

Krzysztof Świętek
Bogdan Szturomski
Akademia Marynarki Wojennej

**ZASTOSOWANIE ZMODERNIZOWANEGO
WAHADŁA BALISTYCZNEGO DO PRÓB
PRZEBICIA POCISKIEM KALIBRU 12,7 MM
MATERIAŁÓW STOSOWANYCH
NA OSŁONY ANTYTERRORYSTYCZNE**

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono stanowisko do badań przebijalności materiałów przy ostrzale pociskiem kalibru 12,7 mm umożliwiające rejestrację energii pochłoniętej przez próbkę. Opisano proces przeprowadzania badań balistycznych wraz z wykonaniem próbek. Przedstawiono wyniki testowe oraz uproszczony bilans energetyczny wahała balistycznego do analizy zjawiska penetracji materiału przez pocisk.

Słowa kluczowe:

balistyka, wahało balistyczne, przemijalność, badania balistyczne, osłony balistyczne, bilans energetyczny.

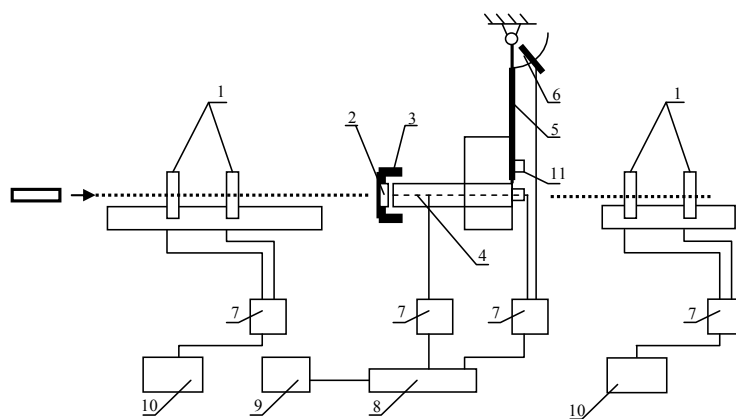
WSTĘP

Współczesne konstrukcje ochronne stanowią ważne elementy wyposażenia jednostek pływających, obiektów wojskowych, publicznych oraz innych. Ich zadaniem jest osłabienie działania terrorystycznego polegającego na użyciu materiałów wybuchowych lub pocisków na wydzielone obszary. Znajomość zachowania się materiałów przy dużych prędkościach deformacji ma ogromne znaczenie przy projektowaniu osłon ochronnych, w szczególności przy zastosowaniu technik komputerowych jako narzędzi inżynierskich.

Obecnie obliczenia wytrzymałości takich konstrukcji prowadzi się za pomocą metod numerycznych i technik komputerowych umożliwiających rozwiązanie równań konstytutywnych, opisujących zachowanie się badanego materiału. Równania te, bez względu na stopień uproszczenia, zawierają określone parametry materiałowe, które należy wyznaczyć eksperymentalnie lub „dobrać” metodą prób, co dla dużych prędkości deformacji stanowi poważny problem. Dla pozyskania odpowiednich charakterystyk dynamicznych materiałów przeznaczonych na osłony balistyczne niezbędne jest przygotowanie odpowiedniego stanowiska badawczego wyposażonego w aparaturę pomiarową. Stanowisko takie powinno umożliwić określenie istotnych własności materiałowych przy dużych prędkościach odkształceń oraz praktyczną weryfikację przyjętych do obliczeń wartości nieznanymi współczynników. W tym celu zbudowano specjalne stanowisko badawcze wyposażone w odpowiednio oprzyrządowane wahadło balistyczne. Stanowisko przeznaczone jest do badań właściwości materiałów przy dużych prędkościach odkształceń od ostrzału pociskami kalibru 12,7 mm. Powyższy projekt stanowi aplikację istniejącego już stanowiska do badań odporności balistycznej materiałów, opracowanego, zbudowanego i opatentowanego przez nieżyjącego już kmdr. dr. hab. inż. Józefa Filę oraz dr. inż. Zdzisława Zatorskiego. Stanowisko to jest jedynym tego rodzaju w Polsce. Było używane do oceny na ostrzał materiałów osłon konstrukcyjno-balistycznych pociskami kalibru 7,62 mm. Stanowisko jest mobilne, co umożliwia jego łatwy transport na strzelnicę czy poligon, gdzie możliwe jest zapewnienie odpowiednich warunków bezpieczeństwa wymaganych przy tego typu badaniach. Wymiary stanowiska umożliwiają prowadzenie strzelania na strzelnicach zamkniętych w tzw. jamach strzelniczych, a co się z tym wiąże — uniezależnienie badania od warunków pogodowych. W przyszłości przewiduje się budowę stanowiska zamkniętego i nadanie mu charakteru laboratoryjnego.

