

Patryk SERAFIN<sup>1</sup>

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

## **MODELOWANIE LAMINATU HYBRYDOWEGO Z WYKORZYSTANIEM METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH**

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono sposób wyznaczania sztywności zginania laminatu hybrydowego z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Laminat składał się z trzech faz, tj. matrycy polimerowej, sześciu warstw wzmocnienia w postaci tkaniny modułowej z rovingów z włókien szklanych oraz czterech warstw wzmocnienia w postaci tkaniny o splocie płóciennym z rovingów z włókien aramidowych. Otrzymane wyniki symulacji modelu obliczeniowego zostały porównane z wynikami badań doświadczalnych.

**Słowa kluczowe:** kompozyt hybrydowy, model MES, eksperymentalny test zginania

## **FINITE ELEMENT MODELLING OF HYBRID COMPOSITE LAMINATE**

**Summary:** This paper presents a method for determining the bending stiffness of a hybrid composite laminate using the finite element method. The laminate consisted of three phases, i.e. a polymer matrix, six layers of reinforcement in the form of a unidirectional fabric made of glass fibers and four layers of reinforcement in the form of woven fabric made of aramid fibers. The obtained simulation results of the computational model were compared with the results of experimental tests.

**Keywords:** hybrid composite, FE model, experimental bending test

### **1. Wstęp**

W przemyśle lotniczym i stoczniowym do budowy samolotów, jachtów i łodzi powszechnie wykorzystuje się polimerowe kompozyty warstwowe (laminaty), w których wzmocnienie w postaci tkanin, włókien ciągłych czy mat z włókien ciętych jest układane warstwami i przesyca matrycą polimerową. Laminaty o strukturze

---

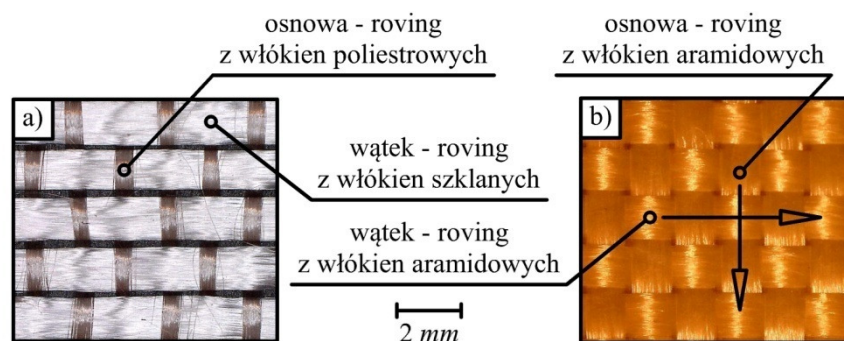
<sup>1</sup> Student, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, serafinpatryk9@gmail.com

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

dwufazowej składają się z matrycy i wzmocnienia wykonanego z jednego rodzaju włókien technicznych np. szklanych, węglowych lub aramidowych (tzw. wzmocnienie jednorodne [3]). Szczególną grupę materiałów kompozytowych stanowią laminaty hybrydowe, których wzmocnienie jest utworzone z co najmniej dwóch rodzajów włókien. Przykładem takiego wzmocnienia są tkaniny hybrydowe, w których wątek i osnowa są wykonane z różnych włókien. Laminat hybrydowy powstaje również w wyniku połączenia tkanin jednorodnych o różnych modułach sztywności. Zaletą kompozytów hybrydowych jest możliwość łączenia zalet poszczególnych włókien wzmocnienia. Włókna aramidowe Kevlar® cechują się dużą sztywnością i wytrzymałością, przy czym charakteryzują się wodochłonnością i są wrażliwe na promienie UV [4]. Trwałość laminatu z włókien aramidowych, przy zachowaniu lub nawet polepszeniu jego właściwości mechanicznych, można zwiększyć stosując na warstwy zewnętrzne włókna tańsze np. szklane lub naturalne. Jednak z uwagi na wielofazową strukturę analityczne wyznaczenie właściwości mechanicznych laminatów hybrydowych jest utrudnione, zwłaszcza gdy wzmocnienie ma postać tkaniny. Dlatego w niniejszej pracy przedstawiono sposób modelowania i wyznaczania sztywności laminatu hybrydowego przy użyciu komercyjnego oprogramowania wykorzystującego metodę elementów skończonych.

