

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF STATIC AND 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
e-mail: j.nowak@wme.wat.edu.pl*

Abstract

Thin-walled elements are more and more often a typical component of the shields protecting structures against the effects of the blast of explosive charge. To be effective, they should be light and exhibit a high energy absorption capacity. By design for controlled crush, they minimize the energy transmitted to the protected structure.

The concept of protective shield consisting of cylindrical shells is presented. The basic energy absorbing element was chosen and the basic experiments were performed. Static experiments covered axial compression in testing machines and obtaining material stress-strain diagram. The dynamic tests allowed for determination of the explosive charge mass allowing for total crush of the cylindrical specimen.

The numerical simulation was performed using MSC.Dytran. Numerical models were built using thin and middle thick shell elements. The energy absorbing element was crushed for certain pressure wave parameters. Performed experimental research in the area of static compression (with strength device) and dynamic loads (with the use of explosives) as well built numeric models permit to state that the agreement of the deformation shape in experimental and numeric researches was obtained.

Keywords: *experimental and numerical analysis, cylindrical shell, blast compression*

NUMERYCZNO-EKSPERYMENTALNA ANALIZA OSIOWO-SCISKANEJ POWŁOKI CYLINDRYCZNEJ PRZY OBCIĄŻENIU STATYCZNYM I IMPULSEM WYBUCHU

Streszczenie

Elementy cienkościenne znajdują coraz częściej zastosowanie w tworzeniu struktur, których zadaniem jest ochrona urządzeń przed skutkami eksplozji ładunku materiału wybuchowego. Elementy te powinny charakteryzować się niewielką masą oraz odpowiednio wysoką zdolnością do absorpcji energii wybuchu (fali uderzeniowej, fali podmuchu, niewielkich odłamków). Ulegając kontrolowanemu zniszczeniu minimalizują one przekazywanie energii do ochranianego obiektu.

Autorzy pracy przedstawili koncepcję struktury ochronnej składającej się z metalowych powłok cylindrycznych. Dokonano wyboru podstawowego elementu energochłonnego i poddano go wstępnym badaniom doświadczalnym. Badania statyczne polegały na przeprowadzeniu próby ściskania na maszynie wytrzymałościowej oraz wyznaczeniu charakterystyk materiałowych niezbędnych do przeprowadzenia symulacji numerycznych. W badaniach dynamicznych, z użyciem materiałów wybuchowych, określono wielkość ładunku powodującego całkowite zniszczenie pojedynczego elementu cylindrycznego.

Przy wykorzystaniu oprogramowania MSC.Dytran wykonano symulacje numeryczne przeprowadzonych badań. Obliczenia przeprowadzono dla modelu numerycznego zbudowanego z elementów powłokowych. Zmieniając parametry impulsu obciążenia działającego na element energochłonny doprowadzono do jego zniszczenia. Wykonane badania eksperymentalne w zakresie ściskania statycznego (na maszynie wytrzymałościowej) i obciążeń dynamicznych (z użyciem materiałów wybuchowych) oraz zbudowane modele numeryczne pozwalają stwierdzić, że uzyskano zgodność postaci deformacji w badaniach doświadczalnych i numerycznych.

Słowa kluczowe: *analiza numeryczno-doświadczalna, powłoka cylindryczna, ściskanie wybuchowe*

1. Wprowadzenie

Na działanie obciążeń dynamicznych wywołanych eksplozją ładunku wybuchowego narażonych jest wiele współczesnych urządzeń i konstrukcji. Na obciążenia te narażony jest nie tylko sprzęt wojskowy biorący udział w działaniach wojennych. Istotnym czynnikiem zagrażającym obiektom infrastruktury (budynki, linie przesyłowe) są ataki terrorystyczne. Dążenie do zwiększenia odporności konstrukcji na tego typu obciążenia jest więc w pełni uzasadnione.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie koncepcji rozwiązania pewnego rodzaju struktury ochronnej i przeprowadzenie wstępnej analizy statycznej i dynamicznej podstawowego elementu energochłonnego tej struktury. Odpowiednio zaprojektowane elementy ulegając kontrolowanemu zniszczeniu minimalizują transmisję energii fali uderzeniowej do ochranianego obiektu. Ze względu na ogromną liczbę czynników wpływających na efektywność procesu dyssypacji energii wybuchu konieczne jest przeprowadzenie zaawansowanych badań eksperymentalno-numerycznych w celu identyfikacji najbardziej optymalnych wariantów. Jednym z parametrów, które muszą być wzięte pod uwagę jest geometria podstawowych elementów absorbujących. Na rys. 1 przedstawiono wyniki symulacji numerycznej procesu ściskania wybranych elementów cienkościennych. Kolejny czynnik to rodzaj zastosowanego materiału do budowy warstwy energochłonnej: metale, kompozyty, piany polimerowe. Następnie, grubość i wymiary modułu absorbującego oraz konfiguracja ładunku wybuchowego (rodzaj materiału wybuchowego, masa oraz odległość od osłony).