WSTĘPNA MODERNIZACJA ISTNIEJĄCEGO STANOWISKA DO BADAŃ BALISTYCZNYCH Z UŻYCIEM POCISKÓW KALIBRU 12,7 MM

Obiektem modernizacji w niniejszej pracy jest wahadło balistyczne (WB), którego schemat przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat zunifikowanego stanowiska do badania odporności balistycznej materiałów:

- 1 — przetwornik do pomiaru prędkości na wlocie i wylocie pocisku, 2 — próbka,
 3 — tuleja mocująca, 4 — dynamometr tensometryczny, 5 — wahadło,
 6 — przetwornik kąta obrotu, 7 — wzmacniacz sygnałów, 8 — oscyloskop cyfrowy,
 9 — komputer, 10 — wskaźnik prędkości pocisku, 11 — rejestrator toru wahadła

Elementy składowe WB to tuleja pomiarowa (4), do której poprzez nakrętkę (3) mocowana jest próbka materiału (2) w postaci krążka o średnicy 50 mm. Tuleja ($\phi 70/\phi 40 \times 300$ mm) wraz z dynamometrem, próbką i masą hamującą osadzone są prostopadle na wolnym końcu ramienia ułożyskowanego wahadła (5). Pocisk wystrzelony z broni strzeleckiej umieszczonej w osi tulei uderza w próbkę (2), poprzez próbkę przekazuje część swojej energii tulei, która wraz z wahadłem i masą hamującą ogranicza dalszy ruch pocisku. Wywołuje to ich obrót wokół osi wahadła, rejestrowany za pośrednictwem przetwornika (6). Ponadto pomiędzy wylotem lufy a próbką zainstalowany został przetwornik piezoelektryczny wraz z układem bramek (t) służący do pomiaru prędkości wylotowej pocisku w zakresie $V_o = 20 - 1000$ m/s. Tuleja (4) stanowi dynamometryczny element umożliwiający pomiar siły uderzenia pocisku F_u , energii E_p oraz prędkości końcowej V_k części resztkowej pocisku wraz korkiem i odłamkami tarczy.

Wszystkie wspomniane wielkości przetwarzane są na odpowiednie sygnały elektryczne i rejestrowane, a następnie analizowane lub przetwarzane i drukowane. Charakterystykę statyczną przetwornika siły wyraża związek pomiędzy przyłożoną siłą (do 100 kN) a uzyskiwanymi sygnałami wyjściowymi. Jest on określony przez wartość współczynnika

$$K_s = 0,140 \pm 0,001 kN / mV .$$

Wzorcowanie dynamiczne przetwornika WB realizowano na młocie opadowym, przy czym początkowo określono „odpowiedź przetwornika” w funkcji energii kinetycznej masy młota, a następnie, stosując charakterystykę statyczną, wyznaczono:

$$F_u = (24 \pm 1) \sqrt{E_k} ,$$

gdzie: F_u — siła uderzenia;
 E_k — energia kinetyczna pocisku.

Układ pomiarowy kąta obrotu omawianego wahadła składa się z rejestratora oraz potencjometrycznego przetwornika połączonego z osią obrotu WB. Przybliżona wartość czułości układu pomiarowego wynosi

$$k_\varphi = 0,045 \text{ deg/mV} .$$

Modernizacja polegała na przystosowaniu istniejącego stanowiska do badań odporności balistycznej (rys. 2.) z kalibru 7,62 na kaliber 12,7 mm. Zamiast stosowanego dotychczas dynamometru o średnicy 50 mm zamontowano dynamometr o średnicy 120 mm (używany uprzednio do symulacji uderzenia pocisku na młocie opadowym).



