

Patryk SERAFIN<sup>1</sup>, Jerzy MARSZAŁEK

Opiekun naukowy: Jerzy MARSZAŁEK<sup>2</sup>

## **EKSPERYMENTALNE I NUMERYCZNE BADANIE DELAMINACJI KOMPOZYTU WARSTWOWEGO Z POMIAREM PRZEMIESZCZENIA I KSZTAŁTU FRONTU PĘKNIĘCIA**

**Streszczenie:** W niniejszym artykule przedstawiono eksperymentalną i numeryczną analizę rozwarstwiania polimerowego kompozytu warstwowego z włókien szklanych w warunkach testu DCB. Podczas badań rejestrowano propagację pęknięcia w każdej próbce wykorzystując częściową przezroczystość kompozytu. Symulację numeryczną procesu rozwarstwiania przeprowadzono za pomocą metody elementów skończonych przyjmując dwuliniowy model strefy kohezyjnej. Wyniki symulacji rozwarstwiania wykazały dobrą zgodność z wynikami eksperymentu.

**Słowa kluczowe:** kompozyt warstwowy, włókno szklane, delaminacja, test DCB, model MES

## **EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY ON DELAMINATION IN LAYERED COMPOSITE WITH THE MEASUREMENT OF DISPLACEMENT AND SHAPE OF THE CRACK FRONT**

**Summary:** This article presents experimental and numerical analysis of the delamination in a glass fiber reinforced polymer composite under the DCB test conditions. During the tests, the propagation of the crack in each specimen was recorded using the partial transparency of the composite. The numerical simulation of the delamination was carried out using the finite element method based on the bilinear cohesive zone model. The results of the simulation showed good agreement with the results of the experiment.

**Keywords:** layered composite, fiberglass, delamination, DCB test, FE model

### **1. Wprowadzenie**

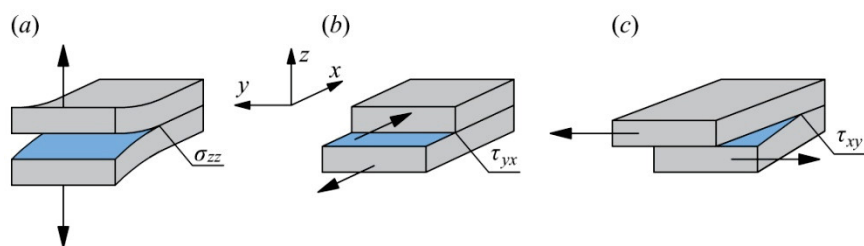
Polimerowe kompozyty warstwowe wzmocnione włóknami (laminaty) znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach techniki w projektowaniu lekkich i wytrzymałych konstrukcji inżynierskich. Z uwagi na relatywnie małą gęstość, odporność na korozję

---

<sup>1</sup>Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, ps054525@student.ath.edu.pl

<sup>2</sup>dr inż., Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, jmarszalek@ath.bielsko.pl

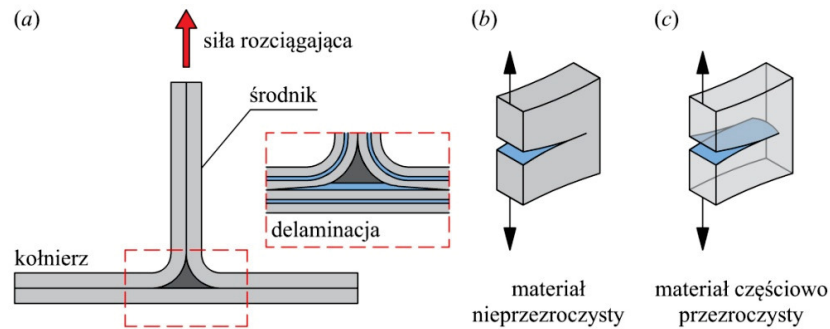
oraz dużą sztywność i wytrzymałość właściwą laminaty są w szczególności wykorzystywane w przemyśle lotniczym, samochodowym, stoczniowym oraz energetycznym [3,4]. Pomimo wielu zalet, laminaty ze względu na strukturę warstwową i zróżnicowaną orientację warstw wzmacniających, charakteryzują się małą wytrzymałością na delaminację, czyli rozwarstwienie [1]. W zależności od sposobu działania obciążenia zewnętrznego wyróżnia się trzy schematy rozwarstwiania [6]. Podczas rozrywania (schemat I) powierzchnie szczeliny rozchylają się i pęknięcie propaguje z powodu przekroczenia dopuszczalnego naprężenia rozciągającego  $\sigma_{zz}$  (rysunek 1a). W trakcie ścinania wzdłużnego (schemat II) powierzchnie szczeliny przesuwają się po sobie w kierunku prostopadłym do jej frontu, przy czym pęknięcie propaguje w wyniku przekroczenia dopuszczalnego naprężenia stycznego  $\tau_{yx}$  (rysunek 1b). Podczas ścinania poprzecznego (schemat III) powierzchnie szczeliny przesuwają się po sobie w kierunku równoległym do jej frontu a rozwój pęknięcia ma związek z przekroczeniem dopuszczalnego naprężenia stycznego  $\tau_{xy}$  (rysunek 1c).



