

Gdańsk, 4 kwietnia 2007

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Anity Orłowskiej

pt.: *Delaminacja wiotkich ustrojów sprężystych – modelowanie, identyfikacja, sterowanie*

Podstawę formalną opracowania niniejszej recenzji stanowi Uchwała Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN z dnia 30 listopada 2006 powołująca opiniującego na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Anity Orłowskiej pt.: *Delaminacja wiotkich ustrojów sprężystych – modelowanie, identyfikacja, sterowanie*.

1. OCENA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Przedmiotem oceny jest praca mgr inż. Anity Orłowskiej pt.: *Delaminacja wiotkich ustrojów sprężystych – modelowanie, identyfikacja, sterowanie* opublikowana w postaci zwartej (druk). Praca liczy 82 strony i zawiera 79 pozycji bibliografii.

OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA PRACY

Praca pt.: *Delaminacja wiotkich ustrojów sprężystych – modelowanie, identyfikacja, sterowanie* obejmuje 82 strony i składa się z sześciu rozdziałów, bibliografii i załącznika CD.

W rozprawie przedstawiono propozycję nowego, efektywnego podejścia do modelowania zjawiska delaminacji z uwzględnieniem zjawisk kontaktowych a także opracowano metodę identyfikacji defektów. Ponadto wskazano na możliwości efektywnego tłumienia drgań w wiotkich ustrojach dwuwarstwowych. Do powyższych celów wykorzystano narzędzia Metody Dystorsji Wirtualnych (MDW).

Rozprawa obejmuje swoim zakresem cztery zasadnicze zagadnienia opisane kolejno w rozdziałach od II–V. W pierwszej części opisano Metodę Dystorsji Wirtualnych (MDW) oraz Metody Impulsowych Dystorsji Wirtualnych (MIDW). Obydwie metody stanowią zasadnicze narzędzia badań opisanych w dalszej części pracy. Doktorantka uzasadniła przydatność obydwu metod do modelowania zmian sztywności konstrukcji mechanicznych gdyż jak wiadomo uszkodzenia konstrukcji powodują właśnie takie zmiany.

W dalszej części pracy opracowano algorytmy modelowania delaminacji dla dwóch przypadków obciążeń konstrukcji – statycznego i dynamicznego. Model delaminacji opracowano na podstawie metod dystorsyjnych, po czym nastąpiła weryfikacja tego modelu przy wykorzystaniu elementów kontaktowych dostępnych w komercyjnym pakiecie programów ANSYS. Zamieszczono również wyniki weryfikacji eksperymentalnej.

Ważną część rozprawy stanowi rozdział czwarty, który poświęcono zagadnieniom identyfikacji delaminacji. Przedstawiono w nim trzy różne metody identyfikacji. Dwie metody opracowano na podstawie gradientowej minimalizacji funkcji celu, która stanowi miarę odstępstwa hipotetycznej odpowiedzi konstrukcji uszkodzonej od odpowiedzi uzyskanej z eksperymentu. W trzeciej metodzie podstawę stanowią sygnały rejestrowane przez czujniki, które umieszczono na powierzchni konstrukcji.

W ostatniej części pracy przedstawiono pewną propozycję kontrolowanego sterowania belki z delaminacją, która ma na celu tłumienie drgań. Również w tym przypadku punktem wyjścia była metoda dystorsji, na podstawie której opracowano algorytm sterowania konstrukcją. Przeprowadzono testy numeryczne, które umożliwiły ocenę efektywności tłumienia drgań metodą PAR (z ang. *Prestress Accumulation Release*). W celu weryfikacji poprawności modelu przeprowadzono badania eksperymentalne.

Opisane wyżej metody zostały opracowane przy założeniu liniowej sprężystości materiału jak też przyjęto, iż pęknięcia (delaminacje) nie propagują się.

W rozprawie zamieszczono 79 pozycji literatury. Na liście cytowanej literatury dominują pozycje z lat 1990–2006 a więc obejmujące najnowsze osiągnięcia badawcze ostatniej dekady. Praca jest dobrze osadzona w odniesieniu do przytoczonych pozycji literatury.

OCENA PRACY

Głównym celem ocenianej rozprawy doktorskiej było opracowanie nowego, efektywnego modelowania zjawiska delaminacji z uwzględnieniem zjawisk kontaktowych a także opracowanie metody identyfikacji tych defektów. Ponadto opracowano pewną koncepcję tłumienia drgań w wiotkich ustrojach dwuwarstwowych. Do powyższych celów wykorzystano narzędzia Metody Dystorsji Wirtualnych.

