

# PORÓWNANIE MOŻLIWOŚCI ANALIZY CYLINDRYCZNYCH ELEMENTÓW ENERGOCHŁONNYCH OBCIĄŻONYCH IMPULSEM WYBUCHU W SYSTEMACH LS-DYNA I MSC.DYTRAN

Marian DACKO, Jacek NOWAK

Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego,  
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

[m.dacko@wme.wat.edu.pl](mailto:m.dacko@wme.wat.edu.pl), [j.nowak@wme.wat.edu.pl](mailto:j.nowak@wme.wat.edu.pl)

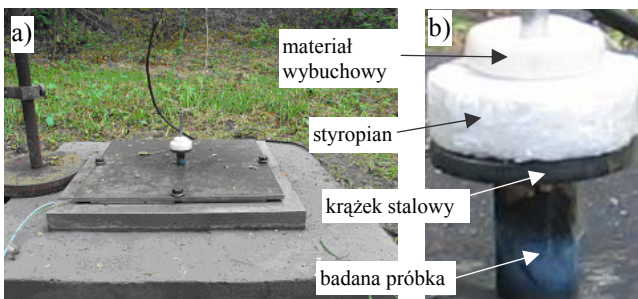
**Streszczenie:** W pracy przedstawiono problematykę modelowania elementów cylindrycznych obciążonych falą ciśnienia powstałą w wyniku detonacji ładunku materiału wybuchowego. Symulację numeryczną przeprowadzono w środowiskach programów MSC Dytran i LS-Dyna. Utworzono model numeryczny stanowiska do badań pakietów elementów cylindrycznych składającego się z nieodkształcalnej podstawy i przymocowanej do niej płyty bazowej. Stworzono model elementu energochłonnego. Obciążenie realizowano poprzez przyłożenie zmiennego w czasie ciśnienia do pokrywy górnej cylindra. Wyniki obliczeń numerycznych porównano z wynikami otrzymanymi na drodze eksperymentalnej.

## 1. WSTĘP

W pracy przedstawiono problematykę modelowania elementów cylindrycznych obciążonych falą ciśnienia powstałą w wyniku detonacji ładunku materiału wybuchowego. Podstawowym celem badań jest opracowanie modelu numerycznego, zweryfikowanego eksperymentalnie, poprawnie opisującego proces niszczenia elementów cylindrycznych poddanych działaniu fali uderzeniowej wybuchu. Dokonana zostanie weryfikacja możliwości współczesnych systemów obliczeń inżynierskich MES pod kątem ich zastosowania do rozpatrywanego zagadnienia. Należy określić, czy stosowane metody numeryczne są na tyle dokładne, że pozwolą na pełny opis rozpatrywanego zagadnienia. W literaturze nie odnaleziono przykładu wykorzystania programów analizy dynamicznej MES do określenia wielkości ładunków niezbędnych do zniszczenia danej konstrukcji.

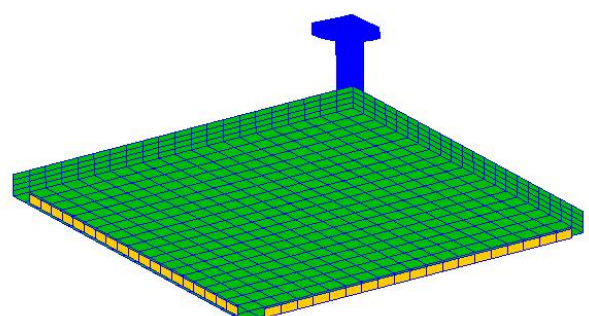
czujnika piezoelektrycznego zamieszczono w pracach (5,6,8,9,10) Analizę numeryczną deformacji elementów cylindrycznych poddanych obciążeniom falą uderzeniową wybuchu MW przeprowadzono w systemach LS-Dyna i MSC. Dytran. Obciążenie realizowano poprzez przyłożenie zmiennej w czasie siły (lub odpowiadającego jej ciśnienia) do górnej płyty ściskającej. Przyjęto biliniowy model materiału z umocnieniem plastycznym. Nie uwzględniono zmiany parametrów materiałowych wynikających z dużych prędkości odkształcenia. Rozpatrywano wpływ modelu materiału, tłumienia energii hourglass i tłumienia wiskotycznego na proces deformacji elementu cylindrycznego i przebieg drgań płyty stanowiska badawczego.

## 2. ANALIZA NUMERYCZNA ELEMENTU ENERGOCHŁONNEGO W SYSTEMIE MSC DYTRAN



Rys. 1. Stanowisko do badań elementów energochłonnych (a) i badany element energochłonny z ładunkiem 15g MW (b)

Na rys. 1. przedstawiono stanowisko badawcze zaprojektowane do badań elementów energochłonnych. Dokładny opis stanowiska oraz omówienie wyników badań statycznych i dynamicznych z zastosowaniem m.in.

