



## NUMERYCZNA ANALIZA UDERZENIA POCISKU W WARSTWY ARAMIDOWE UMIESZCZONE NA PODŁOŻU IMITUJĄCYM CIAŁO CZŁOWIEKA

### *NUMERICAL ANALYSIS OF BULLET IMPACT ONTO ARAMID LAYERS PLACED ON SUBSTRATA SIMULATING HUMAN BODY*

Dawid PACEK, Adam WIŚNIEWSKI  
Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia  
*Military Institute of Armament Technology*

**Streszczenie.** Przedmiotem artykułu jest wskazanie istotnych aspektów analizy numerycznej uderzenia pocisku w elastyczne warstwy tkaniny aramidowej umieszczone na plastycznym podłożu imitującym ciało człowieka. Przedstawiono przegląd wyników badań kamizelek kuloodpornych na różnych podłożach oraz uzasadniono potrzebę ich stosowania. Wyjaśniono, dlaczego plastelina balistyczna jest podkładem imitującym ciało człowieka obowiązującym w większości światowych norm związanych z badaniem osłon osobistych. Zaprezentowano metody modelowania tkanin oraz wyniki własnych analiz numerycznych. Ze względu na istotny wpływ wzajemnego oddziaływania wiązek włókien (przędz) tworzących przeplot tkaniny na jej deformację, jest ona przedstawiona w symulacjach za pomocą modelu bezpośrednio opisującego jej mezostrukturę. Symulacje przeprowadzono z użyciem, wykorzystującego jawny schemat całkowania równań ruchu, programu ANSYS AUTODYN v.16. Przedstawiono wyniki symulacji uderzenia 9 mm pocisku Parabellum FMJ (*Full Metal Jacket*) w warstwy tkaniny Twaron<sup>®</sup> T750 umieszczone na plastelinie balistycznej. Wyniki symulacji porównano z wynikami uzyskanymi podczas badań kuloodporności.

**Słowa kluczowe:** mechanika, osłony osobiste, tkanina aramidowa, badania kuloodporności, symulacje numeryczne

### 1. Wstęp

Od blisko 50 lat tkaniny aramidowe, ze względu na właściwości tworzących je włó-

**Abstract.** Essential aspects of numerical analysis for bullet hitting elastic layers of aramid fabric placed on a plastic substratum imitating the human body are presented in the paper. A review of results for bullet-proof vests tested on various substrata is included in the paper with justification of their use. It is explained why the ballistic plasticine is used as a substructure imitating the human body in most standards binding in the world for testing individual protections. Methods for modelling the fabrics with results of own numerical analyses are presented. As mutual reaction of yarns creating the interweaving of the fabric has an essential impact on its deformation then it is represented in simulations by a model that directly describes its mezo-structure. Simulations were carried out by using an explicit procedure for integration of motion equations in program ANSYS AUTODYN v.16. The results of hitting by 9 mm bullet Parabellum FMJ (*Full Metal Jacket*) into the layers of Twaron<sup>®</sup> T750 fabric placed on ballistic plasticine are presented. Results of simulation and bulletproof resistance tests are compared.

**Keywords:** mechanics, individual protections, aramid fabric, bulletproof resistance tests, numerical simulations

### 1. Introduction

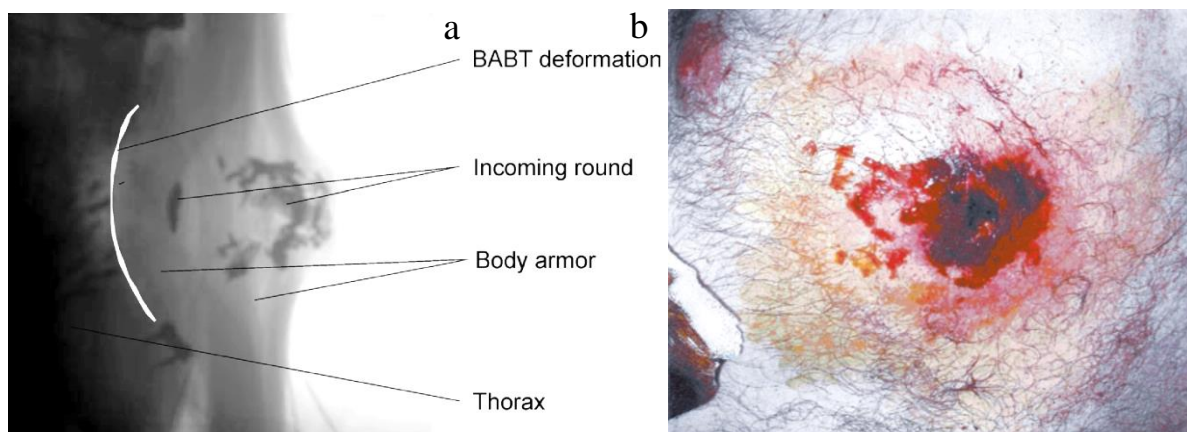
Aramid fabrics have been used for nearly 50 years and because of the proper-

kien, takie jak wysoka wytrzymałość na rozciąganie, wysoki moduł sprężystości oraz niska gęstość znajdują szerokie zastosowanie w elementach ochrony osobistej.

W przypadku odporności balistycznej kamizelek kuloodpornych, oprócz zatrzymania wnikającego pocisku lub innego penetratora, istotne jest również pochłonięcie jak największej ilości energii kinetycznej i rozproszenie jej na jak największej powierzchni. Ma to na celu ograniczenie ugięcia kamizelki, które może wywołać w ciele człowieka urazy takie jak wylew, złamania kości lub urazy narządów wewnętrznych (rys.1). Ugięcie to w literaturze polskiej określane jest jako tępe ugięcie dynamiczne lub uraz tępy za pancerzem, natomiast w literaturze angielskojęzycznej określane jest jako *behind armour blunt trauma (BABT)*.

ties of fibres they consist of, such as high tensile strength, high modulus of elasticity and low density, they are widely used in components of individual protections.

For the ballistic resistance of bullet-proof vests, apart of stopping a piercing bullet or other penetrator, an important thing also is to absorb possibly maximal amount of kinetic energy and scatter it on possibly maximal surface. The aim of it is to limit the bending of the vest which may cause such injuries as bleeding, breaking the bones and injuries of internal organs (Fig.1). The bending is named in the Polish terminology as blunt dynamic deformation behind the armour and in western literature as *behind armour blunt trauma (BABT)*.



**Rys. 1. Ugięcie w ciele człowieka po uderzeniu pociskiem:** a - zdjęcie rentgenowskie [1]; b - uszkodzenia ciała człowieka po uderzeniu 9 mm pociskiem w miękkie warstwy tekstylne [2]

**Fig. 1. Indentation in human body caused by bullet impact (behind armour blunt trauma):** a - X-ray photography [1], b - Personal injury after 9 mm bullet impact into soft textile layers [2]

*BABT defromation* – deformacja typu BABT (urazu tępego za pancerzem)

*Incoming round* – nadlatujący pocisk

*Body armour* – kamizelka ochronna

*Thorax* – klatka piersiowa

W badaniach kwalifikacyjnych, dopuszczających kamizelki kuloodporne do użycia, zdolność do ograniczenia *BABT* oceniana jest na podstawie ugięcia plasteliny balistycznej, mającej imitować ciało człowieka. Ugięcie to określane jest mianem sygnatury powierzchni tylnej *BFS (backface signature)*.

W 1952 roku w USA rozpoczęto realizację programu Lightweight Soft Body Armor mającego na celu opracowanie lekkich, miękkich kamizelek kuloodpornych skrytego noszenia, nada-

During qualification tests for acceptance bulletproof vests the ability of limiting *BABT* is evaluated on the base of deformation of ballistic plasticine which imitates the human body. The dent is named as *BFS (back face signature)*.

In 1952 in the US a Lightweight Soft Body Armour program was launched aimed to develop light soft bulletproof covert vests suitable for daily use. It was assumed that the protection had to prevent

jących się do codziennego użytku. Założono, że osłona ma zapewnić brak przebiccia, śmiertelność (prawdopodobieństwo zgonu) wywołaną *BABT* poniżej 10 % oraz umożliwić dorosłemu mężczyźnie opuszczenie terenu ostrzału. Osłony badano na 40÷50 kg kozach mających odpowiadać człowiekowi o masie 70 kg [3]. Spośród różnych przebadanych materiałów wyselekcjonowano Kevlar® 29 [4]. W celu wyeliminowania konieczności badań na zwierzętach przeprowadzono badania na mającej imitować ciało człowieka 20 % żelatynie balistycznej. Na podstawie analogicznych badań takich samych pancerzy (7 warstw Kevlar® 29) umieszczonych na kozach oraz w ww. żelatynie określono, że średniemu ugięciu w żelatynie  $BFS_{sr}=44$  mm odpowiada brak zgonów wywołanych *BABT* [5].

