# Mezoskalowy model MES do analizy delaminacji kompozytu

Mesoscale FEM model for the analysis of composite delamination

## JERZY MARSZAŁEK JACEK STADNICKI\*

Artykuł podejmuje problem modelowania delaminacji próbek kompozytu warstwowego według pierwszego schematu zniszczenia. Obejmuje część doświadczalną, w której wyznaczono uśrednioną charakterystykę rozwarstwiania próbek w układzie rozwarcie–siła rozrywająca oraz opis mezoskalowego modelu MES kompozytu, uwzględniającego jego strukturę wewnętrzną. Model zastosowano w symulacji rozwarstwiania, przy czym rozwój pęknięcia następował wskutek modyfikacji elementów skończonych modelujących osnowę. Wyniki symulacji rozwarstwiania z użyciem opracowanego modelu MES wykazały dobrą zgodność z wynikami eksperymentu.

SŁOWA KLUCZOWE: modelowanie komputerowe, kompozyt warstwowy, badania doświadczalne, analiza MES, struktura wewnętrzna kompozytu

The article discusses the problem of delamination of layered composite samples according to the mode I (tensile opening mode). It includes the experimental part, which sets the averaged characteristics of delamination of the samples in the relation tensile opening–tensile force as well as the description of mesoscale FEM model of composite, which takes into account its internal structure. The model was used in the simulation of delamination, while the development of the fracture **took place in consequence of modifications of finite elements** modelling the matrix. The results of the delamination simulation with the use of the developed FEM model were consistent with the results of the experiment.

KEYWORDS: computer modelling, layered composite, experimental studies, FEM analysis, internal structure of the composite

Polimerowe materiały kompozytowe o strukturze warstwowej (laminaty) charakteryzują się: dużą wytrzymałością mechaniczną przy niewielkim ciężarze własnym, odpornością na korozję oraz zadowalającą stabilnością termiczną. Ze względu na te właściwości znajdują zastosowanie jako materiały konstrukcyjne w wielu dziedzinach, m.in. w technice lotniczej i motoryzacyjnej oraz w produkcji części maszyn i kadłubów łodzi. Makroskopowe zachowanie się laminatu zależy przede wszystkim od liczby i orientacji warstw oraz materiału komponentów. Kompozyt warstwowy ma największą wytrzymałość na rozciąganie w kierunku zgodnym z ułożeniem warstw wzmocnienia, natomiast w poprzek jest mniej wytrzymały.

Najczęstszą formą uszkodzenia takiego kompozytu jest rozwarstwienie (delaminacja), które polega na przerwaniu spójności osnowy między warstwami wzmocnienia. Kryterium delaminacji może być przekroczenie granicznej wartości odkształcenia lub granicznego naprężenia w osnowie. Do symulacji takiego procesu z powodzeniem wykorzystuje się metodę elementów skończonych. Z uwagi na anizotropowość kompozytów wymagane jest przyDOI: https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.7.83

gotowanie modelu dyskretnego z prawidłowo określonymi stałymi inżynierskimi. Ponieważ model MES kompozytu powinien być wystarczająco efektywny numerycznie, do symulowania delaminacji zaproponowano model, w którym najmniejszym powtarzalnym elementem struktury jest tzw. komórka elementarna. Uwzględniając liczbę elementów skończonych wchodzących w skład modelu, można go nazwać mezoskalowym [1, 2].

# Doświadczalne rozwarstwianie kompozytu według pierwszego schematu zniszczenia

Pierwszy schemat zniszczenia jest stosowany w celu wyznaczenia odporności kompozytu na przerwanie spójności między warstwami wskutek przekroczenia dopuszczalnej wartości naprężenia normalnego w osnowie. Badania mogą być wykonane metodą DCB (double cantilever beam test), dokładnie opisaną w normie ASTM D5528 lub np. w [3]. Rozwarstwienie kompozytu jest realizowane w teście rozciągania prostopadłościennych próbek o wymiarach  $L \times B \times 2h$  (rys. 1). Ze względu na specyficzny sposób prowadzenia badań należało przykleić do próbek stalowe kostki o wymiarach 10 × 10 × 20 mm z przelotowymi otworami Ø5 mm, do których wprowadzono sworznie łączące z uchwytami maszyny wytrzymałościowej. Każdą próbkę wykonano z 16 warstw tkaniny o splocie płóciennym z tasiemek z włókna węglowego i żywicy epoksydowej. Warstwy tkaniny w kompozycie były ułożone w taki sposób, że tasiemki wzmocnienia biegły równolegle do krawędzi próbki. Podczas wytwarzania próbek między warstwami wzmocnienia sąsiadującymi z płaszczyzną symetrii próbki (xy-rys. 1) umieszczono cienką folię, która nie dopuściła do ich trwałego połączenia. Pozwoliło to odseparować folią część górną próbki od dolnej na odcinku o długości  $a_0$  i tym samym zainicjować wstępne rozwarstwienie. Analiza wagowa dziesięciu próbek wykazała, że tkanina z włókna weglowego stanowiła 58,5 ±0,6% masy kompozytu. Badania rozwarstwiania wykonano na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej Inspekt Table Blue 5. Podczas badań prędkość przesuwu trawersy maszyny wytrzymałościowej ustawiono na 0,5 mm/min. Wielkością zadawaną było rozwarcie próbki  $\delta$ , a mierzoną – wartość siły P (rys. 1). Badania powtórzono dla 15 próbek kompozytu.



