

Materiały Wysokoenergetyczne / High-Energetic Materials, 2015, 7, 63 – 72
ISSN 2083-0165

Badania skuteczności ochronnej wielowarstwowego plateru tytan-aluminium na działanie strumienia kumulacyjnego **Research of protective multilayer titanium and aluminum system for cumulative jet**

Zenon Wilk^{1,*}, Piotr Koślik¹, Aleksander Galka²

1) Instytut Przemysłu Organicznego, ul. Annopol 6, 03-236 Warszawa, PL

Oddział zamiejscowy ul. Zawadzkiego 1, 42-693 Krupski Młyn, PL

2) Zakład Technologii Wysokoenergetycznych „Explomet” Galka, Szulc Sp. J.

ul. Oświęcimska 100H, 45-641 Opole, PL

*E-mail: zenon.wilk@ipo.waw.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono badania balistyczne - poligonowe, w których poddano ocenie zdolności ochronne na działanie strumienia kumulacyjnego wielowarstwowego plateru z tytanu i aluminium (7 warstw o grubości łącznej 28 mm). Badany układ wielowarstwowy otrzymano metodą platerowania wybuchowego w jednym cyklu technologicznym odpowiednio z naprzemiennie ułożonych warstw: Ti10mm + Al3mm + Ti3mm + Al3mm + Ti3mm + Al3mm + Ti3mm. W testach zastosowano małokalibrowe ładunki kumulacyjne o średnicy wkładki 32 mm, kącie wierzchołkowym 60° i zawartości 18 g materiału wybuchowego na bazie heksogenu (typu H-Pp-32/60). Wyznaczano głębokość perforacji i objętość powstałego krateru w stosie płytek kontrolnych o grubości 10 mm ze stali typu S235, na którym był umieszczany badany plater. Na tej podstawie szacowano zdolność pochłaniania energii kinetycznej strumienia przez układ wielowarstwowy Ti/Al-28mm. Ze względu na niesymetryczną konstrukcję plateru, analizie poddano jego skuteczność ochronną w zależności od strony oddziaływania ładunku kumulacyjnego.

Abstract: This paper presents the results of ballistic tests of protective capacity a layer system of titanium and aluminum (7 layers with a total thickness of 28 mm) of explosive charge influence. The tested multilayer system was made by explosive welding in a single technological cycle appropriately with of alternating layers: Ti10mm + Al3mm + Ti3mm + Al3mm + Ti3mm + Al3mm + Ti3mm. In the experiments small caliber liner shaped charges a diameter of 32 mm/60° and 18 g of explosive materials based on hexogen (type H-Pp-32/60) were used. The depth of the perforation and the volume of crater in the stack control plates of thickness 10 mm with steel S235 type were determined. Base on this results the absorption capacity of kinetic energy by the multilayer stream of Ti/Al was estimated. Furthermore, analysis piercing jet cumulative multilayer protective system were performed.

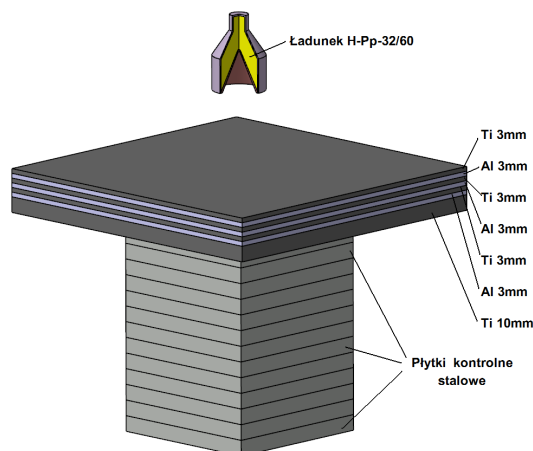
Słowa kluczowe: system ochrony pasywnej, pancierz warstwowy, ładunek kumulacyjny, strumień kumulacyjny