W celu określania ugięcia w żelatynie (które jest chwilowe) niezbędne było użycie kamery do zdjęć szybkich. Aby uniknąć związanych z tym kosztów zbadano inne materiały mogące imitować ciało człowieka. Badanie polegało na uderzeniu z prędkością 55 m/s półkolistym penetratorem o masie 200 g i średnicy 80 mm [6]. Zachowanie najbardziej zbliżone do zachowania żelatyny uzyskano stosując plastelinę balistyczną Roma Plastilina No.1 (Sculpture House). Ugięcie w plastelinie w porównaniu do ugięcia w ciele kozy było o 28 % większe. Na podstawie badań na kozach określono w pracy [6], że założonemu granicznemu prawdopodobieństwu zgonu w wyniku *BABT* (10 %) odpowiada ugięcie w ciele kozy równe 44 mm. Jeżeli założymy dla tego przypadku ważność uzyskanej w badaniach półkolistym penetratorem relacji ugięcia w plastelinie do ugięcia w ciele kozy ( $BFS_{Plastilina}/BABT_{Kozka}=1,28$ ), to można pośrednio określić wartość ugięcia w plastelinie odpowiadającą danemu prawdopodobieństwu zgonu (56 mm dla 10 % oraz 44 mm dla 4 % - rys. 2).

Planowane były dalsze badania mające na celu bezpośrednią korelację deformacji plasteliny z rzeczywistym ugięciem w ciele człowieka, nie zostały jednak przeprowadzone ze względu na przerwanie finansowania [8]. Opracowana metodyka badań zaimplementowana została do normy NIJ 0101 i nadal obowiązuje w aktualnej wersji tej normy NIJ 0101.06 [9]. Metodyka ta stosowana jest jednak szeroko poza założeniami jej twórców, m.in. do badania tępego ugięcia dynamicznego w przypadku płyt twardych (gdzie występować mogą odmienne rodzaje urazów)

against piercing, fatalities (death rate) caused by *BABT* below 10 % and let the adult leave the area under fire. The protections were tested on goats with 40÷50 kg of weight what corresponded a man of 70 kg [3]. Kevlar® 29 was selected between various tested materials [4]. In order to eliminate the need of using animals the tests were performed on 20 % ballistic gelatine imitating the human body. By analogous tests of identical armours (7 layers of Kevlar® 29) covering the goats and the above mentioned gelatine it was stated that at average dents in gelatine of  $BFS_{sr}=44$  mm there is no fatalities caused by *BABT* [5].

In order to measure deformation in gelatine (that has a momentary character) a high speed camera had to be used. To avoid such costs other materials were tested to imitate the human body. A semicircular penetrator of 200 g mass and 80 mm diameter was used at these tests for hitting with velocity of 55 m/s [6]. Ballistic plasticine Roma Plastilina No.1 (Sculpture House) provided the most similar effects as the gelatine. The dent in plasticine was 28% bigger than in the body of goat. Basing on tests of goats it was stated in [6] that for the assumed limited rate of death as a result of *BABT* (10 %) there is a 44 mm dent in the goat's body. Assuming the validity of the relation between deformation in plasticine caused by semicircular penetrator and deformation in the goat's body ( $BFS_{Plasticine}/BABT_{Goat}=1.28$ ) it is possible to determine in indirect way a value of the dent in plasticine corresponding to given rate of death (56 mm for 10 % and 44 mm for 4 % - Fig. 2).

Further tests were planned to find out a direct correlation between deformation in plasticine and in human body but they were stopped because of financial shortages [8]. Developed methodology was implemented into standard NIJ 0101 and has been binding up to now in the updated version NIJ 0101.06 [9] of the standard. Anyway this methodology is widely used far beyond original concepts of its inventors for testing a blunt dynamic deformation of hard plates (where different

oraz w odniesieniu do osób o masie mniejszej niż 70 kg (gdzie istnieje większe zagrożenie urazem) [8].

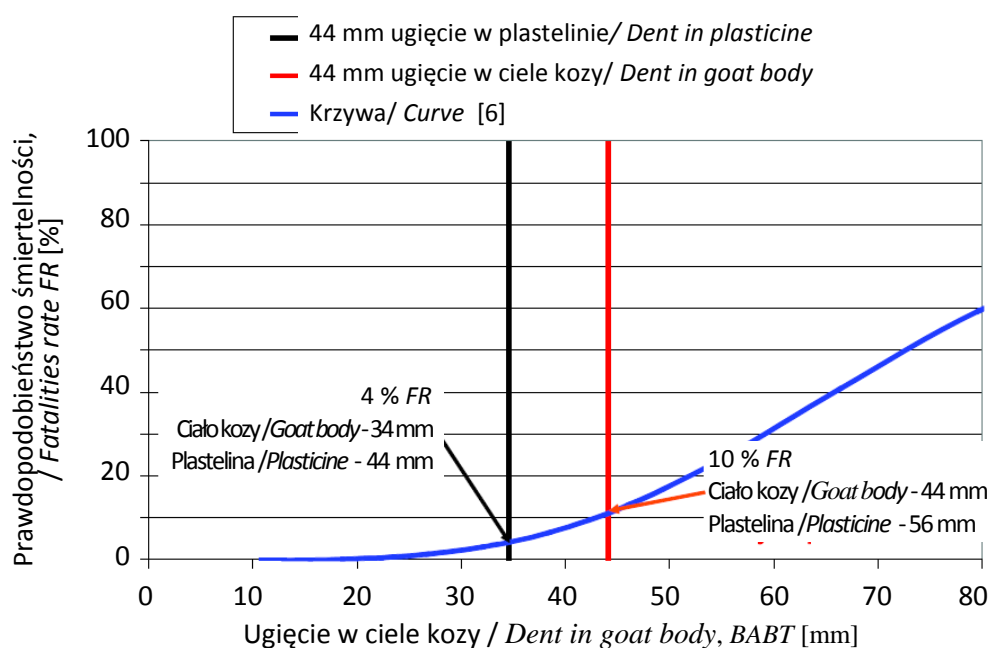
Opracowane zostały zaawansowane mechaniczne modele takie jak australijski AUSMAN imitujące ciało człowieka, uwzględniające obecność układu kostnego oraz organów. Nie znalazły one jednak do tej pory szerszego zastosowania w badaniach kwalifikacyjnych kamizełek kuloodpornych.

Plastelina balistyczna pozostaje nadal podkładem imitującym ciało człowieka obowiązującym w większości światowych norm związanych z badaniem osłon osobistych.

types of injuries may happen) and for persons with a weight less than 70 kg (where the threat of trauma is greater) [8].

Some advanced mechanical models for imitating the human body were developed such as the Australian AUSMAN where the system of bones and some organs are taken into account. But they haven't been used widely yet in qualification tests of bulletproof vests.

Ballistic plasticine still remains a substratum imitating the human body and its use is obligatory in most of world standards for testing personal protections.



**Rys. 2. Relacja ugięcia w ciele kozy do prawdopodobieństwa jej zgonu oraz ugięcia w plastelinie odpowiadające  $FR = 10\%$  oraz  $FR = 4\%$  [7]**

**Fig. 2. Relation between indentation in the goat body to the probability of its death and indentation in plasticine corresponding to  $FR = 10\%$  and  $FR = 4\%$  [7]**

## 2. Model numeryczny tkaniny aramidowej

Złożoność zachowania tkanin oraz duża liczba czynników wpływających na proces ich penetracji utrudniają przewidywanie i analizę ich reakcji podczas uderzenia pocisku oraz projektowanie nowych konstrukcji ochronnych. Modele analityczne, metody empiryczne oraz badania eksperymentalne wspomaganie są obecnie modelowaniem numerycznym. Pozwala to skrócić czas badań, zmniejszyć koszty oraz uzyskać nowy zakres informacji. W odróżnieniu od badań eksperymentalnych w sy-

## 2. Numerical Model of Aramid Fabric

The complexity of behaviour of fabrics and great number of factors influencing the process of their penetration does not help to predict and analyse their reaction during the impact of a bullet and to design new protecting solutions. Analytical models, empiric methods and experimental tests are assisted now by numerical modelling. It shortens the time of tests, reduces the costs and provides new information. In contrary to experimental tests the ideal conditions of fixing

mulacjach numerycznych mogą zostać zapewnione idealne warunki mocowania i kontaktu elementów, co umożliwia bardziej „czystą fizycznie” analizę zachodzących zjawisk.

