

ARAMIDOWE PAKIETY TKANINOWE SKUTECZNĄ OCHRONĄ PRZED POCISKAMI PISTOLETOWYMI 9 MM PARA FMJ WG ZMODYFIKOWANEGO MODELU IWLIJEWA

W artykule została podjęta próba matematycznego opisu zjawiska uderzenia pocisku 9 mm PARA FMJ w aramidowe ochrony balistyczne. W rozważaniach wykorzystano model Iwlijewa wprowadzając niewielkie jego modyfikacje. Analiza była prowadzona w oparciu o podstawowe prawa mechaniki klasycznej.

1. Wstęp

Zjawiska towarzyszące wzajemnemu oddziaływaniu pocisku i ochrony balistycznej, ze względu na duże prędkości zachodzących procesów, są skomplikowane i trudne. W sposób szczególnie skomplikowany przebiegają one wewnątrz struktur o charakterze warstwowym, jakimi są m.in. tkaninowe pakiety aramidowe.

Istniejące analityczne metody oceny charakterystyk ochronnych są z reguły niedoskonałe i wprowadzają szereg założeń upraszczających i zniekształcających obraz realnego przebiegu zjawiska. Zależności obliczeniowe wymagają szeregu współczynników empirycznych, co niewątpliwie utrudnia prowadzenie analiz.

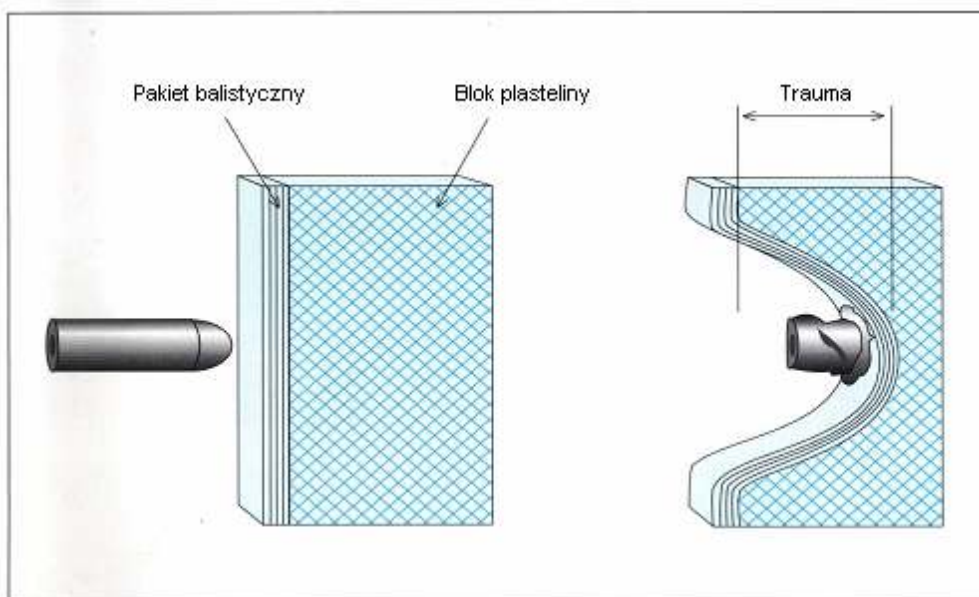
Iwlijew [1] podjął próbę wyjaśnienia zależności na podstawie klasycznych praw mechaniki oraz teorii wytrzymałości materiałów w najbardziej ogólnym zarysie, biorąc za punkt wyjścia istotę zachodzących procesów.

Zgodnie z rozważaniami autora, gdy pocisk zbliża się do przeszkody, ulega ona ugięciu tworząc z tylniej strony „stożek odkształcenia”. Nici tkaniny, przebiegające bezpośrednio przez strefę oddziaływania pocisku, ulegają obciążeniom rozciągającym. Przy stosunkowo małej prędkości i energii pocisku, nawet przy niewielkiej liczbie warstw tkaniny, proces wzajemnego oddziaływania ogranicza się do deformacji przeszkody i nie towarzyszy mu destrukcja warstw, tzn. zerwanie nici.

Przy zwiększeniu prędkości i energii pocisku naprężenia rozciągające wzrastają i doprowadzają do zerwania struktury poczynając od warstw licowych.

Teoria Iwlijewa opisuje matematycznie procesy zachodzące w tkaninowej ochronie balistycznej. W artykule rozszerzono analizę o dodatkowe zjawiska związane z deformacją pocisku oraz energią przechodzącą przez przegrodę i wywołującą bezpośrednio skutki mogące powodować uszkodzenie ciała człowieka.

