

*Materiały Wysokoenergetyczne / High Energy Materials*, 2017, 9, 204 – 213; DOI: 10.22211/matwys/0144  
ISSN 2083-0165

Copyright 2017 © Institute of Industrial Organic Chemistry, Poland

## **Praca doświadczalna / Research paper**

# **Określenie stopnia tłumienia powietrznej fali podmuchowej w przestrzennych układach materiałowych** **Determining degree of pulse absorption of air blast wave by spaced material systems**

**Lech Starczewski, Krzysztof Szcześniak, Michał Gmitrzuk, Robert Nyc**

*Wojskowy Instytut Techniki Panczernej i Samochodowej, Zakład Ekspertyz Materiałowych Uzbrojenia i Sprzętu ul. Okuniewska 1, 05-070 Sulejówek, PL*

**Streszczenie:** *Praca przedstawia wyniki badań nad określeniem stopnia tłumienia impulsu fali podmuchowej, generowanej wybuchem sferycznego ładunku heksogenu flegmatyzowanego cerezyną, przez przestrzenne układy materiałowe. Badane układy montowano na wahadle balistycznym a miarą stopnia absorbcji energii był stopień wychylenia się wahadła. Zastosowane panele przestrzenne z elementami absorbującymi, symulowały konstrukcję płaskiego dna pojazdu poddanego jednokrotnemu udarowi siły.*

**Abstract:** *The paper presents studies to determine the degree attenuation of a blasting wave impulse from a spherical charge containing hexogene phlegmatized with ceresin, through spaced material systems. The systems were mounted on a ballistic pendulum and the amount of energy absorbed was determined from the change in inclination of the pendulum. The spaced panels containing the absorbing elements simulated the flat bottom of a vehicle being subjected to a single blast.*

**Słowa kluczowe:** *fala nadciśnienia, detonacja, materiał wybuchowy (MW), przestrzenny układ materiałowy*  
**Keywords:** *overpressure wave, detonation, explosive, spaced material system*

## **1. Wprowadzenie**

W celu znalezienia optymalnego rozwiązania materiałowego do budowy absorbera energii wybuchu, zastosowano panele przestrzenne z elementami absorbującymi. Układ taki miał za zadanie: w pierwszej fazie zmniejszyć wartość impulsu energii fali podmuchowej działającej na badaną strukturę; w drugiej fazie: zmniejszyć wartość odkształcenia przegrody w wyniku obciążenia falą nadciśnienia. Badania eksperymentalne poprzedzono analizą właściwości materiałowych tworzyw elasto-plastycznych oraz badaniami stanowiskowymi w czasie których określono odpowiedź materiału na wymuszenia statyczne, jak i dynamiczne. Cały eksperyment zakończono badaniami poligonowymi wytypowanych układów, obciążając je falą nadciśnienia od materiału wybuchowego (MW) o zróżnicowanej masie.

## **2. Metodyka badawcza**

### **2.1. Maszyna wytrzymałościowa Instron o zakresie pomiarowym do 200 kN i rejestracji on-line**

Istotą rozwiązania problemu doboru materiału do budowy struktury przestrzennej, była konieczność przebadania wytypowanych elementów na stacjonarnych maszynach wytrzymałościowych. Wyniki z tych testów w przybliżony sposób zobrazowały zachowanie się materiałów poddanych wyężeniu. Testy te pozwoliły na określenie podatności materiału na ugięcie, wyznaczenie maksymalnej siły ściskającej przy stałym odkształceniu

oraz określenia stopnia utraty właściwości wytrzymałościowych. W pierwszym etapie badano materiały na maszynie wytrzymałościowej poddając je jednoosiowemu ścisłaniu. Test ten miał za zadanie wyeliminować materiały, które posiadały ograniczoną zdolność do powracania do stanu pierwotnego lub ulegają trwałemu odkształceniu.