Rysunek 1. Sposoby rozwarstwiania kompozytu: (a) rozrywanie, (b) ścinanie wzdłużne, (c) ścinanie poprzeczne

W praktyce inżynierskiej szczególną uwagę zwraca się na II schemat rozwarstwiania, ponieważ elementy konstrukcyjne z kompozytów warstwowych najczęściej przenoszą obciążenie zginające, co generuje dodatkowe naprężenie ścinające wzdłużne  $\tau_{yx}$  między warstwami wzmocnienia. Jednak największe ryzyko uszkodzenia kompozytu warstwowego w wyniku delaminacji występuje w warunkach I schematu obciążenia, ponieważ w takiej konfiguracji połączenie międzywarstwowe charakteryzuje się najmniejszą wytrzymałością. W niektórych konstrukcjach kompozytowych stosuje się elementy, które są szczególnie narażone na rozwarstwienie spowodowane przekroczeniem dopuszczalnego naprężenia rozciągającego  $\sigma_{zz}$ . Jako przykład można wymienić połączenie usztywniające typu T stosowane m.in. w przemyśle lotniczym (rysunek 2a). Badanie wytrzymałości kompozytu warstwowego na rozwarstwienie w warunkach I schematu obciążenia sprowadza się do wykonania testu DCB [2] (ang. *double cantilever beam*). Na podstawie tego testu wyznacza się wartość współczynnika uwalniania energii  $G_I$ , który jest miarą odporności kompozytu na rozwarstwienie. W tym celu konieczne jest rejestrowanie przyrostu pęknięcia w trakcie trwania testu, co najczęściej sprowadza się do obserwacji propagacji pęknięcia na bocznej powierzchni próbki (rysunek 2b). W przypadku laminatów z włókien szklanych do pomiaru przyrostu pęknięcia można wykorzystać ich częściową przezroczystość. W ten sposób, oprócz przyrostu pęknięcia na powierzchni bocznej próbki, można obserwować kształt frontu pęknięcia (rysunek 2c). W przypadku laminatów z włókien węglowych lub aramidowych

sprawdzenie kształtu frontu pęknięcia jest znacznie utrudnione, ponieważ laminaty z takich włókien nie są przezroczyste. Dokładnie zarejestrowana propagacja pęknięcia międzywarstwowego może stanowić dodatkowy sposób weryfikacji modeli numerycznych wykorzystywanych w symulacji procesu rozwarstwiania.



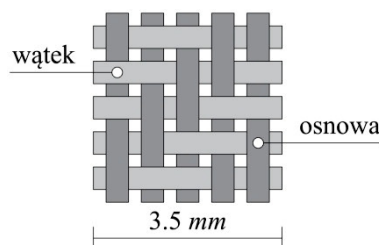
Rysunek 2. (a) Rozwarstwienie w połączeniu usztywniającym typu T, (b) widok pęknięcia na powierzchni bocznej w warunkach test DCB, (c) widok frontu pęknięcia w laminacie częściowo przezroczystym w warunkach test DCB

W ramach niniejszej pracy przeprowadzono doświadczalny test rozwarstwiania, z wykorzystaniem którego została wyznaczona wartość współczynnika uwalniania energii  $G_I$ . Badania przeprowadzono dla laminatu polimerowego wzmocnionego tkaniną rovingową z włókien szklanych. Wykorzystując częściową przezroczystość laminatu zarejestrowano przyrost pęknięcia międzywarstwowego i sprawdzono kształt frontu pęknięcia. Doświadczalnie wyznaczona wartość współczynnika uwalniania energii  $G_I$  została uwzględniona w numerycznej symulacji testu DCB.