2. Uderzenie pocisku w tkaninową ochronę balistyczną



W procesie oddziaływania pocisku podczas uderzenia w tkaninową ochronę balistyczną, pocisk ulega on silnej deformacji oraz traci część swojej energii kinetycznej. Jego przednia część znacznie rozplaszcza się, długość ulega skróceniu, a zwiększająca się powierzchnia czołowa prowadzi do zmniejszenia jednostkowego nacisku na następne warstwy ochrony [2].

Deformacja pocisku jest uzależniona przede wszystkim od efektywności przednich warstw ochrony balistycznej i tylnich warstw amortyzujących.

Bilans energii pocisku przed uderzeniem i po wzajemnym oddziaływaniu z ochroną można przedstawić w sposób następujący:

$$E_{up} = E_{dp} + E_{do} + E_r + Q$$

E_{up} – energia kinetyczna uderzającego pocisku,

E_{dp} – energia deformacji pocisku,

E_{do} – energia deformacji i destrukcji ochrony balistycznej,

E_r – energia rażenia (energia odbierana przez podkład),

Q – ciepło wydzielające się podczas uderzenia i wnikania pocisku w ochronę balistyczną.

Podczas wystrzału oprócz energii cieplnej, której pocisk nabiera w pierwszej fazie lotu, posiada on energię kinetyczną, odnoszącą się do obu jego składowych ruchu, tzn. energię ruchu postępowego i wirowego. Ogólny wzór na całkowitą energię wyjściową, związaną z pociskiem, którą może on przekazać ochronie przedstawia się następująco:

$$E_p = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} + Q_p$$

- m – masa pocisku,
- v – prędkość pocisku,
- I – moment bezwładności pocisku względem jego własnej osi,
- ω – prędkość obrotowa pocisku,
- Q_p – energia cieplna przekazywana ochronie.

Na proces deformacji i destrukcji ochron balistycznych składają się następujące zjawiska:

- poprzeczne zginięcie włókien w przędzy
- rozciąganie i zrywanie przędzy (przecięcie) na skutek silnego zginięcia
- zginanie przędzy
- tarcie pocisku o brzegi otworu

można to zapisać wzorem:

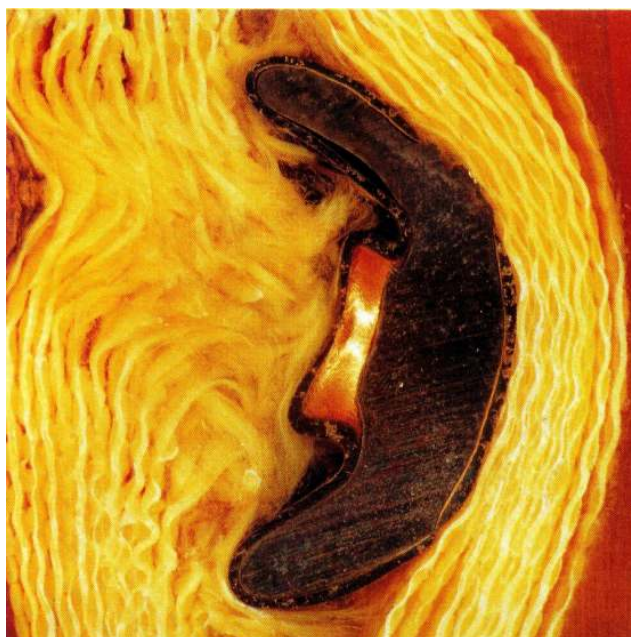
$$E_{do} = E_g + E_r + E_z + E_d + Q$$

- E_{do} – praca deformacji i destrukcji ochrony balistycznej,
- E_g – praca zginięcia,
- E_r – praca rozciągania i zrywania przędzy,
- E_z – praca zginania,
- Q – ciepło.

Różnica pomiędzy wartością energii niesioną przez pocisk a wykonaną pracą powodującą zniszczenie ochrony balistycznej stanowi energię rażenia obiektu przejawiającą się deformacją podłoża. Obiekt (cel) zostaje rażony energią, która przechodzi przez ochronę.

Celem stosowanych ochron balistycznych jest zminimalizowanie energii niesionej przez pocisk do pewnej wartości granicznej, która nie jest już groźna dla człowieka. Jak wykazały badania medyczne dopuszcza się przeniesienie takiej energii, która powoduje deformacje o głębokości 32cm w przypadku głowy i 44cm w pozostałych przypadkach [3,4].

Obraz destrukcji tkaninowej ochrony balistycznej oraz deformację pocisku przedstawia zdjęcie 1.



