

NUMERICAL ANALYSIS OF BLAST LOADED STRUCTURE OF THIN-WALLED TUBES

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*

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: j.nowak@wme.wat.edu.pl*

Abstract

The paper presents the problems of modeling cylindrical specimens, loaded by pressure wave from the blast of explosive charge. The numerical simulation was performed using MSC.Dytran. The cylindrical specimen, along with top and bottom disks is modeled using solid elements. The influence of chosen parameters on the deformation process was investigated. That included material models, hourglass energy damping, rigid/deformable base models and cylinder –top disk connection model (contact/weld).

The test rig was setup in numerical model. It consisted of rigid base and the base plate resting on it. The model of set of five energy absorbing cylinders was created. The load was modeled by applying a varying pressure to the top cover of the set. The pressure was applied to the whole top cover or to the chosen area in the middle of the top cover. The results of numerical simulation was compared to the results of experiments. In the case of load applied to the part of top cover, the deformation shape for numerical model was matching the real deformation of the structure.

Keywords: numerical analysis, protective structures, blast loading

ANALIZA NUMERYCZNA PAKIETU ELEMENTÓW CYLINDRYCZNYCH OBCIĄŻONYCH FAŁĄ UDERZENIOWĄ WYBUCHU

Streszczenie

W pracy przedstawiono problematykę modelowania elementów cylindrycznych obciążonych falą ciśnienia powstałą w wyniku detonacji ładunku materiału wybuchowego. Symulację numeryczną przeprowadzono w środowisku programu MSC Dytran. Do tworzenia modeli numerycznych cylindra, górnej pokrywy oraz podstawy użyto elementów bryłowych typu Solid. Rozpatrywano wpływ następujących parametrów na proces deformacji elementu cylindrycznego: model materiału, tłumienie energii hourglass, wprowadzenie odkształcalnej podstawy oraz połączenie cylindra i pokrywy za pomocą lutu.

Utworzono model numeryczny stanowiska do badań pakietów elementów cylindrycznych składającego się z nieodkształcalnej podstawy i przymocowanej do niej płyty bazowej. Stworzono model pakietu elementów energochłonnych składający się z pięciu cylindrów. Obciążenie realizowano poprzez przyłożenie zmiennego w czasie ciśnienia do pokrywy górnej pakietu. Rozpatrzono przypadki obciążenia falą jednorodną rozłożoną na całym obszarze górnej pokrywy oraz falą ciśnienia działającą na wybrany obszar w środkowej części pokrywy. Wyniki obliczeń porównano z wynikami otrzymanymi na drodze eksperymentalnej.

W drugim przypadku uzyskano zgodność postaci deformacji modelu numerycznego i konstrukcji rzeczywistej.

Słowa kluczowe: analiza numeryczna, struktura energochłonna, obciążenie impulsem wybuchu

1. Wstęp

Poniższe opracowanie omawia symulację zniszczenia próbek cylindrycznych osiową siłą ściskającą. Praca ta stanowi kontynuację badań eksperymentalnych wykonanych w ramach projektu badawczego na temat struktur o wysokiej zdolności pochłaniania energii. W opracowaniu zamieszczono opis przeprowadzonych symulacji, przebiegi sił niszczących, energię pochłoniętą podczas zniszczenia próbek oraz szereg innych charakterystyk opisujących zjawisko.

2. Wnioski z poprzednich badań

Podczas uprzednio przeprowadzonych badań starano się określić najbardziej właściwą metodę modelowania zniszczenia próbki cylindrycznej pod wpływem osiowej siły ściskającej. Testy zostały przeprowadzone dla obciążenia statycznego. Wyniki eksperymentu służyły weryfikacji i wyboru najlepszej metody symulacyjnej. Oto najogólniejsze wnioski z przeprowadzonych dociekań:

- a) Model z elementów powłokowych nie zdał egzaminu. Prawdopodobnie uproszczenie tego typu pomijało stabilizację powłoki o niepomijalnej grubości w obszarze kontaktu z podłożem. W zjawiskach utraty stateczności może mieć to znaczący wpływ na postać deformacji.
- b) Przebieg sił zgniatających podczas symulacji jest najbardziej zgodny z eksperymentem przy wprowadzeniu kompleksowej krzywej odkształceń plastycznych. Przybliżenie modelem dwuliniowym wydało się być niedostatecznie dokładnym.

3. Opis próby na stanowisku doświadczalnym



*Rys. 1. Stanowisko do badań pakietów elementów cylindrycznych
Fig. 1. Experimental stand, allowing tests a set of cylindrical tubes elements*

Stanowisko do badań doświadczalnych pakietów elementów cylindrycznych wykonane jest z płyty stalowej o wymiarach 500x500x100mm, z wgłębieniem o wymiarach 370x370x15mm, zatopionej w bryle betonu 0,8x0,8x0,8m. Na stanowisku znajduje się 12mm stalowa płyta o wymiarach 420x420 mm, która podparta jest na 5mm pryzmie i mocowana do stanowiska za pomocą 4 śrub rozmieszczonych w środku każdego boku. Na środku płyty – od strony stanowiska – naklejoną jest tensometr do pomiaru odkształceń płyty. Pakiety elementów cylindrycznych ustawiane są centralnie na płycie (rys 1). Górna pokrywa (o grubości 6 mm) mocowana jest do górnych krawędzi elementów cylindrycznych poprzez lutowanie. Na pokrywie znajduje się warstwa dystansowa styropianu na której umieszczony jest ładunek wybuchowy wraz z zapalnikiem. Ładunek uformowany jest w postaci płaskiego krążka.

4. Schematy symulacji

a) Modelowanie połączenia próbek cylindrycznych z pokrywą oraz podstawą.

Próbki cylindryczne opierają się swobodnie na podstawie. Do górnej części zamocowana jest za pomocą lutu pokrywa. Na górnej powierzchni pokrywy przyłożone jest ciśnienie. Pomiędzy próbkami a pokrywą i podstawą zdefiniowano kontakt. Również materiał próbki cylindrycznej może również wchodzić w kontakt sam ze sobą. Założony został współczynnik tarcia 0,25.

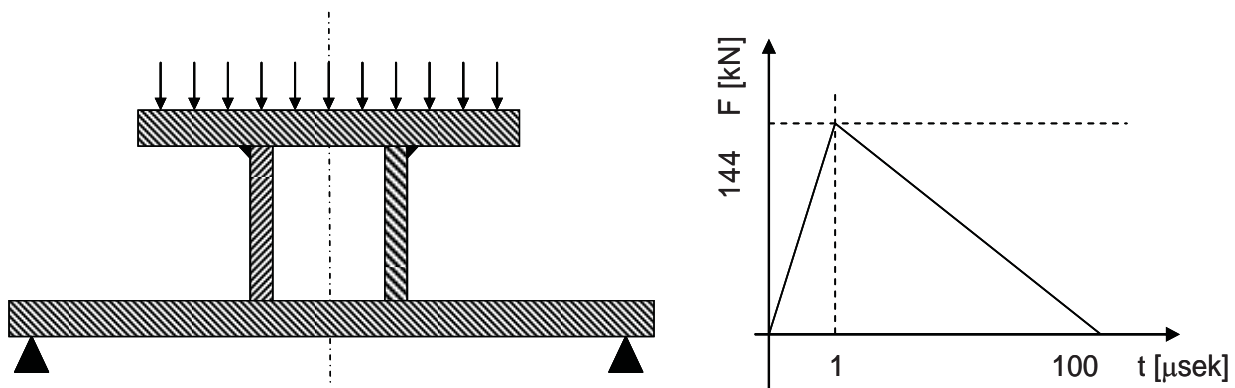
Ze względu na ograniczoną ilość elementów w modelu połączenie lutem nie zostało zamodelowane bezpośrednio. W przypadku pojedynczej próbki użyto więzów (przemieszczenia promieniowe) pomiędzy zewnętrzną krawędzią cylindra a węzłami pokrywy. Na podstawie analizy wyników pojedynczej próbki w celu uniknięcia problemów technicznych związanych z tworzeniem zgodnych siatek na pokrywie oraz cylindrach postanowiono zaniedbać efekt tego połączenia dla zestawu pięciu cylindrów.

b) Modelowanie podstawy.

