

Numeryczna analiza odporności balistycznej aramidowych tkanin trójosiowych

Numerical analysis of ballistic resistance of the triaxial aramid fabrics

JUSTYNA DOMINIAK
ZBIGNIEW STEMPIEŃ*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.7.327

Oslony balistyczne wymagają kompleksowego zweryfikowania ich parametrów odpowiadających za bezpieczeństwo. Weryfikację przeprowadza się eksperymentalnie w tunelu balistycznym, z użyciem znormalizowanego podłoża. W pracy przedstawiono numeryczną analizę odporności balistycznej aramidowych tkanin trójosiowych z kevlaru 29, poddanych ostrzałowi pociskami Parabellum 9 × 19 mm FMJ. Metodą elementów skończonych badano uderzenie pocisku w wielowarstwowy pakiet balistyczny wykonany z wymienionej tkaniny, którą najpierw poddano szczegółowej analizie wymiarowej z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego OLYMPUS SZX-10, aby odwzorować jej model geometryczny. Badania symulacyjne uderzenia pocisku w pakiet balistyczny składający się z 4, 8, 12, 16, 20 i 24 warstw przeprowadzono w środowisku LS-DYNA. Analizowano maksymalną wysokość stożka odkształcenia oraz energię resztkową pocisku. **SŁOWA KLUCZOWE:** tkaniny trójosiowe, metoda elementów skończonych

The bulletproof vests require a thorough analysis of the safety performance parameters, which is carried out in a ballistic tunnel using normalized grounds. This paper presents numerical analysis of ballistic resistance of the triaxial aramid fabrics kevlar 29 which have been subjected to hitting with Parabellum FMJ 9 × 19 mm round. Finite elements method was applied to analyze effect of the impact on ballistic package samples prepared from the said fabric which had been subjected before to detailed inspection of the dimensions under stereo microscope Olympus SZX-10. Dimensions of the fabric allowed for development of geometric model of triaxial fabric. Simulation tests of bullet impacts on ballistic packages consisting of 4, 8, 12, 16, 20, 24 layers respectively were carried out in an LS-DYNA environment. Maximum height of the cone deformation and the residual energy of bullet were analyzed.

KEYWORDS: triaxial fabric, finite element method

Tradycyjne tkaniny stosowane na osłony balistyczne mają struktury o splocie płóciennym. Tkanina płócienna charakteryzuje się ortogonalnymi właściwościami mechanicznymi, wynikającymi z jej dwuukładowej budowy (wzdłuż osnowy i wzdłuż wątku). Podczas uderzenia pocisku w tkaninę dwuosiową energia kinetyczna jest absorbowana przez nitki osnowy i wątku kontaktujące się z czołem pocisku.

W artykule przedstawiono wyniki badań numerycznych tkaniny trójosiowej, gdyż istnieją przesłanki do stwierdzenia, że w porównaniu z tkaniną dwuosiową może wykazywać lepszą kuloodporność i znacząco minimalizować poziom traumy balistycznej, decydujący o fizjologicznych skutkach udaru. Tkaniny trójosiowe mają w swojej strukturze trzy układy nitek, co w porównaniu z tkaninami dwuosiowymi zwiększa ich stopień izotropii i rozkładu naprężenia wokół punktu uderzenia pocisku. W splocie tkaniny trójosiowej jeden układ nitek osnowy znajduje się zawsze nad drugim układem nitek

osnowy i krzyżuje się z nim pod kątem 60°. Klasyczna tkanina trójosiowa odznacza się dobrą stabilnością wymiarów, jednakże jest porowata.

W literaturze znajduje się wiele przykładów modelowania numerycznego tkanin balistycznych, głównie struktur dwuosiowych o splocie płóciennym. Badaniami symulacyjnymi uderzenia pocisku w jednowarstwowy pakiet balistyczny wykonany z twaronu zajmowali się Lim i in. [1]. Autorzy przyjęli parametry materiałowe na podstawie publikowanych badań eksperymentalnych, a badania numeryczne przeprowadzili w środowisku LS-DYNA, wyznaczając prędkość resztkową i energię kinetyczną pocisku absorbowaną przez warstwę. W modelu dyskretnym pominięto tarcie pomiędzy nitkami wątku i osnowy oraz efekt wyciągania ze struktury nitek kontaktujących się z pociskiem.

