

Prof. dr hab. inż. Janusz Badur
Zakład Konwersji Energii
Instytut Maszyn Przepływowych PAN
Gdańsk

Gdańsk 12.11.2008

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Bednarka
pt.
Komputerowe wspomaganie procesu
projektowania konstrukcji drgających
z uwzględnieniem zmęczenia materiału**

1. Ogólne dane o rozprawie.

Przedłożona mi do recenzji rozprawa Pana Tomasza Bednarka napisana jest w języku polskim. Wykorzystuje ona bogate słownictwo naukowe oraz posiada językowe propozycje dla pojęć jeszcze w języku polskim nieużywanych. Zawarta jest w siedmiu rozdziałach, podsumowaniu, literaturze oraz dodatku – łącznie - 158 stron. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Włodzimierz Sosnowski. Rozprawa była współfinansowana przez IPPT PAN, UKW w Bydgoszczy oraz dwa granty celowe.

Tytuł rozprawy w dużej części oddaje jej zawartość merytoryczną. Zwykle określenie „komputerowe wspomaganie” używane jest w biurach konstrukcyjnych w nieco innym znaczeniu. Tutaj te określenie niepotrzebnie sugeruje iż rozprawa mogłaby być zaliczona do dziedziny „budowa i eksploatacja maszyn” - podczas gdy z treści wynika jednoznacznie że jest ona znakomitym przykładem pracy w dziedzinie „Mechanika i Informatyka” stąd chyba nie ma powodu, aby jej charakter ukrywać w tytule.

Określenie „proces projektowania”, w tytule, jest mało fortunne - sugeruje, iż celem rozprawy jest przygotowanie programu dla firmy projektującej np. maszyny wirnikowe. Tytuł rozprawy bliższy jej naukowej zawartości mógłby brzmieć: **Sformułowanie i numeryczna implementacja problemu zmęczenia materiału konstrukcji drgających.**

2. Aktualność i oryginalność tematu rozprawy

Specyfika pracy urządzenia, jej okresowość, ruch tłoków, wirowanie wirników zwykle nieuchronnie przyczyniają się do drgań konstrukcji. Te drgania nie są groźne w poprawnie zaprojektowanej konstrukcji i w najgorszym przypadku przyczyniają się do degradacji zmęczeniowej materiału konstrukcji. Jednak, w przypadku konstrukcji nie odstrojonych znacznie wzrastają amplitudy drgań i amplitudy towarzyszących im naprężeń w wyniku czego następuje kilku- lub kilkunastokrotne obniżenie przewidywanej trwałości zmęczeniowej. Zniszczenie zmęczeniowe charakteryzuje się drobnym przelomem łatwym do określenia za pomocą mikroskopii elektronowej, stąd wiadomo, iż duża ilość poprawnie zaprojektowanych urządzeń (75-80%) ma wymieniane elementy właśnie z powodu wyczerpania trwałości zmęczeniowej.

Bardzo częsta jest sytuacja pośrednia między zwykłym przypadkiem utraty trwałości zmęczeniowej a przypadkiem zniszczenia zmęczeniowego indukowanego nadmiernymi drganiami w rezonansie. Ma to miejsce, na przykład, w eksploatacji turbin, gdzie elementami krytycznymi są wolnonośne łopatki mające trwałość zmęczeniową ocenianą na 140 tys. godzin (około 30 lat). Jednak w trakcie cykli eksploatacyjnych następuje zwałenie materiału najczęściej na wskutek kruchości wodorowej, i po 2-3 latach początkowo (z zapasem) odstrojona łopatka wchodzi w obszar rezonansu i pod wpływem zwiększonych amplitud naprężeń kończy swój żywot po dalszych 5-6 miesiącach. Według takiego mieszanego scenariusza mogły ulec zniszczeniu łopatki wirnikowe turbiny 100 MW w Wrocławiu, turbiny 120 MW w Siekierkach, Poznaniu, Łęku, etc.

Ambicją doktoranta i jego promotora jest podjęcie tego ważnego i złożonego zagadnienia. Wymaga ono najpierw stworzenia podstaw teoretycznych, potem obmyślenia zaawansowanych algorytmów numerycznych i ich implementacji do kodów obliczeniowych. Takie ustawienie tematu jest nie tylko poważnym zadaniem naukowym lecz również zadość czyni potrzebom praktycznym – pozwala bowiem na opracowanie ściślejszych niż dotychczas, odpowiedzi na główne pytania najbardziej twórczych konstruktorów. Po zaprojektowaniu nowego, sprawniejszego i bardziej ekologicznego urządzenia należy zapytać się bowiem o istniejące w konstrukcji zapasy żywotności zmęczeniowej i odstrojenie konstrukcji.