## 2. Materiały i metody badawcze

### 2.1. Materiały

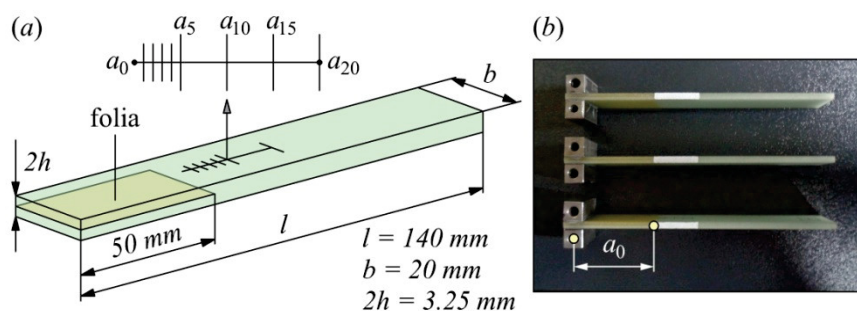
Laminat wzmocniony włóknami szklanymi typu E (włókna ogólnego przeznaczenia) został wykonany z szesnastu warstw tkaniny rovingowej o splocie 2x2 twill (rysunek 3) oraz matrycy polimerowej stanowiącej mieszaninę żywicy epoksydowej MGS® LR 285 i utwardzacza MGS® LH 285 w proporcji wagowej 100:40. Gramatura tkaniny (masa powierzchniowa) i gęstość matrycy wynoszą odpowiednio  $200 \text{ g/m}^2$  i  $1.18 \text{ g/cm}^3$ .



Rysunek 3. Schemat tkaniny rovingowej o splocie 2x2 twill

## 2.2. Sposób przygotowania próbek laminatu

Laminat w postaci cienkiej płyty o wymiarach  $200 \times 200 \text{ mm}$  wykonano metodą laminowania ręcznego w specjalnym foremniku. Wszystkie warstwy zostały ułożone w jednej orientacji, przez co otrzymano laminat ortotropowy ze zbilansowanym wzmocnieniem dwukierunkowym. Między środkowe warstwy, na długości  $50 \text{ mm}$ , wprowadzono cienką folię kaptonową, przez co zainicjowano w płycie wstępne rozwarstwienie. Po nałożeniu ostatniej warstwy tkaniny, płyta została dociśnięta do foremnika za pomocą stalowej pokrywy generującej ciśnienie o wartości  $0.01 \text{ MPa}$ . Proces utwardzania płyty składał się z dwóch etapów, tj. najpierw płytę utwardzano w temperaturze pokojowej przez 24 godziny w zamkniętym foremniku a po wyjęciu z foremnika w temperaturze  $80^\circ\text{C}$  przez 5 godzin. Próbki laminatu (rysunek 4a) zostały wycięte technologią *waterjet*. Na górnej powierzchni każdej próbki umieszczono naklejkę z podziałką, co ułatwiło pomiar długości frontu pęknięcia. Odstęp między kreskami na podziałce początkowo wynosi  $1 \text{ mm}$ . W dalszej części odstęp jest większy i wynosi  $5 \text{ mm}$ . Każda kreska na podziałce, w zależności od jej położenia, została oznaczona symbolem  $a_i$  (gdzie  $i = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20$ ). Położenie punktu  $a_0$  jest mierzone od miejsca przyłożenia siły do frontu rozwarstwienia początkowego i wynosi  $45 \text{ mm}$  (rysunek 4b). Indeks dolny symbolu  $a_i$  wskazuje wartość przyrostu pęknięcia (np. całkowita długość pęknięcia w próbce w chwili osiągnięcia punktu  $a_5$  jest równa  $a_0 + a_5 = 45 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 50 \text{ mm}$ ). Ze względu na charakterystyczny sposób zadawania obciążenia, do próbek zostały przyklejone stalowe uchwyty (rysunek 4b).