Rys. 2. Stanowisko do badania odporności balistycznej materiałów przed modernizacją

Wymagało to zmiany uchwytu i ujednolicenia z poprzednim dynamometrem. Aby powyższy układ mógł funkcjonować (dynamometr do kalibru 7,62 mm jest krótszy i lżejszy), wykonano tzw. przeciwwagę dla dynamometru. Przeciwwaga jest wyposażona w system regulacji pozwalający zrównoważyć ciężar różnorodnych próbek montowanych na dynamometrze, co umożliwia płynną regulację ustawienia wahadła (dynamometr wraz z zamontowaną próbką musi być ustawiony prostopadle

do linii strzału). Wykonano również zestaw nowych ramek do pomiaru prędkości pocisku przed i za próbką. Stosowane dotychczas ramki do pomiaru prędkości przed próbką miały rozmiar 50 x 50 mm, a do użytego dynamometru o średnicy 120 mm wykonano ramki o wymiarach 100 x 100 mm. Zastosowano również nowy rodzaj tzw. szybkozłączek do czujników piezoelektrycznych usprawniających obsługę stanowiska. Wymiana części i zmiany konstrukcyjne spowodowały zmianę ciężaru niektórych elementów wpływających na kąt wychylenia wahadła, a w rzeczywistości na pomiar końcowy, co wymaga uwzględnienia i wzorcowania dynamometru. W związku z powyższym zmierzono masy wszystkich nowych elementów wahadła, aby można określić całkowitą masę wahadła podczas badań. Wzorcowanie dynamometru przy obciążeniu statycznym wykonano z użyciem maszyny wytrzymałościowej typu MTS 810.12. o zakresie siły od 0 do 95 kN. Poniższe fotografie przedstawiają zakres niektórych modernizacji.



Rys. 3. Widok ogólny stanowiska po modernizacji



Rys. 4. Widok elementów stanowiska: przeciwwaga, tuleja, ramki pomiarowe

APARATURA POMIAROWA DO REJESTRACJI WYNIKÓW BADAŃ BALISTYCZNYCH

Opracowano nową koncepcję rejestracji i zarządzania eksperymentem, opierając się na strukturze sieciowej ułatwiającej zapis danych w wybranej bazie danych i obserwację przebiegu eksperymentu przez badaczy zalogowanych do omawianej podsięci. Nowymi elementami systemu pomiarowego są:

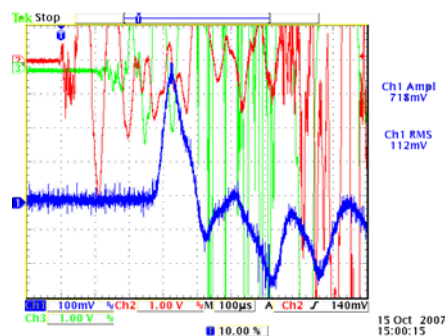
- oscyloskop pomiarowy TEKTRONIX typu TDS3024B;
- jednostka centralna Fujitsu-Siemens Amilo Xi 1554;
- lokalna sieć komputerowa.