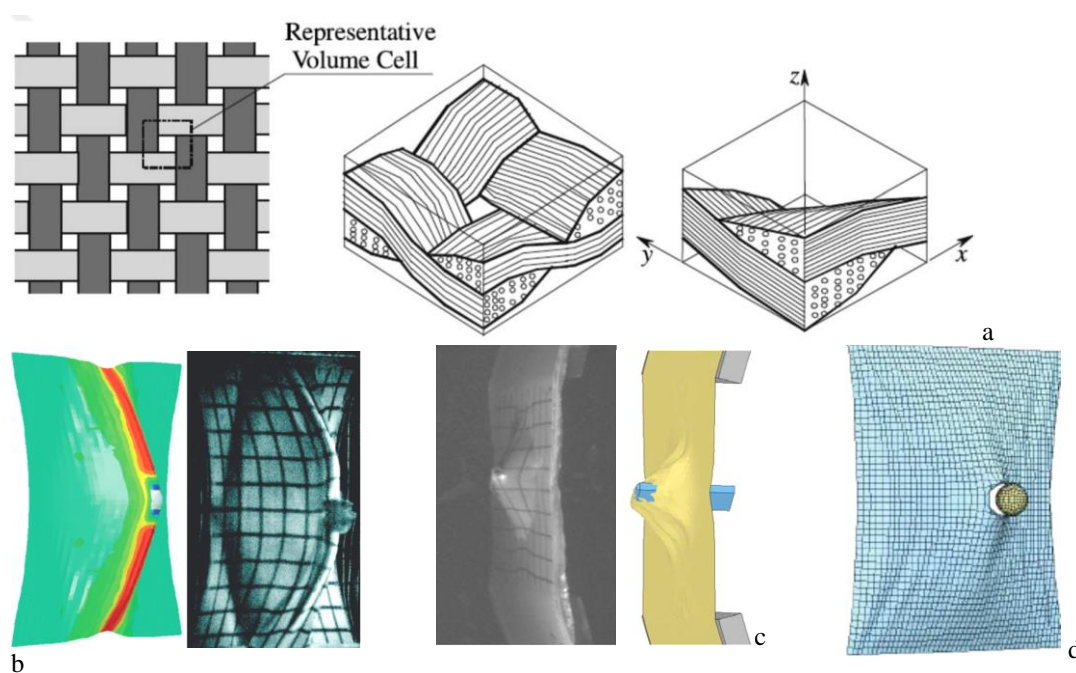
Istnieją różne metody modelowania tkanin:

- 1) metody traktujące je jako anizotropowe ośrodki ciągłe (*continuum approaches*), gdzie właściwości tkaniny określone są na podstawie eksperymentów lub za pomocą modelowania mikromechanicznego (modelowanie struktury tkaniny z użyciem reprezentatywnej komórki objętości - *Representative Volume Cell* – RVC) (rys. 3);

and contact for components may be provided at numerical simulations what secures “physically cleaner” analysis of undergoing processes.

There are various methods for modelling the fabrics:

- 1) Methods which treat them as continuous anisotropic bodies (*continuum approaches*) where the properties of the fabric are determined on the base of experiments or micro-mechanical modelling (modelling the structure of fabric by Representative Volume Cell – RVC) (Fig. 3);

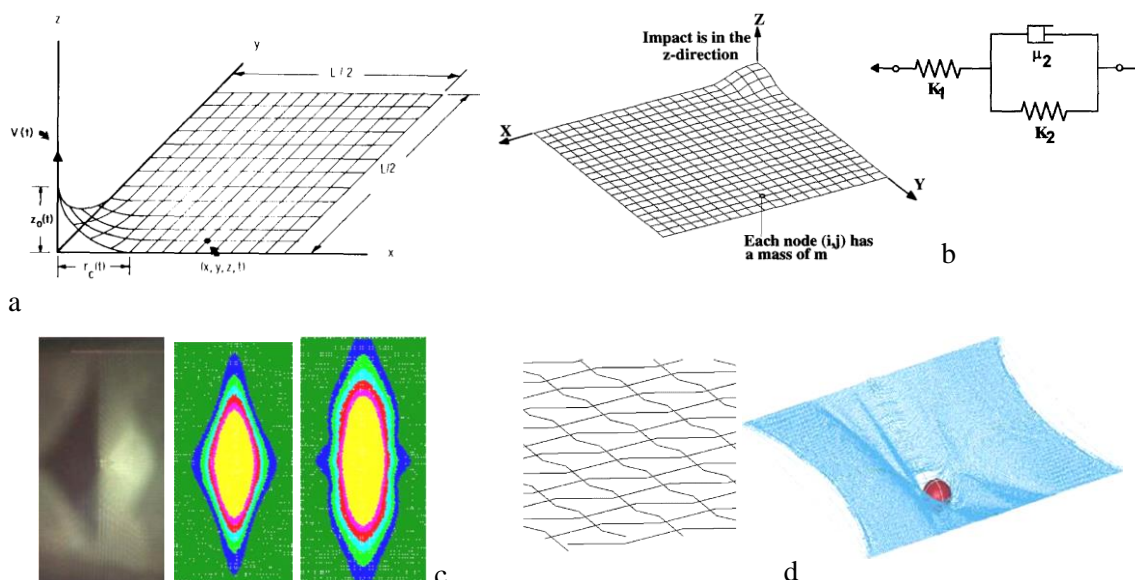


**Rys. 3. Metody traktujące tkaniny jako anizotropowe ośrodki ciągłe zaproponowane przez poszczególnych autorów: a - Ala Tabiei [10], b - Ethan M. Parsons [11], c - S. Bansal [12], d - C.T. Lim [13]**

*Fig. 3. Methods treating fabrics as anisotropic continua proposed by different authors: a – Ala Tabiei [10], b – Ethan M. Parsons [11], c – S. Bansal [12], d – C.T. Lim [13]*

*Representative volume cell – reprezentatywna komórka objętościowa*

- 2) metody przedstawiające tkaninę, jako siatkę (układ) punktów masowych połączonych wzajemnie elastycznymi członami (rys. 4);
- 2) Methods representing the fabric in the form of a network (system) of mass points mutually connected through elastic components (Fig. 4);



**Rys. 4. Modele przedstawiające tkaninę jako siatkę (układ) punktów masowych połączonych wzajemnie elastycznymi członami:** a - zaproponowany przez Davida Roylancea w 1973 [14], b – uwzględniający lepko-sprężyste zachowanie przędzy - V. P. W. Shim, [15], c - uwzględniający zmianę wyrobienia (falistości przędzy) - V.B.C. Tan [16], d - uwzględniający poślizg przędzy - V.B.C. Tan [17]

**Fig. 4. Models representing the fabric as a network (system) of mass points mutually connected by elastic components:** a – Proposed by David Roylance in 1973 [14], b – Taking into account viscous-elastic behaviour of the yarn - V. P. W. Shim, [15], c – Considering the crimp interchange (waving of the yarn) - V.B.C. Tan [16], d – Considering the slip of yarn - V.B.C. Tan [17]

*Impact is in the z-direction* – uderzenie ma miejsce w kierunku osi z  
*Each node(i,j) has a mass m* – każdy węzeł (i,j) ma pewną masę m

- 3) metody bezpośrednio modelujące ich mezostrukturę z uwzględnieniem kształtu i wymiarów przędz (wątku oraz osnowy) (za pomocą elementów bryłowych lub powłokowych) oraz szczegółów ich wzajemnego położenia (przeplotu) (*discrete, three-dimensional approaches*) (rys. 5).
- 4) metody mieszane - modelujące przędze będące w bezpośrednim kontakcie z penetratorem (*principal yarns*) z uwzględnieniem kształtu i wymiarów przędz oraz szczegółów przeplotu, natomiast pozostałych - jako zhomogenizowany ośrodek ciągły (rys. 6).

Zalety i wady wymienionych metod modelowania przedstawiono w tabeli 1.

Ze względu na istotny wpływ wzajemnych oddziaływań przędz, takich jak: zmiana wyrobienia (*crimp interchange*), względny obrót (*yarn trellising*), blokowanie się (*yarn locking*), poślizg (*yarn slip/pullout*) na właściwości ochronne tkaniny w budowanym modelu numerycznym uwzględniono przędze oraz ich przeplot.

Podczas prowadzonych w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia prac zbudowa-

- 3) Methods for direct modelling their mezo-structure and considering the shape and size of yarns (thread and warp) (by volume or surface/shell components) and details of their mutual position (interweaving) (*discrete, three-dimensional approaches*) (Fig. 5).

- 4) Mixed methods modelling the yarns which contact directly with a penetrator (*principal yarns*) by considering the shape and size of yarns and details of interweaving and the rest of them as homogeneous continuum (Fig. 6).

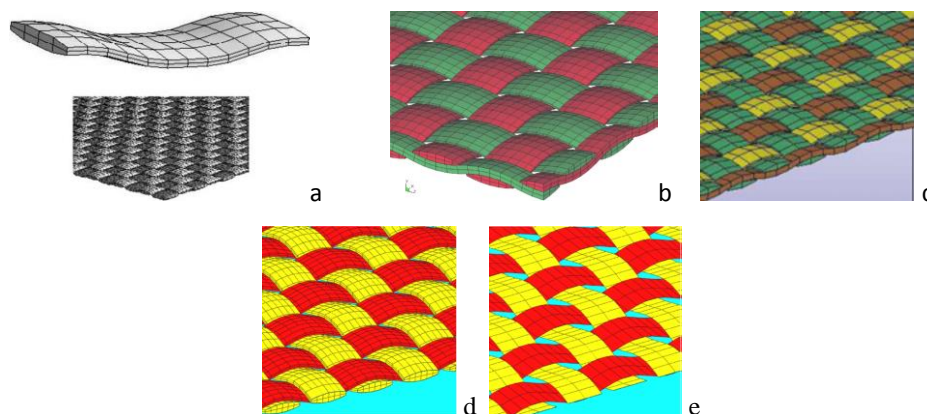
Pros and cons of modelling methods listed above are presented in table 1.

Because of an essential influence of mutual interaction of yarns such as: crimp interchange, yarn trellising, yarn locking, yarn slip/pullout into the protective properties of fabric, the yarns and their interweaving were taken into consideration in this model.

