

INFLUENCE OF BOUNDARY CONDITION ON DEFORMATION OF THIN-WALLED TUBES UNDER AXIAL COMPRESSION

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 metal tubes are a typical component of shields absorbing the energy of the explosive shock wave. The key factor to be considered is the method of binding the tubes with a shield plate and protected structure. It greatly influences energy absorbing capacity of the structure.

The paper presents experiments of static load of thin-walled tubes under axial compression. The specimen were steel (R35) tubes of outer diameter 20 mm, wall thickness 1 mm and length 35 mm, attached to two end plates. The attachment was a combination of simple support (SS) and fixed connection (FIX) of edges to plates (SS-SS, SS-FIX, FIX-FIX). The fixed connection was obtained by soldering (either continuous or in some points), using steel, brass and silver alloy. The influence of the weld type on the resulting compression diagram and energy absorbing capacity of the structure was monitored.

The numerical simulation was performed using MSC.Dytran. Numerical models used solid elements and elastic-plastic material with work hardening. Numerical simulation results were compared to experimental values from static experiments

Keywords: cylindrical shell, large plastic deformation, axial compression, boundary condition

WPLYW WARUNKÓW BRZEGOWYCH NA PROCES DEFORMACJI OSIOWO-ŚCISKANYCH POWŁOK CYLINDRYCZNYCH

Streszczenie

Cienkościenne metalowe elementy cylindryczne znajdują zastosowanie w tworzeniu struktur ochronnych pochłaniających energię fali detonacyjnej wybuchu. Istotnym zagadnieniem jest sposób mocowania tych elementów do płyty ochronnej i konstrukcji chronionej, gdyż ma on znaczny wpływ na energochłonność struktury.

W artykule przedstawiono statyczne badania doświadczalne elementów cylindrycznych poddanych ścisaniu. Przedmiotem badań były rurki o średnicy zewn. 20mm, grubości ścianki 1mm i wysokości 35mm wykonane ze stali R35. Elementy ściskane umieszczano pomiędzy dwoma krążkami. Próbom poddano elementy o brzegach swobodnych, elementy zamocowane do jednego z krążków i elementy dwustronnie utwierdzone. Utwierdzenie realizowano poprzez lutowanie punktowe lub ciągle przy pomocy spoin ze stali, mosiądzu i stopu srebra. Badano wpływ rodzaju spoiny na krzywą ściskania i zdolność absorpcji energii.

Przy użyciu oprogramowania MSC.Dytran przeprowadzono symulację numeryczną opisanych zagadnień. Stworzono pełny model krążków i rurki stosując do tego celu elementy bryłowe typu solid. Przyjęto biliniowy model materiału z umocnieniem plastycznym. Porównano postacie deformacji badanych próbek poddanych statycznemu ścisaniu na maszynach wytrzymałościowych z wynikami otrzymanymi na drodze numerycznej.

Słowa kluczowe: powłoka cylindryczna, duże przemieszczenia i odkształcenia plastyczne, osiowe ściskanie, warunki brzegowe

1. Wprowadzenie

Cienkościenne metalowe elementy cylindryczne znajdują zastosowanie w tworzeniu struktur ochronnych zabezpieczających konstrukcję przed skutkami wybuchu ładunku materiału wybuchowego. Oprócz cech geometrycznych (średnica i wysokość elementu cylindrycznego,

grubość ścianki), istotną rolę w procesie przejmowania energii odgrywa sposób mocowania tych elementów do płyty ochronnej i konstrukcji chronionej. W niniejszej pracy przedstawiono statyczne badania eksperymentalne na ściskanie elementów cylindrycznych o końcach swobodnych lub utwierdzonych poprzez lutowanie punktowe lub ciągłe. Przeprowadzono również próby numerycznego modelowania warunków brzegowych dla tego zagadnienia.