Do celów symulacji zamodelowano dwa rodzaje podłoża. Pierwszy, nieodkształcalny odpowiadający podstawie podczas testu pojedynczej próbki. Drugi, jest to odkształcalna płyta zasymulowana elementami powłokowymi o własnościach liniowo sprężystych. W miejsce pryzm w rzeczywistej konstrukcji zastosowany został kontakt ze sztywnym podłożem. Śruby utwierdzające płytę do podłoża zostały zasymulowane poprzez połączenie węzłów deformowanej podstawy z węzłami nieodkształcalnych pryzm. Do celów porównawczych zasymulowano pojedynczą próbkę zarówno na podstawie odkształcalnej jak i sztywnej.

c) Rodzaj obciążenia.

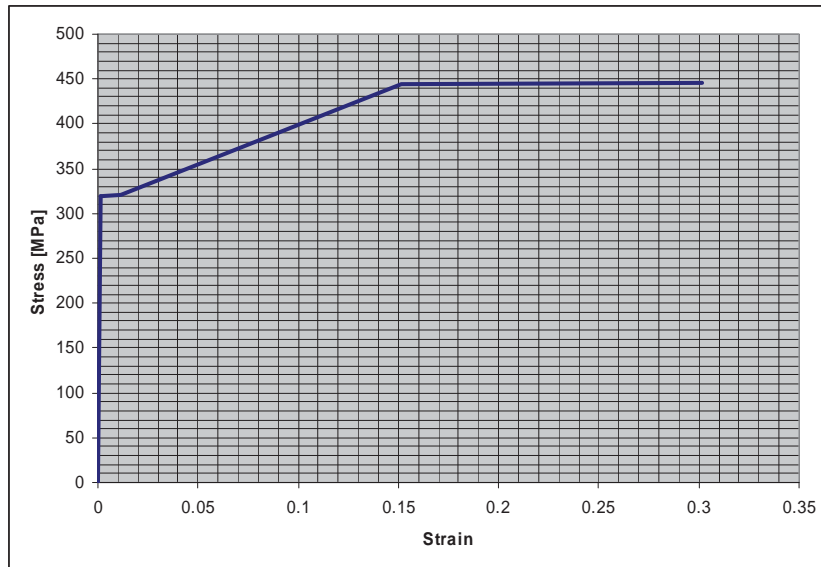
Do obciążenia próbek użyto impulsu ciśnienia o przebiegu trójkątnym. Czas trwania impulsu wynosi 100 μs , natomiast maksymalna wartość zostaje osiągnięta już po 1 μs . Maksymalne ciśnienie odpowiada sile 144 kN na jedną próbkę. W przypadku testu z wieloma cylindrami ciśnienie odpowiada wielokrotności tej siły. W przypadku finalnej symulacji dla konfiguracji z odkształcalną podstawą użyta siła nie była wystarczająca do całkowitego zniszczenia próbki. Dla tych przypadków zasymulowano dodatkowo obciążenie pomnożone przez współczynnik $n=1,5$.



Rys. 2. Obciążenie modelu
Fig. 2. Load of the model

d) Model materiału.

Własności materiałowe bazują na wynikach próby rozciągania przeprowadzonej na materiale próbki. W programie MSC.Dytran użyto modelu DYMAT24. Jest to izotropowy elastyczno plastyczny model ze zdefiniowaną krzywą odkształcenia plastycznego. Zastosowana została funkcja plastyczności Von Misesa, z modelem umocnienia izotropowego. Na rys.3 przedstawiony został wykres naprężenie-odkształcenie dla przyjętego materiału.

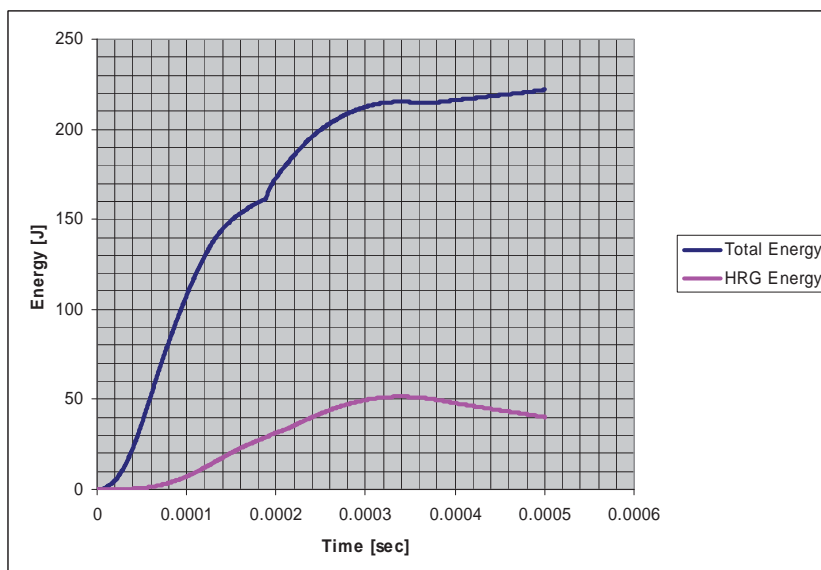


Rys. 3. Model materiału - krzywa naprężenie – odkształcenie
 Fig. 3. Material model – stress-strain curve

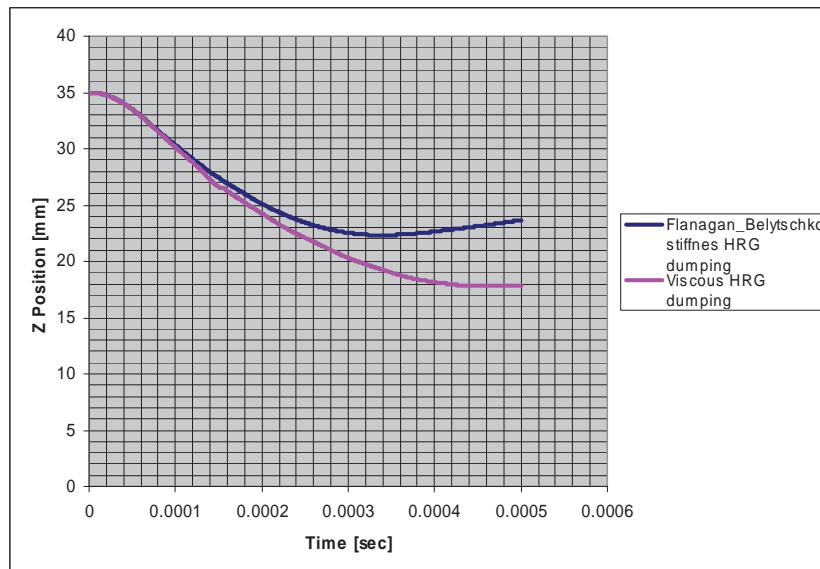
5. Porównanie wyników dla pojedynczej próbki

a) Wpływ tłumienia energii „hourglass”.

