



## **Badania odporności na ostrzał pociskami kalibru 12,7 mm stali 10GHMBA z wykorzystaniem wahadła balistycznego**

BOGDAN SZTUROMSKI

Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny,  
Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, 81-103 Gdynia, ul. Śmidowicza 69

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań odporności na ostrzał pociskami kal. 12,7 mm testowej stali 10GHMBA z wykorzystaniem wahadła balistycznego. Zaproponowano współczynniki porównawcze umożliwiające wzajemne porównywanie właściwości balistycznych różnych materiałów jak również pozwalających na weryfikowanie symulacji numerycznych wykorzystywanych w etapie projektowania.

W pracy przedstawiono weryfikację symulacji numerycznej przebijalności stali 10GHMGA wykonanej oprogramowaniem Ansys Auto Dyna.

**Słowa kluczowe:** balistyka, wahadło balistyczne, stal 10GHMBA, Ansys Auto Dyna

**Symbole UKD:** 623.55

### **1. Wprowadzenie**

Celem pracy było oszacowanie kuloodporności stali podwyższonej jakości 10GHMBA w aspekcie przydatności na konstrukcje osłonowe, chroniące przed ostrzałem pociskami z broni maszynowej kal. 12,7 mm. Badania kuloodporności prowadzono z wykorzystaniem wahadła balistycznego w kierunku oszacowania granicznej grubości pancerza zapewniającego ochronę oraz pozyskania wielkości fizycznych — charakterystyk umożliwiających oszacowanie zdolności przejmowania energii pocisku przez badany materiał w zależności od grubości badanego materiału. W tym celu przeprowadzono badania dla próbek materiału o różnej grubości w zakresie od 8 do 36 mm. W trakcie badań mierzono prędkość pocisku przed trafieniem w próbkę, prędkość pocisku za próbką w przypadku jej przebicia, siłę

odnotowaną na tulei dynamometrycznej, na której osadzona jest próbka oraz kąt wychylenia wahadła. Na podstawie tych wielkości wyznaczono energię kinetyczną pocisku przed i za próbką oraz pracę wykonaną przez wahadło, co pozwoliło oszacować, jaką część energii niesionej przez pocisk absorbuje dany materiał. Należy tu zwrócić uwagę, że badane są procesy szybkozmiennne, dlatego przeprowadzone obliczenia należy traktować jako szacunkowe.

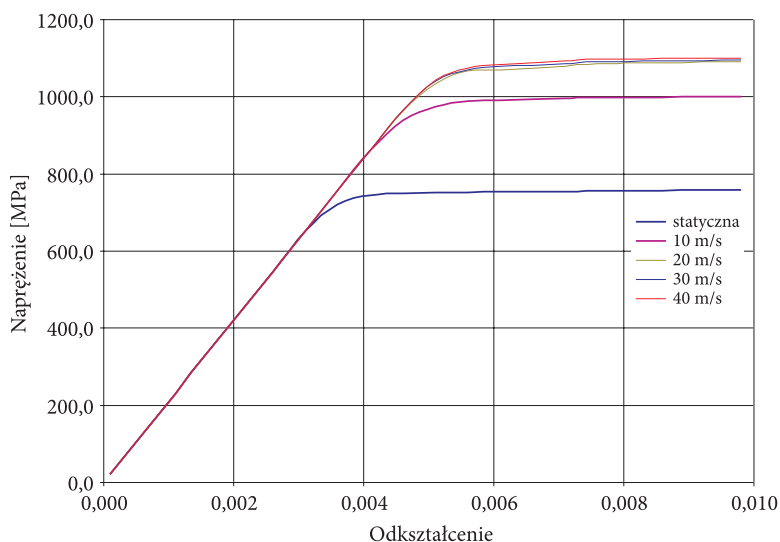
## 2. Badany materiał

Badanym w pracy materiałem była stal stopowa podwyższonej jakości oznaczona symbolem 10GHMBA. Skład chemiczny (tab. 1) tej stali został opracowany w Akademii Marynarki Wojennej przez ś.p. kmdr. dr. hab. inż. Józefa Filę. Jej przeznaczeniem były okrętowe konstrukcje osłonowe narażone na udary.