Rysunek 4. (a) Wymiary próbki DCB, (b) próbki wykorzystane w teście DCB

Stałe inżynierskie ortotropowego laminatu są przedstawione w tabeli 1. Z kolei udziały objętościowe oraz wybrane właściwości mechaniczne włókien szklanych i matrycy polimerowej są zestawione w tabeli 2.

Tabela 1. Stałe inżynierskie laminatu.

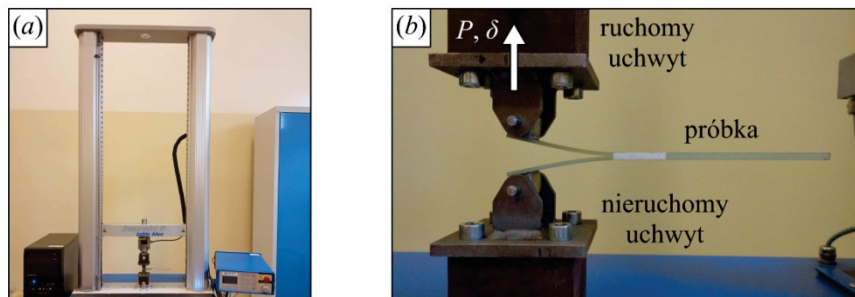
$E_{11}$	$E_{22}$	$E_{33}$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$
20 GPa	20 GPa	3.2 GPa	2.1 GPa	1.1 GPa	1.1 GPa	0.08	0.32	0.32

Tabela 2. Wielkości charakteryzujące włókna szklane i matrycę polimerową.

komponent	moduł Younga $E, GPa$	współczynnik Poissona $\nu, -$	udział objętościowy w laminacie, %
włókno szklane	70	0.22	46.5
matryca	3.2	0.35	53.5

### 2.3. Test DCB

Doświadczalne rozwarstwianie próbek laminatu zostało przeprowadzone na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej Inspekt Table Blue 5 (rysunek 5a). Próbki były mocowane przegubowo za pomocą uchwytów wyposażonych w stalowe wałeczki. Podczas testów zadawano przemieszczenie  $\delta$  z prędkością  $1\text{ mm/min}$  a wielkością mierzoną była siła rozciągająca  $P$  (rysunek 5b). Jednocześnie dla zadanych przyrostów pęknięcia  $a_i$  odczytywano wartość przemieszczenia  $\delta$  oraz fotografowano front pęknięcia.

