

Warszawa, dnia 5 grudnia 2008 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra Tomasza Bednarka pt.  
*„Komputerowe wspomaganie procesu projektowania konstrukcji drgających z uwzględnieniem zmęczenia materiału”*

Tematem recenzowanej rozprawy jest analiza numeryczna konstrukcji poddanych cyklicznym obciążeniom pod kątem ich trwałości zmęczeniowej i podatności na wymuszone drgania. Jest to ważny problem z punktu widzenia praktycznych zastosowań. Obowiązujące normy dozoru technicznego, dotyczące wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji, uwzględniają szereg prostych, najczęściej dwuwymiarowych przypadków i szacują wartości naprężeń w niebezpiecznych miejscach, tj. karbach o typowej geometrii, za pomocą różnych empirycznych współczynników koncentracji. Złożony, trójwymiarowy stan naprężenia w elementach konstrukcyjnych maszyn lub budowli uniemożliwia stosowanie wyznaczonych tam reguł lub prowadzi do znacznego przeszacowania wymaganych wymiarów, co wiąże się z wysokimi kosztami. Dlatego ważne jest opracowywanie numerycznych metod szacowania trwałości zmęczeniowej dla dowolnie skomplikowanych geometrycznie elementów konstrukcyjnych. Równie ważne jest wyznaczanie z możliwie dużą dokładnością częstości drgań własnych takich elementów i optymalizowanie wymiarów pod kątem unikania niebezpiecznych rezonansów dynamicznych, które rzutują m.in. na trwałość zmęczeniową. Podjęcie tego zadania przez Autora uważam więc za słuszne i celowe.

Rozprawa składa się z siedmiu rozdziałów, dodatku i spisu bibliografii. We wstępnym rozdziale 1 Autor przedstawia motywację podjęcia tematu, zakres i cel pracy oraz koncepcję jego realizacji. Dokonuje również przeglądu literatury dotyczącej przedmiotu swojej pracy. W rozdziale 2 przypomniane są podstawy metody elementów skończonych z uwypukleniem aspektów istotnych dla obliczeń rozważanych zagadnień, a mianowicie kwestii modelowania geometrycznego karbów i innych rejonów koncentracji naprężeń.

Rozdział 3 zawiera przegląd znanych metod oceny trwałości zmęczeniowej. Autor omawia dwie metody obliczeń — metodę naprężeń nominalnych (z uwzględnieniem obciążeń niesymetrycznych i zmiennoodprężeniowych) oraz metodę wykorzystującą mechanikę uszkodzeń. Podaje równania matematyczne oraz buduje algorytmy numeryczne oraz oparte na nich procedury numeryczne służące do implementacji tych metod w profesjonalnym programie do analizy MES. Na koniec analizuje dwa przykłady testowe — próbki cylindrycznej z karbem oraz cylindra hydraulicznego — w których wyniki obliczeń numerycznych porównane są z dostępnymi danymi doświadczalnymi. W kolejnym rozdziale 4 Autor rozszerza swoje rozważania na kwestię niezawodności konstrukcji ze względu na zmęczenie materiału i ilustruje je omówionym wcześniej przykładem cylindra hydraulicznego, dla którego wyznacza wskaźniki niezawodności.

W rozdziale 5 Autor omawia znane sformułowanie drgań swobodnych konstrukcji w ujęciu MES, sprowadzające się z matematycznego punktu widzenia do uogólnionego zagadnienia

własnego. Przedstawia także sformułowanie analizy wrażliwości rozwiązania, czyli częstości drgań własnych, na parametry projektowe. Uwzględnione jest w szczególności trudne i bardzo istotne z punktu widzenia zastosowań zagadnienie wielokrotnych wartości własnych. W rozdziale 6 przedstawione są algorytmy numeryczne Autora służące do analizy wrażliwości w obliczeniach drgań swobodnych konstrukcji. Algorytmy, zaimplementowane w programie MES, są zilustrowane trzema przykładami numerycznymi, z których jeden jest realistycznym wielkoskalowym problemem o znaczeniu przemysłowym.

Rozdział 8 zawiera podsumowanie wyników i wnioski na temat obszarów ich zastosowań. Dodatek zawiera opis programu FEAP będącego profesjonalnym narzędziem do analizy mechanicznej metodą elementów skończonych, w którym to programie zaimplementował on wszystkie utworzone przez siebie procedury numeryczne i który służył do przeliczenia wszystkich przykładów obliczeniowych. Całość wieńczy wykaz bibliografii, zawierający 133 pozycje.

Rozprawa napisana jest w sposób przejrzysty. Materiał jest spójny i stanowi logiczną całość. Głównymi elementami oryginalnymi są algorytmy i procedury numeryczne Autora służące do kompleksowej analizy konstrukcji poddanych zmiennym obciążeniom pod kątem ich trwałości zmęczeniowej i odporności na drgania rezonansowe. Tematyka ma istotne znaczenie praktyczne, ponieważ zjawiska zmęczenia materiału i drgań są poważnymi zagrożeniami dla bezpieczeństwa pracy konstrukcji i części maszyn, a koszty badań eksperymentalnych są ogromne, dlatego efektywne narzędzia numeryczne do ich modelowania są bardzo pożądane. Godny podkreślenia jest związek prowadzonych przez Autora badań z rzeczywistymi potrzebami przemysłu — przeliczone w rozprawie przykłady numeryczne stanowiły tematy dwóch dużych projektów badawczych finansowanych przez Komisję Europejską, w których Autor brał udział. Pod względem poziomu naukowego rozprawa zasługuje na wysoką ocenę.