TABELA 1

Skład chemiczny stali 10GHMBA E620T

	Skład chemiczny [%]														
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Nb	Ti	Al <sub>m</sub>	N <sub>2</sub>	B
min	0,05	0,60	0,15	0,0	0,0	1,00	0,40	0,25	0,40	–	0,015	0,010	0,02	0,0	0,025
max	0,10	1,00	0,35	0,015	0,010	1,40	0,60	0,45	0,60	–	0,035	0,030	0,06	0,009	0,045



Rys. 1. Zależność naprężenia od prędkości odkształcenia próbki  $l_0 = 10$  mm dla dynamicznej próby rozciągania stali 10GHMBA na oprzyrządowanym młocie rotacyjnym

Podstawowe właściwości stali 10GHMBA otrzymano w wyniku próby rozciągania na maszynie wytrzymałościowej typu MTS-819.12 oraz oprzyrządowanym młocie rotacyjnym i zestawiono poniżej.

Podstawowe właściwości mechaniczne:

gęstość  $\rho = 7860 \text{ kg/m}^3$   
 liczba Poissona  $\nu = 0,30$   
 moduł Younga  $E = 2,09 \times 10^5 \text{ MPa}$   
 gran. plastycz.  $R_e = 695 \text{ MPa}$   
 gran. wytrż.  $R_m = 758,5 \text{ MPa}$ .

Z powyższej stali przygotowano próbki do badań o średnicy 120 mm i grubościach 8, 10, 12, 14, 16, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36 mm (rys. 2) co najmniej po 3 sztuki z każdej grubości. Zostały one odpowiednio oznaczone, ponumerowane, a następnie po zamontowaniu na wahadle przestrzelono je pociskami B32 o masie 49 g i prędkości średniej 824 m/s. Strzelanie przeprowadzono w specjalnej jamie strzelniczej przy wykorzystaniu karabinu typu WKM (rys. 3).

TABELA 2

Własności dynamiczne w zakresie prędkości rozciągania do 40 m/s

Prędkość młota rotacyjnego	m/s	0	10	20	30	40
Granica plastyczności	MPa	695	923	925	940	942
Granica wytrzymałości	MPa	758,5	997	1095	1098	1099



Rys. 2. Próbkę ze stali 10GHMBA do badań kuloodporności na wahadle balistycznym



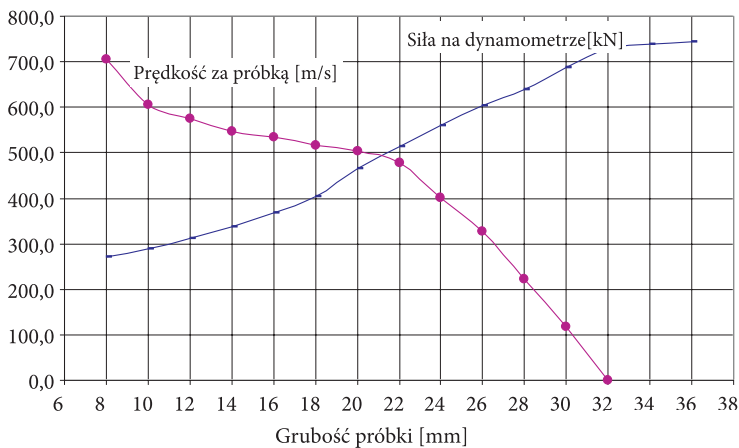
Rys. 3. Przestrzeliwanie próbek ze stali 10GHMBA w jamie strzelniczej

Rejestracja mierzonych parametrów wymaga dużego doświadczenia zespołu pomiarowego. Nie dla każdego strzału zarejestrowano wszystkie parametry. Otrzymane wyniki należało poddać selekcji i odrzucić błędne zapisy. Szczególny kłopot sprawiał pomiar prędkości pocisku za próbką, gdy jej wartość spadała poniżej prędkości dźwięku. W trakcie wcześniejszych strzelań testowych zespół pomiarowy napotykał wiele trudności, które sukcesywnie były rozwiązywane. Poprawne wyniki mierzonych parametrów dla danej grubości uśredniono i zestawiono w tabeli 3 i na rysunkach 4 i 5.