Zdjęcie 1. Przekrój tkaninowej ochrony balistycznej wraz ze środkiem rażenia, który uległ spłaszczeniu w wyniku oddziaływania z przeszkodą [5].

3. Teoria Iwlijewa

Interesującą próbę wyjaśnienia zależności na podstawie klasycznych praw mechaniki oraz teorii wytrzymałości materiałów w najbardziej ogólnym zarysie przeprowadził J. Iwlijew. Według tej teorii, gdy pocisk zbliża się do przeszkody z tkaniny, ugina się ona tworząc z tylnej strony „stożek odkształcenia”. Nici struktury tkaniny przebiegające bezpośrednio przez strefę oddziaływania ulegają obciążeniom rozciągającym. Przy dość małej prędkości oraz energii pocisku, nawet przy niewielkiej liczbie warstw tkaniny, proces wzajemnego oddziaływania ogranicza się do tworzenia stożka odkształcenia. Nie towarzyszy mu destrukcja warstw.

Przy zwiększeniu prędkości i energii oddziaływania naprężenia rozciągające wzrastają i doprowadzają do zerwania nici, poczynając od warstw licowych.

Jeśli energii pocisku brakuje do całkowitego przebicia struktury, ulega on wewnątrz zahamowaniu, aż do całkowitego zatrzymania.

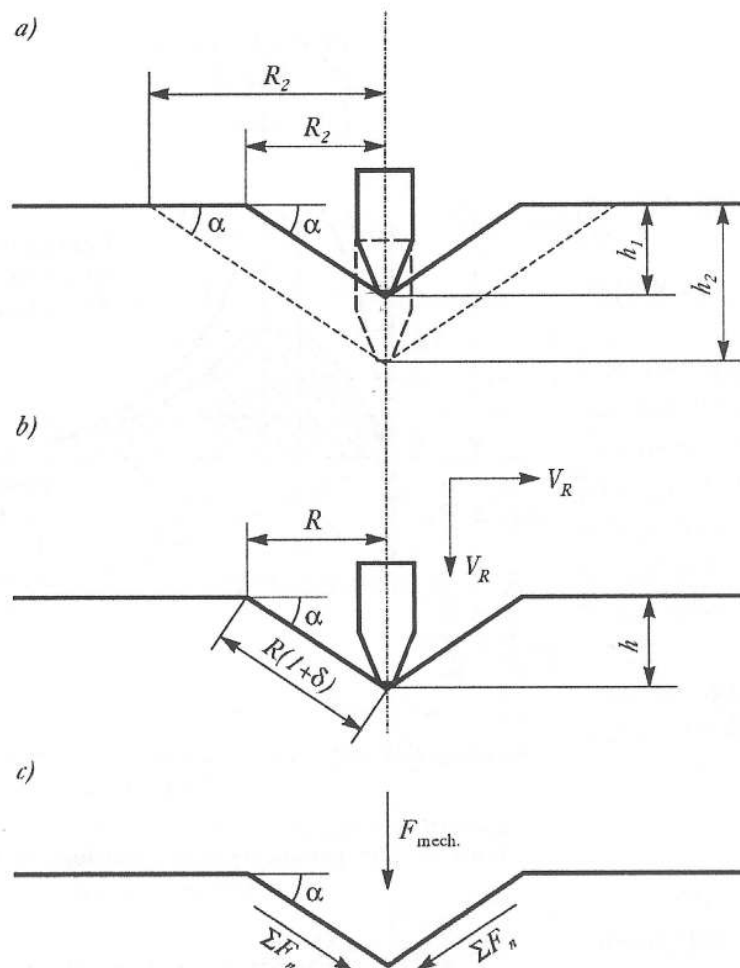
We wszystkich stadiach oddziaływania materiały doznają różnego rodzaju obciążeń i odkształceń. Autor w pierwszym etapie swoich rozważań rozpatrzył przypadek, kiedy warstwy pozostają nienaruszone, zaś w drugiej części swojej pracy analizował sytuację, kiedy część warstw zostaje przebita przez pocisk.

W obu przypadkach do opisu zjawiska wykorzystał następujące parametry:

- M_0, S_0, v_0 – odpowiednio: masa powierzchni rzutu czołowego oraz prędkość początkowa pocisku środka rażenia,
- ρ, ρ_0 – odpowiednio: masa jednostki powierzchni ochrony i jednej jej warstwy,
- h – grubość jednej warstwy materiału ochronnego,
- n – liczba nici z jednej warstwy uszkodzonych w trakcie oddziaływania,
- N_{og} – ogólna liczba warstw struktury,
- F_0 – wytrzymałość na rozciąganie jednej nici,
- δ – wydłużenie względne tkaniny.