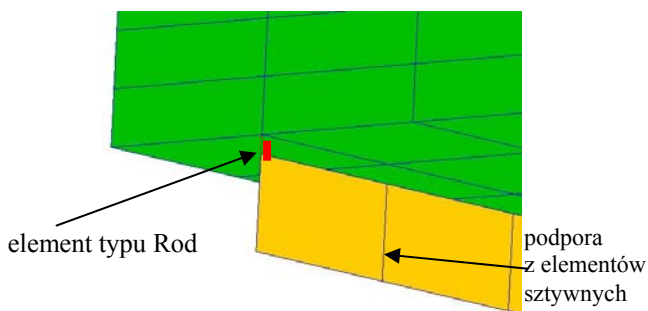


Rys. 2. Model numeryczny stanowiska do badań doświadczalnych w systemie MSC Dytran

Wstępna symulacja numeryczna badań płyty stanowiskowej z elementami energochłonnymi przeprowadzona została w systemie MSC Dytran.

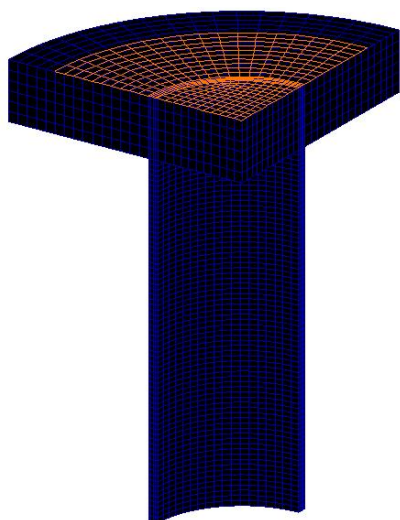
Ze względu na rozmiar zadania zdecydowano się na modelowanie  $\frac{1}{4}$  stanowiska i narzucenie więzów wynikających z symetrii zagadnienia.

Na rys. 2 przedstawiono model stanowiska badawczego z pojedynczym elementem energochłonnym. Płyta stanowiskowa składa się z czterech warstw elementów bryłowych typu Hex8. Od spodu opiera się ona na pryzmach, które w modelu zbudowano z elementów powłokowych typu Quad4 (Material Rigid). Zdefiniowano kontakt pomiędzy elementami podpór a płytą stanowiskową (rys 3). Śrubę łączącą płytę ze stanowiskiem modelowano elementem typu Rod (Bar2).



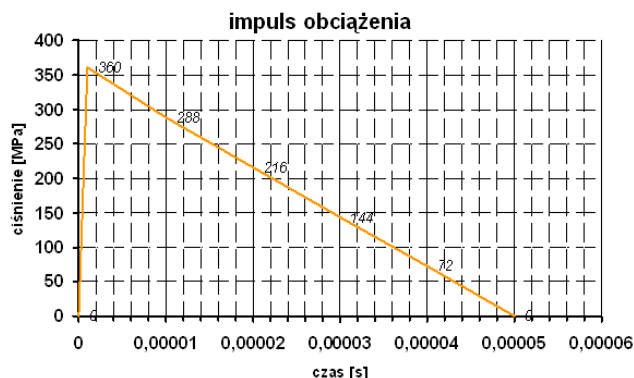
**Rys. 3.** Sposób modelowania połączenia płyty stanowiskowej z pryzmą

Model  $\frac{1}{4}$  elementu energochłonnego pokazano na rys. 4. Ściana boczna profilu cylindrycznego składa się z 70 elementów bryłowych (typu Hex) po wysokości, 18 po obwodzie i 4 elementów bryłowych po grubości. Krążek przykrywający profil cylindryczny składa się z 6 warstw elementów bryłowych. Każda z warstw to 18 wycinków kołowych o szerokości kątowej 5 stopni i 30 elementów wzdłuż promienia krążka. Narzucano odpowiednie więzy wynikające z założonej symetrii. Model obciążony jest impulsem ciśnienia przyłożonym do górnej powierzchni krążka na obszarze o promieniu 20mm, oznaczonym na rys. 4 jasnym kolorem.



**Rys. 4.** Model elementu energochłonnego z zaznaczonym obszarem oddziaływania impulsu ciśnienia

Teoria detonacji (1- 4) nie daje możliwości określenia parametrów fali detonacyjnej dla warunków wybuchu realizowanych w eksperymencie. Stąd dobór impulsu odbywał się na zasadzie pomiarów końcowych efektów deformacji cylindrycznych elementów energochłonnych. Dla potrzeb analizy numerycznej przyjęto impuls ciśnienia pokazany na rys. 5. Jest to impuls ciśnienia równomiernie rozłożonego na powierzchni koła, o liniowej zmienności w czasie jak na rysunku. Maksymalna wartość ciśnienia zostaje osiągnięta po 1 $\mu$ s i wynosi 360 MPa. W analizie numerycznej impuls ten powoduje całkowite zniszczenie (pełne zgniecenie) elementu cylindrycznego. W badaniach doświadczalnych końcowy efekt uzyskujemy detonując płaski ładunek 15g MW w odległości 15mm od elementu cylindrycznego.

