Białystok, 30.06.2008 r.

Prof. zw. dr hab. inż. Andrzej Seweryn
Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej
Wydział Mechaniczny
Politechnika Białostocka
15-351 Białystok, ul. Wiejska 45 C

RECENZJA

pracy doktorskiej autorstwa mgr inż. Krzysztofa P. Mroza pt. „*Propagacja szczeliny zmęczeniowej w bimateriale: model matematyczny i rozwiązanie numeryczne*".

Podstawa opracowania opinii: pismo Dyrektora Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk prof. dr hab. inż. Wojciecha K. Nowackiego z dnia 28.03.2008 roku.

1. Charakterystyka i ogólna analiza pracy

Recenzowana praca dotyczy modelowania matematycznego i numerycznego płaskich zagadnień wzrostu pęknięć zmęczeniowych w warunkach proporcjonalnych obciążeń dwuosiowych (rozrywanie i ścinanie wzdłużne), cyklicznie zmiennych. Rozważono propagację pęknięć w materiałach liniowosprężystych, zarówno jednorodnych, jak i w materiałach kompozytowych (bimateriałach).

Prezentowane w pracy badania można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- obliczenia wartości współczynników intensywności naprężenia (K_{I} i K_{II}) oraz współczynnika przy członie II rzędu rozwiązania asymptotycznego dla pól naprężeń i odkształceń (współczynnika T) przed wierzchołkiem szczeliny zmęczeniowej o dowolnym kształcie, z wykorzystaniem metody osobliwych równań całkowych;
- określenie kierunku i długości przyrostu szczeliny w każdym cyklu obciążenia z wykorzystaniem nielokalnego energetycznego kryterium pękania zmęczeniowego.

Wymienione badania naukowe mają duże znaczenie poznawcze, naukowe, ale także aplikacyjne. W szczególności tworzenie modeli obliczeniowych, uwzględniających fizyczne podstawy procesów pękania, jest aktualnym nurtem współczesnych badań naukowych.

Ze względu na dużą złożoność zjawiska pękania, szczególnie zmęczeniowego, modelowanie tego typu zagadnień obarczone jest dużym stopniem trudności. Z drugiej strony duże znaczenie praktyczne powoduje zaangażowanie istotnego potencjału badawczego w kraju i za granicą, w ośrodkach akademickich i przemysłowych. Niestety, biorąc pod uwagę osiągnięcia badawcze przedstawione w literaturze światowej, można stwierdzić, że brakuje kompleksowych rozwiązań – zweryfikowanych doświadczalnie modeli obliczeniowych pozwalających na prognozowanie pękania elementów konstrukcyjnych w warunkach obciążeń eksploatacyjnych, bez zbytniego upraszczania tego procesu. Powyższa uwaga dotyczy także pękania materiałów jednorodnych, nie mówiąc już o materiałach kompozytowych (np. bimateriałach). Istnieje natomiast potrzeba optymalizacji elementów i całych konstrukcji, a także odpowiedniego doboru lub projektowania materiałów, pod kątem przyszłej ich trwałości, odporności na pękanie, a także (a może przede wszystkim) bezpieczeństwa.

Rozprawa obejmuje 149 stron. Jest ona podzielona na 4 rozdziały, spis treści, jeden dodatek oraz bibliografię.

Pierwszy rozdział (6 stron) zawiera krótkie wprowadzenie do tematyki badań. Przedstawiono w nim uzasadnienie wyboru tematu, cel pracy, a także metodykę badań. Zasadniczym celem rozprawy było opracowanie nowego modelu obliczeniowego propagacji pęknięć o dowolnym kształcie, w sprężystych materiałach, przede wszystkim kompozytowych (bimateriałach powstałych w wyniku idealnego zespolenia dwóch materiałów) w warunkach obciążeń zmęczeniowych. W rozdziale tym przedstawiono także wstęp do późniejszego przeglądu literatury, który zamieszczono w rozdziale drugim i trzecim.

