

KYZIOŁ Lesław¹

Komputerowe wspomaganie projektowania zbiornika do transportu materiałów wybuchowych

Słowa kluczowe: odporność udarowa zbiornika, obliczenia dynamiczne, detonacje ładunków

Streszczenie

Zaprezentowano przebieg niszczenia zbiornika na skutek eksplozji w jego wnętrzu. Niszczenie zbiornika zobrazowano w postaci symulacji komputerowej. Określono wytyczne projektowania zbiornika w oparciu o walidację wyników symulacji. Do badań symulacyjnych wykorzystano oprogramowanie ANSYS®AUTODYN® przeznaczone do analizy zagadnień dynamicznych.

COMPUTER AIDED DESIGN OF THE TANK, THAT IS MADE TO TRANSPORT THE EXPLOSIVES

Abstract

In the article the initial approach of the author was showed to simulate the destruction course of the container intended to the explosives transportation after the explosion into his interior. The aims were presented in reaching them and possibilities of their realizing. Initial results of the computer simulation of the destruction of the special container were described. One qualified guidelines to the further work especially considering the validation of simulation results. To stimulatory subjects one used the latest software of the explicit type ANSYS® AUTODYN® dedicated for assignments of the non-linear dynamics.

1. WSTĘP

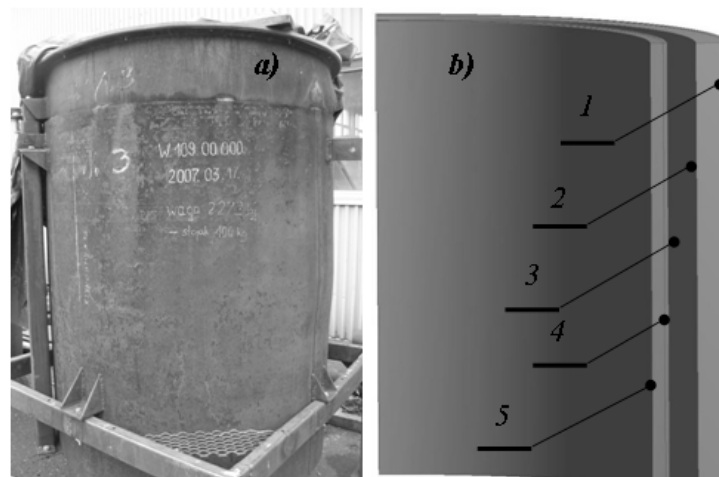
Zgodnie z obecnie obowiązującymi przepisami transport ładunków wybuchowych, niewypałów w ruchu ulicznym musi być bezpieczny. Aby to zapewnić należy materiały niebezpieczne przewozić w odpowiednich pojemnikach. W artykule przedstawiono pojemnik poddany obciążeniom dynamicznym. Jest on zamontowany na specjalnym pojeździe i stanowi jego integralną część [6].



Rys. 1. Pojazd specjalny ze zbiornikiem.

Na rys. 1 przedstawiono konstrukcję takiego pojazdu ze zbiornikiem. Jest on przystosowany do transportu w zbiorniku materiałów wybuchowych, niewypałów, niewybuchów i spełnia wszystkie wymagania dotyczące warunków technicznych pojazdów specjalnych. Pojemniki takie wykonywane są ze stali i umożliwiają bezpieczny przewóz materiałów wybuchowych o masie do 10 kg TNT. W celu uniemożliwienia zdalnego odpalenia ładunku przy użyciu urządzeń radiowych i telekomunikacyjnych pojemniki takie najczęściej są ekranowane elektromagnetycznie. Pojemnik jest przewidziany do wielokrotnego użytku.

¹ Akademia Morska w Gdyni, Wydział Mechaniczny, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, lkyz@am.gdynia.pl, 694-476-390



Rys. 2. Zbiornik i jego główne elementy: a) widok, b) budowa: 1 – płaszcz zewnętrzny, 2 – płaszcz gumowy, 3 – przestrzeń powietrzna, 4 – płaszcz pancerny, 5 – płaszcz wewnętrzny.

