

EXPERIMENTAL STUDIES OF BLAST LOADED STRUCTURE OF THIN-WALLED TUBES

Marian Dacko, Andrzej Kiczko, Jacek Nowak

*Military University of Technology
ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Poland
tel.: +48 22 683-92-26, fax: +48 22 683-73-66
e-mail: m.dacko@wme.wat.edu.pl
e-mail: a.kiczko@wme.wat.edu.pl
e-mail: j.nowak@wme.wat.edu.pl*

Adam Dacko, Paweł Cieśla

*Warsaw University of Technology
ul. Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa, Poland
tel.: +48 22 234-50-70
e-mail: adam.dacko@meil.pw.edu.pl
e-mail: p.ciesla@wp.pl*

Abstract

The paper presents the custom design of the add-on shield, consisting of the set of cylindrical tube elements, protecting the main structure against the effect of the explosive blast pressure load. The experimental stand was designed and set up, allowing tests of protective structures loaded with pressure blast wave.

The key parameter measured in experiments was the influence of protective shield on the deformation of protected structures under blast load. The deformation and strain in the protected plates was measured using strain gauges (ESAM Traveler bridge) with 100 000 Hz sampling. The PWM-14 explosives was used.

Three groups of experiments were performed. In the first one the plate is directly loaded by the blast pressure wave originating from explosion in some distance from the plate. In the second type a single energy absorbing element is used on the plate, while in the third – a set of 4 or 5 energy absorbing elements is used on the plate, loaded by blast wave of explosion of 30-50 g charge.

The plate deflection magnitude and the deformation shape of energy absorbing elements were compared for successive groups of experiments.

Keywords: *protective structures, experimental analysis, blast loading*

DOŚWIADCZALNA ANALIZA PAKIETU ELEMENTÓW CYLINDRYCZNYCH OBCIĄŻONYCH IMPULSEM WYBUCHU

Streszczenie

W pracy przedstawiono zaproponowane przez autorów rozwiązanie warstwy ochronnej - w postaci pakietu elementów cylindrycznych - zabezpieczającej konstrukcję przed skutkami eksplozji ładunku materiału wybuchowego. Omówiono projekt i wykonano stanowiska do badania płyt z warstwą ochronną obciążonych impulsem wybuchu.

Głównym celem badań było określenie efektywności proponowanego rozwiązania poprzez określenie wpływu zastosowania warstwy ochronnej na odkształcenie płyty powstałe w wyniku detonacji ładunku MW. Pomiar odkształcenia i ugięcia płyty realizowano metodą elektrozestawową przy użyciu mostka tensometrycznego ESAM Traveller. Zapis wyników odbywał się z częstotliwością 100 000 Hz. Jako materiał wybuchowy zastosowano plastyczny materiał wybuchowy PMW-14.

W programie badań zrealizowano trzy rodzaje eksperymentów. Pierwszą grupę stanowiły badania, w których detonacja ładunku wybuchowego odbywała się w pewnej odległości od badanej płyty a powstała w wyniku detonacji fala nadciśnienia oddziałuje bezpośrednio na płytę. Drugą grupę badań stanowią eksperymenty z pojedynczym elementem energochłonnym i detonacją ładunku w pewnej odległości od niego. Trzecią grupę badań stanowiły eksperymenty z udziałem pakietów cztero- i pięcioelementowych poddanych działaniu ładunków o masie 30-50 gramów.

Porównano wielkość deformacji płyty dla poszczególnych przypadków oraz postacie deformacji pojedynczych elementów i pakietów elementów energochłonnych.

Słowa kluczowe: struktury energochłonne, badania doświadczalne, obciążenie wybuchem

1. Wprowadzenie

Wiele współczesnych urządzeń i konstrukcji narażonych jest na działanie fali uderzeniowej wybuchu. Uzasadnione jest więc poszukiwanie rozwiązań, których celem byłoby zminimalizowanie uszkodzeń wywołanych eksplozją ładunku wybuchowego. Jednym z możliwych rozwiązań jest wprowadzenie dodatkowej warstwy ochronnej, której zadaniem byłoby przejście możliwie największej części energii wybuchu. W obecnej chwili stosowane są trzy główne podejścia do zagadnienia dyssypacji energii, w których pochłanianie energii może odbywać się poprzez:

- częściowe zniszczenie istniejącej konstrukcji,
- naklejanie dodatkowych warstw folii lub innych materiałów,
- zniszczenie specjalnych elementów energochłonnych.

