

# XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

# TKI2024

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

### Wyznaczanie współczynnika uwalniania energii w kompozytach laminatowych metodą CBBM

Jakub Paśnik<sup>1</sup>, Patryk Różyło<sup>1</sup>, Sylwester Samborski<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Mechatroniki, Politechnika Lubelska

<sup>2</sup>Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Politechnika Lubelska

email: j.pasnik@pollub.pl, p.rozylo@pollub.pl, s.samborski@pollub.pl

**STRESZCZENIE:** Rozwarstwienie w kompozytach laminatowych jest bardzo często występującym typem uszkodzenia. Jednym z parametrów charakteryzujących ten typ uszkodzenia jest współczynnik uwalniania energii. Istnieje wiele metod wyznaczania tego współczynnika. Większość z nich opiera się na pomiarze długości szczeliny. W niniejszym opracowaniu wykorzystano zaproponowany przez de Moura koncept tzw. zastępczej długości szczeliny (z ang. crack equivalent concept). Metoda ta polega na rejestracji siły oraz przemieszczenia obciążanej próbki w celu wyznaczenia jej podatności, a następnie zastępczej długości szczeliny. Jak dotąd analizy laminatów z wykorzystaniem tego podejścia realizowane były głównie dla kompozytów o prostych układach. Poniżej przedstawiono symulacje oraz wyniki dla belek laminatowych z układami sprzężonymi giętno-błonowymi i giętno-skrętnymi w modzie I. Symulacje przeprowadzono w środowisku obliczeniowym z użyciem metody elementów skończonych Abaqus ver. 2020. Rezultaty analiz w postaci krzywych R dla belek sprzężonych porównano z wynikami dla układów prostych. Wykorzystano również dwa podejścia do modelowania połączenia laminatów – VCCT (z ang. virtual crack closure technique) oraz model strefy przyczepności (z ang. cohesive zone model, CZM).

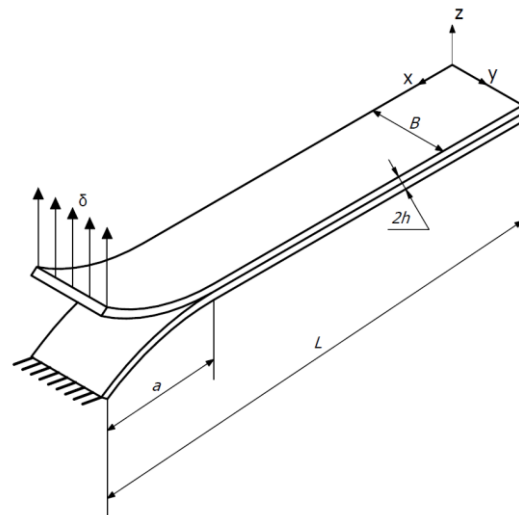
**SŁOWA KLUCZOWE:** kompozyty, laminaty, metoda elementów skończonych, SERR, CBBM

#### 1. Wprowadzenie

Kompozyty laminatowe są obecnie niezwykle popularnymi materiałami wykorzystywanymi w wielu gałęziach przemysłu, m.in. w lotnictwie, astronautyce, medycynie czy motoryzacji. Szerokie zastosowanie tych materiałów wynika z ich, niespotykanych w tradycyjnych materiałach, właściwości, tj. przede wszystkim wysokiej wytrzymałości przy niskiej masie własnej [1]. Duża popularność tych materiałów niesie za sobą konieczność dogłębnego badania i analizowania materiałów kompozytowych, zarówno pod względem wytrzymałości jak i odporności na uszkodzenie. Właściwości wytrzymałościowe kompozytów laminatowych są już dobrze znane, ponieważ badania w kierunku ich wyznaczenia prowadzone są już od kilku dekad, natomiast odporność na uszkodzenie, szczególnie odporność na rozwarstwienie, jest nadal zagadnieniem rozpatrywanym w środowisku naukowym i nie do końca poznany. Rezultatem tego jest ciągła potrzeba analiz i badań kompozytów. Z uwagi na duże zapotrzebowanie na opracowania dotyczące uszkodzeń w kompozytach zbrojonych długimi włóknami niniejsze opracowanie dotyczy analiz odporności belek laminatowych na rozwarstwienie w I modzie obciążenia. Symulacje przeprowadzono w oparciu o metodę elementów skończonych w programie Abaqus ver. 2020. Wykorzystano dwa podejścia do modelowania zjawiska delaminacji: metodę wirtualnego zamknięcia szczeliny (z ang. VCCT) oraz metodę opartą o model strefy przyczepności (z ang. CZM).