Rozdział drugi (aż 76 stron) poświęcono opisowi i metodom obliczeń pól naprężeń w pobliżu wierzchołka szczeliny w złożonym stanie naprężenia (rozrywanie oraz ścinanie wzdłużne) w płaskich zagadnieniach teorii sprężystości. Omówiono w nim rozkład naprężeń przed wierzchołkiem szczeliny otrzymany za pomocą rozwiązania asymptotycznego z uwzględnieniem nie tylko członów osobliwych rozwiązania, ale i członów wyższych rzędów. Przedstawiono analityczne i numeryczne metody wyznaczania współczynników intensywności naprężeń K_{I} i K_{II}. Szczególną uwagę poświęcono zastosowaniu metody osobliwych równań całkowych do wyznaczania pól naprężeń i odkształceń w płaskich zagadnieniach ciał ze szczelinami, modelowanymi za pomocą dyslokacji krawędziowych. Metoda ta została wykorzystana w badaniach własnych Doktoranta. Opisano znane z literatury różne sformułowania problemu, postaci równań całkowych, jak i numeryczne rozwiązanie układu osobliwych równań całkowych typu Cauchy'ego. W rozdziale tym rozważono zagadnienia dyslokacji krawędziowej w okolicy lub wewnątrz kołowej inkluzji, a także na granicy dwóch ośrodków i w jej okolicy. Zaprezentowano rozwiązania zagadnień pojedynczych szczelin znajdujących się w okolicy kołowego wtrącenia lub połączenia dwóch materiałów, a także uogólnienie metody dla przypadków dowolnej liczby szczelin, z możliwością ich łączenia. Następnie omówiono rozkład naprężeń (także o oscylacyjnej osobliwości) przed wierzchołkiem szczeliny umieszczonej w różny sposób na granicy dwóch materiałów o różnych stałych sprężystości (np. szczelina na granicy, przecinająca granicę pod różnym kątem, szczelina na granicy z odgałęzieniem w jednym z materiałów, szczelina w jednym z materiałów o wierzchołku na granicy). Przedstawiono różne modele połączenia dwóch ośrodków: w postaci dodatkowej jednorodnej warstwy lub warstwy o ciągłej zmianie stałych sprężystości. Opisano opracowaną metodę wyznaczania wartości współczynników intensywności naprężeń K_{I} i K_{II} oraz współczynnika T przy członie drugiego rzędu rozwiązania asymptotycznego, bazujących na metodzie osobliwych równań całkowych. Przedstawiono wyniki własnych obliczeń dla wybranych przypadków konfiguracji szczelin i granicy dwóch ośrodków, które porównano z wynikami przedstawionymi w literaturze, uzyskując dobrą zgodność. Dodatkowo w rozdziale drugim opisano klasyczne modele strefy plastycznej przed wierzchołkiem rozciąganej szczeliny (modele Irwina i Dugdale'a).

Rozdział trzeci (46 stron), zgodnie z tytułem, powinien dotyczyć propagacji szczeliny w warunkach obciążeń zmęczeniowych. Przedstawiono w nim zarówno podręcznikowe podstawy zmęczenia materiałów, jak i przegląd kryteriów kruchego pękania płaskich elementów ze szczelinami (między innymi kryterium maksymalnych naprężeń obwodowych, kryterium gęstości energii odkształcenia, kryterium energii uwalnianej, J-kryterium, kryterium maksymalnego odkształcenia obwodowego, T-kryterium, Det-kryterium, kryterium przemieszczenia wierzchołkowego szczeliny, nielokalne naprężeniowe kryterium pękania, W-kryterium), które nie mogą być wykorzystywane bezpośrednio do prognozowania kierunku i wielkości przyrostu szczeliny zmęczeniowej (wbrew nazwie podrozdziału „Kryteria określające kierunek wzrostu szczeliny zmęczeniowej"). Następnie opisano znane z literatury zależności określające prędkość przyrostu szczeliny zmęczeniowej oraz czynniki wpływające na tę prędkość.