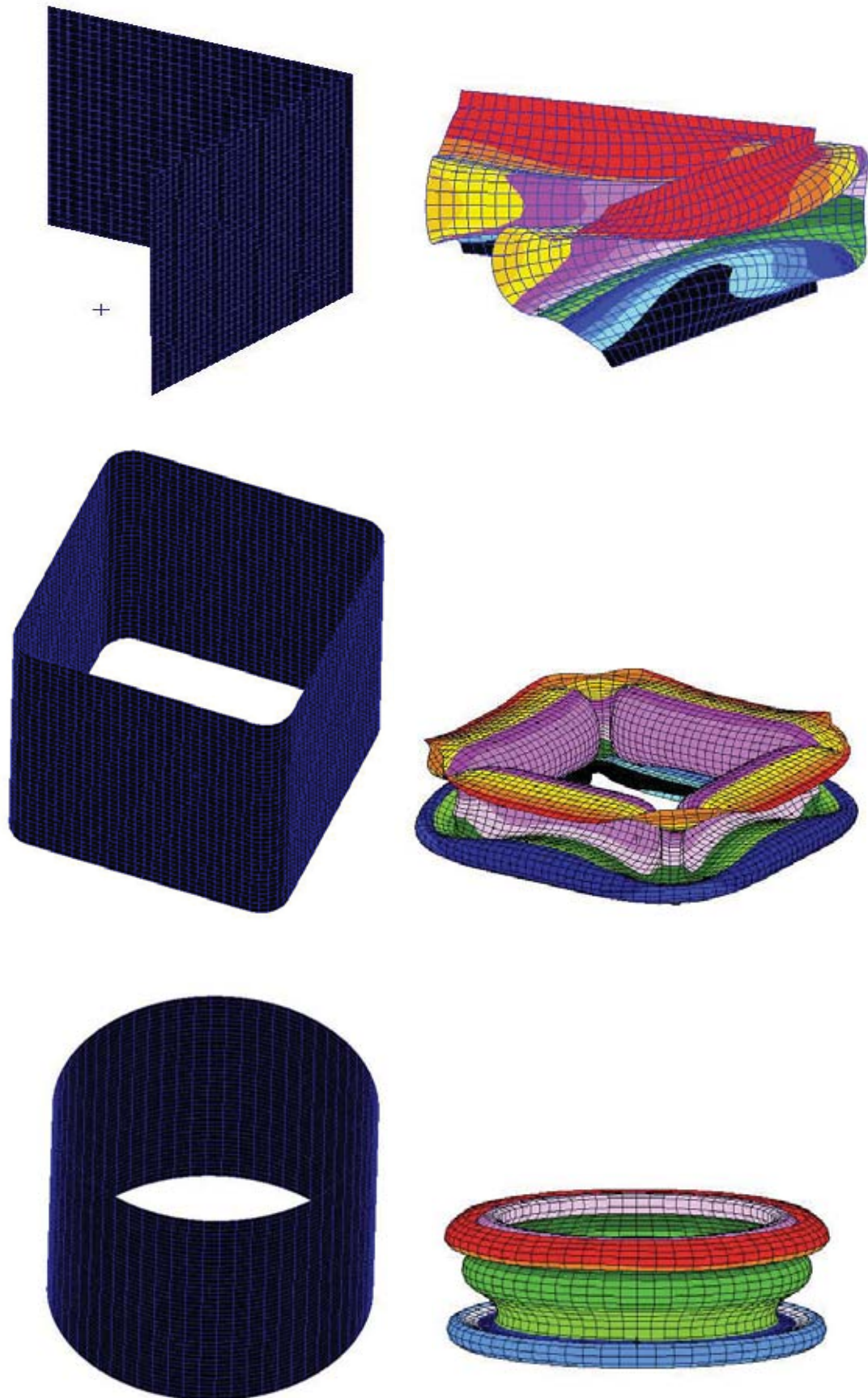
Projektowana struktura ochronna może być przeznaczona do ochrony zewnętrznej np. dna pojazdu wojskowego i jest ona narażona również na inne oddziaływanie niż wybuch takie jak, napór gruntu lub innych ciał obcych. W związku z tym nałożono ograniczenia na grubość i masę warstwy. Zakłada się, że grubość 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.