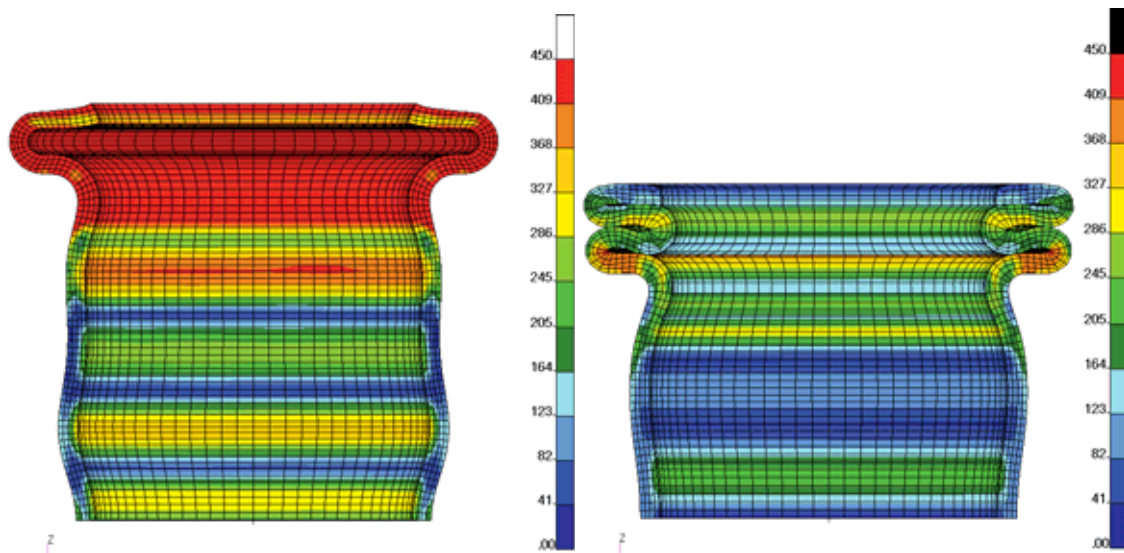
Podczas symulacji monitorowana jest energia modów pasożytniczych. Intencją jest uniknięcie zjawiska „klepsydrowania” związanego z zastosowaniem elementów z jednym punktem całkowania. W przypadku przyjęcia ustawień domyślnych w programie MSC.Dytran zastosowana jest metoda tłumienia strukturalnego Flanagan-Belytchko. Na rys. 4 widać, że energia „hourglass” osiąga poziom ok. 23% całkowitej energii. Umownym progiem akceptowalności występowania tego zjawiska jest energia „hourglass” rzędu 5% energii całkowitej. Z tego względu użyto metody tłumienia wiskotycznego (PARAM,HGSOLID,DYNA). Metoda ta zapewnia zupełne wyeliminowanie tego zjawiska. W porównaniu przemieszczeń górnej części cylindra (rys. 5) oraz postaci deformacji (rys. 6) zauważyć można, że zastosowanie drugiej metody skutkuje podwyższeniem podatności próbki na zgniatanie siłą osiową.



Rys. 4. Porównanie energii "hourglass" z energią całkowitą
 Fig. 4. Comparison of hourglass and total energy



Rys. 5. Pozycja (Z) górnej krawędzi cylindra
 Fig. 5. Z position of the top edge of the cylinder



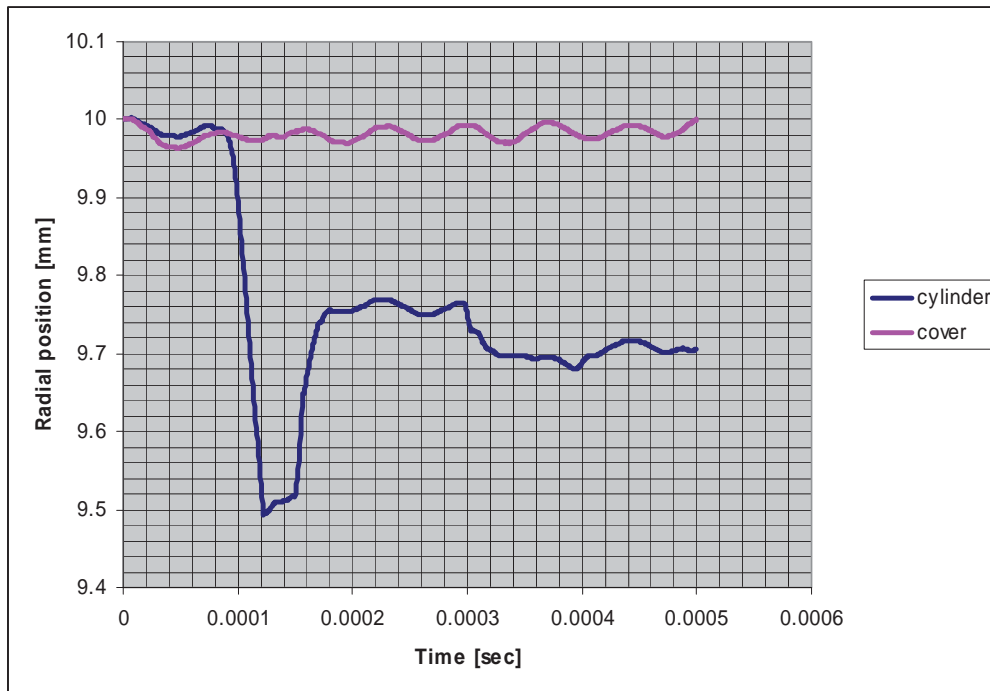
Rys. 6. Naprężenia zredukowane (HMH), próbka z domyślnym modelem tłumienia energii „hourglass” oraz z tłumieniem wiskotycznym

Fig. 6. Von Misses stresses for default damping (a) and viscosity damping (b) of hourglass energy

b) Zastosowanie węzłów symulujących połączenie lutem.

Połączenie lutem pomiędzy próbkami a pokrywą stabilizuje próbkę oraz ułatwia przeprowadzenie eksperymentu. W rozdzielonych próbkach fala uderzeniowa przemieszczała próbkę i pokrywę na duże odległości co sprawiało trudności z odnalezieniem badanego materiału po teście. Podczas symulacji numerycznej nie występują tego typu trudności. Połączenie lutem symulują węzły typu rbe2. Na rys porównane zostały przemieszczenia promieniowe odpowiadających węzłów próbki oraz pokrywy w modelu bez połączenia lutem. Różnice w położeniu węzłów nie przekraczają 0,5 mm (rys. 7) natomiast ogólna postać deformacji oraz przebieg siły zgniatającej są niemal identyczne.

Niestety, w przypadku testu pięciu cylindrów trudno oczekiwać analogicznego zjawiska. Należy zwrócić uwagę na fakt, że tylko jeden cylinder, środkowy, jest obciążony symetrycznie. W przypadku pozostałych czterech mogą wystąpić większe przesunięcia względem pokrywy. Pomimo tego faktu na próbce z wieloma cylindrami zrezygnowano z modelowania połączenia ze względu na problemy w tworzeniu siatki.

