



Duże deformacje osiowo ściskanych elementów cienkościennych

PAWEŁ CIEŚLA*, ADAM DACKO*,
MARIAN DACKO, JACEK NOWAK

*Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa,
00-665 Warszawa, ul. Nowowiejska 24
Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych i symulacji numerycznych procesu ściskania osiowego elementów cienkościennych. Badania doświadczalne przeprowadzono przy obciążeniu quasi-statycznym i przy obciążeniu falą uderzeniową wybuchu MW. Obliczenia numeryczne wykonano metodą elementów skończonych w modelach złożonych z elementów powłokowych i trójwymiarowych. Uzyskano dobrą zgodność w zakresie maksymalnej wartości siły zgniatającej próbkę i postaci deformacji próbki w próbach doświadczalnych i symulacjach numerycznych.

Słowa kluczowe: wytrzymałość materiałów, elementy cienkościenne, ściskanie osiowe, metoda elementów skończonych

Symbole UKD: 624.074

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 przejęcie jak największej części energii wybuchu. Elementy cienkościenne, dzięki korzystnym własnościom energochłonnym, znajdują zastosowanie w tworzeniu struktur, których zadaniem jest zmniejszenie wpływu wybuchu ładunku na ochraniający element urządzenia.

Współczesne techniki badawcze materiałów — ze względu na prędkość odkształcenia — możemy podzielić na kilka grup [1], wśród których można wyróżnić: badania na pełzanie, badania quasi-statyczne, badania dynamiczne (pręt Hopkinsona), próby udarowe (test Taylora), próby z obciążeniem falą uderzeniową wybuchu. Badania teoretyczno-numeryczne i eksperymentalne nad elementami energochłonnymi obciążonymi impulsowo prowadzi się od ponad 20 lat, z wyraźnym preferowaniem elementów cylindrycznych. Większość prób dotyczy jednak prędkości obciążenia typu „crash” [2-9], a zatem nieprzekraczających 20 m/s.

Autorzy pracy [2] poddali próbom ściskania osiowego rurki cienkościenne wykonane z aluminium i ze stali. Próby ściskania przeprowadzono z prędkością przemieszczenia nieprzekraczającą 2 mm/min. Zaobserwowano typowy sposób deformacji próbek w postaci harmonijki, przy czym ilość powstałych fałd zależała od długości i średnicy próbki, grubości ścianki i rodzaju materiału, z jakiego wykonano próbkę. Otrzymane doświadczalnie wykresy ściskania posłużyły autorom do obliczeń teoretycznych, mających na celu określenie analitycznych zależności pomiędzy długością próbek a sposobem ich deformacji.

Eksperymentalnym i numerycznym badaniom statycznego i dynamicznego osiowego zgniatania aluminiowych cylindrów poświęcona była praca [3]. Autorzy zastosowali metodę elementów skończonych do symulacji numerycznej badań doświadczalnych. Otrzymano dobrą zgodność w zakresie maksymalnej wartości siły zgniatającej próbkę i liczby tworzących się fałd. Dokonano porównania istniejących rozwiązań teoretycznych z wynikami otrzymanymi na drodze doświadczalnej i numerycznej. Analizowano również wpływ imperfekcji i szybkości odkształcenia na proces formowania się fałd.

Autorzy pracy [4] podjęli próbę optymalizacji kształtu i wielkości cienkościennych elementów cylindrycznych ze względu na zdolność pochłaniania energii. Obliczenia numeryczne przeprowadzono przy użyciu metody elementów skończonych z wykorzystaniem elementów trójwymiarowych systemu DYNA. Prowadząc obliczenia dla elementów o jednakowych masach, lecz różnych rozmiarach, uzyskano trzy postacie deformacji powłoki: osiowosymetryczną, niesymetryczną oraz postać wyboczeniową pręta. Poprawność obliczeń zweryfikowano na drodze eksperymentalnej przy użyciu kamery umożliwiającej zapis obrazu z szybkością 950 klatek na sekundę.