2. Badania eksperymentalne

Przedmiotem badań były rurki o średnicy zewn. 20mm, grubości ścianki 1mm i wysokości 35mm wykonane ze stali R35. Próby przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron SATEC. Elementy ściskane umieszczano pomiędzy dwoma krążkami. Próby przeprowadzono z prędkością przesuwu trawersy równą 10mm/min. Zapis wartości sił ściskających próbkę i przemieszczeń płyty dociskowej dokonywany był z częstotliwością 10 Hz. Koniec próby następował w momencie przekroczenia przez siłę ściskającą wartości 50kN. Próbom poddano elementy o brzegach swobodnych, elementy zamocowane do jednego z krążków i elementy dwustronnie utwierdzone. Utwierdzenie realizowano poprzez lutowanie. Wykonano spoiny pachwinowe - punktowe lub ciągłe - ze stali i mosiądzu.

Zastosowano następujące oznaczenia próbek:

A – próbki o końcach swobodnych;

B – próbki połączone z krążkiem na jednym z brzegów rurki;

C – próbki obustronnie połączone z krążkiem;

Przykładowe przebiegi procesu ściskania dla rurek dwustronnie utwierdzonych przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przebieg procesu ściskania rurek ze spoiną ciągłą wykonaną ze stali (a) i mosiądzu (b)

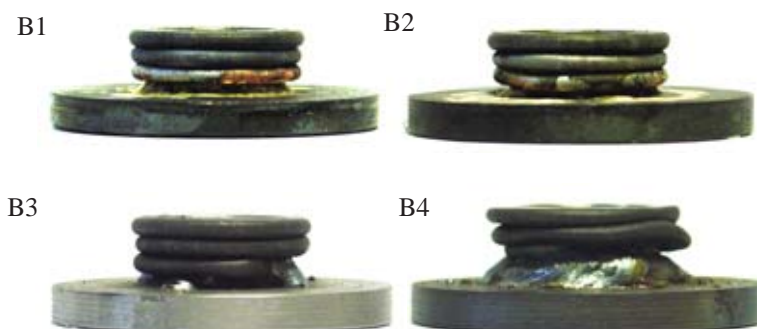
Fig. 1. Compression of thin-walled tubes attached to two end plates by soldering using steel (a) and brass (b)

W wyniku procesu ściskania elementu cylindrycznego o końcach swobodnych - przy zapewnieniu prostokątności powierzchni dociskowych i brzegów elementu cylindrycznego - dochodzi do powstania symetrycznej postaci deformacji. Liczba tworzących się fałd zależy od wysokości elementu cylindrycznego. W badanym przypadku są to trzy fałdy zewnętrzne (rys. 2). Zmiana warunków brzegowych poprzez wprowadzenie spoiny prowadzi do mniejszych lub większych różnic w kształtach zdeformowanych próbek. W wyniku procesu lutowania może dojść do zaburzenia prostokątności powierzchni krążka i brzegów rurki. Zmienia się również

swobodna długość próbki podlegająca odkształceniu. Na rys. 3 przedstawiono próbki ze spoinami jednostronnymi. W próbkach B1 i B2 zastosowano spoiny ciągłe wykonane z mosiądzu. W próbce B3 element cylindryczny połączono z krążkiem spoiną 4-punktową wykonaną ze stali. W próbce B4 zastosowano spoinę stalową ciągłą. Kształt zdeformowanych próbek B1 i B2 jest zbliżony do kształtu próbki o końcach swobodnych. W przypadku próbki B3 dochodzi do zdeformowania dolnej fałdy w okolicach punktów lutowania. Natomiast w przypadku próbki B4 zbyt gruba spoina spowodowała skrócenie długości rurki podatnej na odkształcenie i doszło do utworzenia się tylko dwóch fałd zewnętrznych.



