Prof. dr hab. Zenon Mróz
IPPT PAN
Warszawa, ul. Świętokrzyska 21

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Mroza

pt. „Propagacja szczeliny zmęczeniowej w bimateriale: model matematyczny i rozwiązanie numeryczne".

Celem niniejszej pracy jest analiza numeryczna wzrostu szczeliny w ośrodku sprężystym utworzonym z dwóch obszarów o różnych modułach sprężystych z liniową granicą rozdziału (interfejs). Rozpatrzono obciążenie monotoniczne oraz cykliczne, wywołujące wzrost szczeliny zmęczeniowej. Materiał pracy przedstawiono w dwóch rozdziałach oraz syntetycznie omówiono cel i zakres pracy w rozdziale wstępnym, zaś podsumowanie wyników w zakończeniu pracy. Obecnie omówię krótko treść pracy.

1. Treść pracy.

Rozdział 2 omawia założenia liniowej mechaniki pękania przedstawiając osobliwe pola naprężeń i odkształceń przy wierzchołku szczeliny. Do analizy przyjęto pierwszy człon rozwinięcia asymptotycznego określającego osobliwość naprężenia stopnia $r^{-\frac{1}{2}}$ oraz człon drugi określający pole jednorodne, tak zwane naprężenie T. Rozpatrzono wszystkie trzy mody obciążenia szczeliny i omówiono metody wyznaczania współczynnika intensywności naprężeń. Autor opracował szczegółowo metodę dyslokacji krawędziowych odwzorowujących otwarcie lub poślizg powierzchni szczeliny do wyznaczenia stanu naprężenia w jej otoczeniu. Prowadzi to do układu osobliwych równań całkowych typu Cauchy'ego, zaś numeryczną metodę ich rozwiązania przedstawiono wykorzystując wcześniejszą pracę Erdogana i Gupty, którzy zastosowali aproksymację Gaussa-Czebyszewa. Autor wyprowadził postacie równań osobliwych dla kilku przypadków występowania szczeliny w obecności inkluzji, prostoliniowego interfejsu, a także dla układu kilku szczelin. W szczególności rozpatrzono szczeliny w bimateriale przy różnych konfiguracjach w stosunku do płaszczyzny rozdziału faz. Wyznaczono współczynniki intensywności naprężeń oraz wartości naprężenia jednorodnego T. Dla kilku przypadków porównano wyniki uzyskane w pracy autora do wyników innych autorów w dostępnych w publikacjach, uzyskując dobrą zgodność. Opracowana metoda wyznaczania współczynnika intensywności naprężeń i wartości naprężenia T jest niewątpliwie wartościowa i stanowić może narzędzie do określenia trajektorii szczeliny przy zastosowaniu właściwego kryterium wzrostu pęknięcia. W rozdziale jednak nie przedstawiono analizy wpływu parametrów materiałowych i geometrycznych na wartości K_i i T dla wybranych przypadków. Analiza nie uwzględnia również wpływu brzegów obszaru, a w szczególności wpływu granicy rozdziału na wartości pól asymptotycznych.

Zagadnienie spękań krzywoliniowych stanowi również istotny problem, bowiem nie jest jasne jak asymptotyczny stan naprężenia i odkształcenia zależy od krzywizny szczeliny.
Rozdział 3 poświęcony jest opisowi wzrostu szczeliny zmęczeniowej w złożonym stanie naprężenia. Najpierw przedstawiono przegląd istniejących modeli określających kierunek wzrostu szczeliny przy występowaniu dwóch współczynników K_I i K_{II}, takich jak kryterium maksymalnego naprężenia obwodowego, jednostkowej energii odkształcenia, współczynnika uwalniania energii G, kryterium całki J, maksymalnego odkształcenia obwodowego, kryterium T określające maksimum energii objętościowej na brzegu obszaru sprężystego, naprężeniowe kryterium nielokalne określające płaszczyznę krytyczną, itd. Przydatność tych kryteriów do modelowania rozwoju szczeliny zmęczeniowej nie została w pełni potwierdzona, istnieje zatem potrzeba sformułowania nowych kryteriów. W dalszej części rozdziału przedstawiono kryterium M-K, rozkładając jednostkową energię sprężystą na część objętościową T_v i postaciową T_D. Z warunku $T_v = T_{vf} = \text{const}$ określono kontur $r = r(\theta)$ w otoczeniu szczeliny, na którym poszukuje się punktu odpowiadającego ekstremalnej wartości T_D (minimum), co określa kierunek wzrostu pęknięcia, $\theta = \theta_{pr}$. Podstawą przyjęcia tego rodzaju modelu jest założenie, że w obszarze $T_v \geq T_{vf}$ zachodzi rozwój uszkodzeń w postaci mikropęknięć wywołanych stanem hydrostatycznego rozciągania, zaś warunek $T_D = \min$ na konturze tego obszaru określa położenie elementu o najmniejszym wpływie relaksacji plastycznej. Oczywiście, tak sformułowane kryterium zachodzi jedynie dla dodatnich wartości naprężenia hydrostatycznego, zaś dla wartości ujemnych, należałoby sformułować nowe kryterium. Drugim ograniczeniem tego kryterium jest fakt, że nie określa ono płaszczyzny krytycznej wzrostu pęknięcia w trójwymiarowym stanie naprężenia, co wymaga określenia dwóch składowych jednostkowego wektora normalnego do płaszczyzny. W obecnej postaci kryterium to może być zastosowane jedynie do płaskiego stanu naprężenia lub odkształcenia.
W rozdziale trzecim sformułowano również kryterium wzrostu szczeliny zmęczeniowej w postaci równania (3.80), wyrażającego przyrost długości szczeliny na jeden cykl obciążenia w zależności od amplitudy energii postaciowej i odległości od końca szczeliny $T_D r$. Zastosowanie tego kryterium określa dostatecznie dokładnie zarówno trajektorię pęknięcia jak i przyrost długości w materiale jednorodnym dla stopu tytanu Ti-6 Al-4V. Weryfikacja kryterium (3.80) jest jednak uboga, gdyż dotyczy jednego materiału i jednego rodzaju obciążenia cyklicznego. Rozpatrzono również wzrost szczeliny zmęczeniowej w bimateriale i jej przejście przez powierzchnię rozdziału faz . Rozpatrzono kilka przypadków szczególnych, określając trajektorie propagacji w okolicy interfejsu, z możliwością przejścia pęknięcia do drugiego materiału lub propagacji równoległej do interfejsu. Przedstawione przykłady są interesujące, brak jest jednak bardziej podstawowej analizy tego problemu. Należy uwzględnić fakt, że pewne składowe naprężenia doznają skoku przy przejściu od fazy 1 do fazy 2, a zatem również energia postaciowa T_d i promień r określający strefę dekohezji doznają skoku. Nie sformułowano również kryterium propagacji wzdłuż interfejsu gdzie osobliwość stanu naprężenia opisuje się w klasie zmiennych zespolonych.