

## **DOBÓR LICZBY WARSTW PANCERZA KEVLAROWEGO W NUMERYCZNEJ ANALIZIE PROCESU PENETRACJI POCISKIEM 5,56 MM Z ZASTOSOWANIEM PROGRAMU ANSYS - AUTODYN V12.1.0**

**prof. dr hab. inż. Adam WIŚNIEWSKI\*, mgr inż. Michał GMITRZUK\***

\* Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę numeryczną procesu penetracji pancerza kevlarowego pociskiem 5,56 mm SS109. Analizę przeprowadzono za pomocą programu Ansys - Autodyn v12.1.0 z użyciem metody SPH (dla pocisku) i Lagrange'a (dla pancerza kevlarowego). Zbadano wpływ liczby warstw Kevlaru na penetrację oraz zmianę prędkości pocisku. W symulacjach ostrzału użyto pocisku 5,56 mm SS109 z rdzeniem stalowo-ołowianym oraz płaszczem wykonanym z brązu. Opierając się na przeglądzie literatury przeprowadzono walidację pocisku wykorzystując w tym celu „efekt karoserii”. Wykazano, że przyjęty model pocisku wraz z dobranymi parametrami materiałowymi odpowiada rzeczywistemu pociskowi. Do analizy numerycznej pancerzy kevlarowych przyjęto cztery warianty liczby warstw materiału w miękkim panelu balistycznym. Wyjściowa grubość panelu (12 mm) odpowiadała 40 warstwom tkaniny Kevlaru. Do kolejnych wariantów wzięto odpowiednio 50, 60 i 80 warstw. Wykazano, że wzrost liczby warstw tkaniny Kevlaru powoduje spadek prędkości i długości pocisku. Dla maksymalnej grubości panelu uzyskano spadek prędkości o 663 m/s (72%). Minimalna długość pocisku wyniosła 8,55 mm (63%). Zmianie uległa również prędkość hamowania pocisku. Wykazano, że miękkie panele z użyciem Kevlaru są niewystarczające do powstrzymania pocisku 5,56 mm SS109.

### **1. WSTĘP**

Złożoność symulacji numerycznych uderzenia pocisku w pancerz jest spowodowana przez dużą liczbę parametrów zmiennych takich jak prędkość pocisku, stosunek sztywności do masy, kształt i warunki brzegowe oraz właściwości materiałowe pocisku i pancerza [1]. Dodatkowo wzrost trudności pojawia się w symulacjach penetracji materiałów włókienniczych warstwowych i kompozytowych z powodu ich ortotropowości oraz dużej liczby zmiennych w modelach zniszczenia.

Projektowanie kevlarowych barier balistycznych opartych wyłącznie na modelach fizycznych wymaga dużej liczby danych doświadczalnych, które są czasochłonne i kosztowne. Postępy w kierunku zrozumienia mechanizmów uszkodzeń kompozytów warstwowych umożliwiają uniknięcie wielu badań eksperymentalnych dzięki zastosowaniu symulacji komputerowych, które ostatecznie potwierdza się doświadczalnie.

Jednym z głównych problemów, jakie stwarza modelowanie odpowiedniego zjawiska jest skomplikowana budowa tkanin balistycznych, gdzie dużą rolę odgrywa splot materiału oraz gęstość włókien [1], co jest trudne do modelowania w symulacjach komputerowych.

## 2. SYMULACJE KOMPUTEROWE

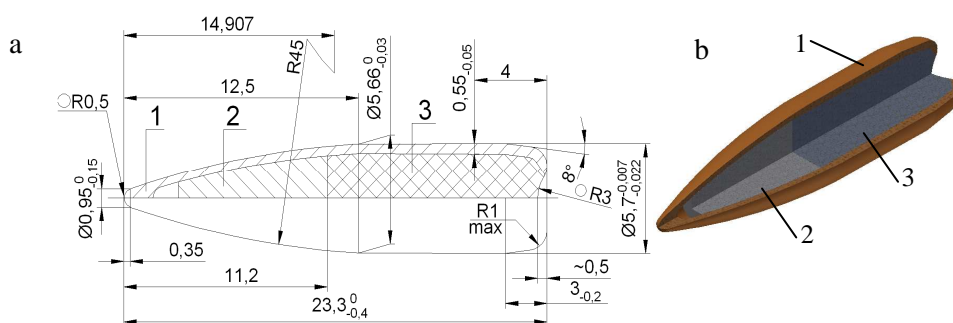
### 2.1. Walidacja modelu pocisku 5,56 mm SS109

W celu wykonania zasadniczej symulacji wnikania pocisku przeprowadzono na podstawie wyników numerycznych i eksperymentalnych [2, 3] wstępną walidację numeryczną uderzenia pocisku 5,56 mm SS109 w blachę pancerną.