## 2.2. Młot opadowy Instron CEAST 9340 o energii uderzenia do 400 J

Badania dynamiczne materiałów energochłonnych rozpoczęto na młocie opadowym. Zakres pomiarowy energii uderzenia młota o wartości 400 J w pełni pokrywał potrzeby badawcze. Energię uderzenia regulowano poprzez wysokość podniesienia bijaka, jak również przez dokładanie dodatkowego obciążenia. W badaniach tych wykonano serię testów dla tych samych rozwiązań jak w próbie ścisłania. Dla każdego z rozwiązań wykonano po dwie serie zrzucania młota o zmiennej masie. Na podstawie następujących mierzonych wielkości jakimi są: masa młota opadowego, wysokość zrzutu młota i prędkość uderzenia młota w materiał konstrukcyjny, określano poziom absorpcji energii uderzenia przy wielokrotnym obciążeniu bez znacznej utraty właściwości konstrukcyjnych. Po przeprowadzonym teście wytypowano te materiały, które zabudowano w przestrzennych układach materiałowych. Charakterystyki odkształceń doznawanych przez obciążane elementy, określono mierząc maksymalne ugięcie materiału i maksymalną siłę uderzenia.

## 2.3. Wahadło balistyczne

Badania przestrzennych układów materiałowych wykonano na wahadle balistycznym [1] znajdującym się w IPO Krupski Młyn [2]. Założono przeprowadzenie serii testów z użyciem materiału wybuchowego (MW). Poszczególne ładunki wybuchowe detonowano zdalnie z bunkra oddalonego 20 m od wahadła. W celu określenia wartości nadciśnienia powstałego w wyniku detonacji MW, wykorzystano stanowisko pomiarowe składające się z wielokanałowego rejestratora cyfrowego HIOKI, czterech ołówkowych czujników ciśnienia, jednego trójosiowego czujnika przyspieszenia zamontowanego na moździerz w wahadła. Zastosowano piezoelektryczne czujniki ciśnienia i przyspieszenia produkcji PCB PIEZOTRONICS. Czujniki ciśnienia pozwalają na rejestrację fali nadciśnienia o bardzo dużych wartościach. Dane techniczne użytych czujników podano w tabelach 1 i 2.

**Tab. 1.** Dane techniczne piezoelektrycznych czujników ciśnienia 137A23

Parametr	Jednostka	Czujnik 137A23 Sn:6803	Czujnik 137A23 Sn:6843	Czujnik 137A23 Sn:7282	Czujnik 137A23 Sn:7283
Zakres pomiarowy	[kPa]	0-345	0-345	0-345	0-345
Rozdzielczość	[kPa]	0,069	0,069	0,069	0,069
Czułość nominalna	[mV/kPa]	14,5	14,5	14,32	13,88
Maksymalna wartość pomiarowa	[kPa]	6895	6895	6895	6895

Trójosiowy czujnik przyspieszenia PCB PIEZOTRONICS zamontowano w tylnej części moździerza, poprzez mechaniczny filtr tłumiący drgania. Filtr dostarczył producent wraz z czujnikiem.

**Tab. 2.** Dane techniczne piezoelektrycznego czujnika przyspieszeń

Czujnik 356B20 Sn:66405				
Parametr	Jednostka	Oś X	Oś Y	Oś Z
Czułość nominalna	[mV/g]	1,06	1,11	1,11
Maksymalna wartość pomiarowa	[V]	9,7	9,7	9,7

Ładunki do badań wykonano metodą prasowania matrycowego z MW na bazie heksogenu (RDX) z dodatkiem 3% cerezyny o masach: 350 g, 500 g, 750 g i 1000 g. Średnia gęstość MW wynosiła 1,6 g/cm<sup>3</sup>. Ładunki podwieszano na wysięgniku na wysokości 1 m nad ziemią i 1 m od czoła płyty absorbera i inicjowano centralnie od góry.