W pierwszym etapie badań został wybrany podstawowy element energochłonny struktury którym jest metalowy element cylindryczny [5]. Element ten został podany wstępnym badaniom statycznym i dynamicznym, o czym traktuje prezentowana praca. Badania statyczne polegały na przeprowadzeniu prób ściskania elementów cylindrycznych o różnych długościach i wybraniu najbardziej optymalnego wariantu. Badania dynamiczne – z użyciem materiałów wybuchowych – miały na celu sprawdzenie odporności elementu energochłonnego na obciążenia szybkozmiennne oraz określenie masy ładunku powodującego całkowite zniszczenie elementu cylindrycznego.

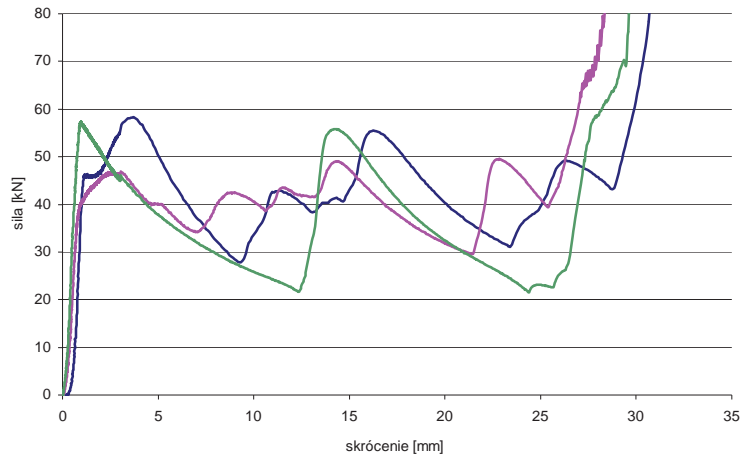
Następnym etapem badań będzie realizacja stanowiska, na którym przeprowadzone zostaną eksperymenty umożliwiające pomiar parametrów impulsu obciążenia pochodzącego z detonacji materiału wybuchowego oraz określenie siły przekazywanej przez element energochłonny na ochranianą konstrukcję. Uzyskane wyniki pozwolą udoskonalić modele numeryczne podstawowego elementu energochłonnego. Kolejnym etapem badań będzie budowa stanowiska do badań struktur ochronnych. Stanowisko to umożliwi pomiar odkształcenia konstrukcji (płyty) z zastosowanym rozwiązaniem warstwy ochronnej. Jednocześnie zbudowany zostanie model numeryczny warstwy ochronnej i przeprowadzone zostaną symulacje numeryczne rozpatrywanego zagadnienia.

2. Badania statyczne elementów energochłonnych

Badaniom statycznym na ściskanie poddano próbki o średnicy zewnętrznej 32 mm i grubości ścianki 1,5 mm. Doświadczenia przeprowadzono na maszynie Instron przy prędkości ściskania $v = 5\text{mm/min}$. Zapis wartości sił ściskających próbkę i przemieszczeń płyty dociskowej dokonywany był z częstotliwością 10/sek. Powierzchnie czołowe próbek wykonano w sposób zapewniający przegubowe zamocowanie próbek w trakcie doświadczenia. Wykonano trzy serie pomiarów dla próbek o długości 40 mm w celu określenia powtarzalności wyników. Określone zależności siła-przemieszczenie dla poszczególnych próbek przedstawiono na rys.2



Rys.1. Symulacja numeryczna procesu ściskania wybranych elementów cienkościennych
Fig.1. Numerical simulation of thin-walled structures compression