Wiśniewski i Gmitrzuk przedstawili wyniki badań numerycznych uderzenia pocisku Parabellum 9 × 19 mm FMJ w pakiet balistyczny składający się z 16 warstw twaronu CT709 [2]. Komputerowy model tkaniny o splocie płóciennym autorzy wykonali w programie Autodesk Inventor Professional 2012. Wymiary części składowych – tj. grubość tkaniny oraz szerokość i wysokość przekroju poprzecznego nitki – przyjęli na podstawie danych katalogowych firmy Teijin. W badaniach symulacyjnych autorzy analizowali wpływ rodzaju zamocowania pakietu balistycznego na rozkład naprężeń i deformację pocisku. Jako warunki brzegowe dla modelu tkaniny przyjęli zamocowane na stałe peryferyjne krawędzie pakietu i rogi tkaniny, przy czym badali trzy warianty:

- cztery rogi tkaniny zamocowane,
- dwie krawędzie tkaniny zamocowane,
- wszystkie krawędzie tkaniny zamocowane.

Symulacje przeprowadzone dla tych trzech wariantów pokazały, że pod wpływem uderzenia pocisku w tkaninie występuje charakterystyczny stan zginania nitek.

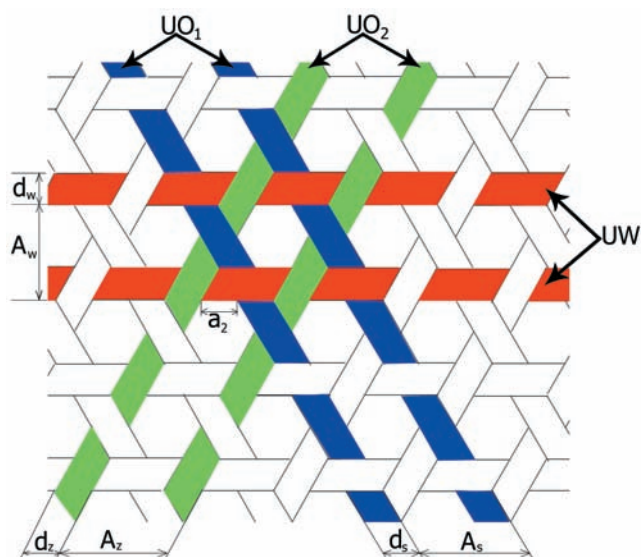
Badaniami numerycznymi uderzenia pocisku Parabellum 9 × 19 mm FMJ w ciało człowieka chronione przez membranowy model pakietu balistycznego twaron CT709 zajmowali się Dominiak i Stempień [3]. Ich celem było opracowanie modelu dyskretnego „pocisk Parabellum 9 × 19 mm – tekstylna osłona balistyczna – ciało człowieka” oraz analiza skutków udaru balistycznego dla różnych konstrukcji osłon. W modelu autorzy uwzględnili najważniejsze organy decydujące o utrzymaniu funkcji życiowych. Poszczególne warstwy kamizelki kuloodpornej modelowali jako dopasowane powłoki, wykorzystując specjalistyczne oprogramowanie do projektowania odzieży na podstawie cyfrowego modelu człowieka. Symulacje przeprowadzone w środowisku LS-DYNA pokazały, że redukcja skutków udaru balistycznego podczas uderzenia pocisku wymaga nie tylko zastosowania wysokowytrzymałych włókien, lecz także dobrania wystarczającej liczby warstw tkaniny w pakiecie.

Na podstawie przeglądu literatury stwierdzono, że w przypadku modelowania metodą elementów skończonych uderzenia pocisku w pakiet balistyczny konieczny jest kompromis pomiędzy precyzją odwzorowania przeplatanej struktury geometrycznej tkaniny a prędkością obliczeń numerycznych. W modelowaniu numerycznym istotne jest zwłaszcza przyjęcie odpowiednich modeli i parametrów materiałowych.