Rys. 1. Wymiary próbki kompozytu i parametry testu rozrywania

<sup>\*</sup> Mgr inż. Jerzy Marszałek (jmarszalek@ath.bielsko.pl), prof. dr hab. inż. Jacek Stadnicki (jstadnicki@ath.bielsko.pl) – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

Na podstawie protokołów pomiarowych wyznaczono charakterystykę rozwarstwiania  $P(\delta)$  każdej próbki – trzy przykładowe charakterystyki przedstawiono na rys. 2a. W każdym przypadku na charakterystyce można wyróżnić dwie fazy. Faza I przedstawia część liniową, w której wstępnie zainicjowane rozwarstwienie nie powiększa się, a próbka gromadzi energię potencjalną odkształcenia sprężystego. W fazie II od końca rozwarstwienia wstępnego zaczyna propagować pęknięcie, przy czym rozwarcie  $\delta$ zmienia się skokami w funkcji siły P, a między skokowymi zmianami rozwarcia zależność  $P(\delta)$  jest liniowa. Charakterystyki poszczególnych próbek różnią się, aczkolwiek zachowują wyraźne podobieństwo co do charakteru przebiegu. Zaistniałe rozbieżności mogą być spowodowane losowym rozmieszczeniem wad struktury lub różnym wypełnieniem żywicą w rozrywanej warstwie. W porównaniu z wynikami badań zrealizowanych w ramach pracy [4] otrzymano lepszą zgodność charakterystyk rozwarstwiania, ponieważ w trakcie przygotowywania próbek zwrócono uwagę na dokładność wykonania i przyklejenia stalowych kostek pełniących funkcję uchwytów. Istotne jest, aby osie otworów przelotowych w kostkach stalowych przyklejonych do próbek były równoległe do frontu szczeliny. Niespełnienie tego warunku prowadzi do skośnego ustawienia próbki, przez co naprężenia normalne przed frontem szczeliny rozkładają się nierównomiernie i zaburzają proces rozwarstwiania. Na podstawie 15 charakterystyk sporządzono uśredniony wykres sztywności dla zakresu liniowego (rys. 2b). Po przekroczeniu siły krytycznej P<sub>MAX</sub>, co odpowiada punktowi MAX na charakterystyce, rozpoczyna się delaminacja i następuje spadek siły P do punktu A. Na wykresie dla punktu MAX podano wartość siły  $P_{\text{MAX}}$  oraz rozwarcia  $\delta_{\text{MAX}}$  wraz z przedziałami ufności dla poziomu istotności 0,05 według testu t-Studenta.



Rys. 2. Charakterystyki rozwarstwiania: a) dla trzech próbek, b) uśredniona dla wszystkich próbek w zakresie liniowym

### Mezoskalowy model MES kompozytu

Symulacja rozwarstwiania próbki kompozytu została zrealizowana z wykorzystaniem MES. W tym celu opracowano model mezoskalowy, który odwzorowywał strukturę wewnętrzną kompozytu i uwzględniał udziały objętościowe komponentów, a jednocześnie zachowywał rozdzielność faz wzmocnienia i osnowy. Budowę modelu rozpoczęto od określenia wielokrotnie powielanej w tkaninie struktury, tzw. komórki elementarnej (rys. 3a). Tkaninę ze splotem płóciennym z tasiemek sprowadzono do płaszczyzny, przez co zamodelowanie pojedynczej komórki wymagało zastosowania czterech węzłów usytuowanych w miejscach przeplotu tasiemek. Strukturę kompozytu odwzorowano elementami skończonymi typu belkowego 1D Beam i powierzchniowego 2D Shell (rys. 3b). Tasiemki między węzłami oraz żywicę łączącą warstwy tkaniny zamodelowano elementami belkowymi. Dwuwymiarowe elementy skończone zastosowano w celu uwzględnienia



Rys. 3. Komórka elementarna kompozytu: *a*) zaznaczona na tkaninie, *b*) w formie modelu MES

w modelu żywicy wypełniającej przestrzeń między tasiemkami wzmocnienia komórki elementarnej.