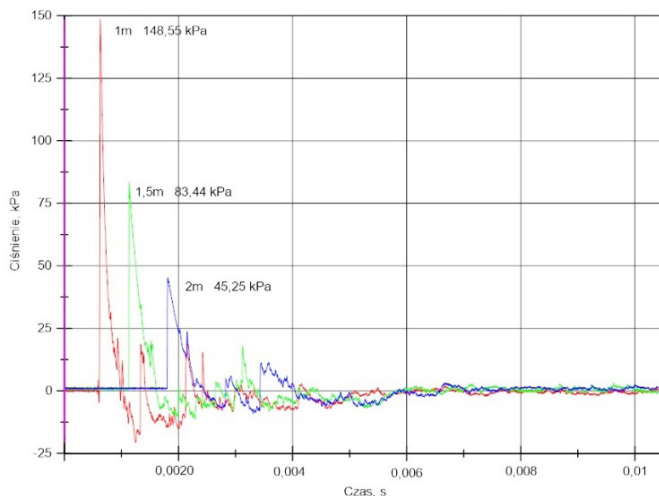
Badane układy (rys. 1) wykonano w postaci paneli stalowych, pomiędzy które zamontowano elementy pochłaniające energię. Badane panele ochronne montowano od strony gniazda moździerzka wahadła balistycznego. Testowane układy przedstawiono na rysunku 1.



**Rys. 1.** Badane układy materiałowe zamontowane od strony gniazda moździerzka wahadła balistycznego

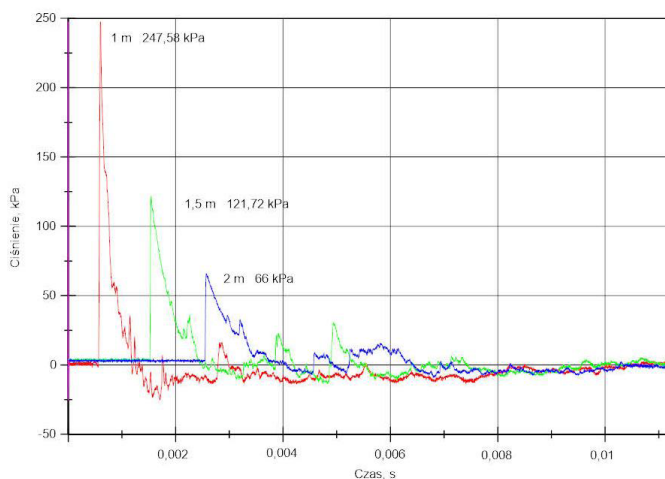
Panele ochronne wypełnione materiałem absorbującym wypełniono dodatkowo pianą poliuretanową, celem zabezpieczenia tulei przed zmianą położenia w czasie wielokrotnych testów obciążania falą podmuchową. Przed testem dokonano kalibrowania czujników ołówkowych na ładunkach MW o mniejszych masach: 100 g i 200 g. Badane układy absorbujące, obciążane były falą podmuchową wytwarzaną przez kuliste ładunki MW. Parametry obciążającej fali podmuchowej określone zostały na drodze eksperymentalnej, co pozwoliło na określenie siły z jaką były obciążane badane układy absorbujące energię.

Dla każdego z testów na podstawie czasu rejestracji fali podmuchowej przez poszczególne czujniki, oszacowano średnią prędkość propagacji fali. I tak, dla ładunku 100 g (rys. 2) na odcinku między 1 i 2 czujnikami (1,0 m a 1,5 m) 674 m/s, pomiędzy czujnikiem 1 i 3 (1,0 m a 2,0 m) 454 m/s.



**Rys. 2.** Przebieg wartości ciśnienia dla ładunku MW o masie 100 g

Natomiast dla ładunku MW o masie 200 g (rys. 3), na odcinku między czujnikiem 1 i 2 prędkość wyniosła 974 m/s a na odcinku między czujnikiem 1 i 3 prędkość wyniosła 500 m/s.