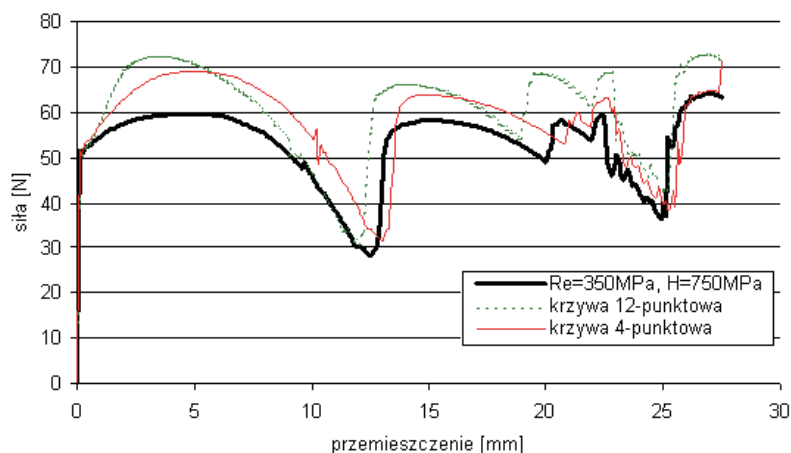
Rys.2. Wykresy ściskania dla próbek $\phi 32 \times 1,5 \text{ mm}$ o wysokości 40mm
 Fig. 2. Experimental load compression curves of $\phi 32 \times 1,5 \text{ mm}$ and 40mm height specimens

W celu określenia parametrów materiałowych niezbędnych do symulacji numerycznych, przeprowadzono badania próbek płaskich wyciętych ze ścianek rury wzdłuż tworzącej. Na podstawie próby określono następujące właściwości mechaniczne materiału dla modelu biliniowego:

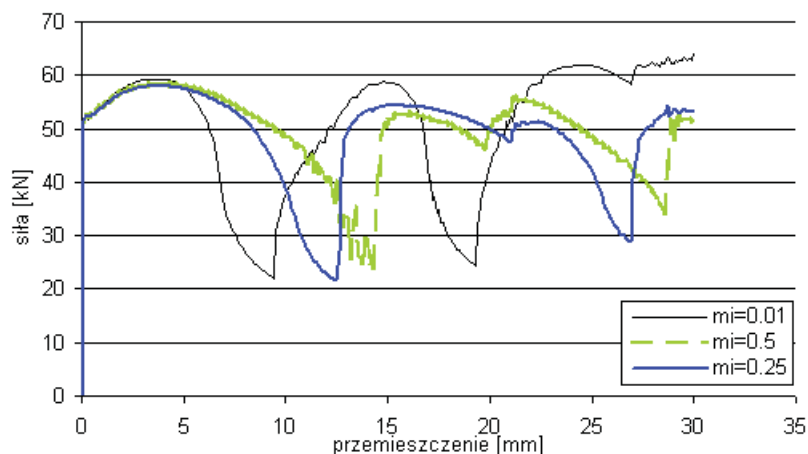
- moduł Younga $E = 215 \text{ GPa}$
- granica sprężystości $R_e = 352 \text{ Mpa}$
- moduł wzmocnienia plastycznego $E_T = 745 \text{ Mpa}$.

Symulacje numeryczne wykonano dla modelu cylindra utworzonego z elementów powłokowych. Model ten umieszczono pomiędzy sztywnymi płytami ściskającymi, utworzonymi również z elementów powłokowych. Warunki brzegowe odwzorowano poprzez narzucenie na węzły leżące na krawędziach rurek więzów odbierających możliwość przesuwu w płaszczyźnie poziomej (dozwolony był obrót). Obciążenie realizowano poprzez przesuw górnej płyty ze stałą prędkością. Przyjęto biliniowy model materiału ze wzmocnieniem plastycznym. Obliczenia wykonano programem MSC.Dytran.

Badając wpływ parametrów materiałowych, oprócz wyżej wymienionego modelu materiału, opisano krzywą materiałową przy użyciu 4 i 12 punktów zdjętych z krzywej doświadczalnej. Ponadto przeprowadzono obliczenia dla kilku wariantów współczynnika tarcia pomiędzy płytami a rurką. Efekty obliczeń w postaci krzywych ściskania przedstawiono na rys. 3 i 4.