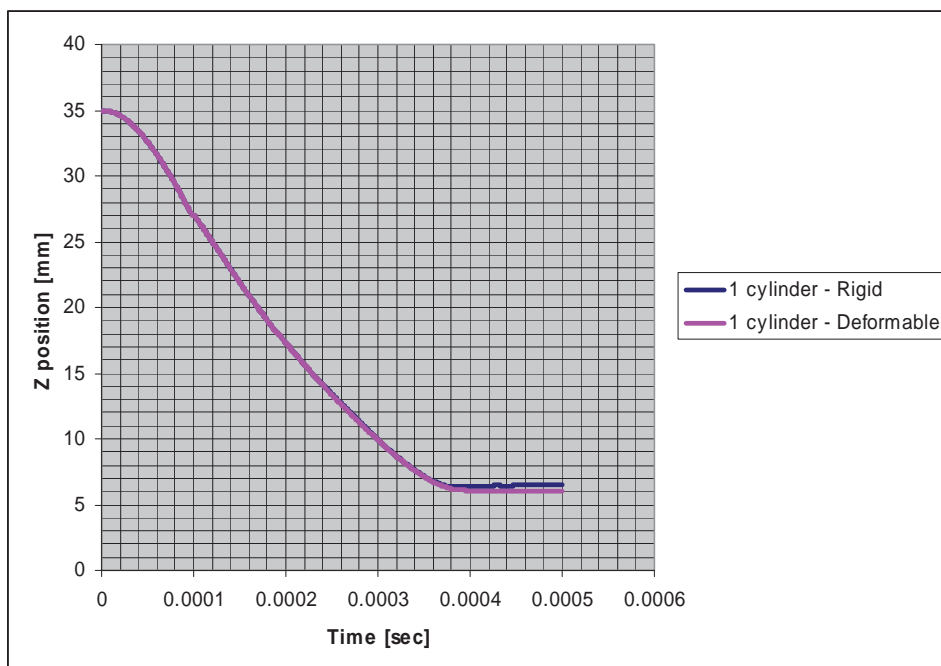


Rys. 7. Pozycja węzła (R) na górnej krawędzi cylindra
 Fig. 7. Position of the top edge of the cylinder

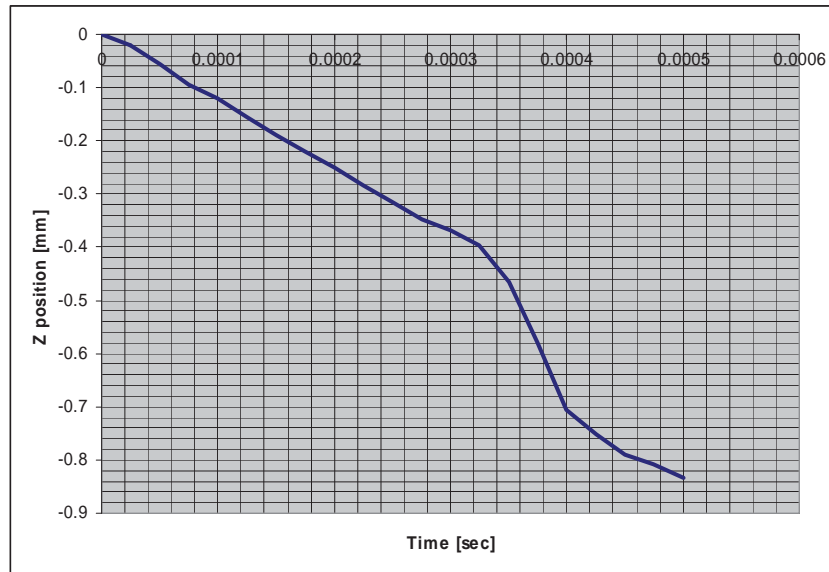
c) Wpływ wprowadzenia odkształcalnej podstawy.

W celu zweryfikowania zgodności wartości otrzymywanych podczas testu jednej próbki z całym zestawem postanowiono zbadać wpływ zastosowania podstawy o niepomijalnej podatności.

Wykresy na rys. 8 pokazują, że maksymalna różnica ugięć wynosi 0,5 mm. Samo ugięcie podstawy wynosi 0,83 mm – rys. 9. Wynika z tego, że ugięcie samej próbki jest tylko o ok. 0,83 mm. Można uznać to za efekt pomijalny w przypadku jednej próbki. Należy zwrócić uwagę, że w przypadku wielu próbek ta różnica może być odpowiednio większa.



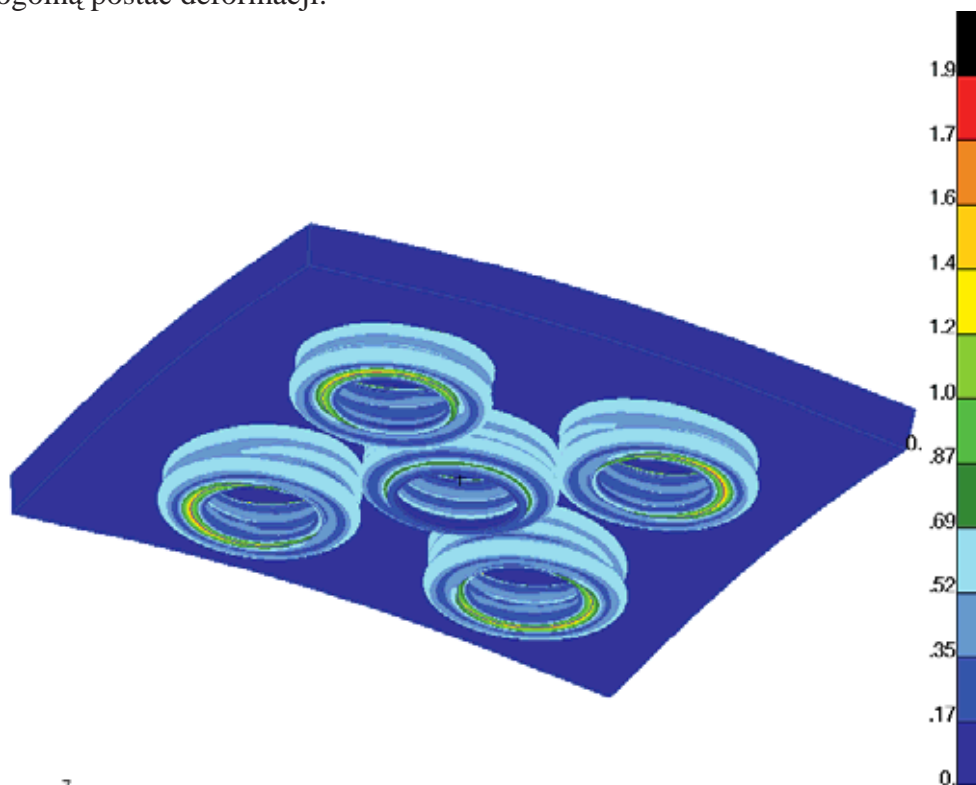
Rys. 8. Pozycja (Z) górnej krawędzi cylindra
 Fig. 8. Z position of the top edge of the cylinder



