

Łukasz Mazurkiewicz lmazurkiewicz@wat.edu.pl
Jerzy Małachowski jerzy.malachowski@wat.edu.pl
Krzysztof Damaziak kdamaziak@wat.edu.pl
Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej,
Wojskowa Akademia Techniczna

PORÓWNANIE METOD MODELOWANIA DELAMINACJI W KOMPOZYTACH WARSTWOWYCH

Streszczenie: Materiały kompozytowe, a w szczególności laminaty, z uwagi na wiele zalet, są wykorzystywane jako materiały konstrukcyjne w wielu dziedzinach przemysłu. Złożona struktura tych materiałów powoduje jednak trudności w analizie elementów złożonych z kompozytów. Bardzo ważne jest odwzorowanie mechanizmów niszczenia kompozytu zarówno włókien jak i osnowy, a w szczególności procesu rozwarstwiania (delaminacji). Celem pracy jest dobór odpowiedniej metody modelowania połączenia między-warstwowego umożliwiającego symulację tego procesu.

MODELLING OF DELAMINATION PROCESS OF LAYERED COMPOSITE – METHODS COMPARISON STUDIES

Abstract: Composite materials, especially laminates, thanks to many advantages are commonly used in many branch of industry. However complex structure of this materials results in troubles with analysis of composite elements. An important matter is to model a failure of composite fiber and matrix, especially a delamination process. The main aim of this paper is to find a suitable method of layer connection modeling with the delamination ability.

