



Badania oraz symulacje numeryczne wysokowytrzymałych tkanin

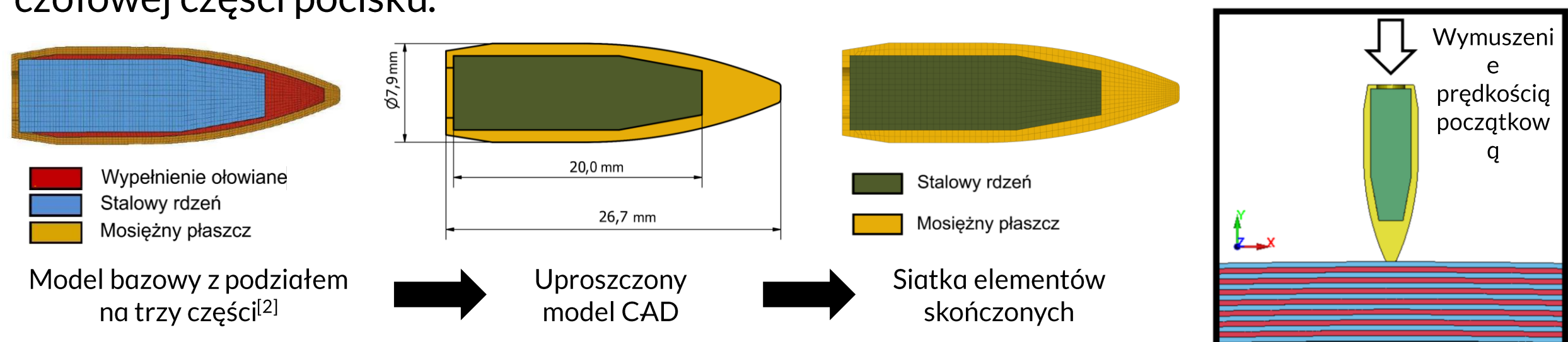
Wstęp

Celem pracy było przeprowadzenie symulacji numerycznej przebiegu pęknięcia płyty balistycznej z materiału Dyneema® HB210 przez pocisk 7,62 × 39 mm PS, bazując na normie STANAG 2920 oraz zbadanie wpływu liczby warstw na uzyskane wyniki.

Na podstawie danych literaturowych opracowano modele geometryczne, utworzono siatkę elementów skończonych oraz zdefiniowano modele materiałowe i warunki początkowo - brzegowe. Przeprowadzono walidację modelu na podstawie danych eksperymentalnych dostępnych w literaturze, a następnie przeprowadzono analizę wpływu liczby warstw na uzyskane wyniki.

Model numeryczny

Opracowano model pocisku 7,62 × 39 mm PS z uproszczoną geometrią. Zastosowano gradację rozmiaru elementów siatki z największym zagęszczeniem w czołowej części pocisku.