## 2. Badany materiał

Próbki laminatu hybrydowego o wymiarach  $90 \times 20 \times 2.25$  mm składały się z dziesięciu warstw wzmocnienia. Zewnętrzne warstwy próbek zostały wykonane z tkaniny modułowej z rovingu z włókien szklanych (w skrócie UGFF – ang. *Unidirectional Glass Fiber Fabric*) – Rysunek 1a. Wzmocnienie wewnętrzne próbek stanowiły cztery warstwy z tkaniny o splocie płóciennym z rovingu z włókien aramidowych (w skrócie WAFF – ang. *Woven Aramid Fiber Fabric*) – Rysunek 1b. Właściwości materiałowe komponentów wykorzystanych do wytworzenia próbek laminatu hybrydowego zostały dobrane na podstawie rozeznania literaturowego (Tabela 1).

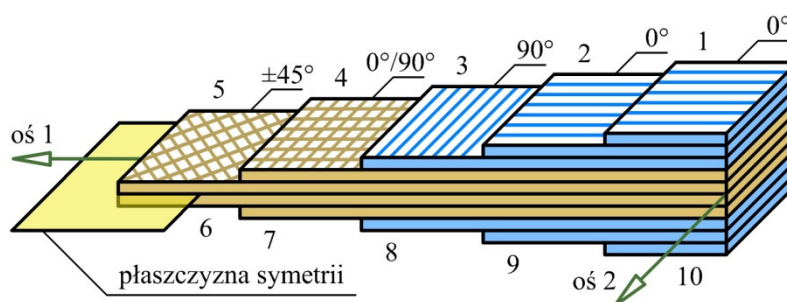


Rysunek 1. Fotografia tkaniny: a) modułowej z rovingu z włókien szklanych, b) o splocie płóciennym z rovingu z włókien aramidowych

Tabela 1. Właściwości materiałowe komponentów – wzmocnienia i matrycy

Tkanina	Rodzaj włókna	Gramatura tkaniny	Moduł Younga włókna [2]	Współczynnik Poissona włókna [2]
UGFF	szklane (typ E)	220 g/m <sup>2</sup>	73.5 GPa	0.22
WAFF	aramidowe (Kevlar® 49)	170 g/m <sup>2</sup>	125 GPa	0.36
<b>Wybrane właściwości materiałowe matrycy [5]</b>				
<b>Stosunek wagowy żywicy i utwardzacza</b>		<b>Gęstość</b>	<b>Moduł Younga</b>	<b>Współczynnik Poissona</b>
100:25		1.15 g/cm <sup>3</sup>	2.94 GPa	0.35

Każda warstwa laminatu hybrydowego, z uwagi na swoją strukturę i orientację ułożenia (Rysunek 2), w określony sposób kształtuje właściwości mechaniczne laminatu (Tabela 2). Grubość poszczególnych warstw została wyznaczona na podstawie obserwacji mikroskopowej.