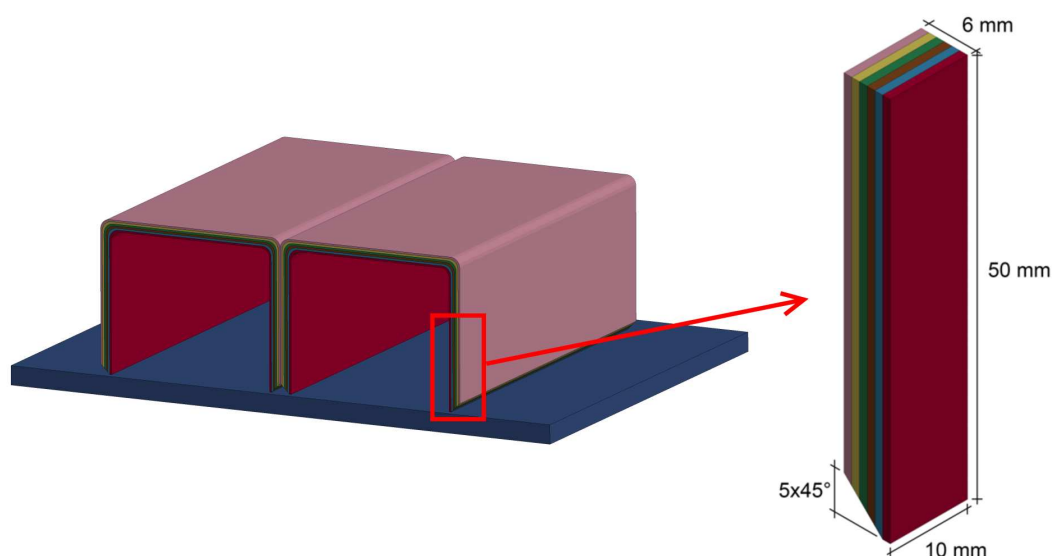
1. WPROWADZENIE

Materiały kompozytowe, a w szczególności laminaty, z uwagi na wiele zalet, są wykorzystywane, jako materiały konstrukcyjne w wielu dziedzinach przemysłu. Cechują się one m.in. wysoką wytrzymałością oraz sztywnością właściwą, odpornością na warunki atmosferyczne oraz coraz niższymi kosztami wytwarzania. Dzięki swoim właściwościom stanowią doskonały materiał na panele energochłonne zmniejszające skutki oddziaływania wybuchu ładunku na elementy konstrukcyjne [1]. Jednak aby uzyskać jak najlepsze właściwości energochłonne projektowanego panelu konieczna jest analiza procesu jego niszczenia oraz optymalizacja strukturalno-materiałowa. Złożona struktura laminatów kompozytowych powoduje jednak trudności w analizie tego typu elementów. Oprócz uwzględnienia ortotropowych właściwości materiałowych bardzo ważne jest odwzorowanie mechanizmów niszczenia kompozytu zarówno włókien jak i osnowy. W szczególności, ze względu na dużą ilość pochłanianej energii, korzystny jest proces progresywnego niszczenia, którego głównym mechanizmem jest rozwarstwienie (delaminacja) poszczególnych warstw kompozytu. Wszystkie wymienione aspekty powodują, że analiza elementów złożonych z laminatów warstwowych wymaga zastosowania bardzo złożonych modeli materiałowych [2,3].

Praca ta przedstawia propozycję analizy elementów kompozytowych przy modelowaniu połączenia międzywarstwowego za pomocą trzech różnych metod. Celem pracy jest dobór odpowiedniej metody modelowania, która umożliwi symulację procesu delaminacji kompozytów warstwowych.

2. OBIEKT BADAŃ

Przedmiotem badań jest prostopadłościenny element kompozytowy, będący wycinkiem projektowanego segmentu energochłonnego, złożony z 6 warstw o grubości 1 mm wykonany z laminatu na bazie żywicy poliestrowej wzmocnionej włóknami szklanymi (Rys. 1). W przypadku struktur energochłonnych, takich jak prezentowany panel, pożądanym jest efekt progresywnego niszczenia elementów składowych struktury. Proces taki można osiągnąć poprzez wymuszenie określonego mechanizmu niszczenia. Najefektywniejsze jest niszczenie poprzez delaminację poszczególnych warstw kompozytu, a następnie ich zginanie. Mechanizm taki w przeciwieństwie do gwałtownego niszczenia powodującego utratę stateczności (np. wyoboczenia ścianek) powoduje utrzymanie stałej, wysokiej siły oporu przy zachowaniu długiej drogi niszczenia, co skutkuje znacznym zwiększeniem ilości pochłanianej energii. W celu wymuszenia procesu delaminacji zastosowano inicjator niszczenia w postaci fazy $5 \times 45^\circ$.



Rys. 1. Przedmiot badań – wycinek kompozytowego segmentu energochłonnego

3. WARUNKI ANALIZY

Główną składową obciążenia działającą na projektowany panel energochłonny będzie siła ściskająca działająca na kierunku normalnym do górnej ścianki segmentu, pochodząca od ładunku wybuchowego. Do celów analizy obciążenie wycinka segmentu zostało zdefiniowane tak, aby zachować charakter wymuszenia. Obciążenie dynamiczne nastąpiło za pomocą ruchu ściany sztywnej o masie „m” i prędkości „v”. Po przeciwnej stronie znajdowała się druga ściana sztywna pozwalająca na niszczenie próbki. Aby uniemożliwić ruch modelu na kierunku poprzecznym nałożono odpowiednie więzy kinematyczne dla górnych węzłów modelu.

Do zamodelowania laminatu kompozytowego użyto modelu konstytutywnego materiału uwzględniającego ortotropowe właściwości mechaniczne oraz umożliwiającego zasymulowanie następujących rodzajów zniszczenia: uszkodzenia włókien, pęknięcia osnowy oraz delaminacji. W badanych modelach użyto danych materiałowych zaczerpniętych z literatury [3].

4. WARIANTY OBLICZEŃ

Analizy numeryczne procesu niszczenia kompozytów wymagają zastosowania odpowiednich modeli materiałowych uwzględniających niszczenie połączenia między kolejnymi warstwami kompozytu. W celu dobrania odpowiedniego typu połączeń wykonano badania testowe następujących modeli, które posłużyły do opisu procesu delaminacji (Tab. 1).