Rys. 2. Postać deformacji próbki o końcach swobodnych (A)
Fig. 2. Deformation mode of free edge specimen (A)



Rys. 3. Postacie deformacji próbek lutowanych na jednym brzegu (B1-B4)
Fig. 3. Deformation mode of specimens attached by soldering to one end plate (B1-B4)

Jeszcze większe różnice w sposobie deformacji pojawiają się w przypadku elementów cienkościennych, do których przytwierdzono krążki na obu końców. Na rys. 4 przedstawiono sześć zdeformowanych próbek w których zastosowano następujące spoiny:

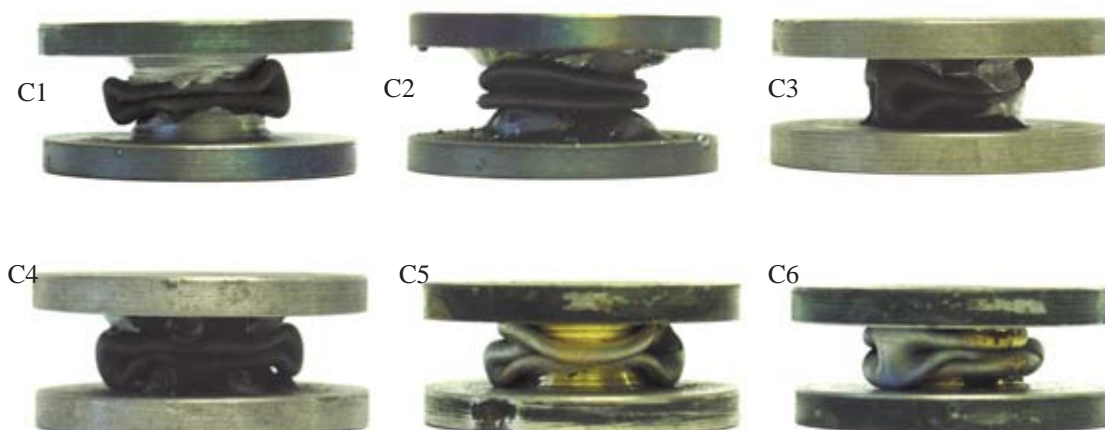
- próbka C1 ze spoiną stalową ciągłą (dodatkowo spoina została oszlifowana w celu zmniejszenia jej grubości),
- próbka C2 ze spoiną stalową ciągłą,
- próbka C3 ze spoiną stalową 4-punktową (dodatkowo oszlifowana),
- próbka C4 ze spoiną stalową 4-punktową ,
- próbka C5 ze spoiną ciągłą z mosiądzu (dodatkowo oszlifowana),
- próbka C6 ze spoina 4-punktową z mosiądzu (dodatkowo oszlifowana).

Jedynie w przypadku próbki C2 doszło do utworzenia na całym obwodzie rurki dwóch fałd zewnętrznych. W pozostałych przypadkach postać deformacji jest wyraźnie niesymetryczna.

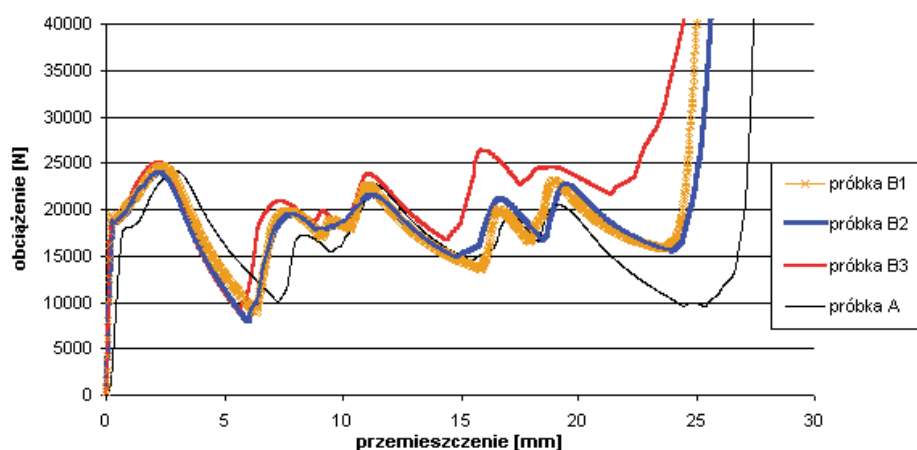
Zbadano wpływ rodzaju spoiny na zależność siła-przemieszczenie i zdolność absorpcji energii. Na rys. 5 i 6 przedstawiono zarejestrowane wykresy ściskania dla próbek jednostronnie i dwustronnie lutowanych i zestawiono je z wykresami dla próbek o końcach swobodnych.