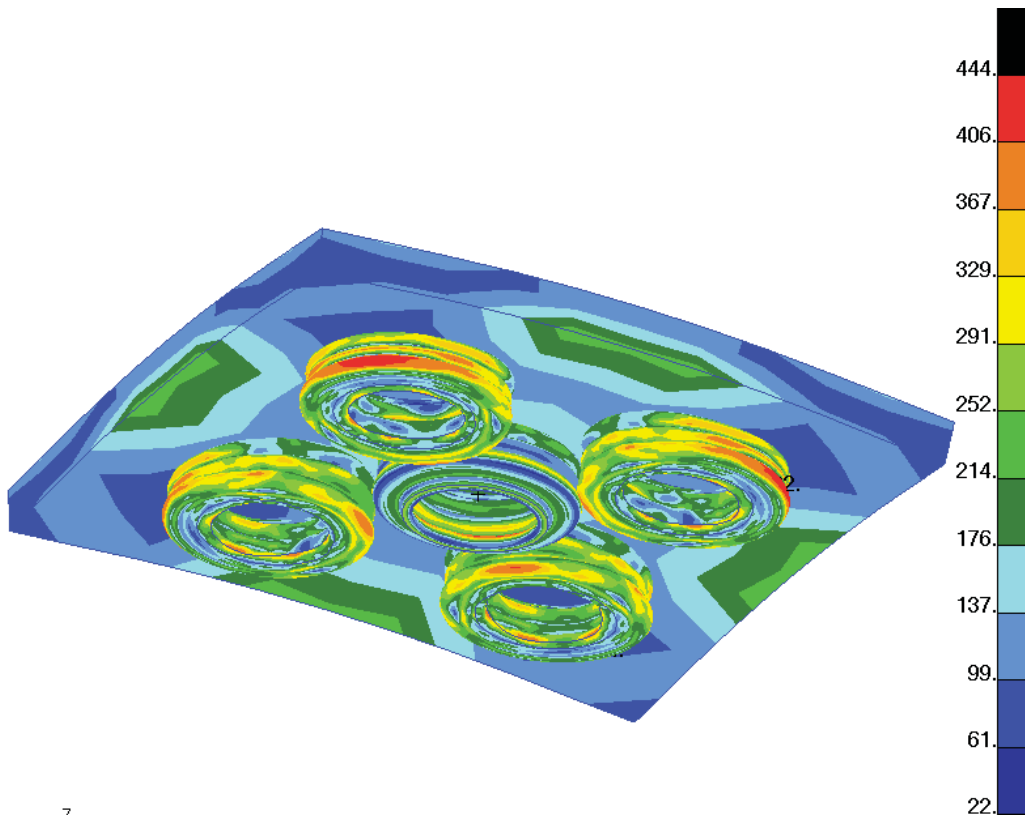
Rys. 9. Ugięcie podstawy
Fig. 9. Deflection of the bottom plate

6. Wyniki obliczeń dla pakietu z pięcioma cylindrami

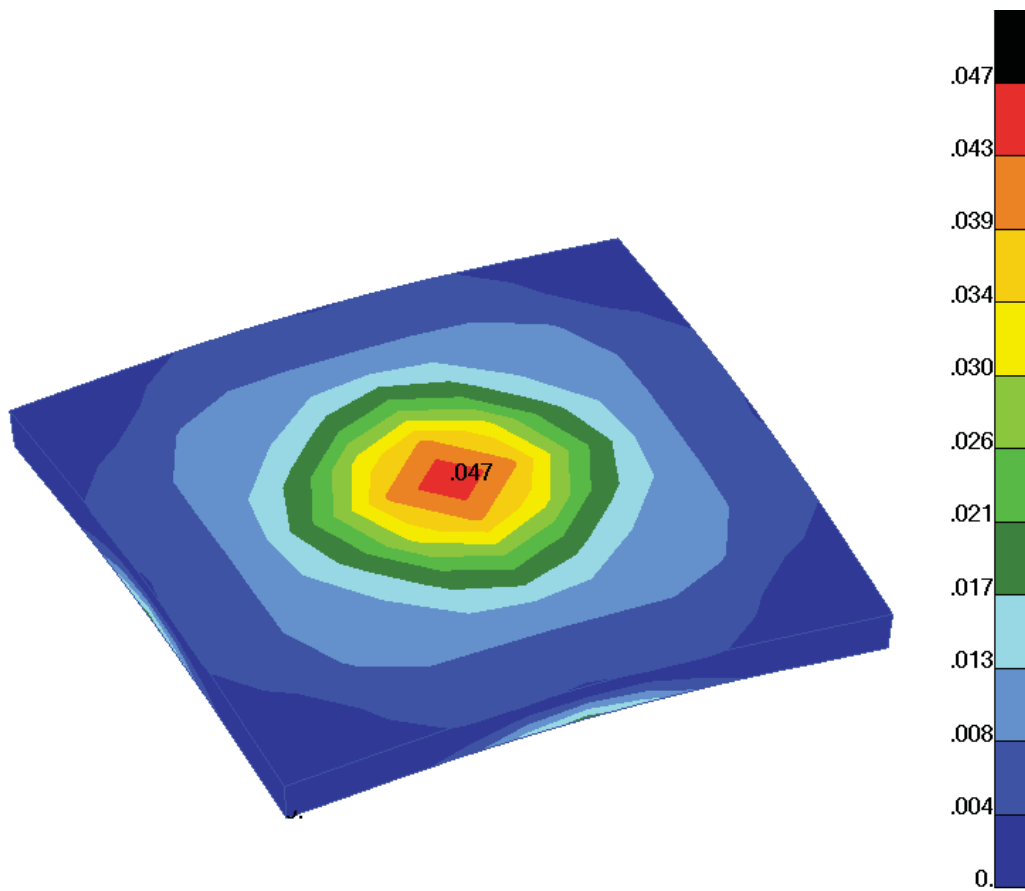
Dla pakietu z pięcioma elementami energochłonnymi obliczenia numeryczne przeprowadzono w dwóch wariantach. W pierwszym wariantcie ciśnienie działające na górną płyt rozłożone było na całej powierzchni płyty. Ogólna postać deformacji, pola naprężeń oraz odkształceń plastycznych (rys. 11, 12) są poprawne. Pokrywa również odkształca się trwale (rys. 12), co można było stwierdzić w eksperymencie. Uwagę należy zwrócić na fakt, że siatka po wewnętrznej stronie fałd zniszczonego cylindra jest silnie zdeformowana (rys.13). Pomimo tego, nie stwierdza się istotnego wpływu na ogólną postać deformacji.



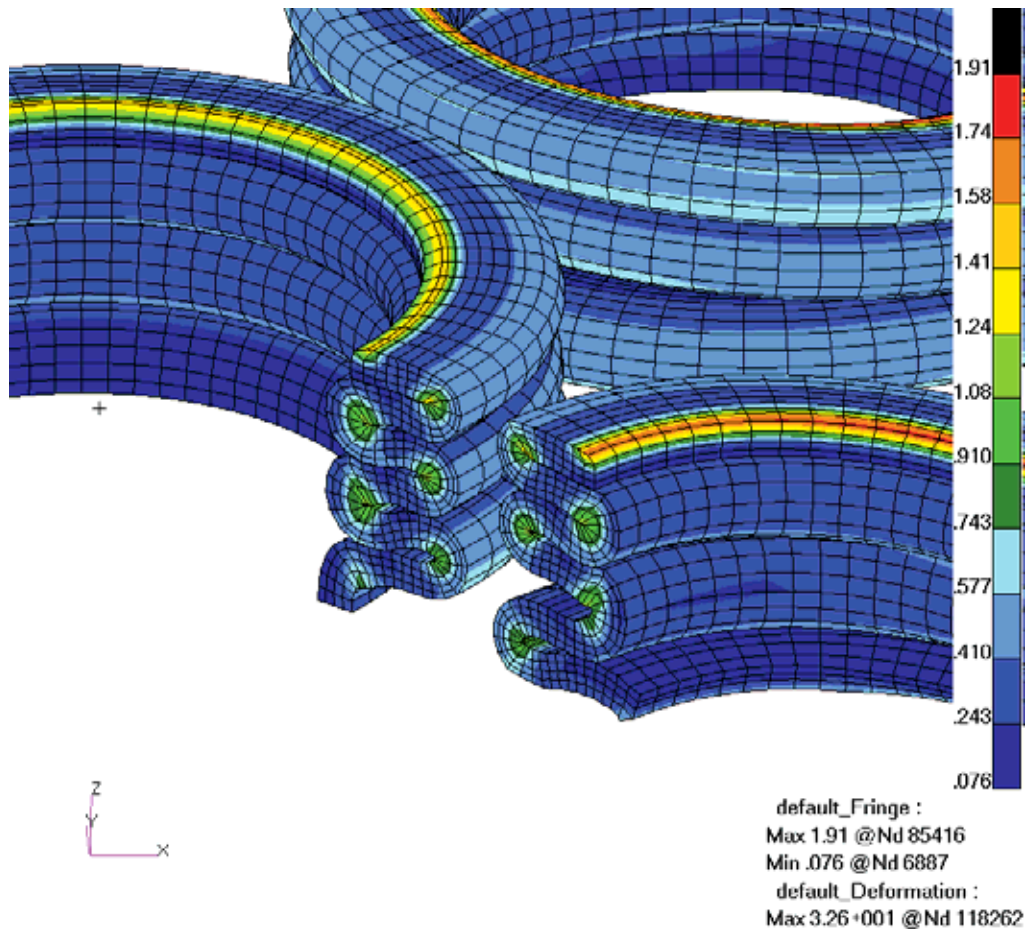
Rys. 10. Odkształcenia plastyczne
Fig. 10. Plastic strain