Tab. 1. Warianty prowadzonych obliczeń

Wariant	Rodzaj połączenia warstw laminatu	Model połączenia
A	Algorytm kontaktu ze zniszczeniem	*Contact Automatic Surface To Surface Tiebreak – option 2
B	Algorytm kontaktu ze zniszczeniem i modelem pęknięcia	*Contact Automatic One Way Surface To Surface Tiebreak – option 9
C	Elementy bryłowe „cohesive” o zerowej grubości	*Mat_Cohesive_General (MAT_186)

4.1. Wariant A – Algorytm kontaktu ze zniszczeniem

W pierwszym wariantcie wykorzystane zostało najprostsze rozwiązanie w postaci aplikacji algorytmu kontaktowego uwzględniającego rozerwanie sztywnego połączenia między dwiema powierzchniami (contact tiebreak). Kryterium zniszczenia będące podstawą tego algorytmu jest następujące [4]:

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{N_{FLF}}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{S_{FLF}}\right)^2 \geq 1 \quad (1)$$

gdzie: σ_n – składowa normalna naprężenia kontaktowego, σ_s – składowa styczna naprężenia kontaktowego, N_{FLF} – naprężenia normalne zrywające, S_{FLF} – naprężenia normalne zrywające.

Po przekroczeniu kryterium zniszczenia następuje zerwanie połączenia kontaktowego, algorytm zachowuje się jak standardowy kontakt bazujący na metodzie funkcji kary, czyli nie przenosi sił rozciągających połączenie.

4.2. Wariant B – Algorytm kontaktu ze zniszczeniem i modelem pęknięcia

Rozwinięciem algorytmu kontaktowego opisanego w poprzednim podrozdziale jest algorytm wykorzystujący model pęknięcia (Discrete Crack Model with Power law damage model). Model ten uwzględnia bi-liniową zależność między naprężeniem pochodzącym od sił kohezji w połączeniu a przemieszczeniem związanym z rozwojem szczeliny zarówno na kierunku normalnym (I-mode) jak i stycznym (II-mode) w postaci mieszanej (mixed mode).

Początek procesu niszczenia definiowany jest poprzez przemieszczenie inicjujące δ^0 , które dla modelu mieszanego określa się z zależności [4]:

$$\delta^0 = \delta_I^0 \delta_{II}^0 \sqrt{\frac{1 + \beta^2}{(\delta_{II}^0)^2 + (\beta \delta_I^0)^2}} \quad (2)$$

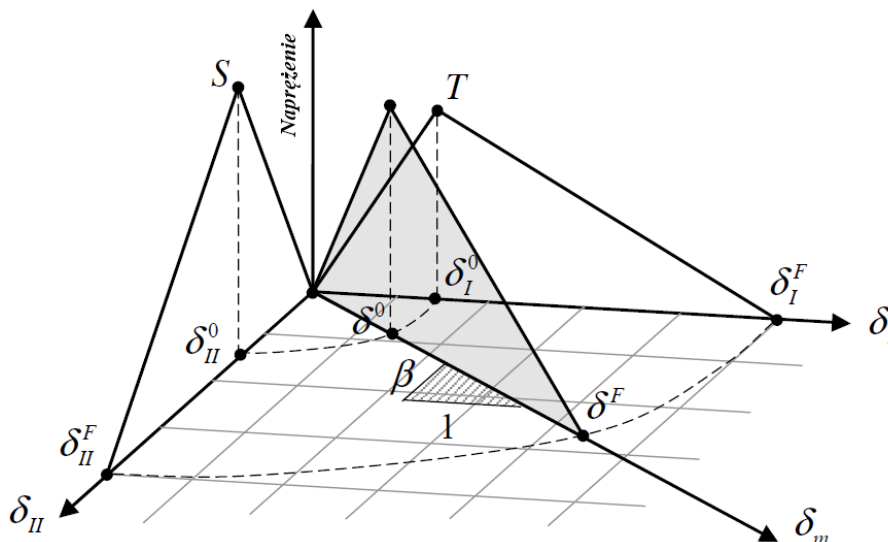
gdzie: δ_I^0 oraz δ_{II}^0 – przemieszczenie inicjujące zniszczenie dla modów I i II, $\beta = \delta_{II} / \delta_I$ – określa udział poszczególnych modów w procesie.