Rysunek 2. Sekwencja i orientacja warstw wzmocnienia w laminacie hybrydowym

Tabela 2. Charakterystyka warstw wzmocnienia w laminacie hybrydowym

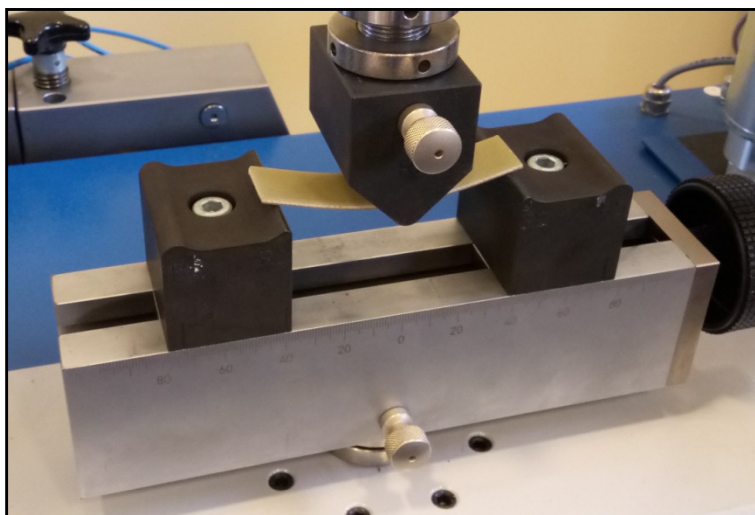
Numer warstwy, rodzaj warstwy, grubość	Wpływ warstwy na sztywność laminatu (w odniesieniu do Rysunku 2)
1, UGFF, 0.215 mm	zwiększenie sztywności w kierunku osi 1
2, UGFF, 0.215 mm	
3, UGFF, 0.215 mm	zwiększenie sztywności w kierunku osi 2
4, WAFF, 0.24 mm	zwiększenie sztywności w kierunkach osi 1 i 2
5, WAFF, 0.24 mm	zwiększenie sztywności pod kątem 45°
6, WAFF, 0.24 mm	względem osi 1 i 2
7, WAFF, 0.24 mm	zwiększenie sztywności w kierunkach osi 1 i 2
8, UGFF, 0.215 mm	zwiększenie sztywności w kierunku osi 2
9, UGFF, 0.215 mm	zwiększenie sztywności w kierunku osi 1
10, UGFF, 0.215 mm	

Bardzo ważnym czynnikiem decydującym o właściwościach mechanicznych laminatu jest udział objętościowy matrycy i wzmocnienia. Według [1] udział

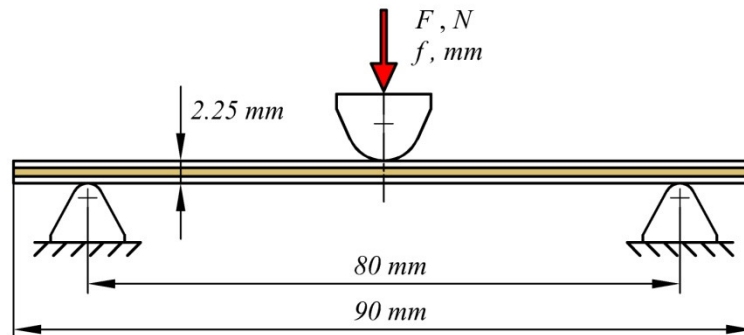
objętościowy wzmocnienia nie powinien przekraczać 65%, ponieważ niedostateczna ilość matrycy w laminacie może skutkować powstawaniem tzw. „suchych styków” między włóknami, co w rezultacie prowadzi do obniżenia sztywności i wytrzymałości laminatu. Udział objętościowy matrycy w każdej warstwie laminatu dwufazowego można wyznaczyć znając masę i wymiary próbek laminatu, gramaturę i liczbę warstw tkaniny w próbkach oraz gęstość matrycy. W przypadku laminatu hybrydowego, ze względu na rodzaj splotu i materiał włókien, warstwy wzmocnienia mogą charakteryzować się różną grubością i stopniem przesylenia. Udział objętościowy matrycy w każdej warstwie laminatu hybrydowego został wyznaczony na podstawie analizy wagowej pojedynczych laminatów wykonanych odpowiednio z UGFF i WAFF przesyconych matrycą i przygotowanych tą samą technologią co próbki laminatu hybrydowego. Przeprowadzona analiza wykazała, że udział objętościowy matrycy w laminatach z UGFF i WAFF wynosił odpowiednio 47% i 65%.

### 3. Próba zginania laminatu hybrydowego

Doświadczalne zginanie prostopadłościennych próbek laminatu o wymiarach  $90 \times 20 \times 2.25 \text{ mm}$  zostało przeprowadzone na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej Inspekt Table Blue 5 z wykorzystaniem testu zginania trzypunktowego (Rysunek 3). Próbki były obciążane siłą  $F$  w połowie ich długości, przy czym podpory zostały rozmieszczone symetrycznie względem miejsca przyłożenia siły (Rysunek 4). Podczas zginania zadawano strzałkę ugięcia próbek  $f$  z prędkością  $1 \text{ mm/min}$ . Wielkością mierzoną była wartość siły  $F$ . Pomiarzy zostały wykonane dla pięciu próbek laminatu.