Keywords: passive protection system, layer armour, shaped charge, cumulative jet

1. Wprowadzenie

W pracy przedstawiono badania balistyczne - poligonowe, w których poddano ocenie zdolności ochronne na działanie strumienia kumulacyjnego układu warstwowego z tytanu i aluminium (7 warstw o grubości łącznej 28 mm). Badany układ wielowarstwowy niesymetryczny otrzymano metodą platerowania wybuchowego (producent: Explomet – Opole) w jednym cyklu technologicznym, odpowiednio z naprzemiennie ułożonych warstw: Ti10mm + Al3mm + Ti3mm + Al3mm + Ti3mm + Al3mm + Ti3mm. Testy perforacji warstwowego układu typu Ti/Al-28mm wykonano w dwóch wariantach. Materiał przestrzelono zarówno od strony, której

pierwszą powierzchnię stanowiła warstwa tytanu o grubości 3 mm jak i od płaszczyzny tytanu o grubości płyty wynoszącej 10 mm. Badany warstwowy układ ochronny umieszczano na stosie płytek kontrolnych o grubości 10 mm ze stali typu S235. W testach statycznych małokalibrowe ładunki typu H-Pp-32/60 (producent: IPO – *Krupski Młyn*) detonowano w odległości 48 mm (tzn. na dystansie 1,5 średnicy wkładki kumulacyjnej). Układ badawczy przedstawiono na rys. 1. W obu wariantach wyznaczano głębokość perforacji i objętość powstałego krateru w stosie kontrolnym. Na tej podstawie szacowano zdolność pochłaniania energii kinetycznej strumienia przez układ wielowarstwowy Ti/Al. Opis szczegółowy metodyki własnej IPO – Oddział w Krupskim Młynie [1], przyjętej w tych badaniach, przedstawiono w dalszej części artykułu.

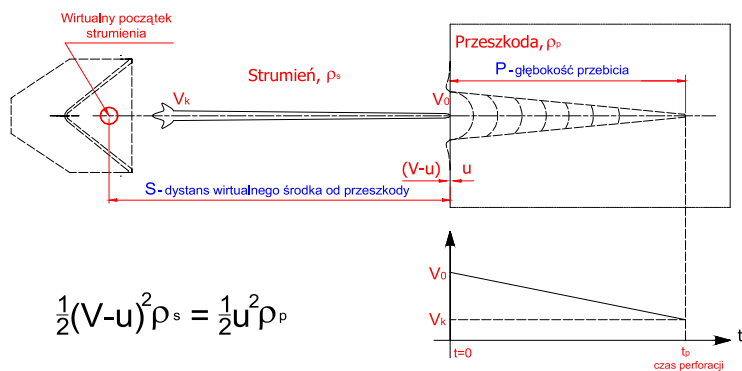


Rys. 1. Schemat badania zdolności ochronnych układu warstwowego Ti/Al

1.1. Model analityczny przebijania przegrody przez strumień kumulacyjny

Dla przyjętej metodyki badawczej wykorzystano podstawowe znane zależności fizyczne występujące w procesie oddziaływania strumienia kumulacyjnego na przeszkody. W praktyce, pozwalają one na jakościową ocenę funkcjonowania różnego rodzaju ładunków kumulacyjnych stosowanych zarówno w obszarze cywilnym (np. ładunki perforujące do odwiertów) jak i obronnym (np. ładunki lub głowice przeciwpancerne) [2 - 4].

Mechanizm powstawania krateru w przeszkodzie jednorodnej, na skutek działania strumienia kumulacyjnego generowanego z klasycznej wkładki stożkowej, można analizować wykorzystując teorię hydrodynamiczną. Schematycznie proces przebicia przedstawia rys. 2. Prędkość czoła strumienia (V_0) wynosi około 7000-8000 m/s. Następuje wydłużanie się strumienia a jego kolejne części posiadają coraz mniejszą prędkość. Jego część tylna wraz ze zbitką posiada skuteczną prędkość końcową (V_k) około 400-500 m/s. Strumień kumulacyjny, poczynając od jego części czołowej o największej prędkości (dla chwili $t = 0$, $V = V_0$), działa na kolejne warstwy przegrody do momentu t_p (czas perforacji przeszkody), kiedy jego energia będzie za mała do pokonania kolejnej warstwy materiału.



Rys. 2. Schemat perforacji przegrody jednorodnej przez klasyczny strumień kumulacyjny – model hydrodynamiczny wnikania strumienia [2]; V – prędkość strumienia; u – prędkość drążenia krateru; ρ_s – gęstość strumienia kumulacyjnego; ρ_p – gęstość materiału przeszkody

W przypadku analizy głębokości drążenia krateru przez strumień kumulacyjny, na podstawie hydrodynamicznej teorii zderzenia się ciał, prędkość drążenia krateru u wynosi

$$u = \frac{V_s}{1 + \sqrt{\rho_p / \rho_s}} \quad (1)$$

gdzie: V_s – prędkość masowa cząstek strumienia kumulacyjnego; ρ_p – gęstość materiału tarczy (przeszkody); ρ_s – gęstość strumienia kumulacyjnego.