Wartość rozwarcia δ^F powodującego zerwanie połączenia (spadek sił kohezji do zera) opisuje następująca zależność [4]:

$$\delta^F = \frac{2(1+\beta)^2}{\delta^0} \left[\left(\frac{E_N}{G_{IC}} \right)^2 + \left(\frac{E_T \beta^2}{G_{IIC}} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

gdzie: $E_N = T / \delta_I^0$ oraz $E_T = S / \delta_{II}^0$ – sztywność połączenia na kierunku normalnym (N) i stycznym (T), T oraz S – maksymalne wartości naprężeń przenoszonych przez połączenie na kierunku normalnym i stycznym, G_{IC} oraz G_{IIC} – energie zniszczenia połączenia dla modów I i II.

Wykres naprężenie-przemieszczenie dla modu mieszanego przedstawia Rys. 2



Rys. 2. Wykres naprężenie-przemieszczenie dla modu mieszanego [4]

Po osiągnięciu rozwarcia δ^F siły kohezji spadają do zera i podobnie jak w poprzednim wariancie kontakt przekształca się w standardowy kontakt.

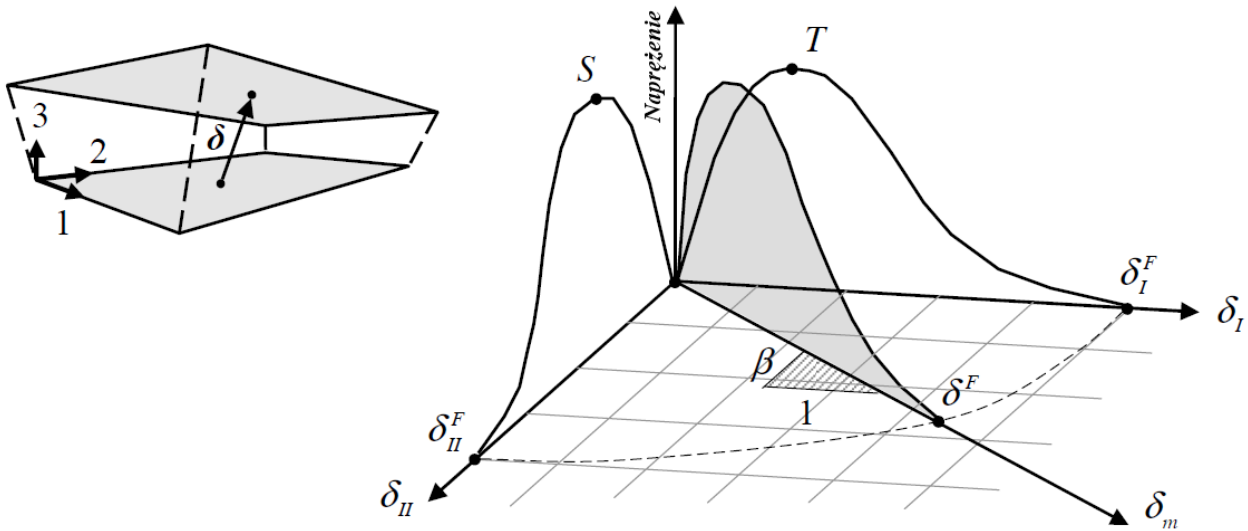
4.3. Wariant C – Elementy bryłowe „cohesive”