W pracy [9] dokonano przeglądu elementów stosowanych w konstrukcjach mających za zadanie pochłanianie energii uderzenia. Do najczęściej stosowanych w rozwiązaniach konstrukcyjnych Autor zaliczył: profile cienkościenne kwadratowe i okrągłe, stożki ścięte, pręty rozporowe, usztywniacze, elementy cienkościenne konstrukcyjne przypominające swą budową plaster miodu lub kratownicę, elementy kompozytowe.

Prac dotyczących zachowania elementów energochłonnych przy obciążeniu falą uderzeniową wybuchu jest stosunkowo niewiele [10-14]. W pracach [13, 14]

autorzy przedstawiają wyniki badań doświadczalnych i numerycznych prowadzonych nad kwadratową usztywnioną płytą poddaną działaniu obciążenia powstałego w wyniku wybuchu ładunku MW. Badania doświadczalne przeprowadzono przy użyciu wahadła balistycznego. Badane płyty obciążane były falą wybuchu plastycznego materiału wybuchowego PE4. Weryfikację numeryczną przeprowadzono przy użyciu programu ABAQUS. Uzyskano zgodność postaci deformacji płyty w badaniach doświadczalnych i numerycznych.

W niniejszej pracy Autorzy prezentują wybrane wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych na elementach cienkościennych poddanych ścisaniu oraz ich implementację numeryczną.

2. Badania doświadczalne

Badaniom doświadczalnym poddano rury o przekroju kołowym oraz profile cienkościenne o przekroju kwadratowym. W pierwszym etapie badań, w celu określenia parametrów materiałowych, przeprowadzono badania próbek płaskich wyciętych ze ścianek rury. Na podstawie badań statycznych wyznaczono następujące właściwości mechaniczne materiału:

- moduł Younga $E = 215$ Gpa,
- granica plastyczności $R_e = 352$ Mpa,
- moduł wzmocnienia plastycznego $E_T = 745$ Mpa.

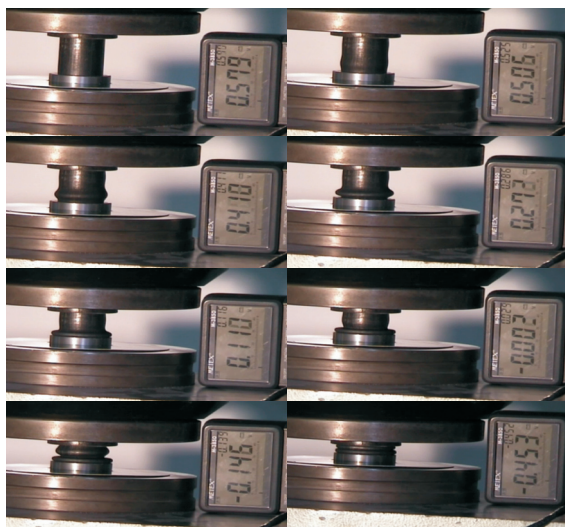
W drugim etapie badań przeprowadzono próby wytrzymałościowe elementów cienkościennych. Badaniom na ściskanie poddano szereg cylindrycznych próbek o średnicy zewnętrznej 32 mm, grubości ścianki 1,5 mm i wysokości od 10 do 40 mm. Doświadczenia wykonano na maszynie wytrzymałościowej Instron oraz na maszynie ZD-40. Próby wytrzymałościowe przeprowadzono z prędkościami z zakresu 5-20 mm/min. Zapis wartości sił ściskających próbkę i przemieszczeń płyty dociskowej dokonywany był z częstotliwością 10 Hz.

W celu porównania przebiegu deformacji próbek w trakcie badań doświadczalnych i obliczeń numerycznych dokonano rejestracji prób kamerą cyfrową. Dodatkowo do układu pomiarowego dołączono miernik napięcia, którego wskazania po przeliczeniu na milimetry określają aktualne skrócenie próbki.

Na rysunku 1 przedstawiono przebieg deformacji rurki o wysokości początkowej 35 mm. Skrócenie próbki można określić na podstawie odczytu wartości z wyświetlacza, przy założeniu, że przemieszczeniu trawersy o 1 mm odpowiada zmiana napięcia o 39 mV. Wartość początkowa 0,579 V odpowiada przemieszczeniu zerowemu.