Gdy pocisk zbliża się do przeszkody, tworzy się stożek odkształcenia, który zaczyna się poruszać razem ze środkiem rażenia jako jednolity system bezwładnościowy. W trakcie wzajemnego oddziaływania wymiary stożka ulegają zwiększeniu.

Schematycznie sposób oddziaływania pocisku przedstawia rysunek 1.



Rys.1. Rozwój stożka odkształcenia. Parametry geometryczne i kinematyczne.

Autor wyprowadza równania pozwalające z dużym przybliżeniem opisać etapy zniszczenia tkaninowej ochrony balistycznej podczas oddziaływania z pociskiem.

W pierwszym etapie, tzn. kiedy występuje tylko deformacja ochrony, energia deformacji warstw (E_{tyln}) może być wyrażona wzorem:

$$E_{tyln} = 0,545 \cdot \frac{(1 + \delta)^2 - 1}{1 + \delta} \cdot F_0 \cdot n \cdot \sqrt{\frac{N \cdot M_0}{\rho_0}}$$

Na ogół fazę wzajemnego oddziaływania bez uszkodzenia warstw tkaniny poprzedza faza, w której ma miejsce ich destrukcja. W zasadzie ta faza też się zaczyna od utworzenia stożka odkształcenia, lecz jego rozwój ogranicza się po

osiągnięciu przez siły bezwładnościowe wartości przewyższających wytrzymałość nici. Przy tym energia i prędkość pocisku maleją w miarę przebicia warstw ochronnych do wartości, które uniemożliwiają przebicie pozostałych warstw.

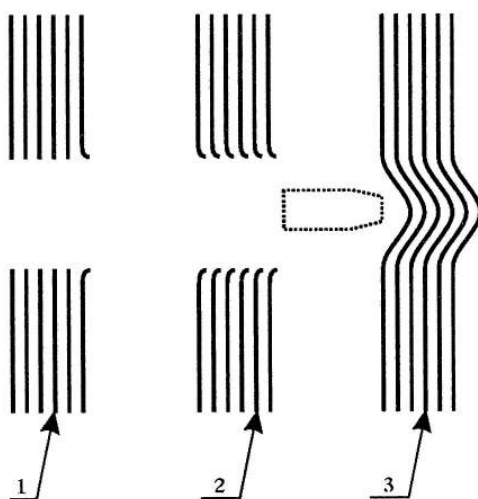
W tym przypadku energia całkowita wzajemnego oddziaływania składa się z energii oddziaływania na tylne warstwy (nieprzebite) oraz energii destrukcji warstw znajdujących się przed nimi. Jest ona sumą energii zerwania (E_{zerw}) i energii deformacji warstw tylnych (E_{tyln}), co można zapisać wzorem

$$E_{calk} = E_{zerw} + E_{tyln}$$

przy czym energia zerwania warstw jest równa:

$$E_{zerw} = F_0 \cdot n \cdot 0,5 \cdot (N_{calk} - N_{tyln}) \cdot [h_{stoż} + (N_{calk} - N_{tyln}) \cdot h] \frac{\sqrt{(1 + \delta)^2 - 1}}{1 + \delta}$$

Kolejność procesu przebicia dynamicznego przeszkody w wersji ogólnej pokazano na rysunku 2.