Niezwykle wysoko ocenić trzeba odwagę badawczą, talent i umiejętności numeryczne oraz zaangażowanie i pracowitość doktoranta. Celem Doktoranta, wspieranym przez promotora, było bowiem kompleksowe opracowanie i wytestowanie nowego narzędzia badawczo-obliczeniowego ujmującego powyżej naszkicowany problem długiej, bezpiecznej i taniej eksploatacji urządzenia. Ta potrzeba kompleksowości tłumaczy po części fakt iż doktorant podejmuje dwa, częściowo niezależne z numerycznego punktu widzenia, tematy. Tak więc już w samym zamyśle, ten doktorat zawiera w sobie dwa duże tematy. Ich doskonała realizacja pokazuje, że Doktorant wykonał dwa doktoraty w jednej rozprawie i z tego punktu widzenia, rozprawa mgr Bednarka jest wyróżniająca się ponad standardy i zwyczajową tradycję.

Niezwykle przyjemnie jest recenzować rozprawę w której doktorant wykazuje tak otwartą postawę badawczą. Nie codziennie spotyka się badacza który miałby śmiałość i odwagę obrócić swą uwagę w stronę problemu z którym boryka się przemysł. Bowiem pochylenie się nad tematami tak złożonymi, które na pewno nie przyniosą mu nagrody Nobla, jest aktem męskiego poświęcenia i potrzebnego pragmatyzmu. Oba tematy badawcze podjęte przez Doktoranta są aktualne gdyż, przykładowo, są rozwijane w czterech wielkich koncernach turbinowych jakie zostały na globalnym rynku. Te koncerny zabiegają również o stworzenie pewnych, sprawnych i wiarygodnych narzędzi badawczych wspierających proces projektowania i modernizacji. Należy pogratulować promotorowi tak trafnie dobranego celu rozprawy.

Reasumując, Pan mgr Bednarek podejmuje aktualny, nierozwiązany dotychczas problem badawczy o dużej skali trudności, wymagający wyjątkowych umiejętności numerycznych i wyróżniającej pracowitości. Już samo rozwiązanie problemu, implementacja numeryczna i walidacja są, same w sobie, poważnym zagadnieniem badawczym w dziedzinie „Mechanika i Informatyka”. Dodatkowo, stworzone przez doktoranta narzędzie obliczeniowe trafia w zaawansowane potrzeby przemysłu. Toteż można sądzić że w przyszłości, po przedarciu się przez barierę konkurencji, będzie ono mogło bezpośrednio być stosowane w procesie projektowania modernizacji i ekspertyz poeksploatacyjnych rozmaitych konstrukcji drgających.

3. Ocena rozprawy w części dotyczącej rewaloryzacji i implementacji modeli zniszczenia zmęczeniowego

Rozdziały 2,3,4 dotyczą postawienia problemu, opracowania modelu, jego implementacji i kalibracji na eksperymentach dotyczących trwałości zmęczeniowej. Doktorant nie ukrywa, że źródłem jego inspiracji i celem ostatecznym jest pierwsza w literaturze próba symulacji wielo-skalowego eksperymentu cyklicznego obciążenia cylindra hydraulicznego.

Daje on temu wyraz w **rozdziale drugim** gdzie pochyła swą uwagę nad tym konkretnym urządzeniem i dokonuje analizy jego pracy i przyczyn zniszczenia zmęczeniowego. Dokonuje krytycznej analizy istniejących w literaturze modeli i narzędzi badawczych pod kątem ich możliwości opisanie zjawiska zmęczenia w cylindrze. Wykonuje też symulacje numeryczne których celem jest wykazanie rzeczywistych punktów krytycznych konstrukcji w okolicach portu olejowego. Nie od razu udaje się trafić na właściwy dobór dyskretyzacji MES eliminujący „osobliwości numeryczne” w postaci zawyżonych koncentracji, i właściwej lokalizacji tych koncentracji zgodnej z obrazem uzyskanym z eksperymentu.