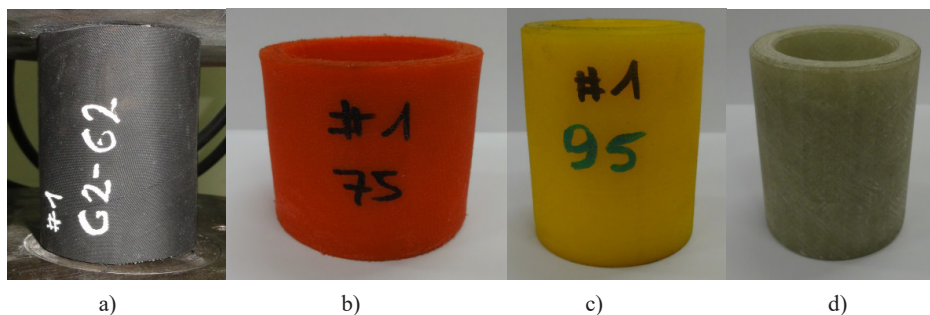


Rys. 3. Przebieg wartości ciśnienia dla ładunku MW o masie 200 g

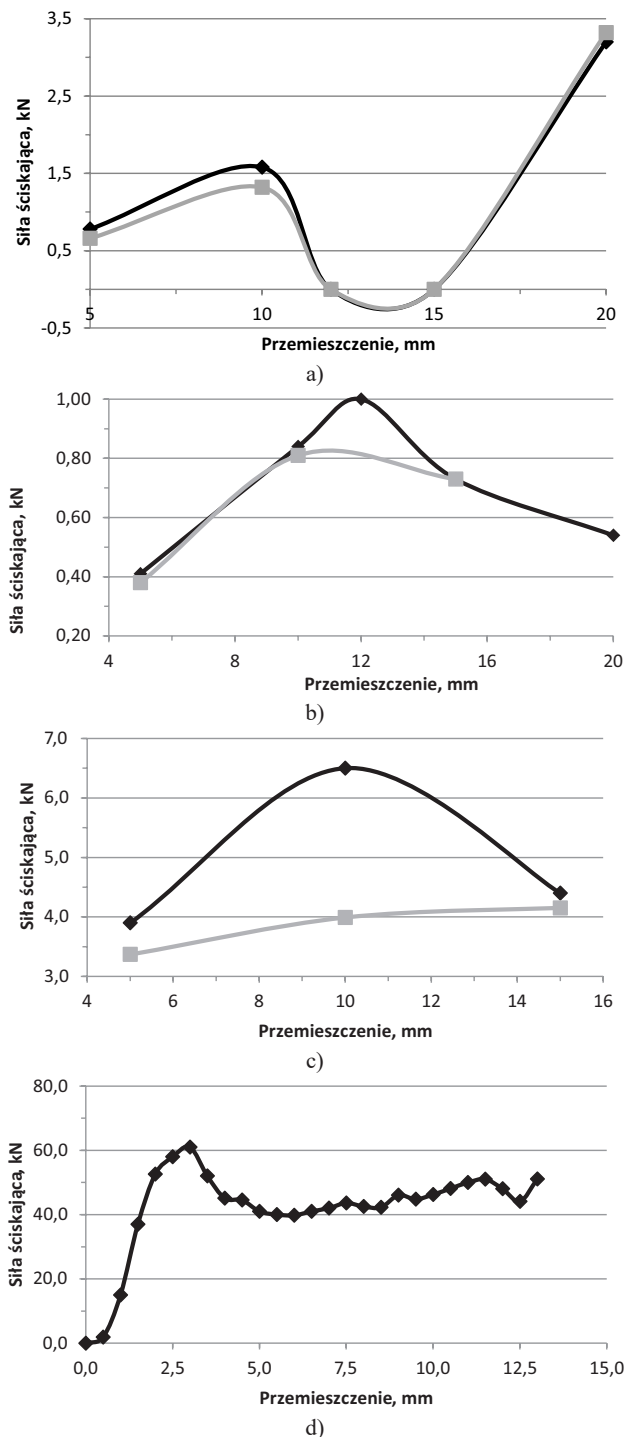
### 3. Badania elementów elasto-plastycznych

#### 3.1. Jednoosiowe ściskanie na maszynie wytrzymałościowej Instron

Materiały z przeznaczeniem na elementy energochłonne (rys. 4) poddano jednoosiowemu ścisłaniu ze stałym przemieszczeniem. Miały one jednakową grubość ścianki oraz występowały w dwóch średnicach 42 mm i 62 mm. Aby stwierdzić utratę właściwości materiału wykonano po dwie próby na każdej próbce. Tylko w przypadku próbki z kompozytu szklanego wykonano pojedynczą próbę ze względu na trwałe odkształcenie (rys. 5). Tuleje poliuretanowe (PU) absorbujące energię są odporne na działanie warunków atmosferycznych, olejów i smarów oraz wykazują niski stopień ścieralności.