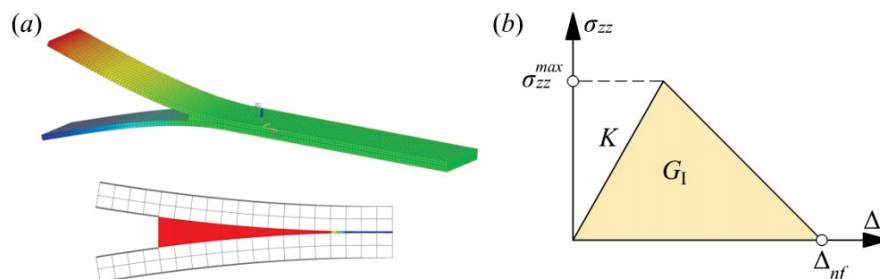


Rysunek 5. (a) Maszyna wytrzymałościowa, (b) próbka podczas testu DCB

### 2.4. Model numeryczny próbki laminatu

Model numeryczny próbki został przygotowany w programie NX Siemens. Laminat zamodelowano na poziomie makroskalowym z wykorzystaniem ośmiowęzłowych bryłowych elementów skończonych typu CHEXA (rysunek 6a). Próbka laminatu została podzielona na dwie części, które odsunięto od siebie na odległość  $0.1\text{ mm}$ . Powstałą przestrzeń wypełniono bryłowymi (ośmiowęzłowymi) kohezyjnymi elementami skończonymi. Zamodelowanie próbki laminatu ze strefą kohezyjną wymagało zdefiniowania dwóch modeli materiałowych. W przypadku elementów bryłowych modelujących laminat zastosowano materiał liniowy o właściwościach ortotropowych (tabela 1). W przypadku elementów kohezyjnych zdefiniowano specjalną charakterystykę dwuliniową (rysunek 6b). Nachylenie pierwszej części charakterystyki zależy od sztywności  $K$  elementu kohezyjnego. Wraz z rosnącym przemieszczeniem węzłów w kierunku normalnym  $\Delta_n$  zwiększa się naprężenie normalne  $\sigma_{zz}$  w elemencie kohezyjnym. Przekroczenie wartości granicznej  $\sigma_{zz}^{max}$  powoduje, że sztywność elementu zaczyna się zmniejszać. W chwili osiągnięcia punktu końcowego  $\Delta_{nf}$  sztywność elementu kohezyjnego spada do zera (element nie przenosi obciążenia). Pole powierzchni pod charakterystyką elementu kohezyjnego jest równe wartości współczynnika uwalniania energii  $G_I$ . Zdefiniowanie

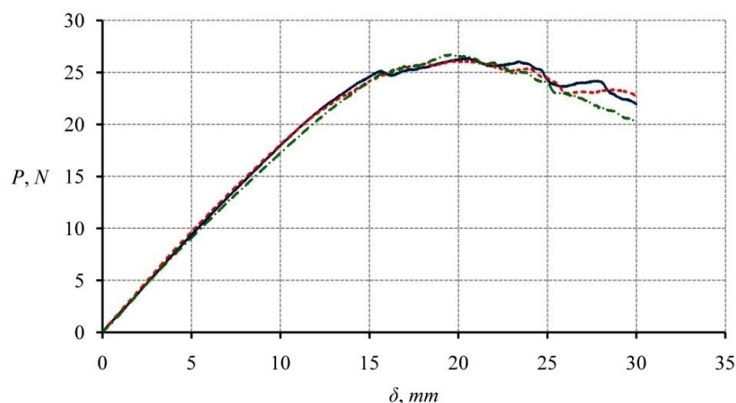
charakterystyki dwuliniowej wymaga zastosowania trzech parametrów: wyznaczonego doświadczalnie współczynnika uwalniania energii  $G_I$ , sztywności elementu kohezyjnego  $K$  (początkowo można przyjąć, że sztywność  $K$  jest równa ilorazowi modułu Younga matrycy  $E$  i grubości połączenia klejonego  $t$  między warstwami laminatu, tj.  $E/t$  [5]) oraz naprężenia granicznego  $\sigma_{zz}^{max}$  wstępnie równego wytrzymałości matrycy na rozciąganie.



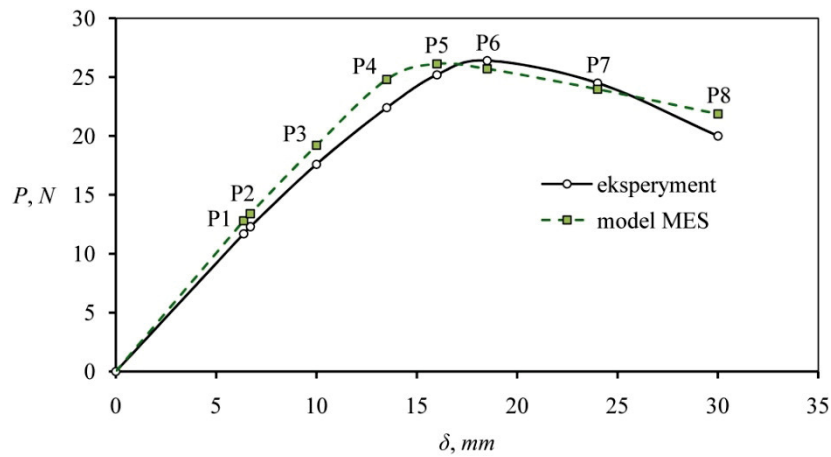
Rysunek 6. (a) Model MES próbki laminatu ze strefą kohezyjną, (b) dwuliniowy model strefy kohezyjnej