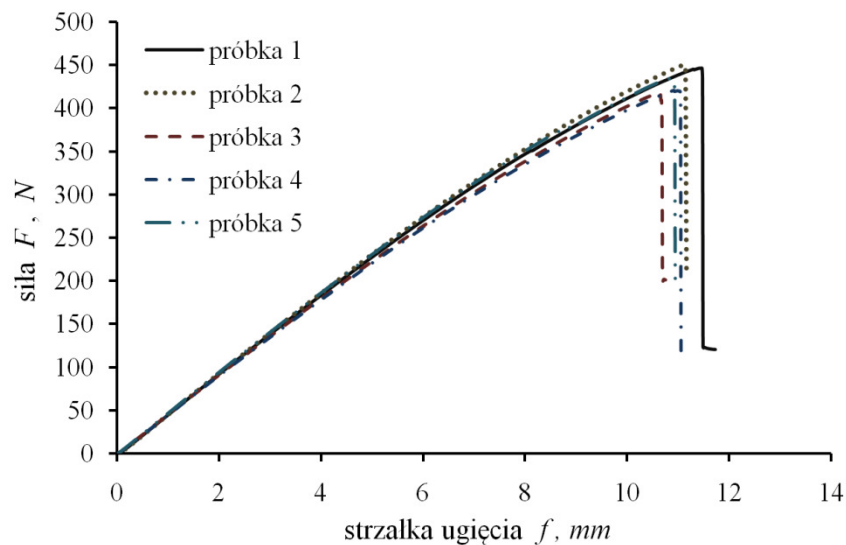


Rysunek 3. Widok próbki laminatu hybrydowego na stanowisku pomiarowym

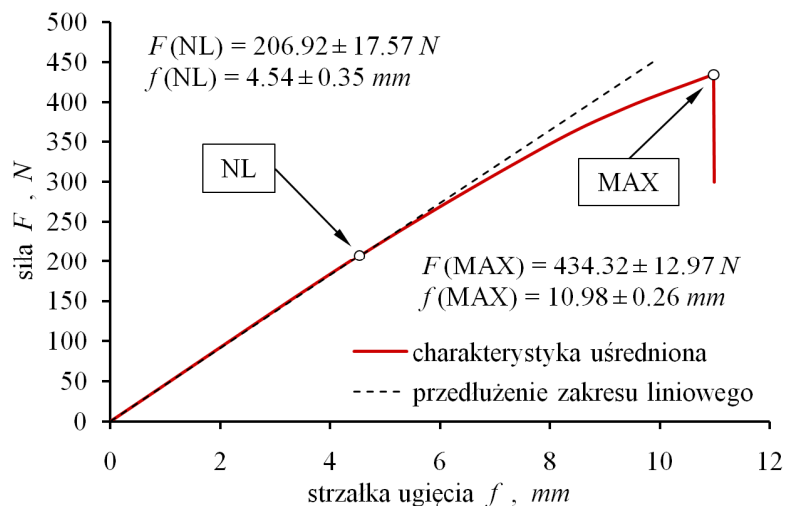


Rysunek 4. Schemat zginania trypunktowego prostopadłościennych próbek laminatu

Dla każdej przebadanej próbki otrzymano charakterystykę siła-strzałka ugięcia  $F(f)$  (Rysunek 5). Na podstawie pięciu charakterystyk została wyznaczona charakterystyka uśredniona dla wszystkich próbek (Rysunek 6). W punkcie NL (od słowa *nieliniowy*) charakterystyka z zakresu liniowego przechodzi w nieliniowy. Następnie charakterystyka łagodnie odchyła się od liniowej aż do osiągnięcia obciążenia niszczącego, co odpowiada punktowi MAX. Na etapie prowadzonych badań nie znaleziono przyczyny przejścia charakterystyki w zakres nieliniowy. Przypuszcza się, że nieliniowość charakterystyki próbek w zakresie NL-MAX może być spowodowana różnymi rodzajami i orientacjami wzmocnienia.