A three dimensional numerical model of Twaron® T750 fabric has been developed

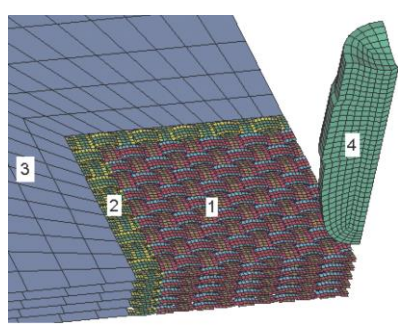
wany został trójwymiarowy model numeryczny tkaniny Twaron® T750 za pomocą elementów bryłowych. Symulacje zostały zrealizowane za pomocą programu do wspomagania obliczeń inżynierskich ANSYS Autodyn v.16.

in the Military Institute of Armament Technology by using volume components. The simulations were carried out by ANSYS Autodyn v.16 program for assisting engineering.

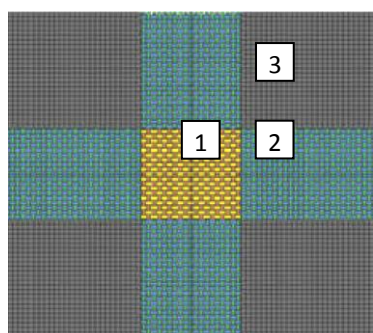


**Rys. 5. Metody bezpośrednio modelujące tkaniny z uwzględnieniem kształtu i wymiarów przędzy zaproponowane przez poszczególnych autorów: a - Donald A. Shockey [18], b - Yiping Duan [19], c - Sidney Chocron [20], d, e - M. Grujčić [21]**

*Fig. 5. Methods for direct modelling of fabrics with consideration of shape and sizes of yarn proposed by following authors: a - Donald A. Shockey [18], b - Yiping Duan [19], c - Sidney Chocron [20], d, e - M. Grujčić [21]*



1. Struktura tkana z modelem zniszczenia - *Woven structure with model of destruction*;
2. Struktura tkana bez modelu zniszczenia - *Woven structure without model of destruction*;
3. Obszar zhomogenizowany – *Homogeneous area*;
4. Pocisk - *Bullet*



1. Struktura tkana / elementy bryłowe - *Woven structure / Volume components*
2. Struktura tkana / elementy shelowe - *Woven structure / Shell components*
3. Obszar zhomogenizowany / elementy shelowe - *Homogeneous area / Shell components*

**Rys. 6. Metody mieszane modelowania tkanin zaproponowane przez poszczególnych autorów: a - Rimantas Barauskas [22]; b - Gaurav Nilakantan [23]**

*Fig. 6. Mixed methods for modelling the fabrics proposed by: a - Rimantas Barauskas [22]; b - Gaurav Nilakantan [23]*

	Metody	Zalety	Wady
1.	traktujące tkaniny jako anizotropowe ośrodki ciągłe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- efektywność obliczeniowa (niewielkie wymagania dotyczące sprzętu komputerowego);</li> <li>- możliwość łatwego łączenia modelu tkaniny z innymi modelami materiałowymi w układach kompozytowych</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nieuwzględnienie wszystkich głównych form deformacji tkaniny, wynikających z wzajemnego oddziaływania przędzy;</li> <li>- w przypadku projektowania nowych tkanin (modyfikacji już istniejącego modelu) brak możliwości bezpośredniej zmiany właściwości modelu tkaniny poprzez zmianę przeplotu lub właściwości przędzy (brak bezpośredniej zależności między właściwościami zhomogenizowanego modelu i właściwościami fizycznymi przędzy)</li> </ul>
2.	przedstawiające tkaninę jako siatkę punktów masowych	<ul style="list-style-type: none"> <li>- efektywność obliczeniowa (niewielkie wymagania dotyczące sprzętu komputerowego)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- uwzględnienie jedynie niektórych mezostrukturalnych form deformacji tkaniny;</li> <li>- trudny do zdefiniowania kontakt pomiędzy warstwami tkaniny w układach wielowarstwowych;</li> <li>- w przypadku kompozytów zbrojonych tkaniną trudne do zrealizowania wcielenie osnowy w model tkaniny</li> </ul>
3.	bezpośrednie modelujące mezostrukturę tkaniny	<ul style="list-style-type: none"> <li>- uwzględnienie wszystkich głównych form deformacji tkaniny, wynikających z wzajemnego oddziaływania przędzy;</li> <li>- możliwość łatwej adaptacji już istniejącego modelu do analizy wpływu zmiany przeplotu lub właściwości przędzy na zachowanie tkaniny</li> <li>- brak konieczności homogenizowania modelu materiałowego</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- wysokie wymagania dotyczące sprzętu komputerowego;</li> <li>- bardziej skomplikowana (niż w przypadku metod homogenizujących strukturę tkaniny) integracja modelu tkaniny z innymi modelami materiałowymi w układach kompozytowych;</li> <li>- konieczność dokładnego określenia wymiarów i kształtu przędz oraz parametrów określających ich wzajemne położenie (przeplot)</li> </ul>
4.	mieszane	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zwiększenie efektywności obliczeniowej względem metod bezpośrednio modelujących mezostrukturę tkaniny na całym obszarze</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- skomplikowany model</li> <li>- konieczność właściwego połączenia odmiennie modelowanych obszarów tkaniny</li> </ul>

Table 1. Pros and cons of fabric modelling methods



	Methods	Advantages	Disadvantages
1.	Treating the fabrics as an anisotropic continuum	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Effective engineering (medium requirements for computing hardware);</li> <li>- Possibility of simple combinations of a fabric model with other material models in composite systems</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Some main forms of fabric deformation resulting from mutual interaction of the yarn are not taken into account;</li> <li>- In the case of designing the new fabrics (modification of an existing model) there is no possibility for direct change of fabric model properties through the change of interweaving or the properties of the yarn (there is no direct dependence between the properties of the homogeneous model and physical properties of the yarn).</li> </ul>
2.	Representing the fabric as a network of mass points	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Effective calculations (limited requirements for computer hardware)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Only some mezzo-structural forms of fabric deformation are taken into account;</li> <li>- Contact between the layers of the fabric in multi-layer systems is difficult for definition;</li> <li>- In the case of composites reinforced by the fabric it is difficult to incorporate the warp into the model of fabric.</li> </ul>
3.	Direct ones modelling the mezzo-structure of fabric	<ul style="list-style-type: none"> <li>- All main forms of fabric deformation resulting from mutual interaction of the yarn are taken into account;</li> <li>- Possibility for a simple adaptation of an existing model to analyse the influence of changes in the interweaving or yarn properties into the behaviour of the fabric;</li> <li>- There is no need for homogenisation of material model</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- High demands for computer hardware;</li> <li>- The integration of fabric model with other material models in composite systems is more complicated than for the methods with homogenisation of fabric structure;</li> <li>- A precise specification of sizes and the shape of the yarns with the parameters describing their mutual position (interweaving) is required</li> </ul>
4.	Mixed ones	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Calculating effectiveness is greater than for methods with direct modelling of fabric mezzo-structure for the whole area</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sophisticated model</li> <li>- The parts of fabric with different modelling have to be properly combined</li> </ul>

Na podstawie pomiarów grubości jednej warstwy tkaniny oraz pojedynczych przędz, wyznaczono wartości średnie grubości tkaniny  $g$ , grubości pojedynczej przędzy  $t$  (założono, że  $g = 2t$ ), szerokości przędzy  $w$  oraz rozstawu pomiędzy sąsiadującymi przędzami  $s$ , które przyjęto w modelu CAD [24].

Przędza tworząca tkaninę Twaron<sup>®</sup> T750 przedstawiona została za pomocą modelu ortotropowego liniowo-sprężystego.

Jako kryterium zniszczenia przędzy przyjęto osiągnięcie przez materiał granicznej wartości naprężenia ( $\sigma_c = 3$  GPa) wzdłuż głównego kierunku (długości) danej przędzy (wątku lub osnowy).

### 3. Badania kuloodporności warstw Twaron<sup>®</sup> T750

W pracy [25] opisane zostały badania eksperymentalne i numeryczne uderzenia 9 mm pocisku Parabellum FMJ w warstwy aramidowe Twaron<sup>®</sup> CT709 bez zastosowania podłoża. W pracy tej ugięcie w kierunku ostrzału niepodpartych warstw odnoszone było bezpośrednio do wymagań dotyczących ugięcia w materiale imitującym ciało człowieka. Podejście takie wydaje się nieprawidłowe, co potwierdza porównanie uzyskanych w pracy [25] wyników z własnymi wynikami badań na podłożu z plasteliny balistycznej. W przypadku tego samego rodzaju warstw, pocisku oraz prędkości uderzenia uzyskano ugięcia mniejsze w stosunku do opisanych w pracy [25] badań symulacyjnych i eksperymentalnych odpowiednio o 4,5 mm (14 %) i 17 mm (38 %).

W przypadku badań osłon przeznaczonych do ochrony ciała człowieka niezbędne jest uwzględnienie obecności imitującego go materiału (plasteliny, żelatyny, itp.). Przeprowadzone zostały badania eksperymentalne oraz symulacje numeryczne penetracji 9 mm pociskiem Parabellum FMJ (*Full Metal Jacket*) 10 oraz 22 warstw tkaniny aramidowej Twaron<sup>®</sup> T750 o wymiarach 100x100 mm, umieszczonej na plastelinie balistycznej (Balistic Plasticine item No. 071756; producent - Carl Weible KG).

W badaniach eksperymentalnych uzyskano przebicie próbki w przypadku zastosowania 10 warstw i zatrzymanie pocisku w przypadku zastosowania 22 warstw.

