

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 bimateryale: 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 pęknięcia 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. bimateryałach). Istnieje natomiast potrzeba optymalizacji elementów i całych konstrukcji, a także odpowiedniego doboru lub projektowania materiałów, pod kątem przyszłej ich trwałości, odporności na pęknięcie, 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 (bimateryałach 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 pęknięcia 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 pęknięcia, 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 nielocalne energetyczne kryterium pęknięcia w płaskich zagadnieniach liniowej mechaniki pęknięcia. 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 zmęczeniowej 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 bimateryale (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 – bimateryale, 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