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono wybrane próbki po zdeformowaniu. Widoczna jest zależność pomiędzy długością początkową próbki a ilością fałd powstałych w wyniku ścisania. W próbkach krótszych (10-25 mm) wytworzyła się jedna fałda, w próbkach dłuższych (30-40 mm) wykształciły się dwie fałdy. Na

rysunku 4 przedstawiono dla wybranych próbek otrzymane zależności pomiędzy siłą ściskającą próbki a skróceniem próbek.



Rys. 1. Proces ściskania rurki o długości początkowej 35 mm

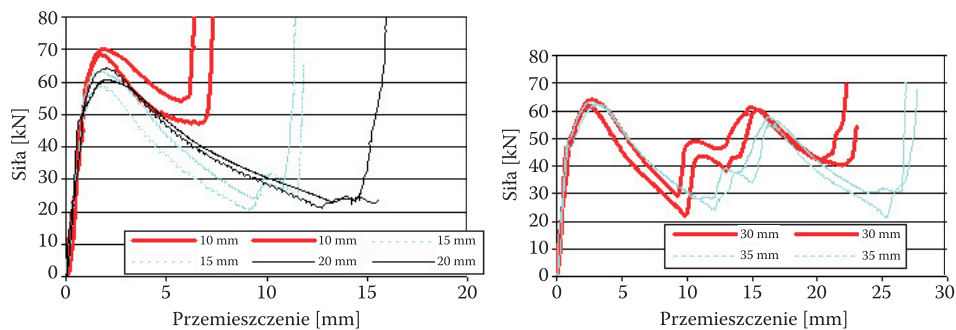


Rys. 2. Próbkki o wysokościach początkowych 10, 15, 20, 25 mm po zdeformowaniu



Rys. 3. Próbkki o wysokościach początkowych 30, 33, 35, 37 mm po zdeformowaniu

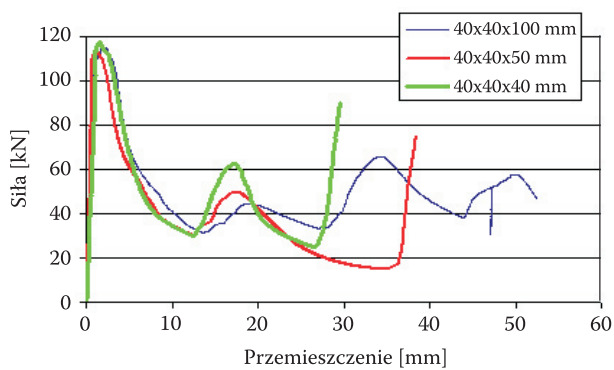
Przeprowadzono również badania profili kwadratowych $40 \times 40 \times 2$ mm. Do badań przygotowano 3 próbki o wysokościach 40, 50 i 100 mm. Na rysunku 5 przedstawiono zdeformowane próbki o wysokości początkowej 100 mm, natomiast otrzymane zależności siła-przemieszczenie dla wykonanych doświadczeń zaprezentowano na rysunku 6.



Rys. 4. Zależność siła-przemieszczenie dla wybranych próbek o przekroju kołowym



Rys. 5. Próbką o wysokości początkowej 100 mm po zdeformowaniu



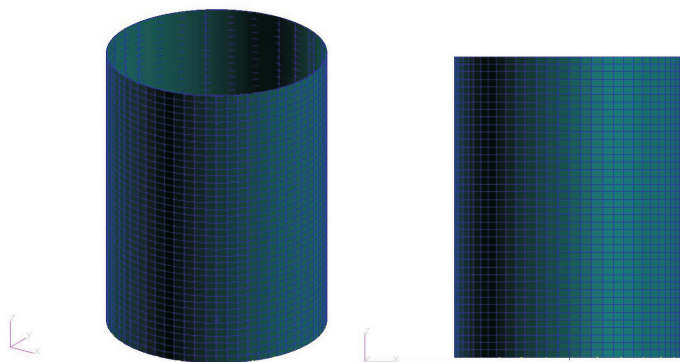
Rys. 6. Zależność siła-przemieszczenie dla profili kwadratowych

