

Dr hab. inż. Dariusz M. Perkowski, prof. PB

Białystok, 10 lipca 2019 r.

Politechnika Białostocka

Wydział Mechaniczny

Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej

Ul. Wiejska 45C, Białystok 15-351

Email: d.perkowski@pb.edu.pl, tel. +48 571 443 034

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Damiana Szubartowskiego
„Modelowanie grubych konstrukcji typu FGM poddanych obciążeniom
termomechanicznym”

1. Podstawa opracowania recenzji:

Pismo Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Karkowskiej Prof. dr hab. inż. Jerzego A. Śladka o numerze M.00-520-73/2019 z dnia 1.04.2019r.

2. Opis zawartości pracy:

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy modelowania grubych konstrukcji typu FGM, czyli materiałów o funkcjonalnej gradacji właściwości poddanych działaniu obciążeń termomechanicznych. Doktorant podjął się tematyki trudnej, a jednocześnie bardzo aktualnej, o dużych możliwościach aplikacyjnych w zastosowaniach inżynierskich. Wykazując się dobrą znajomością literatury związanej z badaną problematyką sformułował i rozwiązał szereg zagadnień brzegowych opisujących zagadnienia cieplne oraz termosprężystości dla ośrodków o funkcjonalnej gradacji właściwości. Materiały te przeważnie stosowane są jako bariery termiczne lub materiały warstwy pozwalające zredukować zużycie w warunkach pracy w podwyższonej temperaturze. Bariery termiczne wykonywane są na dwa sposoby, gdzie warstwa FGM jest traktowana jako TBC lub jest warstwą pośrednią jako materiał przejściowy pomiędzy podłożem a warstwą osłonową. Takie zagadnienia związane są z opisem ośrodków niejednorodnych a ich rozwiązanie przy użyciu metod analitycznych sprowadza się w przypadku ośrodka o funkcjonalnej gradacji właściwości do równań różniczkowych o pochodnych cząstkowych o zmiennych współczynnikach. Uzyskanie rozwiązań w postaci zamkniętej jest możliwe dla wybranych funkcji opisujących zamianę właściwości termicznych oraz mechanicznych w funkcji odległości od brzegu (np. rozkład wykładniczy lub potęgowy). Określony cel pracy oraz jej zakres w ocenie recenzenta jest jak najbardziej prawidłowy i zasadny.

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi opracowanie zawierające 130 stron, zaś zasadnicza część pracy zawarta jest na 65 stronach, pozostałe strony stanowią bibliografia oraz załączniki. Praca podzielona jest na 6 rozdziałów. Doktorant rozpoczął od omówienia aktualności badanych zagadnień, ich możliwości aplikacyjnych. Rozdział pierwszy „Wstęp” zawiera wprowadzenie do problematyki materiałów o funkcjonalnej gradacji właściwości termicznych oraz mechanicznych. Wskazując na zastosowania i funkcje jakie pełni warstwa FGM tj. barierę termiczną oraz warstwę ograniczającą zużycie elementów pracujących w podwyższonej temperaturze. Na podstawie przeglądu literatury Doktorant przedstawił rezultaty

innych autorów omawiając krótko każdą z cytowanych prac. W prezentowanym przeglądzie literatury Doktorant sformułował wniosek, iż „liczba artykułów dotyczących pełnych problemów 3D, jak np. gruba płyta czy półprzestrzeń, jest mocno ograniczona” a przedstawiona praca jest próbą uzupełnienia tej luki. W niniejszym rozdziale sformułowano cele badawcze oraz określono typy zagadnień, które poruszone będą w rozprawie tj. problem grubej płyty, cylindra oraz sfery wykonanych z materiałów o funkcjonalnej gradacji właściwości. W przypadku cylindra podano formułę specjalnego elementu skończonego opartego na teorii Kim-Paulino. Jak również określono metody numeryczne zastosowane w ramach rozprawy doktorskiej: procedurę całkowania numerycznego metodą strzału, metody różnic skończonych lub metody elementów skończonych).