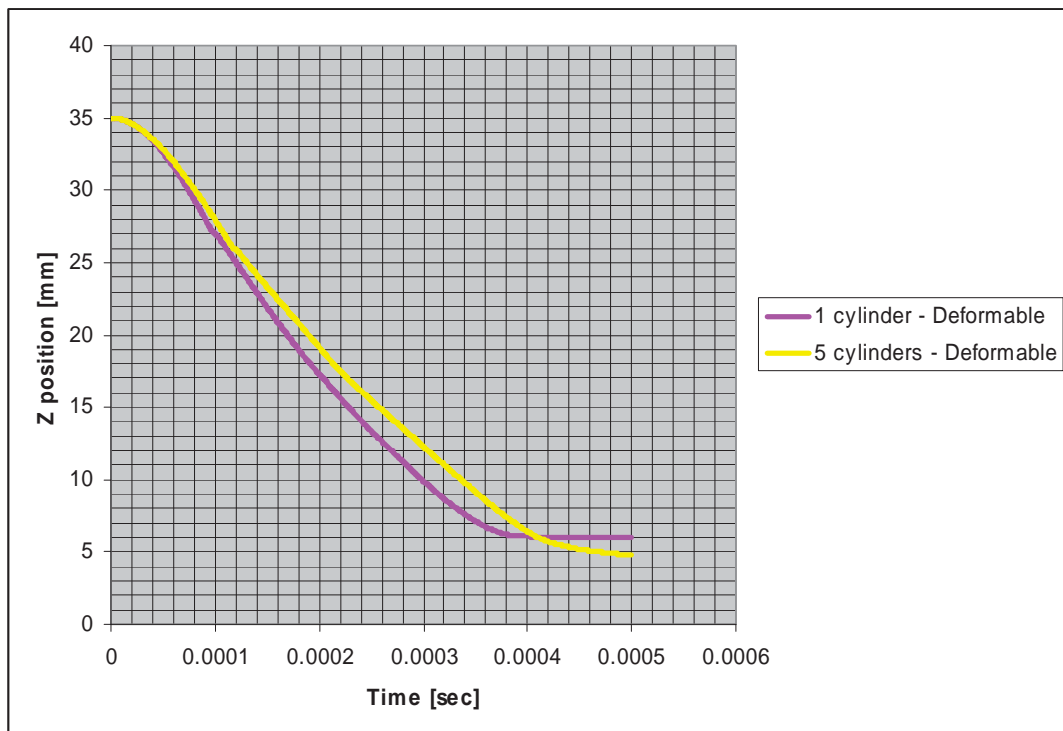
Rys. 11. Naprężenia zredukowane (HMH)
Fig. 11. Von Misses stress (HMH)



Rys. 12. Odkształcenia plastyczne – pokrywa górna
Fig. 12. Plastic strain – top plate



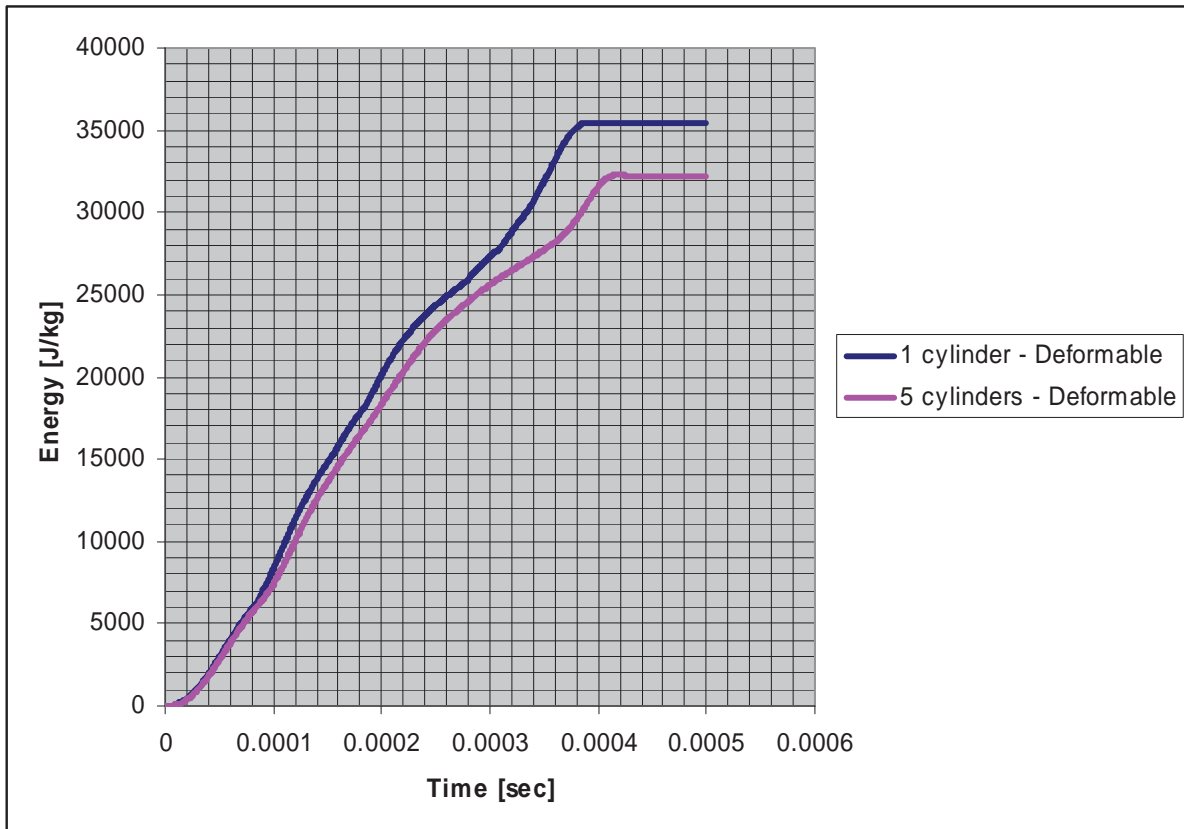
Rys. 13. Odkształcenia plastyczne – widok na zdeformowaną siatkę cylindrów
 Fig. 13. Plastic strain – view of the cylinder deformation