Na rys. 7 zestawiono wartości energii absorbowanej przez próbki w procesie ściskania. Najmniejszą zdolność absorpcji energii zaobserwowano dla próbki C2 (spoina stalowa ciągła dwustronna) i wynosi ona 403 J. Największą zaś wartość równą 548 J zanotowano dla próbki B3 (spoina stalowa punktowa jednostronna). Różnica w absorpcji energii dla tych próbek wynosi

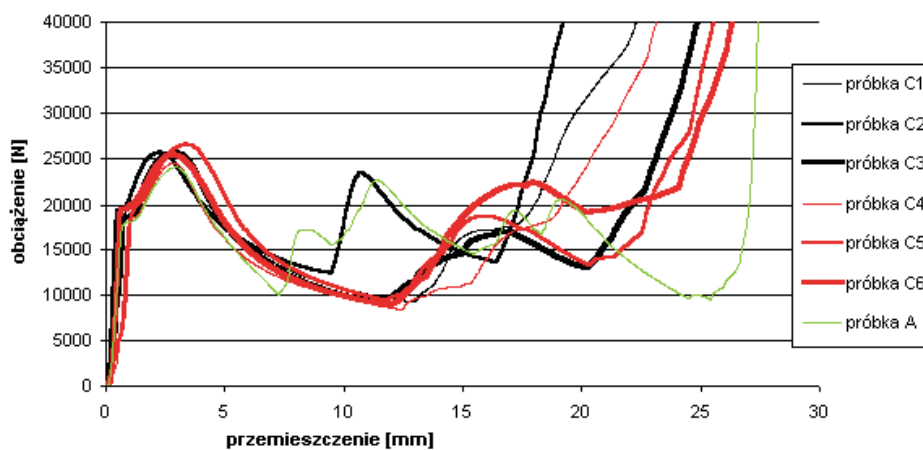
ponad 30%. Dla porównania energia absorbowana przez próbkę o brzegach swobodnych wynosi 455 J.



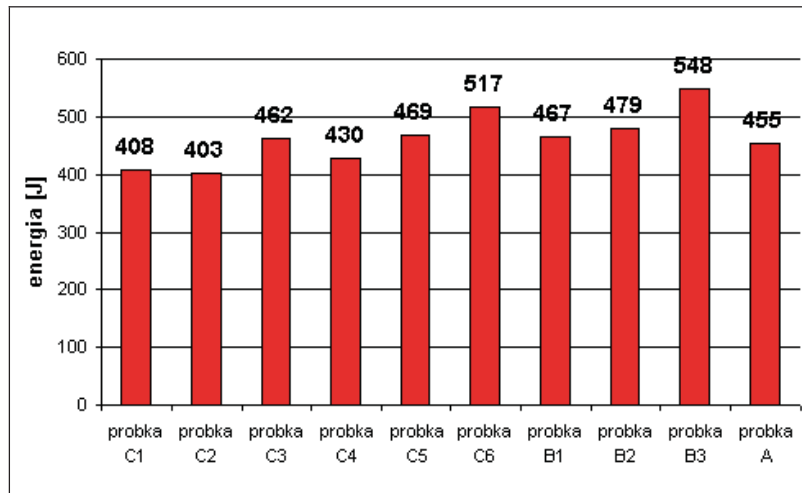
Rys. 4. Postacie deformacji próbek lutowanych na obu brzegach (C1-C6)
 Fig. 4. Deformation mode of specimens attached by soldering to two end plates (C1-C6)



Rys. 5. Wykresy ściskania dla próbek jednostronnie utwierdzonych
 Fig. 5. Experimental load compression curves of specimens attached to one end plate by soldering