3. Symulacja numeryczna

3.1. Model powłokowy

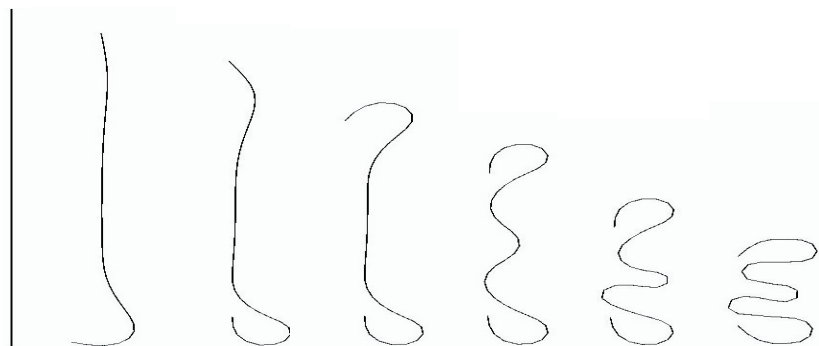
Modelując zagadnienie ściskania elementów cienkościennych, Autorzy postawili sobie za cel uzyskanie zgodności postaci deformacji oraz wykresów

siła-przemieszczenie dla modeli numerycznych i prób doświadczalnych. W tym celu utworzono kilka modeli numerycznych powłokowych i bryłowych, badając ich zachowanie w trakcie obciążania. Na rysunku 7 przedstawiono model dla rurki o długości 40 mm, wykonany 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). Parametry materiałowe przyjęto zgodnie z wartościami wyznaczonymi w badaniach doświadczalnych. Obliczenia wykonano programem MSC.Dytran.



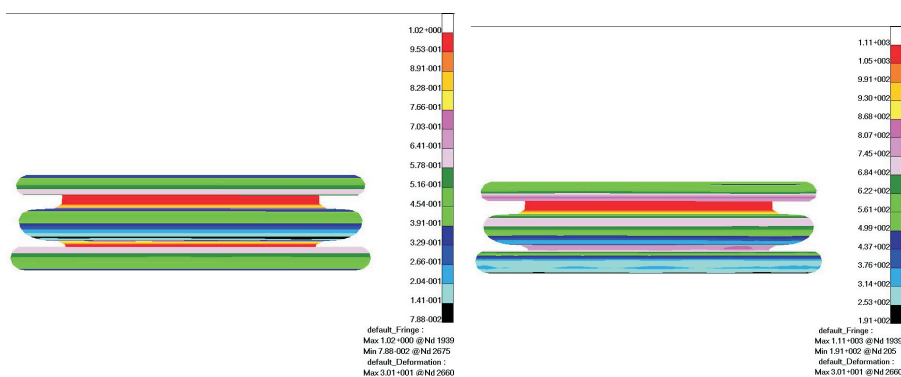
Rys. 7. Model powłokowy dla rurki 40 mm

Na rysunku 8 przedstawiono kolejne postacie deformacji tworzącej powłoki. Wizualizację wykonano dla paska elementów wyciętego ze ścianki modelu. Kolejne postacie deformacji przedstawiają model przy skróceniu o 5, 10, 15, 20, 25, 30 mm.