### 3. Wyniki i dyskusja

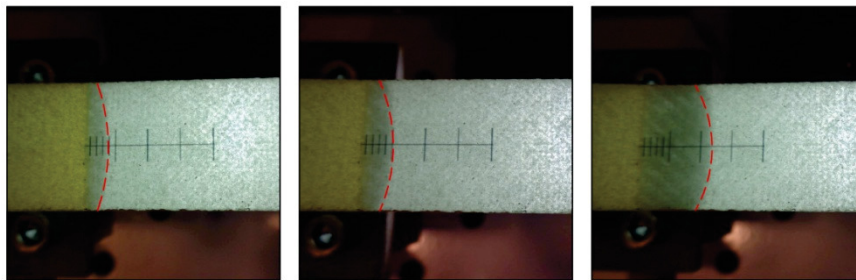
Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano charakterystyki rozwarstwiania dla trzech próbek laminatu w układzie siła-przemieszczenie  $P(\delta)$  – rysunek 7. Każda charakterystyka składa się z części liniowej i nieliniowej. Rysunek 8 przedstawia porównanie charakterystyki obliczeniowej z uśrednioną charakterystyką doświadczalną. W części liniowej charakterystyk nie obserwuje się propagacji wstępnie zainicjowanego rozwarstwienia. Wraz z postępującą propagacją pęknięcia międzywarstwowego charakterystyki przechodzą w zakres nieliniowy. Podczas realizacji testów DCB rejestrowano przyrost pęknięcia wykorzystując częściową przezroczystość laminatu (rysunek 9). Z przeprowadzonych obserwacji wynika, że front pęknięcia przyjmuje kształt zbliżony do paraboli.



Rysunek 7. Charakterystyki rozwarstwiania trzech próbek laminatu



Rysunek 8. Porównanie charakterystyki obliczeniowej z uśrednioną charakterystyką doświadczalną

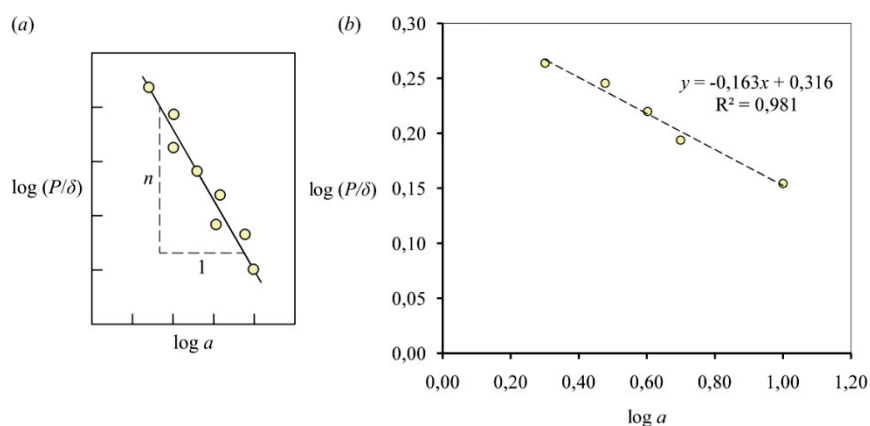


Rysunek 9. Przykładowe fotografie frontu pęknięcia wykonane podczas testu DCB

Wartość współczynnika uwalniania energii  $G_I$  została wyznaczona na podstawie zależności (1). W tym celu dla każdego przyrostu pęknięcia  $a_i$  odczytuje się z charakterystyki doświadczalnej (rysunek 8) wartość siły  $P$  i przemieszczenia  $\delta$  (gdzie  $b$  jest szerokością próbki). Definicję współczynnika  $n$  przedstawia wykres, na którym w skali podwójnie logarytmicznej umieszcza się sztywności próbki  $P/\delta$  w funkcji przyrostu pęknięcia  $a_i$  (rysunek 10a, 10b). Wyznaczenie wartości współczynnika  $n$  jest realizowane poprzez dopasowanie liniowej linii trendu do danych pomiarowych [2].