Rys. 3. Wpływ parametrów materiałowych na krzywą ściskania modelu powłokowego
 Fig. 3. Influence of material properties on numerical load compression curve



Rys.4. Wpływ współczynnika tarcia na zależność siła-przemieszczenie w modelu powłokowym
 Fig. 4. Influence of friction factor on numerical load compression curve

3. Badania dynamiczne elementów energochłonnych

Przeprowadzono wstępne badania doświadczalne próbek poddanych obciążeniu falą uderzeniową wybuchu ładunku MW. Na stalowej masywnej płycie (rys. 5) ustawiono badany element cylindryczny przykryty krążkiem mającym za zadanie przeniesienie ciśnienia pochodzącego z detonacji ładunku na element cylindryczny. W celu uzyskania możliwie równomiernego rozkładu fali uderzeniowej, ładunek wybuchowy z zapalnikiem umieszczono na warstwie styropianu o grubości 15mm. Materiał wybuchowy formowano w postaci walca. Zmieniano masę ładunku w zakresie 20-30 gramów oraz grubość płytki umieszczonej pomiędzy ładunkiem a rurką. Sposób deformacji elementu energochłonnego oraz liczba tworzących się fałd odpowiadają wynikom uzyskanym w badaniach statycznych i symulacjach numerycznych ściskania osiowego (rys. 6).



Rys.5. Stanowisko badawcze
 Fig.5. Experimental stand



Rys. 6 Sposób deformacji próbek cylindrycznych i krążków przykrywających poddanych obciążeniom falą powstałą w wyniku detonacji ładunków wybuchowych o masach 20-30 gramów

Fig. 6. Deformation shape of cylindrical specimens and covering disks loaded by the pressure wave generated by detonation of 20-30g explosive charges

Symulację numeryczną elementu cylindrycznego poddanego obciążeniom dynamicznym przeprowadzono dla modeli powłokowych wykorzystując program Dytran. Do budowy modelu użyto elementów powłokowych. Badany model umieszczono pomiędzy dwiema nieodkształcalnymi płytami typu Rigid Body Object. Dolna płyta była nieruchoma (pełne utwierdzenie) zaś na górną nałożono więzy translacyjne działające w płaszczyźnie płyty. W celu uwzględnienia efektów bezwładnościowych przyjęto masę górnej płyty jako równą masie stalowego krążka o grubości 5mm i średnicy 50mm (używano je w doświadczeniach z użyciem materiału wybuchowego). Przyjęto model materiałowy identyczny jak w obliczeniach statycznych, nie uwzględniając zmiany parametrów materiałowych wynikającej z dużych prędkości odkształcenia. Obciążenie realizowano poprzez przyłożenie siły do górnego krążka (odpowiednik ciśnienia powstałego w wyniku detonacji ładunku MW). W obliczeniach przyjęto trójkątny kształt impulsu ciśnienia o czasie narastania $1\mu\text{s}$ i czasie trwania $100\mu\text{s}$. Zmieniano wartość maksymalnej siły w impulsie i poszukiwano wartości powodującej całkowite zniszczenie elementu cylindrycznego.

Na rys. 7 przedstawiono przebieg deformacji modelu dla kilku charakterystycznych punktów wykresu obrazującego zmianę w czasie przemieszczenia górnej płyty. Wizualizację dokonano dla obciążenia odpowiadającego maks. wartości siły w impulsie równej 400 kN.

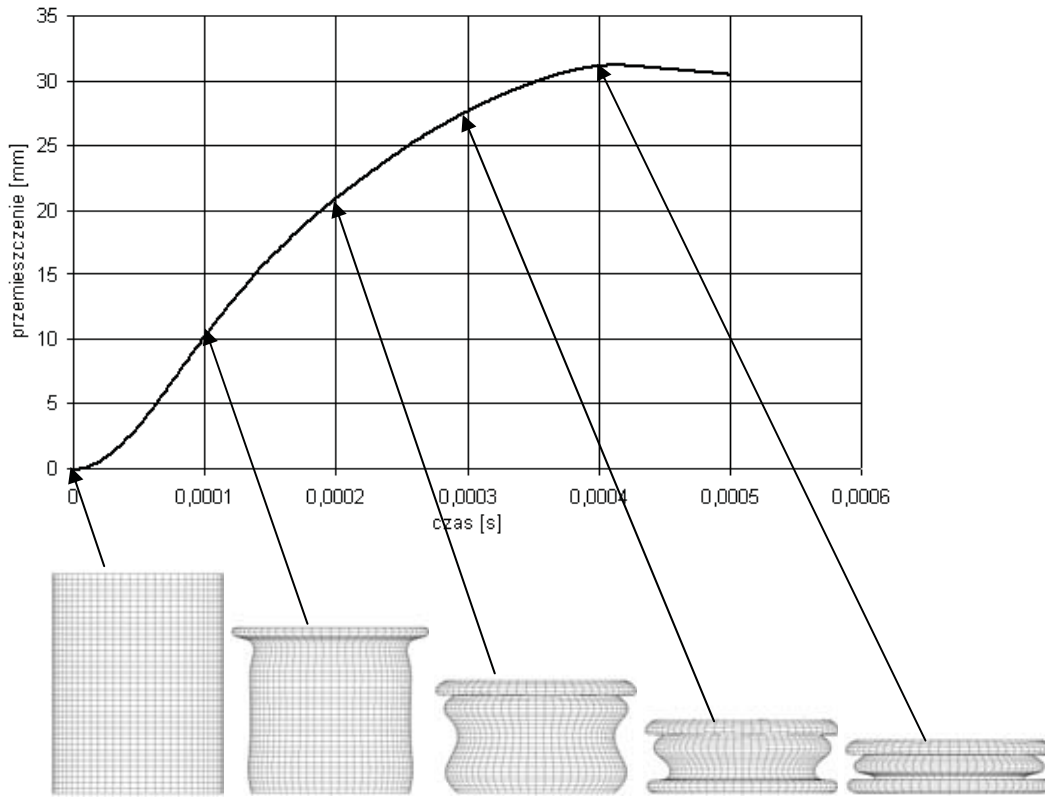
Pełne ściśnięcie elementu cylindrycznego dla impulsu trwającego $100\mu\text{s}$ następuje przy obciążeniu z maksymalną wartością siły w impulsie ok. 400 kN. Rys. 8. przedstawia warstwicę naprężeń zredukowanych i odkształceń plastycznych dla tego przypadku obciążenia.