#### 2. Przedmiot i zakres pracy

Model numeryczny próbki wykonano w oparciu o znormalizowaną próbkę do badań w I schemacie obciążenia (ASTM D5528-01) w próbie Double Cantilever Beam (DCB). Schematycznie próbkę przedstawia rysunek 1.



Rysunek 1. Belka w próbie DCB

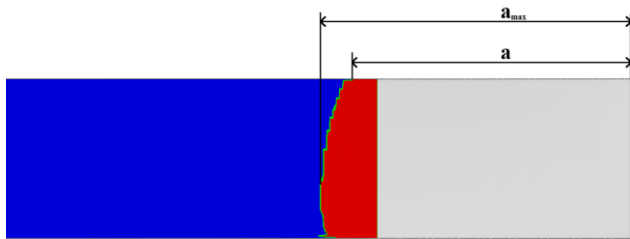
Belka składała się z dwóch sublaminatów połączonych ze sobą z wprowadzonym wstępnym rozwarstwieniem na długości  $a_0=40$  mm. Całkowita długość próbki wynosiła  $L=150$  mm, szerokość  $B=25$  mm, natomiast grubość, oznaczona jako  $2h$  zależała od ilości przyjętych warstw, przy czym grubość pojedynczej warstwy to 0,15 mm. Stałe

materiałowe zostały wyznaczone przez autorów w ramach pracy w projekcie finansowanym ze środków Narodowego Centrum Nauki i zostały zaprezentowane w tabeli 1.

Tabela 1. Stałe materiałowe

$E_1$ [GPa]	$E_2$ [GPa]	$\nu_{12}$ [-]	$G_{12} = G_{13}$ [GPa]
112,105	7,421	0,27	3,338
$G_{IC}$ [N/mm]	$G_{IIC}$ [N/mm]	$G_{IIIc}$ [N/mm]	$\eta$ [-]
0,4	1,3	1,3	1,62

Klasyczne metody wyznaczania wartości współczynnika uwalniania energii, takie jak np. Modified Beam Theory (MBT), Compliance Calibration Method (CCM) czy Modified Compliance Calibration (MCC) wymagają pomiaru długości szczeliny w trakcie przeprowadzania symulacji. W próbkach o układach prostych nie stanowi to dużego wyzwania, natomiast dla układów ze sprzężeniami mechanicznymi czoło szczeliny może być zakrzywione [2], co wprowadza pewnego rodzaju niejednoznaczności co do sposobu pomiaru długości szczeliny (Rysunek 2)

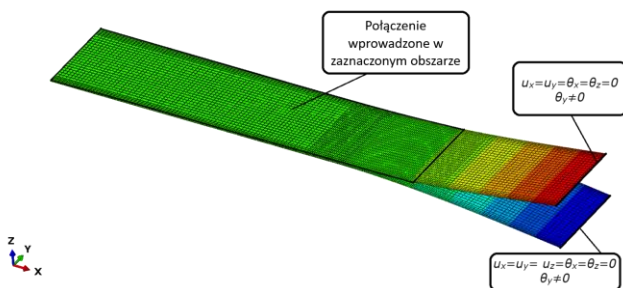


Rysunek 2. Długość szczeliny dla próbki sprzężonej

Dlatego też, w celu wyznaczenia wartości współczynnika uwalniania energii wykorzystano nowatorskie podejście niewymagające pomiaru długości szczeliny oparte o wprowadzony przez de Moura koncept tzw. zastępczej długości szczeliny [3].