Pogłębianie się krateru następuje do momentu, gdy kolejne napływające porcje strumienia kumulacyjnego nie posiadają już dostatecznie wysokiej prędkości (energii). Ta minimalna skuteczna prędkość wnikania strumienia (drążenia krateru) zależy od właściwości materiału przeszkody - jego wytrzymałości na oddziaływanie dynamiczne. W praktyce, do oszacowania prędkości minimalnej wnikania strumienia w przeszkodę metalową przyjmuje się granicę wytrzymałości materiału na rozciąganie R_m , która odpowiada przejściu ze strefy odkształceń sprężystych do plastycznych

$$u_{\min} = \sqrt{\frac{2R_m}{\rho_p}} \quad (2)$$

Minimalnej, końcowej prędkości wnikania strumienia u_{\min} odpowiada, zgodnie z równaniami hydrodynamiki, graniczna minimalna prędkość strumienia kumulacyjnego V_k

$$V_k = u_{\min} \cdot (1 + \sqrt{\rho_p / \rho_s}) \quad (3)$$

Dla różnych materiałów przegrody, na podstawie badań doświadczalnych zdolności przebijania ładunkami kumulacyjnymi, możliwe jest wyznaczenie tzw. specyficznej energii E_s [J/cm³] związanej z przebijaniem danego materiału przez strumień kumulacyjny. Współczynnik ten określa wartość energii strumienia, która bierze udział w tworzeniu krateru o jednostkowej objętości w danym materiale. Energia specyficzna jest charakterystyczna dla materiału przegrody - zależy od jego wytrzymałości i gęstości. W tabeli 1 przedstawiono przykład danych dla typowych materiałów przegrody, które stosowane są do analizy głębokości przebiccia ładunków kumulacyjnych stosowanych w górnictwie otworowym [1, 2].

Tab. 1. Charakterystyka materiałów przegrody

Nazwa materiału	Gęstość, ρ_p [g/cm ³]	Wytrzymałość, R_m [MPa]	Energia specyficzna, $E_{S^{(a)}}$ [J/cm ³]
Stal 4140	7,86	1030	4000
Woda	1,00	-	20
Stal L80	7,86	620	3100
Beton	2,20	37	800
Stal S235 (materiał kontrolny)	7,8	300	2600

a) Energia specyficzna dla strumienia kumulacyjnego z miedzi.

Na podstawie wyników badań poligonowych, dla danej partii ładunków kumulacyjnych, poprzez pomiar objętości krateru V_{KR} w materiale o znanej energii specyficznej (np. stal S235) można wyznaczyć energię skuteczną strumienia E_{SK} , która bierze udział w tworzeniu krateru w tym materiale

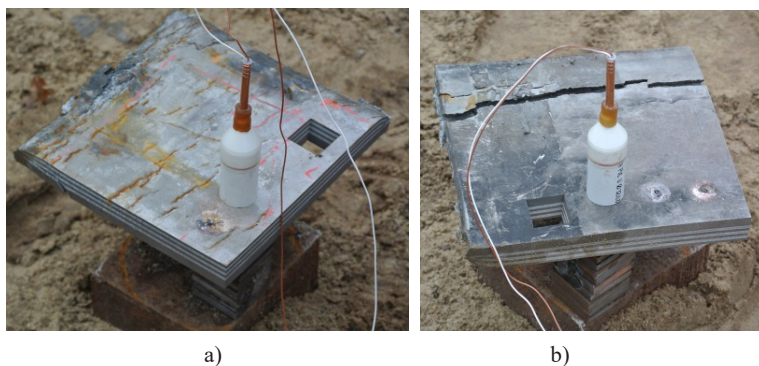
$$E_{SK} = V_{KR} \cdot E_S \quad (5)$$

Jeżeli dla ładunków kumulacyjnych, przeznaczonych do badań z danej partii, znana jest energia skuteczna strumienia, która bierze udział w przebicciu to możliwe jest przeprowadzenie dalszej analizy, tzn. zasięgu perforacji i zdolności ochronnej innych materiałów, np. w postaci złożonej, wielowarstwowej przegrody.