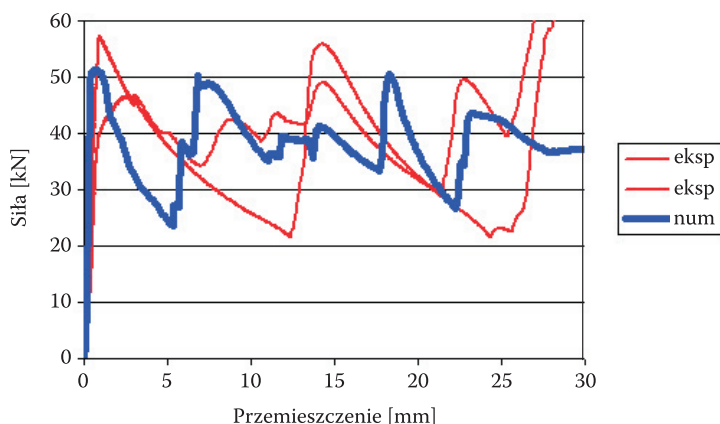


Rys. 8. Przebieg deformacji w modelu powłokowym

Na rysunku 9 przedstawiono warstwy odkształceń plastycznych (a) i naprężeń zastępczych wg hipotezy Hubera (b). Odkształcenia plastyczne występujące w modelu osiągają 100%, natomiast maksymalne naprężenia zredukowane HMH przekraczają wartość 1100 MPa. Wykresy zależności siła ściskająca — skrócenie rurki dla obliczeń numerycznych i badań doświadczalnych zestawiono na rysunku 10. W modelowaniu numerycznym uzyskano zbliżoną wartość maksymalnej siły występującej podczas tworzenia się pierwszej fałdy. Kształt wykresu otrzymanego w obliczeniach numerycznych odstaje od wykresów otrzymanych na drodze doświadczalnej, gdyż postacie deformacji modelu numerycznego i próbek użytych w badaniach różnią się liczbą tworzących się fałd. W badaniach doświadczalnych otrzymano po ściśnięciu rurki dwie fałdy, natomiast w obliczeniach numerycznych w końcowej fazie obliczeń wykształciły się trzy fałdy.



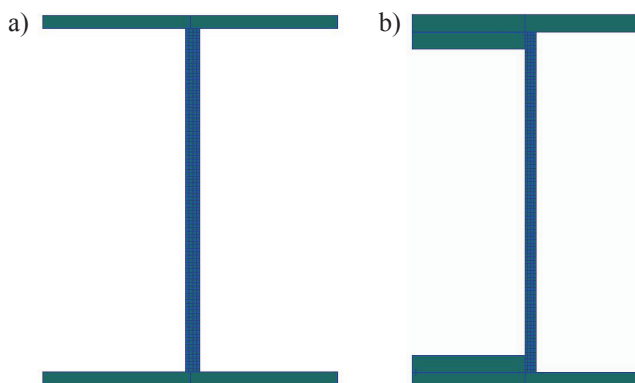
Rys. 9. Odształcenia plastyczne (a) i naprężenia zredukowane wg hipotezy Hubera (b) w modelu powłokowym przy przemieszczeniu płyt ściskających o 30 mm



Rys. 10. Wykres porównawczy zależności siła-przemieszczenie uzyskany w eksperymencie (eksp) i modelu numerycznym (num)

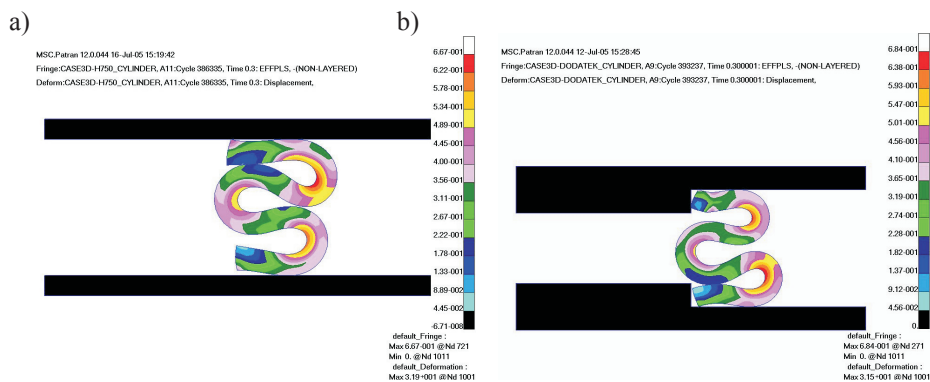
3.2. Modele bryłowe

W związku z występującymi rozbieżnościami utworzono model złożony z elementów bryłowych. Ze względu na rozmiary zadania i czas obliczeń oraz wykorzystując fakt, że zadanie jest osiowosymetryczne, postanowiono modelować jedynie wycinek rurki o szerokości kątowej 1° (rys. 11a). W celu określenia wpływu warunków brzegowych na stan odkształcenia i naprężenia utworzono model, w którym wprowadzono dodatkowe elementy (rys. 11b) uniemożliwiające przesuw końców rurek do środka. Jest to zgodne z warunkami doświadczenia, w którym użyto podkładek z występem w kształcie krążka, pomiędzy którymi umieszczano badane rurki.