Dwa poniższe wykresy przedstawiają zmianę w czasie prędkości i przyspieszenia górnej płyty. Maksymalną prędkość płyta uzyskuje po czasie $80\mu\text{s}$ i wynosi ona 142 m/s (rys. 8). Największe przyspieszenie o wartości $3,3 \cdot 10^6 \text{ m/s}^2$ zanotowano po upływie $12\mu\text{s}$ od momentu zadziałania impulsu (rys. 9).

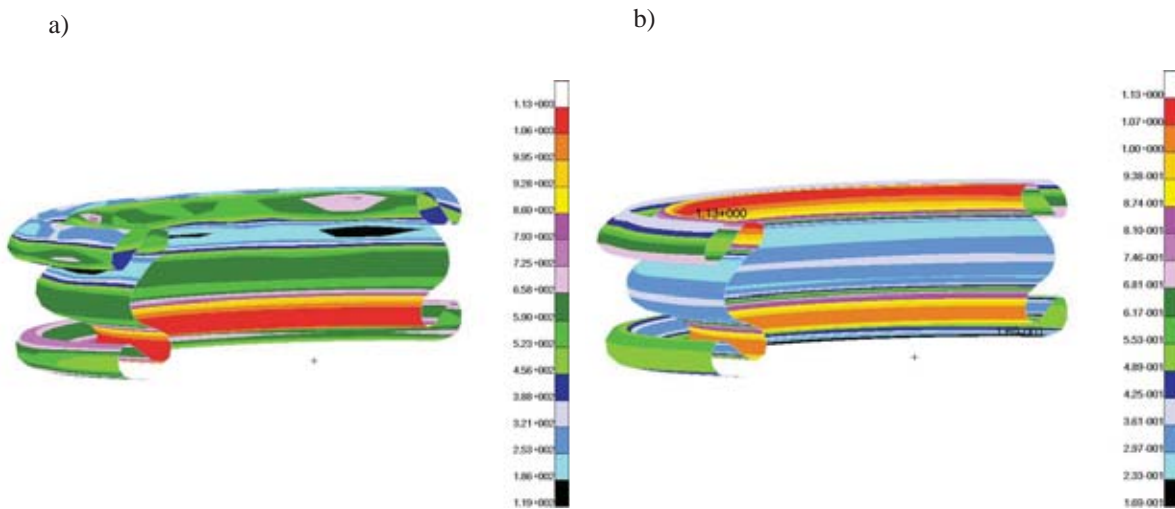
Na rys. 11 zestawiono wykresy przemieszczenia w czasie górnej płyty dla przeliczonych wariantów obciążenia od 100 do 800 kN. Dla obciążenia 100 kN maksymalne skrócenie rurki następuje po czasie $112\mu\text{s}$ i wynosi 1,15 mm, natomiast dla siły 400 kN maksymalne skrócenie rurki wynosi 31,5 mm i zostaje uzyskane po upływie $410\mu\text{s}$. Przy zwiększeniu obciążenia powyżej 400 kN następuje skracanie czasu niezbędnego do całkowitego ściśnięcia próbek. Np. dla obciążenia 800 kN zniszczenie próbki następuje po upływie $151\mu\text{s}$.

