałów gradientowych można wymienić tarcze hamulcowe, cylindry silników spalinowych, tłoki w silnikach, i wiele innych, których prawidłowa i bezawaryjna praca ma ogromne znaczenie nie tylko użytkowe, ale i strategiczne. Muszę przyznać, że Doktorant problem zastosowań swoich rozważań potraktował zbyt lakonicznie, co niestety uważam za ujemną stronę rozprawy. Uwaga Doktoranta skoncentrowana została głównie na analizach matematycznych bez wyraźnie zaakcentowanych bezpośrednich odniesień do problemów istniejących w konkretnych rozwiązaniach technicznych. Niezależnie od tego uważam, że wybór tematyki rozprawy wychodzi naprzeciw współczesnym problemom i należy go uznać za pożądany.

Praca ma zdecydowanie charakter teoretyczno-obliczeniowy. Odczuwa się jednak brak prób weryfikacji otrzymywanych wyników numerycznych z danymi uzyskiwanymi w realnym eksperymencie. Są oczywiście przedstawione przykłady implementacji technik numerycznych w zastosowaniu do standardowych elementów konstrukcyjnych typu cylinder lub sfera, ale moim zdaniem nie rozwiązuje to bardzo złożonych problemów występujących w rzeczywistych konstrukcjach, w których kształt istotnie odbiega od tych rozważanych w pracy. Przy okazji technik obliczeniowych mam jeszcze jedną uwagę, a mianowicie muszę stwierdzić, że Doktorant pominął wiele istotnych elementów przy omawianiu metody elementów skończonych wykorzystywanej w rozprawie. Brak jest informacji o liczbie i

rodzaju zastosowanych elementów, postawionych warunków brzegowych, wpływie gęstości siatki oraz informacji o zbieżności metody w odniesieniu do rozważanych przykładów.

Za główny wkład Doktoranta do rozwoju dziedziny mechaniki uważam opracowanie modeli termomechanicznych uwzględniających niejednorodny charakter zmian właściwości materiału po grubości oraz jego zastosowanie do obliczeń konkretnych elementów konstrukcyjnych w postaci rur grubościennych, grubych sfer lub płyt, co ujęto w trzech najważniejszych moim zdaniem rozdziałach od trzeciego do piątego.

Rozprawa została opracowana dość starannie i w zdecydowanej większości napisana poprawnie od strony językowej, ale niestety są również wyjątki, które przedstawię szerzej w uwagach krytycznych do pracy.

Doktorant nie postawił wyraźnej tezy swojej rozprawie, co ujemnie wyróżnia Jego pracę doktorską od tych, które miałem przyjemność recenzować do tej pory. Na szczęście teza ta wynika z opisów zawartych w kilku miejscach pracy i co może najważniejsze, została udowodniona. Podczas obrony prosiłbym jednak o wyraźne jej sformułowanie.

Zastanawia mnie stosunkowo skromna liczba cytowanych pozycji literaturowych (tylko 77 publikacji) dotyczących analizowanego zagadnienia zarówno w aspekcie badań doświadczalnych, jak i dotyczących modelowania i numerycznego rozwiązywania sformułowanych zagadnień. Świadczy to o niezbyt pełnym rozeznaniu Doktoranta w wymienionych obszarach badań naukowych, a przecież współczesna literatura w tym zakresie jest niezmiernie bogata.

Do ujemnych stron opiniowanej rozprawy należy również zaliczyć skromne potraktowanie prezentacji aktualnego stanu wiedzy, przedstawionego na paru stronach. Moje odczucie pogłębiło się po przeczytaniu rozdziału drugiego, w którym Doktorant prezentuje współczesne techniki wytwarzania materiałów funkcjonalnych tylko na dwóch niepełnych stronach tekstu, a przecież ten aspekt jest szczególnie istotny, ponieważ tu leży ogromny potencjał zastosowań rozważań teoretycznych Doktoranta.

W rozprawie można znaleźć potknięcia w stosowaniu fachowej terminologii. Przykłady zostaną omówione w podpunkcie uwagi szczegółowe.

Reasumując, należy stwierdzić, że mimo pewnych zauważalnych niedociągnięć, Doktorant realizując założone cele rozprawy wykazał się dobrą wiedzą ogólną z zakresu mechaniki ciała stałego, zwłaszcza w zakresie analitycznym wymagającym mocnych podstaw matematycznych. Zrealizowany program trudnych badań o charakterze teoretyczno-obliczeniowym pokazuje, że mgr inż. Damian Szubartowski bardzo swobodnie porusza się w

obszarze modelowania złożonych procesów towarzyszących odkształceniom materiałów funkcjonalnych o zmiennych właściwościach po grubości elementu.