Rozdział 2 zatytułowany „FGM – koncepcja, wytwarzanie oraz numeryczne modelowanie” jest kontynuacją przeglądu literatury. Doktorant przedstawia tutaj technologiczne aspekty nakładania materiałów FGM. Wskazuje tu celowość stosowania materiału FGM jako warstwy pośredniej pozwalającej uniknąć niedopasowanie termomechaniczne na granicy dwóch ośrodków np. metalu i ceramiki. Materiały kompozytowe jakimi są materiały funkcjonalnie gradientowe mają strukturę wielowarstwową. Modelowanie takich ośrodków w ramach klasycznej teorii przewodnictwa ciepła oraz teorii termosprężystości prowadzi do znacznych komplikacji obliczeniowych zarówno w ramach podejścia analitycznego jak i numerycznego przy zastosowaniu bezpośrednich metod numerycznych np. metody elementów skończonych. Prowadzi to do rozwiązywania zagadnień początkowo-brzegowych opisywanych równaniami różniczkowymi o pochodnych cząstkowych o skokowo zmiennych współczynnikach. W tym przypadku koniecznym jest także rozwiązanie układu równań wynikającego ze spełniania warunków ciągłości pola temperatury, wektora strumienia ciepła, wektora przemieszczeń oraz wektora naprężenia na interfejsach pomiędzy różnymi składnikami kompozytu. Podejście takie staje się mało efektywne. Jak to trafnie Doktorant zauważył bardziej efektywnym podejściem są metody przybliżone pozwalające określić moduły zastępcze i uwzględnić właściwości termomechaniczne oraz geometryczne składników wchodzących w budowę warstwy FGM. W niniejszym rozdziale Doktorant przedstawił również problemy numerycznego modelowania FGM. Omówiono tu trzy metody numeryczne: całkowanie równań metodą strzału; metodę różnic skończonych oraz metody elementów skończonych. Uzupełnieniem rozdziału 2 jest dodatek 1, w którym zaprezentowano macierz sztywności elementu opisującego materiał o funkcjonalnej gradacji właściwości.

Kolejny rozdział zatytułowany „Ogólne sformułowanie termosprężystego problemu FGM” zawiera matematyczne sformułowanie problemu ogrzewania niejednorodnej półprzestrzeni zbudowanej z trzech ośrodków. Mianowicie jednorodnego podłoża oraz pokrycia i niejednorodnej warstwy przejściowej o strukturze materiału o funkcjonalnej gradacji właściwości. W ramach sformułowania przyjęto, iż rozważany będzie problem stacjonarnego ogrzewania znanym rozkładem temperatury na górnej powierzchni ośrodka. Sformułowanie zapisano na dwa sposoby: przemieszczeniowe oraz naprężeniowe (patrz Ganczarski i Szubartowski [19]).

Rozdział czwarty zatytułowany jest „Twierdzenie pozwalające na redukcję problemu FGM”. Doktorant ten rozdział opiera na dwóch współautorskich pracach Ganczarski i Szubartowski [19, 20]. Prezentowa w tym rozdziale metoda rozwiązania układu równań (27) termosprężystości dla zagadnień związanych z opisem ośrodków FGM oparta została na metodzie potencjałów bazującej na pracy Iljuszyna i innych [27]. Doktorant ponadto przedstawia w załączniku do niniejszego rozdziału próbę powiązania potencjału Iljuszyna oraz metody Westgarda (patrz Dodatek 3).