2. Struktura warstwy ochronnej

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie koncepcji rozwiązania pewnego rodzaju struktury ochronnej i przeprowadzenie analizy jej odporności na działanie obciążeń dynamicznych, a w szczególności obciążenia falą uderzeniową wybuchu. Jest to obciążenie impulsowe, krótkotrwałe o dużej amplitudzie, którego czas trwania wynosi kilkadziesiąt milisekund.

Projektowana struktura ochronna może być przeznaczona do ochrony zewnętrznej np. dna pojazdu wojskowego i jest ona narażona również na inne oddziaływanie niż wybuch takie jak, napór gruntu lub innych ciał obcych. W związku z tym nałożono ograniczenia na grubość i masę warstwy. Zakłada się, że grubość struktury nie przekroczy 50mm a masa pojazdu nie powinna znacząco wzrosnąć. Ponadto założono, że koszt struktury powinien być niewielki, a materiały z których jest wykonana ogólnodostępne.

a)



b)

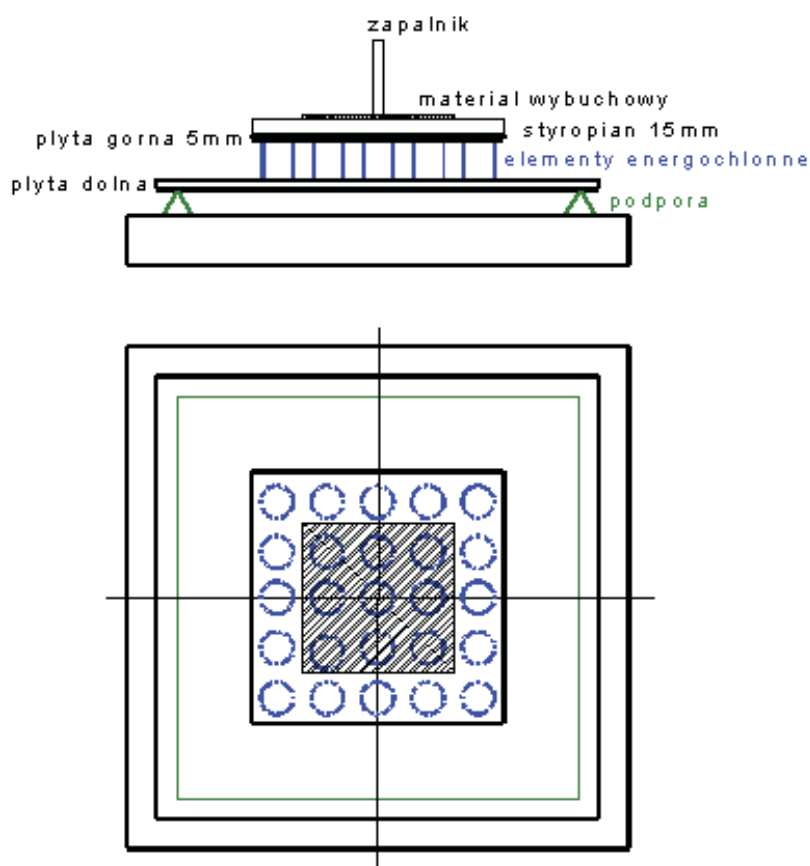


Rys. 1. Pakiet ochronny zawierający 4 (a) lub 5 (b) elementów cylindrycznych
Fig. 1. Set of 4 (a) and 5 (b) cylindrical tube elements