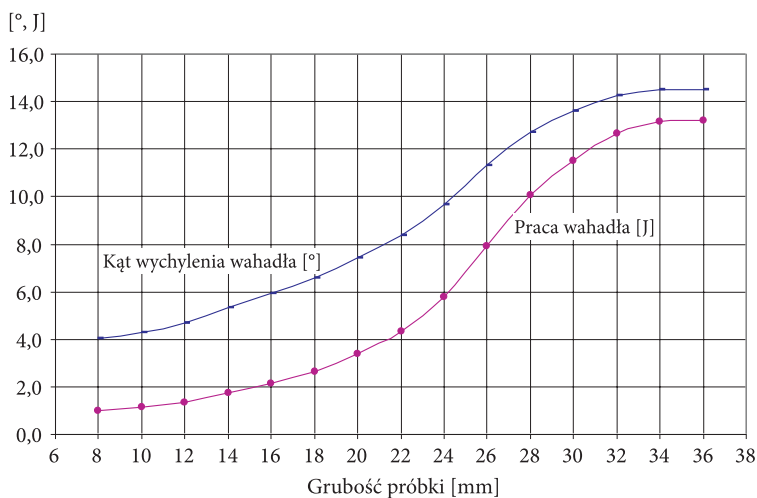
TABELA 3

Wartości średnie pomiarów z badań przebijalności stali 10 GHMBA

Grubość próbki [mm]	Siła na dynam. [kN]	Prędkość pocisku przed próbką [m/s]	Prędkość pocisku za próbką [m/s]	Kąt wychylenia wahadła [°]
8	270,0	825,3	704,5	4,03
10	289,2	823,7	605,0	4,30
12	312,6	826,0	575,0	4,68
14	337,2	822,3	547,5	5,31
16	367,8	825,0	535,0	5,91
18	403,5	823,3	517,5	6,59
20	464,3	822,3	504,0	7,41
22	514,6	825,3	478,0	8,37
24	559,6	824,7	402,0	9,66
26	604,3	823,7	brak	11,31
28	637,9	824,7	221,5	12,71
30	688,0	822,7	116,3	13,59
32	728,1	824,7	0,0	14,24
34	739,5	823,3	0,0	14,51
36	744,3	823,0	0,0	14,52



Rys. 4. Prędkość pocisku za próbką i siła na dyn. w funkcji grubości próbki



Rys. 5. Kąt wychylenia waha i praca waha w funkcji grubości próbki

### 3. Procentowe współczynniki porównawcze

Porównywanie odporności na przebicie różnych materiałów, np. pancernej stali, z współczesnymi kompozytami, ceramiką, konstrukcjami przekładkowymi lub weryfikacja modeli matematycznych eksperymentem może być dokonana przy porównaniu wybranych mierzonych parametrów, takich jak np. maksymalna grubość przebijanego materiału dla danego pocisku, prędkość pocisku za próbką odniesiona do jej grubości oraz inne parametry możliwe do zmierzenia. Wszystkie te wielkości, np. prędkość pocisku za próbką, są funkcjami grubości próbki dla danego typu pocisku. Proces przebijania materiału przez pocisk to przekształcenie

się energii niesionej przez pocisk w energię odkształcenia próbki, energię odkształcenia pocisku, wydzielane ciepło, pracę wahadła itp. Do porównań odporności na przebicie różnych materiałów lub modeli matematycznych z eksperymentem proponuje się wprowadzenie współczynników bezwymiarowych lub procentowych, które określają procentową zmianę energii kinetycznej lub pędu elementów układu. W przeprowadzonym eksperymencie dysponowano pomiarem prędkości przed i za próbką, pomiarem kąta wychylenia wahadła, na podstawie którego oblicza się pracę wykonaną przez wahadło na pokonanie siły ciężkości. Na podstawie powyższych parametrów proponuje się następujące współczynniki porównawcze:

- **Współczynnik  $A_1$  — praca wahadła**

W trakcie procesu przebijania próbki przez pocisk rejestruje się maksymalny kąt  $\varphi_p$  wychylenia wahadła balistycznego, na podstawie którego oblicza się rzeczywistą pracę wahadła  $W_p$ , jaką wykonało ono na pokonanie siły ciężkości, przemieszczając swój środek ciężkości na daną wysokość. Praca ta powstaje z części energii kinetycznej niesionej przez pocisk, przyrównuje się ją do pracy teoretycznej  $W_w$ , jaką wykonałoby wahadło w przypadku, gdyby na jej wykonanie została spożytkowana cała energia kinetyczna niesiona przez pocisk. Wówczas wahadło wychyliłoby się o kąt  $\varphi_w$ . W przypadku gdy pocisk nie przebije próbki, wielkości te wynoszą:

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

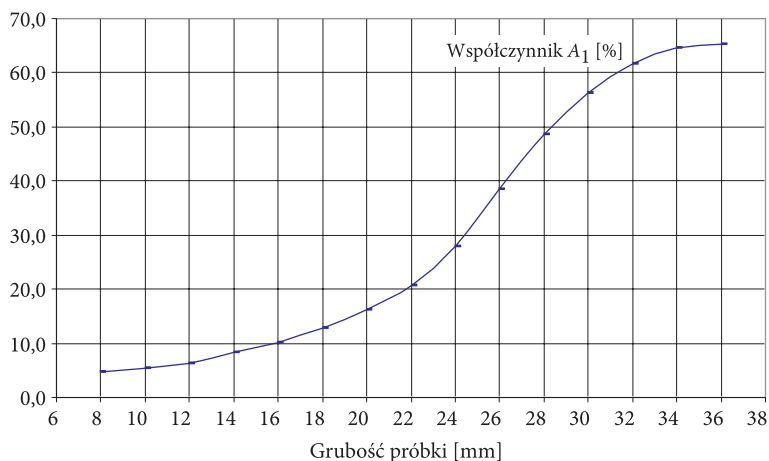
Jeżeli pocisk przebije próbkę, powyższe równania przyjmują postać:

$$W_w = \frac{1}{2} \cdot \frac{m^2 \cdot l^2}{I_z} \cdot v_p^2, \quad \cos \varphi_w = 1 - \frac{m^2 \cdot l^2 \cdot v_p^2}{2 I_z \cdot M \cdot g \cdot s}.$$

Porównując powyższe prace, otrzymuje się współczynnik procentowy  $A_1$  określający, jaka część energii niesionej przez pocisk została spożytkowana na wychylenie wahadła:

$$A_1 = \frac{W_p}{W_w} \cdot 100 \% \quad \text{lub} \quad A_1 = \frac{1 - \cos \varphi_p}{1 - \cos \varphi_w} \cdot 100 \%.$$

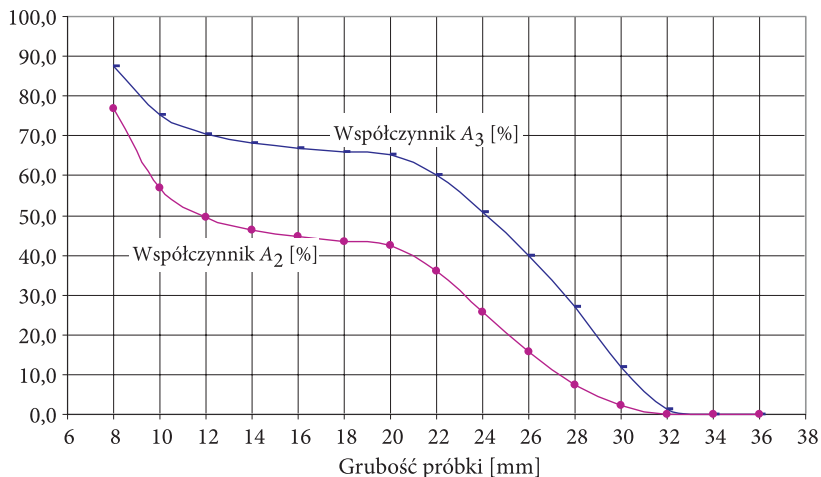
Na podstawie bilansu energetycznego dla wahadła balistycznego oraz wyznaczonych charakterystyk masowych i geometrycznych wyznaczono teoretyczną pracę wahadła, jaką wykonałoby, gdyby cała energia kinetyczna niesiona przez pocisk została na nią zamieniona. Porównywano ją z pracą rzeczywistą wahadła w trakcie przestrzelania danej próbki, wyznaczonej na podstawie kąta wychylenia wahadła. Stosunek tych prac pomnożony przez 100% nazwano  $A_1$  (rys. 6).