2. Materiały i metody

2.1. Układ badawczy

Widok układów do badań poligonowych testowego materiału warstwowego tytan/aluminium przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Widok ogólny układu badawczego: a) układ warstw: Ti3Al3Ti3Al3Ti3Al3Ti10; b) układ warstw: Ti10Al3Ti3Al3Ti3Al3Ti3

Testy perforacji warstwowego układu typu Ti/Al wykonano w dwóch wariantach. Ładunkami kumulacyjnymi strzelono w układzie statycznym zarówno od strony, której pierwszą powierzchnią stanowiła warstwa tytanu o grubości 3 mm jak i od płaszczyzny tytanu o grubości płyty wynoszącej 10 mm. Układ badawczy składał się z następujących elementów:

- ładunek kumulacyjny typu H-Pp-32/60 wraz z zapalnikiem,
- tuleja dystansowa o wysokości 48 mm, tj. 1,5 kalibra wkładki kumulacyjnej,
- badany materiał warstwowy,
- stos płytek kontrolnych o wymiarach 50 mm x 50 mm ze stali typu S235 (St3).

Dla potrzeb tej analizy niezbędna jest znajomość energii skutecznej strumienia generowanego w wyniku wybuchu ładunku, którą oznaczamy na wybranym materiale kontrolnym.

2.3. Test kontrolny ładunków H-Pp-32/60

Do badań wybrano ładunki kumulacyjne z typoszeregu H-Pp-32/60, które są przeznaczone do stosowania w zakładach górniczych otworowych, do perforacji, do rozdrabniania skał i głazów narzutowych oraz do specjalistycznych prac minerskich. Ładunki typu H-Pp-32/60 nominalnie zawierają prasowany materiał wybuchowy heksoflen (heksogen z dodatkiem fluoropolimerów) o masie 18 g (gęstość $\rho = 1,65 \text{ g/cm}^3$). Wkładka kumulacyjna stożkowa zastosowana w ładunkach wykonana jest w technologii prasowania i spiekania z proszków miedzi. Masa wkładki wynosi 18 g, średnica 32 mm, kąt stożka 60° . Ładunki posiadają obudowę z tworzywa (polipropylen) o średnicy zewnętrznej około 34 mm. W miejscu pobudzenia ładunku do detonacji stosowano centralnie umieszczony zapalnik elektryczny.

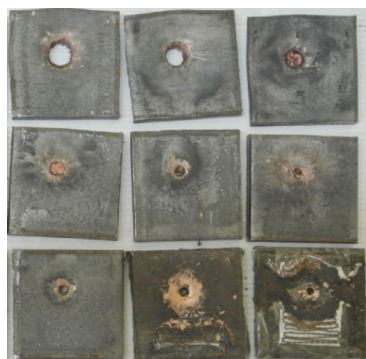
Dla partii ładunków wybranych do badań wykonano test statystyczny (5 szt.) przebiecia na wybranym materiale kontrolnym (stal S235) w postaci stosu złożonego z płytek (50 mm x 50 mm x 10 mm), jak to przedstawiono na rys. 4. Na podstawie przeprowadzonego doświadczenia określono dla ładunku nominalną głębokość perforacji strumieniem na stosie kontrolnym: $L = 80\text{-}90 \text{ mm}$.



Rys. 4. Widok układu do testu ładunków H-Pp-32/60

Dla określenia energii skutecznej strumienia kumulacyjnego wyznaczano objętość wytworzonego krateru w materiale kontrolnym. Na podstawie wymiarów średnic powstałych otworów w płytkach obliczono poszczególne objętości i objętość łączną dla poszczególnych testów.

Dla przykładu, na rys. 5 przedstawiono widok przeбитych strumieniem kumulacyjnym płytek kontrolnych (stal S235) po jednym z testów.



Rys. 5. Widok płytek (stal S235) po jednym z testów przebicia strumieniem kumulacyjnym

W tabeli 2 zestawiono średnie objętości i energie oznaczone dla poszczególnych płytek stalowych w teście kontrolnym na podstawie zgodnej z wzorem (5) zależności

$$E_{sk(n)} = V_n \cdot 2600 \quad (6)$$

gdzie: $E_{sk(n)}$ – energia tracona w płytce n , [J]; V_n – objętość krateru dla danej płytki n , [cm³]; E_s – energia specyficzna dla stali miękkiej (S235) na działanie strumienia kumulacyjnego z miedzi, $E_s = 2600$ J/cm³ (tabela 1).