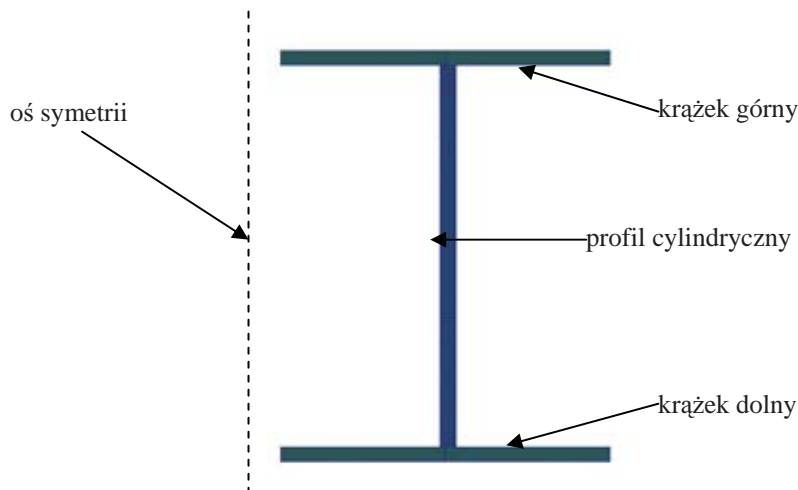
Rys. 6. Wykresy ściskania dla próbek obustronnie utwierdzonych
 Fig. 6. Experimental load compression curves of specimens attached to two end plates by soldering



Rys. 7. Energia absorbowana przez próbki w procesie ściskania
 Fig. 7. Energy absorption in compression tests of specimens

3. Symulacja numeryczna

Symulację numeryczną procesu ściskania cienkościennych elementów cylindrycznych przeprowadzono przy użyciu programu MSC.Dytran. Ze względu na symetrię zamodelowano jedynie wycinek (rys. 8). Do modelowania wycinka rurki o szerokości kątowej 1° użyto elementów bryłowych z odpowiednio narzuconymi więzami wynikającymi z warunków symetrii. Siatka elementów utworzona jest z czterech warstw na grubości ścianki rurki i jednego elementu po obwodzie. Krążki modelowano jako ciała nieodkształcalne (rigid body object). Dolny krążek pozostawał nieruchomy, natomiast górny krążek przemieszczał się ze stałą prędkością. Zapewniono kontakt pomiędzy krążkami a rurką oraz pomiędzy elementami modelującymi rurkę (self-contact).



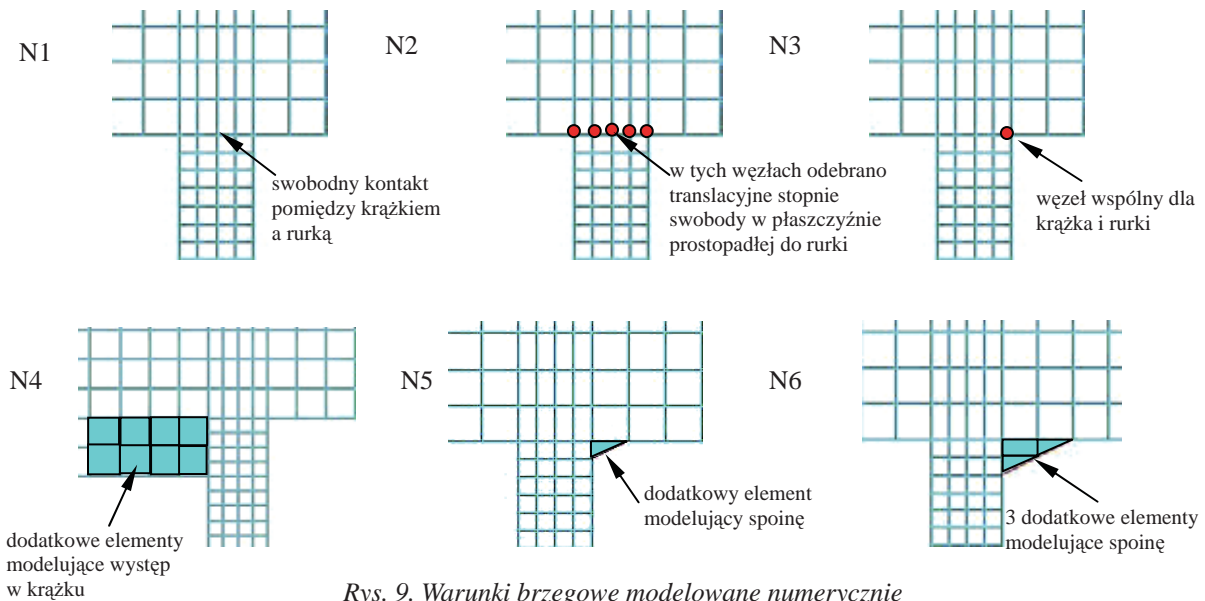
Rys. 8. Model bryłowy wycinka rurki o szerokości kątowej 1°
 Fig. 8. Numerical model of 1° cylinder sector