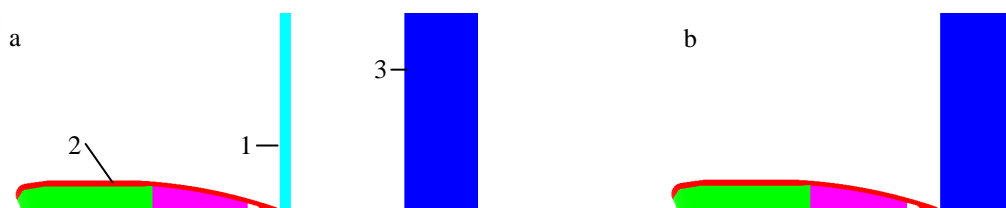
Pocisk 5,56 mm SS109 składa się z rdzenia stalowo-ołowianego i płaszczka mosiężnego (rys. 1). Dla rdzenia przyjęto materiały dostępne w programie Ansys - Autodyn v12.1.0. Stal 4340 (penetrator), dostępna w bibliotece programu charakteryzuje się kompletnym modelem wytrzymałościowym oraz modelem zniszczenia Johnsona-Cooka (JC) (tabela 1). Za rdzeń wypełniacza przyjęto ołów (Lead) zgodnie z modelem wytrzymałościowym Stainberga-Guinana. Dane materiałowe, wytrzymałościowe (modyfikowany JC) oraz dane modelu zniszczenia dla płaszczka mosiężnego przyjęto na podstawie danych literaturowych [3, 4].

W pracach [2, 3] opisano tak zwany „efekt K” (efekt karoserii) obserwowany w opancerzonych samochodach osobowych.

Przeprowadzone w WITU symulacje komputerowe walidacji pocisku 5,56 mm SS109 zakładały dwa warianty: z blachą ze stali niestopowej ( $\neq 1$  mm) poprzedzającą blachę pancerną ( $\neq 6,5$  mm) z dziesięciomilimetrową przerwą (rys. 2-a) oraz bez użycia blachy ze stali niestopowej (rys. 2-b).



Rys. 1. Pocisk kalibru 5,56 mm SS109, a - wymiary pocisku, b - rzut izometryczny z przekrojem, 1 - płaszcz mosiężny, 2 - rdzeń ze stali 4340 (penetrator), 3 - wypełniacz ołowiany



Rys. 2. Model układu pocisku i pancerza dla warunków początkowych wariantów: a - z blachą o grubości 1 mm oraz b - bez cienkiej blachy  
1 – blacha ze stali miękkiej o grubości 1 mm, 2 – pocisk, 3 – blacha pancerna o grubości 6,5 mm

Prędkość pocisku dla wariantu „a” wynosiła 1003 m/s [3]. Wariant „b” zakładał prędkość równą średniej prędkości pocisku po przebiciu cienkiej blachy (960 m/s).

Dane materiałowe oraz model konstytutywny blachy pancernej i blachy ze stali miękkiej (1006) przyjęto zgodnie z danymi literaturowymi [2, 3] oraz dostępnymi w bibliotece programu Ansys - Autodyn v12.1.0.

Symulacje przeprowadzono za pomocą metody Lagrange'a (ciało pokryte siatką przymieszcującą i odkształcającą się wraz z nim). Układ pocisk pancierz przedstawiono w symulacjach dwuwymiarowych.