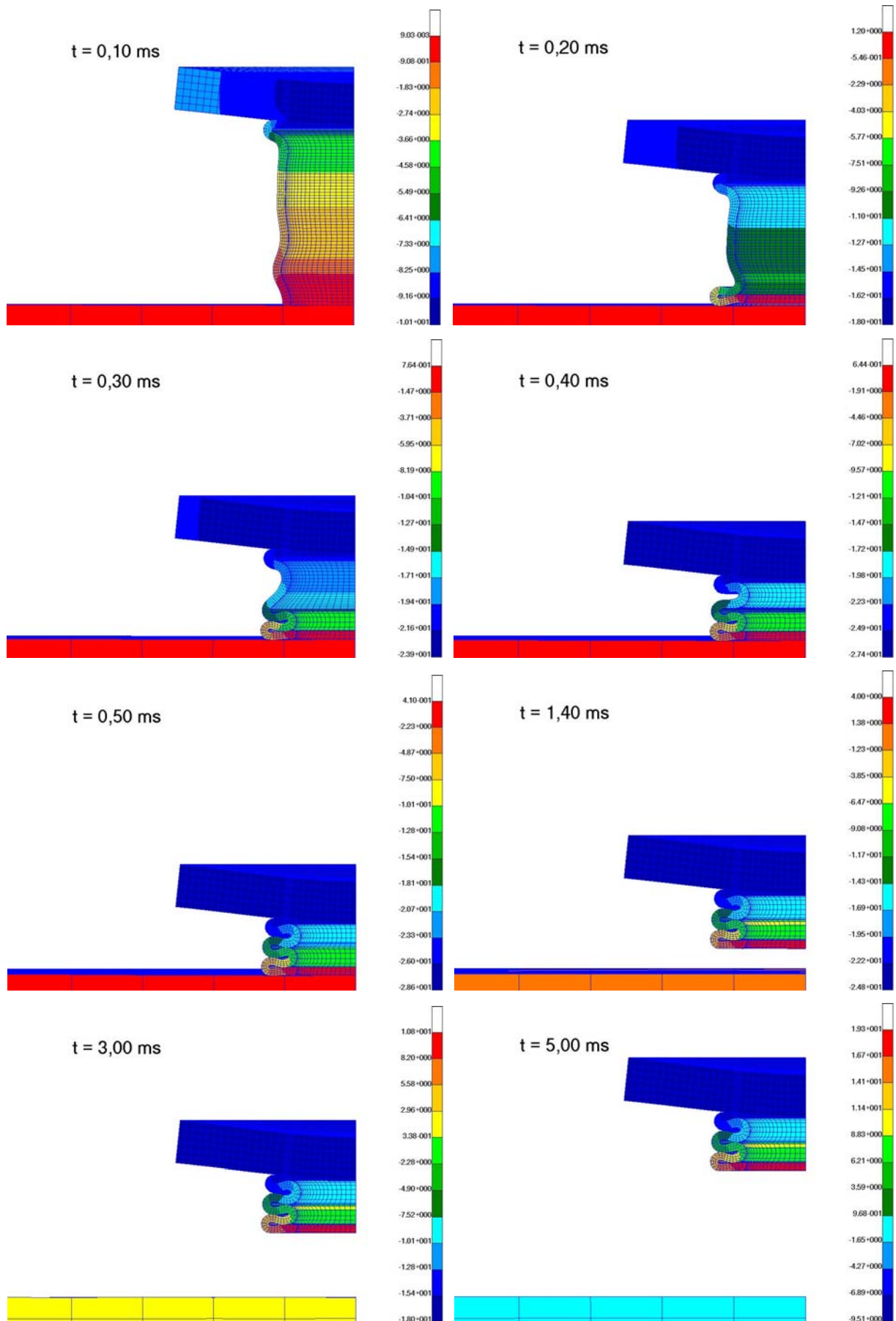


**Rys. 5.** Podstawowy impuls ciśnienia założony w symulacjach numerycznych

Na rys. 6. przedstawiono przebieg procesu deformacji modelu numerycznego elementu energochłonnego na płycie stanowiska badawczego. Proces niszczenia profilu cylindrycznego rozpoczyna się od utworzenia się w modelu górnej fałdy. W dalszej kolejności tworzy się pofałdowanie od strony płyty stanowiskowej. Jako ostatnia tworzy się fałda w części środkowej modelu profilu cylindrycznego. Zakończenie procesu formowania się fałd, a tym samym całkowite zniszczenie elementu energochłonnego następuje po upływie 430  $\mu$ s od momentu zadziałania ciśnienia. Kształt zniszczonej próbki jest podobny do kształtu próbki zgniecionej w procesie statycznego ściskania. W obu przypadkach dochodzi do utworzenia się trzech fałd. Zwraca uwagę również fakt utworzenia się wgłębienia w krążku przykrywającym profil cylindryczny. Identyczny efekt obserwuje się w badaniach doświadczalnych. W dalszej fazie symulacji numerycznej następuje oderwanie się elementu cylindrycznego od płyty i jego ruch w górę.