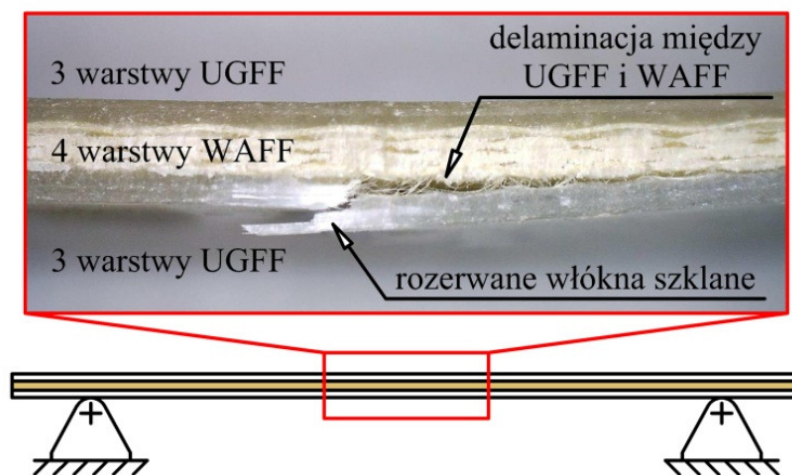


Rysunek 5. Charakterystyki doświadczalne siła-strzałka ugięcia dla pięciu próbek laminatu hybrydowego



Rysunek 6. Uśredniona charakterystyka siła-strzałka ugięcia dla wszystkich próbek

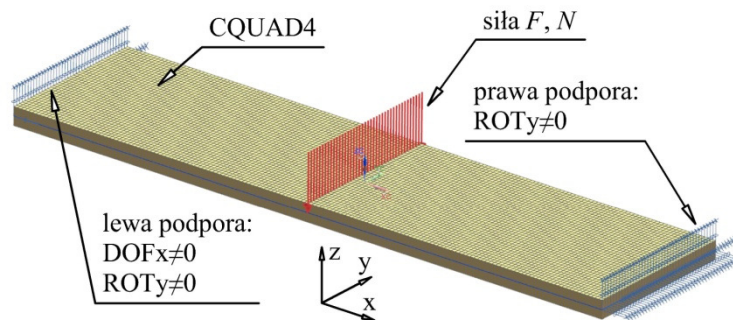
Obserwacja próbek po zakończeniu testu zginania wykazała, że nagle utrata sztywności próbek w punkcie MAX nastąpiła w wyniku wystąpienia dwóch rodzajów zniszczenia – rozerwania włókien szklanych w warstwach rozciąganych podczas zginania oraz delaminacji, która pojawiła się między tkaninami z włókien szklanych i aramidowych (Rysunek 7). W trakcie badań nie zaobserwowano żadnych efektów mogących wskazywać na inicjację i propagację delaminacji. Zwykle delaminacji towarzyszą wyraźne efekty akustyczne, a te pojawiły się dopiero w punkcie MAX, po przekroczeniu którego próbki ulegały złamaniu. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że zniszczenie laminatu hybrydowego jest zagadnieniem, które wymaga dalszych badań i szczegółowych analiz.



Rysunek 7. Fotografia przekroju poprzecznego próbki po zakończeniu testu zginania ze wskazaniem miejsc uszkodzenia próbki