Do sprawdzenia pracy nowo opracowanego systemu jako urządzenie odniesieniowe zastosowano wysokiej klasy rejestrator SEFRAM typu 8416C. W celu weryfikacji testowanego toru pozyskane parametry badań były rejestrowane równoległe na dwóch zestawach pomiarowych, a wyniki zapisane i porównane. Rejestrator SEFRAM typu 8416C jest urządzeniem przenośnym, umożliwiającym równoległą rejestrację parametrów w 4, 8, 12 lub 16 kanałach jednocześnie. Ma 16 wejść logicznych (rejestracja stanu HIGH — LOW). Zapis danych może się odbywać w trybie DIRECT, czyli bezpośrednio za pomocą drukarki termicznej na taśmę papierową, lub w trybie MEMORY, czyli bezpośrednio do pamięci. Każda rejestracja jest archiwizowana na wymiennym krzemowym dysku instalowanym w złączu PCMCIA, natomiast połączenie „ze światem zewnętrznym” jest realizowane przez w pełni oprogramowany interfejs RS232. Komunikacja rejestratora z użytkownikiem odbywa się za pomocą dużego ekranu LCD, klawiszy oraz przejrzystego menu. W porównaniu z innymi rozwiązaniami układów pomiarowo-rejestrujących rozwiązania zastosowane w rejestratorze SEFRAM wykazują wiele zalet, co umożliwia szybkie dostosowanie systemu pomiarowego do konkretnych potrzeb. Jest to szczególnie istotne w sytuacji, kiedy planowane są badania w miejscu zainstalowania, czyli na strzelnicy lub jednostkach pływających. Możliwość permanentnej kontroli jakości pozyskiwanych danych i kontrola pracy torów pomiarowych zabezpiecza przed utratą danych, co jest istotne zwłaszcza podczas pomiarów poza stanowiskiem badawczym (rys. 5.).

Jednostkę centralną stanowi komputer przenośny Fujitsu-Siemens AMILO Xi 1554 wyposażony w procesor Core 2 Duo Intel 2 GHz, grafikę ATI Radeon X1900 z 17” ekranem LCD WUXGA, pamięć operacyjną 2 GB oraz niezbędne interfejsy IN — OUT. Rysunek 6. przedstawia zestaw składający się z oscyloskopu i jednostki centralnej oraz przykładowy zrzut z ekranu oscyloskopu.



Rys. 5. Widok na płytę czołową i tylną rejestratora danych SEFRAM typu 8416C



Rys. 6. Zestaw pomiarowy i przykładowy zrzut z ekranu oscyloskopu w przebiegu eksperymentu

PRÓBKI DO BADAŃ BALISTYCZNYCH

Testowe próbki do badań balistycznych ostrzałem kalibru 12,7 mm wykonano ze stali 10GHMBA. Z blachy o grubości 25 mm i wymiarach 1000 x 500 mm za pomocą maszyny Centrum Obróbczego OMAX 55100 i przy użyciu technologii cięcia strumieniem wodnym pod ciśnieniem wycięto krążki o średnicy 120 mm (rys. 7. i 8.).

Następnie wycięte próbki poddano obróbce skrawaniem. Sześć krążków splanowano do grubości 20 mm. Zostały one ponumerowane od 1 do 12. Poddano je również obróbce cieplnej. Tabela 1. przedstawia rodzaj obróbki cieplnej zastosowanej dla wybranych próbek.



Rys. 7. Centrum obróbki OMAX 55100 — przygotowanie do wycinania próbek



Rys. 8. Blacha po wycięciu próbek oraz gotowe próbki

Tabela 1. Przykładowe próbki do badań balistycznych i rodzaj obróbki cieplnej

Numer próbki	Grubość próbki [mm]	Rodzaj obróbki	Parametry obróbki
1	20	D	hartowanie przez 0,5 godz. w temp. 880 °C odpuszczanie przez 2–3 godz. w temp. 650 °C
4	20	B	hartowanie przez 0,5 godz. w temp. 880 °C odpuszczanie przez 1 godz. w temp. 500 °C
5	20	—	bez obróbki
7	25	—	bez obróbki
9	25	C	hartowanie przez 0,5 godz. w temp. 880 °C odpuszczanie przez 3–4 godz. w temp. 600 °C

STRZELANIE TESTOWE

Strzelanie testowe przeprowadzono przy współpracy z firmą JAKUSZ — System Zabezpieczeń Bankowych na stanowisku do badań odporności osłon. Firma posiada koncesję MSWiA nr B 414/2003 i broń strzelecką kal. 12,7 mm (rys. 9).

