

## EXPERIMENTAL TESTS OF BLAST LOADED THIN-WALLED TUBES

**Marian Dacko, 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  
j.nowak@wme.wat.edu.pl*

**Adam Dacko**

*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*

### **Abstract**

*The paper presents the stand for experimental investigation of cylindrical specimens, loaded by the pressure wave of the blast. The key parameters determined in experiment were the duration and the peak value of the load. The blast load was generated by detonation of small explosive charges of PWM-14. The force was measured using piezoelectric gauge and registered by digital oscilloscope.*

*The load acting on the gauge was generated by detonation of the charge situated 150 mm and 200 mm from the gauge and the charge situated just on the cylindrical specimen. The pressure blast wave was transmitted to the specimen using a typical setup: the specimen, covering disk, distance layer (15 mm of Styrofoam), explosive charge. The specimen and the covering disc were either just in contact or were soldered. The explosive charge mass, necessary to crush the specimen, was measured. The time variation of the gauge load was monitored for both aerial explosion, as well as explosion acting directly on the specimen. The deformation shape of crushed energy absorbing elements were compared for dynamic loads and static loads in testing machines.*

**Keywords:** *experiment, cylindrical shell, blast loading*

## DOŚWIADCZALNA ANALIZA POWŁOKI CYLINDRYCZNEJ OBCIĄŻONEJ IMPULSEM WYBUCHU

### **Streszczenie**

*W pracy przedstawiono stanowisko do badań cylindrycznych elementów cienkościennych obciążonych impulsem wybuchu. Głównym celem badań było określenie parametrów impulsu obciążenia tj. czasu trwania i maksymalnej wartości siły. Obciążenie realizowano detonacją niewielkich ładunków materiału wybuchowego. Do pomiaru siły działającej na powłokę cylindryczną zastosowano czujnik piezoelektryczny. Rejestrację i zapis siły dokonano przy użyciu oscyloskopu cyfrowego. Jako materiał wybuchowy zastosowano plastyczny materiał wybuchowy PMW-14. Ładunki w kształcie cylindrycznym o małej wysokości detonowano przy użyciu zapalników typu Erg.*

*Przeprowadzono pomiar siły działającej na czujnik dla wybuchu ładunku MW umieszczonego w powietrzu w odległości 150 i 200mm od czujnika oraz dla ładunku umieszczonego na badanym elemencie. Oddziaływanie fali wybuchu na element cylindryczny realizowano w układzie: badany element, krążek przykrywający, warstwa dystansowa (15mm styropianu), ładunek wybuchowy. Realizowano dwa typy warunków brzegowych w połączeniu pomiędzy powłoką a krążkiem. W pierwszym występował swobodny kontakt pomiędzy badaną rurką a płytką przykrywającą. W drugim zaś krążek z rurką połączono spoiną pachwinową. Określono masę ładunku niezbędną do zniszczenia elementu cylindrycznego. Przedstawiono wykresy zmienności w czasie siły działającej na czujnik w przypadku wybuchu powietrznego i wybuchu działającego na cylindryczny element energochłonny. Porównano postacie deformacji badanych próbek przy obciążeniach dynamicznych z próbkami poddanymi statycznemu ścisnaniu na maszynach wytrzymałościowych.*

*Słowa kluczowe: eksperyment, powłoki cylindryczne, obciążenie impulsem wybuchu*

## 1. Wprowadzenie

Cylindryczne elementy cienkościennie znajdują zastosowanie w tworzeniu struktur, których zadaniem jest zmniejszenie wpływu wybuchu ładunku na ochraniający element urządzenia. Elementy ochronne powinny charakteryzować się niewielką masą oraz odpowiednio wysoką zdolnością do absorpcji energii wybuchu (fali uderzeniowej, fali podmuchu, niewielkich odłamków). Odpowiednio zaprojektowane elementy ulegając kontrolowanemu zniszczeniu minimalizują przekazywanie energii do ochranianego obiektu. Pochłanianie energii odbywa się poprzez odkształcenie plastyczne elementów cienkościennych.

Autorzy przeprowadzili szereg badań statycznych elementów cienkościennych o różnych rozmiarach i parametrach przekroju [5-8]. Jako najbardziej optymalne wybrano elementy cienkościennie  $\phi 32 \times 1,5$  mm i  $\phi 20 \times 1$  mm o wysokości 35mm. W pierwszym z nich w wyniku ściskania statycznego wytworzyły się trzy półfały, zaś w drugim 5 półfałd.