Parametry modelu numerycznego pocisku

Basing on measurements made for one layer of the fabric and individual samples of yarn the average values of the fabric thickness  $g$ , single yarn thickness  $t$  (it was assumed that  $g = 2t$ ), width  $w$  of the yarn and space  $s$  between adjacent yarns were determined and used in CAD model [24].

The yarn of Twaron<sup>®</sup> T750 fabric was represented by orthotropic linear-elastic model.

As the criterion of yarn damage the state of reaching the elastic limit strength ( $\sigma_c = 3$  GPa) by material along the main direction (length) of a specific yarn (thread or warp) was accepted.

### 3. Bullet Resistance Tests for Layers of Twaron<sup>®</sup> T750

Experimental and numerical tests of 9 mm Parabellum FMJ bullet hitting into aramid layers of Twaron<sup>®</sup> CT709 without using any substratum were described in publication [25]. In this work the deformation of unsupported layers in the direction of firing was referred directly to requirements for deformation in the material imitating the human body. Such approach seems to be unjustified what is confirmed by the comparison of results received in the work [25] with own results of tests on the ballistic plasticine substratum. For the same type of layers, bullet, and hitting velocity the received dents were smaller than simulating and experimental tests described in the work [25] respectively by 4.5 mm (14 %) and 17 mm (38 %).

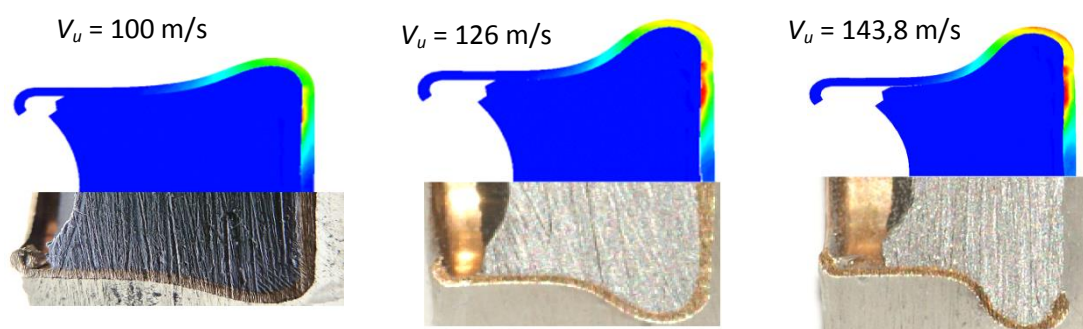
Screens designated for protection of human body have to be tested with the presence of body imitating material (plasticine, gelatine, etc.). Experimental tests and numerical simulations were carried for the penetration of 9 mm bullet Parabellum FMJ (*Full Metal Jacket*) through 10 and 22 layers of aramid fabric Twaron<sup>®</sup> T750 with the size of 100x100 mm placed on Balistic Plasticine item No. 071756 manufactured by Carl Weible KG).

In experimental tests the sample was penetrated in the case of 10 layers and the bullet was arrested in the case of 22 layers.

Parameters of bullet numerical model

dobrane zostały na podstawie wcześniej wykonanych badań eksperymentalnych i numerycznych przedstawionych w [26]. W badaniach tych zwalidowano model pocisku w oparciu o jego uderzenie w płytę ze stali pancernej. Uzyskano zadowalającą zgodność z eksperymentem - różnice wymiarów grzybka i długości pocisku pomiędzy eksperymentem i symulacją wyniosły  $< 5\%$  (rys. 7).

were taken on the base of earlier performed experimental and numerical investigations presented in [26]. During these tests the model of the bullet was validated by its impact into the armour steel plate. A sufficient compliance with the experiment was achieved – differences of dimensions of mushroom cap and length of the bullet in experiment and simulation were  $< 5\%$  (Fig. 7).



**Rys. 7. Końcowe deformacje 9 mm pocisku Parabellum FMJ w symulacjach i podczas badań eksperymentalnych dla wybranych prędkości uderzenia pocisku w płytę ze stali pancernej**

*Fig. 7. Final deformations of 9 mm Parabellum FMJ bullet in simulations and experiments for selected velocities of hitting into armour steel plate*

Model numeryczny plasteliny balistycznej zweryfikowano na podstawie badania plastyczności podłoża wg. polskiej normy badania kamizelek kuloodpornych PN-V-87000:2011 [27]. W badaniu tym, na umieszczoną w pojemniku plastelinę balistyczną, z wysokości 2 m zrzucany jest swobodnie ciężarek stalowy o półkolistym zakończeniu, średnicy 44 mm i masie 1 kg. Po wyrównaniu powierzchni (ściągnięciu nadmiaru podłoża) do poziomu brzegów pojemnika mierzone jest ugięcie w plastelinie. Powinno ono wynosić  $25 \pm 3$  mm.

Przeprowadzono symulacje numeryczne zrzutu swobodnego z wstępnie dobranymi z literatury wartościami parametrów materiałowych, które następnie modyfikowano, aby uzyskać ugięcie w podłożu zgodne z wymaganiami. Wyselekcjonowane parametry oraz końcową deformację podłoża przedstawiono w tabeli 2 oraz na rysunku 8.

Numerical model of ballistic plasticine was verified by testing the plasticity of the substratum according to the Polish standard for testing bulletproof vests PN-V-87000:2011 [27]. In this test a steel weight of 1 kg with the semicircle front and 44 mm diameter is dropped from the height of 2 m on the ballistic plasticine placed in a container. After levelling the surface (removing the excessive portion of the substratum material) to the edge of container the deformation of plasticine is measured. It had to be  $25 \pm 3$  mm.

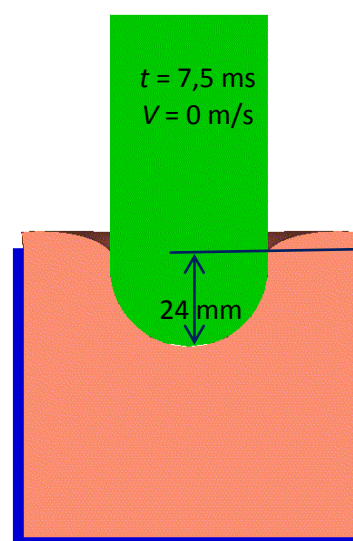
Numerical simulations were carried out for free dropping at set values of material parameters which were first taken from literature and next modified to get the deformation in the substratum that meets the requirements. Selected parameters and final deformation of the substratum is presented in table 2 and in figure 8.

Tabela 2. Wyselekcjonowane parametry plasteliny  
 Table 2. Selected parameters of plasticine

Gęstość, $\rho$ , g/cm <sup>3</sup> Density, $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	1,56
Moduł Younga, $E$ , MPa Young modulus, $E$ , MPa	3
Moduł ścinania, $G$ , MPa Shearing modulus, $G$ , MPa	1,007
Moduł Helmholtza, $K$ , MPa Helmholtz modulus, $K$ , MPa	50
Granica plastyczności, $A$ , MPa Plasticity limit, $A$ , MPa	0,065
Stała umocnienia, $B$ , MPa Coefficient of strengthening, $B$ , MPa	0,37
Wykładnik umocnienia, $n$ Exponent of strengthening, $n$	0,6
Współczynnik zmiękczenia termicznego, $m$ / Coefficient of thermal softening, $m$	1
Współczynnik Poissona, $\nu$ Poisson coefficient, $\nu$	0,49
Przewodność cieplna, J/(m*K*s) Thermal conductivity, J/(m*K*s)	0,6
Pojemność cieplna, J/(kg*K) Thermal capacity, J/(kg*K)	1280

Wykonano symulacje numeryczne uderzenia pocisku w warstwy tkaniny umieszczone na podłożu z plasteliny balistycznej. W symulacjach założono warunki symetrii na dwóch prostopadłych płaszczyznach, modelując w ten sposób jedynie ¼ układu. W przypadku modeli z 10 i 22 warstwami tkaniny składały się one odpowiednio z 1 200 000 oraz 2 500 000 elementów. Ze względu na dużą liczbę elementów czas realizacji obliczeń wynosił ok. 5 miesięcy.