Badając wpływ warunków brzegowych na sposób deformacji rozpatrzono sześć wariantów połączenia brzegów rurki z krążkami (rys. 9):

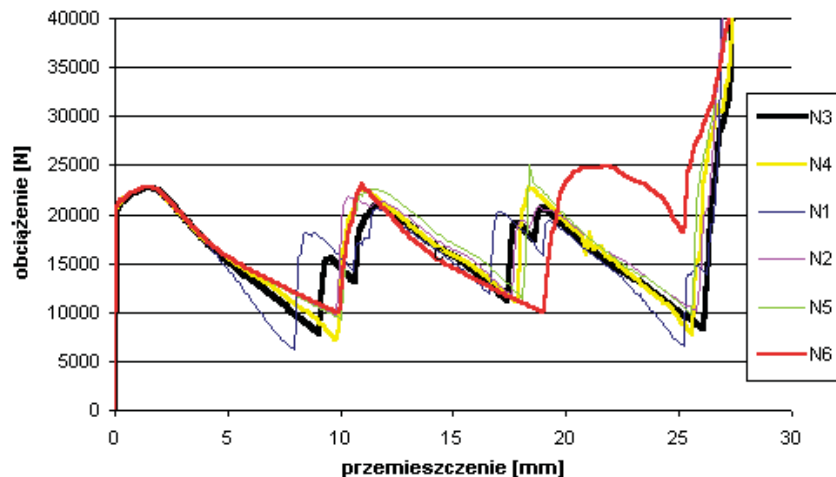
- swobodny kontakt pomiędzy krążkiem a rurką (wariant oznaczony przy wizualizacji wyników jako N1),
- węzłom leżącym na końcach rurek odebrano więzy translacyjne w płaszczyźnie prostopadłej do rurki (N2),
- połączono krążek z rurką tylko w 1 węzle leżącym na zewn. ścianie rurki (N3),

- utworzono występ w krążku o wysokości 1mm od strony wewnętrznej rurki (identyczny zabieg stosowano w części badań doświadczalnych w celu otrzymania symetrycznej postaci odkształcenia) (N4),
- utworzono dodatkowy element 6-węzłowy imitujący spoinę, który połączył zewnętrzną część rurki z krążkiem (N5),
- zmodyfikowano wariant N6 powiększając spoinę do 3 elementów (N6).

Dla wszystkich przypadków obliczeń przyjęto jednakowe wartości współczynnika tarcia statycznego ($\mu_{st}=0.2$) i kinetycznego ($\mu_k=0.1$) pomiędzy kontaktującymi się powierzchniami w modelu.