Rys. 4. Próbkę materiałów konstrukcyjnych przed badaniem: a) guma zbrojona; b) PU o twardości 75SHA; c) PU o twardości 95SHA; d) kompozyt szklany

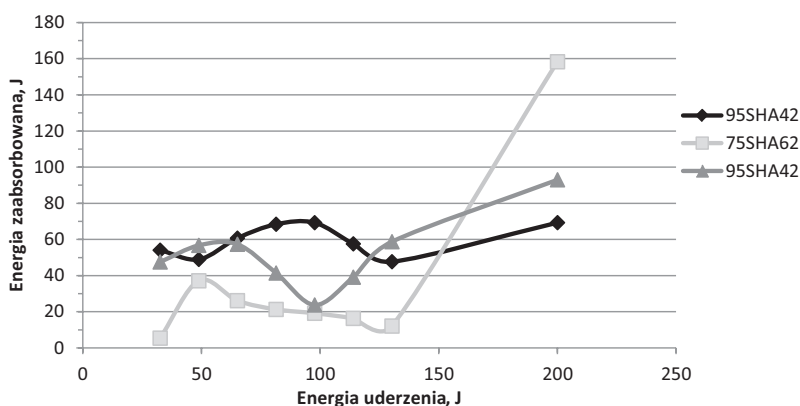


**Rys. 5.** Wyznaczona doświadczalnie zależność obciążenie-odkształcenie badanych elementów konstrukcyjnych: a) guma zbrojona; b) PU 75SHA62; c) PU 95SHA42; d) kompozyt szklany

### 3.2. Badania dynamiczne na młocie opadowym o energii uderzenia do 400 J

Badania przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej pozwoliły na określenie wytrzymałościowej odpowiedzi badanych materiałów w zakresie relatywnie niskiej wartości siły obciążającej. Określa to podatność materiału na ugięcie (przekształcenie energii uderzenia na pracę wewnętrzną materiału). Założenie okazało się słuszne i potwierdzono je w badaniach dynamicznych na młocie opadowym o energii uderzenia do 400 J.

Badaniu na młocie opadowym nie poddano próbki z laminatu szklanego. Wynikało to z analizy danych ze ściskania na maszynie wytrzymałościowej, gdzie dla większości materiałów maksymalna wartość siły ściskającej zawierała się w zakresie 0,8-7 kN. Dla kompozytu szklanego pierwsze odkształcenia uzyskano przy wartości 60 kN i oscylowało w zakresie 40-50 kN. Tak duże siły znacznie przekroczyłyby zakres pomiarowy młota. Zarejestrowane wartości przebiegu zmian właściwości badanych elementów elasto-plastycznych, przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Przebieg zmian energii zaabsorbowanej w funkcji energii uderzenia

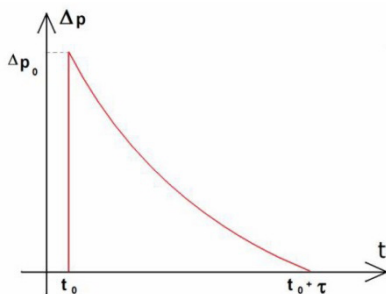
Z przeprowadzonych badań (rys. 6) wynika, że najlepsze wyniki uzyskano dla materiałów typu:

- 95SHA42 – od strony absorpcji energii. Dla tego materiału, oscylująca wokół wartości 60 J ilość zaabsorbowanej energii okazuje się wartością graniczną, co przy dalszych testach pozwala w przybliżeniu szacować i przewidywać zachowanie się układu. Pozostałe materiały wykazują niższą lub nierównomierną zdolność absorpcji energii.
- 75SHA62 – dla zmian przebiegu siły zgniotu, materiał ten wykazuje zdolność zwiększania pracy wewnętrznej wraz ze wzrostem siły uderzenia.

