



## Modelowanie numeryczne i analiza kuloodporności wielowarstwowych pakietów wykonanych z włókien paraaramidowych

Justyna DOMINIAK\*, Zbigniew STEMPIEŃ

*Politechnika Łódzka, ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź*

*\* autor korespondencyjny, e-mail: justyna.dominiak@p.lodz.pl*

*Artykuł wpłynął do redakcji 11.08.2014. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 07.03.2015*

DOI 10.5604/20815891.1195200

**Streszczenie.** Dobór odpowiedniej liczby warstw tekstylnego pakietu balistycznego, tak aby spełnić wymagane kryteria bezpieczeństwa stosownie do przyjętej klasy kuloodporności, realizowany jest głównie w oparciu o badania eksperymentalne w tunelu balistycznym z użyciem znormalizowanego podłoża. W pracy przedstawiono podejście doboru odpowiedniej liczby warstw pakietu poprzez modelowanie zjawiska uderzenia pocisku w pakiet balistyczny metodą elementów skończonych, co pozwala na ograniczenie zakresu badań eksperymentalnych. W przeprowadzonych badaniach analizowano metodą elementów skończonych uderzenie pocisku Parabellum  $9 \times 19$  mm FMJ, składającego się z ołowianego rdzenia i płaszczka, w wielowarstwowy pakiet balistyczny złożony z tkanin paraaramidowych Twaron CT709. W pierwszym etapie badań, w celu doboru parametrów modelu pocisku, analizowano jego deformację wyznaczoną symulacyjnie i eksperymentalnie podczas uderzenia z różną prędkością w nieodkształcalną płytę. W następnym etapie, w celu doboru i weryfikacji parametrów modelu materiałowego tkaniny paraaramidowej Twaron CT709, wyznaczano symulacyjnie przy prędkości uderzenia pocisku 366 m/s wysokość stożka odkształcenia w pakietach tekstylnych o różnej liczbie warstw i prędkość resztkową po przejściu pocisku przez pakiet.

Artykuł został opracowany na podstawie referatu prezentowanego podczas X Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”, Ryn, 15-18 września 2014 r.

Rezultaty tych badań weryfikowano następnie z publikowanymi wynikami badań eksperymentalnych. Ostatni etap badań symulacyjnych polegał na ocenie kuloodporności wielowarstwowych pakietów złożonych tkanin paraaramidowych Twaron CT709 podczas uderzenia pocisku Parabellum  $9 \times 19$  mm z różnymi prędkościami. Przeprowadzono symulacje komputerowe uderzenia pocisku w pakiet balistyczny składający się z 8, 12, 16, 20 i 24 warstw dla zakresu prędkości uderzania 300-460 m/s, obejmującego klasy kuloodporności II-A, II i III-A.

W wyniku przeprowadzenia badań uzyskano zweryfikowane eksperymentalnie modele materiałowe dla pocisku Parabellum  $9 \times 19$  mm FMJ i tkaniny paraaramidowej Twaron CT709. Badania symulacyjne wielowarstwowych pakietów wykazały, że ich kuloodporność zależy od liczby warstw tkanin oraz prędkości uderzenia pocisku. Stwierdzono, że klasa kuloodporności II-A jest spełniona dla pakietu złożonego przynajmniej z 10 warstw tkaniny Twaron CT709. W przypadku klasy kuloodporności II, pakiet musi być złożony przynajmniej z 12 warstw, a w przypadku klasy kuloodporności III-A – przynajmniej z 16 warstw. Taka konfiguracja warstw dla poszczególnych klas kuloodporności zapewnia nieprzestrzelenie pakietu i maksymalną poprzeczną deformację mniejszą niż 44 mm.

**Słowa kluczowe:** tkanina paraaramidowa, pakiet balistyczny, modelowanie numeryczne, kuloodporność

## 1. WSTĘP

Zadaniem wkładu balistycznego jest zatrzymanie wnikałego pocisku, jak również pochłonięcie jak największej ilości energii kinetycznej lub jej rozproszenie na jak największej powierzchni tak, żeby zmniejszyć jej szkodliwe oddziaływanie na ciało człowieka. Tradycyjny wkład balistyczny składa się w zależności od klasy kuloodporności od kilkunastu do kilkudziesięciu warstw wysoko wytrzymałych płaskich struktur tekstylnych (w przedziale 16-36 warstw). W przypadku balistycznych barier tekstylnych odkształcenia i naprężenia są wywoływane uderzeniem penetratora, poruszającego się z dużymi prędkościami. Uderzenie pocisku o małej energii kinetycznej, np. Parabellum  $9 \times 19$  mm, w miękki pakiet balistyczny powoduje sprężysto-plastyczne deformacje włókien, prowadzące do ich rozerwania w pierwszych warstwach pakietu. W trakcie dalszej penetracji warstw pocisk ulega odkształceniom plastycznym, które wywołują tzw. efekt grzybkowania i znaczne zwiększenie powierzchni kontaktu pomiędzy pociskiem a kolejnymi warstwami włókienniczymi. Zwiększona powierzchnia kontaktu na skutek grzybkowania pocisku powoduje objęcie procesem deformacji większej liczby nitek, co skutkuje gwałtownym rozproszeniem energii kinetycznej pocisku. W końcowym etapie uderzenia szczątkowa ilość energii kinetycznej pocisku powoduje jedynie ugięcie ostatnich warstw pakietu [1, 2].

Zjawisko uderzenia pocisku w tekstylny pakiet balistyczny jest trudne i skomplikowane do precyzyjnego opisu matematycznego, gdyż zachodzi z bardzo dużą prędkością wewnątrz struktur włókienniczych.

Bilans całkowitej energii wystrzeliwanego pocisku jest równy sumie energii deformacji pocisku, energii deformacji i destrukcji pakietu balistycznego, energii deformacji podkładu za osłoną balistyczną oraz ciepłu wydzielanemu podczas uderzenia i wnikaniu pocisku w barierę balistyczną [2].