* Mgr inż. Justyna Dominiak (justyna.dominiak@p.lodz.pl); dr hab. inż. Zbigniew Stempień, prof. PŁ (zbigniew.stempien@p.lodz.pl) – Instytut Architektury Tekstyliów Politechniki Łódzkiej

Model geometryczny tkaniny trójosiowej z kevlaru 29

Model geometryczny tkaniny trójosiowej do badań symulacyjnych opracowano na podstawie rzeczywistych wymiarów tkaniny z nitek para-aramidowych kevlar 29 (1500 denier), wykonanej przez firmę Triaxial Structures Inc. (USA). Liczba nitek na cal w dwóch układach osnów i w układzie wątku wynosiła $9 \times 9 \times 9$, a masa powierzchniowa 200 g/m^2 . W modelu geometrycznym tkaniny uwzględniono zależności wynikające z jej modelowego widoku przedstawionego na rys. 1. Założono więc jednakową geometrię nitki i podziałkę w układach osnów i wątku oraz kształt oczka tkaniny jako sześciokąt foremny.



Rys. 1. Widok tkaniny trójosiowej: UO_1 – układ osnowy skierowanej pod kątem $+60^\circ$ względem nitki wątku, UO_2 – układ osnowy skierowanej pod kątem -60° względem nitki wątku, UW – układ wątku, A_w – podziałka nitki wątku, A_z – podziałka nitki osnowy skierowanych pod kątem -60° względem nitki wątku, A_s – podziałka nitki osnowy skierowanych pod kątem $+60^\circ$ względem nitki wątku, d_w – średnica nitki wątku, d_z – średnica nitki osnowy pod kątem $+60^\circ$ względem nitki wątku, d_s – średnica nitki osnowy pod kątem -60° względem nitki wątku, a_2 – długość boku oczka w tkaninie trójosiowej

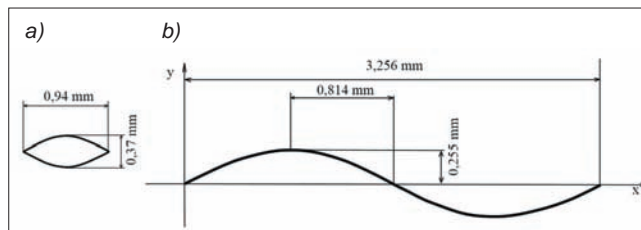
W celu odwzorowania geometrii nitki tworzącej rzeczywistą tkaninę trójosiową, tkaninę poddano szczegółowej analizie wymiarów, wykonanej pod mikroskopem stereoskopowym OLYMPUS SZX-10. Badanie polegało na obserwacji mikroskopowej oraz zwymiarowaniu przekrojów podłużnych i poprzecznych nitki tkaniny. Przykładowy obraz uzyskany w trakcie tego badania przedstawiono na rys. 2 – widać na nim przekroje poprzeczne nitki osnowy i przekrój wzdłużny nitki wątku.

Na podstawie wyników analizy mikroskopowej wyznaczono średnie wartości wysokości i szerokości przekroju poprzecznego nitki tworzącej rzeczywistą tkaninę trójosiową oraz średnie wartości amplitudy i okresu w sinusoidalnym przebiegu nitki w obu układach osnowy oraz w układzie wątku (rys. 3).

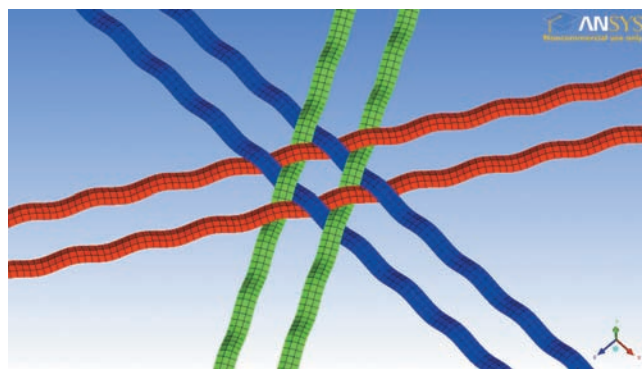
Wyznaczone w ten sposób wymiary przekroju poprzecznego oraz parametry sinusoidalnego przebiegu nitki posłużyły do odwzorowania jej modelu 3D w programie ANSYS ICEM CFD. Za pomocą narzędzi tego programu odpowiednio powielono nitki jednego układu o wartość podziałki $2,822 \text{ mm}$, a następnie cały układ powielono dwukrotnie, obracając go o kąt $+60^\circ$ i -60° . Na rys. 4 pokazano strukturę geometryczną tkaniny trójosiowej dla dwóch nitki w poszczególnych układach, otrzymaną według opisanej metodyki. Docelowo do dalszych badań symulacyjnych opracowano model geometryczny tkaniny trójosiowej o wymiarach $20 \times 20 \text{ cm}$.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny tkaniny trójosiowej