Przeprowadzono również wstępne badania dynamiczne bez pomiaru siły. Detonowano ładunek wybuchowy w odległości 15mm od płytki przykrywającej element cylindryczny. Stwierdzono, że do całkowitego zniszczenia elementu cylindrycznego  $\phi 32 \times 1,5$  mm o wysokości 35mm potrzebny jest ładunek o masie 25g. Sposób deformacji elementu cylindrycznego przy obciążeniu statycznym i dynamicznym był podobny.

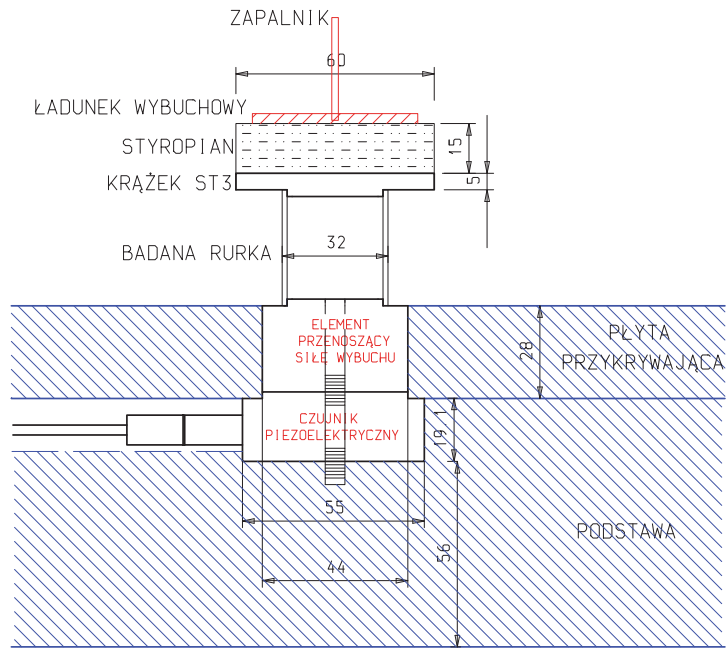
W niniejszej pracy Autorzy prezentują wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych na elementach cienkościennych poddanych działaniu fali uderzeniowej wybuchu MW w specjalnym stanowisku pomiarowym z zastosowaniem czujnika piezoelektrycznego.

## 2. Opis stanowisko do badań wyodrębnionego elementu cienkościennego

W zamyśle autorów, projektowane stanowisko pozwoli na badanie elementów cienkościennych poddanych działaniu fali nadciśnienia powstałej w wyniku detonacji ładunków wybuchowych o masie do 30 gramów. Istotnym ograniczeniem co do parametrów elementów cylindrycznych (średnica, grubość ścianki), które można badać na projektowanym stanowisku jest zakres pomiarowy czujnika mierzącego siłę przenoszoną przez element cienkościenny. Stanowisko, którego schemat przedstawiono na rys. 1, ma umożliwić pomiar oraz rejestrację czasu trwania i wartości impulsu nadciśnienia.

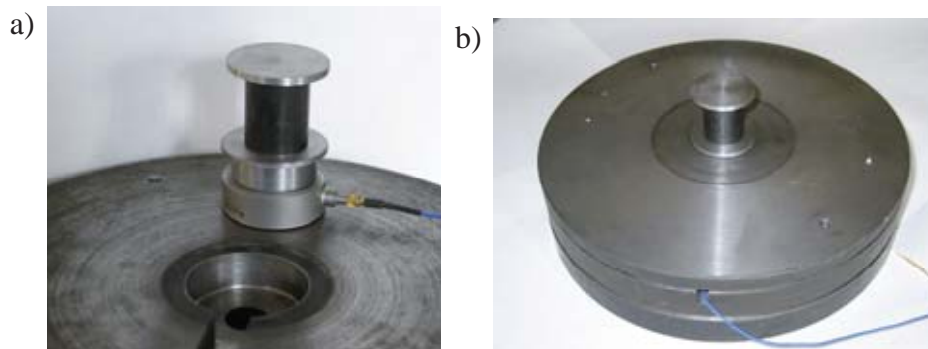
Podstawę stanowiska stanowi zespół dwóch masywnych płyt kołowych z wydrążonym w środku otworem. Wewnątrz otworu zamocowano czujnik piezoelektryczny 200C50 PCB Piezotronics do pomiarów dynamicznych sił (max. wartość siły ścisniającej - 225 kN). Od góry stanowisko zamknięto płytą przykrywającą z otworem umożliwiającym przykręcenie do czujnika walcowego elementu pośredniego zakończonego występem w kształcie krążka o średnicy większej niż średnica otworu w płycie przykrywającej. Element ten przekazuje siłę z badanej rurki na czujnik a jednocześnie stanowi zabezpieczenie czujnika przed bezpośrednim oddziaływaniem fali nadciśnienia. Zaletą budowy modułowej stanowiska jest możliwość szybkiej wymiany elementów uszkodzonych w trakcie wybuchu, wadą zaś konieczność sprawdzania zamocowania poszczególnych elementów po każdej próbie eksperymentalnej.