Innym podejściem do modelowania delaminacji jest zastosowanie elementów kohezyjnych (cohesive). Są to najczęściej 8-węzłowe elementy bryłowe łączące dwa elementy modelowanego materiału (po 4 węzły wspólne z każdą powierzchnią). Dodatkowo w modelowanym przypadku wykorzystano możliwość zdefiniowania zerowej grubości początkowej. Zachowanie tych elementów opisane jest odpowiednimi modelami konstytutywnymi uwzględniającymi charakter pracy takiego elementu. W niniejszej pracy wykorzystano model Mat_Cohesive_General, który uwzględnia nieliniową zależność między naprężeniem pochodzącym od sił kohezji w połączeniu a przemieszczeniem związanym z rozwojem szczeliny (Rys. 3).

Wartość rozwarcia δ^F powodującego zerwanie połączenia (spadek sił kohezji do zera) jest opisuje następująca zależność [4]:

$$\delta^F = \frac{1 + \beta^2}{A_{TSLC}} \left[\left(\frac{T}{G_{IC}} \right)^2 + \left(\frac{S\beta^2}{G_{IIC}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

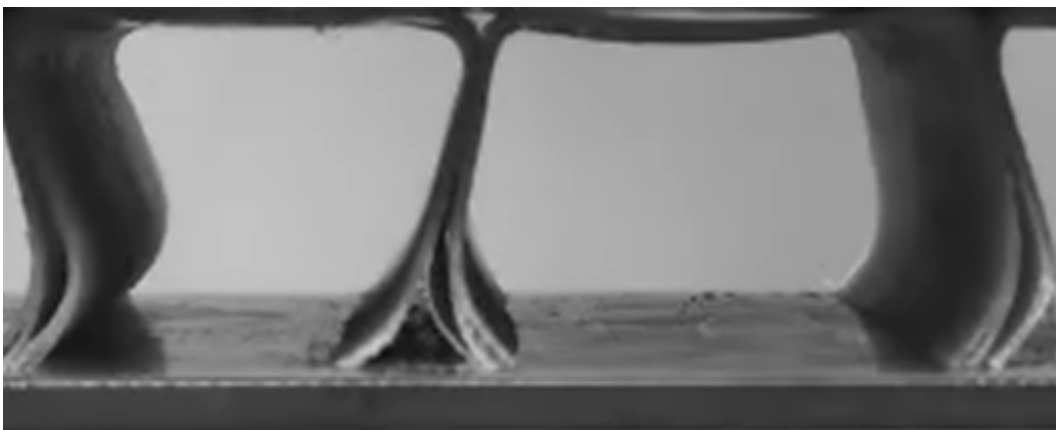
gdzie: A_{TSLC} – pole pod znormalizowaną krzywą naprężenie-przemieszczenie. Zależność ta jest bardzo zbliżona do zależności (3). Po osiągnięciu rozwarcia δ^F siły kohezji spadają do zera i element kohezjny jest usuwany z modelu.



Rys. 3. Element kohezjny oraz wykres naprężenie-przemieszczenie dla modu mieszanego [4]