Proponowane rozwiązanie opiera się podejściu, w którym pochłanianie energii odbywa się poprzez deformację płyty ochronnej i specjalnych elementów energochłonnych, które absorbują energię poprzez odkształcenie plastyczne. Pakiet ochronny składa się z płyty stalowej i zestawu cienkościennych elementów cylindrycznych. Grubość płyty ochronnej powinna być tak dobrana, aby w wyniku wybuchu nie następowało przebicie płyty przez elementy energochłonne. W proponowanym pakiecie płyta ma grubość 5mm. Jako elementy energochłonne wybrano powłoki cylindryczne wykonane ze stali R35. Po przeprowadzeniu badań statycznych zdecydowano się na elementy o średnicy zewn. 20mm, grubości ścianki 1mm i wysokości 35mm. Elementy energochłonne mocowane są do płyty ochronnej poprzez lutowanie przy pomocy spoiny pachwinowej ciągłej. Przykładowe pakiety ochronne 4- i 5-elementowe pokazano na rys.1

3. Opis stanowisko do badań eksperymentalnych płyt z warstwą ochronną

Przeprowadzenie badań płyt z warstwami ochronnymi wymaga stworzenia stanowiska odpornego na wybuch ładunku o masie kilkudziesięciu gram. Główna część stanowiska wykonana została z płyty stalowej o wymiarach 500x500x100mm, w której wykonano wgłębienie o wymiarach 370x370x15mm. Do płyty przyspawano stalowe kątowniki i całość zatopiono w bryle betonu 0,8x0,8x0,8m (rys. 2). Zaprojektowane stanowisko umożliwia badanie płyt o wymiarach 420x420mm i dowolnej grubości. Badana płyta podparta jest na 5mm pryzmie i mocowana do stanowiska za pomocą 4 śrub rozmieszczonych w środku każdego boku (rys. 3). Taki sposób mocowania umożliwia swobodne podnoszenie się naroży płyty w trakcie obciążania. Na środku badanej płyty naklejono tensometry umożliwiające pomiar odkształcenia środka płyty. Dodatkowo do stanowiska mocowany jest przyrząd do pomiaru ugięcia płyty. Ugięcie płyty mierzone jest w odległości 5mm od środka płyty.



Rys. 2. Schemat stanowiska do badań płyt ochronnych
 Fig. 2. Scheme of the experimental stand, allowing tests of protective structures

Na płycie możliwe jest przeprowadzenie doświadczeń z wybuchem powietrznym, z pojedynczym elementem energochłonnym i z pakietami elementów energochłonnych. Poprzez porównanie wyników odkształcenia i ugięcia płyty można ocenić wpływ zastosowanego rozwiązania warstwy energochłonnej na zachowanie badanej płyty. Zapis wartości odkształcenia i ugięcia płyty możliwy jest z częstotliwością próbkowania 100 000 Hz.

a)



b)



Rys. 3. a) Montaż stanowiska, b) Widok stanowiska z czujnikiem przemieszczenia
Fig. 3. a) Construction of the stand, b) View of the stand and displacement gauge

4. Program badań

Na program badań składają się trzy rodzaje eksperymentów. Pierwszą grupę stanowią badania, w których detonacja ładunku wybuchowego odbywa się w pewnej odległości od badanej płyty a powstała w wyniku detonacji fala nadciśnienia oddziałuje bezpośrednio na płytę (rys. 4). Dla różnych wielkości ładunku i jego odległości od płyty można określić odkształcenie płyty bez warstwy energochłonnej.



Rys. 4. Realizacja wybuchu powietrznego w odległości 300mm od płyty
Fig. 4. Detonation of the charge situated 300mm away

