

MODELOWANIE NUMERYCZNE ROZWOJU DELAMINACJI W WARUNKACH OBCIĄŻEŃ CYKLICZNYCH

DANIEL SZELAĞ, PIOTR BAJURKO

Instytut Lotnictwa

PIOTR CZARNOCKI

Politechnika Warszawska

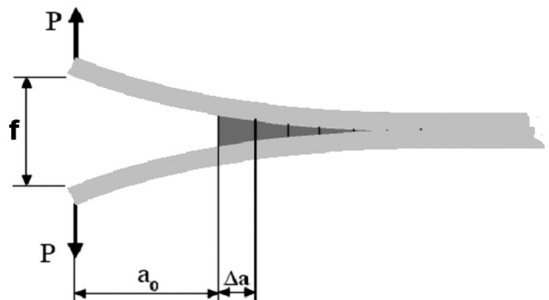
Streszczenie

Przedstawiono uproszczoną procedurę numerycznego symulowania rozwoju delaminacji z wykorzystaniem MES, w warunkach I sposobu pęknięcia, pod działaniem obciążenia cyklicznego. Uproszczenie polegało na ograniczeniu procesu degradacji zmęczeniowej materiału do jednego elementu, bezpośrednio sąsiadującego z czołem rozwarstwienia. Otrzymane wyniki w niewielkim stopniu odbiegały od wyników badań zmęczeniowych.

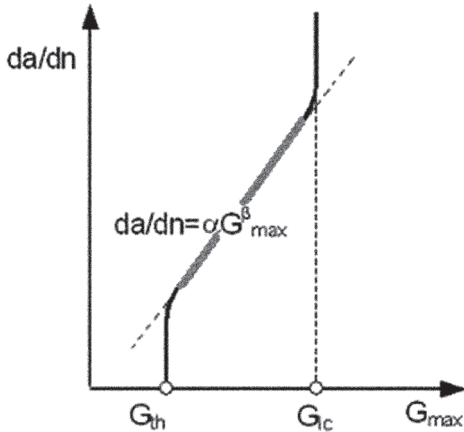
1. WSTĘP

Prezentowana praca miała na celu zbadanie możliwości symulowania rozwoju zmęczeniowego rozwarstwienia w laminatach polimerowych, w warunkach I sposobu pęknięcia. Przyjęto następującą procedurę postępowania: na podstawie zależności typu Parisa-Erdogena (9), uzyskanej w wyniku wcześniejszej działalności Zespołu, wykorzystując MES, wykonano symulację rozwoju rozwarstwienia w strukturze typu DCB (rys. 1). Umożliwiło to uzyskanie obliczeniowej zależności długości rozwarstwienia od liczby cykli obciążenia $a(n)$. By ocenić jakość modelu numerycznego i przeprowadzonej symulacji, tę obliczeniową zależność porównano z odpowiadającą jej zależnością doświadczalną, na podstawie której zostało wyznaczone równanie (9), wykorzystane w procesie symulacji.

Rys. 1. Analizowana struktura



Równanie Parisa-Erdogena w jego oryginalnej postaci przedstawia zależność (1). Ponieważ dane doświadczalne charakteryzowały odporność na rozwarstwienia badanej struktury za pomocą współczynnika uwalniania energii, dokonując kilka elementarnych przekształceń (2)-(4) doprowadzono równanie (1) do alternatywnej postaci (5), odpowiedniej dla posiadanych danych materiałowych.



Rys. 2. Równanie typu Parisa-Erdogena reprezentuje liniową część wykresu $da/dn(G_{max})$

Równanie Parisa-Erdogena w swej klasycznej postaci (1), reprezentuje zależność między przyrostem rozwarstwienia spowodowanym jednym cyklem obciążenia, wyrażonym jako (da/dn) a zmianą wartości współczynnika intensywności naprężenia $\Delta K = K_{max} - K_{min}$, odpowiadającą temu cyklowi.

$$\frac{da}{dn} = \varphi(\Delta K)^\psi \quad (1)$$

Wprowadzając współczynnik asymetrii cyklu R zdefiniowany jako stosunek naprężenia minimalnego do maksymalnego w danym cyklu, można łatwo wykazać, iż zachodzi zależność (2)

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{K_{min}}{K_{max}} = \sqrt{\frac{G_{min}}{G_{max}}} \quad (2)$$

Dla konfiguracji próby typu DCB (rys. 1), wartość współczynnika uwalniania energii ma postać

$$G = \xi \delta^2 \quad (3)$$

gdzie ξ jest parametrem o stałej wartości dla rozpatrywanej struktury, charakteryzującym jej sztywność. Podstawienie zależności (3) do (2) daje:

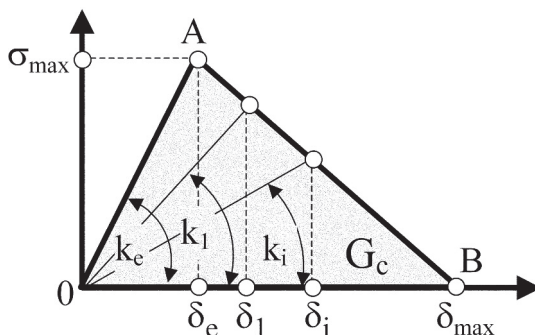
$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{K_{min}}{K_{max}} = \sqrt{\frac{G_{min}}{G_{max}}} = \frac{\delta_{min}}{\delta_{max}} \quad (4)$$

Posiłkując się zależnością (2), można równanie (1) przedstawić w alternatywnej postaci (5), wykorzystanej w przedstawionej pracy:

$$\frac{da}{dn} = \varphi(K_{max} - RK_{max})^\psi = \varphi(1-R)^\psi K_{max}^\psi = \varphi(1-R) \left(\sqrt{G_{max} E} \right)^\psi = \alpha G_{max}^\beta \quad (5)$$

gdzie

$$\alpha = \varphi(1 - R)^\psi E^{\frac{\psi}{2}} \quad \text{oraz} \quad \beta = \frac{\psi}{2} \quad (6)$$



Rys. 3. Charakterystyka naprężeniowo-przemieszczeniowa bi-liniowego elementu kohezyjnego

Do symulacji rozwoju delaminacji został użyty tzw. element kohezyjny, którego właściwości mechaniczne wyjaśnia szkic na rysunku 3. (W przypadku procedury przedstawionej w tej pracy, ten typ elementu nie jest konieczne, został jednak zastosowany ze względu na przewidywane udoskonalenie modelu). Pole trójkąta 0AB reprezentuje wartość krytyczną współczynnika uwalniania energii G_c , δ separację powierzchni powstającej delaminacji (pęknięcia) natomiast σ towarzyszące temu naprężenia, przeciwstawiające się powstawaniu rozwarstwienia. Element kohezyjny ulega „zniszczeniu” gdy separacja powierzchni rozwarstwienia $\delta > \delta_{max}$. W modelu numerycznym elementy kohezyjne są rozmieszczone na powierzchni spodziewanego rozwarstwienia, między elementami bryłowymi reprezentującymi laminat. Wymiar liniowy elementu kohezyjnego jest równy długości a boku elementu bryłowego, na którym jest rozpoczyna, tak więc zniszczenie elementu kohezyjnego odpowiada przyrostowi pęknięcia o długości Δa .

2. PROCEDURA SYMULACJI

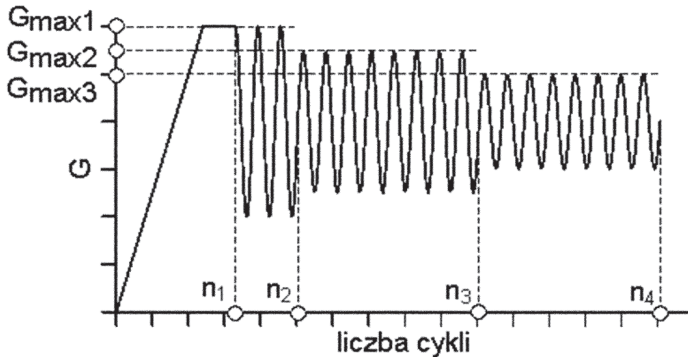
Przyjęto założenie, iż strefa degradacji właściwości mechanicznych materiału, spowodowanego cyklicznymi zmianami obciążenia jest ograniczona do obszaru jednego elementu kohezyjnego. Istnieje szereg pozycji literaturowych np. [1,2] w których zaprezentowane są procedury umożliwiające rozszerzenie procesu degradacji właściwości mechanicznych materiału na większy obszar, na tzw. „strefę kohezyjną”. Wiąże się to jednak ze stosunkowo skomplikowanym algorytmem obliczeń, natomiast wykorzystany w pracy sposób modelowania znacznie go upraszcza. Symulację przeprowadzano w warunkach kontrolowanego przemieszczenia. Maksymalna wartość f_{max} była tak dobrana, by był spełniony warunek (7)

$$f_{max} = \sqrt{0.9} f_c \quad (7)$$

gdzie f_c jest przemieszczeniem odpowiadającym wartości krytycznej G_c współczynnika uwalniania energii.