$$G_I = \frac{nP_c\delta_c}{2ba} \quad (1)$$





Rysunek 10. (a) Definicja współczynnika  $n$ , (b) sztywności próbki w funkcji przyrostu pęknięcia w skali podwójnie logarytmicznej

Wyznaczoną doświadczalnie wartość współczynnika uwalniania energii  $G_I = 168 \text{ N/m}$  ( $0.168 \text{ N/mm}$ ) wykorzystano w symulacji rozwarstwiania próbki laminatu. W celu uzyskania lepszej zgodności wyników symulacji z wynikami badań doświadczalnych należało skorygować parametry modelu strefy kohezijnej (sztywność elementu kohezijnego  $K$  i naprężenie graniczne  $\sigma_{zz}^{max}$ ) przy zachowaniu stałej wartości współczynnika uwalniania energii  $G_I$ . W tabeli 3 przedstawiono początkowe i skorygowane wartości parametrów modelu strefy kohezijnej. Zastosowanie początkowych parametrów modelu strefy kohezijnej spowodowało, że w modelu próbki nie zaobserwowano propagacji pęknięcia – elementy kohezijne, z uwagi na zawyżone wartości parametrów  $K$  i  $\sigma_{zz}^{max}$ , charakteryzowały się dużą sztywnością. Rysunek 11 przedstawia przyrost pęknięcia w modelu dyskretnym próbki, w którym zastosowano skorygowane wartości parametrów strefy kohezijnej. Kolor czerwony oznacza, że element kohezijny jest wyłączony i nie przenosi obciążenia normalnego (zgodnie z dwuliniowym modelem strefy kohezijnej został osiągnięty punkt końcowy charakterystyki  $\Delta_{nf}$  – rysunek 6b). Front pęknięcia w modelu, tak samo jak w próbkach rozwarstwianych doświadczalnie, w przybliżeniu przyjmuje kształt paraboli, przy czym paraboliczny kształt frontu pęknięcia odznaczałby się wyraźniej w modelu próbki podzielonym na mniejsze elementy skończone.

Tabela 3. Skorygowana wartość sztywności  $K$  i naprężenia maksymalnego  $\sigma_{zz}^{max}$ .

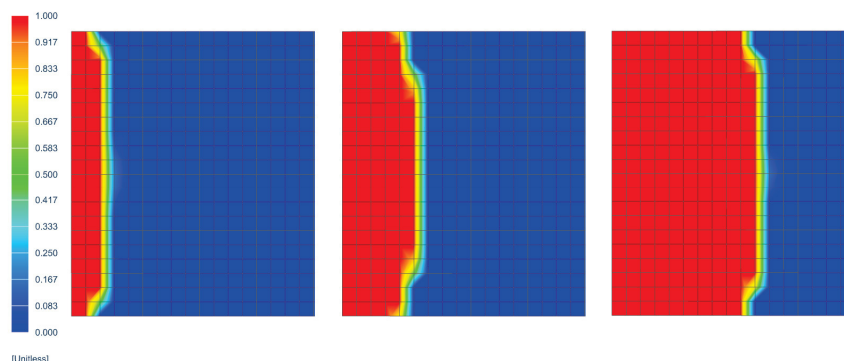
wartość początkowa	$K = 3.2 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^3$	$\sigma_{zz}^{max} = 80 \text{ MPa}$
wartość skorygowana	$K = 10^3 \text{ N/mm}^3$	$\sigma_{zz}^{max} = 14.15 \text{ MPa}$

Miarą dopasowania charakterystyki obliczeniowej do uśrednionej charakterystyki doświadczalnej jest błąd względny siły  $P$  w punktach pomiarowych (rysunek 8, tabela 4). Otrzymano dostateczną zgodność charakterystyk (tylko w punkcie pomiarowym P4 błąd względny nieznacznie przekroczył wartość dziesięciu procent).