Rys. 6. Wartości współczynnika  $A_1$  dla 10GHMBA w funkcji grubości próbki

### • Współczynnik $A_2$ — energia pocisku

Współczynnik  $A_2$  określa procentowo energię kinetyczną, jaką zachował pocisk po przejściu przez próbkę. Określa się go, przyrównując kwadraty prędkości pocisku za i przed próbką (rys. 7):

$$A_2 = \frac{E_{za}}{E_{przed}} \cdot 100 \% \quad \text{lub} \quad A_2 = \frac{v_{za}^2}{v_{przed}^2} \cdot 100 \%$$

Rys. 7. Wartości współczynnika  $A_2, A_3$  dla 10GHMBA w funkcji grubości próbki

- **Współczynnik  $A_3$  — pęd pocisku**

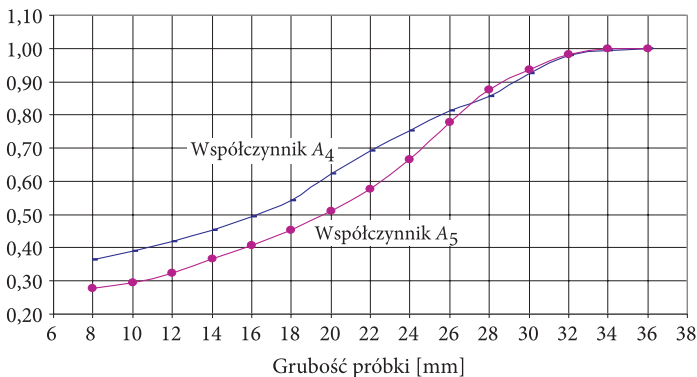
Współczynnik  $A_3$  określa procentowo pęd, jaki zachował pocisk po przejściu przez próbkę. Określa się go, przyrównując bezpośrednio prędkości pocisku za i przed próbką:

$$A_3 = \frac{mv_{za}}{mv_{przed}} \cdot 100\% \quad \text{lub} \quad A_3 = \frac{v_{za}}{v_{przed}} \cdot 100\%.$$

- **Współczynnik  $A_4$  i  $A_5$  — impuls siły i kąt wychylenia wahadła**

Wahadło balistyczne wyposażone jest w tuleję dynamometryczną do której bezpośrednio montowana jest ostrzeliwana próbka, rejestrująca impuls siły ściskającej tuleję w trakcie uderzenia pocisku. Wartość tej siły narasta wraz z grubością próbki. Gdy grubość przestrzeliwanej próbki jest wystarczająco duża, by zatrzymać pocisk, wartość siły osiąga wartości maksymalne. Dalsze zwiększenie grubości próbki powoduje nieznaczny wzrost siły rejestrowanej na dynamometrze. Współczynnik  $A_4$  jest stosunkiem rejestrowanej siły dla próbki danej grubości do siły rejestrowanej dla próbki zatrzymującej pocisk. Podobny przebieg do zmiany impulsu siły w funkcji grubości próbki ma kąt wychylenia wahadła. Po przekroczeniu grubości próbki zatrzymującej pocisk jego wartość nieznacznie narasta. Współczynnik  $A_5$  jest stosunkiem kąta wychylenia wahadła dla próbki danej grubości do kąta wychylenia wahadła dla próbki zatrzymującej pocisk. Powyższe współczynniki wyznacza się według wzorów (rys. 8):

$$A_4 = \frac{F_h}{F_{max}} \quad A_5 = \frac{\varphi_h}{\varphi_{max}}.$$

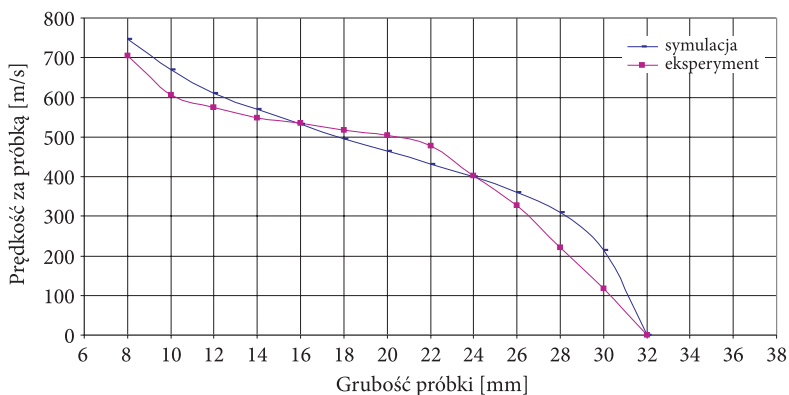


Rys. 8. Wartości współczynnika  $A_4$  i  $A_5$  dla 10GHMBA w funkcji grubości próbki