Rys. 12 przedstawia reakcję dolnej płyty modelu (rigid body) dla przeliczonych wariantów obciążenia. Należy zauważyć, że czas oddziaływania rurki na płytę dolną we wszystkich

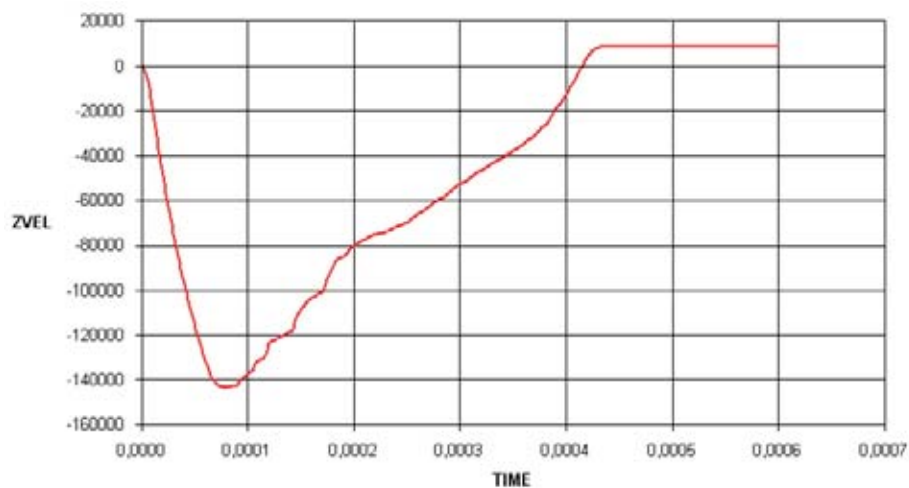
przypadkach jest dłuższy niż czas trwania obciążenia. Czas ten wzrasta wraz ze wzrostem maksymalnej wartości siły w impulsie. Dla siły 100 kN wynosi on 140 μ s, a dla 400kN wynosi już 410 μ s.



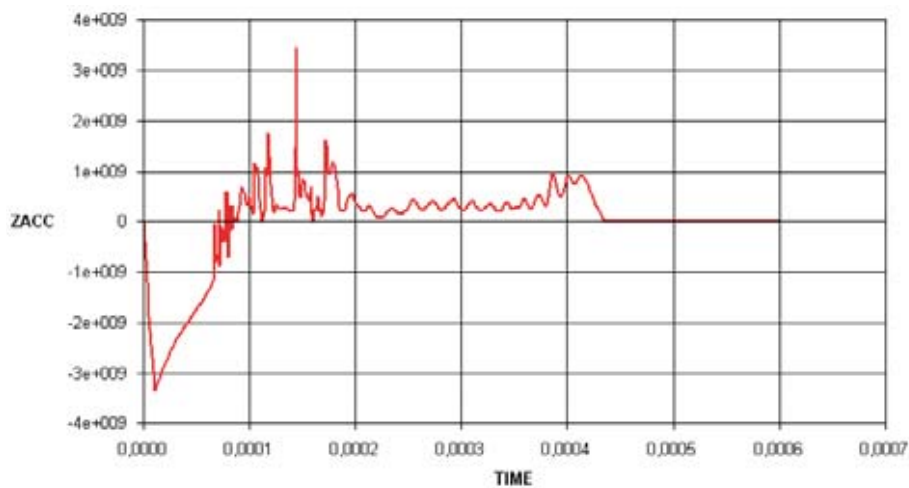
Rys. 7. Przebieg deformacji modelu przy obciążeniu impulsem siły o max. wartości 400 kN
 Fig.7. Time history of deformation of the model loading by the impulse of 400 kN force