Lektura rozprawy nasuwa jednak pewne pytania i wątpliwości. Wymienię tu najważniejsze z nich:

1. W rozdziale 3, w tabelach 3.1 i 3.2, Autor zestawia wyniki trwałości zmęczeniowej, wyrażonej poprzez liczbę cykli przeniesionych przez badane konstrukcje, otrzymane drogą numeryczną i doświadczalną. Już pobieżne porównanie obu kolumn liczb nasuwa wniosek, że wyniki numeryczne w niektórych przypadkach przeszacowują trwałość, tzn. badana konstrukcja przenosi w rzeczywistości mniej cykli obciążenia, niż wynika to z obliczeń. Oczywiście można się zgodzić, że w tego rodzaju zagadnieniach, tak bardzo podatnych na wpływ czynników stochastycznych, już sama zgodność rzędu wielkości pomiędzy modelem a eksperymentem może być uznana za sukces, jednak przy omówieniu wyników brakuje komentarza na ten temat i wniosków dotyczących wiarygodności i zakresu stosowalności otrzymanych wyników.
2. Wcześniej w tym rozdziale Autor poświęcił dużo uwagi problemom numerycznym w modelowaniu naprężeń w kątowych narożach brzegowych w siatce modelu MES. Naprężenia wykazują tam koncentracje a ich wartości są w niedopuszczalnym stopniu wrażliwe na gęstość dyskretyzacji. Autor uzasadnia konieczność „wygładzania” powierzchni modelu w celu zmniejszenia niepożądanych koncentracji naprężeń. Powstaje jednak pytanie, czy takie operacje nie zafałszowują wyników obliczeń numerycznych w sytuacji, gdy w modelowanej konstrukcji występują rzeczywiste ostrokatne karby, w których mają miejsce realne niebezpieczne koncentracje naprężeń.
3. W wyprowadzeniach równań MES Autor stosuje absolutną notację macierzowo-wektorową. Przy omawianiu zagadnienia wrażliwości wprowadza ponadto wektor para-

metrów węzłowych  $h$ , względem którego elementów różniczkuje odpowiednie wielkości i równania macierzowe. W konsekwencji macierzowo-wektorowy zapis równań wrażliwości staje się niejasny, ponieważ nie wiadomo, czy np. pochodne wektorów względem  $h$  są zapisane kolumnami, czy rzędami, i jak dokładnie należy rozumieć operacje mnożenia tego typu macierzy. W zapisie pojawiają się ponadto obiekty będące trójwymiarowymi tablicami liczb. Wydaje się, że użyta notacja macierzowo-wektorowa nie jest w tym przypadku adekwatna, a przynajmniej wymaga jakiegoś dodatkowego wyjaśnienia.

4. W sformułowaniu zagadnienia własnego w rozdziale 5 równania (5.19)–(5.20) są niestety zapisane błędnie i błąd ten powtarza się następnie w dalszych wyprowadzeniach tego rozdziału. Prawidłowy zapis znajdujemy dopiero w następnym rozdziale, w równaniu (6.1), które, jak łatwo się przekonać, nie jest równoważne z równaniami (5.19)–(5.20).
5. Analiza wrażliwości jest ważnym narzędziem do formułowania gradientowych metod optymalizacji i słusznie, że Autor zajął się nią w kontekście analizy drgań własnych konstrukcji. Po lekturze rozprawy odczuwam jednak pewien niedosyt spowodowany brakiem podobnego sformułowania wrażliwości w odniesieniu do rozważań rozdziału 3, poświęconego analizie trwałości zmęczeniowej. Tym bardziej, że we wnioskach Autor sam stwierdza: „*Dzięki znajomości miejsca i kierunku propagacji pęknięcia zmęczeniowego możliwa jest bardziej efektywna optymalizacja obszarów konstrukcji szczególnie narażonych na pękanie zmęczeniowe*”. Efektywna optymalizacja? — tak, o ile znamy gradienty wrażliwościowe.

Język rozprawy jest poprawny, choć manuskrypt niestety nie jest wolny od błędów literowych i interpunkcyjnych. Można jedynie zarzucić Autorowi błędne używanie słowa „ilość” w odniesieniu do rzeczowników policzalnych, do których prawidłowo należałoby używać słowa „liczba”.

Wymienione wyżej uwagi krytyczne nie umniejszają mojej pozytywnej oceny rozprawy. Autor wykazał dobre przygotowanie merytoryczne i dużą dojrzałość badawczą w podejściu do tematu. Podsumowując, uważam, że przedłożona przez niego rozprawa spełnia wymogi ustawy o stopniach naukowych i wnioskuję o dopuszczenie Autora do publicznej obrony jej tez.