Numeryczne techniki symulacji komputerowej, a w szczególności metoda elementów skończonych, stanowią obecnie jedno z bardziej efektywnych narzędzi analizy zjawisk dynamicznych i statycznych. Skala trudności w modelowaniu numerycznym procesów uzależniona jest od przejrzystego modelu geometrycznego nitki. W zasadzie nie jest obecnie możliwe przyjęcie modelu nitki na poziomie pojedynczych włókien ze względu na czas obliczeń. W roku 1973 Roylance [3] opracował model dyskretny do symulacji zjawiska poprzecznego uderzenia pocisku w nitkę i tkaninę. Badania pokazały, że energia kinetyczna pocisku jest głównie absorbowana przez nitki kontaktujące się z czołem pocisku. Stwierdzono również, że całkowita deformacja pocisku w pakiecie następuje zanim fala naprężenia osiągnie krawędź zamocowania. Największe wydłużenia występują w elementach łączących się z punktem uderzenia pocisku.

Badaniami symulacyjnymi zajmowali się również Lim i in. [4], którzy modelowali uderzenie pocisku w jednowarstwowy pakiet balistyczny wykonany z Twaronu. Badania numeryczne zostały przeprowadzone w środowisku LS-Dyna. Parametry materiałowe przyjęto na podstawie publikowanych badań eksperymentalnych. Na podstawie obliczeń wyznaczono prędkość resztkową oraz absorbowaną energię kinetyczną pocisku przez warstwę. Autorzy zwracają uwagę na pominięcie w modelu dyskretnym tarcia pomiędzy nitkami wątku i osnowy oraz efektu wyciągania ze struktury nitki kontaktujących się z pociskiem.

Ting i in. [5] modelowali numerycznie zjawisko uderzenia pocisku w wielowarstwowy pakiet balistyczny. W modelu dyskretnym uwzględniono poślizg pomiędzy miejscami przeplotu nitki. W celu analizy pakietów wielowarstwowych wprowadzono do modelu zmienny parametr definiujący początkową odległość pomiędzy sąsiadującymi warstwami. Przeprowadzone badania symulacyjne obejmowały wyznaczenie prędkości resztkowej w funkcji prędkości uderzenia dla różnych współczynników tarcia. Stwierdzono, że efektywność balistyczna zmniejsza się wraz ze zmniejszeniem współczynnika tarcia pomiędzy nitkami w miejscu przeplotu.

Modelowaniem uderzenia pocisku w pakiet balistyczny wykonany z tkanin aramidowych Kevlar w oprogramowaniu LS-Dyna zajmował się również zespół Blankenhorn [6]. Model geometryczny tkaniny wykonano na podstawie rzeczywistych przekrojów poprzecznych tkaniny. Uzyskany model geometryczny poddano procesowi dyskretyzacji. Jako model materiałowy dla elementów dyskretnych nitki osnowy i wątku przyjęto MAT\_ORTOELASTIC\_PLASTIC. Analizowano deformacje pojedynczej warstwy podczas uderzenia pocisku typu MFK z prędkością 100 m/s.

Wyniki obliczeń numerycznych nie były weryfikowane z eksperymentem. Przedstawione badania miały charakter badań wstępnych. Jednakże publikacja zwraca szczególną uwagę na model geometryczny tkanin jako struktury przeplatanej, gdzie każda nitka jest oddzielnym obiektem. Daje to możliwość modelowania kontaktu pomiędzy nitkami oraz warstwami.

Na podstawie przeglądu literatury stwierdzono, że konieczny jest kompromis pomiędzy precyzją odwzorowania struktury geometrycznej tkaniny a prędkością obliczeń numerycznych. Istotnym elementem w modelowaniu numerycznym jest dobór odpowiednich modeli materiałowych i ich parametrów. Wymaga to niejednokrotnie dodatkowych badań eksperymentalnych w celu ich weryfikacji.

## 2. OBIEKT BADAŃ

Wymagania balistyczne dotyczące opancerzeń ciała przeznaczonych, w zależności od stopnia zagrożenia, dla wojska, policji czy osób prywatnych są określone przez normy. Firma Tenijin oferuje do zastosowań balistycznych różne rodzaje materiałów opartych na wysokowytrzymałych przędzach Twaron. W badaniach przyjęto dwa obiekty badań: tkanina z włókien paraaramidowych Twaron CT709 oraz pocisk Parabellum 9 × 19 mm FMJ. Tkanina balistyczna wykonana została z przędzy Twaron CT Microfilament 930 tex (tabela 1).

Tabela 1. Podstawowe parametry przędzy Twaron CT Microfilament

Table 1. The basic parameters of yarn Twaron CT Microfilament

Parametr	Wartość
Masa liniowa, dtex	930
Liczba filamentów w przekroju poprzecznym	1000
Wytrzymałość właściwa, cN/tex	235
Moduł sprężystości, GPa	102
Wydłużenie przy zerwaniu, %	3,45
Gęstość, g/cm <sup>3</sup>	1,44
Temperatura rozpadu, °C	500

Drugim obiektem badań symulacyjnych był pocisk Parabellum 9 × 19 mm FMJ. Pocisk Parabellum 9 × 19 mm FMJ jest obecnie najczęściej używanym pociskiem na świecie, szczególnie w większości typów pistoletów służb cywilnych i wojskowych. Pocisk 9 mm FMJ został uwzględniony w trzech klasach kuloodporności wg amerykańskiej normy NIJ Standard 2008 (tabela 2).

Tabela 2. Klasy kuloodporności dla kamizelek kuloodpornych wg normy NIJ Standard 2008

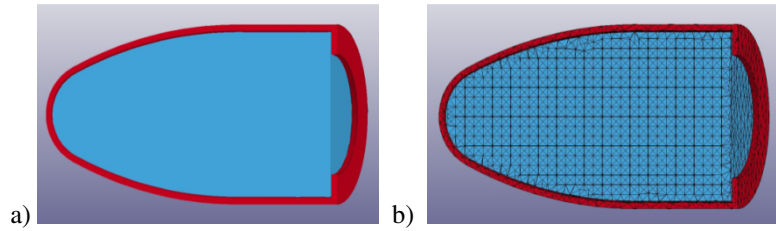
Table 2. The classes for bullet-proof body armor according to NIJ Standard 2008