Na podstawie przeprowadzonej analizy, oba te materiały wykorzystano do budowy przestrzennych struktur materiałowych w eksperymencie obciążania ich siłą wybuchu na wahadle balistycznym.

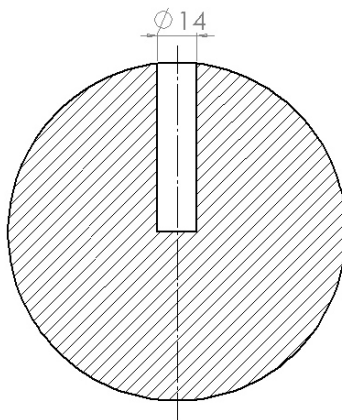
### 3.3. Badania eksperymentalne osłon energochłonnych na wahadle balistycznym

Sprawdzenie zdolności pochłaniania energii, opierało się na rozpoznaniu mechanicznego działania fali uderzeniowej. Docierająca do obiektu fala uderzeniowa powoduje gwałtowny wzrost ciśnienia [3] działającego na powierzchnię napotkanej przegrody. Na przegrodę działa impuls nadciśnienia o charakterze pokazanym na rysunku 7 [4].



**Rys. 7.** Przebieg impulsu ciśnienia oddziałującego na powierzchnię obiektu poddanego obciążeniu falą uderzeniową, gdzie  $\Delta p_0$  maksymalny pik nadciśnienia, czas przybycia  $t_0$ , jest czasem potrzebnym na przebycie frontu fali uderzeniowej do przeszkody; czas trwania dodatniej fazy  $\tau$  jest to czas w którym ciśnienie jest powyżej ciśnienia otoczenia

Serię testów dynamicznych przeprowadzono na wahadle balistycznym z wykorzystaniem plastycznego MW detonowanego zdalnie. Ładunki MW (rys. 8) do badań wykonano metodą prasowania matrycowego heksogenu z dodatkiem cerezyny w ilości 3% o masach: 350 g, 500 g, 750 g i 1000 g. Średnia gęstość materiału wynosiła 1,6 g/cm<sup>3</sup>. Prasowanie matrycowe odbyło się poprzez zasypanie mieszaniny MW do matrycy o określonym kształcie i poddaje jednoosiowemu ściskaniu, celem uzyskania zwartej, jednolitej struktury.



**Rys. 8.** Poglądowy rysunek inicjowanego centralnie od góry sferycznego ładunku wybuchowego o zmiennej masie



Rys. 9. Badane układy materiałowe, w trakcie montażu: 1 – tuleja centrująca

Testy rozpoczęto od zbadania wpływu fali podmuchowej na układ stalowy pusty (dwie stalowe płyty przedzielone powietrzem), następnie układy wypełnione: 75SHA62 oraz 95SHA42. W teście wyznaczono pracę układów poprzez określenie wielkości wychylenia się wahadła balistycznego, następującego w wyniku parcia wywieranego na niego przez falę podmuchową [3]. Dane zebrane podczas testów dla wszystkich badanych typów absorbera zestawiono w tabeli 4. Energię wahadła balistycznego wyznaczono, zgodnie z [1], ze wzoru (1):

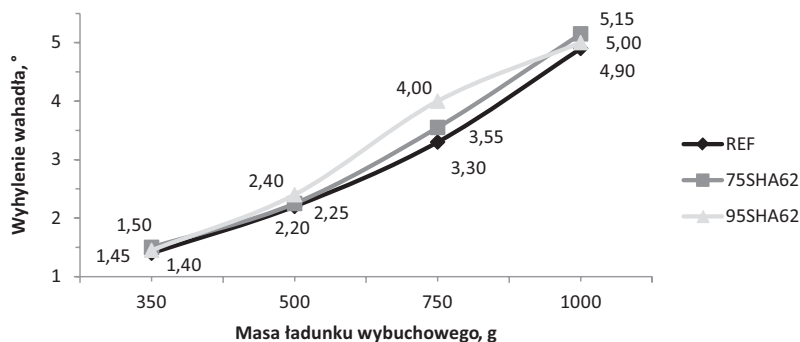
$$W = M \cdot g \cdot L \cdot (1 - \cos\varphi) \quad (1)$$