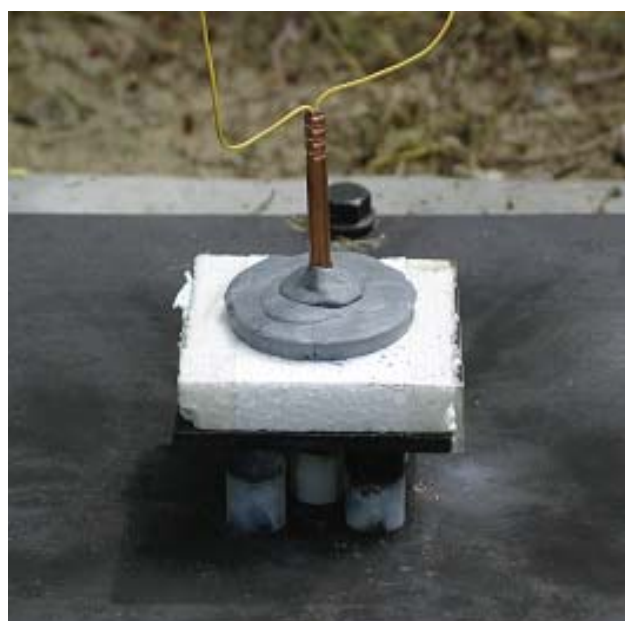
Drugą grupę badań stanowią eksperymenty z pojedynczym elementem energochłonnym i detonacją ładunku w pewnej odległości od niego (rys. 5a). Badania te pozwolą na określenie masy ładunku powodującej całkowite zniszczenie badanego elementu cylindrycznego i pomiar odkształcenia płyty chronionej. Pozwoli to na ocenę efektywności elementu cylindrycznego w procesie przejmowania części energii wybuchu pochodzącej z detonacji ładunku MW.

Trzecią grupę badań stanowią eksperymenty z udziałem pakietów elementów energochłonnych (rys. 5b). Ładunkiem wybuchowym użytym w badaniach był PMW-14. Jest to plastyczny materiał wybuchowy o energii wybuchu 5,2 MJ/kg. Dla porównania energia wybuchu trotylu wynosi 4,2MJ/kg. Do inicjacji wybuchu ładunku MW użyto zapalnika elektrycznego typu ERG uruchamianego przy użyciu tranzystorowej zapalarki kondensatorowej TZK – 100 W.

a)



b)

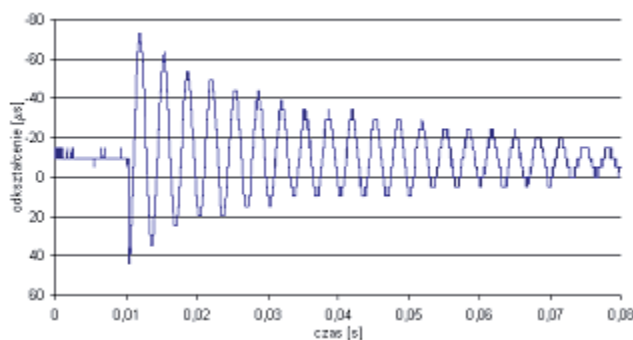


Rys. 5. a) Realizacja wybuchu z udziałem elementu cylindrycznego b) Realizacja wybuchu z udziałem pakietu elementów energochłonnych

Fig. 5. a) Detonation of the charge situated just on the cylindrical specimen b) Detonation of the charge situated just on the set of 5 cylindrical specimen