W rozdziale trzecim przedstawiono też wyniki badań własnych. Zaproponowano w nim autorskie nielokalne energetyczne kryterium pękania w płaskich zagadnieniach liniowej mechaniki pękania. Przedstawiono wyniki symulacji komputerowej dla różnych wartości parametrów występujących w kryterium. Na podstawie tego kryterium opracowano model obliczeniowy zmęczeniowej propagacji szczeliny w warunkach proporcjonalnych obciążeń, cyklicznie zmiennych. Model ten umożliwia wyznaczenie trajektorii szczeliny oraz prędkości jej przyrostu. W rozdziale tym zamieszczono także wyniki weryfikacji modelu dla przypadku obciążeń monotonicznych oraz zmęczeniowych. W tym celu wykorzystano zagadnienie rozciąganej tarczy ze szczeliną nachyloną pod różnym kątem do kierunku obciążenia. Wyniki obliczeń (trajektorię oraz prędkość przyrostu szczeliny) porównano z wartościami otrzymanymi w badaniach doświadczalnych przedstawionych w literaturze. W dalszej części rozdziału przedstawiono możliwości zastosowania opracowanego modelu obliczeniowego do prognozowania rozwoju szczeliny zmęczeniowej w materiale kompozytowym (bimateriale o idealnym połączeniu). Wykonano szereg obliczeń prędkości przyrostu oraz trajektorii szczeliny zmeczeniowej dla różnych konfiguracji szczeliny oraz granicy połączenia materiałów. Wyniki obliczeń nie mogły być porównane z wynikami badań eksperymentalnych, gdyż wyniki takie w literaturze nie występują.

Rozdział czwarty (4 strony) zawiera krótkie podsumowanie przeprowadzonych badań oraz możliwości rozwoju opracowanych metod.

W bibliografii zamieszczono 188 publikacji, z czego zdecydowana większość pochodzi z uznanych wydawnictw o zasięgu międzynarodowym. Zaskakujący jest fakt, że żadna z cytowanych prac nie jest autorstwa lub współautorstwa Doktoranta, choć takie publikacje są mi znane.

Należy dodać, iż badania, których wynikiem jest oceniana rozprawa, zostały wykonane w ramach projektu Sieć Doskonałości „Materiały wieloskładnikowe oparte na wiedzy" (*Network of Excellence on Knowledge-based Multicomponent Materials – KMM-NoE*), finansowanego w 6. Programie Ramowym Komisji Europejskiej.

2. Ocena pracy

Doktorant postawił cel pracy o następującym brzmieniu (cyt.):

„Celem jest uzyskanie efektywnej metody umożliwiającej określenie wzrostu ... (zmęczeniowej) *szczeliny* (w płaskich zagadnieniach), *dowolnie usytuowanej w bimateriale* (powstałym na skutek idealnego zespolenia dwóch materiałów sprężystych)*"*.

Cel ten został przedstawiony we „Wstępie", a nie w rozdziale zatytułowanym „Cel pracy, jej istota i uzasadnienie podjęcia problemu".

Oceniając wybór tematu oraz cel pracy, nie mam wątpliwości, że są one ambitne i wartościowe.

Autor nie przedstawił natomiast tezy pracy. Nie jest to jednak warunek konieczny pozytywnej oceny rozprawy. Tezę taką można byłoby zaproponować w odniesieniu do opracowanej uniwersalnej metody wyznaczania współczynników intensywności naprężeń oraz współczynnika przy członie II rzędu rozwiązania asymptotycznego dla pól naprężeń i odkształceń w pobliżu wierzchołka szczeliny o dowolnym kształcie w materiale jednorodnym i kompozytowym – bimateriale, a także energetycznego kryterium wzrostu szczeliny zmęczeniowej w warunkach obciążeń dwuosiowych (rozrywanie + ścinanie wzdłużne) w płaskich zagadnieniach teorii sprężystości. W moim przekonaniu tak sformułowana teza odzwierciedlałaby ideę prezentowanych badań i chociaż częściowo mogłaby być w pracy udowodniona.