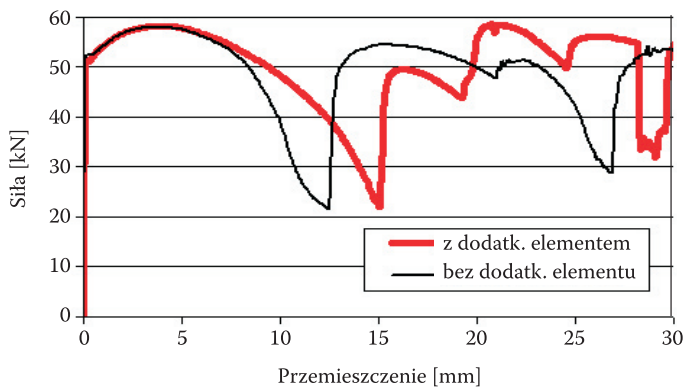
Rys. 11. a) model z elementów bryłowych; b) model bryłowy z dodatkowymi elementami

Na rysunkach 12a i 12b zestawiono warstwy odkształceń plastycznych dla modeli z rysunku 11 przy przemieszczeniu górnej płyty dociskowej o 30 mm. Wartości maksymalnych odkształceń plastycznych są zbliżone, natomiast brak dodatkowych

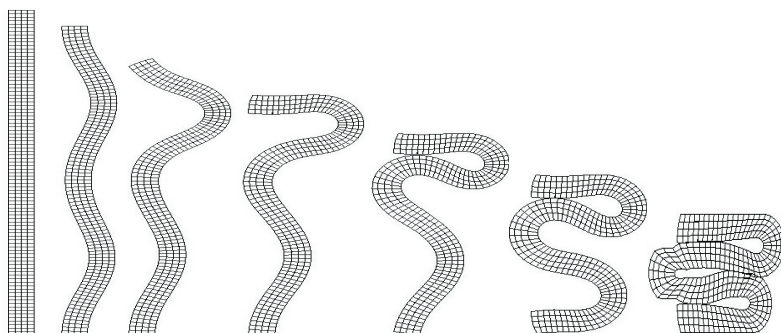


Rys. 12. Warstwy odkształceń plastycznych dla modeli bryłowych

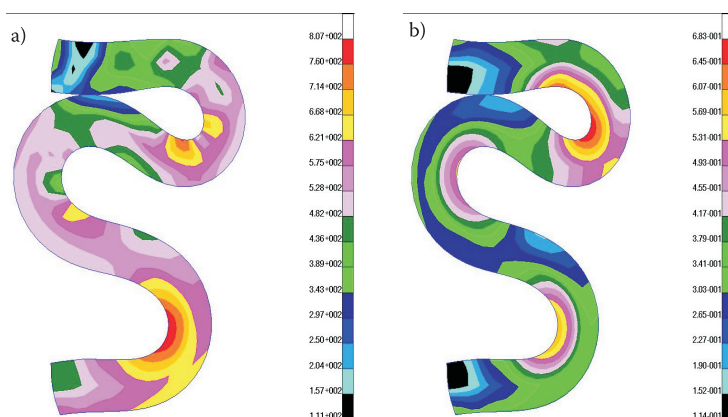
elementów powoduje przemieszczenie się krawędzi rurki do środka. Wpływ dodatkowych elementów na wykres siła-przemieszczenie zilustrowano na rysunku 13.