Do oryginalnych koncepcji i osiągnięć Autorki zaliczam:

- (1) Sformułowanie na podstawie metod MDW i MIDW problemu modelowania odpowiedzi odkształceniowej konstrukcji dwuwarstwowej zdelaminowanej oraz opracowanie algorytmu modelowania odpowiedzi konstrukcji obciążonej statycznie i dynamicznie.
- (2) Wykorzystanie podejścia dystorsyjnego do modelowania oddziaływań kontaktowych, które pozwoliło na łatwe wprowadzenie oddziaływań zapobiegających penetracji jak i uwzględnienie tzw. efektu otwartej szczeliny.
- (3) Sformułowanie problemu wyznaczania wrażliwości pól odkształceń na składowe wektora współczynników modyfikacji sztywności definiującego rozmiar i intensywność rozwarstwienia.
- (4) Sformułowanie na podstawie metod MDW i MIDW problemu minimalizacji funkcji celu stanowiącej miarę odległości pomiędzy funkcjami przejścia, które otrzymano z eksperymentu przeprowadzonego na rzeczywistej konstrukcji oraz obliczeń wykonanych na jego modelu numerycznym.
- (5) Opracowanie algorytmu identyfikacji uszkodzeń bazującego na wspomnianej powyżej funkcji celu.
- (6) Opracowanie algorytmu identyfikacji delaminacji opartego na pomiarze różnic odpowiedzi konstrukcji pierwotnej i uszkodzonej wykorzystującego siatkę sensorów rozłożonych równomiernie na powierzchni belki.

Oceniając merytoryczną wartość pracy pragnę wyrazić opinię, iż Autorka w pełnym wymiarze zrealizowała postawione we wstępie do rozprawy zadanie naukowe.

Autorka przeprowadziła analizę wyników obliczeń numerycznych porównując te wyniki z eksperymentem. Wnioski wskazują na prawidłowość funkcjonowania opracowanych przez Autorkę modeli, algorytmów i programów komputerowych. Wybór stosowanych w pracy narzędzi badawczych oceniam pozytywnie.

Realizacja tematu rozprawy wymagała od Autorki dobrego przygotowania z zakresu kilku dyscyplin naukowych takich jak: mechanika konstrukcji, mechanika pękania, metody numeryczne wraz z techniką programowania oraz techniki prowadzenia badań eksperymentalnych.

UWAGI KRYTYCZNE

Str. 6¹ napisano: *Pierwsze próby opracowania analitycznego modelu konstrukcji zdelaminowanej pojawiają się pod koniec lat 70-tych w pracach Ramkumara [55].* Doktorantka podała pracę [55] z roku 1997 a napisała o latach 70-tych. Ponadto zwracam uwagę, że prace o delaminacjach pojawiły się wcześniej (patrz na wykaz zamieszczony w: Ostachowicz W., Krawczuk M.: *On modelling of structural stiffness loss due to damage*. Key Engineering Materials, Vols. 204–205, pp. 185–200, 2001).

Str. 7⁵ napisano: *Shen i Grady [53] zaproponowali dwa modele* Pod numerem [53] jest inna praca: Andre Preumont.

Str. 7⁹ napisano: ... *Zastran [76]....* a powinno być: *Zastrau [76]*.

Str. 7¹⁰ napisano: ... *funkcją kształtu Ostachowicz i Krawczuk [48]* Praca [48] nie dotyczy delaminacji, o której prowadzi się rozważania w tekście.

W drugim akapicie na str. 7 przedstawiono dwie informacje, które się wykluczają. W pierwszym zdaniu Doktoranta napisała: *Pierwsze prace dotyczące metod identyfikacji delaminacji pojawiają się po roku 1996* a cztery linijki dalej napisano: *Zainteresowanie tematem identyfikacji delaminacji zaowocowało powstaniem wielu publikacji metod bazujących na propagacji fali Lamba (Cawley [4])* Zwracam uwagę, że publikacja [4] ukazała się w 1979.

Doktorantka nie postępuje konsekwentnie przywołując bibliografię. W niektórych przypadkach podaje w tekście rozprawy jedno nazwisko, (choć autorów jest więcej). W innym przypadku podaje wszystkich autorów. Przykładem może być przywołanie pracy na str. 7₆ gdzie podano, (Cawley [4]) a w rzeczywistości powinno być *Cawley and Adams [4]*.