Silne deformacje elementów modeli pocisku oraz tkaniny powodowały zmniejszenie kroku czasowego (ang. timestep -  $TS$ ), w wyniku, czego zwiększał się znacznie czas realizacji obliczeń lub obliczenia były przerwane w wyniku przekroczenia minimalnej dopuszczalnej wartości parametru  $TS$ . W tym wypadku konieczne okazało się wprowadzenie odpowiednich numerycznych kryteriów erozji usuwających zdegenerowane komórki. Oprócz usuwania elementów, które uległy zniszczeniu, usuwane były również te, których deformacje powodowały zmniejszenie kroku czasowego (opcja: *erode after timestep*) poniżej wartości 1 E-6 ms. Stosunkowo niewielka liczba zerodowanych komórek wskazuje, że przyjęte kryteria nie miały



**Rys. 8. Wynik symulacji zrzutu swobodnego ciężarka na podłoże z plasteliny balistycznej**

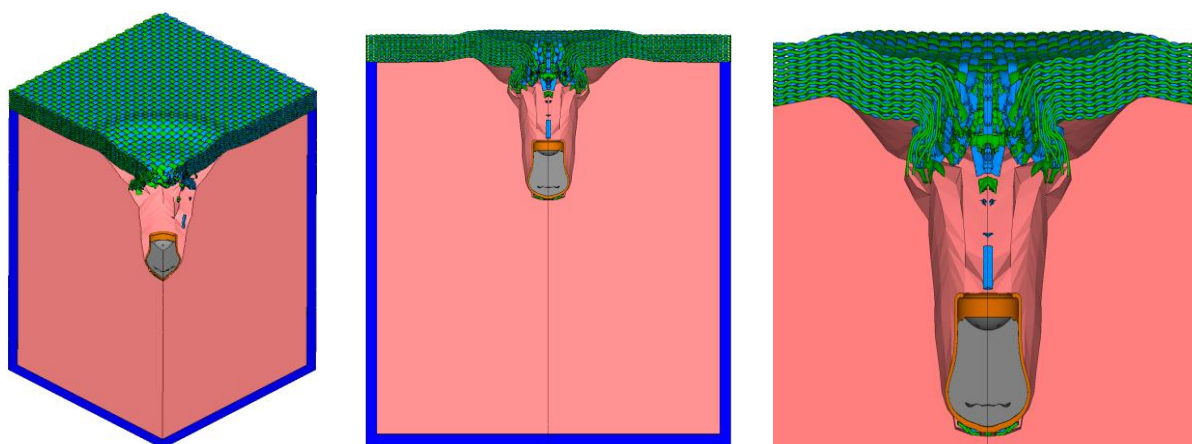
**Fig. 8. Results of simulation for free dropping of a weight on the substratum of ballistic plasticine**

Numerical simulations of bullet hitting into the layers of fabric placed on the ballistic plasticine substratum were made. The conditions of symmetry on two perpendicular planes were assumed for modelling a ¼ part of the system. Models with 10 and 22 fabric layers consisted respectively of 1 200 000 and 2 500 000 components. The calculations have lasted for ca. 5 months because of great number of components.

Significant deformations of parts of bullet and fabric models caused the time step ( $TS$ ) had to be decreased what extended time of calculations or they were interrupted because of crossing the minimal acceptable value of  $TS$ . In this case some relevant criteria of erosion had to be used for removing degenerated cells. Apart of removing components which were damaged there were also eliminated such ones which deformations caused the reduction of time step (option: *erode after time step*) below the value of 1 E-6 ms. Relatively small number of eroded cells indicates that the accepted criteria had not affected significantly the physics of simulated phenome-

istotnego wpływu na fizyczność symulowanego zjawiska. W przypadku symulacji uderzenia w 10 warstw tkaniny uzyskano zgodnie z wynikami badań ostrzałem przebicie próbki (rys. 9, 10).

non. In the case of simulation of hitting into 10 layers of fabric the penetration was obtained in accordance with results of firing tests of the sample (Fig. 9, 10).



**Rys. 9. Symulacja uderzenia pocisku w 10 warstw tkaniny aramidowej**

*Fig.9. Simulation of hitting by a bullet into 10 layers of aramid fabric*

	Badania ostrzałem/Firing tests		Symulacja Autodyn/Simulation	
1 warstwa / przód 1-st layer/front				
10 warstwa / tył 10-th layer/back				

**Rys. 10. Odkształcenia i zniszczenia tkaniny oraz podłoża w symulacji oraz podczas badań ostrzałem**

*Fig. 10. Deformation and destruction of fabric and substratum in simulation and at firing tests*

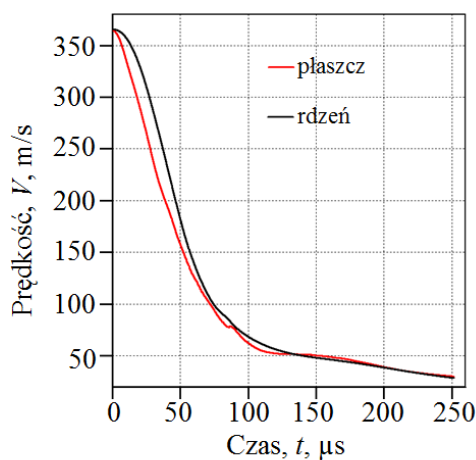
W symulacji uderzenia w 22 warstwy tkaniny, zgodnie z wynikami badań doświadczalnych, uzyskano zatrzymanie pocisku.

Ze względu na bardzo długi czas symulacji i uzyskanie małej prędkości szczątkowej pocisku, niemożęcej wpłynąć istotnie na deformację układu, przerwano obliczenia przed całkowitym wyhamowaniem pocisku. W początkowym okresie symulacji (do ok. 75  $\mu$ s) pocisk wytracił ok. 73 % prędkości. Następnie tempo spadku prędkości zmniejszało się, przyjmując od 200-tnej  $\mu$ s stałą w przybliżeniu

In simulation of the hitting into 22 layers of fabric the bullet was stopped what is in accordance with experimental results of tests.

For the long time of simulation and obtained small residual velocity of the bullet which cannot influence significantly on deformation of the system the calculations were interrupted before the bullet stopped. In the first part of simulation (to ca. 75  $\mu$ s) the bullet lost ca. 73 % of velocity. Next the rate of velocity decrease was falling until 200  $\mu$ s

wartość (rys. 11). W momencie przzerwania symulacji w czasie 250  $\mu$ s prędkość rdzenia pocisku wynosiła 28,4 m/s. Analiza wymiarów pocisku w zakresie 200÷250  $\mu$ s wskazuje, że nie ulega on już dalszym deformacjom, w związku z czym zmierzone w czasie 250  $\mu$ s wymiary odkształconego pocisku przyjęto jako wymiary końcowe. Za pomocą logarytmicznej linii trendu aproksymowano czas zakończenia symulacji ( $t_k=475$   $\mu$ s), a następnie na podstawie ugięcia podłoża w zakresie 200 ÷ 250  $\mu$ s, za pomocą przybliżenia liniowego i logarytmicznego, wyznaczono prawdopodobne wartości końcowego ugięcia podłoża, wynoszące odpowiednio 32 mm i 28 mm (rys. 12).



Rys. 11. Zmiana średniej prędkości rdzenia i płaszcza pocisku w czasie

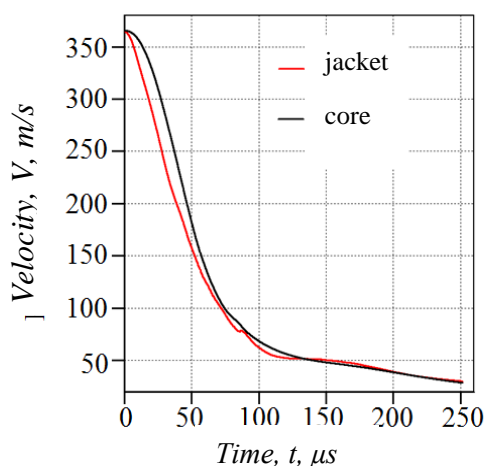
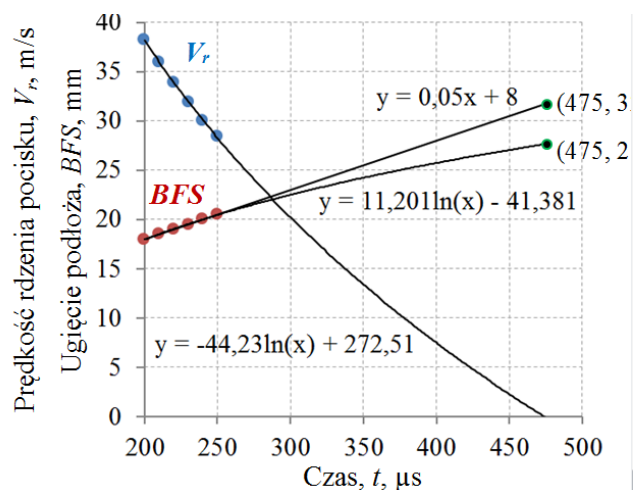


Fig. 11. Change of average velocity of bullet core and jacket versus time

Sposób deformacji warstw tkaniny w symulacji numerycznej jest bardzo zbliżony do tego obserwowanego w badaniach ekspery-

when it became approximately constant (Fig. 11). In the moment of 250  $\mu$ s when the simulation was stopped the velocity of bullet core was 28.4 m/s. Analysis of bullet dimensions between 200÷250  $\mu$ s indicates that it is not subjected to any further deformations and the sizes of deformed bullet measured in 250  $\mu$ s were taken as final ones. The time of termination of simulation was approximated ( $t_k=475$   $\mu$ s) by using a logarithmic line of trend and then basing on the bending of the substratum for 200 ÷ 250  $\mu$ s the expected values of substratum final bending respectively of 32 mm and 28 mm (Fig. 12) were determined by linear and logarithmic approximations.