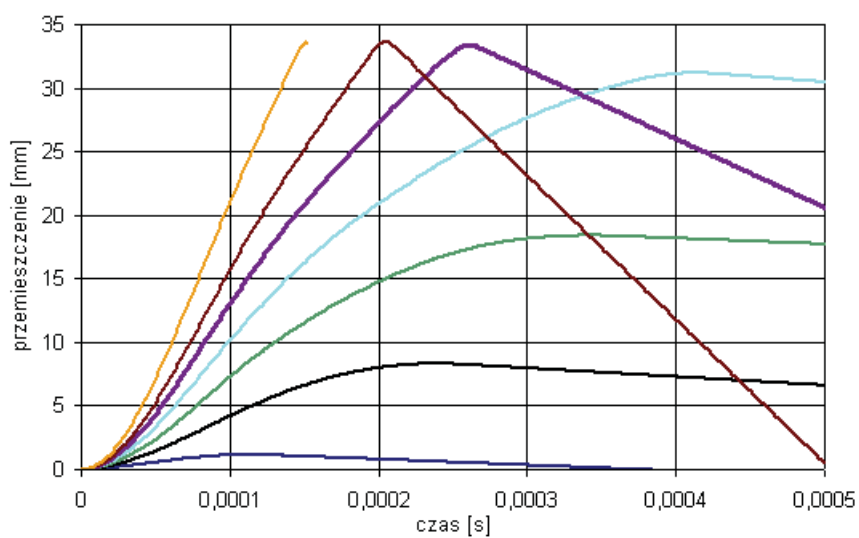
Rys. 8. Warstwy naprężeń zredukowanych *HMH* (a) i odkształceń plastycznych (b) dla maksymalnego skrócenia rurki przy impulsie siły 400 kN
 Fig. 8. Von Misses stresses and plastic strain for final state of deformation of the model loading by the impulse of 400 kN force



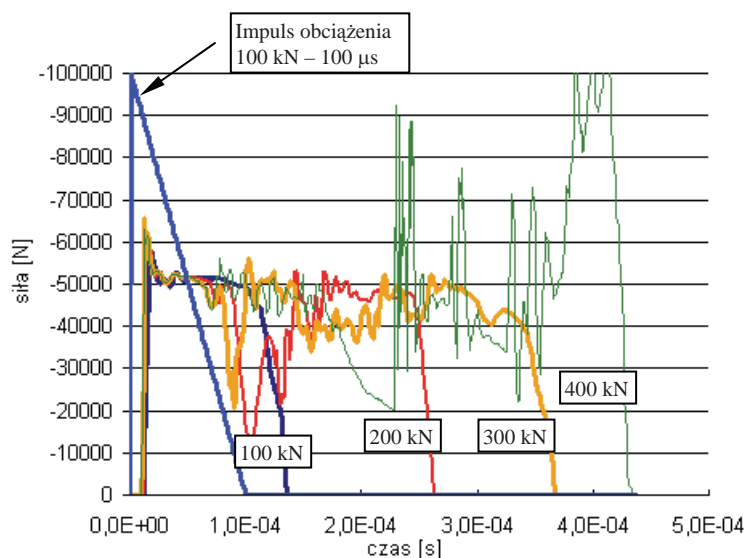
Rys. 9. Prędkość górnej płyty
Fig. 9. Velocity of the top plate



Rys. 10. Przyspieszenie górnej płyty
Fig. 10. Acceleration of the top plate



Rys. 11. Przemieszczenie górnej płyty w funkcji czasu
Fig. 11. Displacement of the top plate versus time



Rys. 12. Reakcja dolnej płyty w funkcji czasu
 Fig. 12. Reaction of the bottom plate versus time

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań podstawowych elementów energochłonnych proponowanej struktury ochronnej. Wykonano badania eksperymentalne w zakresie ściskania statycznego (na maszynie wytrzymałościowej) i obciążeń dynamicznych (z użyciem materiałów wybuchowych). Zbudowano modele numeryczne prezentowanych zagadnień. Uzyskano zgodność postaci deformacji w badaniach doświadczalnych i numerycznych.

Omówione w artykule badania doświadczalne są wstępem do badań stanowiskowych, w których określone zostaną parametry impulsu siły działającej na element cylindryczny. Kolejnym etapem badań doświadczalnych będą eksperymenty z pakietami elementów cylindrycznych, które zostaną przeprowadzone na specjalnie do tych potrzeb zaprojektowanym stanowisku.

Literatura

- [1] MSC.Dytran 2005, MSC.Software Corporation, LA 2004.
- [2] MSC.Patran 2005, MSC.Software Corporation, LA 2004.
- [3] 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.
- [4] Cieśla, P., Dacko, A., Dacko, M., Nowak, J., *Analiza i eksperyment w badaniu udarowej odporności konstrukcji*, Górnictwo Odkrywkowe 5-6, 2006.
- [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 ściskaniu*, IX Konferencja Naukowo-Techniczna Programy MES w komputerowym wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania, Giżycko, Poland 2005.