#### 4. Symulacja zginania próbki laminatu

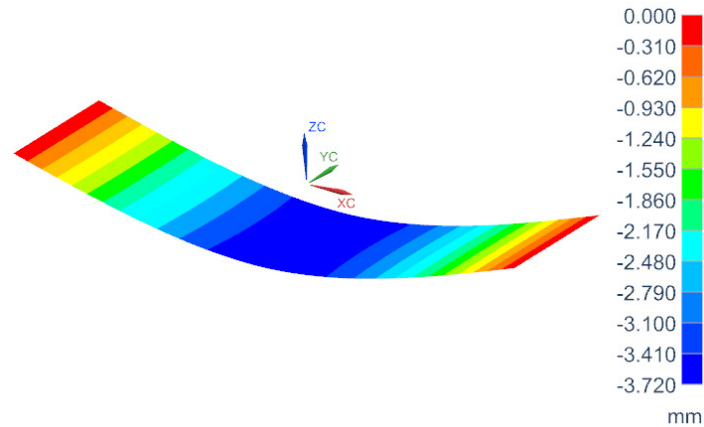
Próbka laminatu została zamodelowana w programie NX za pomocą powierzchniowych czterowęzłowych elementów skończonych typu CQUAD4 (Rysunek 8). Wykorzystując zaimplementowaną w programie metodę *Layup-Ply* zdefiniowano liczbę, rodzaj, grubość i orientację ułożenia poszczególnych warstw wzmocnienia. Dodatkowo wprowadzono udziały objętościowe matrycy w każdej warstwie oraz stałe inżynierskie włókien i matrycy, tj. moduł sprężystości podłużnej i współczynnik Poissona (właściwości materiałowe komponentów zostały dobrane na podstawie rozeznania literaturowego – Tabela 1). Należy zaznaczyć, że tak przygotowany model dyskretny nie uwzględnia mikrostruktury laminatu na poziomie wzmocnienia i matrycy. Charakterystyki modelu są wyznaczane na podstawie właściwości tworzących go warstw. W tym celu wykorzystuje się klasyczną teorię laminowania, która bazuje na założeniach upraszczających [6]. Warunki brzegowe dla modelu zostały zdefiniowane zgodnie z warunkami obowiązującymi podczas zginania doświadczalnego (Rysunek 8). W przypadku lewej podpory pozostawiono możliwość przemieszczenia węzłów modelu wzdłuż osi  $x$  ( $DOFx \neq 0$ ) oraz obrót względem osi  $y$  ( $ROTy \neq 0$ ). Z kolei węzłom znajdującym się w miejscu prawej podpory pozostawiono tylko jedną stopień swobody – obrót względem osi  $y$  ( $ROTy \neq 0$ ).



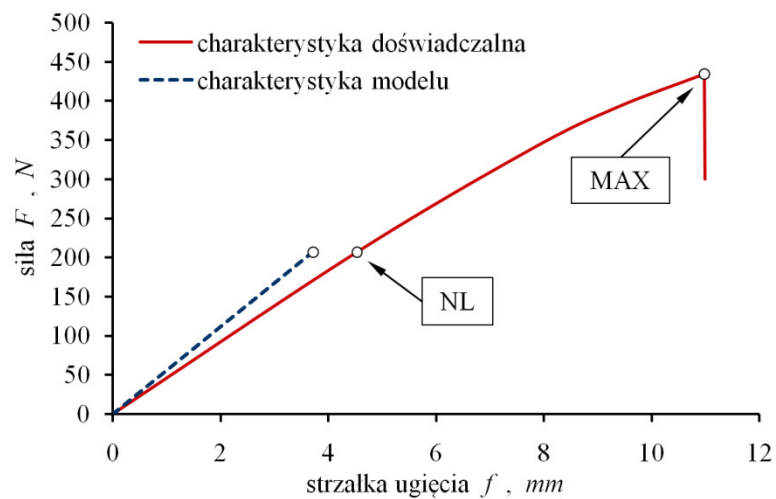
Rysunek 8. Model dyskretny próbki laminatu w programie NX

Zgodnie z głównym celem pracy symulacja zginania sprowadziła się do analizy ugięcia (analizy sztywności) modelu z pominięciem analizy wytrzymałościowej. Dlatego do modelu przyłożono siłę zginającą  $F$  o wartości odpowiadającej punktowi NL na uśrednionej charakterystyce doświadczalnej (Rysunek 6). Model został następnie poddany liniowej analizie strukturalnej MES. Wyniki symulacji przedstawiono w postaci przemieszczeń węzłowych modelu w kierunku osi  $z$  (Rysunek 9). Na podstawie przeprowadzonej symulacji opracowano charakterystykę siła-strzałka ugięcia, którą porównano z uśrednioną charakterystyką doświadczalną (Rysunek 10). Stwierdzono, że model dyskretny nie odwzorował dokładnie liniowej części charakterystyki doświadczalnej. Model ma zawyżoną sztywność zginania. Błąd względny strzałki ugięcia  $f$  dla siły zginającej  $F$  odpowiadającej punktowi NL przyjął wartość 18%.