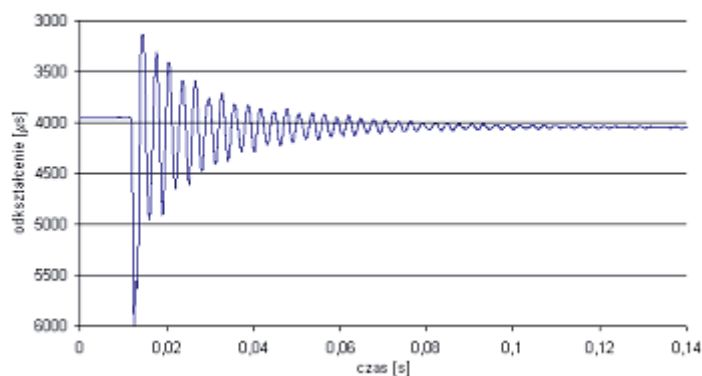
5. Wyniki przeprowadzonych badań

W trakcie badań przeprowadzono kilkadziesiąt detonacji ładunków wybuchowych o masach z zakresu 10-50 gramów. Badania przeprowadzono dla dwóch płyt chronionych. Pierwsza płyta o wymiarach 420x420mm i grubości 10mm wykonana była ze stali St3, druga o grubości 12mm ze stali o podwyższonej wytrzymałości S355J2G3 (odpowiednik 18G2). Na rys. 6 przedstawiono zarejestrowane przebiegi drgań płyt przy działaniu ładunków MW bezpośrednio na płyty. W pierwszym z pokazanych przypadków (rys. 6a) zdetonowano ładunek 15g MW w odległości 300mm od środka płyty, zaś w drugim przypadku (rys. 6b) detonacja ładunek MW o masie 20g odbyła się w odległości 200mm od środka płyty. Zarejestrowana częstość drgań płyty w pierwszym przypadku wynosiła 298 Hz a odkształcenia wywołane wybuchem były niewielkie. Dla drugiego przypadku, częstość drgań płyty wyniosła 338 Hz a maksymalne odkształcenia sięgnęły 800 $\mu\epsilon$ ($\mu\text{m}/\text{m}$). Ze względu na wytrzymałość płyt i konieczność detonacji ładunków o masie kilkudziesięciu gramów do dalszych testów wybrano płytę o grubości 12mm.



Rys. 6. Odkształcenia płyty przy bezpośrednim oddziaływaniu ładunków na płytę (wybuch powietrzny)
 Fig. 6. Time history of deformation of the plate loaded by explosion acting directly on the plate

Badania z zastosowaniem elementu energochłonnego przeprowadzono dla różnych układów elementów energochłonnych i ładunków MW. Na rys. 7 przedstawiono przebieg drgań płyty dla przypadku detonacji ładunku MW w odległości 15mm od badanego elementu energochłonnego. W doświadczeniu użyto elementu cylindrycznego o średnicy zewn. 32mm i grubości ścianki 1,5mm, detonując ładunek 25g MW. Maksymalne odkształcenie płyty wyniosło 2020 $\mu\epsilon$ a deformację elementu cylindrycznego i przykrywającego go krążka prezentuje rys. 8.

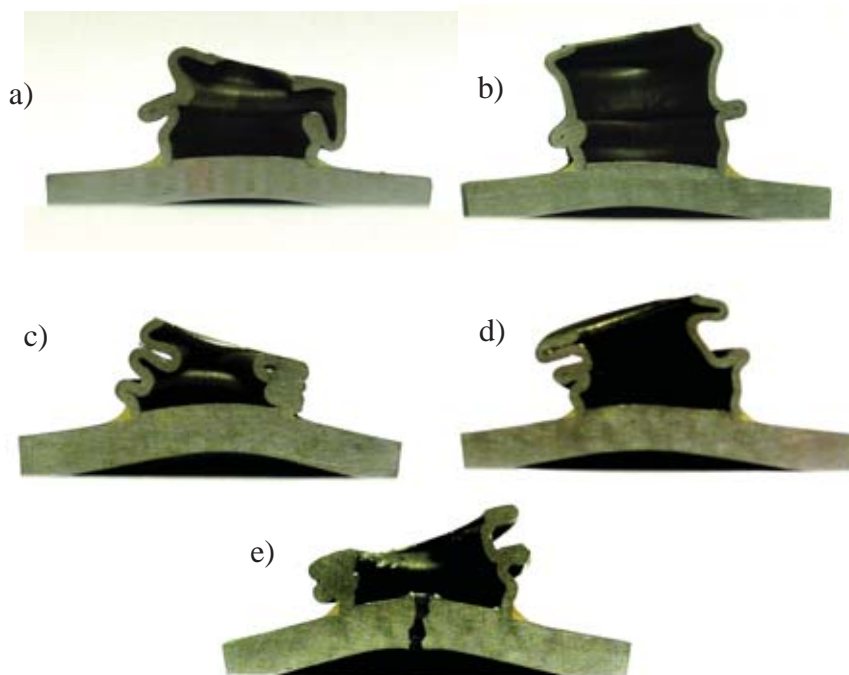


Rys. 7. Odkształcenia płyty z udziałem pojedynczych elementów energochłonnych
 Fig. 7. Time history of deformation of the plate loaded by explosion acting directly on the single energy absorbing element