Piąty rozdział „Przykłady modelowania grubościennych elementów konstrukcyjnych” jest ostatnim rozdziałem zawierającym autorskie wyniki przedstawione w ocenianej rozprawie doktorskiej Pana mgr inż. Damiana Szubartowskiego. Otrzymane rezultaty zostały opublikowane we współautorstwie z promotorem profesorem Arturem Ganczarskim [60, 62, 63]. Pierwszym przypadkiem obliczeniowym jest gruba płyta $Al./ZrO_2+Y_2O_3$ pracująca w przypadku płaskiego stanu naprężenia. W rozdziale 5.1 przedstawiona jest analiza osiowosymetrycznego zagadnienia ogrzewania półprzestrzeni niejednorodnej pokrytej jednorodną warstwą ceramiczną a warstwa pośrednia pomiędzy tymi ośrodkami jest materiałem o funkcjonalnej gradacji właściwości. Zmiana właściwości termomechanicznych materiału FGM opisana jest zależnością (54). Analizowany problem jest zagadnieniem stacjonarnym, zaś rozkład temperatury na powierzchni zależy od promienia i opisany jest zależnością (57). Warstwa ceramiczna ma bardzo słabą przewodność cieplną w stosunku do podłoża i pracuje jako bariera termiczna. Jak to trafnie Pan mgr inż. Damian Szubartowski zauważył w warstwie ceramicznej powstają naprężenia rozciągające w przypadku składowej obwodowej co powodować może powstawanie pęknięć. Trafnie sformułował wniosek, że wyjściem z tej sytuacji jest zastosowanie kompozytu metal-metal w zamian ceramika-metal lub wywołanie odpowiednich naprężeń resztkowych w warstwie ceramicznej pozwalających zredukować oddziaływanie rozciągających naprężeń obwodowych. Rozdział 5.3 dotyczy analizy rozkładu temperatury oraz składowej obwodowej naprężenia dla zagadnienia cylindra posiadającego interfejs wykonany z materiału FGM. Rozpatrywana rura jest obciążona na powierzchni wewnętrznej ciśnieniem p oraz przyjęto, iż temperatura wewnątrz jest wyższa od temperatur na ścianie zewnętrznej. Sformułowany problem jest stacjonarne. Do analiz przyjęto kilka typów warstwy FGM: ceramika na metalu, interfejs liniowy, interfejs typu tgh, gładki interfejs wielostopniowy oraz interfejs typu potęgowego. Przyjęto, iż wszystkie stałe termomechaniczne: współczynnik przewodzenia ciepła, współczynnik rozszerzalności liniowej oraz moduł Younga opisane wymienionymi wyżej funkcjami. Analizie poddano dominującą składową obwodową tensora naprężenia w dwóch przypadkach, gdy płaski stan odkształcenia jest narzucony na część mechaniczną oraz w przypadku płaskiego stanu odkształcenia narzuconego na część mechaniczną oraz termiczną. Autor formułuje na podstawie uzyskanych wyników wniosek, iż brak jest jakościowych różnic pomiędzy rozkładami składowych naprężenia odpowiadającymi płaskim stanom odkształcenia narzuconym na deformację wyłącznie typu mechanicznego oraz narzuconym na deformacje termiczną i mechaniczną. Czy zdaniem Doktoranta taki sam wniosek będzie można sformułować w przypadku zagadnień niestacjonarnych? W rozdziale 5.4 Doktorant zajmuje się analizą stanu naprężenia w sferze o grubej ścianie, gdzie wewnętrzna część jest wykonana z materiału o funkcjonalnej gradacji właściwości. W tym przypadku również znana jest temperatura w wewnętrznej części sfery i jest ona wyższa od założonej na brzegu. Wewnątrz sfery panuje ciśnienie p . Podobnie jak wcześniej przyjęto tu analogiczne rodzaje materiałów warstwy wewnętrznej. Ostatni rozdział 5.5 przedstawia proponowane podejście do analiz temperatury oraz naprężeń w materiale FGM przy pomocy specjalnych elementów skończonych. Wyniki prezentowane w tym rozdziale mają bardzo dobrą zgodność z wynikami uzyskanymi w przypadku zastosowania klasycznych elementów skończonych oraz metody strzału. Zaproponowane podejście ma bardzo duże znaczenie aplikacyjne do modelowania ośrodków o funkcjonalnej gradacji właściwości, ponieważ pozwala rozwiązywać problem teorii termosprężystości dla FGM o dowolnej budowie, przy założeniu gradacji w jednym kierunku. We wnioskach Pan mgr inż. Damian Szubartowski omówił najważniejsze rezultaty rozprawy doktorskiej. Ponadto zawarł w nich kierunki badań na najbliższy okres pracy naukowej. Praca zawiera streszczenie w języku polskim oraz angielskim oraz spis literatury liczący 77 pozycji prac i monografii, które zostały przez Doktoranta wcześniej zacytowane.

3. Oryginalność pracy

W mojej ocenie oryginalne osiągnięcia pracy to:

1. Specjalnie w tym celu stworzone i przetestowane algorytmy numeryczne pozwalające wyznaczać zmienne stanu w zagadnieniach teorii termosprężystości.
2. Zaproponowanie oryginalnego podejścia do modelowania osiowosymetrycznych zagadnień termosprężystości w ramach metody elementów skończonych uwzględniając, że właściwości termomechaniczne zmieniają się wzdłuż elementu skończonego. Przyjęto, że właściwości materiału w ramach elementu skończonego opisane są funkcją potęgową.
3. Zaproponowanie metody opisu ośrodków mikropolarnych o funkcjonalnej gradacji właściwości (Dodatek 2).