Jednym z powszechnie stosowanych sposobów modelowania procesu rozwarstwiania jest zastosowanie w modelu strefy kohezyjnej. Polega to na wprowadzeniu miedzy warstwy modelu dyskretnego specjalnych elementów skończonych (kohezyjnych), których właściwości umożliwiają modelowanie inicjacji i dalszej propagacji pęknięcia. W zależności od schematu rozwarstwiania zastosowanie elementu kohezyjnego wymaga zdefiniowania zależności pomiędzy naprężeniami a względnymi przemieszczeniami. Dlatego elementy kohezyjne mogą mieć różne charakterystyki, spośród których najczęściej stosuje się dwuliniową. W fazie I naprężenie w elemencie kohezyjnym rośnie liniowo w funkcji przemieszczenia węzłów do osiągnięcia wartości progowej, a następnie w fazie II nachylenie charakterystyki zmienia się tak, że naprężenie w elemencie maleje w funkcji przemieszczenia węzłów. Faza II odpowiada osłabieniu materiału. Rozdzielenie dwóch sąsiednich warstw następuje wtedy, gdy naprężenie w elemencie kohezyjnym przyjmuje wartość zerową (faza separacji). W konsekwencji rozwarstwienie powoduje całkowitą utratę sztywności elementów kohezyjnych.

Podobny schemat zastosowano w modelu mezoskalowym. Rozwój pęknięcia zapewniono przez zmianę wartości parametrów decydujących o sztywności rozciąganych elementów belkowych modelujących żywicę w strefie pękania (zmieniano pole przekroju poprzecznego lub moduł sprężystości podłużnej). Takie założenie wymagało opracowania odpowiedniego algorytmu sterującego symulacją rozwarstwiania modelu MES kompozytu. Algorytm wykrywał elementy belkowe modelujące żywicę między warstwami wzmocnienia, w których przekroczone było kryterium progowej wartości odkształcenia  $\varepsilon_k$ , i modyfikował (znacznie zmniejszał) ich sztywność. Modyfikacja polegała na tym, że dla elementu belkowego rozpiętego między węzłami *i* oraz *j* (rys. 4), dla którego  $\varepsilon > \varepsilon_k$  przekrój (lub moduł sprężystości podłużnej) przyjmował bardzo małą wartość w stosunku do wartości początkowej.



Rys. 4. Schemat rozwarstwiania modelu mezoskalowego

Progową wartość odkształcenia  $\varepsilon_k$  wyznaczono na podstawie symulacji modelu MES próbki kompozytu, która polegała na odtworzeniu eksperymentu. Dla rozwarstwienia odpowiadającego punktowi MAX uśrednionej charakterystyki doświadczalnej (rys. 2*b*) odczytano wartość odkształcenia  $\varepsilon_k$  w elementach belkowych modelujących żywicę między warstwami wzmocnienia przed frontem szczeliny.

#### Symulacja procesu rozwarstwiania

W celu zautomatyzowania tworzenia modeli MES płaskich próbek kompozytowych opracowano specjalny program w języku poleceń APDL, będącym wewnętrznym językiem systemu Ansys. Program pełni funkcję generatora węzłów i elementów skończonych według definicji komórki elementarnej (rys. 3b). Zaletą programu jest możliwość generowania modeli o zmiennej grubości, liczbie i orientacji warstw. Położenia węzłów modelu wynikały z wymiarów próbek i położenia punktów krzyżowania się tasiemek wzmocnienia. Parametry przekrojowe elementów 1D Beam188 oraz grubość elementów 2D Shell63 komórki elementarnej wyznaczono na podstawie jej wymiarów, odległości warstw w kompozycie oraz udziałów wagowych (objętościowych) komponentów w kompozycie. Model składał się z 16 warstw. Zgodnie z rys. 1 na długości  $a_0$  = 50 mm usunięto pionowe elementy belkowe modelujące żywicę między środkowymi warstwami w celu odtworzenia wstępnego rozwarstwienia. Obliczenia MES zrealizowano z zachowaniem warunków brzegowych obowiązujących w badaniach doświadczalnych. Utworzono więc dwa dodatkowe węzły w połowie szerokości modelu, których położenie odpowiadało osiom otworów stalowych kostek przyklejonych do próbek (rys. 5). Węzły te połączono elementami sztywnymi typu MPC184 z węzłami znajdującymi się na dolnej i górnej powierzchni modelu. Powierzchnie te odpowiadały miejscom przyklejenia kostek do próbki. W pierwszym węźle pozostawiono tylko jeden stopnień swobody, aby umożliwić obrót względem osi otworu kostki. W drugim węźle pozostawiono możliwość przesunięcia w kierunku odpowiadającym kierunkowi przemieszczania się trawersy maszyny wytrzymałościowej oraz obrót względem osi otworu.