Klasa kuloodporności	Szczegółowe wymagania testów						
	Liczba powtórzeń	Rodzaj amunicji testującej	Masa pocisku	Minimalna prędkość pocisku	Liczba strzałów pod kątem 0°	Maksymalna wartość deformacji	Liczba strzałów pod kątem 30°
I	1	38 Special RN Lead	10,2 g 158 g	259 m/s	4	44 mm	2
	2	22 LRHV Lead	2,6 g	320 m/s	4	44 mm	2
II-A	1	357 Magnum JSP	10,2 g 158 g	381 m/s	4	44 mm	2
	2	9 mm FMJ	8,0 g	332 m/s	4	44 mm	2
II	1	357 Mangnum	10,2 g 158 g	425 m/s	4	44 mm	2
	2	9 mm FMJ	8,0 g	358 m/s	4	44 mm	2
III-A	1	44 Magnum Lead SWC	15,55 g	426 m/s	4	44 mm	2
	2	9 mm FMJ	8,0 g	426 m/s	4	44 mm	2
III	1	7,62 mm FMJ	9,7 g	838 m/s	6	44 mm	0
IV	1	30-6 AP	10,8 g	868 m/s	6	44 mm	0

### 3. DOBÓR MODELI GEOMETRYCZNYCH I MATERIAŁOWYCH

#### 3.1. Pocisk Parabellum 9 × 19 mm FMJ

Model geometryczny pocisku Parabellum 9 × 19 mm FMJ opracowano na podstawie dostępnych danych fabrycznych za pomocą oprogramowania ANSYS DESIGNMODELER (rys. 1a). Modelowano zarówno ołowiany rdzeń pocisku, jak i jego płaszcz.



Rys. 1. a) Model geometryczny,  
b) Model dyskretny pocisku Parabellum 9 × 19 mm

Fig. 1. a) The geometric model,  
b) The discrete model of 9 x 19 mm Parabellum bullet

Model geometryczny pocisku Parabellum 9 × 19 mm FMJ poddano procesowi dyskretyzacji w oprogramowaniu ANSYS ICEM CFD. Dla rdzenia i płaszczki wygenerowano siatkę elementów skończonych o wielkość węzła 0,5 mm metodą Robust (Octree) typ siatki Tetra/Mixed/Solid. Model dyskretny pocisku Parabellum 9 × 19 mm FMJ przedstawiono na rysunku 1b. Parametry materiałowe dla modelu pocisku zostały dobrane na podstawie literatury [7].

Tabela 3. Parametry materiałowe modelu ołowianego rdzenia

\*MAT\_SIMPLIFIED\_JOHNOSN\_COOK – karta z LS-Dyna

Table 3. The material parameters of lead core

\*MAT\_SIMPLIFIED\_JOHNOSN\_COOK – card LS-Dyna

<b>RO</b>	<b>E</b>	<b>PR</b>	<b>VP</b>
11300	1,3E+09	0,42	0
<b>A</b>	<b>B</b>	<b>n</b>	<b>c</b>
5,15E+06	3,5E+07	0,5	0,628
<b>PSFAIL</b>	<b>SIGMAX</b>	<b>SIGSAT</b>	<b>EPSO</b>
1E+17	1E+28	1E+28	1

Tabela 4. Parametry materiałowe modelu płaszczki pocisku

\*MAT\_SIMPLIFIED\_JOHNOSN\_COOK – karta z LS-Dyna

Table 4. The material parameters of jacket bullet

\*MAT\_SIMPLIFIED\_JOHNOSN\_COOK – card LS-Dyna

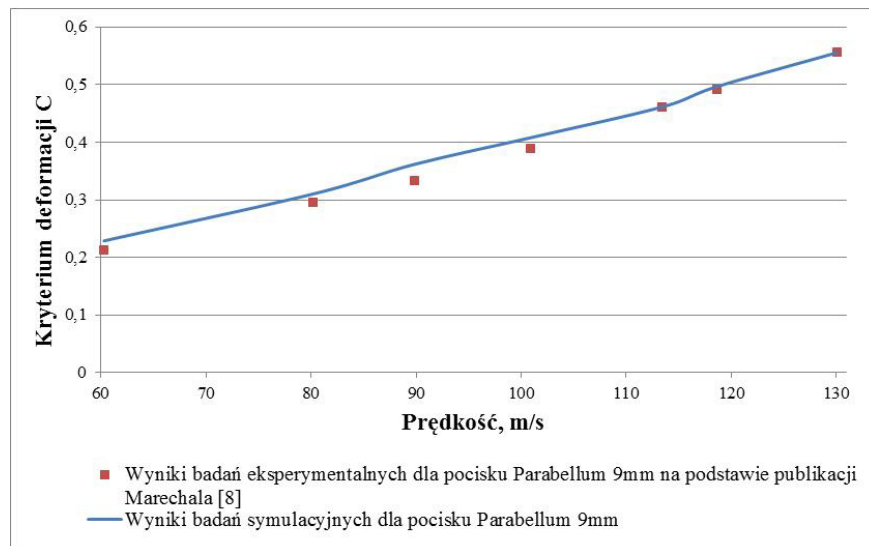
<b>RO</b>	<b>E</b>	<b>PR</b>	<b>VP</b>
8940,9	1,3E+11	0,375	0,9
<b>A</b>	<b>B</b>	<b>n</b>	<b>c</b>
1,12E+08	5,05E+08	0,42	0,009
<b>PSFAIL</b>	<b>SIGMAX</b>	<b>SIGSAT</b>	<b>EPSO</b>
1E+17	1E+28	1E+28	1

W celu weryfikacji przyjętych modeli dla rdzenia i płaszczka, analizowano metodą elementów skończonych deformację pocisku podczas uderzenia w nieodkształcalną płytę przy różnych prędkościach: 60,3 m/s; 80,2 m/s; 89,9 m/s; 100,9 m/s; 113,4 m/s; 118,6 m/s; 130,1 m/s; 141,1 m/s; 150,9 m/s. Szczegółowo wyznaczano kryterium deformacji  $C$  w postaci

$$C = \sqrt{\frac{1}{2} * \left[ \left( \frac{\Delta l}{l_0} \right)^2 + \left( \frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 \right]} \quad (1)$$

gdzie:  $C$  – kryterium deformacji,  $\Delta l = l - l_0$  i  $\Delta d = d - d_0$ ,  $l_0$  – długość pocisku przed uderzeniem, mm;  $d_0$  – średnica pocisku przed uderzeniem, mm;  $l$  – długość pocisku po uderzeniu, mm;  $d$  – średnica pocisku po uderzeniu, mm [8].