4. Wartości użytkowe pracy

Przedstawiona do oceny praca doktorska charakteryzuje się podstawowym charakterem badań, niemniej jednak uzyskane wyniki wyróżniają się potencjałem praktycznego wykorzystania do projektowania konstrukcji wymagających zastosowania barier termicznych, czy warstw pośrednich pozwalających zredukować naprężenia wynikające z oddziaływania zarówno pól mechanicznych jak i termicznych w warunkach stacjonarnych.

Ponadto zaproponowane podejście numeryczne polegające na zmodyfikowaniu elementu skończonego daje możliwość rozwiązywania problemów termomechaniki w przypadku stacjonarnych zagadnień osiowosymetrycznych dla dowolnej funkcji opisującej gradację właściwości w warstwie FGM.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne do pracy

Przedstawiona do recenzji praca jest oryginalna i wartościowa, napisana zwięźle i przejrzysto, zilustrowana licznymi wykresami i rysunkami. Zaproponowane i zastosowane metody analiz zagadnień termosprężystości stanowią istotny wkład do problematyki naukowej związanej z rozwojem metod modelowania ośrodków o funkcjonalnej gradacji właściwości termicznych oraz mechanicznych. Ogólna ocena pracy przez recenzenta jest pozytywna. Rozprawa doktorska porusza ważny problem i przedstawia oryginalne i wartościowe rezultaty. Opracowane metody numeryczne podparte dobrą zgodnością z rozwiązaniami teoretycznymi pozwalają twierdzić, iż zaproponowane podejście może znaleźć szerokie uznanie.

Kwestie, które chciałbym wyjaśnić z Doktorantem są następujące:

1. Dlaczego w pracy poruszono jedynie problemy stacjonarne, czy istnieją plany rozszerzenia opracowanego podejścia na zagadnienia niestacjonarne?
2. Czy wykładniki n , m , s występujące w funkcjach potęgowych (patrz wzór (22) strona 22), opisujących zmienność właściwości termicznych oraz mechanicznych mogą przyjmować dowolne wartości?
3. Dlaczego w pracy przyjęto, że współczynnik Poissona ma stałą wartość? Czy możliwe jest uwzględnienie faktu, iż będzie on funkcją odległości od brzegu warstwy, jak to jest w przypadku pozostałych właściwości i czy wymaga to istotnych zmian w zaproponowanym podejściu?

W pracy można znaleźć nieliczne tzw. literówki, które pokrótce wymieniam poniżej:

1. Str. 8 – jest „został przestawiony”; powinno być „został przedstawiony”.

2. Str. 11 – jest „od czystego ceramika do czystego metalu”; powinno być „od czystej ceramiki do czystego metalu”.
3. Str. 29 – jest „oryginalną”; powinno być „oryginalna”.
4. Str. 35 – jest „Zakłożono”; powinno być „Założono”.
5. Proszę o weryfikację obliczeń dotyczących linii niebieskiej przedstawionej na rysunku 9, strona 26.
6. Str. 40 – jest „poligonowej rozkładu”; powinno być „poligonowego rozkładu”.
7. Str. 58 – jest „braku braku”; powinno być „braku”.
8. Co oznacza „gruba sfera”?

6. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że w moim przekonaniu, praca spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez ustawę „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”. Biorąc pod uwagę podstawowy charakter przedstawionych badań kwalifikowałbym ją do dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna* (art. 177 ust. 3 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. z 2018 r., poz. 1669 oraz komunikat Centralnej Komisji do Spraw Stopni i Tytułów z dn. 30.04.2019 r.), której zakres obejmuje wnioskowaną przez mgr inż. Damiana Szubartowskiego dyscyplinę *mechanika* (Rozporządzenie MNiSW z dnia 20 września 2018 r. w sprawie dziedzin i dyscyplin naukowych i artystycznych, Dz. U. z dnia 25 września 2018 r. poz. 1818). Biorąc powyższe pod uwagę, stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr inż. Damiana Szubartowskiego do publicznej obrony.


10.07.2019