gdzie:  $M$  – masa wahadła z panelem = 390 kg;  $g$  – przyspieszenie ziemskie = 9,81 m/s<sup>2</sup>;  $\varphi$  – kąt wychylenia wahadła [°];  $L$  – długość ramienia wahadła od osi obrotu do środka masy = 2,985 m.

Tab. 4. Zestawienie wyników z pomiarów na wahadle balistycznym

Układ	Masa MW [g]	Wychylenie wahadła [°]	Ciśnienie maksymalne $P_{\max}$ [kPa] w odległości [m]				Energia wahadła [J]	Maksymalny impuls ciśnienia [Pa·s]
			1,0	1,5	2,0	2,5		
REF	350	1,40	304,82	181,03	94,27	–	3,43	241,80
	500	2,20	406,20	214,48	122,20	–	8,46	324,00
	750	3,30	375,86	271,00	148,00	–	19,03	452,70
	1000	4,90	482,00	390,40	–	129,90	41,95	552,10
75SHA62	350	1,50	383,45	170,34	101,60	71,00	3,93	278,30
	500	2,25	378,62	205,51	122,90	85,40	8,85	426,30
	750	3,55	462,10	291,72	168,29	118,80	22,02	489,00
	1000	5,15	486,21	352,41	201,11	135,87	46,33	654,20
95SHA42	350	1,45	318,96	169,65	99,16	67,36	3,68	259,10
	500	2,40	420,68	216,55	90,08	77,08	10,07	323,30
	750	4,00	395,86	294,48	168,29	102,30	27,96	489,40
	1000	5,00	492,41	327,58	181,56	126,08	43,68	624,50



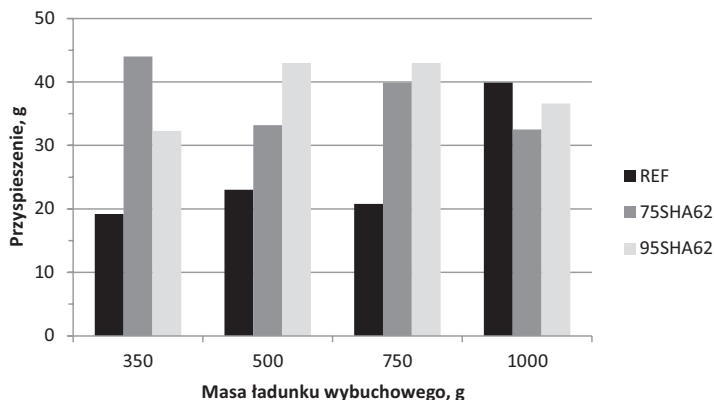


Rys. 10. Wartości wychylenia mózdzierza wahadła balistycznego w funkcji masy ładunku MW

Przeprowadzone badania w zakresie absorpcji energii wybuchu dla układów badanych, pozwoliły oszacować ich skuteczność ochronną. W eksperymentach wyznaczono charakterystyki fali uderzeniowej (impuls, ciśnienie) MW o określonych masach. Rejestrowane pomiary fali nadciśnienia w odległości od miejsca detonacji 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m i 2,5 m posłużyły do wyznaczenia zależności, maksymalnej wartości fali nadciśnienia  $P_{max}$  od miejsca posadowienia piezoelektrycznego czujnika ciśnienia.

Układy wypełnione poliuretanem o różnych twardościach, wykazały zdolność do skutecznej i powtarzalnej absorpcji energii a materiały zastosowane do ich budowy, nie uległy degradacji pod wpływem obciążenia. W tego typu rozwiązaniu, dyssypacja energii wybuchu, następuje poprzez zmianę kształtu i wysokości obciążanego elementu.