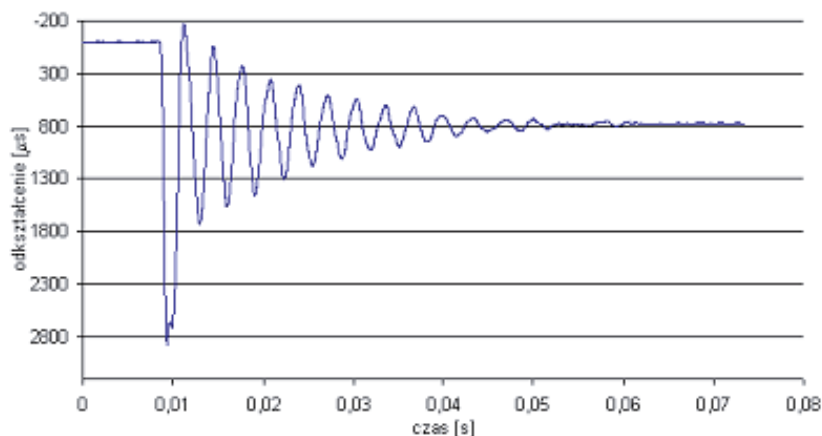
Rys. 8. Deformacja elementu cylindrycznego $\phi 32 \times 1,5$ mm
 Fig. 8. Deformation of $\phi 32 \times 1,5$ mm cylindrical tube

Na rys. 9 przedstawiono elementy energochłonne poddane obciążeniu fali detonacyjnej pochodzącej z wybuchu ładunków MW o masach 10g, 12,5g i 15g. Elementy te były połączone z krążkami przykrywającymi za pomocą spoiny z mosiądzu. Zwraca uwagę fakt, iż przy detonacji największego z wymienionych ładunków nastąpiło pęknięcie krążka przykrywającego próbkę (rys. 9e).



Rys. 9. Deformacja elementów cylindrycznych $\phi 20 \times 1$ mm
 Fig. 9. Deformation of $\phi 20 \times 1$ mm cylindrical tubes

Do badań pakietów ochronnych przygotowano po dwie struktury składające się z czterech i pięciu elementów cylindrycznych połączonych z płytą przykrywającą spoinami z mosiądzu. Do struktury 4-elementowej przyłożono ładunek 30g (warstwa dystansowa styropianu 15mm). Fala detonacyjna powstała w wyniku wybuchu spowodowała trwałe ugięcie środka płyty stanowiskowej wynoszące 1,2mm. Przebieg odkształcenia w czasie dla płyty przedstawiono na rys 10. Maksymalne odkształcenie zanotowane podczas próby wynosi $2860 \mu\epsilon$, natomiast odkształcenie plastyczne $776 \mu\epsilon$.