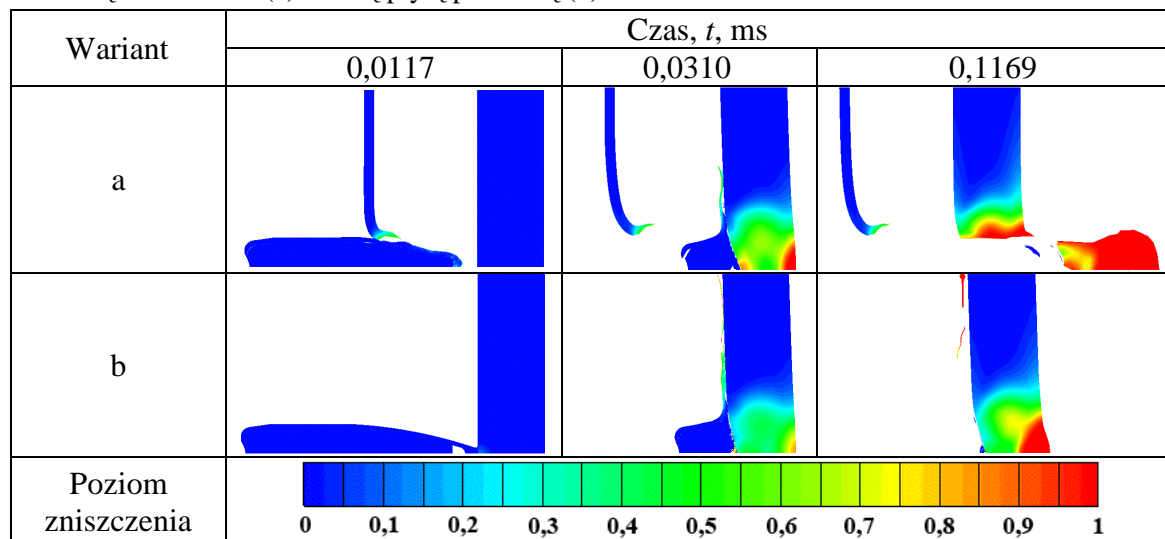
Tabela 1. Model wytrzymałościowy oraz model zniszczenia Johnsona-Cooka stałych materiałowych użytych do symulacji komputerowej

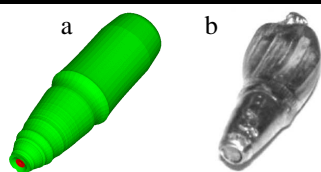
Parametr	Materiał			
	Cienka płyta stalowa (1006)	Stalowy rdzeń (4340)	Mosiężny płaszcz	Płyta pancerna
Model wytrzymałościowy Johnsona-Cooka				
A (MPa)	350	792	206	1299
B (MPa)	275	510	505	2230
n	0,36	0,26	0,42	0,558530
C	0,022	0,014	0,01	0,044474
m	1,00	1,03	1,68	0,961240
Tm [K]	1811	1793	1189	1800
Model zniszczenia Johnsona-Cooka				
D1	0,8	0,05	0,54	0,168040
D2	2,1	3,44	4,89	0,034994
D3	-0,5	-2,12	-3,03	-2,44
D3	0,0002	0,002	0,014	-0,045
D5	0,61	0,61	1,12	0,918998

W wynikach eksperymentalnych oraz numerycznych [2, 3] wykazano, iż pocisk 5,56 mm przebija płytę pancerną o grubości 6,5 mm w przypadku umieszczenia przed nią blachy ze stali 1006, natomiast w przypadku jej braku przebicie nie wystąpiło. Efekt karoserii potwierdzono w symulacjach komputerowych przeprowadzonych w WITU (tabela 2). Zaobserwowano, że pocisk po przejściu przez cienką blachę z miękkiej stali ulega stępieniu poprzez częściowy zgniot czoła płaszczu mosiężnego. Podczas kontaktu pocisku z blachą pancerną naprężenia wywołane przez stępiony pocisk występują na większym obszarze, co skutkuje wybiciem tak zwanego „korka”.

Określono podobny wygląd oraz zachowanie się pocisku po przebicciu cienkiej blachy stalowej (rys. 3). Zaobserwowano zniekształcenia płaszczu oraz wyrzuszenia w tylnej części pocisku powstałe na skutek przemieszczenia się ołowiu.

Tabela 2. Graficzna reprezentacja wyników symulacji ostrzału blachy pancerniej z blachą imitującą karoserię samochodu (a) i samą płytą pancerną (b)





Rys. 3. Pocisk 5,56 mm SS109 po perforacji cienkiej blachy ze stali niskostopowej dla: a - analizy numerycznej przeprowadzonej w WITU, b - badań eksperymentalnych uzyskanych w [2]

Wykazano, że model pocisku jest prawidłowy i umożliwia dalsze prowadzenie analiz komputerowych.