Rys. 5. Odkształcony model dyskretny próbki kompozytu ze wstępnym rozwarstwieniem

Na podstawie kart technologicznych przyjęto stałe materiałowe komponentów: moduł sprężystości podłużnej tasiemek z włókna węglowego  $E_c = 105$  GPa i żywicy epoksydowej  $E_z = 3,4$  GPa, współczynnik Poissona tasiemek  $v_c = 0,1$  i żywicy  $v_z = 0,35$ . W trakcie symulacji z zadanym krokiem  $\Delta \delta$  w każdej iteracji był sprawdzany warunek selekcji i modyfikacji przekroju elementów belkowych modelujących żywicę między warstwami.

#### Wyniki analizy

Na podstawie przeprowadzonej symulacji rozwarstwiania modelu MES próbki kompozytu otrzymano wykres w układzie siła-przemieszczenie węzła wyznaczającego miejsce połączenia próbki z uchwytem trawersy maszyny wytrzymałościowej. Charakterystykę obliczeniową porównano z wynikami badań doświadczalnych dla wybranych trzech próbek kompozytu (rys. 6). Uzyskano bardzo dobrą zgodność (współczynnik korelacji wzajemnej charakterystyk w zakresie liniowym  $R^2 = 0,99$ ). Propagacja pęknięcia w modelu przebiegała skokami, podobnie jak w próbkach podczas eksperymentu, przy czym odstępy między kolejnymi skokami były równe. Uzyskany sposób rozwarstwiania wynikał z regularnej budowy modelu. Ponadto model nie uwzględniał czynników o charakterze stochastycznym, np. lokalnych mikrodefektów struktury w próbkach kompozytu.



Rys. 6. Porównanie charakterystyk doświadczalnych i obliczeniowej

#### Podsumowanie

W artykule przedstawiono autorski mezoskalowy model MES próbki kompozytu warstwowego wzmocnionego tkaniną o splocie płóciennym z tasiemek z włókna węglowego, opracowany w celu przeprowadzenia symulacji zjawiska delaminacji kompozytu według pierwszego schematu zniszczenia. Model i procedura modyfikowania sztywności (przekroju) elementów belkowych modelujących połączenie żywicą warstw wzmocnienia eliminują potrzebę tworzenia strefy kohezyjnej, którą zwykle stosuje się do modelowania pękania. Modele dyskretne z elementami kohezyjnymi umożliwiają analizę rozwoju pęknięcia wyłącznie w miejscach, w których zdefiniowano strefę kohezyjną. W zaproponowanym modelu mezoskalowym - z uwagi na jego strukturę - przerwanie spójności kompozytu po spełnieniu odpowiedniego kryterium może nastąpić w dowolnym miejscu, a więc nie trzeba znać lokalizacji potencjalnych miejsc pękania. Istotną zaletą opracowanego modelu, uwzględniającego strukturę wewnętrzną na poziomie komponentów oraz odrębność ich faz, jest również możliwość analizowania wytrzymałości kompozytu z uwagi na pękanie żywicy lub zerwanie tasiemek tkaniny wzmocnienia, co z kolei nie jest możliwe w przypadku jednofazowych modeli MES z tzw. elementów kanapkowych, przeznaczonych do modelowania kompozytów dostępnych w preprocesorach MES. Ponadto można określić nośność części z kompozytu, które zostały osłabione pęknięciami, lecz nie uległy całkowicie zniszczeniu i mogą być dalej eksploatowane pod mniejszym obciążeniem.

#### LITERATURA

- Marszałek J., Stadnicki J. "Walidacja doświadczalna modelu MES kompozytu warstwowego wzmocnionego tkaniną". *Inżynier XXI wieku*. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, 2016, s. 707–718.
- Stadnicki J., Tokarz Z. "Mesoscale finite element model for calculating deformations of laminate composite constructions". Advances in Mechanical Engineering. 8, 2 (2016): s. 1–9.
- Carlsson L.A., Adams D.F., Pipes R.B. "Experimental characterization of advanced composite materials". Fourth edition. Boca Raton: CRC Press – Taylor & Francis Group, 2014.
- Stadnicki J., Marszałek J. "Doświadczalne badanie delaminacji kompozytu warstwowego według I I II schematu pękania". *Mechanik.* 7 (2016): s. 818–819.