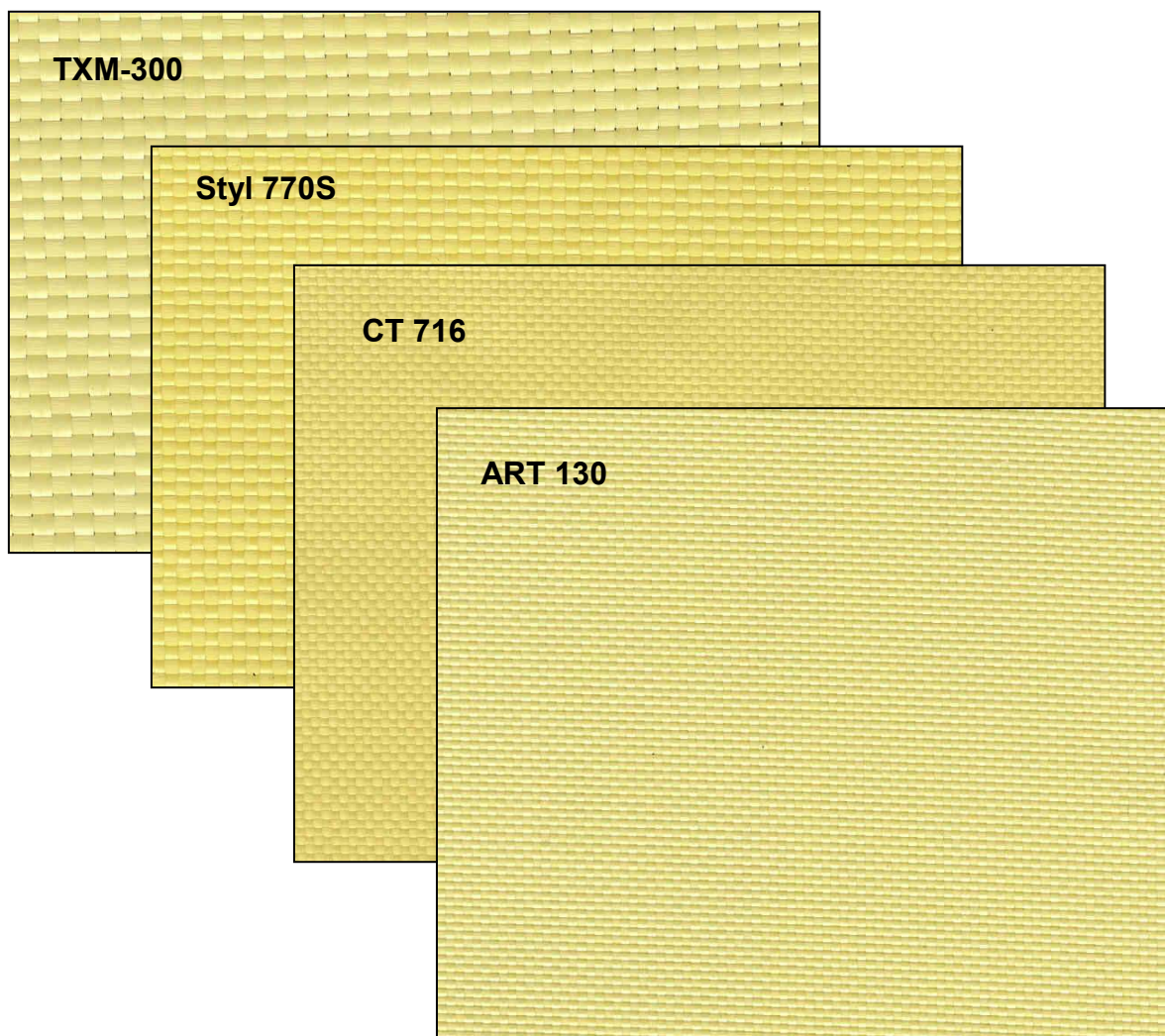
Rys.2. Fazy wspólnego oddziaływania dynamicznego środka rażenia i przeszkody warstwowej. 1 – strefa zerwania nici bez przesunięcia warstw, 2 – strefa oddziaływania wzajemnego w trybie zerwania nici z przesunięciem warstw, 3 – strefa tworzenia się stożka odkształcenia bez destrukcji warstw.

4. Część eksperymentalna

4.1. Tkaninowe pakiety balistyczne

Podczas eksperymentalnych badań ostrzeliwano miękkie pakiety wykonane z luźno ułożonych tkanin aramidowych różniących się strukturą. Eksperymentalne materiały włókiennicze posiadały różną masę powierzchniową wynikającą z zastosowanej przędzy o różnej grubości oraz zróżnicowanej gęstości liniowej wątku i osnowy. Wszystkie tkaniny posiadały splot płócienny.

Zastosowane tkaniny aramidowe pokazane na zdjęciu 2.



Zdjęcie 2. Tkaniny aramidowe.

Pakiety z tkanin aramidowych wykonane były z różnej ilości warstw, co determinowało ich masę powierzchniową, a zatem i różną odporność balistyczną.

4.2. Ostrzał pakietów tkaninowych

Wykonane tkaninowe pakiety balistyczne poddano próbom ostrzału pociskami 9 mm PARA FMJ w Laboratorium Badań Balistycznych ITWW MORATEX.