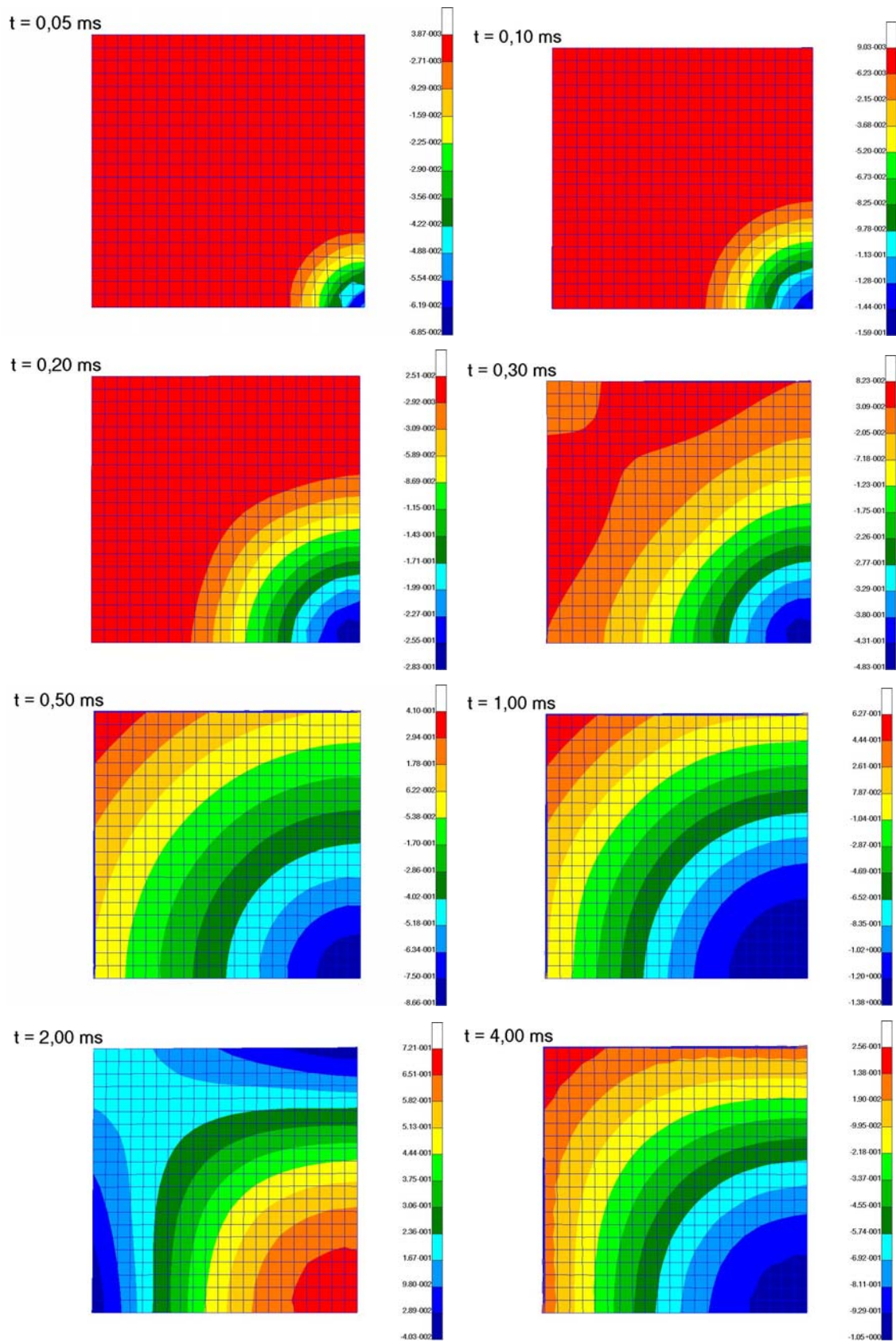
Deformacje elementów cylindrycznych przy pełnym zniszczeniu (fałdy w autokontakcie) przy obciążeniu statycznym i obciążeniu impulsem wybuchu są identyczne (skrócenie, liczba fałd) w analizowanych przypadkach.

Rys. 7 przedstawia warstwy przemieszczeń modelu płyty dla wybranych chwil czasowych.

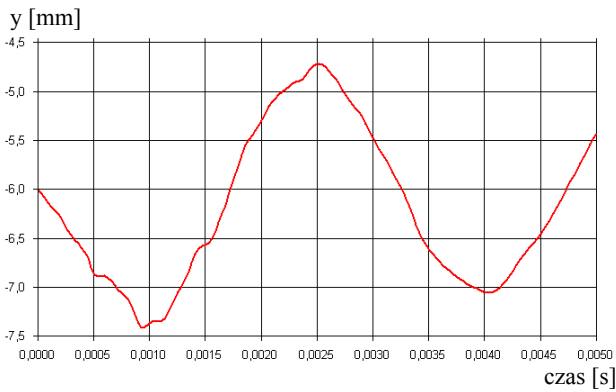


Rys. 6. Symulacja numeryczna deformacji ¼ elementu energochłonnego na płycie stanowiska głównego (na skali przedstawiono przemieszczenie pionowe)

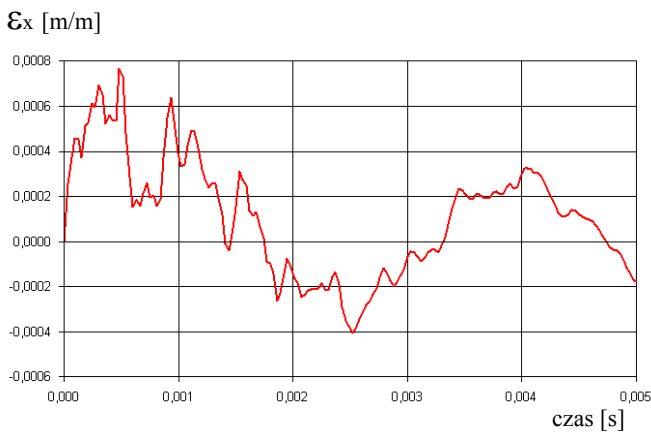




Rys. 7. Ugięcie płyty dla wybranych chwil czasowych



Rys. 8. Zmiana w czasie pionowego przemieszczenia węzła środkowego dolnej powierzchni płyty