Zasadniczym, oryginalnym elementem ocenianej rozprawy jest model obliczeniowy propagacji szczeliny zmęczeniowej w zagadnieniach dwuwymiarowych. Umożliwia on prognozowanie trajektorii oraz prędkości przyrostu szczeliny (lub układu szczelin) w sprężystych materiałach jednorodnych oraz kompozytach (bimateriałach powstałych w wyniku idealnego zespolenia dwóch materiałów) w warunkach dwuosiowych, proporcjonalnych obciążeń, cyklicznie zmiennych.

Zaproponowany model ma prawidłową strukturę modułową: składa się z dwóch bloków obliczeniowych. Pierwszy z nich służy do wyznaczania wartości współczynników intensywności naprężeń (współczynników przy osobliwych członach I rzędu) oraz współczynnika przy członie II rzędu rozwiązania asymptotycznego dla pól naprężeń i odkształceń w pobliżu wierzchołka szczeliny. Do tego celu wykorzystano metodę osobliwych równań całkowych oraz dyslokacyjny model szczeliny. Metoda ta jest efektywna zarówno w przypadku materiałów jednorodnych, jak i kompozytowych (dla przypadku idealnego połączenia dwóch materiałów – granica w postaci okręgu lub linii prostej).

Wyznaczone w pierwszym bloku parametry opisujące pole naprężeń przed wierzchołkiem szczeliny posłużyły jako dane wejściowe do drugiego bloku obliczeniowego do określania kierunku i przyrostu tej szczeliny w każdym cyklu (lub bloku cykli) obciążenia. Do tego celu wykorzystano oryginalne nielokalne kryterium pękania oraz prawo rozwoju szczeliny bazujące na energetycznych podstawach. W kryterium pękania wykorzystano gęstość sprężystej energii odkształcenia, którą rozłożono na dwa składniki: objętościowy T_V (odpowiadający za procesy plastyczne) oraz postaciowy T_D (odpowiadający za procesy dekohezji). Założono, że kierunek pękania określa się z warunku minimalnej wartości gęstości energii postaciowej na konturze wokół wierzchołka szczeliny o stałej wartości gęstości energii objętościowej, odpowiadającej pewnej wartości krytycznej T_V^f. Według tego kryterium, propagacja szczeliny następuje wówczas, gdy zasięg obszaru dekohezji (wyznaczonego za pomocą gęstości energii objętościowej) w tym kierunku osiągnie wartość krytyczną. Trudno jest jednak znaleźć fizyczną interpretację zaproponowanych zależności obliczeniowych. Należy jednak dodać, że zostały one pozytywnie zweryfikowane na podstawie wyników badań doświadczalnych przedstawionych w literaturze, dla przypadku rozciąganej tarczy ze szczeliną nachyloną pod pewnym kątem do kierunku obciążenia.

Zaproponowany w rozprawie algorytm obliczeniowy został zaimplementowany numerycznie w programie MatLab. Szkoda, że nie zamieszczono np. schematu blokowego algorytmu, zwłaszcza, że według informacji zawartej w pracy, kod źródłowy liczy ok. 2000 linii w języku tak wysokiego poziomu. Uważam, iż autorskie, zaawansowane oprogramowanie także należy zaliczyć do osiągnięć Doktoranta.

Przechodząc do uwag krytycznych oraz dyskusyjnych poniżej wymienię ważniejsze nich, w kolejności ich powstawania podczas analizy niniejszej rozprawy doktorskiej.

1. Zaproponowany model obliczeniowy propagacji szczeliny zmęczeniowej ma pewne ograniczenia oraz nieścisłości, a mianowicie:
   - Model umożliwia prognozowanie przyrostu szczeliny jedynie w zagadnieniach płaskich oraz w przypadku proporcjonalnych, dwuosiowych obciążeń, cyklicznie zmiennych. Co będzie zatem w przypadku obciążeń nieproporcjonalnych, które najczęściej występują w praktycznych zagadnieniach inżynierskich?