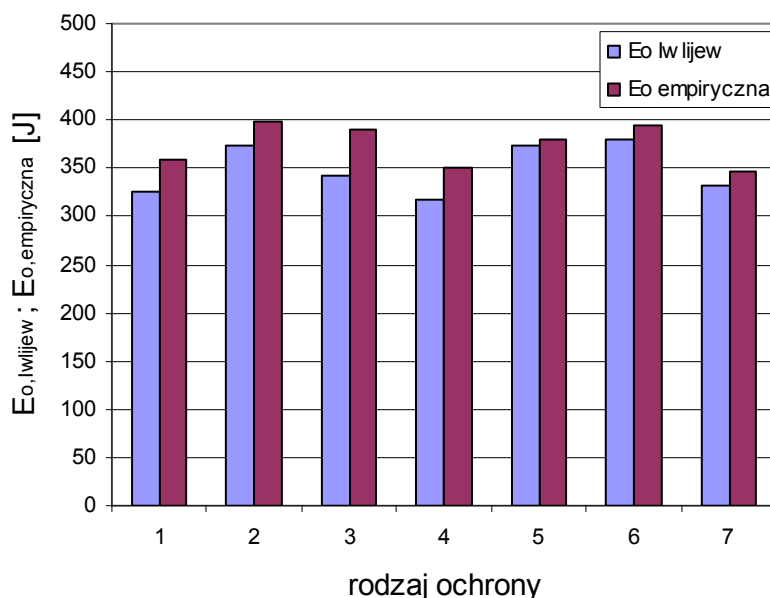
Dla różnych prędkości uderzenia pocisku w ochronę balistyczną były oznaczane następujące parametry:

- głębokość deformacji podłoża plastelinowego,
- objętość deformacji podłoża plastelinowego,
- pole deformacji podłoża plastelinowego,
- skrócenie pocisku,
- rozplaszczanie pocisku,
- ilość warstw uszkodzonych,
- ilość nici zerwanych w warstwach uszkodzonych.

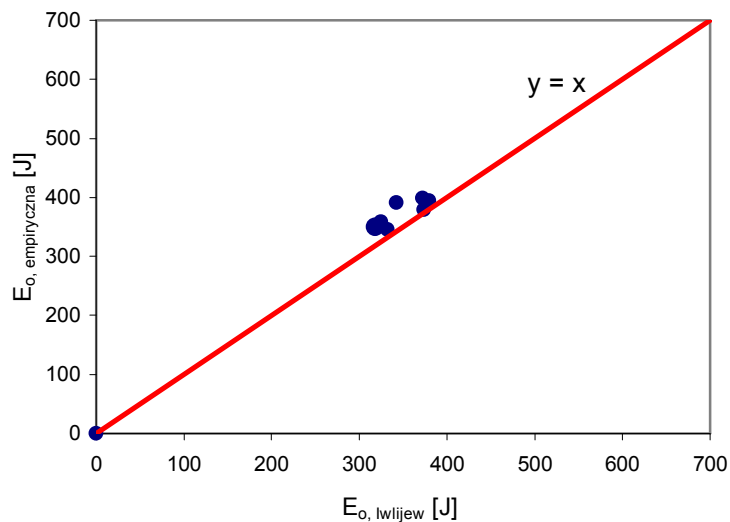
Uzyskane wyniki eksperymentalne umożliwiły obliczenie energii uderzenia oraz energii deformacji pocisku, energii rażenia oraz energii destrukcji i deformacji ochrony balistycznej.

Przeprowadzono także obliczenia zgodnie z założeniami teorii Iwlijewa.

Porównanie uzyskanych wyników obliczeniowych i empirycznych (uzyskanych w oparciu o krzywe wzorcowe dla pracy deformacji pocisku i objętości deformacji podłoża) zestawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys.3. Energia destrukcji i deformacji tkaninowej ochrony balistycznej podczas uderzenia pocisku 9 mm PARA FMJ. Energia obliczona ($E_{o, Iwlijew}$) i określona empirycznie ($E_{o, empiryczna}$).



Rys.4. Energia destrukcji i deformacji tkaninowej ochrony balistycznej podczas uderzenia pocisku 9 mm PARA FMJ. Energia obliczona ($E_{o, \text{lwijew}}$) i wyznaczona empirycznie ($E_{o, \text{empiryczna}}$).

4.3. Deformacja pocisku

Nabój kalibru 9×19 mm Parabellum to standardowy niemal na całym świecie wojskowy nabój pistoletowy. W naboju wojskowym stosuje się tylko pocisk płaszczowy z rdzeniem ołowianym.

Dane:

Długość naboju: 29,28 mm
Długość łuski: 19,35 mm
Średnica dna łuski: 9,94 mm
Masa pocisku: 8 g
Prędkość początkowa pocisku: 365 m/s
Energia początkowa pocisku: 530 J



Pocisk po uderzeniu w ochronę balistyczną ulega deformacji lub niekiedy deformacji połączonej z destrukcją.

W procesie wzajemnego oddziaływania osłony balistycznej wykonanej z miękkiego, sztywnego lub twardego materiału (tkaniny, włókienniczego kompozytu lub stali) i pocisku (przedmiotu uderzającego), ten ostatni ulega deformacji, w wyniku której traci znaczną część swojej energii kinetycznej. W niektórych przypadkach, zwłaszcza przy dużych prędkościach uderzenia, zjawisku deformacji może towarzyszyć destrukcja pocisku polegająca na odrywaniu się niewielkich jego zniekształconych fragmentów, uzyskujących również pewną energię kinetyczną. Jednak w przypadku ochrony tkaninowej zjawisko to nie występuje.