Rys. 14. Przesunięcie górnej części cylindra w pojedynczej próbce oraz z pięcioma elementami energochłonnymi
 Fig. 14. Displacement of the top part of the cylinder for 1 cylinder and set of 5 cylinders

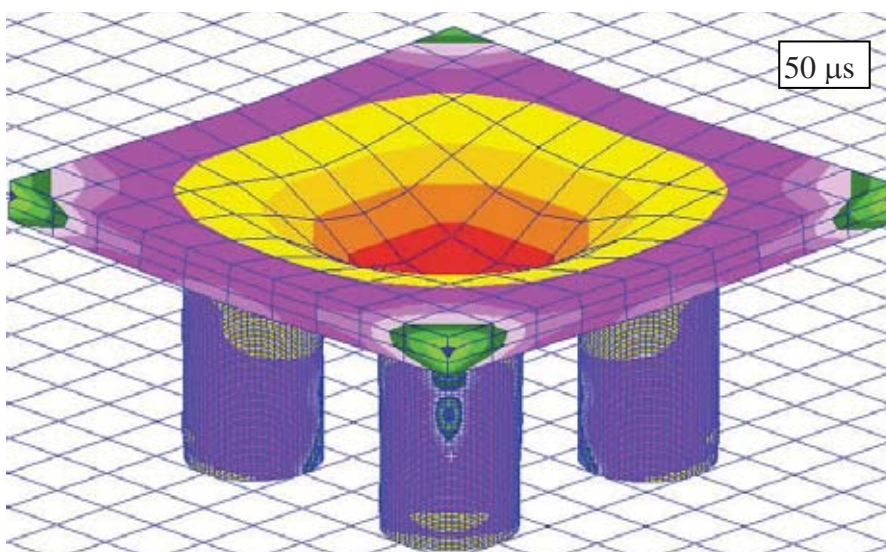
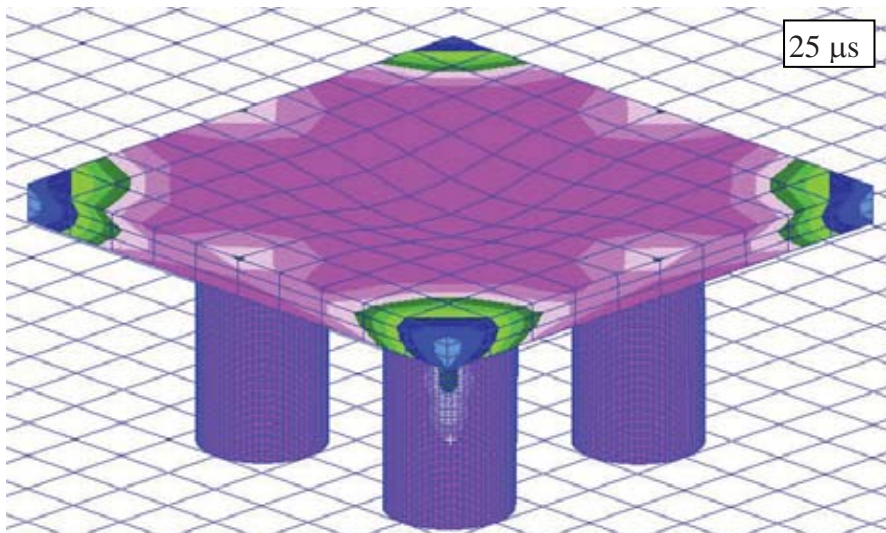
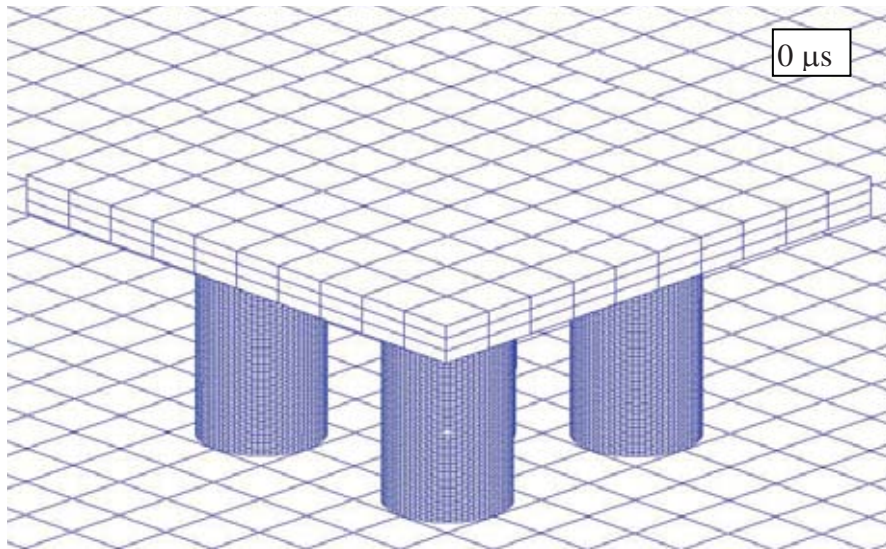
W przypadku próbki z pięcioma cylindrami wykres pozycji górnej części środkowego cylindra widocznie różni się od tego samego parametru zmierzonego na pojedynczej próbce. Jak już wcześniej wspomniano, powodem tego zjawiska może być niesymetryczne obciążenie bocznych cylindrów (utrata stateczności) oraz podatność podstawy.

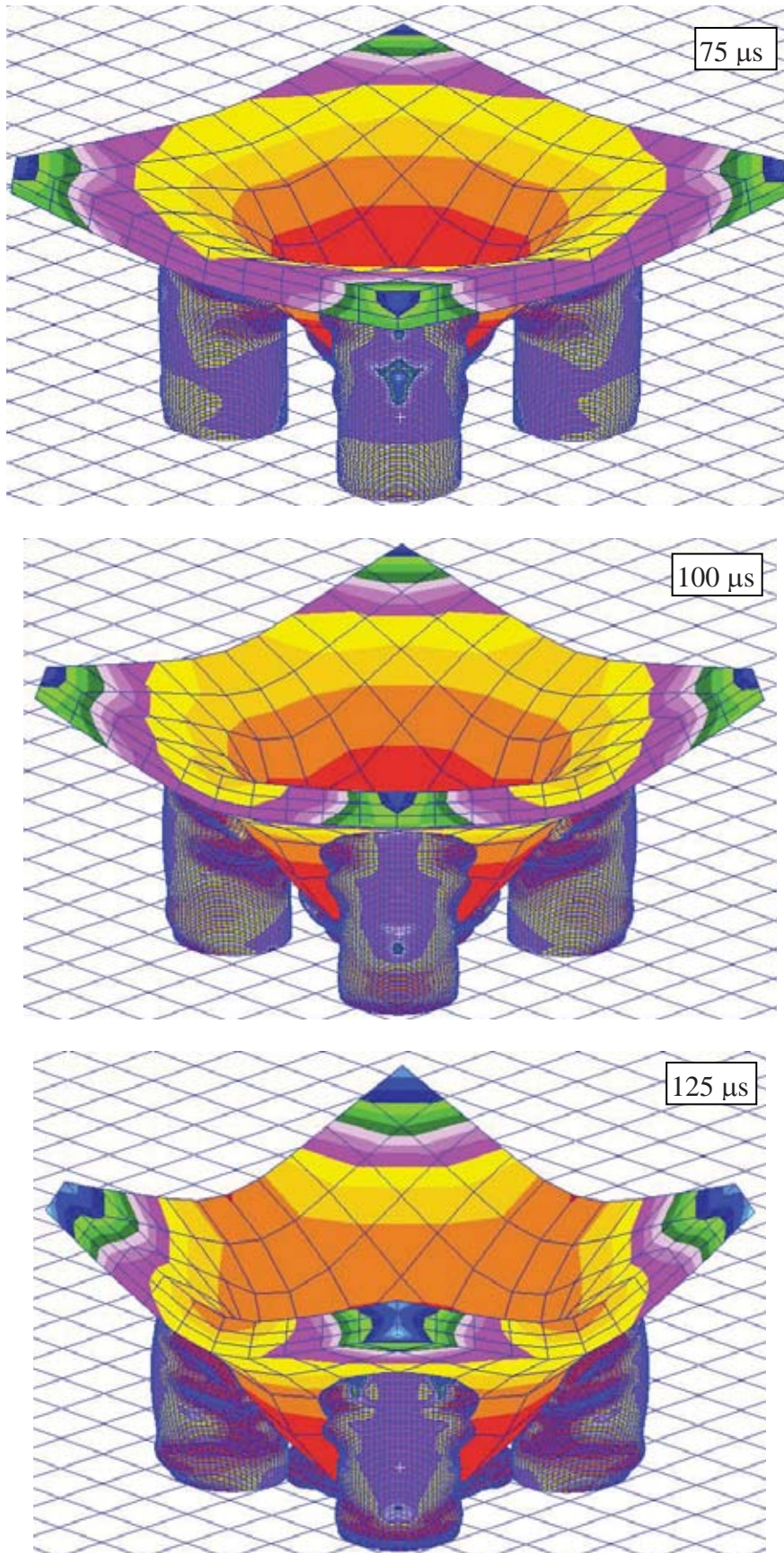
Efektorem większej podatności próbki z wieloma cylindrami jest jej zmniejszona zdolność do pochłaniania energii. Różnica przez większość czasu trwania zjawiska jest stała i wynosi około 10%.



