

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