Do badań symulacyjnych zastosowano typ kontaktu AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE, wartość współczynnika tarcia statycznego i dynamicznego pomiędzy rdzeniem a płaszczem pocisku wynosiła 0,8 oraz SOFT = 2 [8]. Wyniki badań symulacyjnych weryfikowano z wynikami badań eksperymentalnych przedstawionymi w literaturze [8]. Uzyskano dobrą korelację wyników badań symulacyjnych z wynikami badań eksperymentalnych (rys. 2), co potwierdza prawidłowy dobór modelu pocisku.

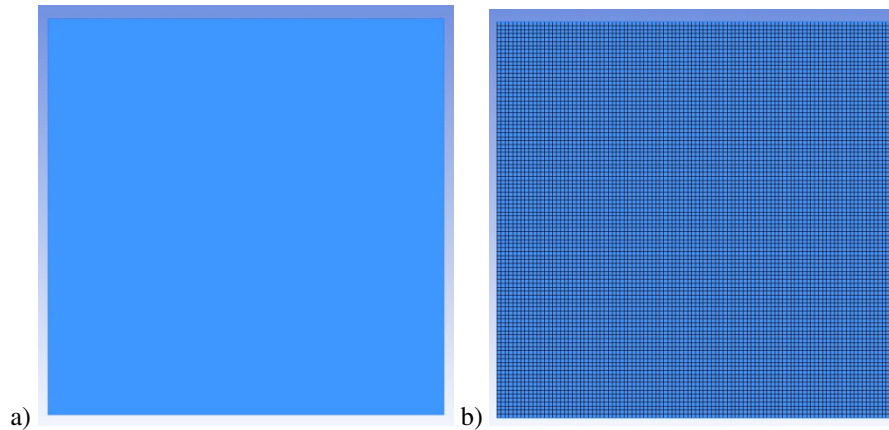


Rys. 2. Wykres przedstawiający kryterium deformacji pocisku w zależności od prędkości uderzenia

Fig. 2. The criterion deformation of bullet according to impact velocity

### 3.2. Tkanina Twaron CT709

Model geometryczny warstwy pakietu balistycznego opracowano za pomocą oprogramowania ANSYS ICEM CFD. Przyjęto dla warstwy wymiary  $30 \times 30$  cm. Opracowano pakiety składające się z 8, 12, 16, 20 i 24 warstw. Model geometryczny warstwy poddano procesowi dyskretyzacji, przyjmując węzeł o wielkości 5 mm, typ siatki Hexa/Shell. W kolejnym etapie zestawiono model pakietów z modelem pocisku Parabellum  $9 \times 19$  mm FMJ (rys. 3).



Rys. 3. a) Model geometryczny,  
b) Model dyskretny warstwy pakietu balistycznego

Fig. 3. a) The geometric model,  
b) The discrete model layer of ballistic package

Symulacje komputerowe przeprowadzono w środowisku LS-Dyna. Krawędzie pakietu balistycznego zamocowano tak, aby nie przemieszczały się w żadnym z kierunku układu współrzędnych XYZ. W tym celu ograniczono odpowiednio liczbę stopni swobody krawędziowych węzłów siatek poszczególnych warstw pakietu za pomocą opcji BOUNDARY SPC-SET. W symulacji komputerowej zastosowano typ kontaktu AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE do symulacji kontaktu pomiędzy pociskiem i warstwami oraz kontaktu pomiędzy sąsiadującymi warstwami pakietu. Dla warstwy pakietu balistycznego wykonanego z tkaniny paraaramidowej Twaron CT709 przyjęto model materiałowy \*MAT\_ORTOELASTIC\_PLASTIC. Parametry modelu przyjęto na podstawie literatury [5, 9] (tabela 5).

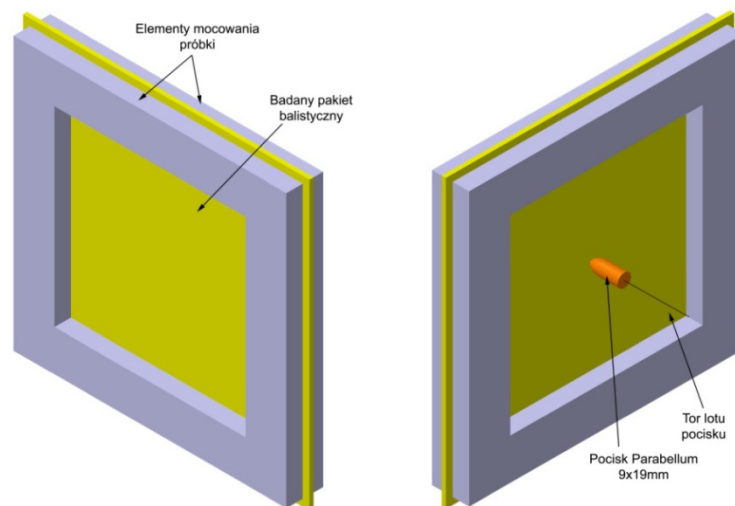


Tabela 5. Parametry materiałowe dla pakietu balistycznego Twaron CT709, \*MAT\_ORTOELASTIC\_PLASTIC

Table 5. The material parameters of ballistic package Twaron CT709 \*MAT\_ORTOELASTIC\_PLASTIC

RO	EA	EB	GAB	PRBA	PRCA	PRCB	SIGY
1440	9,0 E+10	9,0 E+10	4,4 E+9	0,30	0,30	0,30	3,6 E+9

W pierwszym etapie weryfikowano przyjęty model materiałowy dla pakietów balistycznych w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych przedstawionych w literaturze [1]. W badaniach tych pakiety balistyczne wykonane z tkaniny paraaramidowej Twaron CT709 o liczbie warstw 8, 10, 12, 16 i 24 przed ostrzałem mocowano w uchwycie wg schematu przedstawionego na rysunku 4. Taki sposób mocowania wymuszał warunki brzegowe, z których wynika, że deformacja poprzeczna i wzdłużna pakietu w punktach mocowania jest równa zero.



