

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15-18 października 2024

Pękanie interfejsu w laminatach metalowo-włóknistych: modelowanie numeryczne, emisja akustyczna i uczenie maszynowe

Michał Smolnicki¹, Szymon Duda¹, Paweł Zielonka¹, Paweł Stabla¹, Grzegorz Lesiuk¹

¹Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wroclawska
email: michal.smolnicki@pwr.edu.pl

STRESZCZENIE: W niniejszym referacie konferencyjnym przedstawiono wyniki badań prowadzonych nad laminatami metalowo-włóknistymi (ang. Fiber Metal Laminates, FML) o osnowie termoplastycznej. Opisano przeprowadzoną próbę typu DCB (ang. double cantilever beam), która pozwala na obciążenie interfejsu metal-kompozyt w modzie I (otwieranie szczeliny). Badania eksperymentalne prowadzono przy wykorzystaniu systemu rejestrującego emisję akustyczną. Wykorzystanie dwóch czujników pozwoliło na lokalizację zdarzeń akustycznych i porównanie ich z przyrostem delaminacji obserwowanym przy wykorzystaniu przyrządów optycznych. Utworzono trójwymiarowy, bryłowy model numeryczny i wykorzystano metodę elementów skończonych aby odwzorować proces delaminacji i wyznaczyć parametry mechaniki pęknięcia charakterystyczne dla badanego interfejsu. Do zamodelowania interfejsu wykorzystano model strefy kohezijnej przed frontem szczeliny. Dla lepszego zrozumienia przebiegu eksperymentu i interpretacji wyników modelowania numerycznego przeprowadzono analizę sygnałów akustycznych wykorzystując uczenia maszynowe nienadzorowane w postaci różnych metod klastrowania takich jak spectra clustering czy fuzzy-c-means.

SŁOWA KLUCZOWE: laminaty metalowo-włókniste, interfejs, MES, emisja akustyczna, uczenie maszynowe

1. Wstęp

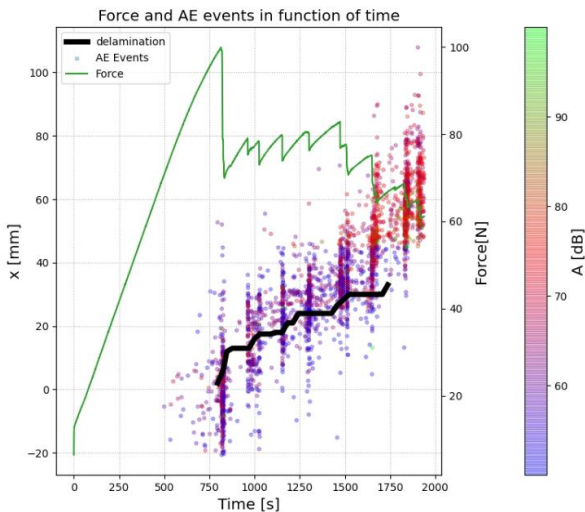
Laminaty metalowo-włókniste (ang. fibre-metal laminates, FML) należą do kompozytów hybrydowych. Charakteryzują się tym, że warstwy do nich przylegające mogą być wykonane z metalu albo z klasycznego kompozytu zbudowanego z osnowy termo- bądź duroplastycznej i zbrojonego włóknami ciągłymi takimi jak węglowe, szklane, aramidowe czy bazaltowe. Materiały te oryginalnie powstały na Uniwersytecie Technicznym w Delft jako odpowiedź na zapotrzebowanie na materiały o dobrych własnościach zmęczeniowych z przeznaczeniem dla przemysłu lotniczego. Najbardziej znanym przedstawicielem tej grupy FML-i jest GLARE – oparty o warstwy aluminium oraz żywicy epoksydowej zbrojonej włóknem ciągłym szklanym. Materiał ten odniósł sukces komercyjny w postaci wykorzystania go w samolotach firmy Airbus (np. Airbus A380) [1]. Obecnie na całym świecie obserwowany jest trend zwiększonego zainteresowania laminatami metalowo-włóknistymi. Badania prowadzi się przede wszystkim nad różnymi wariacjami materiału – zmieniając wybrany materiał metaliczny (proponowane są stal, magnez, lit i inne), rodzaj włókien w warstwach kompozytowych (różne włókna klasyczne takie jak węglowe, szklane, aramidowe, bazaltowe oraz włókna naturalne takie jak juka, palma czy len). Wreszcie można dokonywać zmian w materiale osnowy i zamiast żywicy epoksydowej wykorzystywać termoplasty, co skutkuje w łatwiejszym procesie technologicznym i stanowi korzystną zmianę przy wykorzystaniu w innych przemysłach niż lotniczym np. w branży automotive.