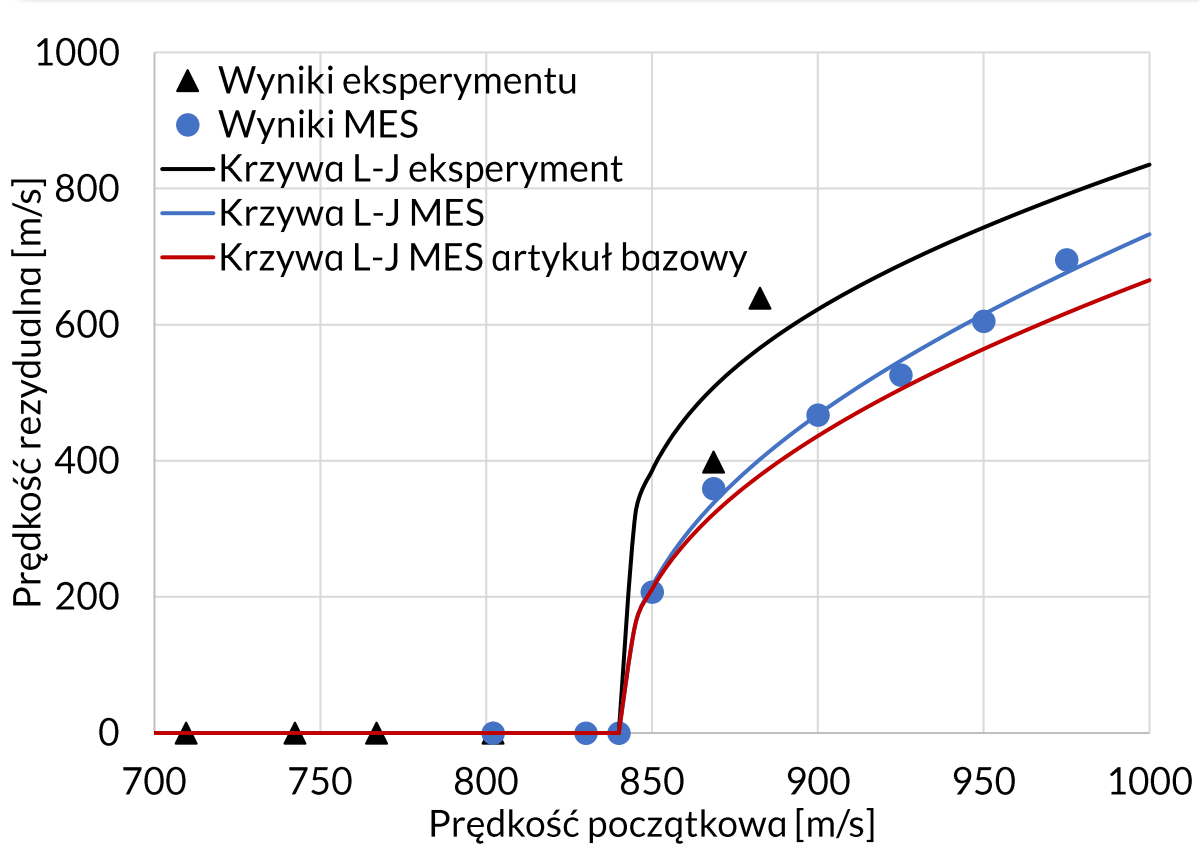


W rzeczywistości płyta kompozytowa składała się z 88 warstw materiału Dyneema® HB210. W modelu numerycznym zastosowano podejście makro-homogeniczne, w którym kilka rzeczywistych warstw zastąpiono jedną warstwą o zastępczych właściwościach materiałowych. Zastosowano gradację rozmiaru siatki z jej zagęszczeniem w miejscu uderzenia pocisku.

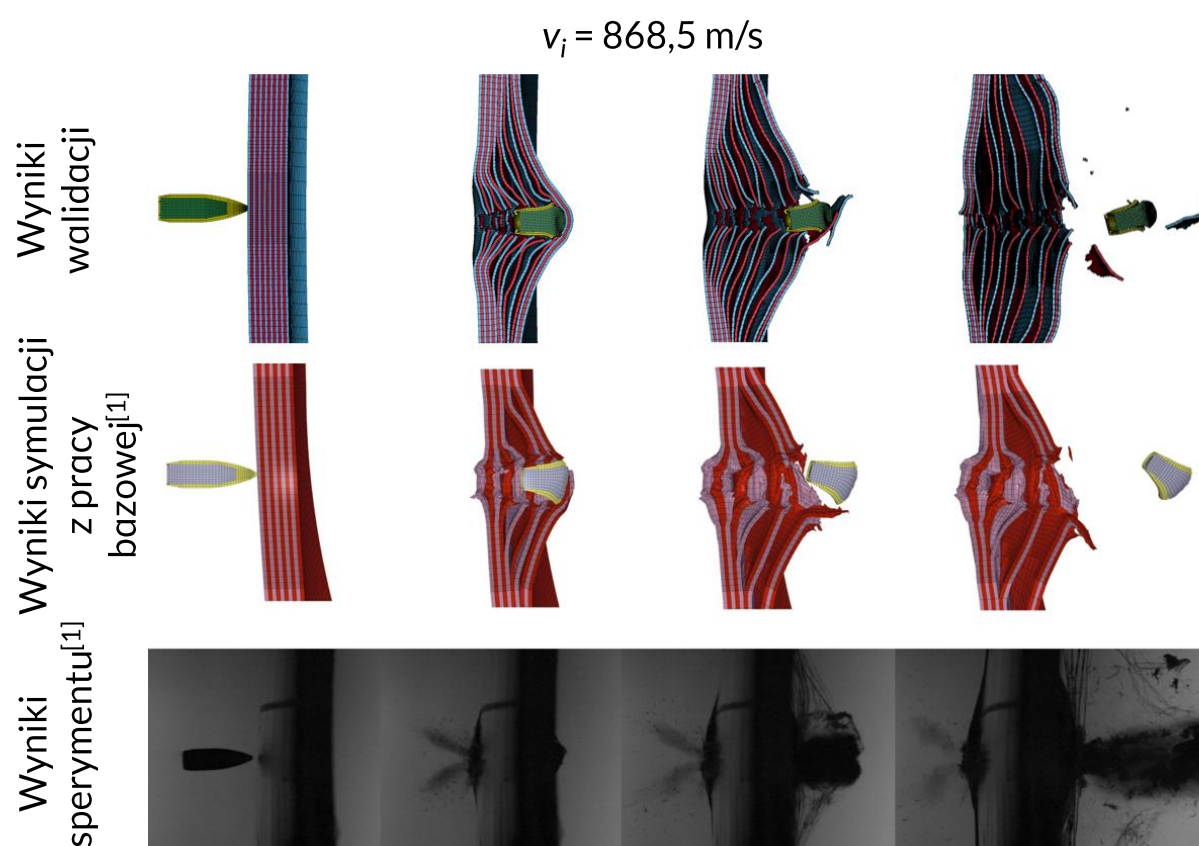
Delaminację między warstwami odwzorowano za pomocą kontaktu typu tiebreak, którego parametry wyznaczono na podstawie danych dostępnych w literaturze oraz metodą prób i błędów podczas walidacji.