Do rejestracji siły działającej na czujnik użyto oscyloskopu cyfrowego Hewlett-Packard, do którego sygnał z czujnika piezoelektrycznego doprowadzono poprzez wzmacniacz ładunkowy. Oscyloskop umożliwia zapis impulsu siły z częstotliwością próbkowania 2,5 MHz (pomiar siły odbywa się co 0,4  $\mu$ s). Zaletą tego urządzenia jest prowadzenie ciągłej rejestracji wyników pomiarów do pamięci wirtualnej. Zapis wyników do pliku inicjowany jest w momencie przekroczenia przez impuls zadanej wartości progowej, przy czym istnieje możliwość określenia czasu wyprzedzenia rozpoczęcia zapisu w stosunku do zajścia zdarzenia.



Rys. 1. Schemat stanowiska do badań elementów cienkościennych obciążonych impulsem wybuchu

Fig. 1. Scheme of the stand for experimental investigation of cylindrical specimens loaded by the pressure wave of the blast



Rys.2. Stanowisko do badań wyodrębnionych elementów energochłonnych: a) czujnik piezoelektryczny z elementem pośrednim i badaną rurką, b) stanowisko z badaną rurką

Fig. 2. The stand for experimental investigation of cylindrical specimens: a) piezoelectric gauge, intermediate element and the specimen, b) the stand and the specimen



Rys. 3. Oscyloskop cyfrowy umożliwiający zapis wyników pomiaru z częstotliwością 2,5 MHz

Fig. 3. Digital oscilloscope with 2,5 MHz sampling

### 3. Program i przedmiot badań

Na program badań składają się dwa rodzaje eksperymentów. Pierwszą grupę stanowią badania, w których detonacja ładunku wybuchowego odbywa się w pewnej odległości od czujnika a powstała w wyniku detonacji fala nadciśnienia oddziałuje bezpośrednio na czujnik, ściślej na element walcowy przekazujący siłę wybuchu (rys. 4a) Ładunek MW z zapalnikiem umieszczony jest na cylindrze wykonanym z papieru. Wysokość cylindra określa odległość ładunku MW od czujnika. Zmieniając wielkość ładunku i jego odległość od czujnika można określić czas trwania impulsu i wartość nadciśnienia. Pozwala to na określenie parametrów impulsu wybuchu oraz na weryfikację zgodności i możliwości zastosowania wzorów teoretycznych [1] w odniesieniu do rozpatrywanego zagadnienia.

Drugą grupę badań stanowią eksperymenty z detonacją ładunku znajdującego się bezpośrednio na badanym elemencie cienkościennym (rys. 4b). Badania te pozwolą na określenie masy ładunku powodującej całkowite zniszczenie badanego elementu cylindrycznego. Możliwa będzie również ocena efektywności zastosowania elementu cylindrycznego w procesie przejmowania części energii wybuchu pochodzącej z detonacji ładunku wybuchowego.



Rys. 4. a) Realizacja wybuchu powietrznego w odległości 100mm od czujnika, b) Realizacja wybuchu z udziałem elementu cylindrycznego

Fig. 4. a) Detonation of the charge situated 100mm from the gauge, b) Detonation of the charge situated just on the cylindrical specimen

Przedmiotem badań były cylindryczne powłoki cienkościenne o wysokości 35mm, średnice zewn. 20mm i grubości ścianki 1mm. Wykonane one były ze stali R35 i charakteryzowały się następującymi statycznymi parametrami materiałowymi:

- granica plastyczności  $R_e=350$  MPa
- moduł Younga  $E=215$  GPa

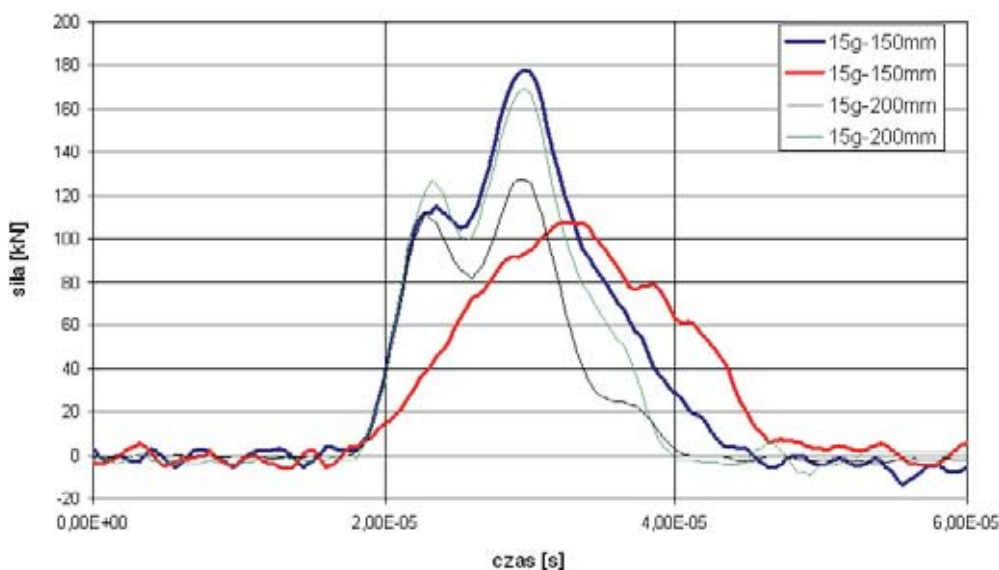
Badane elementy przykrywano krążkiem stalowym o średnicy 50mm i grubości 5mm. Miał on za zadanie przeniesienie ciśnienie powstałego w wyniku detonacji na element cylindryczny. W celu uzyskania możliwie równomiernego rozkładu fali uderzeniowej, materiał umieszczono na warstwie styropianu o grubości 15mm.

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.

Jednym z problemów, który autorzy musieli rozwiązać przed przystąpieniem do badań, było przyjęcie kształtu i wielkości detonowanych ładunków wybuchowych. Ładunek i jego kształt powinny być dobrane w sposób zapewniający prawidłowy przebieg detonacji. Zgodnie z danymi literaturowymi [1,4], średnica krytyczna ładunku - dla jednorodnych materiałów wybuchowych - poniżej której detonacja nie jest możliwa, wynosi kilka milimetrów. Natomiast średnica graniczna, powyżej której prędkość detonacji jest stała, jest z reguły 5-10 razy większa od średnicy krytycznej.

#### 4. Wyniki przeprowadzonych badań

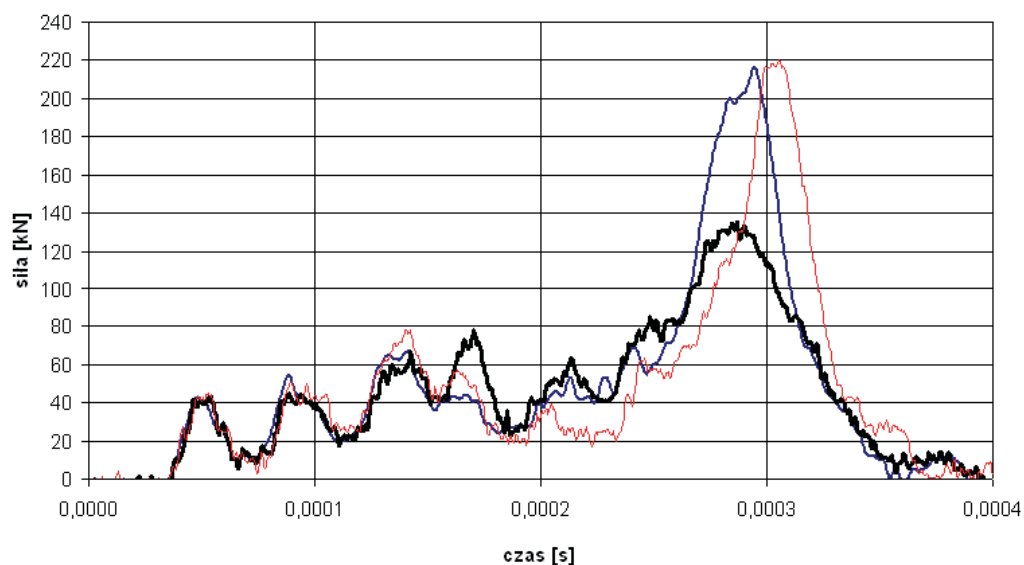
W trakcie badań przeprowadzono kilkadziesiąt detonacji ładunków wybuchowych o masach z zakresu 10-30 gramów. Na rys. 5 przedstawiono zarejestrowane przebiegi siły działającej na czujnik powstałe w wyniku wybuchu powietrznego. Ładunki MW o masach 15g detonowane były w odległości 150mm i 200 mm od czujnika do pomiaru siły. Jak można zauważyć charakter czterech zarejestrowanych przebiegów zmienności siły w czasie dla odległości wybuchu 150 i 200 mm jest zbliżony, jednak lokalnie występują znaczne różnice. Maksymalne siły zarejestrowane w impulsie mają wartość 110-180kN. Czas trwania impulsu wynosi 23-29 $\mu$ s. Z wykresów tych wynika, że przebieg detonacji w poszczególnych próbach znacznie się różni.