2. Modelowanie numeryczne pęknięcia interfejsu i emisja akustyczna

Celem prowadzonych szeroko zakrojonych badań było opracowanie metody wyznaczenia parametrów mechaniki pęknięcia dla materiałów typu FML o osnowie termoplastycznej przy wykorzystaniu zarówno podejścia eksperymentalnego jak i numerycznego. W ramach tych prac przeprowadzono próby dla różnych sposobów obciążania interfejsu. W niniejszym streszczeniu skrótowo omówiono działania przeprowadzone dla I sposobu obciążania szczeliny (otwieranie).

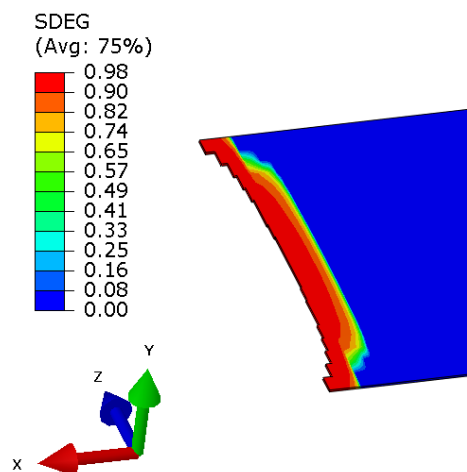
W ramach badań eksperymentalnych wykorzystano próbę DCB. Próba ta jest normatywnym podejściem do wyznaczania energii pęknięcia dla klasycznych materiałów kompozytowych (ASTM D5528 [1]). Dla materiałów typu FML nie można wykorzystać normy wprost, ale próbki i oprzyrządowanie były nią zainspirowane. Testy wytrzymałościowe przeprowadzono wykorzystując maszynę wytrzymałościową Instron 5944 ze względu na jej nieduży zakres (maksymalna siła 2kN) dopasowany do spodziewanych niewielkich sił. Oprócz standardowych wielkości mierzonych (czas, przemieszczenie, siła) układ eksperymentalny składał się również z systemu do rejestracji emisji akustycznej AMSY-6 firmy Vallen. Na każdą próbkę naklejono przy użyciu kleju na gorąco dwa piezoelektryczne czujniki o zakresie częstotliwości od 100 do 450 kHz odpowiadające przewidywanym zakresom zdarzeń akustycznych. Dwa czujniki umieszczone liniowo umożliwiły lokalizację zdarzeń akustycznych wzdłuż długości próbki. Na każdej próbce wykonano precrack

(między 3 a 5 mm), a następnie obciążano przy prędkości 1 mm/min. Przykładowy rezultat próby eksperymentalnej uwidocznił na rys 1.