Tab. 2. Objętość krateru i energia skuteczna strumienia rozdzielona na poszczególne płytki w teście kontrolnym ładunków H-Pp-32/60

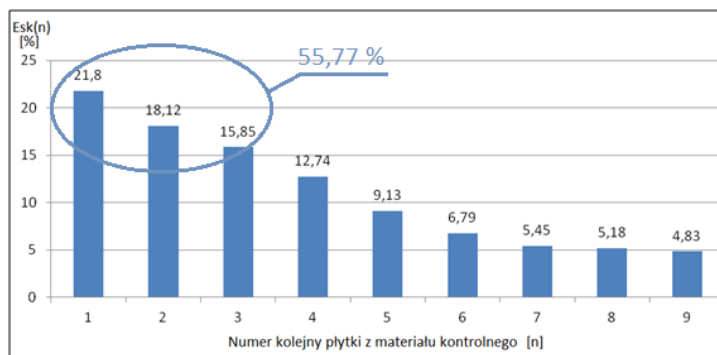
Nr płytki, n	Objętość krateru, V_n [cm ³]	Energia tracona na kolejnych płytkach, $E_{sk(n)}$ [J]	Udział energii utraconej na płytce względem całkowitej, $E_{sk(n)}/(E_{SK} = 6773)$ [%]
1	0,568	1476,8	21,80
2	0,472	1227,2	18,12
3	0,413	1073,8	15,85
4	0,332	863,2	12,74
5	0,238	618,8	9,13
6	0,177	460,2	6,79
7	0,142	369,2	5,45
8	0,135	351,0	5,18
9	0,126	327,6	4,83
Suma	$V_{KR} = 2,605$	$E_{SK} = 6773$	100

Średnia objętości krateru V_{KR} w materiale kontrolnym, jaki wytwarza strumień kumulacyjny ładunków H-Pp-32/60 z partii do testów, wynosi: $V_{KR} = 2,605$ cm³. Całkowita energia skuteczna strumienia (E_{SK}) dla danego typu ładunku wyznaczona na podstawie wzoru (5) wynosi

$$E_{SK} = V_{KR} \cdot E_s = 2,605 \text{ [cm}^3\text{]} \cdot 2600 \text{ [J/cm}^3\text{]} = 6773 \text{ [J]} \quad (7)$$

gdzie: E_s – energia specyficzna strumienia dla materiału kontrolnego (stali miękkiej S235) na działanie strumienia kumulacyjnego z miedzi, $E_s = 2600$ J/cm³ (tabela 1).

Na rys. 6 przedstawiono graficznie rozkład procentowy energii zużytej na przebicie strumieniem kumulacyjnym stosu kontrolnego z podziałem na poszczególne płytki.

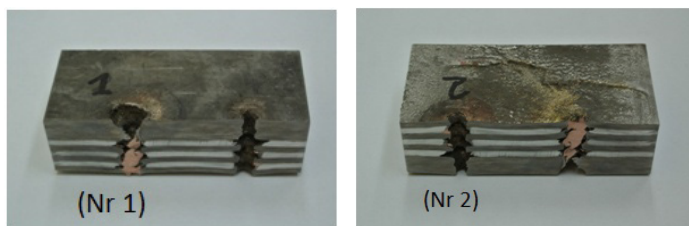


Rys. 6. Rozkład procentowy energii zużytej na przebicie strumieniem kumulacyjnym stosu kontrolnego (stal S235) z podziałem dla kolejnych płytek

Energia wyznaczona dla kolejnych otworów w płytkach jest proporcjonalna do przekroju otworu (stosowano płytki jednakowej grubości tj. 10 mm). Przedstawiony rozkład jest typowym dla stali miękkiej odwzorowaniem profilu krateru utworzonego przez strumień kumulacyjny z wkładki stożkowej. Klasyczny strumień kumulacyjny największą energię posiada w swojej części czołowej. Na podstawie danych z tabeli 2 lub wykresu na rys. 6 można stwierdzić, że strumień kumulacyjny ładunku testowego penetrując przeszkodę w postaci płytek stalowych, ponad połowę swej energii (około 55%) traci na pokonanie pierwszych trzech płytek (30 mm). Należy podkreślić, że dla innego typu materiałów przeszkody, np. bardzo twardych stali, ceramiki lub kompozytów ten rozkład traconej energii przez strumień może być inny.