## 2.2. Analiza numeryczna wnikania pocisku w pancerz

W artykule wykonano symulacje numeryczne wnikania pocisku 5,56 mm SS109 (rys. 1) w uproszczony model pancerza kevlarowego o różnej liczby warstw. Analizy numeryczne przeprowadzono za pomocą dwóch metod fizyki komputerowej: SPH (Smooth Particle Hydrodynamic) dla modelu pocisku i metody Lagrange'a (ciało pokryte siatką deformującą i przemieszczającą się wraz z nim) dla modelu pancerza. Dla modelu pancerza przyjęto parametry materiałowe dostępne w programie Ansys - Autodyn v12.1.0 (KEV-EPOXY) (tabela 3). Dla warstwy o grubości 0,3 mm oraz masie powierzchniowej 220 g/m<sup>2</sup> (dane Instytutu Technologii Bezpieczeństwa MORATEX) uzyskano gęstość objętościową 0,733 g/cm<sup>3</sup>, którą przyjęto w symulacjach dla pojedynczej warstwy pancerza.

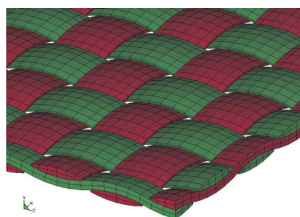
Tabela 3. Zestawienie parametrów dla materiału badawczego (kevlar-epoxy) użytego w symulacjach penetracji pocisku SS109

Parametr	Wartość	Parametr	Wartość
Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	0,733	Moduł ścisłości [MPa]	3267,29
Równanie stanu – materiał ortotropowy		A2 [MPa]	40000
Szywność	Stiffness matrix	A3 [MPa]	0
C11 [MPa]	3252,166	B0	0
C22 [MPa]	13058,26	B1	0
C33 [MPa]	13068,22	T1	3267,29
C12 [kPa]	0,075610	T2	0
C23 [kPa]	0,063199	Temperatura odniesienia [K]	373
C31 [kPa]	0,312318	Ciepło właściwe [J/kgK]	0
Moduł ścinania 12 [MPa]	1000	Model wytrzymałościowy – elastic	
Moduł ścinania 23 [MPa]	1000	Moduł ścinania [MPa]	1000
Moduł ścinania 31 [MPa]	1000	Model zniszczenia – Material Stress/Strain	
Charakterystyka objętościowa	Polynomial		

Badano wpływ liczby warstw panelu pancerza kevlarowego na jego zdolność ochronną przed pociskiem kalibru 5,56 mm SS109. Symulacje przeprowadzono dla czterech wariantów liczby warstw (20, 40, 60 i 80), co odpowiada kolejno 6, 12, 18 i 22 milimetrom grubości panelu. Do analizy przyjęto materiał o wymiarach (długość/szerokość) 400/400 mm z tym, że przeprowadzono ją w symulacji (2D) z użyciem symetrii osiowej. Pozwoliło to na znaczne zmniejszenie czasu potrzebnego do jednej symulacji. Do symulacji przyjęto warunki brzegowe (więzy) na najdalej wysuniętych (od osi symetrii) krawędziach wszystkich warstw Kevlaru. Jako zmienna wyjściowa przyjęta została prędkość pocisku (923 m/s) w punkcie zderzenia z pancerzem.

Warstwy tkanin w panelach balistycznych składają się z włókien splecionych w odpowiedni przeplot, który odgrywa ważną rolę w pochłanianiu energii pocisku. Zjawisko oddzia-

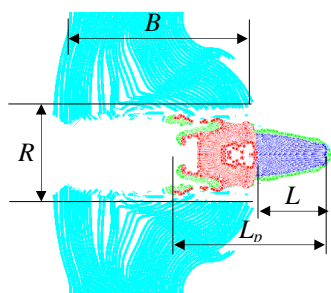
ływania poszczególnych włókien tkaniny jest trudne do odwzorowania matematycznego, a symulacja czasochłonna. Przykładową warstwę tkaniny modelowaną metodą Lagrange'a przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Przykładowa warstwa tkaniny modelowanej metodą Lagrange'a [5]

W symulacjach penetracji pocisku 5,56 mm model pancerza przedstawiono w dużym uproszczeniu, co dodatkowo wprowadza pewien błąd związany z mniejszą dokładnością w odniesieniu do rzeczywistości.