Rys. 9. Odształcenie środkowego elementu płyty na dolnej powierzchni odpowiadające odształceniu  $\epsilon_x$  mierzonemu w trakcie badań doświadczalnych na stanowisku głównym

Drgania modelu płyty stanowiska głównego przedstawiono na rys. 8. Na wykresie zobrazowano zmianę w czasie położenia środkowego węzła dolnej powierzchni płyty. Płyta obciążana jest przez element energochłonny w czasie 430  $\mu$ s, po czym element odbija się od płyty. Ugięcie płyty w tym momencie osiąga w przybliżeniu połowę wartości maksymalnego ugięcia. Dalszy proces można traktować jako drgania własne o okresie 3,3ms.

Obliczone wartości odształceń w środkowym elemencie na dolnej powierzchni płyty wykazują taką samą podstawową częstość (rys. 9), jednak ze znacznym udziałem wyższych częstości. W badaniach eksperymentalnych dokonano pomiaru odształceń – z wykorzystaniem aparatury tensometrycznej – w środku płyty na kierunku prostopadłym do brzegu płyty.

### 2.1. Porównanie wyników badań doświadczalnych i analizy numerycznej w systemie MSC Dytran pojedynczego elementu energochłonnego

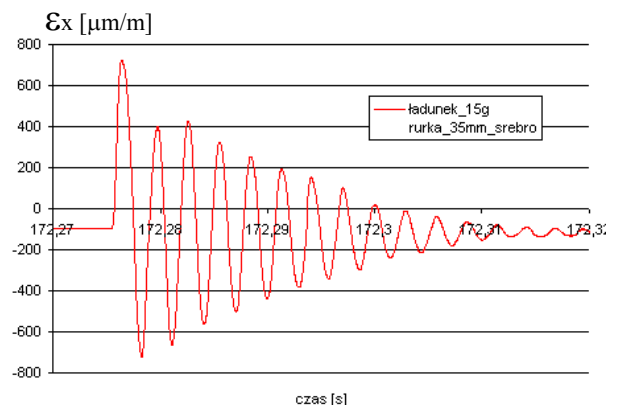
W celu weryfikacji poprawności modelu stanowiska głównego oraz sposobu aproksymacji obciążenia elementu energochłonnego falą ciśnienia pochodzącą z wybuchu ładunku MW przeprowadzono analizę porównawczą następujących przypadków:

- badanie doświadczalne - wybuch 15 g ładunku MW w odległości 15mm od elementu energochłonnego (przebieg odształcenia płyty rzeczywistej przedstawia rys. 10),

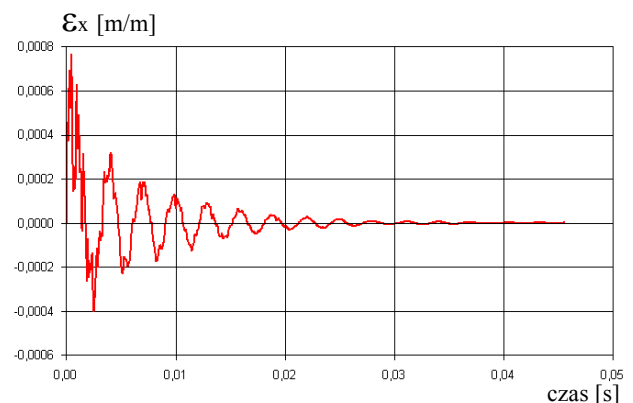
- symulacja numeryczna - obciążenie impulsem ciśnienia ( $p_{max} = 360\text{MPa}$ ,  $t=50\mu\text{s}$ ) górnej powierzchni płytki przykrywającej element energochłonny (przebieg odształcenia płyty w modelu numerycznym przedstawia rys. 11).

Porównanie otrzymanych wykresów (rys. 12) wskazuje na dobrą zgodność częstości drgań płyty rzeczywistej i jej modelu numerycznego. Maksymalne odształcenie sprężyste w obydwu przypadkach jest prawie identyczne i wynosi około 800  $\mu\text{e}$ . W modelu numerycznym występuje jednak zbyt silne tłumienie drgań. Jest ono efektem zastosowania uproszczonego (1-punktowego) całkowania równań ruchu i koniecznością wprowadzenia współczynnika tłumienia energii hourglass. Ma to na celu uniknięcia efektu klepsydrowania elementów bryłowych, gdyż w przypadku zastosowania zredukowanego całkowania (ang. *one-point integration*), podczas analizy numerycznej mogą wystąpić niefizyczne deformacje (mody pasożytnicze) nazywane klepsydrowaniem (ang. *hourglassing*). Mają one zazwyczaj charakter oscylacyjny, a ich okres drgań jest z reguły znacznie krótszy niż okres odpowiedzi badanej struktury.