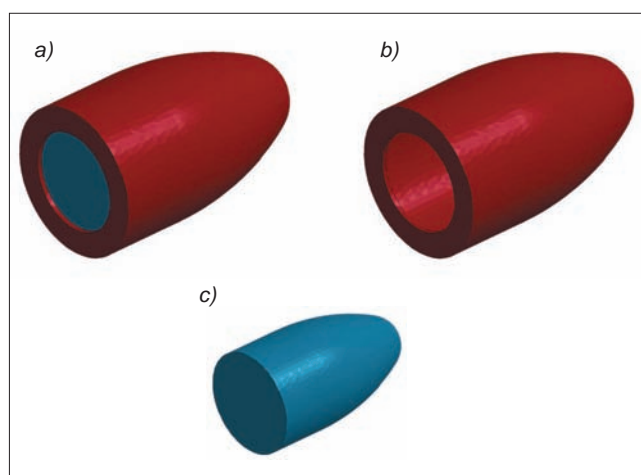
Rys. 3. Geometria modelu tkaniny trójosiowej: a) wysokość i szerokość przekroju poprzecznego nitki, b) amplituda i okres w sinusoidalnym przebiegu nitki



Rys. 4. Widok struktury geometrycznej tkaniny trójosiowej

Model geometryczny pocisku Parabellum $9 \times 19 \text{ mm FMJ}$

Nabój pistoletowy Parabellum $9 \times 19 \text{ mm FMJ}$ po raz pierwszy został wykonany w 1902 r. przez Georga Lugera w wytwórni Deutche Waffen und Munitionsfabrik. Na podstawie dostępnych danych fabrycznych opracowano w programie ANSYS DesignModeler model geometryczny tego pocisku (rys. 5a). Modelowano zarówno płaszcz pocisku, jak i jego rdzeń (rys. 5b i c).



Rys. 5. Model geometryczny pocisku Parabellum $9 \times 19 \text{ mm FMJ}$, płaszcz (b) oraz rdzeń pocisku (c)

Model dyskretny tkaniny trójosiowej z kevlaru 29

Model geometryczny tkaniny trójosiowej poddano procesowi dyskretyzacji w programie ANSYS ICEM CFD. Zastosowano siatkę elementów skończonych typu HEXA – maksymalna wielkość węzła wynosiła 0,4 mm. Otrzymano model dyskretny (rys. 6), przyjęto model materiałowy *MAT_PLASTIC_KINEMATIC. Parametry tkaniny (tabl. I) dobrano na podstawie danych literaturowych [1, 4].



Rys. 6. Model dyskretny tkaniny trójosiowej

TABLICA I. Parametry materiałowe dla pakietu balistycznego z kevlaru 29 (model materiałowy: *MAT_PLASTIC_KINEMATIC)

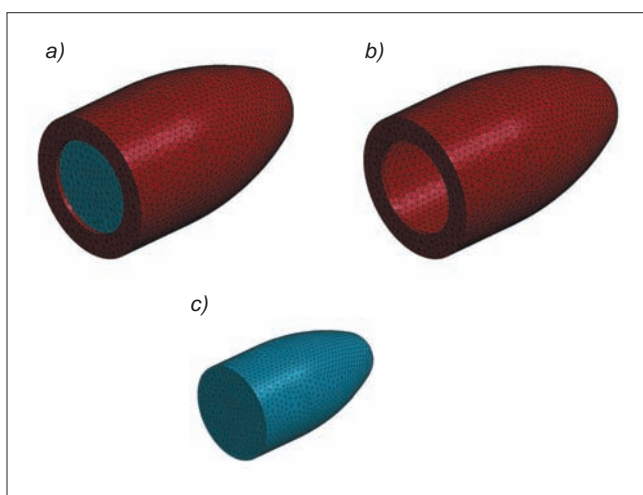
RO	E	PR	SIGY	FS
1440	8,5 e+10	0,30	1,24 e+9	0,4

Objaśnienia symboli:
 RO – gęstość, kg/m³,
 E – moduł Younga, MPa,
 PR – współczynnik Poissona,
 SIGY – granica plastyczności, N/m²,
 FS – efektywne odkształcenia plastyczne, kryterium zniszczenia.