Dla wszystkich wariantów zbadano czas penetracji  $t$ , długość rdzenia stalowego (penetratora)  $L$ , długość całego pocisku  $L_p$ , wybrzuszenie pancerza  $B$ , średnicę otworu wylotowego (rys. 5), liczbę przeбитych warstw  $N$  oraz prędkość rdzenia stalowego  $V$  i pocisku  $V_p$  po przebiciu. Wyniki dla każdego wariantu przedstawiono w tabeli 4. Średnią prędkość pocisku (płaszczka, rdzenia stalowego i ołowianego) w funkcji czasu dla każdego wariantu pokazano na rysunku 6. Rysunek 7 przedstawia średnią prędkość samego rdzenia stalowego. Tabela 5 zawiera graficzną reprezentację wyników.



Rys. 5. Parametry opisujące odkształcenie pocisku i pancerza po zakończeniu symulacji

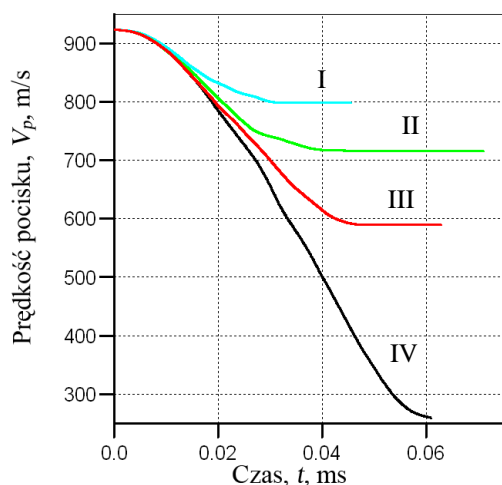
Zmiana grubości panelu wraz ze wzrostem liczby warstw wpływa znacząco na: wybrzuszenie pancerza, długość pocisku oraz prędkość pocisku po przebiciu pancerza.

We wszystkich przypadkach zaobserwowano te same zjawiska deformacji pancerza i pocisku. Przerwanie pierwszych warstw Kevlaru następuje tuż po zetknięciu się pocisku z pancerzem. W wyniku zagłębiania się pocisku naprężenia przekazywane są kolejno z warstwy na warstwę wskutek czego występuje większe pochłanianie energii kinetycznej. W początkowym etapie penetracji następuje deformacja oraz stępienie płaszczka czoła pocisku. Znaczne zwolnienie stalowego rdzenia dla wszystkich wariantów zaobserwowano w czasie około 0,00036 ms (rys. 7-1) po przebiciu 5 warstw materiału. Wybrzuszenie pancerza dla wariantu I nastąpiło w czasie 0,005354 ms. Ze względu na większą liczbę warstw dla kolejnych przypadków czas, po jakim osiągnięto wybrzuszenie pancerza, był większy (odpowiednio 0,005981 ms, 0,007071 ms i 0,009902 ms). Hamowanie pocisku powoduje odkształcanie się rdzenia ołowianego (wypełniacza) na tylnej płaszczyźnie rdzenia stalowego.

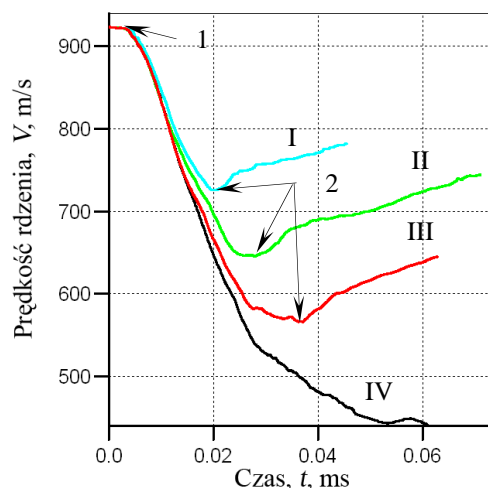
Tabela 4. Parametry poszczególnych wariantów dla różnej liczby warstw pancerza

Wariant		I	II	III	IV
Liczba warstw pancerza		40	50	60	80
Grubość panelu, mm		12	15	18	22
Moment zakończenia symulacji	Ilość warstw przeбитych	40	50	60	80
	Moment przebicia [ms]	0,0200	0,0281	0,0371	0,059
	Długość rdzenia stalowego $L$ [mm]	7,53	7,2	7,09	6,95
	Długość pocisku $L_p$ [mm]	16,65	12,35	9,75	8,55
	Wybrzuszenie pancerza $B$ [mm]	24,85	32	35,09	39,5
	Prędkość rdzenia stalowego $V$ [m/s]	775	744	634	444
	Prędkość pocisku $V_p$ [m/s]	798	716	589	260
	Średnica otworu wylotowego $R$ [mm]	10,15	12	14	15