Rys. 5. Zmiana w czasie siły działającej na czujnik w wyniku wybuchu powietrznego ładunków o masie 15g  
 Fig. 5. Time history of the load acting on the gauge, generated by detonation of 15g explosive charges

Na rys. 6 przedstawiono zarejestrowane przebiegi siły działającej na czujnik powstałe w wyniku detonacji ładunku 15g MW w odległości 15mm od badanych elementów cylindrycznych. Realizowano dwa typy warunków brzegowych. W pierwszym występował swobodny kontakt pomiędzy badaną rurką a płytką przykrywającą (WB1), w drugim zaś krążek z rurką połączono przy użyciu spoiny stalowej pachwinowej (WB2). Dla próbek WB1 postać deformacji badanych elementów cylindrycznych poddanych obciążeniom dynamicznym jest zbliżona do postaci otrzymanych w wyniku statycznego ściskania na maszynach wytrzymałościowych, co ilustruje rys. 7. Należy zauważyć również, że ładunek o masie 15g wystarcza do pełnego zniszczenia elementu cylindrycznego, przy czym następuje również odkształcenie krążka przykrywającego rurkę. Przy realizacji warunków sztywnego połączenia rurki z płytą przykrywającą (WB2) okazało się że technika lutowania, a zwłaszcza zbyt gruba i nierównomierna spoina powoduje powstanie niesymetrycznych postaci deformacji co ilustruje rys. 8. Przy badaniach statycznych efektu tego nie zauważono. Jediną różnicą była mniejsza liczba powstałych fałd (ze względu na dużą grubość spoiny zmniejszyła się bowiem wysokość ścianki próbki podlegająca odkształceniu).

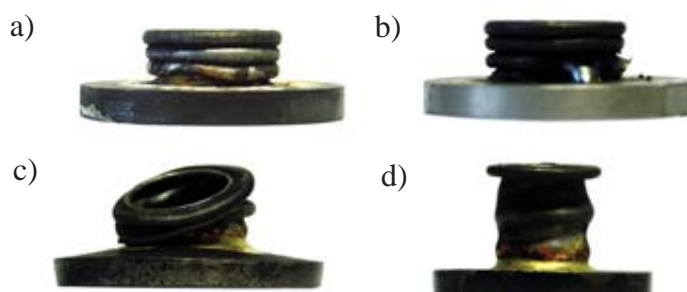
Na rys. 9 przedstawiono zarejestrowane przebiegi siły działającej na czujnik powstałe w wyniku detonacji ładunku 12,5g MW w odległości 15mm od badanych elementów cylindrycznych (WB2), a na rys. 10 postaci deformacji badanych elementów cylindrycznych. Zmniejszenie masy ładunku obniżyło maksymalną wartość siły do 70-100kN. Jednocześnie obserwujemy wydłużenie czasu deformacji do 440-480 $\mu$ s. Zdeformowane próbki wykazują wyraźnie brak powtarzalności w procesie deformacji i wynikający stąd brak symetrii obciążenia.