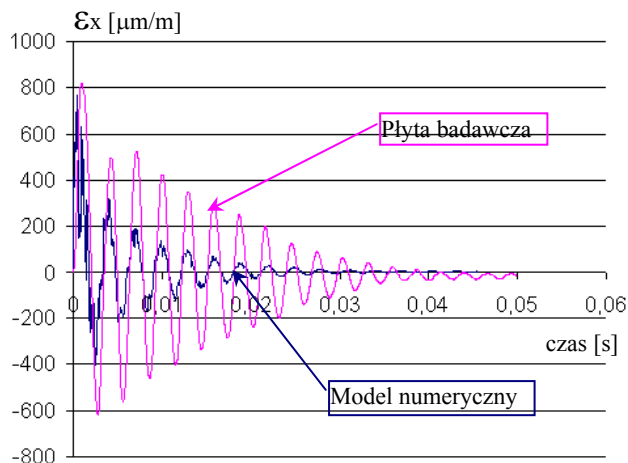
Skuteczną metodą tłumienia modów pasożytniczych jest zastosowanie w analizie elementów o pełnym całkowaniu. W elementach tych klepsydrowanie nigdy nie występuje, jednakże ich użycie jest bardziej kosztowne numerycznie i może z kolei doprowadzić do niefizycznego przeszywnienia modelu – tzw. blokady ścinania (ang. *shear locking*).



Rys. 10. Przebieg odształcenia  $\epsilon_x$  płyty na stanowisku badawczym



Rys. 11. Przebieg odształcenia  $\epsilon_x$  płyty w modelu numerycznym

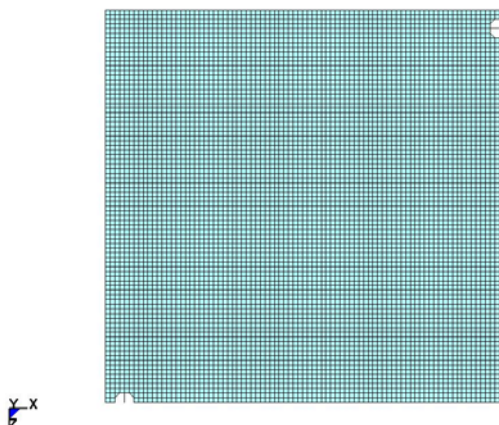


Rys. 12. Porównanie przebiegów odkształceń w płycie w doświadczeniu i modelu numerycznym

### 3. ANALIZA NUMERYCZNA PŁYTY STANOWISKA BADAWCZEGO W SYSTEMIE LS-DYNA

Brak pełnej zgodności wyników symulacji numerycznych i badań doświadczalnych przeprowadzonych na stanowisku głównym zdecydowały o przeprowadzenie analizy numerycznej modelu płyty stanowiskowej w systemie LS-Dyna. Dużą zaletą zastosowania tego systemu była możliwość wykonania analizy z użyciem stacji wieloprocesorowej, a co za tym idzie znaczne skrócenie czasu obliczeń.

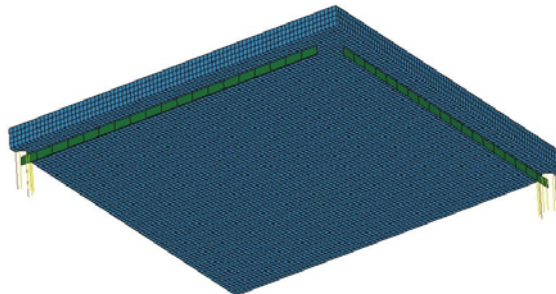
Model numeryczny płyty stanowiska składał się z czterech warstw elementów bryłowych. W stosunku do poprzedniego modelu zagęszczono czterokrotnie siatkę MES w każdej warstwie. Podobnie jak poprzednio, ze względu na symetrię do modelowania przyjęto  $\frac{1}{4}$  stanowiska. Na rys. 13 przedstawiono model numeryczny płyty stanowiska w widoku z góry.



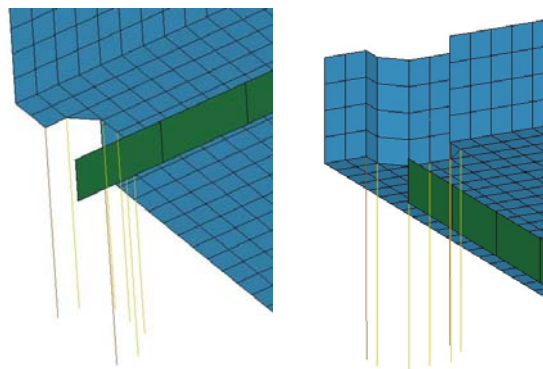
Rys. 13. Model płyty stanowiska głównego (widok z góry)

Pryzma, na której opiera się płyta została utworzona z nieodkształcalnych elementów powłokowych (rys 14). Połączenie płyty ze stanowiskiem przy pomocy śrub zrealizowano używając grupy elementów prętowych (rys. 15). Elementy te łączyły poszczególne węzły leżące

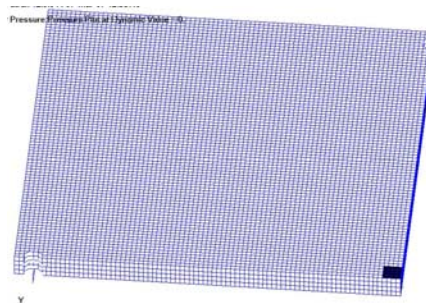
na obwodzie otworu pod śrubę z nieodkształcalnym podłożem. Długość tych elementów odpowiadała rzeczywistej długości śruby. Natomiast sumaryczna sztywność grupy elementów prętowych odpowiadała rzeczywistej sztywności śruby. Zdefiniowano kontakt pomiędzy elementami podpór a płytą stanowiskową.