- Analizując proces pękania na granicy dwóch ośrodków można stwierdzić, że zasadniczą rolę odgrywa w nim osłabienie tej granicy wywołane nieidealnym połączeniem materiałów. Powoduje ono to, że pękanie najczęściej ma miejsce na granicy tych ośrodków. Autor założył połączenie idealne, stąd też otrzymane w tym zakresie wyniki nie mają większego praktycznego znaczenia.
- Rezultatem użycia zaproponowanego kryterium jest (co Doktorant przyznał w pracy) ciągła zmiana wartości kąta wzrostu szczeliny zmęczeniowej w cyklu obciążenia. Stąd też Autor przyjął pewien poziom obciążenia (wartość maksymalną, minimalną (?) lub pośrednią) jako reprezentatywny i dla tego poziomu wyznaczał kierunek przyrostu szczeliny. Jest to podejście nie mające uzasadnienia fizycznego. W takim przypadku należało równanie ewolucji szczeliny zapisać w postaci przyrostowej (przyrost szczeliny uzależnić od przyrostu obciążenia) i w sposób ciągły (a nie po cyklu obciążenia) zmieniać kierunek jej przyrostu.

2. Rozpatrując zagadnienie szczeliny na granicy dwóch ośrodków, Doktorant analizował osobliwe i oscylacyjne zarazem pole naprężeń przed jej wierzchołkiem. Wywołuje ono wzajemne przenikanie się krawędzi szczeliny. W rzeczywistości na pewnym odcinku następuje kontakt między krawędziami szczeliny. Ma on także miejsce w wielu przypadkach obciążenia, szczególnie, gdy szczelina jest mocno zakrzywiona. Czy i w jaki sposób był on uwzględniany w obliczeniach?
3. Na propagację szczeliny w warunkach obciążeń zmęczeniowych największy wpływ mają dwa czynniki, a mianowicie: stan uszkodzenia przed wierzchołkiem szczeliny oraz przyrost poszczególnych składowych obciążenia. Stąd też w przypadku „naciętej" szczeliny nie występuje strefa uszkodzenia i potrzeba pewnej liczby cykli obciążenia do jej „wytworzenia" – szczelina wówczas nie propaguje. Stan uszkodzenia w strefie przywierzchołkowej powoduje zmianę kierunku przyrostu szczeliny w stosunku do wyznaczonego z kryterium pękania bez jego uwzględnienia, o czym wspominał Doktorant w rozprawie.
4. Opis użytego w badaniach sformułowania metody osobliwych równań całkowych jest niejasny i przemieszany z informacjami dotyczącymi tej metody znanymi z literatury. Należało wyjaśnić dokładnie (najlepiej w oddzielnym rozdziale) poniższe kwestie. Jaka jest postać rozwiązywanych równań całkowych? Jaką postać mają jądra tych równań? Jak z funkcji Airy'ego przejść do jąder równań całkowych? Jaką metodą rozwiązywano układ równań całkowych (metodą kolokacji?)? Wspomniana w pracy

metoda Gaussa-Chebysheva to metoda całkowania numerycznego, a nie rozwiązywania równań całkowych. W jaki sposób w prezentowanym sformułowaniu metody osobliwych równań całkowych uwzględnia się warunki brzegowe wynikające ze skończonych wymiarów elementów?

Redakcja pracy została wykonana na zadawalającym poziomie. Krytyczne uwagi szczegółowe oraz redakcyjne zostały zamieszczone w tekście pracy i przekazane Autorowi. Poniżej zostaną przedstawione ważniejsze z nich.