Doktorantka niepotrzebnie rozszerzyła listę pozycji bibliografii o prace, które znajdują się dalej od głównego nurtu tematyki rozprawy. Rezultatem takiego postępowania jest cytowanie wielu pozycji spoza obszaru zainteresowania pracy jak też pozostawienia wielu pozycji literatury bez cytowań, np.: 3, 7, 9, 10, 18, 19, 21–24, 26, 30, 32, 36, 38, 40, 43, 44, 47, 49, 51, 56, 58, 59–61, 63–65, 67, 70, 79.

Str. 11⁷ napisano: *w postaci samorównoważającej się pary sił rozciągających pręt;* a powinno być: *w postaci samorównoważającej się dwójki zerowej sił rozciągających pręt.*

Str. 11¹² napisano: *jak wiadomo w ramowym elemencie skończonym występują trzy typy odkształceń: odkształcenie podłużne, krzywiznowe i postaciowe.* W tym jednym zdaniu jest kilka pojęć dyskusyjnych. Pierwsze dotyczy *ramowego elementu skończonego*. Zwyczajowo takie elementy noszą nazwę *belkowych elementów skończonych*. Następna sprawa to pojęcie *odkształceń* – w elementach skończonych definiuje się pojęcia *przemieszczeń* (translacyjnych, rotacyjnych) a odkształcenia są wielkościami pochodnymi tych przemieszczeń. W opisywanym przypadku chodzi więc o *przemieszczenie podłużne* i *poprzeczne* a także niezależny *kąt obrotu* płaszczyzny prostopadłej do osi belki.

Str. 11¹³ napisano: *Nawet jeśli pominiemy deformacje postaciowe (wpływ odkształcenia postaciowego można zazwyczaj zaniedbać przyjmując założenia Bernoulliego)* Autorka w stopce strony wyjaśnia, że takie założenie jest uzasadnione w przypadku cienkich konstrukcji belkowych. Problem jednak w tym, że delaminacje występują przeważnie w elementach kompozytowych o cechach ortotropowych i w takich przypadkach założenie, że przekroje poprzeczne belki pozostają po deformacji prostopadłe do osi odkształconego pręta jest nieprawidłowe.

Str. 20^{1,2} napisano: *Warstwy laminatu zbudowane zostały z dwuwęzłowych elementów belkowych spełniających założenia Bernoulliego ...* Na ogół warstwy laminatu (wg. literatury) spełniają założenia belek Timoshenki. Bardzo proszę Doktorantkę o uzasadnienie przyjętego w rozprawie wyboru modelu belki Bernoulliego a także jakie trudności wystąpiłyby w przypadku implementacji do przyjętego w rozprawie modelu bardziej zaawansowanego modelu Timoshenki.

Str. 22¹¹⁻¹⁵ napisano: *Celem tego rozdziału jest zaprezentowanie możliwie najprostszego modelu opisującego zjawisko delaminacji i uwzględniającego problem kontaktowy, pozwalającego na efektywne rozwiązanie kosztownego numerycznie zagadnienia odwrotnego identyfikacji defektów* Po pierwsze – Autorka nie przywołała w tym miejscu żadnej pozycji literatury, która dotyczy *modelu opisującego zjawisko delaminacji i uwzględniającego problem kontaktowy* a jest tego trochę, przykładowo:

- [1] Żak A.: *Non-linear vibration of a delaminated composite beam*. Key Engineering Materials, 293–294, pp. 607–614, 2005.
- [2] Ostachowicz W., Żak A.: *Vibration of a laminated beam with a delamination including contact effects*. Shock and Vibration, 11, pp. 157–171, 2004.
- [3] Żak A., Krawczuk M., Ostachowicz W.: *Vibration analysis of composite plate with closing delamination*. Structural Health Monitoring, edited by Fu-Kuo Chang, Technomic Publishing Co., Inc., Lancaster–Basel, pp. 1019–1028, 1999.

Po drugie – rozwiązanie zagadnienia odwrotnego jest w stosunkowo niewielkim stopniu zależne od spotykanych w literaturze modeli np. delaminacji. W każdym bądź razie Autorka nie przedstawiła takiej analizy dla innych modeli a więc podane stwierdzenie jest zbyt mocne.

Str. 23³⁻⁶ napisano: *Odspojenie warstw laminatu traktowane jest w niniejszej rozprawie na dwa sposoby: jako defekt wywołany wcześniej i poddany procedurze identyfikacji lub jako określone, pożądane rozwarstwienie, wymuszone w drgającej konstrukcji*. Chciałbym, aby Doktorantka wyjaśniła ten drugi (podkreślony wyżej) przypadek podczas publicznej obrony rozprawy.