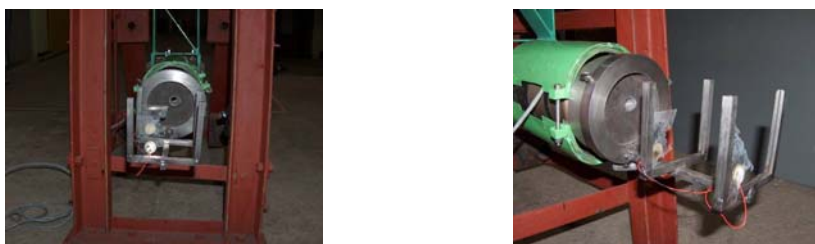


Rys. 9. Widok stanowiska strzeleckiego z karabinkiem kal. 12,7 mm

Próbki na stanowisku zamontowano za pomocą tulei do dynamometru umieszczonego na wahadle. Następnie zamontowano ramki, na których umieszczono czujniki do pomiaru prędkości pocisku przed i za próbką. Próbki na wahadle przed i po ostrzale przedstawiają poniższe zdjęcia (rys. 10. i 11.). Wybrane próbki po przestrzeleniu przedstawia tabela 2.


















Rys. 10. Widok wahadła z zamontowaną próbką



Rys. 11. Widok wahadła z zamontowaną próbką po strzeleniu

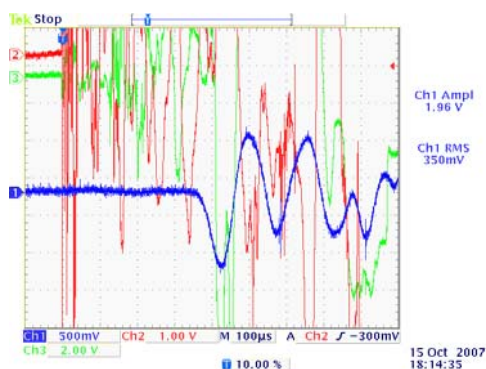
Tabela 2. Wybrane próbki po przestrzeleniu pociskiem kal. 12,7 mm

Nr próbki	Widok od frontu próbki	Widok od tyłu próbki	Widok z boku próbki
1			
4			
5			
7			
9			

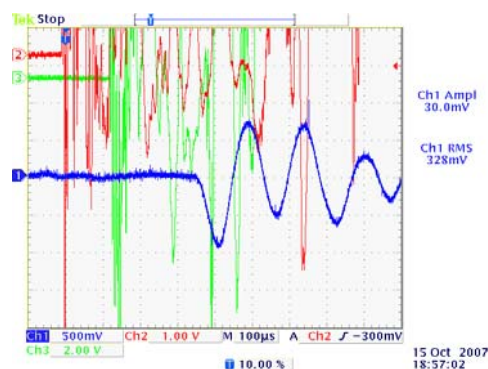
Wyniki pomiarów ze strzelania testowego przedstawia rysunek 13. i tabela 3., w której zamieszczono dla poszczególnych próbek siłę odnotowaną na dynamometrze, czas przelotu między bramkami, prędkość pocisku między bramkami oraz kąt wychylenia wahadła.

Tabela 3. Wyniki pomiarów ze strzelania testowego pociskiem kal. 12,7 mm

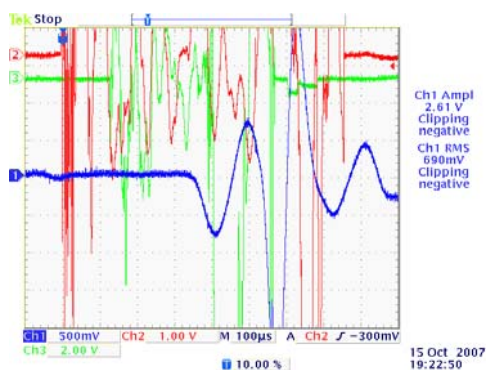
Próbka nr	Nr Oscylogramu	Siła <i>kN</i>	Czas przelotu pomiędzy:			Odczyt potencj. MAX [mV]	Odczyt potencj. „0” [mV]	Odczyt potencj. MIN [mV]	V 1–2 [m/s]	V 2–3 [m/s]	V 3–4 [m/s]	Kąt maks wychylenia <i>deg</i>
			1–2 <i>sek⁻⁶</i>	2–3 <i>sek⁻⁶</i>	3–4 <i>sek⁻⁶</i>							
1	005	45,2	128	brak	brak	427	20,7	-378	781	brak	brak	17,8
4	008	40,5	136	1369	596	392	21,1	-347	735	584,4	167,8	16,3
5	003	39,6	130	1310	390	361	17,0	-346	769	610,7	256,4	15,1
7	009	36,3	128	821	515	382	25,3	-331	781	974,4	194,2	15,6
9	011	38,2	132	982	435	382	25,1	-334	758	814,7	229,9	15,7