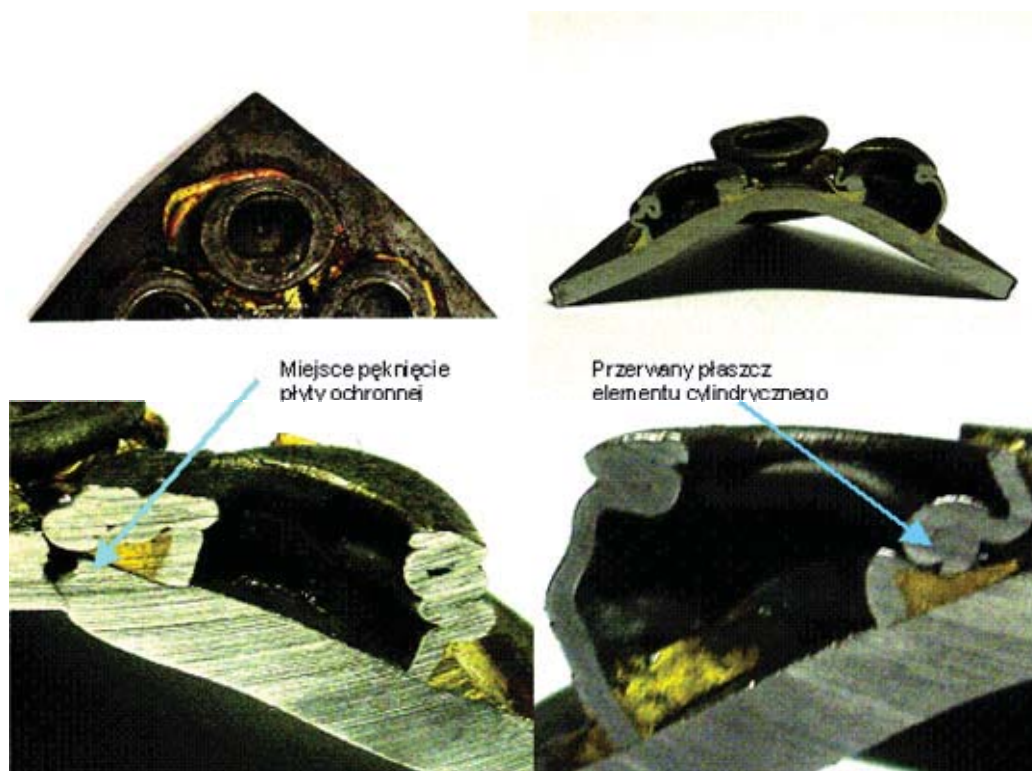


Rys. 10. Odkształcenia płyty z pakietem 4-elementowym przy detonacji ładunku 30g MW
 Fig. 10. Time history of deformation of the plate loaded by explosion of 30g charges acting directly on the set of 4 cylindrical elements

Ładunek MW 30g nie spowodował całkowitego zniszczenia elementów energochłonnych. Część energii wybuchu została przejęta również przez płytę ochronną, która doznała odkształceń plastycznych (rys. 11). Detonacja ładunku 50g MW nad pakietem 4-elementowym spowodowała pęknięcie płyty chroniącej. Deformację elementów energochłonnych cechuje w tym przypadku widoczny brak symetrii. Zauważalne są również pęknięcia płaszcza elementów cylindrycznych (rys. 12).



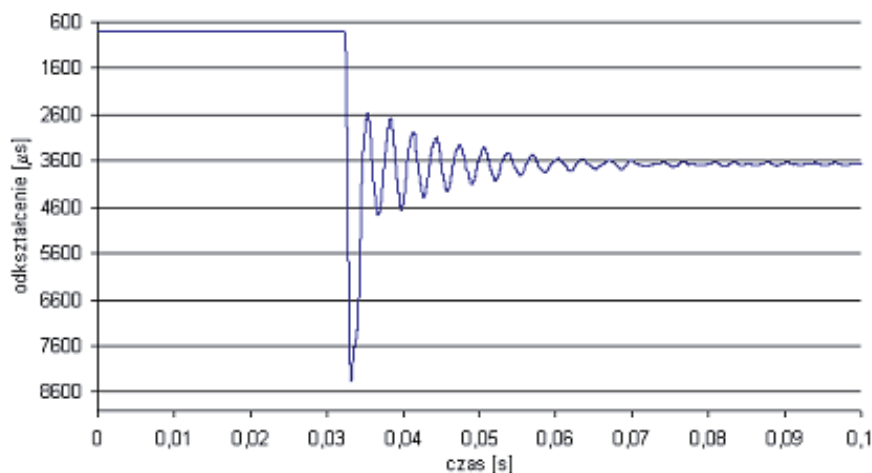
Rys. 11. Deformacja pakietu 4-elementowego przy ładunku 30g MW
Fig. 11. Deformation of set of 4 cylindrical tubes loaded by blast wave of 30g charge explosion