Str. 26 – tablica 3.2: Autorka w wielu miejscach pracy przyjmuje oznaczenia potęgowe danych liczbowych w *komputerowym* zapisie, np. 70e9 zamiast $70 \cdot 10^9$ czy 5e-5 zamiast $5 \cdot 10^{-5}$. Problem w tym, że Autorka stosuje obydwa zapisy jednocześnie (tzn. *komputerowy* i zwykły) w różnych częściach pracy.

Str. 33₂ brak numeru tablicy.

Str. 34 brak rysunku 3.11(b).

Str. 35 w rozdz. 3.7 brakuje numeru tablicy.

Str. 37₇₋₈ *co to są płaskie elementy ramowe?* Ponadto w tym samym miejscu – moment bezwładności przekroju poprzecznego ma wymiar m^4 (jest zapis m^2).

Str. 39 brak opisu osi na rys. 3.14(c).

Rys. 40 bałagan w podpisie pod rys. 3.15 (jest pięć rysunków od *a–e* a podpisy dotyczą tylko rysunków od *a–c*).

Str. 43 w zdaniu pomiędzy wzorami (4.2) i (4.3) nie dopisano numeru wzoru.

Str. 45 w tabelicy 4.2 można było w opisach użyć większych liter (nie ma ograniczeń miejsca). Podobnie jest w kilku innych miejscach rozprawy (np. tablica 4.3).

Str. 46³ brak numeru tablicy.

Str. 65_{7–9} napisano: *W następnym paragrafie zostanie pokazane, że odpowiednie sterowanie delaminacją wzdłuż powierzchni kontaktowej pozwala akumulować i rozładowywać na tyle duże porcje energii sprężystej, żeby proces tłumienia był bardzo efektywny.* Ten fragment pracy budzi moje zastrzeżenia, co do sensu takiego stawiania problemu technicznego. Delaminacja stanowi bowiem uszkodzenie konstrukcji i jako taka jest w układzie niepożądana a metody jej identyfikacji służą do jej wykrywania i informowania użytkownika o stopniu zagrożenia. Użytkownik natomiast podejmuje decyzje dalszego postępowania w stosunku do sygnalizowanego stanu zagrożenia. Nigdy natomiast nie słyszałem aby delaminacja była wykorzystywana a tym samym pożądana do tłumienia drgań. Nawet jeżeli się pojawi w jakimś miejscu to trudno sobie wyobrazić, że będzie właśnie w tym miejscu implementowany system aktywnego tłumienia, który w dodatku może niekorzystnie wpływać na powiększanie się delaminacji. Bardzo proszę aby Doktorantka wyjaśniła tę sprawę podczas publicznej obrony rozprawy. Wyjaśnienia wymaga również zapis na str. 70_{16–19} *Wyzwanie do dalszych badań stanowi też opracowanie technologii pozwalającej na wywoływanie efektu zbliżonego do szybko sterowalnej i odwracalnej delaminacji a także demonstracja efektu tych zabiegów na przykładzie wybranego problemu inżynierskiego.* Proszę podczas publicznej obrony rozprawy wyjaśnić pojęcie *odwracalnej delaminacji* oraz podać przykład *problemu inżynierskiego*.

Str. 78: w wielu pozycjach literatury (artykuły i wydawnictwa konferencji naukowych) nie ma podanych stron (np. [12]).

Str. 82: w pracy [78] nie ma wydawnictwa.

2. WNIOSEK KOŃCOWY

W podsumowaniu pragnę podkreślić, iż zasadnicze założenia pracy zostały zrealizowane a jej teza udowodniona. Przedstawiona do oceny rozprawa dokumentuje umiejętność samodzielnego formułowania i rozwiązywania problemu naukowego przez jej Autora. Metody Dystorsji Wirtualnych okazały się skutecznym i efektywnym narzędziem w zastosowaniu do modelowania zjawiska delaminacji z uwzględnieniem zjawisk kontaktowych a także identyfikacji defektów. Wyniki są interesujące a przede wszystkim możliwe jest wykorzystanie metody w zastosowaniach praktycznych.

Autorka wykazała się dobrym przygotowaniem do pracy naukowej, w szczególności w zakresie mechaniki konstrukcji, mechaniki pękania, metod numerycznych, programowania oraz techniki prowadzenia badań eksperymentalnych. Układ rozprawy nie budzi zastrzeżeń. Dostrzeżone usterki nie pomniejszają wartości naukowej pracy, która stanowi oryginalny i samodzielny dorobek naukowy Autorki. W moim przekonaniu rozprawa spełnia wymagania obowiązującej Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.