Odształcenie przedniej części pocisku (tzw. „grzybkowanie”) zwiększa powierzchnię jego działania, co prowadzi do zmniejszenia nacisku na następną warstwę osłony. Im efektywność osłony jest wyższa, tym pocisk jest bardziej deformowany.

W przypadku ochron balistycznych wykonanych z wielowarstwowych pakietów tkaninowych praca odształcenia pocisku jest znaczna i przy dużych prędkościach stanowi nawet kilkadziesiąt procent.

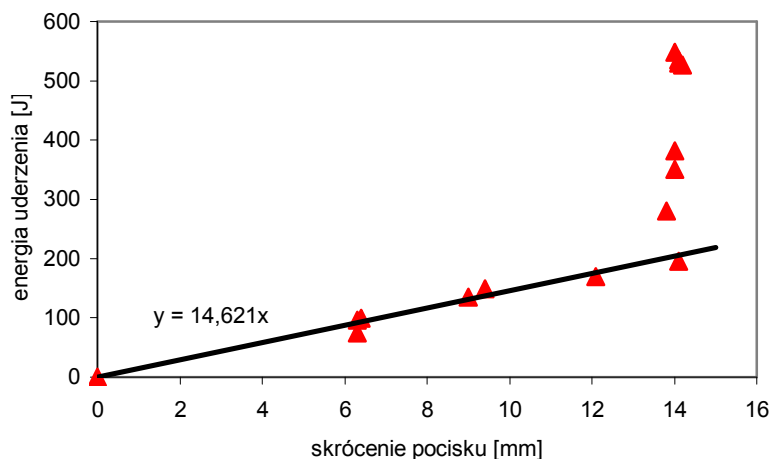
W celu określenia pracy związanej z deformacją pocisku (E_{dp}) (bez jego destrukcji, która ma miejsce tylko w przypadku twardych materiałów), został zaproponowany prosty sposób wykorzystujący zjawisko uderzenia małego i lekkiego przedmiotu uderzającego w „sztywną i ciężką ściankę”, dla którego z dużą dokładnością spełniona jest zależność [5]:

$$\frac{mv^2}{2} = E_{dp} \Delta l$$

- m – masa przedmiotu uderzającego,
- v – prędkość przedmiotu uderzającego,
- E_{dp} – praca deformacji przedmiotu uderzającego,
- Δl – skrócenie przedmiotu uderzającego.

Jako „sztywna ścianka” stosowany był masywny blok ze stali o dużej wytrzymałości (powyżej 1 GPa) i twardości (powyżej 5 GPa). Wówczas można przyjąć, że cała energia kinetyczna pocisku zostaje zamieniona na pracę związaną z jego deformacją. Na podstawie wzoru można łatwo otrzymać zależność między pracą deformacji (E_{dp}) a skróceniem długości pocisku ($\Delta l = l_0 - l$).

Na rysunku 5 została przedstawiona zależność skrócenia pocisku 9 mm PARA FMJ w funkcji jego energii kinetycznej.



Rys.5. Skrócenie pocisku 9 mm PARA FMJ w funkcji jego energii uderzenia.

Na podstawie uzyskanych danych eksperymentalnych opracowano krzywą wzorcową służącą do określania pracy deformacji pocisku w funkcji jego skrócenia. Krzywą wzorcową dla pocisku 9 mm PARA FMJ przedstawiono na rysunku 5 .

Jest ona opisana równaniem $y = 14,621 \cdot x$

Za pomocą sporządzonej krzywej wzorcowej dla pocisków 9 mm PARA FMJ można wyznaczyć każdorazowo pracę deformacji związaną z określonym eksperymentalnie skróceniem pocisku.

4.4. Energia rażenia

Energia rażenia (E_r), to energia przechodząca przez ochronę balistyczną i będąca przyczyną doznawanych urazów. Podczas badania jest ona odbierana przez podkład plastelinowy umieszczany bezpośrednio za osłoną balistyczną i określana poprzez pomiar objętości wgłębienia powstającego w bloku plastelinowym [6].