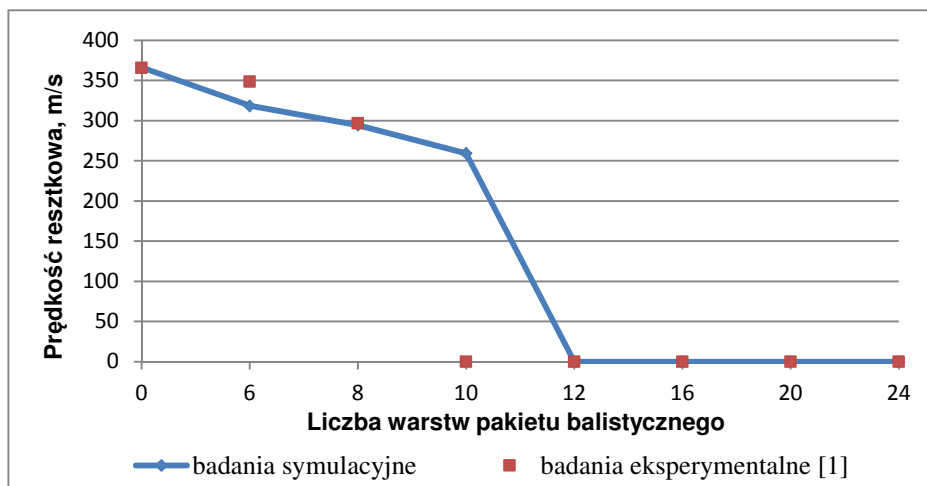
Rys. 4. Sposób mocowania pakietów podczas ostrzału – widok od strony wyjściowej i od strony uderzenia pocisku [1]

Fig. 4. The method of attaching packages during fire – view from the output and from the impact of the bullet

Wymiar powierzchni absorbującej uderzenie pocisku był stały i wynosił  $30 \times 30$  cm (rys. 4).

Te parametry dobrano celowo tak, aby wymiar pakietu balistycznego absorbującego uderzenie był porównywalny z szerokością tułowia ciała ludzkiego.

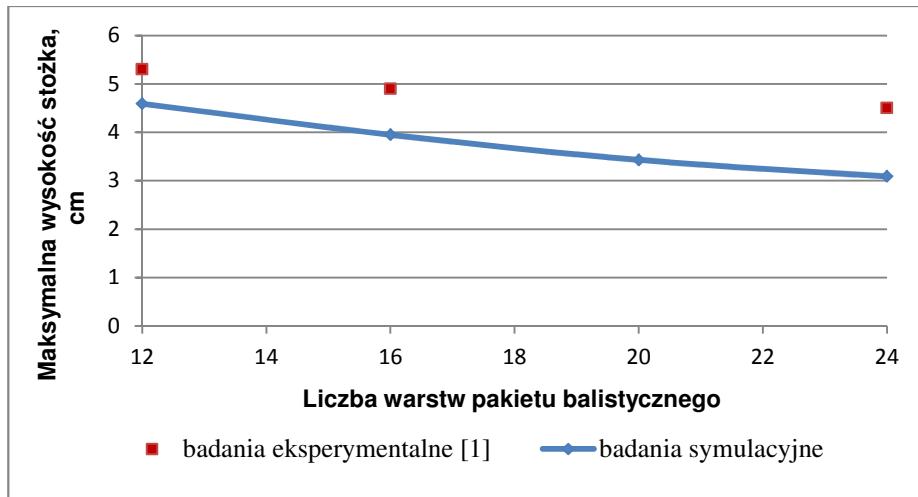
Punkt uderzenia pocisku był zlokalizowany w środku geometrycznym układu mocowania. Prędkość uderzenia pocisków podczas ostrzału badanych pakietów wynosiła 366,9 m/s przy odchyleniu standardowym wynoszącym 5,1 m/s. Podczas ostrzału system pomiaru prędkości pocisku dokonywał pomiaru prędkości uderzeniowej pocisku oraz prędkości po przejściu przez pakiet tzw. prędkości resztkowej. Mierzono również deformację pakietu w kierunku toru lotu pocisku. Na rysunku 5 przedstawiono zależność prędkości resztkowej pocisku w funkcji liczby warstw, natomiast na rysunku 6 – zależność maksymalnej wysokości stożka odkształcenia w funkcji liczby warstw dla wykonanych badań symulacyjnych i publikowanych w pracy [1] badań eksperymentalnych.



Rys. 5. Zależność prędkości resztkowej w funkcji liczby warstw dla badań eksperymentalnych oraz badań symulacyjnych

Fig. 5. The dependence of the residual velocity as a function of the number of layers for the experimental and simulation research

Analizując wyniki badań, stwierdzono, że wartości prędkości resztkowej z badań eksperymentalnych i badań symulacyjnych uderzenia pocisku w pakiet balistyczny są zbliżone, co potwierdza poprawność doboru modelu tkaniny Twaron CT709. Pewne różnice występują w minimalnej liczbie warstw pakietu zapewniającej jego nieprzestrzelenie. Badania eksperymentalne wykazały, że nieprzestrzelenie pakietu uzyskuje się dla 10 warstw. W przypadku badań symulacyjnych ten stan został uzyskany dla 12 warstw.



Rys. 6. Zależność maksymalnej wysokości stożka w funkcji liczby warstw pakietu balistycznego

Fig. 6. The dependence of the maximum height of the cone as a function of the number of layers of ballistic package

Te różnice nie są jednak znaczące w praktyce, bowiem w celu zagwarantowania pełnej ochrony liczba warstw musi zostać zwiększona o 60-80% w stosunku do minimalnej liczby warstw zapewniającej nieprzestrzelenie.

W przypadku wartości maksymalnego stożka odkształcenia zauważono, że w badaniach eksperymentalnych są one większe niż w przypadku badań symulacyjnych. Jest to spowodowane tym, że nitki kontaktujące się z czołem pocisku podczas badań eksperymentalnych wysuwają się częściowo z zacisku.