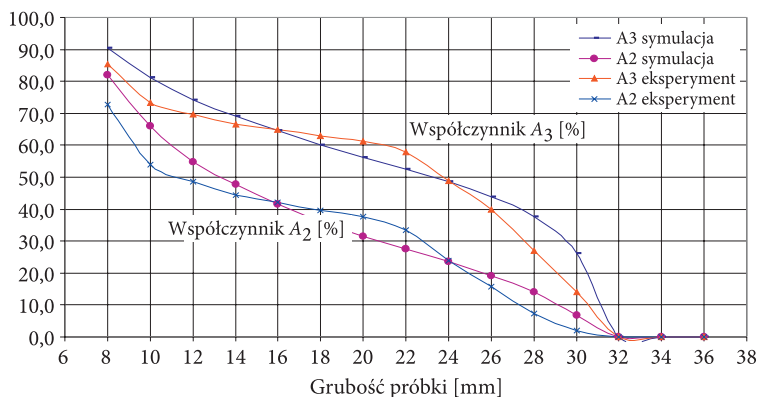


#### 4. Weryfikacja symulacji numerycznych przebijalności osłon ze stali 10GHMBA

Parametry mierzone w trakcie eksperymentu i wyznaczone są przydatne do weryfikacji charakterystyk dynamicznych materiałów wykorzystywanych do symulacji numerycznych wykonywanych za pomocą programów komputerowych dostępnych na rynku. Symulacje te nie mają żadnego „sensu”, jeśli ich wyników nie można zweryfikować eksperymentem, a są one dzisiaj podstawowym narzędziem konstruktorów projektujących osłony. W przypadku braku charakterystyk materiałowych konstruktor dobiera je, kierując się doświadczeniem. Pozyskanie charakterystyk dynamicznych materiałów jest stosunkowo kosztowne. Do tego celu niezbędne jest laboratorium z odpowiednim sprzętem. Charakterystyki niektórych materiałów, takich jak stale pancerne, można pozyskać z literatury, jednak dla nowych materiałów pojawiających się na rynku jest to bardzo trudne. Producenci materiałów chronią takie dane tajemnicą. Poniżej przedstawiono zestawienie wyników badania kuloodporności stali 10GHMBA otrzymanych z eksperymentu i z symulacji numerycznej przeprowadzonej programem Ansys AutoDyna (rys. 9 i 10).



Rys. 9. Prędkość pocisku za próbką w funkcji grubości próbki ze stali 10GHMBA. Eksperyment i symulacja



Rys. 10. Wartości współczynnika  $A_2$  i  $A_3$  w funkcji grubości próbki ze stali 10GHMBA. Eksperyment i symulacja

## Podsumowanie

Stanowisko badawcze — wahadło balistyczne wyposażone w aparaturę pomiarową — umożliwia prowadzenie badań balistycznych — przebijalności dowolnych materiałów przy ostrzale pociskiem kalibru 12,7 mm i rejestrację takich parametrów jak prędkość pocisku przed próbką, prędkość pocisku za próbką, maksymalna siła odnotowana na tulei dynamometrycznej w chwili trafienia próbki oraz kąt wychylenia wahadła. Na przykładzie materiału testowego — stali 10GHMBA — przedstawiono metodykę badania kuloodporności materiałów z wykorzystaniem wahadła balistycznego. Przedstawiono obliczenia energii kinetycznej pocisku przed uderzeniem w próbkę, energii pocisku za próbką, pracę spożytkowaną na wychylenie wahadła, na którym zamontowana jest przestrzeliwana próbka. Wprowadzono procentowe współczynniki porównawcze  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$  będące funkcjami grubości przestrzeliwanego materiału, które służą do szacowania odporności na przebicie badanego materiału, ułatwiają weryfikację symulacji numerycznych, mogą być wykorzystane do wzajemnych porównań różnych materiałów między sobą, przy założeniu jednakowych warunków strzelania, co będzie tematem kolejnych prac.