Okazuje się, że znaczenie też ma dobór właściwych „obliczeniowych” warunków brzegowych analizowanego wycinka cylindra. Krytyczne porównania wyników i modeli obliczeniowych wykonane w punkcie 2.2 świadczą, że autor jest krytyczny do

modeli literaturowych i jest gotowy do samodzielnego zaatakowania problemu i poszukiwania modelu który sprostaby opisowi zniszczenia cylindra hydraulicznego.

Pięćdziesięcio-pięć-stronicowy **rozdział trzeci** jest zasadniczym elementem rozprawy. Tu analizowane są literaturowe modele opisu zmęczenia, zarówno te oparte na koncepcji naprężeń nominalnych jak i te oparte o ewolucję parametru zmęczenia. Opierając się na analizie literatury, doktorant opracował oryginalne algorytmy dla obu modeli i zaimplementował je do kodu obliczeniowego (rozdz. 3.5) oraz ocenił koszt proponowanych przez siebie algorytmów (rozdz. 3.6).

Dobrym pomysłem jest weryfikacja obu rozważanych modeli na jednym przykładzie cyklicznie rozciąganej próbki z karbem wyoblonym. Rozpatrzono konkretny eksperyment o dużych jak nie olbrzymich amplitudach naprężeń – w rzeczywistości mających miejsce tylko w niepoprawnie zaprojektowanych konstrukcjach. To, że w tak ekstremalnych obciążeniach uzyskano jakościowo zgodne wyniki (tab. 3.1) jest dowodem dużej „pojemności” modelu naprężeń nominalnych, który dopuszcza lokalne pojawianie się uplastycznień.

Rozwiązanie tego samego przykładu za pomocą modelu z ewolucją parametru zmęczenia pozwala należycie ocenić wagę tej metody w której zmęczenie i stan naprężeń ewoluuje po każdym cyklu. Można ocenić redystrybucję skoncentrowanych stanów naprężeń i przemieszczanie się frontu zniszczenia zmęczeniowego. Zniszczenie zmęczeniowe pojawia się po 130 tys cykli - jednak ta szczegółowa informacja okupiona jest kosztownym obliczeniem każdego cyklu z osobna.

Po tym testowym przykładzie następuje właściwy przykład ilustrujący moce i możliwości obu modeli. Doktorant dokonuje oryginalnej, pierwszej w literaturze, analizy przypadku cylindra hydraulicznego, wykazując badawczą wnikliwość. To, że dysponuje on dokładnymi danymi wyników eksperymentu pozwala mu odtworzyć realistyczne warunki zniszczenia zmęczeniowego i ostatecznie porównać oba implementowane przez siebie modele w każdej z 10-ciu krytycznych stref.

Wyniki analizy metodą naprężeń nominalnych [podane w tab. 3.2] są, w porównaniu z eksperymentem, na tyle zaskakujące, że nie podejmuje się z nimi dyskusji. Szkoda, że nie podano, które z wartości eksperymentalnych pochodzą z tych samych próbek. We wszystkich przypadkach obliczeniowa trwałość zmęczeniowa przekracza (czasem dziesięciokrotnie) wartość eksperymentalną. Z kolei, obliczona za pomocą parametru zmęczenia trwałość zmęczeniowa jest na poziomie 300 000 cykli, czyli dwa razy mniej niż w eksperymencie. Oznacza to, że wyniki eksperymentu lokują się pomiędzy wynikami obu modeli.

Chociaż wyniki uzyskane przez Doktoranta są pewne i cenne, formułuje on ostrożne wnioski, widząc przyczyny rozbieżności tylko w modelach. Wydaje się, że oba modele są poprawne, a modelowanie i dyskretyzacja zostały wykonane zgodnie z możliwościami modeli.

Trzeba pamiętać, że model naprężeń nominalnych kalibrowany jest na prostych próbkach a taki przypadek nie ma miejsca w cylindrze hydraulicznym. Tak więc nie tylko, jak słusznie wnioskuje Doktorant, dokładność wyliczenia naprężeń w modelu naprężeń nominalnych jest ważna, ale również są ważne efekty synergetyczne, redystrybucja pola naprężeń, które nie są uwzględnione w kalibracjach stałych tego modelu. Jedynym grubym przybliżeniem jaki tu zakładamy to, że, niezależnie od ilości składowych stanu naprężenia, mamy lokalnie ten sam, skalibrowany integralnie, wykres S-N. Jest to jednak nieuchronna, immanentna cecha tego modelu – w końcu, moduł Younga też ustalamy integralnie na dużej próbce a potem stosujemy do mikroskopijnych obszarów. Jednak w tym przypadku płacimy dużą cenę i tracimy lokalne informacje.