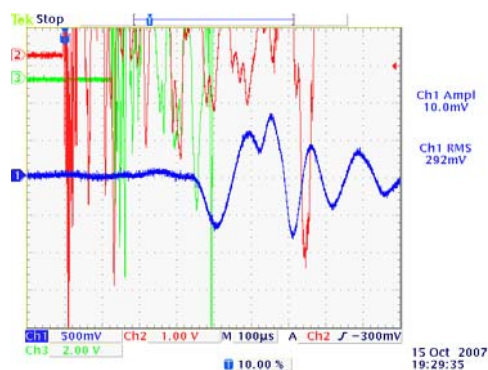
Oscylogram nr 005



Oscylogram nr 006



Oscylogram nr 009



Oscylogram nr 010

Rys. 12. Wybrane oscylogramy ze strzelania testowego pociskiem kal. 12,7 mm

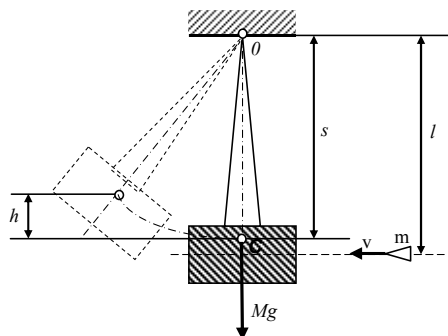
WTÓRNA MODERNIZACJA STANOWISKA — WAHADŁA BALISTYCZNEGO

W czasie przeprowadzonego strzelania obserwowano zachowanie się wahadła balistycznego w celu wychwycenia wszelkich niedoskonałości. Na podstawie tych obserwacji doposażono stanowisko w regulowaną sztywną rozbieralną podstawę, która umożliwia regulację wahadła w zakresie kilkudziesięciu centymetrów w górę lub w dół. Związane to było z brakiem możliwości regulacji podstawy karabinu, z którego wykonywano strzelanie.

Podczas strzelania odłamki i resztki pocisku uszkadzały ramki pomiarowe, a nawet odłamywały się od układu mocującego. Odłamki uszkodziły również w kilku miejscach kable pomiarowe. W związku z tym ramki wzmocniono oraz wykonano osłony torów kablowych.

UPROSZCZONY BILANS ENERGETYCZNY WAHADŁA BALISTYCZNEGO

Wahadło balistyczne umożliwia określenie przejętej energii kinetycznej od uderzającego pocisku w zamontowaną na nim próbkę (rys. 13.). W przypadku gdy nie dojdzie do przebicia próbki, przy założeniu, że uderzenie pocisku jest całkowicie plastyczne, niesiona przez niego energia zostaje spożytkowana na wychylenie wahadła z położenia równowagi o kąt φ . Pomijając straty energii przemienionej w ciepło, energia pocisku równa jest pracy, jaką wahadło musi wykonać, aby wychylić się o kąt φ , pokonując siłę ciężkości. Korzystając z zasady zachowania krętu, kręt pocisku K_z przed uderzeniem równy jest krętowi wahadła po uderzeniu K_z' , które obraca się wraz z pociskiem wokół osi obrotu z .