Jak już wcześniej wspomniałem, rozprawa reprezentuje dobry poziom naukowy, ale dają się jednak zauważyć słabsze jej strony. Te bardziej znaczące wymieniono powyżej, a pozostałe w sposób szczegółowy omówiono w następnym punkcie niniejszej recenzji.

### 3. Uwagi szczegółowe

W rozprawie zamieszczono wprawdzie streszczenia pracy w języku polskim i angielskim, ale ich zawartość nie jest satysfakcjonująca. Omówienie tylko tego, co znajduje się w poszczególnych rozdziałach nie jest wystarczające, jak na rozprawę doktorską. Powinno się tutaj znaleźć miejsce na przedstawienie zakresu i celu pracy, jak również wymienienie najważniejszych dokonań i wniosków wynikających z przeprowadzonych analiz.

Przy czytaniu rozprawy można odnieść dobre wrażenie pod względem wydawniczym. Można jednak również zauważyć szereg niedociągnięć. Niektóre z nich, takie jak literówki, braki przecinków, zaznaczono w dostarczonym egzemplarzu, bardziej znaczące potknięcia redakcyjne omawiam poniżej:

- (a) Rysunki zamieszczone w rozprawie są w większości dobrej jakości, jednak niektóre z nich wymagają korekty, gdyby Doktorant chciał rozprawę opublikować w formie monografii. Sprawa dotyczy wielkości liter opisów, które są zbyt małe. Kolejna sprawa to anglojęzyczne opisy na niektórych rysunkach (Rys. 1 i 2). Dobra wydawnicza zasada to zachowanie jedyne języka dzieła, albo stosujemy język polski, albo angielski do całości wydawanej książki.
- (b) W pracy znajdują się niezręczne sformułowania, np. na stronie 13 „...drukowanie 3D proszku metali sklejanego kolejno specjalnym spoiwem.”; na stronie 25 jest „dwoma równoległymi płaszczyznami”, a powinno być „dwoma równoległymi płaszczyznami”; na stronie 40 jest „prowadzi do jego poligonowej rozkładu w całej płycie”, powinno być „prowadzi do jego poligonowego rozkładu w całej płycie”; na stronie 42 jest „Symbol T oznacza temperaturę odniesienia stowarzyszoną z brakiem naprężenia oraz odkształcenia”; lepiej byłoby „Symbol T oznacza temperaturę odniesienia w stanie nieobciążonym i bez odkształcenia”; na stronie 43 jest „obrotowo symetryczny cylinder..”, powinno być osiowo symetryczny cylinder ...”; strona 55 „...by następnie mógł być przyłożony gradient temperatury” - nie bardzo wiem, jak można gradient jakiegokolwiek wielkości przykładać?

- (c) W opisie oznaczeń moduły stosowane w wytrzymałości materiałów nazwane są niejednolicie, dwa nazwane zostały od nazwisk (Young i Kirchhoff), a jeden w postaci charakteryzującej badanie zjawisko – moduł ściśliwości. Powinny być te moduły nazwane alternatywnie albo od nazwisk badaczy, albo od charakterystyki zjawiska.
- (d) Na stronie 14 Doktorant powołuje się na publikację autorstwa prof. Ostoi-Starzewskiego, zamiast jednak użyć pełnego nazwiska, korzysta ze skrótu Starzewski. Nie jest to prawidłowa reguła.
- (e) Na stronie 19 Doktorant powołuje się na równanie, które pojawia się w znacznie dalszej części tekstu rozprawy. Z punktu widzenia wydawniczego jest to złe podejście. Tak samo numer równania z podaniem indeksu nie należy do zbioru dobrych reguł oznaczania równań.
- (f) W rozprawie wiele jest błędów interpunkcyjnych (braki przecinków, literówki), trafiły się również i ortograficzne (strona 63), słowa „posiadałyby” i „byłoby” piszemy łącznie.
- (g) Jednostki miar nie na wszystkich rysunkach odpowiadają układowi jednostek przyjętym w SI.

#### **4. Wniosek końcowy**

Mgr inż. Damian Szubartowski jest Autorem rozprawy doktorskiej wnoszącej wkład w rozwój mechaniki ciała stałego, głównie w zakresie analityczno-numerycznych badań nowoczesnych materiałów kompozytowych. Zamieszczone w niniejszej recenzji uwagi krytyczne mają na ogół charakter dyskusyjny, bądź to dotyczą strony edycyjnej lub terminologicznej i nie zmniejszają w sposób istotny wartości rozprawy.

Mając na uwadze wszystkie wymienione powyżej aspekty stwierdzam, że przedstawiona do oceny praca spełnia wymagania stawiane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym, zgodnie z art.179 ust. 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. (przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. z 2018 r., poz. 1669) i może być podstawą do nadania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie „Inżynieria mechaniczna”. Wnoszę jednocześnie o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

*Lewalewski*