Symulacje przebiegu pęknięcia płyty przeprowadzono w środowisku LS-Dyna z wykorzystaniem podejścia jawnego. Przeanalizowano przypadki obliczeniowe dla prędkości początkowych pocisku z zakresu od 802,1 m/s do 975 m/s.

Wyniki walidacji



Zestawienie krzywych L-J uzyskanych w pracy bazowej^[1] oraz w pracy własnej

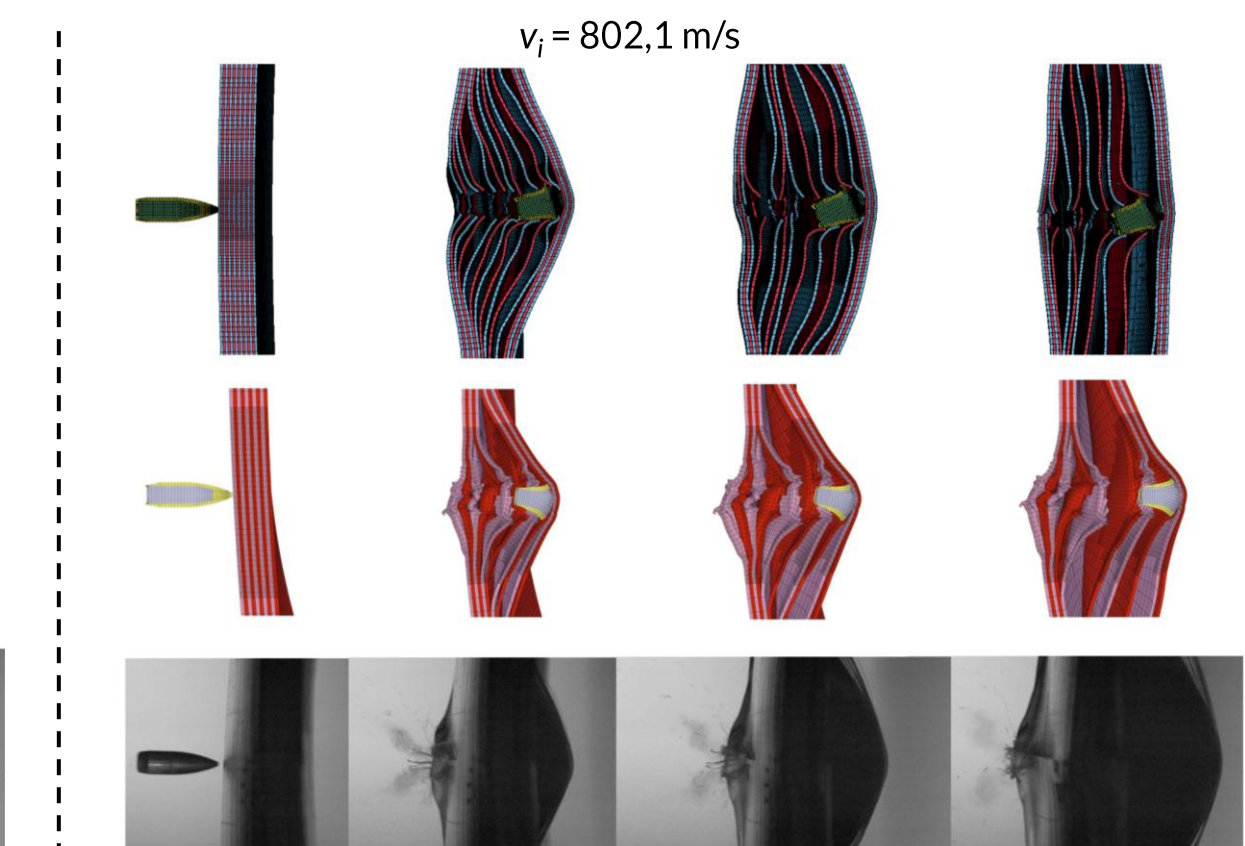


Porównanie wyników w różnych chwilach czasowych

Model walidacyjny składał się z 15 warstw. Walidację modelu numerycznego oparto na porównaniu wyników symulacji z wynikami przedstawionymi w pracy bazowej^[1]. Proces ten obejmował porównanie krzywych Lamberta-Jonasa (L-J), wartości granicznej prędkości balistycznej v_{bl} , deformacji płyty, mechanizmów jej uszkodzenia oraz deformacji rdzenia pocisku.

Model L-J:
$$v_r = a (v_i^p - v_{bl}^p)^{\frac{1}{p}}$$

Gdzie: v_r – prędkość resztkowa, v_i – prędkość początkowa, v_{bl} – prędkość graniczna balistyczna, a – współczynnik dopasowania, p – parametr modelu