Rys. 13. Model wahadła balistycznego

$$K_z = m \cdot v_p \cdot l; \quad K'_z = I_z \cdot \omega_w + m \cdot v_w \cdot l; \quad v_w = \omega_w \cdot l,$$

gdzie: K_z — kręt pocisku przed uderzeniem;
 K'_z — kręt wahadła i pocisku po uderzeniu;
 I_z — masowy moment bezwładności wahadła względem osi obrotu;
 m — masa pocisku;
 l — odległość punktu trafienia próbki od osi obrotu wahadła;
 ω_w — prędkość kątowa wahadła;
 v_p — prędkość pocisku przed uderzeniem,

więc

$$m \cdot v_p \cdot l = (I_z + m \cdot l^2) \omega_w;$$

$$\omega_w = \frac{m \cdot l}{I_z + m \cdot l^2} \cdot v_p.$$

Przy założeniu, że po zderzeniu wahadło balistyczne wraz z pociskiem porusza się jak ciało sztywne, suma jego energii kinetycznej i potencjalnej jest równa stałej C i wynosi:

$$(I_z + m \cdot l^2) \cdot \frac{\omega_w^2}{2} + (M + m) \cdot g \cdot s \cdot (1 - \cos \varphi) = C,$$

gdzie: M — masa wahadła;
 s — odległość środka ciężkości wahadła od osi obrotu;
 g — przyspieszenie ziemskie;
 φ — kąt wychylenia wahadła.

Stałą C , która jednocześnie określa pracę W_w , jaką wahadło musi wykonać, aby pokonać siły ciężkości w najwyższym położeniu, wyznacza się z warunku początkowego, że

$$\text{dla } \varphi = 0 \Rightarrow \omega_w = \frac{m \cdot l}{I_z + m \cdot l^2} \cdot v_p;$$

$$W_w = C = \frac{1}{2} \cdot \frac{m^2 \cdot l^2}{I_z + m \cdot l^2} \cdot v_p^2,$$

gdzie W_w — praca wahadła spożytkowana na pokonanie sił ciężkości.

Stąd:

$$(I_z + m \cdot l^2) \cdot \frac{\omega_w^2}{2} + (M+m) \cdot g \cdot s \cdot (1 - \cos \varphi) = \frac{1}{2} \cdot \frac{m^2 \cdot l^2}{I_z + m \cdot l^2} \cdot v_p^2$$

Gdy wahadło osiągnie najwyższe położenie, czyli dla $\varphi = \varphi_0 \Rightarrow \omega_w = 0$, wówczas

$$\cos \varphi = 1 - \frac{m^2 \cdot l^2}{2(I_z + m \cdot l^2)} \cdot \frac{v_p^2}{(M+m) \cdot g \cdot s},$$

a praca wahadła

$$W_w = C = \frac{1}{2} \cdot \frac{m^2 \cdot l^2}{I_z + m \cdot l^2} \cdot v_p^2.$$

Jeżeli pocisk przebije próbkę, powyższe równania przyjmują postać:

$$\omega_w = \frac{m \cdot l}{I_z} \cdot v_p$$

$$\frac{I_z \cdot \omega_w^2}{2} + M \cdot g \cdot s \cdot (1 - \cos \varphi) = C$$

$$W_w = C = \frac{1}{2} \cdot \frac{m^2 \cdot l^2}{I_z} \cdot v_p^2$$

$$\frac{I_z \cdot \omega_w^2}{2} + M \cdot g \cdot s \cdot (1 - \cos \varphi) = \frac{m^2 \cdot l^2 \cdot v_p^2}{2 \cdot I_z}$$

$$\cos \varphi = 1 - \frac{m^2 \cdot l^2 \cdot v_p^2}{2 I_z \cdot M \cdot g \cdot s}$$

W przypadku oderwania się od próbki odłamków w równaniach należy uwzględnić ubytek masy. Równania te pozwalają określić maksymalny kąt, jaki osiągnęłyby wahadło balistyczne, oraz pracę W_w , gdyby cała energia kinetyczna pocisku została spożytkowana wyłącznie na jego wychylenie. Dysponując odczytem

rzeczywistego kąta wychylenia wahadła φ_p podczas strzelania, wyznacza się rzeczywistą pracę W_p , jaką wykonało wahadło balistyczne:

$$W_p = M \cdot g \cdot s \cdot (1 - \cos \varphi_p) .$$

Różnica tych prac

$$W_w - W_p = E_{res}$$

stanowi energię spożytkowaną na przebicie próbki, jej odkształcenie, ciepło, energię kinetyczną odłamków itp. Analiza tej energii zostanie podjęta w następnej pracy.