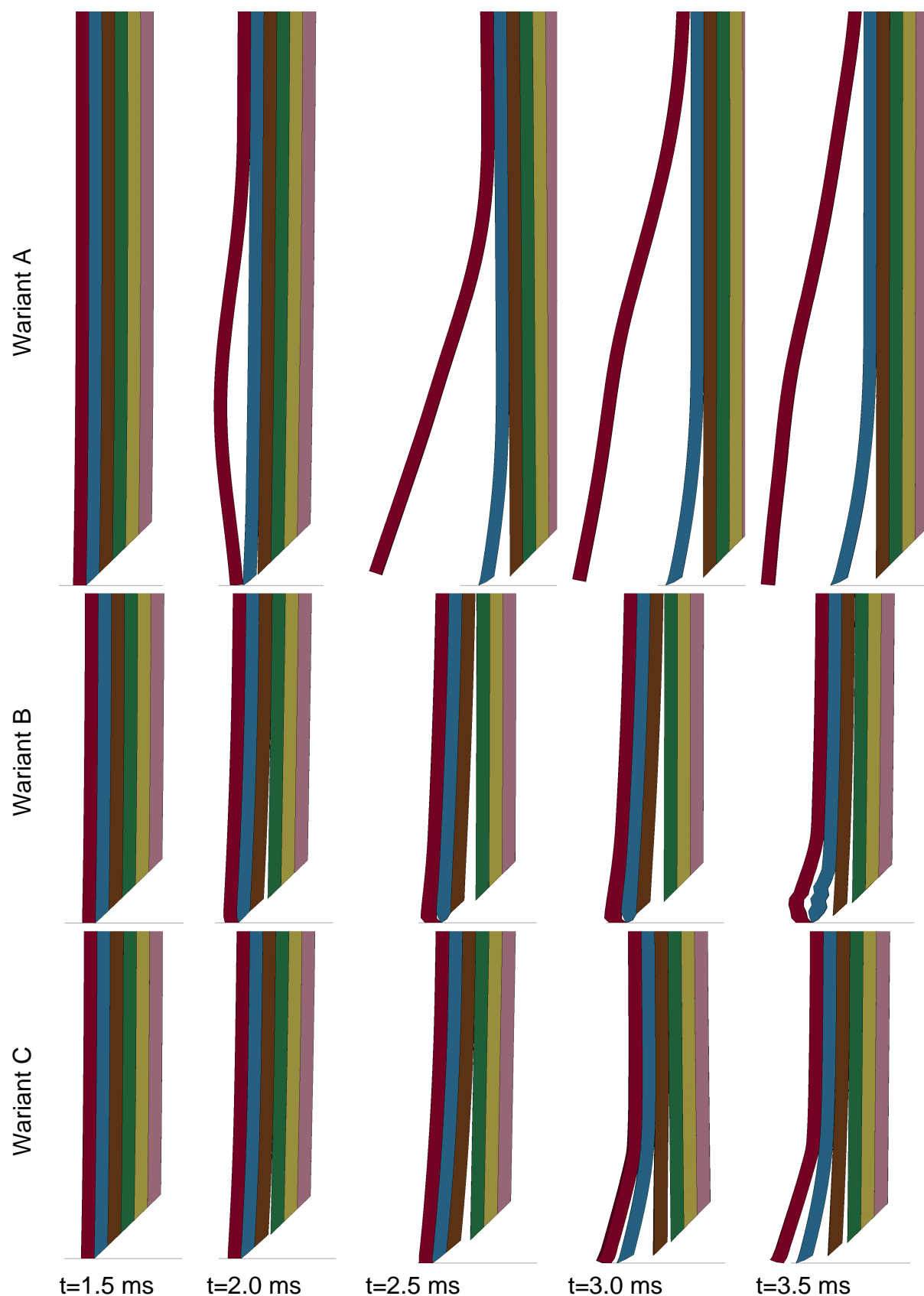
5. WYNIKI BADAŃ

Przykładowe wyniki badań eksperymentalnych pełnych segmentów przedstawione w postaci zdjęcia z początkowej fazy ściskania są następujące (Rys. 4):