Tabela 4. Błąd względny siły  $P$  dla wybranych punktów pomiarowych.

punkt pomiarowy	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
siła $P$ , $N$ (eksperyment)	11.7	12.3	17.6	22.4	25.2	26.4	24.5	20.3
siła $P$ , $N$ (symulacja)	12.8	13.4	19.2	24.8	26.1	25.7	23.9	21.8
błąd względny, %	9.4	8.9	9.1	10.7	3.6	2.7	2.4	7.4



Rysunek 11. Propagacja pęknięcia w modelu dyskretnym próbki

#### 4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych i symulacji numerycznych sformułowano następujące wnioski:

- wyznaczona doświadczalnie wartość współczynnika uwalniania energii  $G_I$  w połączeniu z dwuliniowym modelem strefy kohezijnej pozwoliła zasymulować proces rozwarstwiania próbki laminatu z zadowalającą dokładnością,
- zastosowanie początkowych parametrów modelu strefy kohezijnej spowodowało, że w modelu próbki nie zaobserwowano inicjacji procesu pęknięcia – elementy kohezyjne, z uwagi na zawyżone wartości parametrów  $K$  i  $\sigma_{zz}^{max}$ , charakteryzowały się dużą sztywnością początkową,
- korygując model strefy kohezijnej, tj. sztywność elementu kohezijnego  $K$  i maksymalne naprężenie  $\sigma_{zz}^{max}$  można lepiej dopasować wyniki symulacji do wyników badań doświadczalnych,
- porównując początkową (liniową) część charakterystyki obliczeniowej z uśrednioną charakterystyką doświadczalną można zauważyć, że sztywność modelu jest nieznacznie zawyżona – sztywność modelu zależy przede wszystkim od wartości modułu sprężystości podłużnej  $E_{11}$ ,
- w przeciwieństwie do laminatów wzmocnionych włóknami węglowymi i aramidowymi, laminaty wzmocnione włóknami szklanymi wykazują częściową przezroczystość, przez co możliwa jest dokładna obserwacja propagacji frontu pęknięcia,
- uwzględnienie strefy kohezijnej w modelach makroskalowych nie jest skomplikowanym zagadnieniem, ponieważ komercyjne pakiety MES są wyposażone w odpowiednie narzędzia wspomagające proces modelowania,

- czas symulacji procesu rozwarstwiania próbki laminatu z wykorzystaniem komputera PC Intel® Core™ i7-4770S 3.10 GHz, 32 GB nie przekroczył dwóch minut.

W celu lepszego dopasowania charakterystyki modelu do wyników eksperymentu można sformułować odpowiednie zadanie optymalizacji parametrycznej bez ograniczeń. Celem byłoby jak najlepsze dopasowanie charakterystyki rozwarstwiania modelu do charakterystyki doświadczalnej, a funkcją celu byłoby minimum sumy kwadratów odchyłań wartości siły  $P$  zmierzonych i obliczonych dla wybranych wartości przemieszczenia  $\delta$ . Składowymi wektora zmiennych decyzyjnych, przy założeniu stałej wartości współczynnika uwalniania energii  $G_I$ , byłyby: sztywność elementu kohezyjnego  $K$  i maksymalne naprężenie  $\sigma_{zz}^{max}$ .

## LITERATURA

1. BAJURKO P.: Numeryczna i eksperymentalna analiza rozwoju delaminacji wyboczeniowych w warunkach obciążeń quasi-statycznych. Prace Instytutu Lotnictwa, **244**(2016)3, 9-19.
2. CARLSSON L.A., ADAMS D.F., PIPES R.B.: Experimental characterization of advanced composite materials. 4th edn. CRC Press, Boca Raton 2014.
3. GAGANI A.I., KRAUKLIS A.E., SÆTER E., VEDVIK N.P., ECHTERMEYER A.T.: A novel method for testing and determining ILSS for marine and offshore composites. Composite Structures, **220**(2019), 431-440.
4. LIU D., TANG Y., CONG W.L.: A review of mechanical drilling for composite laminates. Composite Structures, **94**(2012), 1265-1279.
5. PARK J-S., KIM J-H., PARK J-H., KO D-C.: Prediction of the delamination at the steel and CFRP interface of hybrid composite part. Materials, **14**(2021)21, 6285.
6. WNUK M.P.: Podstawy mechaniki pękania. Wydawnictwo Naukowe Akapit, Kraków 2008.