Natomiast ocena trwałości zmęczeniowej za pomocą parametru zmęczenia daje przyzwoite wyniki w oparciu o które można stawiać bezpieczne prognozy żywotności. I co ważne dla producenta, można prognozować czas gwarancji i harmonogram remontów. Przykładowo, przesunięcie terminu pierwszego postoju z 2.5 do 3 lat zezwala na podniesienie ceny oferty turbiny o 6% [przypadek turbiny 103JT Odessa].

Kolejny **rozdział czwarty**, kończący analizę wrażliwości zmęczeniowej, jest następstwem wątpliwości i pytań Doktoranta wynikających z jego zamodelowania rzeczywistego eksperymentu cylindra hydraulicznego. Ten rozdział dotyczy, ogólnie mówiąc, problemów jakie obliczeniowcy posługujący się narzędzi CFD i CSD mają w przekazaniu ostatecznych wyników badań konstruktorom i inżynierom wykształconym w paradygmacie wiedzy opartej na modelach 0D (integralnych). Przejście z naszego rozumowania używanego w modelach 3D do rozumowania i pojęć modelu 0D, [wspartych często kulejącym eksperymentem i rupieciarnią narzędzi klasycznych], jest nieodzownym elementem naszej pracy i nie winniśmy się od niego uciekać. W niekończącej się walce o uzyskanie wiarygodności dla CFD i CSD, to my musimy wskazać jak klasyczne integralne parametry i ich charakterystyki mogą być uzyskiwane z modeli 3D.

Nie unikając tego wyzwania, Doktorant pochyła się nad problemem przejścia od wyników i informacji uzyskanych na poziomie 3D do integralnych 0D ocen niezawodności konstrukcji. Słusznie, że podejmuje ten temat – trzeba bowiem wielu wysiłków aby przełożyć uzyskane wyniki na wskaźniki analizy stosowane od lat w praktyce inżynierskiej koncernów lotniczych czy turbinowych. Analiza przeprowadzona w tym rozdziale świadczy o dużej dojrzałości badawczej doktoranta i jego gotowości do odpowiedzialnej oceny pracy rzeczywistych urządzeń.

4. Ocena rozprawy w części dotyczącej numerycznej implementacji metod wrażliwości konstrukcji do jej odstrajania.

Dwa następne **rozdziały piąty i szósty**, same w sobie będące doskonałą rozprawą, dotyczą sytuacji gdy chcemy przedłużyć trwałość zmęczeniową konstrukcji poprzez obniżenie amplitud naprężeń za pomocą odstrojenia konstrukcji. Przeprojektowanie

konstrukcji narażonych na pracę w stanie rezonansowym nazywane jest przez konstruktorów „odstrojeniem” konstrukcji – często nie chodzi tu o pierwsze postaci drgań lecz częstości wyższe przez które ulegają zniszczeniu zmęczeniowemu krótsze elementy konstrukcji – również podstawowe dla pracy urządzenia. W praktyce dobre odstrojenie konstrukcji jest niemożliwe – działa tu bowiem „efekt krótkiej kołdry” gdy po zbyt dobrym odstrojeniu na pierwsze częstości odsłaniamy w konstrukcji inny, często tak samo niebezpieczny obszar zagrożeń dotyczący innego elementu konstrukcji.

W trakcie projektowania konstruktor zawsze zadaje sobie pytanie o ile zmieni się analizowana częstość drgań gdy zmienimy pewien wymiar geometryczny zwany parametrem projektowym. Przykładowo o ile wzrośnie pierwsza częstość drgań dwudziesto centymetrowej łopatki wirującej i rozkręconej gdy zwiększymy jej długość o 1 mm (69 Hz dla 103JT), lub gdy podniesiemy średnicę bębna mocującego o 1 mm (240 Hz dla 103JT). Znając bowiem wrażliwość częstości drgań na zmianę parametrów projektowych można ustalić strategię takiego projektowania które doprowadzi do wyprowadzenia konstrukcji z głównych rezonansów.