Krawędzie warstwy tkaniny zamocowano tak, aby nie przemieszczały się w żadnym z kierunków układu współrzędnych XYZ. Ograniczono więc odpowiednio liczbę stopni swobody krawędziowych węzłów siatek poszczególnych warstw pakietu, korzystając z opcji BOUNDARY SPC-SET.

Model dyskretny pocisku Parabellum 9×19 mm FMJ

Na podstawie modelu geometrycznego pocisku Parabellum 9×19 mm FMJ utworzono w programie ANSYS ICEM CFD model dyskretny (rys. 7). Dla rdzenia i płaszczka pocisku



Rys. 7. Model dyskretny pocisku Parabellum 9×19 mm FMJ (a), płaszcz (b) oraz rdzeń pocisku (c)

wygenerowano metodą ROBUST (OCTREE) siatkę elementów skończonych typu TETRA/MIXED/SOLID o maksymalnej wielkości węzła 0,5 mm. Modele materiałowe i parametry dla modelu ołowianego rdzenia i płaszczka dobrano na podstawie literatury [5] (tabl. II i III).

TABLICA II. Parametry materiałowe modelu ołowianego rdzenia *MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK – karta z LS-DYNA

RO	E	PR	VP
11300	1,3e+9	0,42	0
A	B	n	c
5,15e+6	3,5e+7	0,5	0,628
PSFAIL	SIGMAX	SIGSAT	EPSO
1e+17	1e+28	1e+28	1

TABLICA III. Parametry materiałowe modelu płaszczka pocisku *MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK – karta z LS-DYNA

RO	E	PR	VP
8940,9	1,3e+11	0,375	0,9
A	B	n	c
1,12e+8	5,05e+8	0,42	0,009
PSFAIL	SIGMAX	SIGSAT	EPSO
1e+17	1e+28	1e+28	1

Objaśnienia symboli:
 RO – gęstość, kg/m³,
 E – moduł Younga, MPa,
 PR – współczynnik Poissona,
 VP – granica plastyczności, N/m²,
 A, B, n, c – stałe wejściowe,
 PSFAIL – efektywne odkształcenia plastyczne, kryterium zniszczenia, N/m²,
 SIGMAX – maksymalne naprężenie, MPa,
 SIGSAT – maksymalna wartość naprężenia efektywnego, MPa,
 EPSO – prędkość odkształcenia.

Badania symulacyjne

Symulacje uderzenia pocisku Parabellum 9×19 mm FMJ w pakiety balistyczne składające się z 4, 8, 12, 16, 20 i 24 warstw tkaniny trójosiowej z kevlaru 29 przeprowadzono w środowisku LS-DYNA. Symulowano centralne uderzenia pocisku z prędkością 366,9 m/s i energią kinetyczną 529 J w pakiety balistyczne o wymiarach 20×20 cm. W symulacjach założono typ kontaktu AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE pomiędzy:

- nitkami w warstwach,
- płaszczem pocisku i warstwami,
- sąsiadującymi warstwami pakietu,
- rdzeniem a płaszczem pocisku.