Rys. 12. Deformacja pakietu 4-elementowego przy ładunku 50g MW (przekrój)
Fig. 12. Deformation of set of 4 cylindrical tubes loaded by blast wave of 50g charge explosion

Do badań pakietu 5-elementowego użyto 40g ładunków MW. Doświadczenie przeprowadzono na płycie użytej w poprzednim doświadczeniu (trwale odkształconej). Fala detonacyjna powstała w wyniku wybuchu spowodowała trwale ugięcie środka płyty stanowiskowej wynoszące 1,4mm. Drgania płyty powstałe w wyniku detonacji przedstawiono na rys. 13. Maksymalne odkształcenie płyty zanotowane podczas próby wynosi 7450 μe , natomiast odkształcenie plastyczne 2870 μe . Całkowitemu zniszczeniu uległ środkowy element pakietu (rys. 14). Pozostałe elementy

odkształciły się niesymetrycznie. Strzałkami zaznaczono miejsca pęknięcia płaszcza elementów cylindrycznych



Rys. 13. Odkształcenia płyty z pakietem 5-elementowym przy detonacji ładunku 40g MW
Fig. 13. Time history of deformation of the plate loaded by explosion of 40g charges acting directly on the set of 5 cylindrical elements



Rys. 14. Deformacja pakietu 5-elementowego przy ładunku 40g MW (przekrój)
Fig. 14. Deformation of set of 5 cylindrical tubes loaded by blast wave of 40g charge explosion

5. Wnioski

Przeprowadzone badania eksperymentalne dowiodły możliwości zastosowania zaprojektowanego stanowiska do pomiaru odkształcenia płyty z warstwą ochronną obciążonej siłą pochodzącej z wybuchu ładunków MW.

Planuje się testowanie struktur większych (9-, 16-, i 25-elementowych). Wiąże się to ze zmianą kształtu ładunku wybuchowego, zmianą sposobu detonacji (zmniejszenie efektu kumulującego zapalnika) ewentualnie zmianą odległości ładunku MW od płyty, tak aby możliwe było uzyskanie jednorodnej fali ciśnienia na większym obszarze płyty. Zmianie ulegnie również sposób łączenia elementów cylindrycznych z płytą ochronną. Spoina z mosiądzu zostanie zastąpiony cieńszą spoiną wykonaną ze stopu srebra.

Literatura

- [1] Krzewiński, R., *Dynamika wybuchu – Część I – Metody określania obciążeń*, Wydawnictwo WAT, Warszawa 1982.
- [2] Krzewiński, R., *Dynamika wybuchu – Część II – Działanie wybuchu w ośrodkach inercyjnych*, Wydawnictwo WAT, Warszawa 1982.
- [3] Krzewiński, R., Rekucki, R., *Roboty budowlane przy użyciu materiałów wybuchowych*, Wydawnictwo Polcen, Warszawa 2005.
- [4] Włodarczyk, E., *Wstęp do mechaniki wybuchu*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994.
- [5] Cieśla, P., Dacko, A., Nowak, J., *Axial crush of thin walled tubes – experiment and simulation*, 16th International Conference on Computer Methods in Mechanics, Częstochowa June 21-24, 2005.
- [6] Cieśla, P., Dacko, A., Dacko, M., Nowak, J., *Duże odkształcenia elementów cienkościennych poddanych ścisłaniu*, IX Konferencja Naukowo-Techniczna Programy MES w komputerowym wspomaganii analizy, projektowania i wytwarzania, Giżycko, Poland 2005.
- [7] Cieśla, P., Dacko, A., Dacko, M., Nowak, J., *Symulacja numeryczna zachowania elementu o dużej zdolności pochłaniania energii*, IX Konferencja Naukowo-Techniczna Programy MES w komputerowym wspomaganii analizy, projektowania i wytwarzania, Giżycko, Poland 2005.
- [8] Cieśla, P., Dacko, A., Dacko, M., Nowak, J., *Analiza i eksperyment w badaniu udarowej odporności konstrukcji*, Górnictwo Odkrywkowe 5-6, 2006.