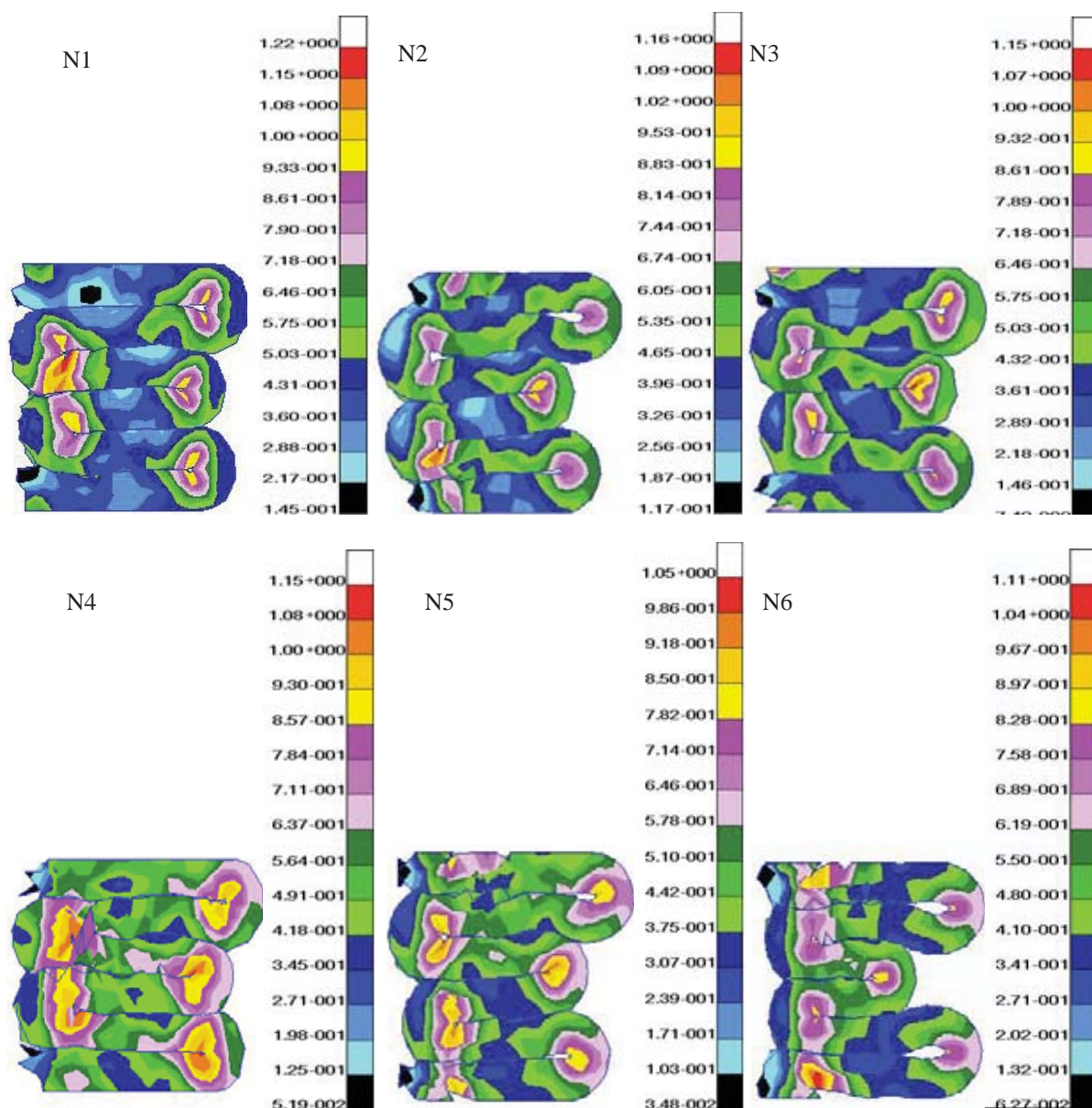


Rys. 9. Warunki brzegowe modelowane numerycznie
Fig. 9. Boundary condition in numerical models

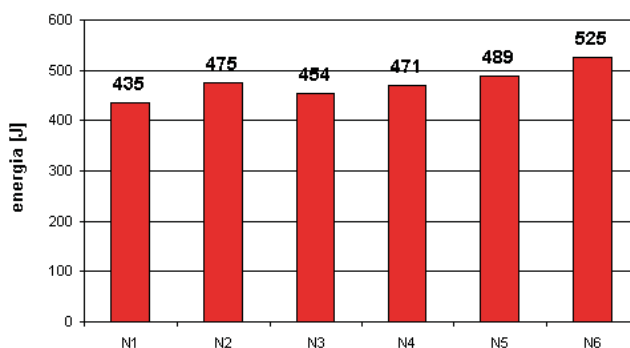


Rys. 10. Zależność siła-przemieszczenie dla wariantów N1-N6 w obliczeniach numerycznych
Fig. 10. Numerical load compression curves of N1-N6 models