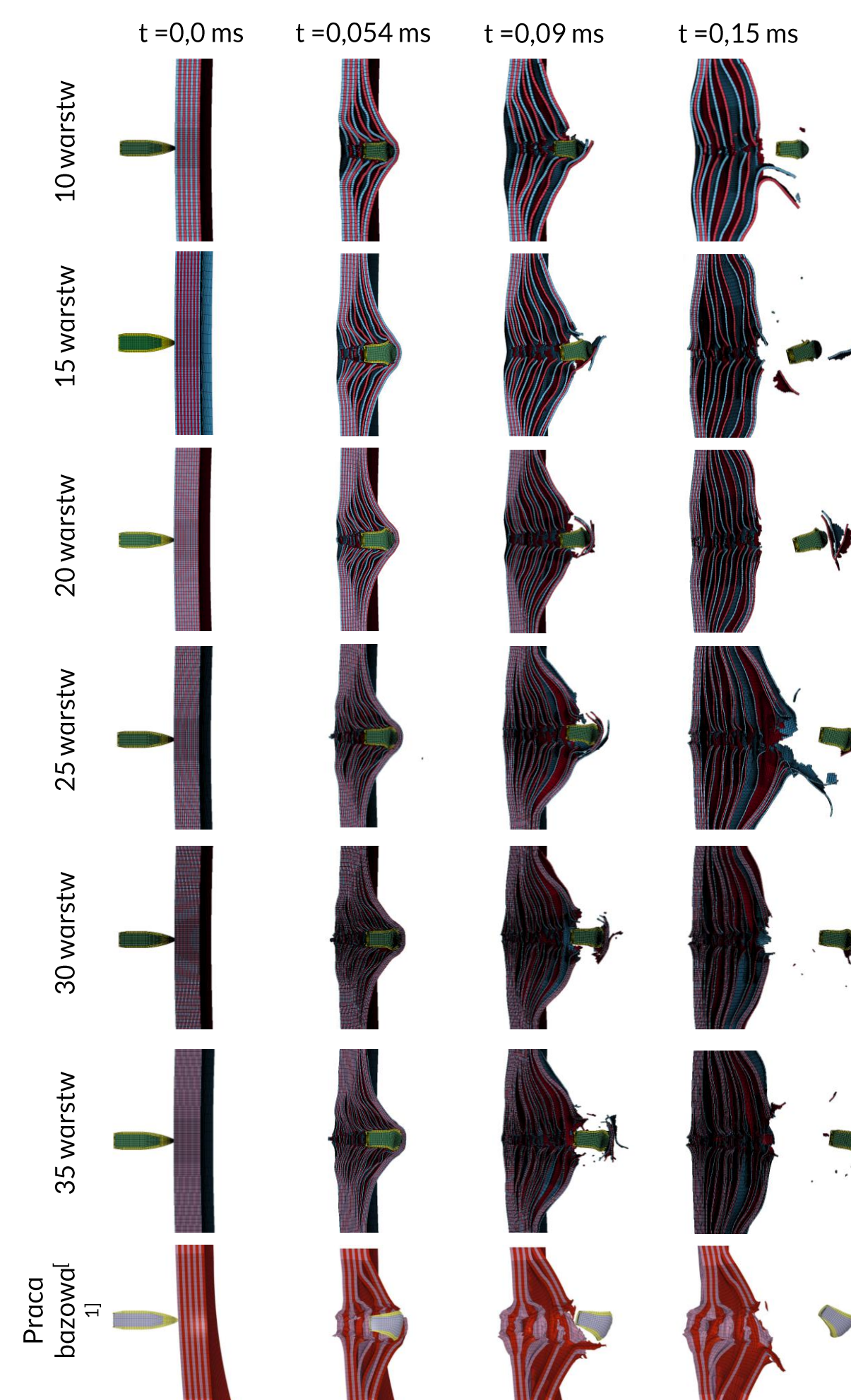


Porównanie wyników w różnych chwilach czasowych

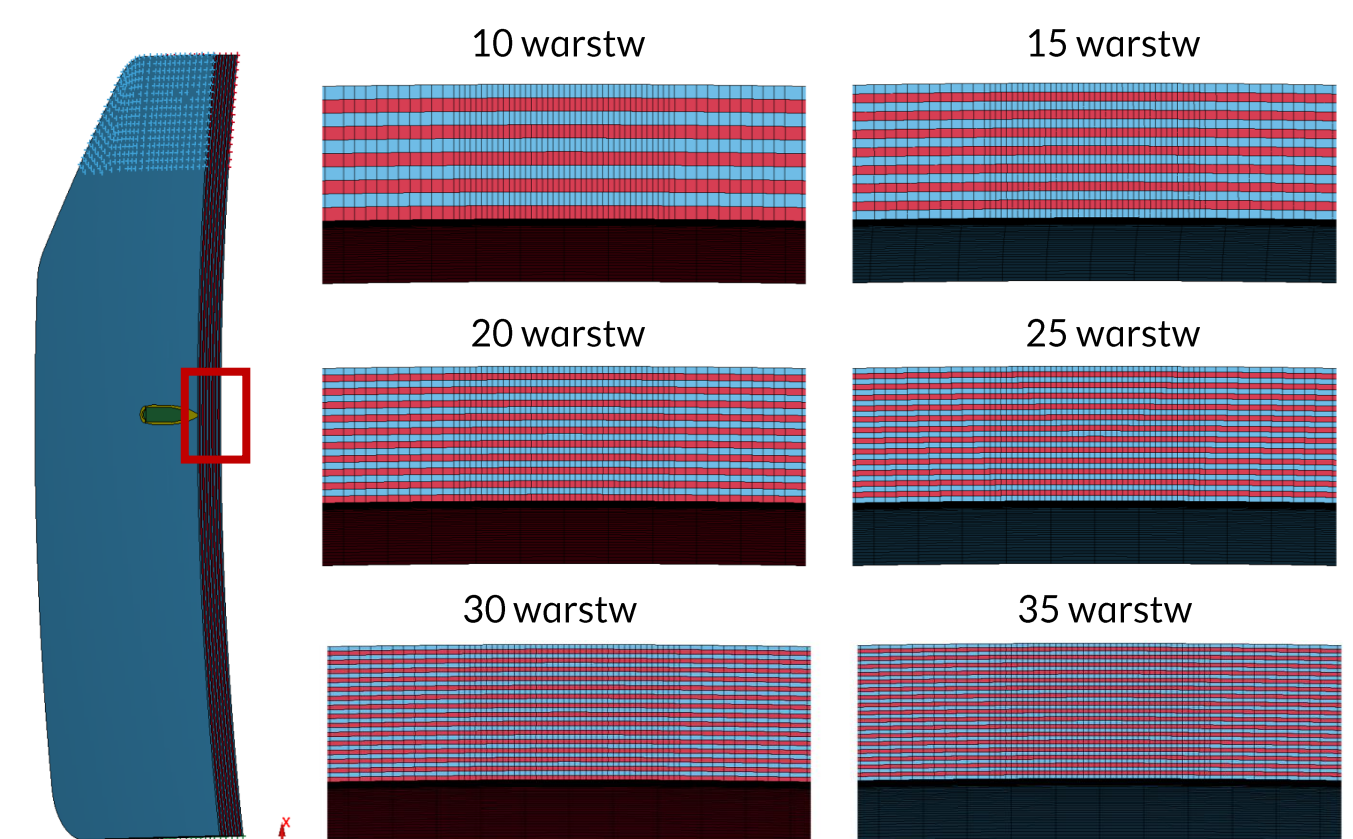
Analiza wpływu liczby warstw

Przeprowadzono analizę wpływu liczby warstw w modelu na uzyskane