2.4. Badania poligonowe zdolności przebicia strumieniem kumulacyjnym - ocena właściwości tłumiących materiału wielowarstwowego tytan/aluminium

Poniżej przedstawiono wynik reprezentatywnych badań poligonowych zdolności ochronnej plateru Ti/Al-28 mm na działanie strumienia kumulacyjnego generowanego z ładunków testowych. Wykonany został wycinek z badanego plateru z widocznym przekrojem dwóch sąsiadujących otworów, które powstały przez strzelanie z dwóch stron, jak to ilustruje rys. 7.



Rys. 7. Widok przekroju otworów w materiale wielowarstwowym Ti/Al-28mm powstałych na skutek działania strumienia kumulacyjnego z ładunków testowych H-Pp-32/60

Widoczne są w przekroju otwory (przebicia) powstałe na skutek działania strumieni kumulacyjnych dla dwóch wariantów strzelania:

Nr 1 - Działanie strumienia kumulacyjnego w stronę warstwy Ti 10 mm (odpowiada układowi strzelania jak na rys. 3b).

Nr 2 - Działanie strumienia kumulacyjnego w stronę warstwy Ti 3 mm (odpowiada układowi strzelania jak na rys. 3a).

Na rys. 8 i 9 przedstawiono widok stalowych płyt kontrolnych, które uległy przebiciu energią strumienia kumulacyjnego jaka pozostała po pokonaniu przeszkody warstwowej Ti/Al.

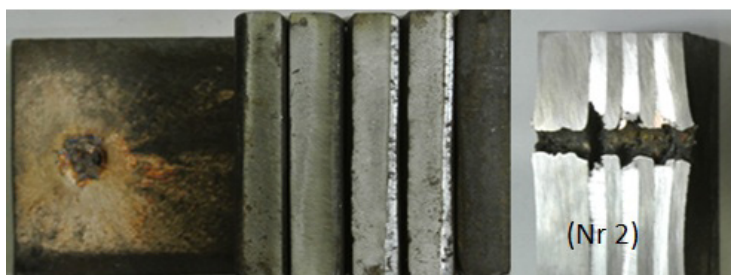


Rys. 8. Działanie strumienia kumulacyjnego w stronę warstwy Ti 10 mm: dodatkowe przebicie 3 płytek kontrolnych; układ strzelania Nr 1 (jak na rys. 3b)

W odniesieniu do wyniku przebicia przedstawionego na rys. 8 (wariant strzelania Nr 1), na podstawie danych dotyczących energii specyficznej dla ładunków testowych, energia wyrażona w procentach energii całkowitej strumienia jaka została przejęta przez warstwy w pakiecie kontrolnym przebitych 3 płytek stalowych (30 mm) wynosi (patrz ostatnia kolumna w tabeli 2):

$$5,45 + 5,18 + 4,83 = 15,45\%$$

W tym układzie badania, skuteczność ochronna plateru o łącznej grubość 28 mm na przebicie strumieniem kumulacyjnym odpowiada skuteczności ochronnej 6 płytek stalowych (60 mm).



Rys. 9. Działanie strumienia kumulacyjnego w stronę warstwy Ti 3 mm: dodatkowe przebicie 5 płytek kontrolnych; układ strzelania Nr 2 (jak na rys. 3a)

W odniesieniu do wyniku przebicia przedstawionego na rys. 9 (wariant strzelania Nr 2), na podstawie danych dotyczących energii specyficznej dla ładunków testowych, energia wyrażona w procentach energii całkowitej strumienia jaka została przejęta przez warstwy w pakiecie kontrolnym przebitych 5 płytek stalowych (50 mm) wynosi (patrz ostatnia kolumna w tabeli 2):

$$9,13 + 6,79 + 5,45 + 5,18 + 4,83 = 31,38\%$$

Skuteczność ochronna badanego plateru o łącznej grubość 28 mm na przebicie strumieniem kumulacyjnym w tym przypadku odpowiada skuteczności ochronnej 4 płytek stalowych (40 mm).