Rys. 13. Wpływ dodatkowego elementu na zależność siła-przemieszczenie



Rys. 14. Proces deformacji modelu bryłowego rurki o długości początkowej 37 mm

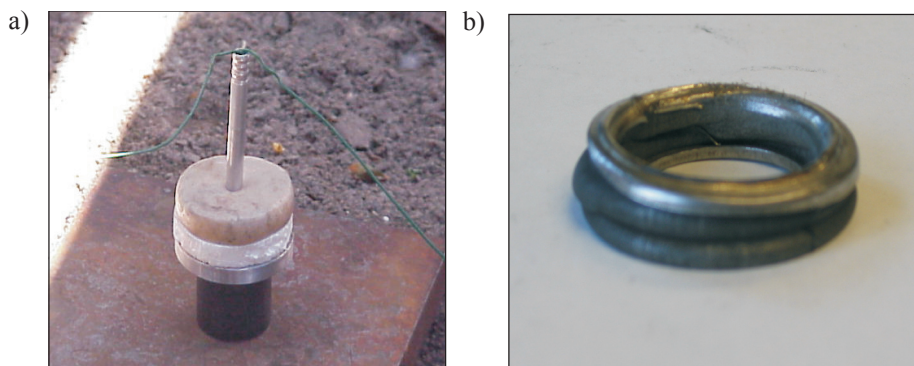


Rys. 15. Stan naprężenia (a) i odkształcenia (b) w modelu bryłowym rurki 37 mm przy skróceniu o 25 mm

Przebieg deformacji w modelu bryłowym rurki o długości początkowej 37 mm przedstawiono na rysunku 14. Kolejne widoki przedstawiają model przy skróceniu o 5, 10, 15, 20, 25 i 30 mm. W modelu tym uzyskano zgodność co do postaci deformacji po ściśnięciu i liczby powstałych fałd. Na rysunku 15 przedstawiono mapy odkształceń plastycznych oraz naprężeń zredukowanych przy przemieszczeniu płyty dociskowej o 25 mm.

4. Obciążenie falą uderzeniową wybuchu MW

Przeprowadzono wstępne badania doświadczalne próbek poddanych obciążeniu falą uderzeniową. Na rysunku 16a przedstawiono stanowisko do badań próbek obciążanych wybuchem. Przeprowadzono serię prób zmieniając moc ładunku oraz grubość płytki umieszczonej pomiędzy ładunkiem a rurką. Na rysunku 16b przedstawiono zdeformowaną rurkę po wybuchu. Postać deformacji rurki oraz liczba powstałych fałd odpowiadają wynikom uzyskanym w badaniach statycznych i modelach numerycznych. Planuje się przeprowadzenie dalszych badań w celu określenia parametrów fali uderzeniowej i wykonania odpowiednich obliczeń w systemie MSC.Dytran.



Rys. 16. Stanowisko do badań doświadczalnych przy obciążaniu falą detonacyjną (a) oraz zdeformowana rurka (b)

5. Wnioski

W artykule zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych profili cienkościennych poddanych statycznym i dynamicznym obciążeniom osiowym. Badania te stanowią wstęp do prac nad utworzeniem warstwy ochronnej złożonej z elementów cylindrycznych. Przeprowadzone symulacje numeryczne dowiodły, że dobór modelu numerycznego prezentowanych zagadnień nie jest rzeczą trywialną. Osobnym problemem jest ustalenie parametrów materiałowych

(np. modułu wzmocnienia plastycznego), gdyż w doświadczeniu odkształcenia plastyczne osiągają przy zerwaniu próbki poziom kilkunastu procent. W obliczeniach numerycznych odkształcenia plastyczne przekraczają zaś 100%. Stwierdzono również dużą wrażliwość rozwiązania na zmianę poszczególnych parametrów modelu (np. współczynnik tarcia pomiędzy kontaktującymi się powierzchniami).

Planowane są dalsze badania doświadczalne w kierunku określenia sił obciążających element cylindryczny w trakcie wybuchu ładunku MW oraz implementacja numeryczna tego zjawiska.

Artykuł wpłynął do redakcji 16.02.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano we wrześniu 2006 r.