#### 4. BADANIA SYMULACYJNE KULOODPORNOŚCI PAKIETÓW BALISTYCZNYCH

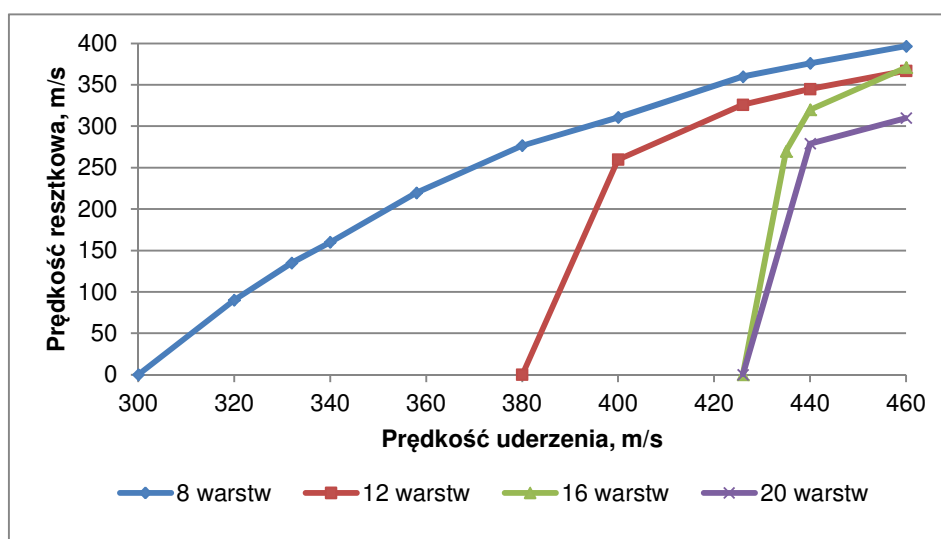
##### 4.1. Metodyka badań

W ostatnim etapie badań symulacyjnych, wykorzystując dobrane modele materiałowe pocisku i tkaniny Twaron CT709, przeprowadzono symulacje komputerowe kuloodporności pakietów balistycznych. Parametrem zmiennym w symulacjach była liczba warstw pakietu i prędkość pocisku. Przyjęto zakres prędkości uderzenia od 300-460 m/s, uwzględniając w nim trzy dodatkowe prędkości dla klasy kuloodporności II-A (332 m/s), II (358 m/s), III-A (426 m/s). Analizowano prędkość resztkową, maksymalną wysokość stożka odkształcenia oraz rozkład naprężeń w pakiecie.

Symulacje komputerowe przeprowadzono w środowisku LS-Dyna dla pakietów składających się z 8, 12, 16, 20 i 24 warstw. Przyjęta dolna liczba warstw pakietu jest mniejsza od liczby warstw stosowanej w praktyce dla pakietów zapewniających wymagane bezpieczeństwo w klasach kuloodporności II-A, II i III-A. Założonym celem obliczeń numerycznych było bowiem wyznaczenie minimalnej liczby warstw pakietów w przyjętych klasach kuloodporności, zapewniającej ich nieprzestrzelenie.

## 4.2. Wyniki badań

Na rysunku 7 przedstawiono zależność prędkości resztkowej pocisku w funkcji prędkości uderzenia dla różnej liczby warstw.

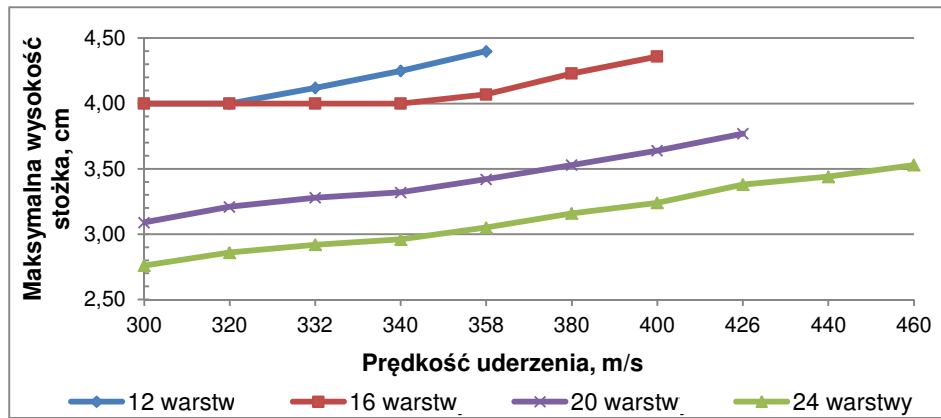


Rys. 7. Zależność prędkości resztkowej pocisku w funkcji prędkości uderzenia dla pakietów wielowarstwowych

Fig. 7. The dependence of the residual velocity of the bullet as a function of the impact velocity for multi-layer packages

Dla pakietu balistycznego składającego się z 8 warstw przestrzelenie następuje już przy najmniejszej prędkości równej 300 m/s. W przypadku pakietu składającego się z 12 warstw minimalna prędkość pocisku powodująca przestrzelenie pakietu wynosi 380 m/s, a dla pakietu składającego się z 16 warstw 426 m/s (III klasa kuloodporności). Dla pakietu składającego się z 20 warstw minimalna prędkość przestrzelenia wynosiła 440 m/s. Pakiet balistyczny spełniający kryterium nieprzestrzelenia pociskiem Parabellum 9 × 19 mm w zakresie prędkości do 460 m/s musi zawierać 24 warstwy tkaniny Twaron CT 709.

Na rysunku 8 przedstawiono zależność maksymalnej wysokości stożka odkształcenia w funkcji prędkości uderzenia pocisku dla różnej liczby warstw. Zależności przedstawiono w zakresach prędkości pocisku, w których nie występuje przestrzelenie pakietu.



Rys. 8. Maksymalna wartość stożka w funkcji prędkości uderzenia dla pakietów wielowarstwowych