1. Struktura pracy jest nieco chaotyczna. Wyniki badań własnych są przedstawione na przemian z wynikami badań znanymi z literatury. Ponadto za zbędny uważam podrozdział *2.10. Strefa plastyczna w otoczeniu wierzchołka szczeliny*, gdyż praca nie dotyczy zagadnień sprężysto-plastycznego pękania, a zagadnień liniowosprężystych. Również umiejscowienie tego rozdziału pomiędzy metodami obliczeń współczynników K_{I} i K_{II} oraz współczynnika T, a wynikami obliczeń za pomocą tych metod, jest co najmniej nielogiczne. W rozdziale *1.1. Cel pracy (...)* nie zamieszczono celu pracy. Ponad połowę pracy zajmuje jeden rozdział. Zbyt dużo miejsca zajmują informacje ogólnie znane, wręcz podręcznikowe.
2. Praca zyskałaby na wprowadzeniu „Spisu oznaczeń".
3. W „Spisie treści" zapomniano o „Dodatku".
4. Różnica naprężeń głównych nie może być utożsamiana z maksymalnymi naprężeniami obwodowymi (str. 94), a jedynie z maksymalnymi naprężeniami tnącymi.
5. Na stronie 105 przedstawiono błędną nazwę trzech obszarów na wykresie prędkości przyrostu szczeliny zmęczeniowej. Nie może tam np. występować „inicjacja szczeliny" gdyż szczelina już istnieje (w przeciwnym wypadku nie można wyznaczyć współczynników intensywności naprężeń).
6. W kryterium Novozilova nie wprowadza się małej, ekwiwalentnej szczeliny (str. 111), lecz uśrednia się naprężenia normalne na pewnym obszarze (zakłada się, że istniejące w tym obszarze mikropęknięcia powodują redystrybucję naprężeń).
7. Rysunki 3.13-3.15 są niejasne. Brakuje na nich części wykresów. Czy kąt θ na tych rysunkach nie powinien zmieniać się w przedziale $(-180^{o},180^{o})$?
8. Ani współczynnik T, ani tym bardziej jego wartość krytyczną T_{cr} (jaki ona ma sens?) nie są parametrami charakteryzującymi rodzaj propagacji szczeliny (stabilny lub niestabilny).

9. W jaki sposób wyznaczano parametry *C* oraz *n* występujące w równaniu (3.80)?
10. Kąt α na rys. 3.23 na pewno nie wynosi 43°.
11. W pracy występują błędy w nazewnictwie, np.: zamiast „nielokalne naprężeniowe kryterium kruchego pękania" jest „kryterium nielokalnego naprężeniowego kruchego pękania", zamiast, „dwuosiowy" jest „dwu-osiowy", zamiast „kształt elementu" jest „geometria elementu" itp. Autor zamiennie używa określeń: „sferyczne", „kołowe" oraz „okrągłe" dla przypadku „wtrącenia kołowego".
12. Niektóre opisy bibliograficzne publikacji są niepełne, brakuje np. ich tytułów. W pracy brakuje odniesienia do uznanych prac (także monografii) autorstwa M. Savruka (z zakresu metody osobliwych równań całkowych) i G. Mishurisa (zagadnienia szczeliny w pobliżu granicy dwóch ośrodków).

3. Podsumowanie

Na podstawie analizy rozprawy stwierdzam, iż Autor wykazał się szeroką wiedzą na temat matematycznego i numerycznego modelowania zagadnień mechaniki pękania. Doktorant w zasadzie osiągnął zamierzone cele: opracował nowy (choć może jeszcze niedoskonały) model obliczeniowy propagacji szczeliny w warunkach obciążeń zmęczeniowych. Wykorzystano w nim zaawansowane metody mechaniki, takie jak metoda osobliwych równań całkowych, czy też energetyczne kryteria mechaniki pękania. Uwagi krytyczne przedstawione w poprzednim punkcie recenzji, w dużej mierze dyskusyjne, wynikają przede wszystkim z wysokiego stopnia trudności podjętej problematyki. Mam nadzieję, że pomogą one Autorowi rozprawy w realizacji przyszłych badań naukowych.

Uważam, że pomimo uwag krytycznych, przedstawiona do recenzji praca spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim przez *Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach naukowych i tytule w zakresie sztuki* z dnia 14 marca 2003 r. i powinna być dopuszczona do publicznej obrony, a mgr inż. Krzysztof P. Mróz może ubiegać się o stopień *doktora nauk technicznych* w dyscyplinie *mechanika*.