3. Analiza wyników

Przeprowadzone badania poligonowe miały na celu ocenę zdolności tłumiących (chroniących) materiału wielowarstwowego Ti/Al w wybranym układzie konstrukcyjnym grubości 28 mm, otrzymanego metodą platerowania wybuchowego, przed rażącym działaniem strumienia kumulacyjnego. Ze względu na niesymetryczną konstrukcję plateru, analizie poddano jego skuteczność ochronną w zależności od strony oddziaływania ładunku kumulacyjnego. Wyniki odniesiono do testu kontrolnego przyjętych w badaniach ładunków kumulacyjnych (H-Pp-32/60) na stosie złożonym z płytek o grubości 10 mm ze stali miękkiej typu

S235. W tabeli 3 przedstawiono zbiorcze zestawienie podziału energii uzyskanych w poszczególnych testach badanego układu warstwowego Ti/Al-28mm.

Tab. 3. Zbiorcze zestawienie podziału energii w testach badanego materiału warstwowego

Oznaczenie testu - układ warstw	Podział energii strumienia kumulacyjnego [%]	
	w materiale badanym Ti/Al-28mm	w stocie kontrolnym (stal S235)
Nr 1 - Ti10Al3Ti3Al3Ti3Al3Ti3	84,55	15,45
Nr 2 - Ti3Al3Ti3Al3Ti3Al3Ti10	68,62	31,38

Na podstawie zestawienia wyników z tabeli 3 można wnioskować, że większą zdolność ochronną przed strumieniem kumulacyjnym ma badany układ warstwowy od strony grubszej warstwy tytanowej plateru (Ti 10 mm) – przejmuje około 84% początkowej energii skutecznej strumienia kumulacyjnego. W przypadku działania strumienia kumulacyjnego od strony cieńszej warstwy tytanu (Ti 3 mm) – plater przejmuje około 69% jego początkowej energii skutecznej.

Ponieważ zazwyczaj testowane materiały wielowarstwowe posiadają bardzo różniące się gęstości warstw, istotna jest analiza ich właściwości ochronnych ze względu na tzw. współczynnik masowy układu ochronnego. Współczynnik masowy ochrony liczony jest dla danego materiału jako iloczyn gęstości i głębokości przebiccia w tym materiale ($\rho \cdot L$). W praktyce, współczynnik ten odnosi się do jednostki pola powierzchni materiału ochronnego ustawionego prostopadle do działania efektu rażącego (w naszym przypadku działał strumień kumulacyjny ładunków testowych).

Dla analizy współczynnika masowego ochrony testowanego plateru Ti/Al-28mm przyjęto do obliczeń gęstości ρ materiałów odpowiednio: dla tytanu $4,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, dla aluminium $2,7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, a dla materiału kontrolnego (stal S235) $7,8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. W tabeli 4 przedstawiono obliczenia wskaźników masowych ochrony badanych układów.

Tab. 4. Wyniki przebiccia i wskaźniki ochronne masowe badanych układów

Oznaczenie testu, materiału badanego / głębokość przebiccia materiału badanego i kontrolnego	Wskaźnik ochronny masowy, ($\rho \cdot L$) $\cdot 10^3$, [kg/m ²]	Podział energii strumienia [%]
Nr 1 - układ warstw: Ti10Al3Ti3Al3Ti3Al3Ti3 Ti (10+3+3+3) = 19 mm, Al (3+3+3) = 9 mm / Materiał S235: przebity stos kontrolny 30 mm Łącznie przebiccie układu Nr 1: L1 = 58 mm	$4,5 \cdot 0,019 = 0,0855$ $2,7 \cdot 0,009 = 0,0243$ $7,8 \cdot 0,030 = 0,234$ Łącznie: 0,3438 (ok. 50%)	Ti/Al-28mm: 84,54 15,46
Nr 2 - układ warstw: Ti3Al3Ti3Al3Ti3Al3Ti10 Ti (3+3+3+10) = 19 mm, Al (3+3+3) = 9 mm / Materiał S235: przebity stos kontrolny 50 mm Łącznie przebiccie układu Nr 2: L2 = 78 mm	$4,5 \cdot 0,019 = 0,0855$ $2,7 \cdot 0,009 = 0,0243$ $7,8 \cdot 0,050 = 0,3900$ Łącznie: 0,4998 (ok. 70%)	Ti/Al-28mm: 68,62 31,38
Test odniesienia - materiał kontrolny S235 / Przebiccie stosu kontrolnego płytek (9 szt.): L = 90 mm	$7,8 \cdot 0,090 = \mathbf{0,702 (100\%)}$	100