### 3. Modelowanie numeryczne

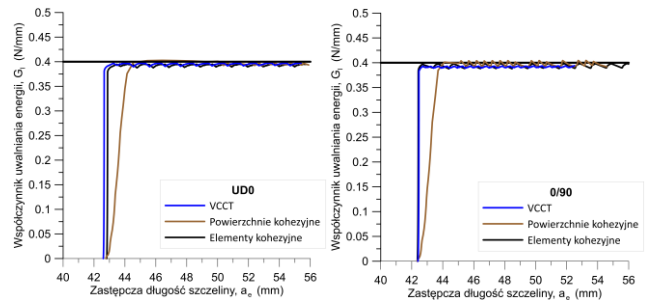
W przeprowadzonych symulacjach wykorzystano dwa podejścia do modelowania połączenia pomiędzy odnogami: opierające się na metodzie wirtualnego zamknięcia szczeliny (z ang. VCCT) oraz drugie wykorzystujące model strefy przyczepności Dugdale i Barenblatta. Model dyskretny analizowanej belki przedstawiono na rysunku 3.



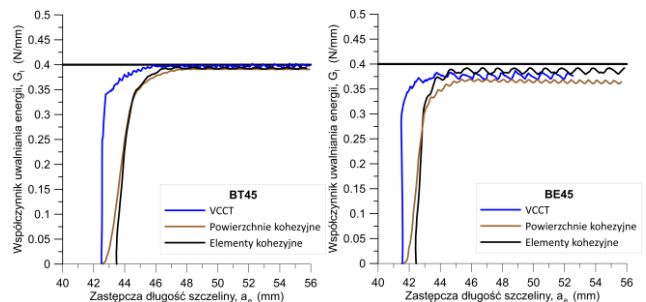
Rysunek 3. Model numeryczny belki w próbie DCB

### 4. Uzyskane wyniki

Wyniki przeprowadzonych analiz przedstawiono w formie krzywych R. Rysunek 4 prezentuje krzywe dla układów prostych: układ UD oznacza wszystkie włókna ułożone w jednym kierunku, 9 warstw w jednej odnodze, układ 0/90 to włókna ułożone naprzemiennie w kierunku wzdłuż długiej krawędzi próbki i prostopadłe do niej, ilość warstw po 9 w sublaminacie. Na rysunku 5 pokazano krzywe dla układów sprzężonych: giętno-skrętnych (z ang. bending-twisting, BT) o następującym układzie włókien: [45/0/45/45/0/-45/0/-45/-45/-45/-45/0/-45/45/0/0/45/45], natomiast układ oznaczony jako BE (z ang. bending-extension) to układ giętno-błonowy o następującej sekwencji [45/-45/0/-45/0/45/90/45/-45].



Rysunek 4. Krzywe R dla układów prostych



Rysunek 5. Krzywe R dla układów sprzężonych

### 5. Podsumowanie

Wyniki uzyskane w ramach symulacji numerycznych zjawiska rozwarstwienia kompozytów laminatowych o różnych układach włókien przedstawiono w pracy w formie krzywych R. Wykorzystano metodę opartą na nowatorskim koncepcie zastępczej długości szczeliny – Compliance-Based Beam Method (CBBM). Uzyskane rezultaty pokazują duże możliwości stosowania metody niewymagającej pomiaru długości szczeliny dla układów prostych. Natomiast dla układów sprzężonych metoda ta posiada pewne ograniczenia. Wynika to głównie z faktu, iż oparta jest na liniowej mechanice pęknięcia, podczas gdy w układach sprzężonych występują efekty nieliniowe, które przez tę metodę nie są uwzględniane.

### Literatura

- [1] R. M. Jones, *Mechanics of Composite Materials - 2nd Ed.* 1999.
- [2] S. Samborski, *Numerical analysis of the DCB test configuration applicability to mechanically coupled Fiber Reinforced Laminated Composite beams*, Compos. Struct., vol. 152, pp. 477–487, Sep. 2016.
- [3] M. F. S. F. de Moura, R. D. S. G. Campilho, and J. P. M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*, Compos. Sci. Technol., vol. 68, no. 10–11, pp. 2224–2230, Aug. 2008.