WNIOSKI

Zmodernizowane stanowisko — wahadło balistyczne umożliwia prowadzenie badań balistycznych (przebijalności dla dowolnych materiałów przy ostrzale pociskiem kalibru 12,7 mm) i rejestrację niezbędnych parametrów umożliwiających określenie energii kinetycznej pocisku przed uderzeniem, energii przejętej przez wahadło oraz energii kinetycznej odłamków po przebiciu próbki. Wskazane jest wyposażyć stanowisko w kamerę umożliwiającą dokładne określenie prędkości odłamków, ponieważ pomiar za pomocą bramek foliowych jest dokładny w przypadku jednego odłamka, co ma miejsce najczęściej, gdyż pocisk przemieszcza się po przebiciu wraz z oderwanym czopem. Określenia masy oderwanej części materiału dokonuje się poprzez dokładne ważenie próbki przed i po strzale. W przypadku kilku odłamków można przyjąć, że przemieszczają się one z jednakową prędkością.

Powyższe wielkości pozwalają na ocenę właściwości materiałów stosowanych na osłony balistyczne. Są one również niezbędne do weryfikacji obliczeń konstrukcji takich osłon. Programy komercyjne umożliwiające tego typu symulację wymagają wprowadzenia wielu własności dynamicznych i współczynników dla danego materiału oraz doboru odpowiedniego kryterium zniszczenia. Badania prowadzone na wahadle balistycznym dla danego materiału umożliwią weryfikację symulacji numerycznych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Fila J., *O przydatności oprzyrządowanego wahadła balistycznego i mechanizmach przebijalności ostrzałem*, Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Osobiste ochrony balistyczne”, ITWW „Moratex”, Łódź 1995.

- [2] Fila J., *Zunifikowane stanowisko do badań odporności balistycznej materiałów, zwłaszcza okrętowych, konstrukcyjno-osłonowych i pancernych*, P313233, 1995.
- [3] Kinslov R., *High Velocity Impact Phenomena*, Academic Press NY and London 1970.
- [4] Kruska L., Malinowski J., Kowalewski Z., *Analiza wyników eksperymentalnych badań dynamicznych stali 34GS w szerokim zakresie prędkości odkształcenia*, 21st Symposium on Experimental Mechanics of Solids, Poland, Jachranka 2004.
- [5] Leyko J., *Mechanika ogólna*, t. II, *Dynamika*, PWN, Warszawa 1976.
- [6] Wiśniewski A., *Badania ostrzałem 53 mm płyty z laminatu szklanego*, WITU, 1987.
- [7] Wiśniewski A., *Pancerze, budowa, projektowanie i badanie*, WNT, Warszawa 2001.
- [8] Zatorski Z., *Design of the ballistic many-layered steel shields*, „Marine Technology Transactions”, 2005, Vol. 16, pp. 13–22.
- [9] Zatorski Z., *Modelling of energy absorbed under firing of homogeneous plates*, „Marine Technology Transactions”, 2005, Vol. 16, pp. 1–12.
- [10] Zatorski Z., *Odporność na ostrzał kompozytów ceramika-guma-stal*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2005, nr 1, s. 1–10.
- [11] Zatorski Z., *Odporność na ostrzał laminatów z osłonami ceramicznymi*, „Zeszyty Naukowe” AMW 2005, nr 2, s. 1–13.

USE OF MODERNIZED BALLISTIC PENDULUM IN TRIALS TO PENETRATE MATERIALS USED FOR ANTITERRORIST SHIELDS WITH 12.7 MM ROUND

ABSTRACT

The paper presents a test stand to investigate penetrability of materials when hit with a 12.7 mm round which make it possible to record energy absorbed by the sample. It describes the process of investigations and making the samples. It shows the test results and a simplified energy balance for a ballistic pendulum for analysis of the phenomenon of penetration of material by a round.

Keywords:

ballistics, ballistic pendulum, penetrability, ballistic investigations, ballistic shields, energy balance.

Recenzent dr hab. inż. Marek Sperski, prof. AMW