Na rys. 10 przedstawiono wykresy ściskania dla 6 wariantów warunków brzegowych, a na rys. 11 deformację modeli w końcowej fazie obciążenia przy przemieszczeniu górnej płyty o 29mm. W każdym z prezentowanych przypadków doszło do utworzenia 3 zewnętrznych fałd. Jak można zauważyć z rys. 10 wpływ różnych warunków brzegowych na przebieg zależności siła-skrócenie rurki, zwłaszcza w zakresie do 20mm skrócenia, jest niezbyt duży. W końcowej fazie ściskania można zauważyć wpływ zwiększonej grubości spoiny – model N6.



Rys.11. Deformacja modeli w obliczeniach numerycznych (N1-N6)
Fig. 11. Deformation mode of N1-N6 models in numerical calculations



Rys. 12. Absorpcja energii w modelach numerycznych
Fig. 12. Energy absorption in numerical calculations

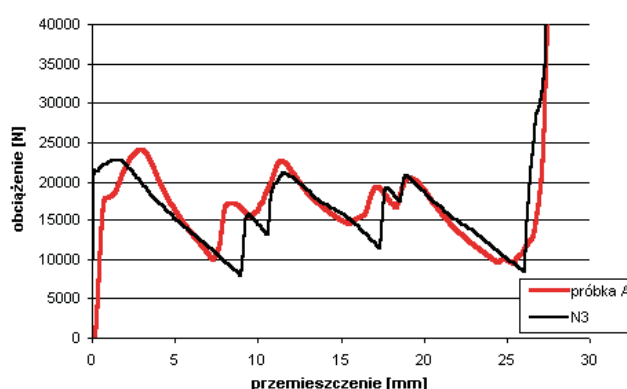
Deformacje modeli pokazane na rys. 11 również nie wykazują istotnych różnic – występują trzy zewnętrzne fałdy. Przedstawione płany warstwicowe odkształceń plastycznych mają bardzo

podobny wygląd. Maksymalne wartości odkształceń plastycznych zmieniają się od 105% dla modelu N5 do 122 % dla modelu N1.

Na rys. 12 zestawiono wartości energii absorbowanej przez próbki w obliczeniach numerycznych. Najmniejszą zdolność absorpcji energii (435 J) wykazuje model N1 (swobodny kontakt pomiędzy rurką a krążkiem). Największą zaś wartość równą 525 J odnotowano dla modelu N6. Różnica w absorpcji energii dla tych modeli wynosi ok. 20%.

4. Podsumowanie

Przedstawione wyniki eksperymentów wykazują znaczący wpływ sposobu zamocowania brzegów elementu cylindrycznego na deformację, zależność siła-przemieszczenie oraz poziom absorpcji energii. W przypadku zbyt grubej i nierównomiernej spoiny pojawiają się niesymetryczne postacie odkształcenia i/lub zmniejsza się liczba tworzących się fałd. Różnica w absorpcji energii dla skrajnych przypadków wynosi ponad 30%



Rys.13. Porównanie próby doświadczalnej i symulacji numerycznej
Fig.13. Comparison of experimental and numerical load compression curves

W symulacjach numerycznych – ze względu na przyjęcie modelu osiowosymetrycznego – nie można uwzględnić wszystkich wariantów spoin zastosowanych w badaniach doświadczalnych. Porównując zależności siła-przemieszczenie należy zauważyć duże podobieństwo pomiędzy zależnością doświadczalną dla próbki o swobodnych brzegach (A) i dla modelu numerycznego z jednym wspólnym węzłem pomiędzy rurką a krążkiem (N3). Dla tych dwóch przypadków zanotowano również prawie identyczny poziom absorpcji energii (próbka A- 455 J, model N3- 454 J).

Literatura

- [1] 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.
- [2] Cieśla, P., Dacko, A., Dacko, M., Nowak, J., *Duże odkształcenia elementów cienkościennych poddanych ścisłaniu*, IX Konferencja Naukowo-Techniczna Programy MES w komputerowym wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania, Giżycko, Poland 2005.
- [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.