Rysunek 9. Przesunięcia węzłowe modelu próbki w kierunku osi z dla obciążenia odpowiadającego punktowi NL



Rysunek 10. Porównanie charakterystyki modelu z uśrednioną charakterystyką doświadczalną

## 5. Wnioski i plan dalszych badań

Na podstawie przeprowadzonych analiz i badań sformułowano następujące wnioski:

- wadą laminatów hybrydowych wzmocnianych tkaninami jednorodnymi o różnych modułach sztywności jest wyraźny brak ciągłości odkształceń i naprężeń przy przejściu między warstwami,



- brak ciągłości przemieszczeń na grubości laminatu skutkowało tym, że w każdej przebadanej próbce zaobserwowano delaminację, tj. utratę spójności między tkaninami z włókien szklanych i aramidowych,
- modelowanie laminatu w komercyjnym pakiecie MES z wykorzystaniem metody *Layup-ply* wymaga określenia stałych inżynierskich dla matrycy i włókien wzmocnienia, udziału objętościowego matrycy w każdej laminie oraz grubości i orientacji ułożenia każdej laminy, co komplikuje się w przypadku modelowania laminatu hybrydowego,
- model obliczeniowy nie odwzorował dokładnie sztywności zginania próbki laminatu – maksymalny błąd strzałki ugięcia przyjął wartość 18%, przy czym model zawyżył sztywność próbki laminatu (zastąpienie laminatu hybrydowego materiałem jednorodnym nie przynosi dobrych rezultatów).

Plan dalszych badań:

- podjęcie próby doświadczalnego wyznaczenia modułu sprężystości podłużnej dla włókna szklanego i aramidowego w celu porównania otrzymanych wartości z wartościami literaturowymi – przyczyną nieadekwatności modelu do wyników badań doświadczalnych mogą być zawyżone wartości modułów sztywności włókien (model ma za dużą sztywność zginania),
- uwzględnienie w symulacji zginania kryteriów wytrzymałościowych zakładających pękanie włókien szklanych i aramidowych – proponuje się wykorzystać kryterium odkształceniowe Hashina [7],
- wprowadzenie do modelu elementów kohezyjnych w celu symulacji rozwarstwienia zaobserwowanego podczas badań doświadczalnych.

## LITERATURA

1. BOCZKOWSKA A. i in.: Kompozyty - wydanie II zmienione. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2003.
2. FEJDYŚ M., ŁANDWIJT M.: Włókna techniczne wzmacniające materiały kompozytowe. Techniczne Wyroby Włókiennicze, 1-2(2010), 12-22.
3. IMIELIŃSKA K., WOJTYRA R.: Wpływ absorpcji wody na właściwości laminatów winyloestrowych wzmocnionych włóknem aramidowym i szklanym. Kompozyty (Composites), 3(2003), 192-197.
4. KRÓLIKOWSKI W.: Polimerowe kompozyty konstrukcyjne. PWN, Warszawa, 2012.
5. MARSZAŁEK J., STADNICKI J.: Mesoscopic modelling of unidirectional polymer laminate reinforced with glass roving fabric. W: Engineer of the XXI Century. Mechanisms and Machine Science. Red. Zawiślak S., Rysiński J. Cham, wyd. Springer, (70)2020, 51-60.
6. WILCZYŃSKI A.P.: Polimerowe kompozyty warstwowe. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 1996.

7. YANG Y. i in.: A progressive damage model for predicting damage evolution of laminated composites subjected to three-point bending. *Composites Science and Technology*, 151(2017), 85-93.