Rys. 12. Aproksymowane wartości ugięcia podłoża BFS

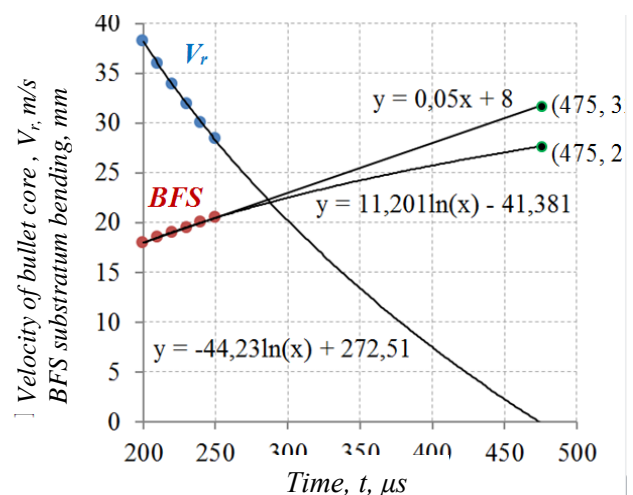


Fig. 12. Approximated values of BFS substratum bending

The way fabric layers are deformed in simulation is very similar to that which is observed in experimental tests – e.g. there is

mentalnych - widoczne jest m.in. wyciąganie przędz (*yarn pull out*), ich wzajemne blokowanie się oraz piramidalne ugięcie. Wskazuje to, że struktura tkaniny została zamodelowana poprawnie a parametry związane ze sztywnością materiału zostały dobrane właściwie. W dalszych analizach konieczna jest natomiast weryfikacja przyjętych obecnie parametrów charakteryzujących zniszczenie materiału.

Wyniki symulacji uderzenia pocisku w 22 warstwy tkaniny przedstawiono na rysunkach 13÷16 oraz w tabeli 3.

yarn pulling out effect, mutual locking and pyramidal bending. It indicates that the structure of the fabric has been modelled correctly and parameters connected with the stiffness of the material were suitably selected. Verification of currently accepted parameters describing damage of the material has to be carried out in further analyses.

Results of simulation of bullet hitting 22 layers of fabric are presented in figures 13÷16 and in table 3.

Tabela. 3. Porównanie wyników analizy numerycznej i eksperymentu uderzenia pocisku w pakiet 22 warstw tkaniny balistycznej Twaron® T750 ( $V_u=365$  m/s)

Table 3. Comparison of results of numerical analysis and experiment for impact of the bullet into a set of 22 layers of ballistic fabric Twaron® T750 ( $V_u=365$  m/s)

Kryterium / Criterion		Wyniki / Results			Różnica pomiędzy wynikami symulacji i eksperymentu, % Difference between results of simulation and experiment	
		eksperymentu Experiment	symulacji Simulation			
Wynik Result	P/Z (P - przebicie próbki/ Penetration of sample, Z - zatrzymanie pocisku / Arresting of the bullet	Z	Z		Zgodne Compatible	
Podłoże Base	Ugięcia podłoża/ Bendig of the base, BFS, mm	30	28	32	-7	+7
Pocisk Bullet	Długość/ Length, $L_p$ , mm	5,7	8,5		+49	
	Średnica grzybka/ Diameter of mushroom cap, $D_{min} / D_{max}$ , mm	14,8 / 17,3	16,9		+14 / -2	

#### 4. Wnioski

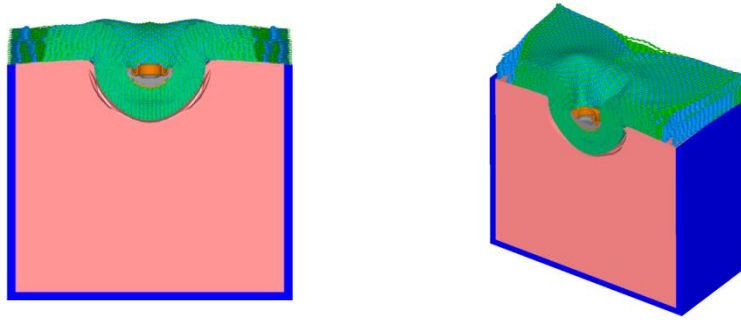
Na podstawie dokonanej analizy stanu techniki w zakresie badań warstw aramidowych umieszczonych na podłożu imitującym ciało człowieka oraz wyników własnych badań eksperymentalnych i numerycznych wyciągnięto następujące wnioski:

1. Metodologia badania kamizelek kuloodpornych na podłożu z plasteliny balistycznej stosowana jest obecnie w wielu przypadkach (badania płyt twardych, w odniesieniu do osób o masie mniejszej niż 70 kg) poza pierwotnymi założeniami jej twórców.

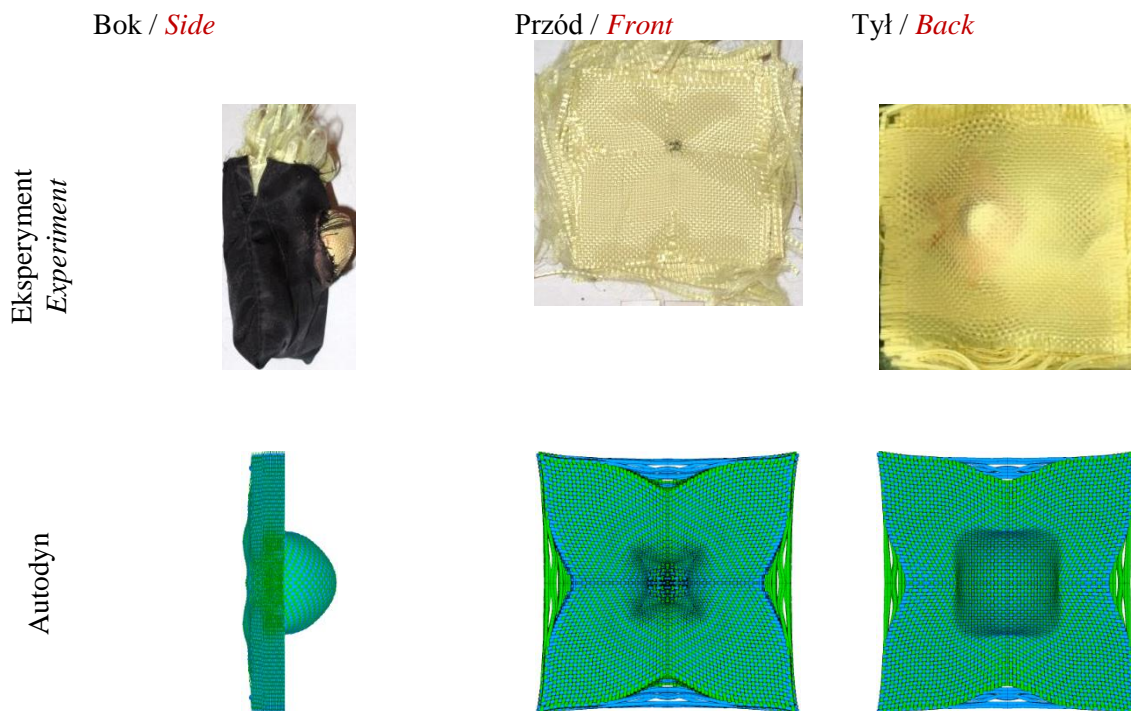
#### 4. Conclusions

Following conclusions were drawn on the base of performed studies on the state of technologies for testing aramid layers placed on the substratum imitating the human body and the results of own experimental and numerical tests:

1. Methodology of testing bulletproof vests on the ballistic plasticine base is now used in many cases (testing hard plates, for persons with weight less than 70 kg) what is beyond the original assumptions of its inventors.



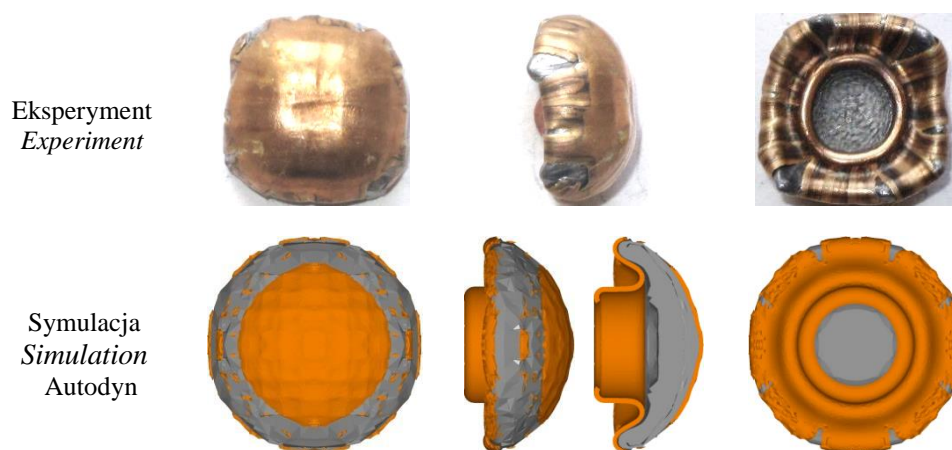
**Rys. 13. Symulacja uderzenia 9 mm pocisku Parabellum w pakiet 22 warstw tkaniny aramidowej**  
**Fig. 13. Simulation of 9 mm Parabellum bullet hitting into a set of 22 layers of aramid fabric**



**Rys. 14. Porównanie deformacji warstw tkaniny otrzymanych w symulacji i eksperymencie**  
**Fig. 14. Comparison of deformations of fabric layers received in simulation and experiment**

2. Bezpośrednie modelowanie przeplotu tkaniny i przędz za pomocą elementów bryłowych jest uniwersalną i dokładną metodą modelowania tkaniny, w przypadku analizy jej odporności na oddziaływanie pocisku. Wadą metody są wysokie wymagania pod względem mocy obliczeniowej. Czas realizacji 250  $\mu$ s symulacji numerycznej uderzenia pocisku w 22 warstwy tkaniny o wymiarach 100x100 mm za pomocą stacji roboczej z układem dwóch procesorów Intel Xeon W5580- 3,19 GHz oraz 64GB pamięci RAM wyniósł 5 miesięcy.
2. Direct modelling of interweaving for fabric and yarns by volume components is a universal and accurate method for fabric modelling at investigating its resistance against the action of a bullet. High requirement for calculating power is a disadvantage of this method. The performance of 250  $\mu$ s of numerical simulation for bullet hitting into 22 layers of fabric having the size of 100x100 mm by using the working station with system of two processors Intel Xeon W5580- 3.19 GHz and 64GB RAM has required 5 months.