Rys. 14. Płyta stanowiska głównego (widok od spodu). Kolorem zielonym zaznaczono elementy powłokowe modelujące pryzmy, na których opiera się płyta



Rys. 15. Sposób modelowania śruby mocującej płytę do stanowiska głównego. Kolorem żółtym oznaczono grupę elementów prętowych o sumarycznej sztywności odpowiadającej rzeczywistej sztywności śruby.

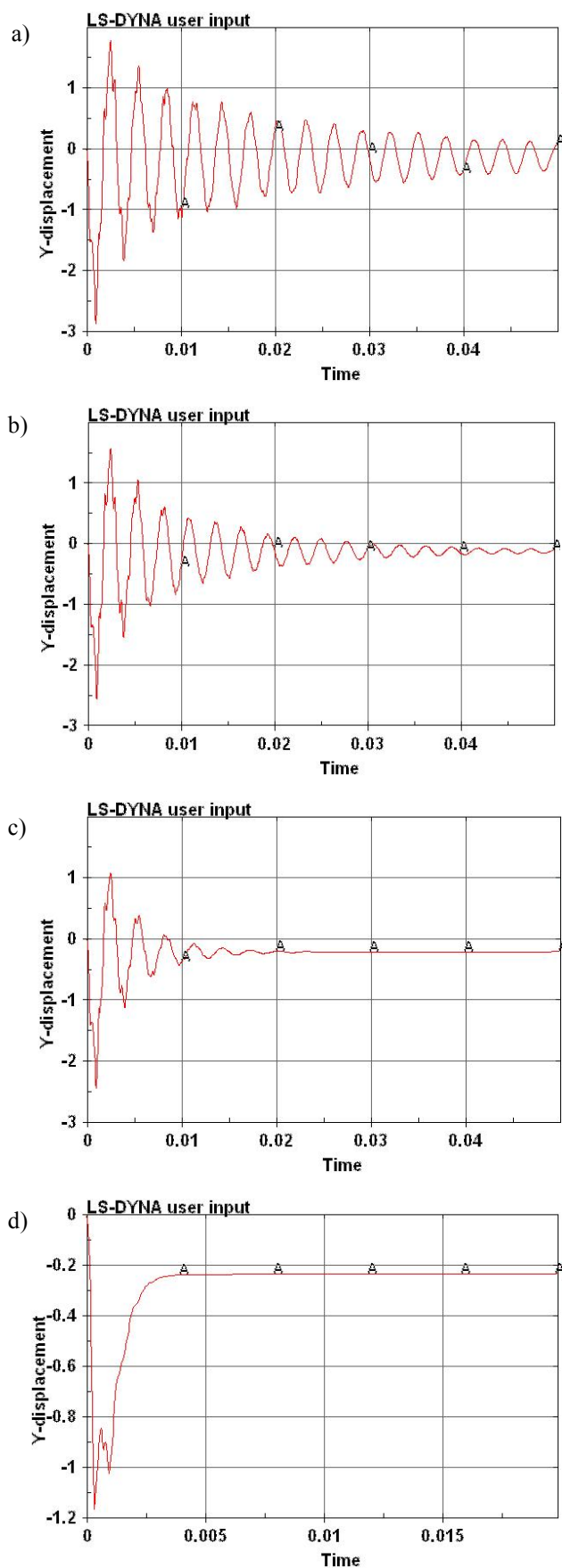


Rys. 16. Obszar oddziaływania ciśnienia dla obliczeń z przypadków a-d z rys 17

LS-DYNA oferuje użytkownikom dodatkowo kilka metod kontrolowania zjawiska klepsydrowania. Jedną z metod polega na kontrolowaniu lepkości materiału (ang. *bulk viscosity*) modelu. Lepkość ta (podczas obliczeń) jest automatycznie przeliczana przez program, natomiast użytkownicy mają możliwość odpowiedniej jej modyfikacji przy pomocy współczynników lepkości – pierwszego oraz drugiego rzędu. Radykalne zwiększanie wartości tych



współczynników może mieć jednak bardzo niekorzystny wpływ na ogólną postać deformacji badanej struktury.



Rys. 17. Przebieg drgań płyty dla różnych wartości współczynnika tłumienia: a)10, b)150, c)400, d)4000

Mody pasożytnicze mogą być również tłumione poprzez dodawanie sztywności sprężystej do modelu. Niekiedy jest to bardziej korzystne niż stosowanie metod związanych z lepkością materiału (np. gdy w analizie zastosowano tzw. dynamiczną relaksację). Sztywność sprężystą dodaje się, zwiększając współczynnik klepsydrowania (ang. *hourglass coefficient*). Należy jednak pamiętać, że zbyt duża jego wartość (z reguły powyżej 0.15) może:

- w przypadku dużych deformacji doprowadzić do przeszywnienia modelu
- powodować niestabilności rozwiązania.