Następnie, dla pary odpowiadających sobie wartości $f_{max} - P$ wyznaczano wartość współczynnika uwalniania energii z zależności (8)

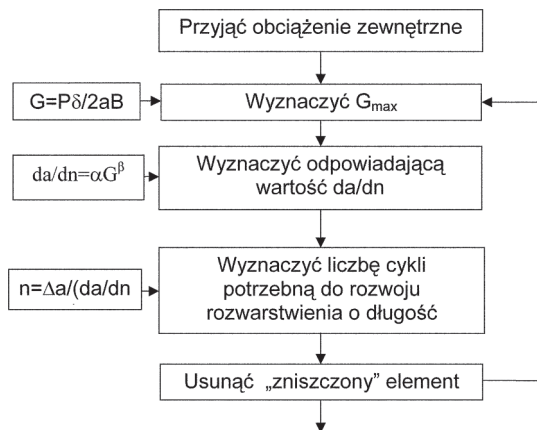
$$G_{max} = \frac{P f_{max}}{2aB} \quad (8)$$



Rys. 4. Schematyczna reprezentacja zmian wartości G_{max} powodowana eliminacją kolejnych elementów kohezyjnych: pierwszy element eliminowany po n_2 cyklach, drugi po n_3 itd.

Na wykresie na rysunku 4 odpowiada to odcinkowi poziomemu. Na podstawie wyznaczonej z zależności (8) wartości G_{max} , posługując się formułą (9), stanowiącą eksperymentalnie uzyskaną zależność typu Parisa-Erdogena, wyznaczano prędkość rozwoju rozwarstwienia.

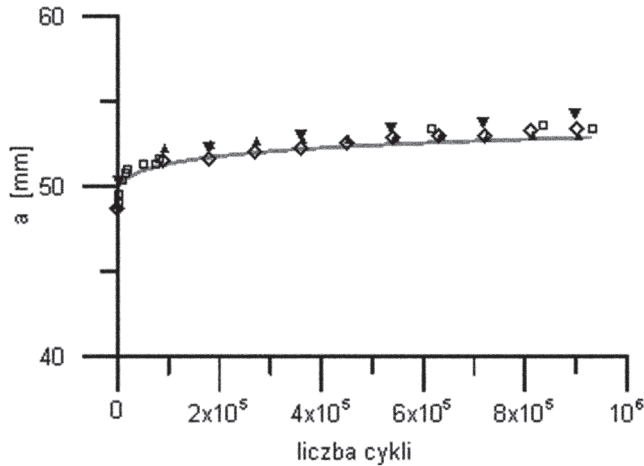
$$\frac{da}{dn} = 10^{7.475} G_{max}^{17.553} \quad (9)$$



Rys. 5. Uproszczona procedura symulacji zmęczeniowego rozwoju rozwarstwienia

WYNIKI

Wyniki przeprowadzonej symulacji rozwoju delaminacji oraz porównanie ich z wynikami doświadczalnymi przedstawiono na rysunku 6. Oznaczenia reprezentują rezultaty badań doświadczalnych, pochodzących z czterech próbek. Ciągła linia czerwona reprezentuje wynik symulacji numerycznej. Widać, iż mimo zastosowanego uproszczenia, polegającego na ograniczeniu degradacji zmęczeniowej materiału do obszaru jednego elementu, różnica między wynikami jest niewielka. Można wysunąć stwierdzenie, że wyniki symulacji numerycznej mieszczą się w polu rozrzutu wyników eksperymentalnych. Na zakończenie należy zaznaczyć, iż posłkowanie się zależnością Parisa-Erdogena do symulowania rozwoju delaminacji nie jest jedynym sposobem postępowania. Alternatywny sposób powiązania przyrostu delaminacji z liczbą cykli obciążenia został przedstawiony np. w (3).



Rys. 6. Wykres przedstawia zależności $a(n)$: linia ciągła reprezentuje wyniki otrzymane na drodze symulacji numerycznej, oznaczenia reprezentują wyniki eksperymentalne

Pracę wykonano w ramach projektu POIG „Opracowanie technologii badań odporności na uszkodzenia lotniczych i kosmicznych kompozytowych struktur nośnych – TEBUK” realizowanego w ramach Priorytetu 1, Działania 1.1, Poddziałania 1.1.2.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Turon A., Costa J., Camanho P.P., Da´vila C.G, “Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue”, Composites: Part A 38 (2007), s. 2270–2282.
- [2] Harper P.W., Hallett S.R., “A fatigue degradation law for cohesive interface elements – Development and application to composite materials”, International Journal of Fatigue, Vol.32, I.11, 2010, s.1774–1787.
- [3] Roe K.L., Siegmund T., An irreversible cohesive zone model for interface fatigue crack growth simulation, Engineering Fracture Mechanics, 70, 2003, s. 209–232.

DANIEL SZELAŁ, PIOTR BAJURKO, PIOTR CZARNOCKI

NUMERICAL SIMULATION OF DELAMINATION GROWTH DUE TO CYCLIC LOADING

Abstract

Simplified procedure taking advantage of FEM for simulation of delamination growth due to Mode I cycling loading is presented. The simplification consisted in restricting effect of fatigue load to one element that was next to the dealmination front only. The discrepancy between the numerical and experimental results was not significant.