wyniki. Rozpatrzono sześć różnych konfiguracji modelu, obejmujących od 10 do 35 warstw. Należy podkreślić, że podczas analizy zachowano niezmienny rozmiar elementów skończonych w kierunku podłużnym oraz poprzecznym.

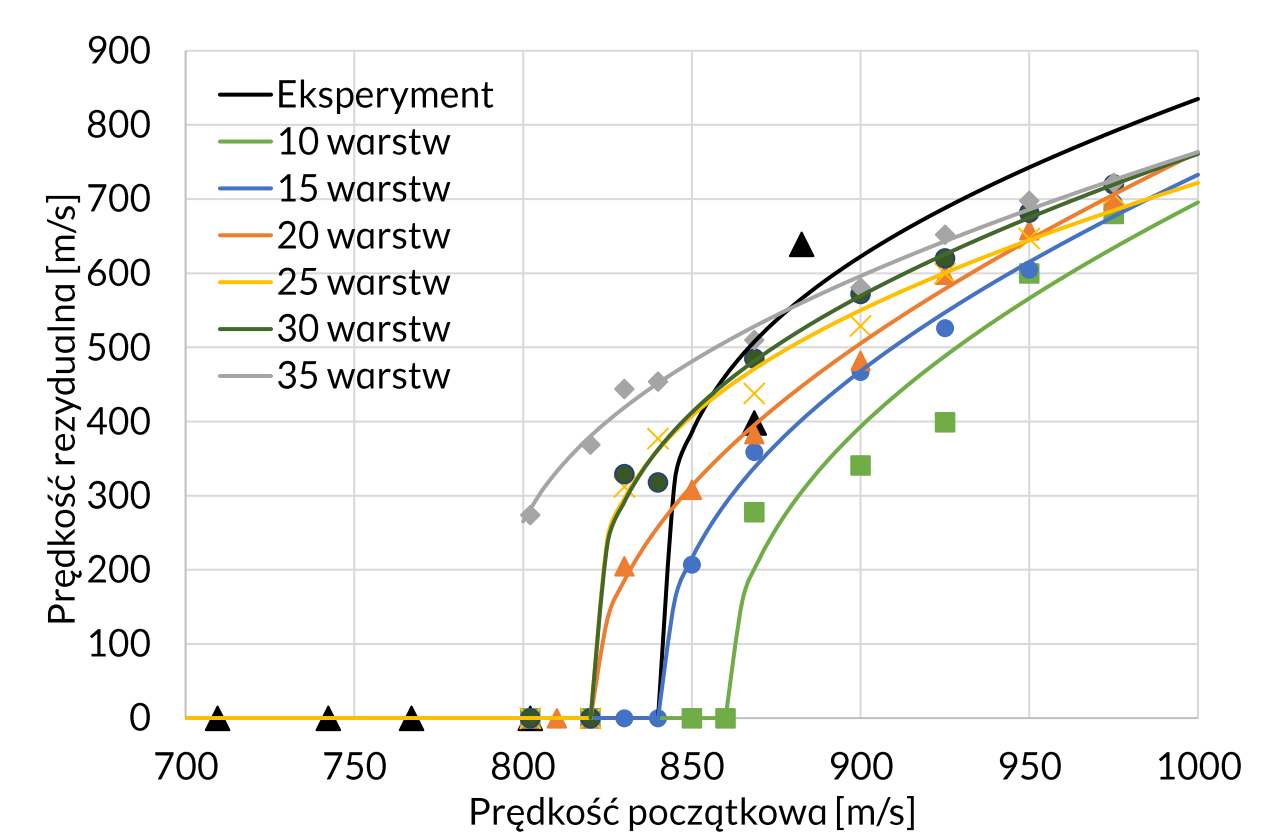
Następnie dla każdej konfiguracji przeprowadzono serię symulacji numerycznych, na podstawie których wyznaczono wartości granicznej prędkości balistycznej oraz określono przebieg krzywych L-J.