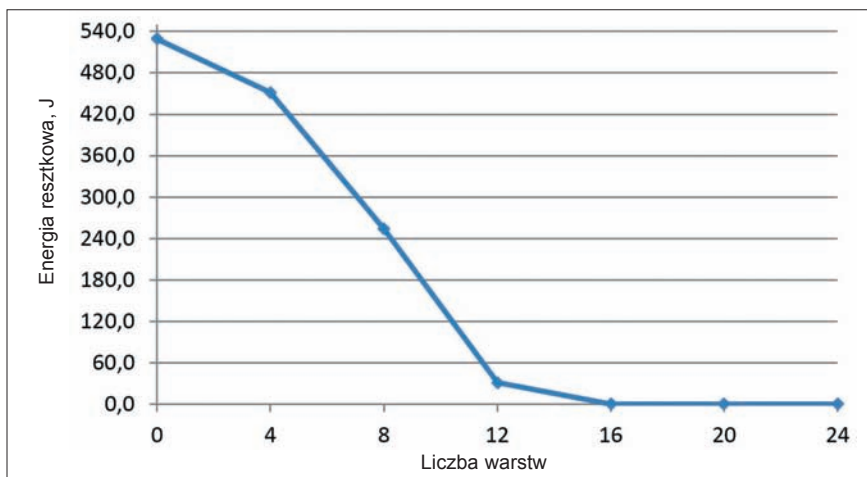
Analizowano wartość energii resztkowej pocisku oraz maksymalną wysokość stożka odkształcenia dla pakietów nieprzeбитych przez pocisk. Na rys. 8 przedstawiono zależność energii resztkowej pocisku w funkcji liczby warstw pakietu balistycznego.

Na podstawie badań stwierdzono, że pakiet balistyczny jest w stanie całkowicie zneutralizować energię kinetyczną pocisku (to oznacza, że nie następuje przebitcie pakietu), jeżeli liczba warstw tkaniny jest równa przynajmniej 16. Na skutek ruchu nitki wywołanego przez uderzenie pocisku powstaje stożek odkształcenia pakietu. Maksymalną wysokość stożka dla poszczególnych wariantów pakietów balistycznych podano w tabl. IV. Na rys. 9 przedstawiono skutki uderzenia pocisku w pakiety balistyczne składające się z 12 warstw tkaniny

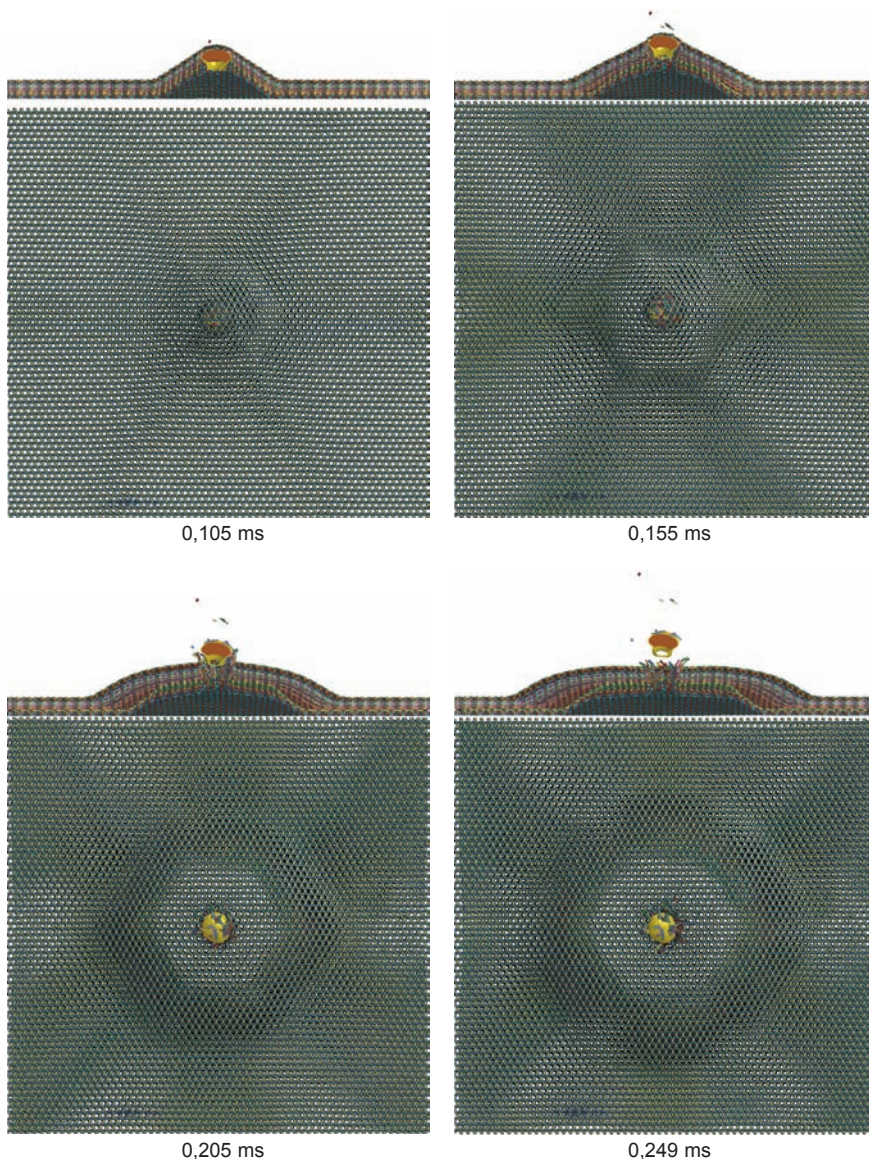
trójosiowej. Dla pakietów ochronnych składających się z 4, 8 lub 12 warstw nastąpiło przebicie, natomiast dla pakietu składającego się z 16, 20 i 24 warstw pocisk wytracił energię kinetyczną bez całkowitego przebicia pakietu. Maksymalna wysokość stożka odkształcenia dla pakietów nieprzestrzelonych nie przekroczyła granicy bezpieczeństwa wynoszącej 44 mm.