Ważnym aspektem opisywanego zagadnienia jest kontrola wpływu klepsydrowania na otrzymywane wyniki. LS-DYNA oferuje użytkownikom możliwość monitorowania (podczas obliczeń) energii dysypowanej przez siły przeciwdziałające tworzeniu się omawianych deformacji. Według ogólnie przyjętych zasad nie powinna ona przekraczać 10% energii wewnętrznej rozpatrywanego modelu/układu.

W analizie numerycznej zastosowano pełne całkowanie równań ruchu. Wprowadzono współczynnik tłumienia (global damping). Kształt impulsu ciśnienia przyjęto identyczny jak w przypadku obliczeń w systemie MSC Dytran. Płyta obciążona była ciśnieniem rozłożonym na 16 środkowych elementach. Obszar oddziaływania ciśnienia odpowiada obszarowi oddziaływania cylindra na płytę (rys. 16). Na rys. 17a-d przedstawiono drgania płyty stanowiskowej przy różnych wartościach współczynnika tłumienia. Przypadek d odpowiada tłumieniu krytycznemu. Dla przypadku b (wartość współczynnika tłumienia równa 150), otrzymany wykres najlepiej odzwierciedla rzeczywisty przebieg drgań płyty stanowiskowej (rys.10).

#### 4. WNIOSKI

Symulacje numeryczne przeprowadzone na modelu stanowiska pokazały dobrą zgodność w zakresie jakościowym deformacji energochłonnego elementu cylindrycznego i jego modelu numerycznego. Duże trudności w analizie numerycznej sprawiło powstawanie w trakcie analiz zjawiska hourglassingu (tzw. klepsydrowania), polegającego na niefizycznych deformacjach elementów brylowych. W programie MSC Dytran problemu tego nie udało się poprawnie rozwiązać. Dla modelu stanowiska z elementem energochłonnym, przy braku tłumienia energii hourglass, dochodziło do niefizycznych deformacji elementów cylindrycznych przy poprawnej deformacji płyty stanowiskowej. Z kolei podwyższanie wartości współczynnika tłumienia energii hourglass dawało poprawną deformację elementu cylindrycznego i niefizyczne odkształcenia elementów modelujących płytę stanowiska. Problem ten udało się rozwiązać w systemie LS-Dyna, dzięki zastosowaniu m.in. tłumienia wiskotycznego (global damping).

Ogólnie należy uznać, że system obliczeń numerycznych LS-Dyna umożliwia dokładniejszy opis analizowanego zagadnienia, niż MSC.Dytran, aczkolwiek przyjęcie wartości poszczególnych współczynników wymaga wspomaganie się wynikami doświadczalnymi.

## LITERATURA

1. **Krzewiński R.** (1982), Dynamika wybuchu – Część 1 – Metody określania obciążeń, Wydawnictwo WAT, Warszawa.
2. **Krzewiński R.** (1982), Dynamika wybuchu – Część II – Działanie wybuchu w ośrodkach inercyjnych, Wydawnictwo WAT, Warszawa.
3. **Krzewiński R., Rekucki R.** (2005), Roboty budowlane przy użyciu materiałów wybuchowych, Wydawnictwo Polcen, Warszawa.
4. **Włodarczyk E.** (1994), Wstęp do mechaniki wybuchu, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
5. **Cieśla P., Dacko A., Nowak J.** (2005), Axial crush of thin walled tubes – experiment and simulation, 16th International Conference on Computer Methods in Mechanics, Częstochowa.
6. **Cieśla P., Dacko A., Dacko M., Nowak J.** (2005), Duże odkształcenia elementów cienkościennych poddanych ścisłaniu, Materiały IX Konferencji Naukowo-Technicznej Programy MES w komputerowym wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania, Giżycko.
7. **Cieśla P., Dacko A., Dacko M., Nowak J.** (2005), Symulacja numeryczna zachowania elementu o dużej zdolności pochłaniania energii, Materiały IX Konferencji Naukowo-Technicznej Programy MES w komputerowym wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania, Giżycko.
8. **Cieśla P., Dacko A., Dacko M., Nowak J.** (2006), Analiza i eksperyment w badaniu udarowej odporności konstrukcji, Górnictwo Odkrywkowe 5-6.
9. **Dacko M., Kiczko A., Nowak J., Dacko A., Cieśla P.** (2007), Doświadczalna analiza pakietu elementów cylindrycznych obciążonych impulsem wybuchu, Journal of KONES Powertrain and Transport, vol. 14, No. 1.
10. **Nowak J., Dacko A., Dacko M.** (2007), Doświadczalna analiza powłoki cylindrycznej obciążonej impulsem wybuchu – Journal of KONES Powertrain and transport, vol. 14, No. 1.

## ANALYSIS OF BLAST LOADED ENERGY ABSORBING ELEMENTS USING LS-DYNA AND MSC.DYTRAN SYSTEMS

**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 and LS-Dyna. The test rig was setup in numerical model. It consisted of rigid base and the base plate resting on it. The model of energy absorbing cylinder was created. The load was modeled by applying a varying pressure to the top cover of the cylinder. The results of numerical simulation was compared to the results of experiments