Porównanie wyników w różnych chwilach czasowych przy prędkości początkowej $v_i = 868,5$ m/s dla różnej liczby warstw



Siatka elementów skończonych w miejscu trafienia pocisku dla różnej liczby warstw



Zestawienie krzywych L-J uzyskanych w eksperymencie^[1] i symulacjach dla różnej liczby warstw

Liczba warstw	10	15	20	25	30	35
Prędkość początkowa v_i [m/s]	Prędkość rezydualna v_r [m/s]					
802,1	BP	BP	BP	BP	BP	274
810	-	-	BP	-	-	-
820	BP	-	BP	BP	BP	369
830	-	BP	205	312	329	444
840	-	BP	-	377	318	454
850	-	207	308	-	-	-
860	BP	-	-	-	-	-
868,5	278	359	383	438	485	510
900	341	467	482	529	572	581
925	399	526	598	600	620	652
950	600	605	658	647	682	698
975	680	695	699	707	720	722
Graniczna prędkość balistycznej v_{bl} [m/s]	860	840	820	820	820	< 802,1

BP – brak przebiegu

	Eksperyment ^[1]	Liczba warstw					
Prędkość rezydualna v_r [m/s] przy $v_i = 868,5$ m/s	398,2	278	359	383	438	485	510
Różnica [%]	-	30,2	9,8	3,8	10,0	21,8	28,1

Wnioski

- Liczba warstw modelu znacząco wpływa na uzyskane wyniki.
- Przy niższych prędkościach większy udział w pochłanianiu energii miały mechanizmy delaminacji oraz globalna deformacja płyty, natomiast przy wyższych prędkościach dominowało lokalne niszczenie i pękanie włókien kompozytu w miejscu uderzenia pocisku.
- Korelacja parametrów kontaktu wykonana dla jednej konfiguracji modelu nie ma charakteru uniwersalnego, dla każdej liczby warstw konieczne jest indywidualne wyznaczenie parametrów siły krytycznej zerwania kontaktu.
- Najlepszą zgodność pomiędzy wynikami symulacji numerycznych a rezultatami eksperymentalnymi oraz wynikami przedstawionymi w pracy bazowej uzyskano dla 15 i 20 warstw, ale należy zaznaczyć, że model z 15 warstwami był modelem walidacyjnym.
- Dalszy rozwój opracowanego modelu może obejmować analizę deformacji tylnej powierzchni z wykorzystaniem gliny balistycznej, umożliwiając symulację testów zgodnych z określonymi normami.
- W celu zwiększenia dokładności walidacji modeli numerycznych zasadne byłoby wykonanie dodatkowych badań eksperymentalnych.

Źródła:
1. Zochowski P., Numerical Methods for the Analysis of Behind Armor Ballistic Trauma, 12th European LS-DYNA Conference, Koblenz, Germany 2019.
2. Zochowski P., Numerical Methods for the Analysis of Behind Armor Ballistic Trauma, Thin-Walled Structures, 213 (2025) 113265.

Specjalność: **MASZYNY INŻYNIERYJNO-BUDOWLANE I DROGOWE**