Deformacja ołowiu powoduje pęcznienie płaszczka, który zostaje zerwany w wyniku naporu kolejnych warstw Kevlaru. Powoduje to duże zniszczenie warstw tkaniny wewnątrz panelu i wzrost średnicy otworu wylotowego. Moment przebicia pancerza charakteryzuje się wzrostem prędkości rdzenia stalowego (rys. 7-2). Wzrost ten spowodowany jest dużym momentem pędu wypełniacza, który dodatkowo „pcha” rdzeń stalowy. Najmniejsze skrócenie pocisku odpowiada najmniejszej liczbie warstw Kevlaru i wynosi 6,65 mm (29%). Wynika to z łatwości pokonania przeszkody przez pocisk. Najkrótszy pocisk uzyskany w symulacjach zaobserwowano dla największej liczby warstw. Długość jego wyniosła 8,55 mm (zmniejszenie długości o 14,75 mm). Długość samego penetratora (rdzenia stalowego) dla wszystkich wariantów nie ulega znaczącej zmianie. Niewielki kaliber pocisku i jego kształt powoduje skuteczne przenikanie kolejnych warstw materiału.



Rys. 6. Średnia prędkość a) pocisku w funkcji czasu dla czterech wariantów grubości panelu



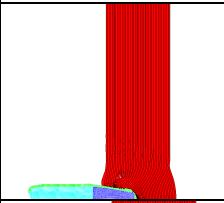
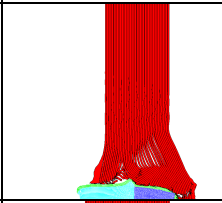
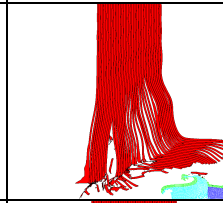
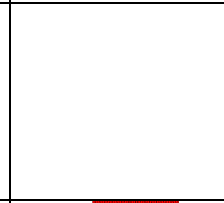
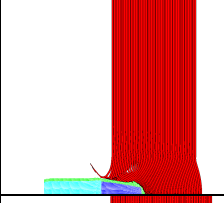
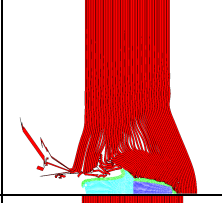
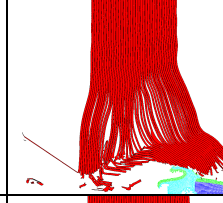
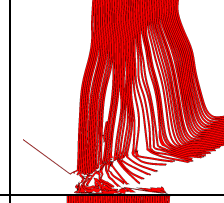
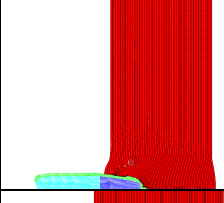
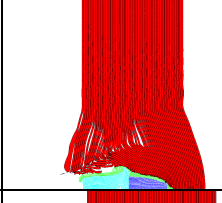
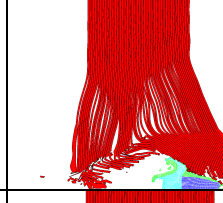
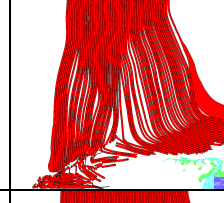
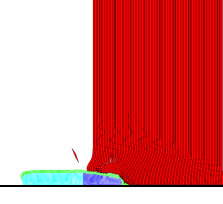
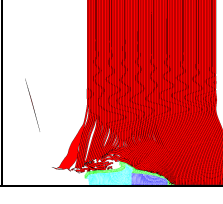
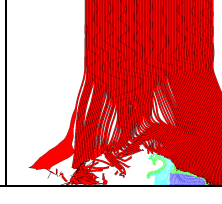
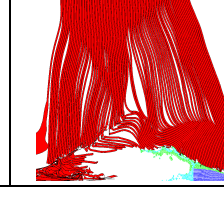
Rys. 7. Średnia prędkość rdzenia pocisku w funkcji czasu dla czterech wariantów grubości panelu, 1 – wyraźne spowolnienie rdzenia pocisku po przebiciu 5 warstw tkaniny, 2 – moment przebicia pancerza

Średnia prędkość pocisku dla wariantu I po przebiciu wszystkich warstw spadła o 123 m/s (13%) w stosunku do prędkości wyjściowej. Największy spadek prędkości uzyskano dla naj-



większej liczby warstw. Prędkość dla wariantu IV spadła o 663 m/s co odpowiada 72%. Zaobserwowano również większą prędkość hamowania pocisku wraz ze wzrostem grubości panelu. Świadczy o tym wzrost nachylenia krzywych w stosunku do osi x (rys. 6, 7).