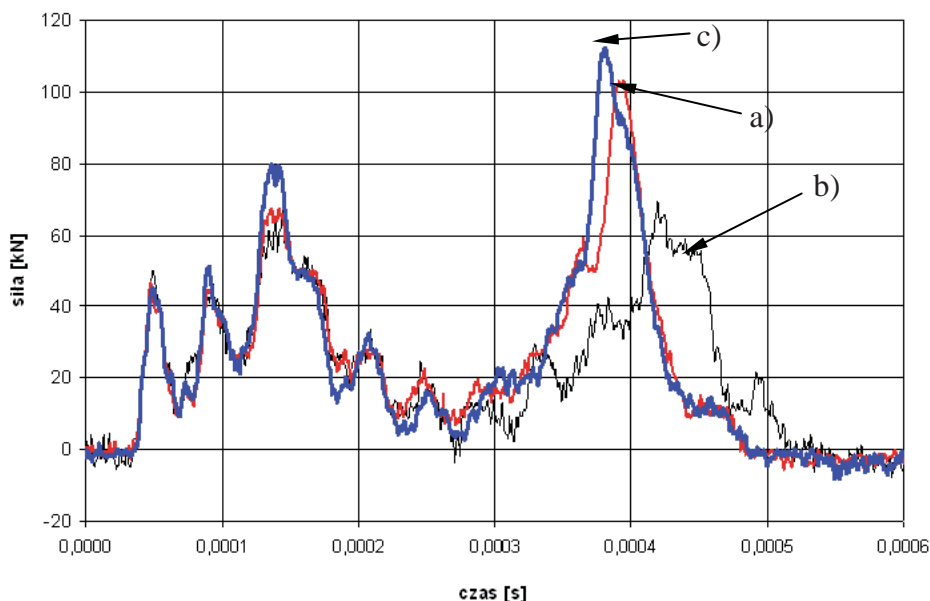
Rys. 6. Zmiana siły w czasie w wyniku wybuchu 15g MW w układzie z elementem energochłonnym  
 Fig. 6. Load acting on the single energy absorbing element versus time, generated by detonation of 15g charge



Rys. 7. Postać deformacji próbek przy obciążeniu statycznym(a) i dynamicznym (b, c)  
 Fig. 7. Deformation mode of specimens for static (a) and dynamic (b, c) loads



Rys. 8. Postać deformacji próbek połączonych sztywno z płytką przykrywającą przy obciążeniu statycznym(a, b) i dynamicznym (c, d)  
 Fig. 8. Deformation mode of specimens, attached by soldering to one end plate, for static (a, b) and dynamic (c, d) loads



Rys. 9. Siła działająca na czujnik w wyniku wybuchu powietrznego ładunków masie 12,5g  
 Fig. 9. Time history of the load acting on the gauge, generated by detonation of 12,5g charges



Rys. 10. Postacie deformacji próbek przy obciążeniu dynamicznym (widoki próbek a, b, c odpowiadają wykresom na rys. 9)

Fig. 10. Deformation modes of specimens for dynamic loads

## 5. Wnioski

Przeprowadzone badania eksperymentalne dowiodły możliwości zastosowania zaprojektowanego stanowiska do pomiaru siły pochodzącej z wybuchu małych ładunków MW. Proces detonacji w małych ładunków MW nie zawsze przebiega w jednakowy sposób, stąd uzyskane wyniki cechuje słaba powtarzalność. W trakcie doświadczeń wielokrotnie zdarzało się, że detonacja nie występowała a ładunek MW ulegał rozproszeniu. Nie udało się doprowadzić do detonacji ładunków mniejszych niż 10g. Stosowane w doświadczeniach zapalniki typu Erg posiadają wkładkę kumulacyjną, co dodatkowo powodowało przypadki perforacji krążka przykrywającego rurkę.

Stwierdzono również, że deformację większości elementów cylindrycznych powstałą w wyniku obciążenia impulsem wybuchu cechuje brak symetrii. Powodem może być niejednorodne obciążenie wynikające z niesymetrycznego rozłożenia ładunku wybuchowego. Dla rurek połączonych sztywno z płytą przykrywającą (WB2) dodatkowym czynnikiem wpływającym na brak symetrii była technika lutowania, a zwłaszcza zbyt gruba i nierównomierna warstwa spoiny. Kolejne badania zamierza się przeprowadzić zastępując spoinę stalową inną np. mosiężną lub stopami srebra.

Przeprowadzone badania są wstępem do prac związanych z opracowaniem struktury energochłonnej. Uzyskane wyniki wykorzystane zostaną przy tworzeniu symulacji numerycznych omawianych zagadnień i testowaniu ich zgodności z doświadczeniem.

## 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 ścisnaniu*, IX Konferencja Naukowo-Techniczna Programy MES w komputerowym wspomaganiu 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 wspomaganiu 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.