TABLICA IV. Maksymalna wysokość stożka dla poszczególnych pakietów balistycznych

Liczba warstw pakietu balistycznego	4	8	12	16	20	24
Maksymalna wysokość stożka, cm	1,52	2,29	2,40	1,90	1,73	1,51



Rys. 8. Zależność energii resztkowej pocisku w funkcji liczby warstw w pakietach balistycznych



Rys. 9. Skutki uderzenia pocisku Parabellum 9×19 mm FMJ w pakiet balistyczny składający się z 12 warstw tkaniny trójosiowej

Na rys. 9 widać charakterystyczne kształty stożka odkształcenia na pierwszym etapie penetracji pakietu balistycznego przez pocisk. Podstawa stożka odkształcenia ma tu kształt sześciokąta, co stanowi istotną różnicę w porównaniu z tradycyjnymi tkaninami dwuosiowymi (o splocie płóciennym) – w ich przypadku kształt podstawy stożka jest zbliżony do kwadratu.

Podsumowanie

Zaprezentowane w artykule wyniki badań symulacyjnych uderzenia pocisku Parabellum 9×19 mm FMJ w pakiety balistyczne wykonane z tkaniny trójosiowej kevlar 29 są podstawą do dalszych badań numerycznych i eksperymentalnych tych tkanin.

Przeprowadzone badania symulacyjne pokazały, że tkanina trójosiowa stanowi alternatywę dla pakietów wykonanych z tradycyjnej tkaniny o splocie płóciennym, gdyż jej trójosiowy charakter może polepszać kuloodporność pakietu balistycznego i w konsekwencji znacząco minimalizować poziom traumy balistycznej.

Planowane są dalsze badania symulacyjne i eksperymentalne o charakterze porównawczym dla pakietów balistycznych wykonanych z tkaniny trójosiowej i tkaniny o splocie płóciennym (dwuosiowej), które pozwolą na wyciągnięcie jednoznacznych wniosków w tym zakresie.

**Praca wyróżniona na konferencji
Symulacja 2015**

LITERATURA

1. Lim C.T., Shim V.P.W., Ng Y.H. "Finite-element modeling of the ballistic impact of the fabric armor". *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 28, Issue 1 (2003): pp. 13-31.
2. Wiśniewski A., Gmitrzuk M. "Validation of Numerical Model of the Twaron® CT709 Ballistic Fabric". *Problemy Mechatroniki: uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa*. Vol. 5, Nr 2 (16) 2014.
3. Dominiak J., Stępień Z. „Modelowanie numeryczne uderzenia pocisku w ciało człowieka chronione kamizelką kuloodporną”. *Mechanik*. Nr 7 (2013).
4. Tan V.B.C., Zeng X.S., Shim V.P.W. "Characterization and constitutive modeling of aramid fibers at high strain rates". *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 35, Issue 11 (2008): pp. 1303-1313.
5. Maréchal Ch., Bresson F., Haugou G. "Development of a Numerical Model of the 9 mm Parabellum FMJ Bullet Including Jacket Failure". *Engineering Transactions*. Vol. 59, No. 4 (2011): pp. 263-272.