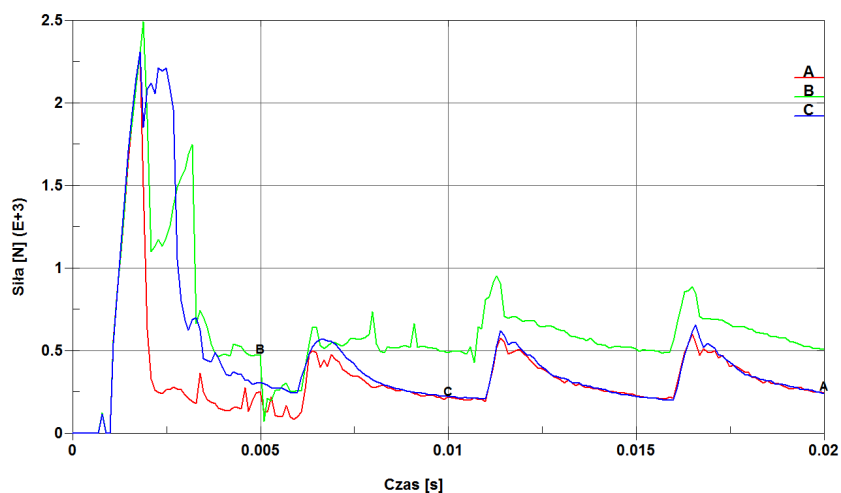
Rys. 4. Przykładowe wyniki badań eksperymentalnych – początkowa faza ściskania [5]

Porównując rzeczywisty mechanizm niszczenia zaobserwowany na stanowisku z postaciami deformacji otrzymanymi z badań numerycznych można dokonać wstępnego jakościowego porównania badanych metod modelowania.



Rys. 4. Postacie deformacji w kolejnych fazach niszczenia.

Uzyskany wykres siły nacisku w funkcji czasu (Rys. 5) pokazuje kolejne momenty, w których dochodzi do kontaktu warstw z podłożem (wzrosty sił), a następnie delaminacji (spadki sił).



Rys. 5. Wykres siły obciążenia w funkcji czasu dla poszczególnych wariantów

6. WNIOSKI

Otrzymane wyniki badań umożliwiają porównanie w sposób jakościowy możliwości modelowania laminatów oraz odzwierciedlenia procesu delaminacji, jaki występuje podczas progresywnego niszczenia. Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że w wariacie A, na skutek nie uwzględnienia dodatkowej energii potrzebnej na rozwój pęknięcia, doszło do gwałtownej delaminacji zewnętrznej warstwy kompozytu, co nie odpowiada rzeczywistemu zachowaniu się laminatu. Model zastosowany w wariacie B zachowywał się poprawnie, jeżeli chodzi o sposób inicjacji delaminacji, natomiast wystąpiły problemy z rozdzieleniem węzłów kontaktujących się z ciałem sztywnym. Rozdzielenie węzłów w tym miejscu było znacznie opóźnione, co wpłynęło na zawyżenie ilości energii pochłoniętej przez element. Rozwiązanie zastosowane w wariacie C jest pozbawione wad występujących w poprzednich przypadkach. Zarówno inicjacja delaminacji, jak i dalsze fazy zniszczenia kompozytu przebiegają sposobem zbliżony do tego, jaki można zaobserwować podczas testów stanowiskowych. Trzeba jednak zaznaczyć, że pełna weryfikacja zaproponowanej metody modelowania kompozytów warstwowych będzie możliwa po walidacji eksperymentalnej utworzonych modeli oraz porównaniu ilości energii pochłoniętej przez model rzeczywisty oraz numeryczny.

7. LITERATURA

- [1] Tekalur S.A., Shukla A., Shivakumar K., Blast resistance of polyurea based layered composite materials, *Composite Structures* 84 (2008) 271–281
- [2] Gama B.A., Gillespie Jr J.W., Finite element modeling of impact, damage evolution and penetration of thick-section composites, *International Journal of Impact Engineering* 38 (2011) 181-197.
- [3] Xiao J. R., Gamma B.A., Gillespie Jr J.W., Progressive damage and delamination in plain weave S-2 glass/SC-15 composites under quasi-static punch-shear loading, *Composite Structures* 78 (2007) 182–196.
- [4] Hallquist J.O.: *LS-Dyna. Theory manual*, California Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- [5] Klasztorny M., Małachowski J., Gotowicki P., Raport Nr 15-586/3/2011: Badania eksperymentalne statyczne energochłonności segmentów kompozytowych. Część 1 – segmenty KSE-1, Warszawa 2011.