Stal 10GHMBA wytypowana do testowania stanowiska — wahadła balistycznego — została przebadana w Laboratorium Inżynierii Materiałowej AMW, dla niej przeprowadzono statyczne i dynamiczne próby rozciągania na maszynach wytrzymałościowych typu MTS i młocie rotacyjnym. Otrzymane charakterystyki wykorzystano do przeprowadzenia symulacji numerycznych przebijalności stali 10GHMBA z wykorzystaniem oprogramowania Ansys Auto Dyna. Symulacje przeprowadzono w kierunku porównania otrzymanych wyników z przeprowadzonym eksperymentem na wahadle balistycznym i weryfikacji przyjętych do obliczeń danych wejściowych — charakterystyk materiałowych. Otrzymano zadowalającą

zgodność wyników w zakresie grubości przebijanej próbki jak również prędkości pocisku za próbką w przypadku przebicia.

Podsumowując, oprzyrządowane stanowisko badawcze — wahadło balistyczne — umożliwia pomiar niezbędnych wielkości fizycznych do określania odporności na przebicie dowolnych materiałów konstrukcyjnych przeznaczonych na osłony jak również do weryfikacji symulacji numerycznych procesów szybkozmiennych wykorzystywanych w projektowaniu konstrukcji osłonowych.

W trakcie wykonywania pomiarów mierzonych parametrów zespół wykonawców pracy zdobył bardzo duże doświadczenie. Pomiarów parametrów procesów szybkozmiennych, takich jak proces przebijania stali pancernej przez pocisk, są „praktycznie” trudne w realizacji, napotkano na wiele trudności, które sukcesywnie rozwiązywano w trakcie prowadzonych badań. Początkowo mierzono wiele „fałszywych sygnałów”, np. jednym z wielu problemów wymagających rozwiązania był pomiar prędkości pocisku za próbką, gdy spadała ona poniżej prędkości dźwięku ok. 330 m/s. Czujniki piezoelektryczne bramek mierzyły wówczas falę dźwiękową powstającą w chwili zderzenia pocisku z próbką. Problem rozwiązano, zmieniając konstrukcję bramek. Napotykanne problemy rozwiązywano na bieżąco, a zdobywane doświadczenie pozwalało wyodrębnić pomiary prawidłowe od „fałszywych”. Obecnie zespół pomiarowców dysponuje bogatym doświadczeniem w tej dziedzinie, a opracowane stanowisko jest gotowe do badania kuloodporności dowolnych materiałów i weryfikacji charakterystyk dynamicznych niezbędnych do symulacji numerycznych.

Artykuł wpłynął do redakcji 12.12.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lipcu 2010 r.

#### LITERATURA

- [1] Z. DYLAŁG, A. JAKUBOWICZ, Z. ORŁOŚ, *Wytrzymałość materiałów*, t. 1, WNT, 2007.
- [2] J. FILA, *Zunifikowane stanowisko do badań odporności balistycznej materiałów, zwłaszcza okrętowych, konstrukcyjno osłonowych i pancernych*, P313233, 1995.
- [3] J. FILA, *O przydatności oprzyrządowanego wahadła balistycznego i mechanizmach przebijalności ostrzałem*, Międzynarodowa Konferencja Naukowo Techniczne: „Osobiste Ochrony Balistyczne”, ITWW „Moratex”, Łódź, 1995.
- [4] J. FILA, *Badania odporności balistycznej materiałów okrętowych*, Raport Nr 1/1993/IPBMO/POWŁ, Z1. KBN/AMW, cz. 1, 1993.
- [5] J. J. LEYKO, *Mechanika ogólna*, t. 2, Dynamika, PWN, 2006.
- [6] T. NIEZGODZIŃSKI, *Mechanika ogólna*, PWN, 2008.
- [7] B. SZTUROMSKI, *Charakterystyki dynamiczne do symulacji numerycznej materiałów stosowanych na osłony antyterrorystyczne na jednostkach pływających*, Raport z pracy badawczej N508-O/0054/32, AMW/MNiSW, 2009.

**B. SZTUROMSKI****Testing results of shooting bullets of 12.7-mm resistance test steel 10GHMBA using ballistic pendulum**

**Abstract.** The testing results of shooting bullets of 12.7-mm resistance test steel 10GHMBA with the use of ballistic pendulum were introduced in this report. Comparative coefficients were proposed enabling mutual comparing ballistic proprieties of various materials as well as enabling verification of numeric simulations used at design stage.

Verification of numeric simulation of steel 10GHMGA perforation, made by software Ansys Auto Dyna, was introduced in the report.

**Keywords:** ballistics, ballistic pendulum, penetrability, ballistic investigations, ballistic shields

**Universal Decimal Classification:** 623.55