Ten niezwykle trudny, pracołłonny i bolesny temat badawczy miał odwagę podjąć doktorant stawiając sobie ambitny cel: numeryczne określenie wrażliwości częstości drgań na parametry projektowe i wykorzystanie go do optymalnego odstrojenia konstrukcji. Wychodząc naprzeciw potrzebom realnych konstrukcji, doktorant definiuje optymalne odstrojenie podobnie jak to czyni się w biurach konstrukcyjnych najlepszych koncernów – gdzie żąda się aby ostępy między częstościami drgań konstrukcji napiętej, odkształconej i często zdegradowanej eksploatacyjnie były jak największe od częstości wymuszeń będącymi również funkcją procesu eksploatacji i przez to zmiennymi w czasie. Często rezonanse są nieuchronne – wtedy urządzenie posiada zalecenie jak najkrótszego przebywania w tym stanie eksploatacji (np. zakaz pracy przy 85-86% mocy turbiny 107JT).

Kontynuując doświadczenia szkoły badawczej z której wyrasta i którą dziś współtworzy promotor, doktorant obmyśla oryginalny algorytm wyznaczenia wrażliwości wartości własnych (pojedynczych i wielokrotnych) na dowolną, skończoną, liczbę parametrów projektowych i z powodzeniem implementuje go do kodu obliczeniowego FEAP. Jest to olbrzymie osiągnięcie numeryczne świadczące o zdolnościach, talencie i dojrzałości doktoranta. [Nad podobnym zagadnieniem pracuje w Baden wielo-osobowa grupa, współpracując z uniwersytetami w Zurychu, Stuttgarcie, oraz instytucjami: DLR i VKI].

Opracowany własny algorytm i program wykorzystuje następnie doktorant w optymalizacji parametrów projektowych ze względu na optymalne odstrojenie. Wyniki pokazują, że dopracował się on niezwykle skutecznego narzędzia optymalizującego, które zezwala mu już w kilku lub kilkunastu krokach znaleźć rozwiązanie optymalne. Opracowany przez siebie algorytm testuje najpierw dla konstrukcji z jednym parametrem konstrukcyjnym (belka), z dwoma parametrami (płyta z żebrami) i nawet z trzema parametrami (wirnik na dwóch łożyskach). Niezależnie od budzących podziw

profesjonalnych osiągnięć jako mechanika i numeryka, podczas analizy tych trzech przykładów doktorant opisuje się doskonałą analizą inżynierską, antycypuje bowiem sposób myślenia doświadczonego konstruktora mający miejsce podczas „ręcznego” odstrajania konstrukcji.

Wszystkie trzy przykłady są oryginalne, autorskie, pomyślane i ustawione tak aby pokazać możliwości obliczowe proponowanego algorytmu – stąd brak jest porównań literaturowych a tym bardziej eksperymentalnych.

5. Podsumowanie

Strona merytoryczna rozprawy nie budzi zastrzeżeń. Praca powstała, bowiem w znanym i renomowanym (nie tylko w kraju) ośrodku naukowym, zajmującym się modelowaniem złożonych procesów mechanicznych.

Poprzez opracowanie oryginalnych modeli i ich implementację do kodu obliczeniowego oraz poprzez wykonanie testów i zaawansowanych obliczeń Doktorant udowodnił swoje bardzo wysokie kwalifikacje jako mechanik-informatyk specjalizujący się w problematyce obliczeń konstrukcji drgających.

Doktorant wykazał się profesjonalną znajomością metodologii badań naukowych. Potwierdził on swą dojrzałość i umiejętność samodzielnego rozwiązywania problemów badawczych. Wyróżnił się wszechstronnym opanowaniem współczesnych technik obliczeniowych. Posiada ugruntowaną wiedzę klasyczną z dziedziny modelowania dynamiki konstrukcji, którą potrafi się posługiwać oraz pogłębiać.

Stwierdzam, iż Doktorant osiągnął, z nadmiarem, postawiony mu przez promotora cel.

6. Wniosek końcowy.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Tomasza Bednarka, pod tytułem „**Komputerowe wspomaganie procesu projektowania konstrukcji drgających z uwzględnieniem zmęczenia materiału**” odpowiada wymogom określonym w Ustawie o Stopniach i Tytułach Naukowych, więc – zgodnie z obowiązującą procedurą – wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Jednocześnie wysoko oceniając imponujący wkład merytoryczny Doktoranta w ustanowienie modeli przybliżających nas do rzeczywistości i wysoko ceniąc umiejętności wykonania skomplikowanych i trudnych implementacji numerycznych, oraz wkład doktoranta w przygotowanie podstaw teoretycznych i narzędzi numerycznych w zakresie optymalizacji i diagnostyki zmęczeniowej konstrukcji drgających, wnoszę do Rady Naukowej IPPT o wyróżnienie rozprawy.

J. Bader