Przykład obliczeń. W teście odniesienia, dla materiału oznaczonego Materiał S235 przebiccie wyniosło 9 płytek (tj. $L = 90 \text{ mm} = 0,09 \text{ m}$) oraz przyjęto gęstość stali $7,8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Wobec tego obliczeniowy masowy współczynnik ochrony dla tego gatunku stali wynosi:

$$\rho \cdot L = 7,8 \cdot 10^3 \text{ [kg/m}^3] \cdot 0,09 \text{ [m]} = 702 \text{ [kg/m}^2]$$

W tabeli 4 dodatkowo odniesiono w procentach wartości wskaźnika masowego badanego plateru Ti/Al-28mm w stosunku do materiału kontrolnego (stal S235 – 100%). Najniższy masowy wskaźnik ochronny w badaniu uzyskano dla materiału warstwowego w układzie warstw: Ti10Al3Ti3Al3Ti3Al3Ti3 (około 344 kg/m^2) stanowi

to około 50% masy ekwiwalentnego układu ochronnego stalowego (S235). Na poziomie znacznie wyższym otrzymano ochronny wskaźniki masowy dla układu warstw: Ti3Al3Ti3Al3Ti3Al3Ti10 (około 500 kg/m²) co stanowi około 70% masy ekwiwalentnego układu ochronnego ze stali S235.

4. Podsumowanie

1. Opis badań testowych lekkiego niesymetrycznego układu warstwowego Ti/Al-28mm uzupełniony został o badanie partii ładunków kumulacyjnych, które użyto w badaniach (tj. oznaczenie energii skutecznej strumienia kumulacyjnego około 6,8 kJ dla ładunków typu H-23/60, na podstawie objętości utworzonego krateru w stali S235). Arbitralnie przyjęto do badań porównawczych wartość tej energii, zakładając taką samą skuteczność ładunków użytych w testach.
2. Analizując rozkład energii traconej przez strumień kumulacyjny w stosie kontrolnym (płytki 10 mm ze stali S235, tabela 2) stwierdzono, że największa wartość energii strumienia około 55% jest wytracana na pokonanie pierwszych trzech płytek (30 mm) z 9 szt. przebitych w stosie kontrolnym.
3. W wyniku testu wyliczone zostały masowe wskaźniki ochronne dla badanego niesymetrycznego układu wielowarstwowego Ti/Al o grubości 28 mm na poziomie 50% lub 70% grubości układu ochronnego wykonanego z materiału kontrolnego (stal S235). Wyższą skuteczność ochrony przed strumieniem kumulacyjnym wykazuje układ ostrzeliwany od strony warstwy Ti 10 mm.
4. Użycie w układach ochronnych przed strumieniem kumulacyjnym struktur warstwowych (np. takich jak badany w niniejszej pracy lekki układ warstwowy Ti/Al) pozwala na obniżenie ich masy.
5. Klasyczny strumień kumulacyjny największą energię posiada w swojej części czołowej, dlatego pierwsze warstwy w układach ochronnych przed strumieniem kumulacyjnym powinny zapewniać najwyższą zdolność pochłaniania energii szybkiego czoła strumienia (w układach biernych) lub powodować silne zaburzenie części czołowej strumienia w układach aktywnych.

Podziękowanie

Praca została wykonana w ramach realizacji pracy badawczej pt. „Nowe zaawansowane materiały wielowarstwowe Al-Ti o podwyższonej odporności balistycznej na konstrukcje lotnicze i kosmiczne” - umowa z NCBiR nr PBS2/A5/35/2013.

Literatura

- [1] Koślik Piotr, Wilk Zenon, Nikoleczuk Karolina, Hadzik Justyna. 2012. *Badania symulacyjne i eksperymentalne osłon balistycznych układów ochraniających przed skutkami rażenia w wyniku wybuchu – Etap I*. Sprawozdanie IPO z pracy statutowej EMC 093900013, Warszawa/Krupski Młyn.
- [2] Wilk Zenon. 2008. *Opracowanie technologii i konstrukcji ładunków kumulacyjnych do efektywnej perforacji odwiertów geologicznych*. Rozprawa doktorska, Warszawa : WAT.
- [3] Świerczewski Marek. 2013. *Ochrona załogantów kołowego transportera opancerzonego przed minami i IED*. Rozprawa doktorska, Warszawa : Wydział Mechaniczny WAT.
- [4] AEP-55 Volume 2, Edn.2, *Procedures for evaluating the protection level of armoured vehicles*. NATO/PfP UNCLASSIFIED, August 2011.