Konstrukcja absorbera energii udarowej, pozwoliła na rozproszenie energii i zmniejszenie jej negatywnego wpływu na konstrukcję wahadła balistycznego. Stopień i zakres dyssypacji energii sterowny był poprzez zastosowanie materiałów o różnych charakterystykach wytrzymałościowych. Powstałe w wyniku detonacji nadciśnienie, generowało nacisk na powierzchnię układu zgniatając go. Powstała od naciśku siła zamieniana była wewnątrz układu na odkształcenie oraz temperaturę. Po wielokrotnym obciążeniu falą podmuchową badanego absorbera, nie zaobserwowano zmian w kształcie tulei PU (zmiana wysokości, baryłkowatość). Inaczej się miała sytuacja przy statycznym zgniataciu próbek, gdzie dochodziło do zmiany średnicy tulei. Zasadniczą różnicą w tych dwóch przypadkach jest czas zajścia zjawiska. Dla badania statycznego, cały proces zgniatania trwał około 30 s a dla badania dynamicznego obciążenia falą podmuchową, zjawisko trwało 0,0015 s.



Rys. 12. Wartości przyspieszeń mózdzierza wahadła balistycznego uzyskane w trakcie badań eksperymentalnych

### 3. Podsumowanie i wnioski

Prowadzone badania ukierunkowano na określeniu różnic w badanych wariantach i obejmowały m.in. twardość materiału i wielkość ładunku MW. Testy stacjonarne pozwoliły na wybranie optymalnych rozwiązań do testów poligonowych. Istotą prowadzonych testów, było uzyskanie za pomocą mierzalnych parametrów, informacji o zdolności do absorpcji energii pochodzącej od fali uderzeniowej przez testowane elementy tłumiące. Przeprowadzenie testów balistycznych wykazało błędy w projektowaniu osłony w postaci:

- a) wypełnienia jej dodatkową pianą poliuretanową, co usztywniło układy,
- b) zbyt gęstego rozmieszczenie tulei.

Do szacowania zdolności tłumiących materiałów posłużyły zarejestrowane wartości przyśpieszeń każdego z układów. Tuleje poliuretanowe 75SHA62 i 95SHA62 wykazały najlepszą pracę przy obciążeniu detonacją MW o masie 1000 g. W stosunku do układu bez wypełnienia, stopień tłumienia działania fali detonacyjnej znalazł się na poziomie 18,55% (75SHA62) i 8,27% (95SHA62), wskazuje to na zasadność stosowania materiałów o mniejszej sztywności lub mniejszej liczności elementów tłumiących przypadających na jednostkę powierzchni.

Uzyskane wyniki wielowariantowych testów wybuchowych umożliwiły identyfikację zagrożeń jakimi są: fala wybuchowa i przyśpieszenie. Posłużą one jako wytyczne do zoptymalizowania osłony przeciwwybuchowej i przeprowadzenia kolejnych testów walidacyjnych.

### Literatura

- [1] Świątek K., Szturmowski B. 2009. Zastosowanie zmodernizowanego wahadła balistycznego do prób przebiecia pociskiem kalibru 12,7 mm materiałów stosowanych na osłony antyterrorystyczne. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej XLX 2 (177)*: 91-106.
- [2] Koślik Piotr, Wilk Zenon. 2015. Badania w zakresie oceny zdolności ochronnych układów zabezpieczających przed rażącym działaniem wybuchu. *Materiały Wysokoenergetyczne 7*: 53-62.
- [3] *Hearing Protection – Needs, Technologies and Performance*. RTO Technical Report TR-HFM-147, AC/323(HFM-147)TP/337, NATO 2010.
- [4] Stewart K.L., Freidenberg A., Rodriguez-Nikl T., Oesterle M., Wolfson J., Durant B., Arnett K., Asaro J.R., Hegemier A.G. 2014. Methodology and validation for blast and shock testing of structures using high-speed hydraulic actuators. *Engineering Structures 70*: 168-180.

Received: June 6, 2017

Revised: December 22, 2017

Published: December 28, 2017