Energetykę wnikania w materiał plastyczny i powstawanie wgłębienia można opisać za pomocą wzoru:

$$W_1 = a \cdot V_k$$

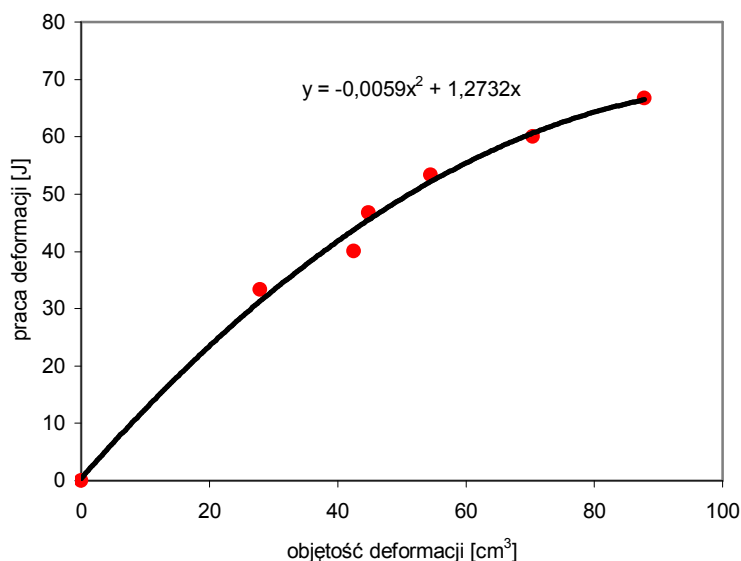
W_1 – praca deformacji podłoża,
 V_k – objętość deformacji podłoża,
 a – praca właściwa deformacji podłoża.

W tym celu została sporządzona krzywa wzorcowa deformacji podłoża plastelinowego stosowanego podczas badań balistycznych wykonywanych w Laboratorium Badań Balistycznych ITWW MORATEX.

Zależność energii deformacji podłoża plastelinowego od objętości jego deformacji (najlepszym przybliżeniem jest wielomian 2-go stopnia) można opisać równaniem:

$$y = -0,0059x^2 + 1,2732x$$

Równanie to umożliwia określanie pracy deformacji wykonanej podczas deformacji podłoża plastelinowego o objętości określonej w trakcie uderzenia pocisku w osłonę kompozytową. Uzyskana krzywa wzorcowa została przedstawiona na rysunku 6.



Rys.6. Krzywa wzorcowa deformacji podłoża.

Krzywa wzorcowa została wykreślona na podstawie wartości energii potencjalnej obliczonej na podstawie spadków kulki z różnych wysokości i uzyskanego w wyniku tego spadku wgłębienia (jego objętości) w podłożu plastelinowym podczas każdego uderzenia.

Krzywa ta umożliwi obliczanie energii rażenia dla określonej eksperymentalnie objętości deformacji (V_d) spowodowanej ostrzałem podczas eksperymentu.

5. Podsumowanie i wnioski

1. Dla przeprowadzonej serii eksperymentalnej teoria Iwlijewa umożliwiła ilościowe określenie energii destrukcji i deformacji wybranych tkaninowych pakietów balistycznych podczas ostrzału pociskami 9 mm PARA FMJ.
2. Zaproponowane równania do opisu zjawiska uderzenia pocisku w tkaninowy pakiet balistyczny pozwoliły na teoretyczne określenie energii związanej z destrukcją oraz deformacją warstw ochrony.
3. Wyniki obliczeń energii niezbędnej do destrukcji i deformacji ochrony dokonanych na podstawie wzorów zaproponowanych przez Iwlijewa nieznacznie tylko odbiegają od analogicznych wartości wyznaczonych na podstawie danych eksperymentalnych (wartości są niższe o około 5-10%).
4. Teoria Iwlijewa wraz z zaproponowanym sposobem jej weryfikacji może być użyteczna podczas projektowania tkaninowych pakietów balistycznych.

Literatura

1. J. Iwlijew „Zagadnienie wzajemnego oddziaływania penetratora i miękkiego pancerza z włókien chemicznych o dużej wytrzymałości”, Tech. Wyr. Włók. 1998;
2. Wł. Jabłoński „Włókna aramidowe bazą produktów innowacyjnych”, Bielsko-Biała 2000;
3. PN-V-87000:1999 „Ochrony balistyczne lekkie. Kamizelki ochronne odłamko- i kuloodporne. Wymagania ogólne i badania”;
4. PN-V-87001:1999 „Osłony balistyczne lekkie. Hełmy ochronne odłamko- i kuloodporne. Wymagania ogólne i badania”;
5. Biuletyn informacyjny firmy Teijin Twaron.
6. A.B. Sinani, G.S. Pugaczow „Zastosowanie materiałów o dużej twardości w lekkiej ochronie balistycznej”, Woprosy Oboronnej Techniki, Moskwa, 1996;