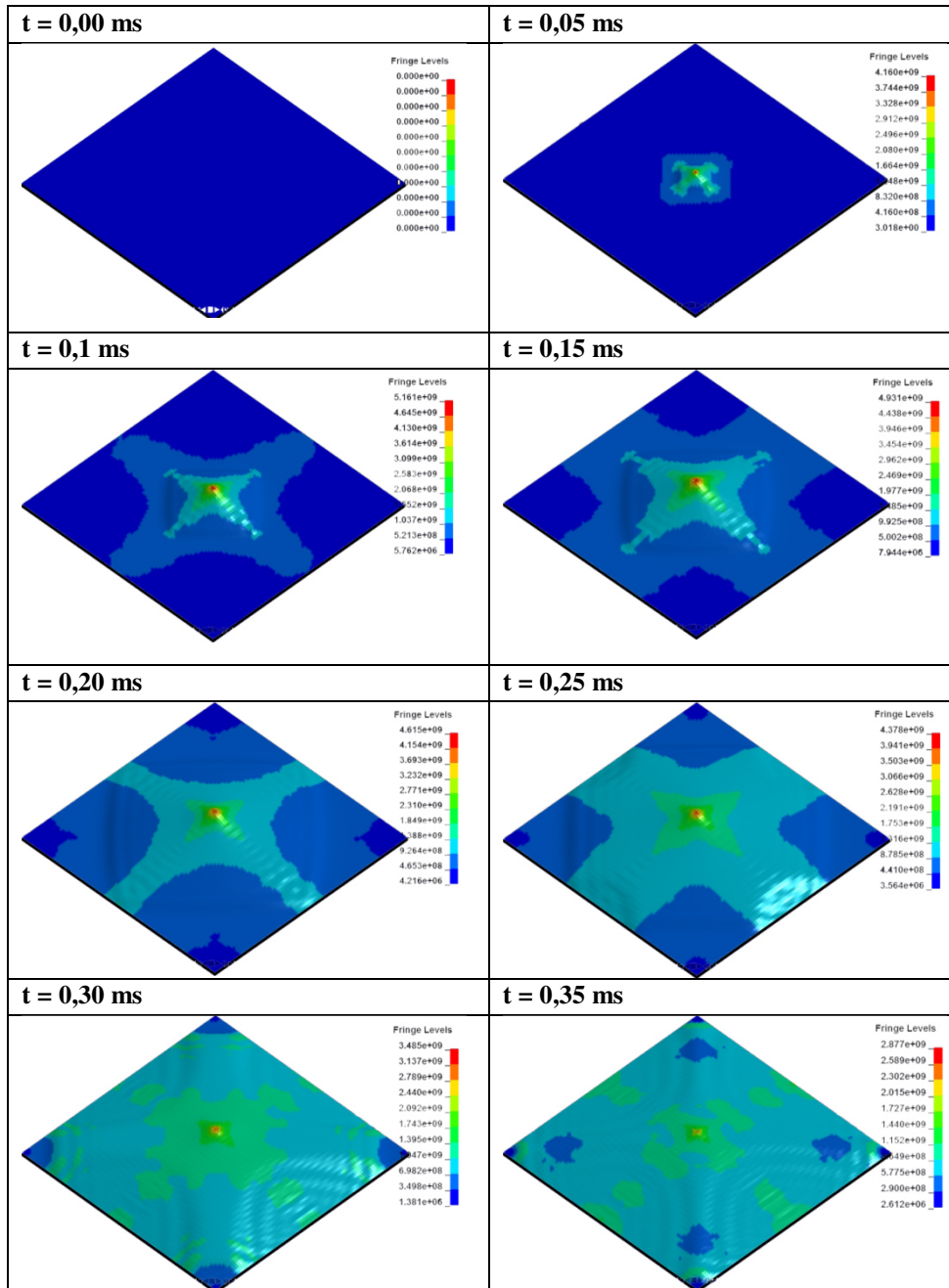
Fig. 8. The maximum value of the cone as a function of the impact velocity for multi-layer packages

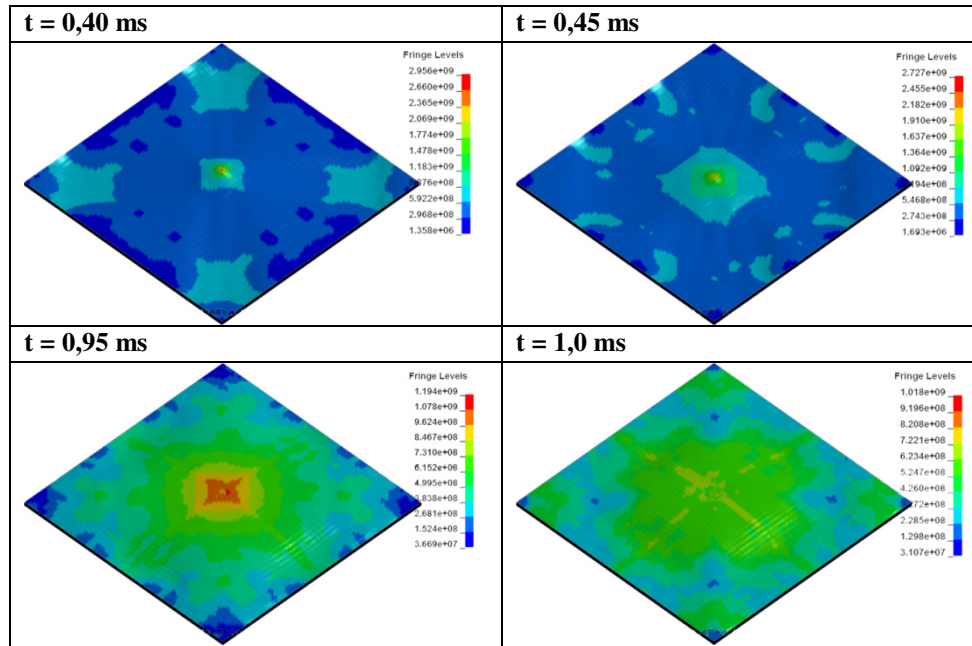
Analizując wyniki badań, stwierdzono, że przy prędkości uderzeniowej pocisku w zakresie 300-358 m/s pakiet balistyczny składający się z 12 warstw nie został przestrzelony, a wartość maksymalnego stożka odkształcenia nie przekroczyła granicy bezpieczeństwa. Z kolei dla pakietu składającego się z 16 warstw nieprzestrzelenie i wysokość stożka odkształcenia poniżej 44 mm jest zapewnione dla prędkości uderzenia pocisku w zakresie 300-400 m/s. W przypadku pakietu balistycznego składającego się z 20 warstw ten stan jest osiągnięty dla prędkości uderzenia pocisku w zakresie 300-426 m/s. Dla przyjętej w badaniach maksymalnej prędkości uderzenia pocisku 460 m/s, kryterium nieprzestrzelenia i deformacji poprzecznej poniżej 44 mm jest zapewnione dla pakietu złożonego z 24 warstw.

Dodatkowo przeprowadzono analizę rozkładu naprężeń w czasie dla pakietów balistycznych składających się z 12, 16, 20 i 24 warstw przy prędkości uderzenia równej 400 m/s. W tabeli 6 przedstawiono przykładowo rozkład naprężeń w czasie dla pakietu składającego się z 16 warstw. Dla każdego z rozpatrywanych pakietów zauważono charakterystyczną tendencję osiągnięcia maksymalnej wartości naprężenia w czasie do 0,1 ms. W przypadku 12 warstw maksymalna wartość naprężenia wyniosła  $6,04 \times 10^9$  Pa, przy czym po przekroczeniu tej wartości pakiet balistyczny został przestrzelony. Dla pakietów składających się z 16, 20 i 24 warstw nie nastąpiło przestrzelenie.