LITERATURA

- [1] J. E. FIELD, S. M. VALLEY, W. G. PROUD, H. T. GOLDREIN, C. R. SIVIOUR, *Review of experimental technique for high rate deformation and shock studies*, International Journal of Impact Engineering, 30, 2004, 725-775.
- [2] N. K. GUPTA, R. VELMURUGAN, *An analysis of axi-symmetric Axial collapse of round tubes*, Thin-Walled Structures, 22, 1995, 261-274.
- [3] D. AL. GALIB, A. LIMAM, *Experimental and numerical investigation of static and dynamic axial crushing of circular aluminum tubes*, Thin-Walled Structures, 42, 2004, 1103-1137.
- [4] K. YAMAZAKI, J. HAN, *Maximization of the crushing energy absorption of cylindrical shells*, Advanced in Engineering Software, 32, 2000, 425-434.
- [5] L. SANG-HOON, K. HEON-YOUG, OH. SOO-IK, *Cylindrical tube optimisation using response surface method based on stochastic process*, Journal of Materials Technology, 130-131, 2002, 409-496.
- [6] J. D. REID, *Towards the understanding of material property influence on automotive crash structures*, Thin-Walled Structures, 24, 1996, 285-313.
- [7] N. K. GUPTA, *Some aspects of axial collapse of cylindrical thin-walled tubes*, Thin-Walled Structures, 32, 1998, 111-126.
- [8] M. LANGSETH, O. S. HOPPERSTAD, A. G. HANSEN, *Crash behaviour of thin-walled aluminium members*, Thin-Walled Structures, 32, 1998, 127-150.
- [9] A. A. A. ALGHAMDI, *Collapsible impact energy absorbers: an overview*, Thin-Walled Structures, 39, 2001, 189-213.
- [10] R. G. TELLING-SMITH, G. N. NURICK, *The Deformation and Tearing of Thin Circular Plates Subjected to Impulsive Loads*, International Journal of Impact Engineering, 11, 1991, 77-91.
- [11] G. N. NURICK, M. D. OLSON, J. R. FAGNA, A. LEVIN, *Deformation and Tearing of Blast-Loaded Stiffened Square Plates*, International Journal of Impact Engineering, 16, 1995, 273-291.
- [12] G. N. NURICK, M. E. GELMAN, N. S. MARSHALL, *Tearing of Blast loaded Plates with Clamped Boundary Conditions*, International Journal of Impact Engineering, 18, 1996, 803-827.
- [13] S. CHUNG KIM YUEN, G. N. NURICK, *Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened plates, Part I: Subjected to uniform blast load*, International Journal of Impact Engineering, 31, 2005, 55-83.
- [14] G. S. LANGDON, S. CHUNG KIM YUEN, G. N. NURICK, *Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened plates, Part II: localised blast loading*, International Journal of Impact Engineering, 31, 2005, 85-111.

- [15] X. TENG, T. WIERZBICKI, S. HIERMAIER, I. ROHR, *Numerical prediction of fracture in the Taylor test*, International Journal of Solids and Structures, 42, 2005, 2929-2948.
- [16] A. G. EVANS, J. W. HUTCHINSON, N. A. FLECK, M. F. ASHBY, H. N. G. WADLEY, *The topological design of multifunctional cellular metals*, Progress in Material Science, 46, 2001, 309-327.
- [17] N. JONES, *Structural Impact*, Cambridge University Press, Cambridge, 1989.
- [18] J. HENRYCH, *The Dynamics of Explosion and Its Use*, Academia Prague, Praga, 1979.
- [19] E. WŁODARCZYK, *Wstęp do mechaniki wybuchu*, PWN, Warszawa, 1994.
- [20] R. KRZEWIŃSKI, *Dynamika wybuchu. Część I. Metody określania obciążeń*, WAT, Warszawa, 1982.
- [21] R. KRZEWIŃSKI, *Dynamika wybuchu. Część II. Działanie wybuchu w ośrodkach inercyjnych*, WAT, Warszawa, 1983.
- [22] MSC.Dytran 2005, MSC.Software Corporation, LA, 2004.
- [23] MSC.Patran 2005, MSC.Software Corporation, LA, 2004.
- [24] P. CIEŚLA, A. DACKO, J. NOWAK, *Axial crush of thin walled tubes — experiment and simulation*, 16th International Conference on Computer Methods in Mechanics, Częstochowa, 2005.

P. CIEŚLA, A. DACKO, M. DACKO, J. NOWAK

Large deformations of axially-compressed thin-walled structural elements

Abstract. The paper presents the results of experimental investigations and numerical simulations of axial compression of thin-walled structural elements. Experiments were carried out for quasi-static loads and the load of shockwave of explosion. The numerical analyses were based on both shell- and solid-element models. Good correlation of maximum axial force for specimen crush and deformation shape was obtained in experiments and numerical simulation.

Keywords: strength of materials, thin-walled elements, axial compression, finite element method

Universal Decimal Classification: 624.074