Tabela 5. Zestawienie graficzne wyników symulacji ostrzału czterech wariantów grubości paneli w poszczególnych krokach czasowych

Wariant	Czas, $t$ , ms			
	0,01	0,025	0,04	0,06
I				
II				
III				
IV				

### 3. WNIOSKI

Na podstawie przeglądu literatury i wykonanych symulacji można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Pocisk 5,56 mm SS109 ze względu na swoją charakterystyczną budowę powoduje powstawanie „efektu karoserii” w opancerzonych samochodach osobowych. Symulacje komputerowe wykazały zgodność modelu pocisku z modelem eksperymentalnym zaczerpniętym z literatury.
2. Z analizy symulacji komputerowej wynika, że panele z wykorzystaniem miękkiego wkładu kevlarowego są mało odporne na penetrację pociskiem 5,56 mm SS109 nawet w przypadku osiemdziesięciu warstw tkaniny.
3. Głównym czynnikiem w penetracji pancerza kevlarowego jest rdzeń stalowy, który nie ulega znacznemu odkształceniu, a jego kształt pozwala na swobodną penetrację w głąb pancerza.
4. Duża deformacja ołowiu na rdzeniu stalowym wynika z większej bezwładności ołowianego wypełniacza oraz z hamowania rdzenia stalowego w trakcie penetracji kolejnych warstw Kevlaru. Ponadto plastyczne płynięcie ołowiu powoduje rozległe zniszczenie sięgające trzech kalibrów pocisku oraz nawet czternastomilimetrową średnicę  $R$  otworu wylotowego.

5. Spadek długości pocisku w odniesieniu do liczby warstw pancerza wynika z deformacji ołowianego wypełniacza. Największe zaobserwowane skrócenie pocisku nastąpiło dla najgrubszego panelu i wyniosło 63% w porównaniu do długości wyjściowej pocisku, która wynosi 23,3 mm.
6. Przebicie pancerza dla wszystkich wariantów nastąpiło w momencie wzrostu prędkości rdzenia stalowego pocisku. Czas potrzebny na penetrację panelu wzrastał wraz ze zmianą grubości pancerza i wynosił odpowiednio dla 40, 50, 60 i 80 warstw:
  - 0,02 ms,
  - 0,03 ms,
  - 0,037 ms,
  - 0,059 ms.
7. Wybrzuszenie pancerza *B* dla 80 warstw tkaniny wyniosło około 39,5 mm. Duża liczba warstw dla IV wariantu spowodowała rozprzestrzenienie się energii na większą powierzchnię, jednak nie powstrzymało to dalszej penetracji pocisku.

## LITERATURA

- [1] Silva M. A. G., Cismasiu C., Chiorean C.G.: Numerical simulation of ballistic impact on composite laminates, *International Journal of Impact Engineering* 31 (2005) s. 289–306.
- [2] Nsiampa N., Coghe F., Dyckmans G.: Numerical investigation of the bodywork effect (K-effect), *DYMAT 2009* (2009) s. 1561–1566.
- [3] Adams B.: Simulation of ballistic impacts on armoured civil vehicles, PhD thesis, MT 06.03, The Netherlands (2006).
- [4] Borvik T., Dey S., Clausen A. H.: Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles, *International Journal of Impact Engineering* 36 (2009) s. 948–964.
- [5] Duana Y., Keefe M., Bogetti T.A., Powers B.: Finite element modeling of transverse impact on a ballistic fabric, *International Journal of Mechanical Sciences* 48 (2006) s. 33–43.

Praca została współfinansowana przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego (Projekt „Inteligentne pancerze pasywne z zastosowaniem cieczy reologicznych ze strukturami nano” Nr umowy UDA-POIG.01.03.01-00-060/08-00) i wykonana w ramach konsorcjum pomiędzy Instytutem Technologii Bezpieczeństwa “MORATEX”, Politechniką Warszawską i Wojskowym Instytutem Technicznym Uzbrojenia.