Tabela 6. Rozkład naprężeń w czasie dla pakietu balistycznego składającego się z 16 warstw

Table 6. The stress distribution in time for a ballistics package consisting of 16 layers





Maksymalna wartość naprężeń dla pakietu składającego się z 16 warstw wyniosła  $5,16 \times 10^9$  Pa, dla pakietu składającego się z 20 warstw była równa  $4,85 \times 10^9$  Pa, natomiast dla pakietu składającego się z 24 warstw wyniosła  $4,63 \times 10^9$  Pa. W przypadku każdego z badanych pakietów balistycznych obserwowano zjawisko rozchodzenia się fali naprężeń w sposób ortogonalny.

## 5. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych i publikowanych badań eksperymentalnych zweryfikowano poprawność doboru modeli materiałowych i ich parametrów dla tkaniny paraaramidowej Twaron CT709 oraz pocisku Parabellum  $9 \times 19$  FMJ.

W wyniku przeprowadzonych symulacji komputerowych uderzenia pocisku Parabellum  $9 \times 19$  FMJ w pakiet balistyczny złożony z tkanin paraaramidowych Twaron CT709 stwierdzono, że wymaganą kuloodporność przed pociskiem poruszającym się w zakresie prędkości 300-460 m/s zapewnia pakiet składający się z 24 warstw. Taki pakiet nie ulega przestrzeleniu, a maksymalna wysokość stożka odkształcenia jest poniżej dopuszczalnej granicy 44 mm. Z kolei stwierdzono, że pakiet balistyczny składający się z 8 warstw ulega przestrzeleniu pociskiem dla każdej prędkości uderzenia z zakresu 300-460 m/s.

W przypadku zbadanych pakietów balistycznych obserwowano zjawisko rozchodzenia się fali naprężeń w sposób ortogonalny. Wynika to z dwuosiowości tkaniny narzuconej przeplatającymi się nitkami wątku i osnowy.

## LITERATURA

- [1] Stempień Zbigniew. 2009. „Strukturalna barierowość balistyczna tekstyliów”. *Zeszyt Naukowy* 1049. Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej.
- [2] Witczak Elżbieta. 2011. *Specjalistyczne osłony osobiste*. Łódź.
- [3] Roylance David. 1973. „Wave propagation in a viscoelastic fiber subjected to transverse impact”. *Journal of Applied Mechanics* 40 Series E : 143-148.
- [4] Lim Chwee Teck, Shim Victor. 2002. “Finite-element modeling of the ballistic impact of the fabric armor”. *International Journal of Impact Engineering* 28 : 13-31.
- [5] Roylance David, Kwun-Lon Ting, Paul Chammas, Ho Chi, Scott Lawrence. 1993. Numerical modeling of fabric panel response to ballistic impact. In *Proceeding of the 25<sup>th</sup> International SAMPE Technical Conference*.
- [6] Bankenhorn Gunther, Karl Schweizerhof, Hermann Finckh. 2003. Improved numerical investigations of a projectile impact on a textile structure. In *Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Ls-Dyna Users Conference*. Ulm (Germany).
- [7] Marechal Christophe, Bresson, Gregory Haugou. 2011. „Development of a numerical model Francois of the 9 mm Parabellum FMJ bullet including jacket failure”. *Engineering Transactions* 59 (4) : 263-272.
- [8] Barauskas Rimantas, Aušra Abraitienė. 2007. „Computational analysis of impact of a bullet against the multilayer fabrics in LS-DYNA”. *International Journal of Impact Engineering* 34 : 1286-1305.
- [9] Tan Vincent, Xuesen Zeng, Victor Shim. 2008. „Characterization and constitutive modeling of aramid fibers at high strain rates”. *International Journal of Impact Engineering* 35 : 1303-1313.



## **Numerical Modelling and Analysis of Ballistic Performance of a Multilayer Para-Aramid Packet**

Justyna DOMINIAK, Zbigniew STEMPIEŃ

**Abstract.** The selection of the appropriate number of layers of textile ballistic package, in order to meet the required safety criteria according to the accepted class of bullet-proofness, is implemented mainly on the basis of experimental research in the ballistic tunnel using a normalised ballistic substrate. The paper presents an approach to the selection of the appropriate number of layers of the package by modelling the phenomenon of ballistic impact into the package by using the finite element method, which allows us to limit the scope of experimental research.

In the research, the ballistic impact of the  $9 \times 19$  mm FMJ Parabellum bullet consisting of a lead core and jacket into the multi-layer ballistic package submitted from a fabric of para-aramid Twaron CT709 was analysed by using the finite element method. In the first stage of the research, for the selection of model parameters of the bullet, the deformation was analysed and designated by simulation and experiment during the impact at different speeds in the non-deformable plate.

In the next step, for the selection and verification of material parameters of para-aramid fabric Twaron CT709, determined by simulation at an impact speed of the bullet of 366 m/s, the height of the cone deformation of textile package and the residual velocity of the bullet after puncturing the package. The results of the research were verified with the published experimental results. The last stage of simulation research included the evaluation of bullet-proof multi-layer packages composed of para-aramid fabric Twaron CT709 during the impact of  $9 \times 19$  mm Parabellum bullet at different speeds. The bullet impact into the ballistic package consisting of 8, 12, 16, 20, 24 layers, at the speed range of 300-460 m/s, including bullet-proofness class II-A, II, and III-A was carried out.

The material models  $9 \times 19$  mm Parabellum bullet FMJ and para-aramid fabric Twaron CT709 were verified with the results published in literature. The simulation research of multilayer packets have shown that the bulletproofness depends on the number of layers of fabric and the velocity of bullet impact. It has been found that the bullet-proofness class II-A is obtained for the package composed of at least 10 layers of Twaron CT709. In the case of bullet-proofness class II, the package must be composed of at least 12 layers but in the case of bullet-proofness class III-A, of at least 16 layers. Such a configuration of layers, for particular classes of bullet-proofness, provides no-penetration packages and maximum perpendicular deformation of less than 44 mm.

**Keywords:** para-aramid textile, ballistic package, numerical modeling, bullet-proofness