**Rys. 15. Porównanie deformacji pocisku otrzymanych w symulacji i eksperymencie**  
**Fig. 15. Comparison of bullet deformations received in simulation and experiment**

3. Dobór sposobu modelowania tkaniny powinien być uzależniony od specyfiki przedstawianego numerycznie zjawiska fizycznego oraz dostępnych mocy obliczeniowych.
  4. Właściwie zamodelowano uderzenie pocisku w warstwy tkaniny aramidowej umieszczonej na podłożu z plasteliny balistycznej. Uzyskano, zgodnie z wynikami badań eksperymentalnych, przebicie tkaniny w przypadku zastosowania 10 warstw i zatrzymanie pocisku w przypadku zastosowania 22 warstw. Różnica głębokości ugięcia pomiędzy użytym w eksperymencie a obserwowanym podczas obliczeń wyniosła  $\Delta BFS = 2 \text{ mm}$  (6,7%).
  5. Struktura tkaniny została zamodelowana poprawnie, a parametry związane ze sztywnością materiału zostały dobrane właściwie. Sposób deformacji warstw tkaniny w symulacji numerycznej jest bardzo zbliżony do obserwowanego w badaniach eksperymentalnych - widoczne jest m.in. wyciąganie przędz, ich wzajemne blokowanie się oraz piramidalne ugięcie.
3. Selection of a way for modelling the fabric has to depend on a specific character of physical phenomenon which is represented in numerical form and disposed capacities of computer.
  4. The impact of a bullet into layers of aramid fabric covering the base of ballistic plasticine has been properly modelled. The penetration of the fabric by bullet was observed for 10 layers and its arresting for 22 layers what was in accordance with results of experimental tests. Difference between depths of deformation in experiment and observed at calculations was  $\Delta BFS = 2 \text{ mm}$  (6.7%).
  5. The structure of the fabric was properly modelled and parameters for material stiffness were selected correctly. Process of deformation of fabric layers is very close to that which is observed in experimental tests – among all there is the pulling yarn of, mutual locking and pyramidal bending.

### Literatura / Literature

- [1] Bass C. R., Salzar R. S., Lucas S. R., Davis M., Donellan L., Folk B., Sanderson E., Waclawik S.: Injury Risk in Behind Armor Blunt Thoracic Trauma. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE), Vol. 12, No. 4, 2006, s. 429-442.
- [2] Brooks A. J., Clasper J., Midwinter M. J., Hodgetts T. J., Mahoney P. F.: Ryan's Ballistic Trauma - A Practical Guide. Third Edition. London: Springer, 2011.
- [3] Goldfarb M., Clurej T., Weinstein M., Metker L.: A Method for Soft Body Armor Evaluation: Medical Assessment. EB-TR-74073. Aberdeen Proving Ground, MD, Edgewood Arsenal, 1975. Dostępne w Defense Technical Information Center (<http://www.dtic.mil/>)

- cgi-bin/GetTRDoc?AD= ADA005575&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf),otwierane 01.04.2016 r.
- [4] Montanarelli N., Hawkins C., Goldfarb M., Ciurej T.: Protective Garments for Public Officials. LWL-TR-30B73. Aberdeen Proving Ground, MD, Edgewood Arsenal, 1973. Dostępne w Defense Technical Information Center (<http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA089163&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>); otwierane 01.04.2016 r.
- [5] Metker L., Prather R., Johnson E.: A Method for Determining Backface Signatures of Soft Body Armors. EB-TR-75029. Aberdeen Proving Ground, MD, Edgewood Arsenal, 1975. Dostępne w Defense Technical Information Center (<http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA012797&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>); otw. 01.04.2016 r.
- [6] Prather R., Swann C., Hawkins C.: Backface Signatures of Soft Body Armors and the Associated Trauma Effects. ARCSL-TR-77055. Aberdeen Proving Ground, MD, Edgewood Arsenal, 1977. Dostępne w Defense Technical Information Center (<http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA049463&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>); otw.01.04.2016 r.
- [7] Board on Army Science and Technology, Division on Engineering and Physical Sciences, National Research Council: Testing of Body Materials: Phase III. The National Academies Press. Washington. 2012.
- [8] Hanlon E., Gillich P.: Origin of the 44-mm Behind-Armor Blunt Trauma Standard. ARL-RP-390. Aberdeen Proving Ground, MD, 2012. Reprint from Military Medicine. Volume 177, March 2012, s. 333-339.
- [9] National Institute of Justice: Ballistic Resistance of Body Armor - NIJ Standard-0101.06. July 2008.
- [10] Tabiei A., Yi W.: Comparative Study of Predictive Methods for Woven Fabric Composite Elastic Properties. Compos. Struct., 58, 2002, s. 149÷164.
- [11] Parsons E. M., Weerasooriya T., Sarva S., Socrate S.: Impact of Woven Fabric: Experiments and Mesostructure-based Continuum-level Simulations. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 58, 2010, s. 1995-2021.
- [12] Bansal S., Mobasher B., Rajan S. D., Vintilescu I.: Development of Fabric Constitutive Behavior for Use in Modeling Engine Fan Blade-Out Events, Journal of Aerospace Engineering, June 2009, s. 249-259.
- [13] Lim C. T., Shim V. P. W., Ng Y. H.: Finite-element Modeling of the Ballistic Impact of Fabric Armor. International Journal of Impact Engineering 28, 2003, s. 13-31.
- [14] Roylance D., Wang S. S.: Penetration Mechanics of Textile Structures: Influence of Non-Linear Viscoelastic Relaxation. Polym. Eng. and Sci., 18, 1978, s. 1068-1072.
- [15] Shim V. P. W., Tan V. B. C., Tay T. E.: Modelling Deformation and Damage Characteristics of Woven Fabric Under Small Projectile Impact. Int. J. Impact Engng. Vol. 16, No. 4, 1995, s. 585-605.
- [16] Tan V. B. C., Shim V. P. W., Zeng X.: Modelling Crimp in Woven Fabrics Subjected to Ballistic Impact. International Journal of Impact Engineering 32, 2005, s. 561-574.
- [17] Tan V. B. C., Ching T. W.: Computational Simulation of Fabric Armour Subjected to Ballistic Impacts. International Journal of Impact Engineering 32, 2006, s. 1737-1751.
- [18] Shockey D. A., Elrich D. C., Simons J. W.: Improved Barriers to Turbine Engine Fragments: Interim Report III. DOT/FAA AR-99/8, III, 2001.
- [19] Duan Y., Keefe M., Bogetti T. A., Cheeseman B. A.: Modeling the Role of Friction Dur-

- ing Ballistic Impact of a High-strength Plain-weave Fabric. *Composite Structures* 68, 2005, s. 331-337.
- [20] Chocron S., Figueroa E., King N.: Modeling and Validation of Full Fabric Targets Under Ballistic Impact. *Composites Science and Technology*. 70, 2010, s. 2012-2022.
- [21] Gruzicic M., Arakere G., Gogulapati M., Cheeseman B. A.: A Numerical Investigation of the Influence of Yarn-level Finite-element Model on Energy Absorption by a Flexible-fabric Armour During Ballistic Impact. *Proc. IMechE, Vol. 222 Part L: J. Materials: Design and Applications*, 2008, s. 259-276.
- [22] Barauskas R.: Multi-Scale Modelling of Textile Structures in Terminal Ballistics. 6th European LS-DYNA Users' Conference, 4.5.2, 2007, s. 4.141-4.154.
- [23] Nilakantan G., Keefe M., Bogetti T. A.: On the Finite Element Analysis of Woven Fabric Impact Using Multiscale Modeling Techniques. *International Journal of Solids and Structures* 47, 2010, s. 2300-2315.
- [24] Niezgoda T.: Budowa i walidacja modeli numerycznych pocisku 9 mm Parabellum oraz tarczy wykonanej z kompozytu typu Twaron. Sprawozdanie WITU, 2011 (niepublikowane).
- [25] Dominiak J., Stempień Z.: Modelowanie numeryczne i analiza kuloodporności wielowarstwowych pakietów wykonanych z włókien para-aramidowych. X Międzynarodowa Konferencja Uzbrojeniowa „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”, Ryn 15-18.09.2014 r.
- [26] Wiśniewski A., Pacek D.: Walidacja modelu numerycznego pocisku 9 mm Parabellum. *Mechanik* 2, 2012, s. 138-140.
- [27] Norma PN-V-87000:2011 - Osłony balistyczne lekkie / Kamizelki kulo- i odłamko- odporne / Wymagania i badania.