Rys. 1. Zestawienie siły wywołującej delaminację, przyrostu delaminacji oraz sygnałów emisji akustycznej w czasie dla próby typu DCB

W celu wyznaczenia parametrów takich jak energia pęknięcia czy inicjacja pęknięcia wykorzystano model numeryczny i metodę elementów skończonych. Model opracowano w środowisku Simulia ABAQUS. Ze względu na nieliniowy przebieg frontu delaminacji wykorzystano bryłowy model trójwymiarowy. Interfejs zamodelowano przy użyciu elementów kohezyjnych, jako że wcześniejsze prace pokazały że w tego typu przypadkach dają one lepszą zgodność z rzeczywistością aniżeli powierzchnie kohezyjne [3]. Elementy kohezyjne zostały opisane przy wykorzystaniu tzw. modelu strefy kohezyjnej (ang. Cohesive Zone Model, CZM). W omawianym przypadku wykorzystano bilinearną wersję CZM. Z modelu usuwano elementy, które osiągnęły maksymalną wartość degradacji sztywności (SDEG). Przebieg delaminacji (pokazana tylko warstwa kohezyjna ukazano na rysunku 2).



Rys. 2. Nieliniowy front delaminacji obserwowany w modelu numerycznym testu DCB.

Więcej szczegółów na temat modelowania numerycznego laminatów metalowo-włóknistych można odnaleźć w pracy Autorów pt. „A Review on Finite-Element Simulation of Fibre Metal Laminates” [4].

3. Klasteryzacja danych z emisji akustycznej

Dane uzyskiwane z systemów rejestracji emisji akustycznej charakteryzują się wielowymiarowością (amplituda, częstotliwość, czas trwania, czas narastania etc.). Powoduje to że ich analiza jest utrudniona i często zespoły badawcze ograniczają się do analizy dwóch powszechnie uznawanych za najbardziej informatywne cech – amplitudy i częstotliwości. Wykorzystanie metod uczenia maszynowego takich jak dekompozycja spektralna (spectra clustering), grupowanie oparte o rozmytą przynależność do grup (fuzzy-c-means) czy grupowanie bazujące na rozkładaniu danych na sumę rozkładów normalnych (Gaussian Mixture Model) pozwala na wykorzystanie pełnych danych zarejestrowanych podczas badań. Uzyskane klastry ideowo oznaczają różne przyczyny emisji akustycznej i mogą być przypisane do różnych czynników je wywołujących takich jak pęknięcie osnowy, delaminacja, uszkodzenie włókien, tarcie i inne.

4. Podsumowanie

W niniejszym streszczeniu pokazano wyniki badań prowadzonych nad interfejsem laminatów metalowo-włóknistych przy I sposobie obciążenia szczeliny (testy DCB). Można sformułować następujące wnioski:

- 1) Model strefy kohezyjnej jest skutecznym podejściem do modelowania numerycznego interfejsu materiałów typu laminat metalowo-włóknisty w tym delaminacji
- 2) Emisja akustyczna dostarcza dodatkowych informacji pozwalających zwalidować model numeryczny
- 3) Uczenie maszynowe nienadzorowane może być wykorzystane do klastrowania danych uzyskanych przez rejestrację emisji akustycznej i stanowić wsparcie dla interpretacji eksperymentu i modeli numerycznych.

Opisane powyżej badania stanowią część większej kampanii badawczej skupiającej się na wyznaczeniu parametrów mechaniki pęknięcia dla materiału typu laminat-metalowo-włóknisty o osnowie termoplastycznej przy wykorzystaniu podejścia eksperymentalno-numerycznego. W powyższej pracy przedstawiono również nowatorskie podejście do interpretacji danych z emisji akustycznej z wykorzystaniem uczenia maszynowego.

Literatura

- [1] Asundi A, Choi AYN (1997) Fiber metal laminates: An advanced material for future aircraft. *J Mater Process Technol* 63:384–394. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02652-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02652-0)
- [2] ASTM D5528-01 (2014) Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites
- [3] Duda S, Smolnicki M, Osiecki T, Lesiuk G (2021) Determination of fracture energy (mode I) in the inverse fiber metal laminates using experimental–numerical approach. *Int J Fract* 2021 1–10. <https://doi.org/10.1007/S10704-021-00566-3>
- [4] Smolnicki, M., Lesiuk, G., Duda, S. *et al.* A Review on Finite-Element Simulation of Fibre Metal Laminates. *Arch Computat Methods Eng* 30, 749–763 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09814-8>