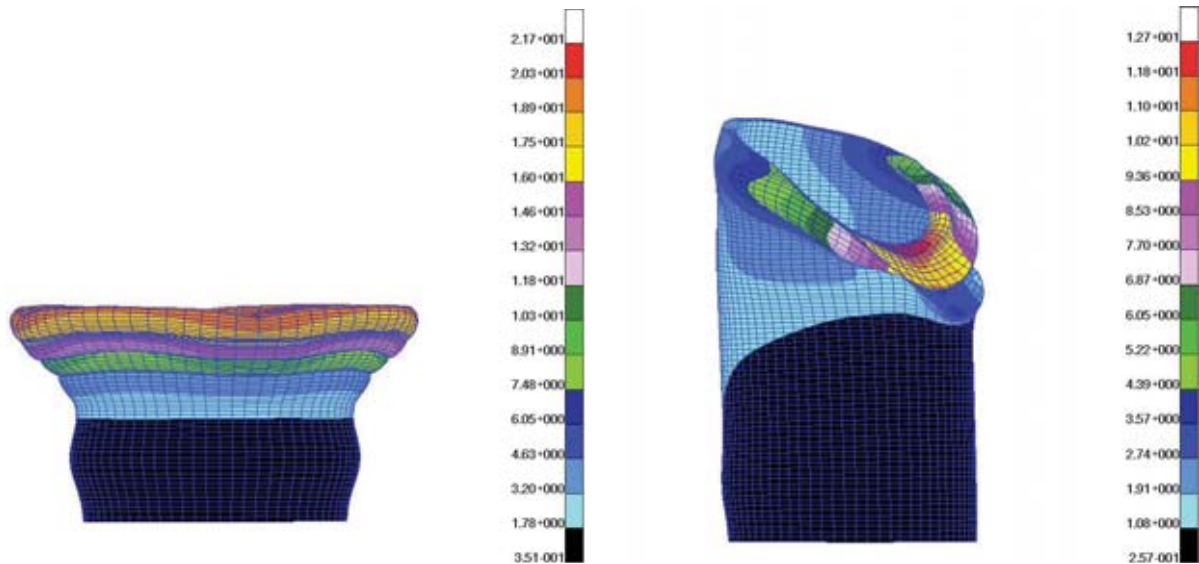
Rys. 15 . Energia wewnętrzna na jednostkową masę próbki
Fig. 15 . Internal energy [J/kg]

W drugim wariantcie obliczeń założona, że ciśnienie działające na górną płytę skupione jest tylko na 16 środkowych elementach. Założenie to wynika z faktu, iż ładunek wybuchowy w przeprowadzanych doświadczeniach rozłożony jest tylko na środkowej części pokrywy górnej. I w związku z tym fala ciśnienia powstająca w wyniku detonacji ładunku nie jest równomierna na całej pokrywie. Na rys. 16 przedstawiono przebieg deformacji pakietu cylindrycznego dla opisanego wyżej przypadku. Kolejne ujęcia przedstawiają postać deformacji pakietu dla czasu 0, 25, 50, 75, 100, 125 μ s. Należy zwrócić uwagę, że w omawianym przypadku odkształcenie górnej płyty nie jest równomierne na całej powierzchni. Następuje silne ugięcie części środkowej pokrywy, natomiast jej naroża wyraźnie podnoszą się. Deformacja elementów cylindrycznych również nie jest jednakowa. Całkowitemu zniszczeniu uległ element środkowy, natomiast pozostałe elementy zostały zgięte niesymetrycznie. Na rys. 17 porównano deformację elementu cylindrycznego znajdującego się na środku pokrywy i jednego z bocznych cylindrów. Rysunki przedstawiają deformację i mapę odkształceń plastycznych dla czasu 75 μ s. Maksymalne odkształcenia plastyczne w elemencie środkowym wynoszą 21,7% , a w elemencie zewnętrznym 12,7%. Sposób deformacji pakietu cylindrycznego jest podobny do uzyskanego w wyniku badań eksperymentalnych (rys. 18).





Rys. 16. Postacie deformacji modelu z ciśnieniem rozłożonym na 16 śródkowych elementach
Fig. 16. Deformation shape of model with pressure on 16 FE



Rys. 17. Postacie deformacji elementu cylindrycznego znajdującego się na środku płyty (a) i elementu zewnętrznego cylindrycznego (b)

Fig.17. Deformation shape of the central cylindrical element (a) and outer cylindrical element (b)



Rys. 18. Zdeformowany pakiet poddany działaniu fali ciśnienia powstałej w wyniku detonacji 40 gramów MW

Fig. 18. Deformation of set of 5 cylindrical tubes loaded by blast wave of 40g charge explosion

7. Podsumowanie

W pracy przedstawiono problematykę modelowania elementów cylindrycznych obciążonych falą ciśnienia powstałą w wyniku detonacji ładunku materiału wybuchowego. Poddano analizie wpływ modelu materiału, tłumienia energii hourglass, wprowadzenia odkształcalnej podstawy oraz połączenia cylindra i pokrywy za pomocą lutu na proces deformacji elementu cylindrycznego. Utworzono model numeryczny stanowiska do badań pakietów elementów cylindrycznych oraz model pakietu składającego się z pięciu cylindrów. Porównano deformację pakietu uzyskaną w eksperymencie z wynikami symulacji numerycznej. Sposób deformacji modelu numerycznego pakietu dla II wariantu obliczeń jest podobny do uzyskanego w wyniku badań eksperymentalnych.

Kontynuowane będą prace doświadczalne nad dokładnym określeniem parametrów fali ciśnienia powstałej w wyniku detonacji. Pozwoli to na wprowadzenie korekt w modelu i dokładniejszą analizę zagadnienia.

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 ścisaniu*, 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