Wymiary omawianego zbiornika są następujące: średnica zewnętrzna zbiornika 1332 mm, wysokość całkowita 1840 mm a wysokość bez pokryw 1500 mm. Na rys. 2 przedstawiono widok zbiornika i jego budowę. Główne elementy składowe zbiornika uwzględniono następnie w modelu dyskretnym. Konstrukcja zbiornika pozwala na transport pocisków odłamkowo-burzących kalibru 152,4 mm (masa ładunku wybuchowego TNT 6,25 kg)). Pociski takie pochodzące z II wojny światowej znajduje się najczęściej podczas prac ziemnych przy budowie budynków lub dróg.

2. PRZEBIEG BADAŃ

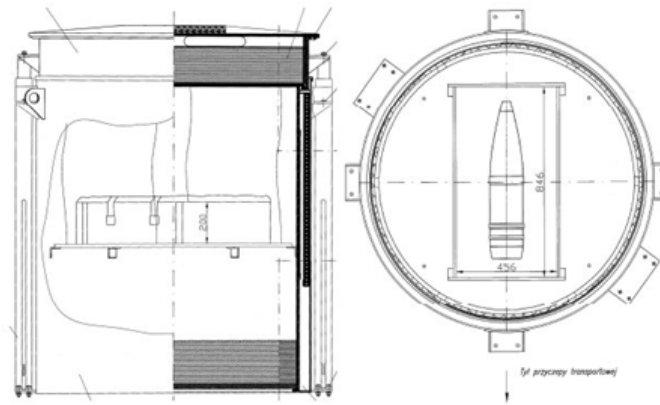
2.1. Warunki przebiegu badań

Zbiorniki o takim przeznaczeniu muszą być wykonane z materiałów charakteryzujących się odpowiednimi właściwościami wytrzymałościowymi, plastycznymi, technologicznymi oraz fizyko-chemicznymi. Stal z której wykonuje się zbiorniki musi być spawalna oraz zdolna do przenoszenia wysokich obciążeń eksploatacyjno-korozyjnych, udarowych i balistycznych bez skłonności do pękania. Konstrukcja takiego zbiornika musi się charakteryzować odpornością na eksplozję niekontaktową oraz przenikanie przez pociski i odłamki bojowe. Pojemnik charakteryzuje się ściśle określoną geometrią oraz dopuszczalnym ciężarem ze względu na posadowienie go na podwoziu samochodowym. Badania tego rodzaju konstrukcji prowadzi się na poligonach. Ze względu na jej złożoność oraz to, że po każdej próbie może ona ulec całkowitemu zniszczeniu, w związku z tym koszty prowadzonych badań są bardzo wysokie. Dlatego badania poligonowe muszą zostać poprzedzone badaniami symulacyjnymi pozwalającymi praktycznie na nieograniczone poszukiwania optymalnych rozwiązań. Inżynier mający do dyspozycji narzędzie jakim są oprogramowania profesjonalne jest w stanie określić „wewnętrzna odpowiedź konstrukcji” na zadane obciążenie poprzez wizualizację przebiegu destrukcji wnętrza zbiornika oraz analizę wyników obliczeń odnoszących się przede wszystkim do praw fizyki. W badaniach poligonowych destrukcyjna wizualizacja wybuchu wewnątrz zbiornika jest oczywiście niemożliwa, podobnie jak uzyskanie parametrów w oparciu o przeprowadzone pomiary. W takich przypadkach wykonuje się w ograniczonym zakresie pomiary wybranych parametrów.

Przeprowadzona obliczenia mają na celu sprawdzenie, czy dla tak silnie nieliniowych zjawisk fizycznych jakim jest proces detonacji możliwe staje się modelowanie komputerowe całego procesu destrukcji łącznie z jego skutkami. Do badań symulacyjnych zastosowano system ANSYS®AUTODYN® dedykowany dla zadań dynamiki nieliniowej. W obliczeniach uwzględnia się maksymalną liczbę czynników fizycznych, buduje modele matematyczne a następnie wykorzystuje się kody obliczeniowe; począwszy od uwzględnienia nieliniowości materiału aż do jego przejścia w stan ciekły. Wyniki obliczeń porównano z efektami prób uzyskanymi na poligonie.

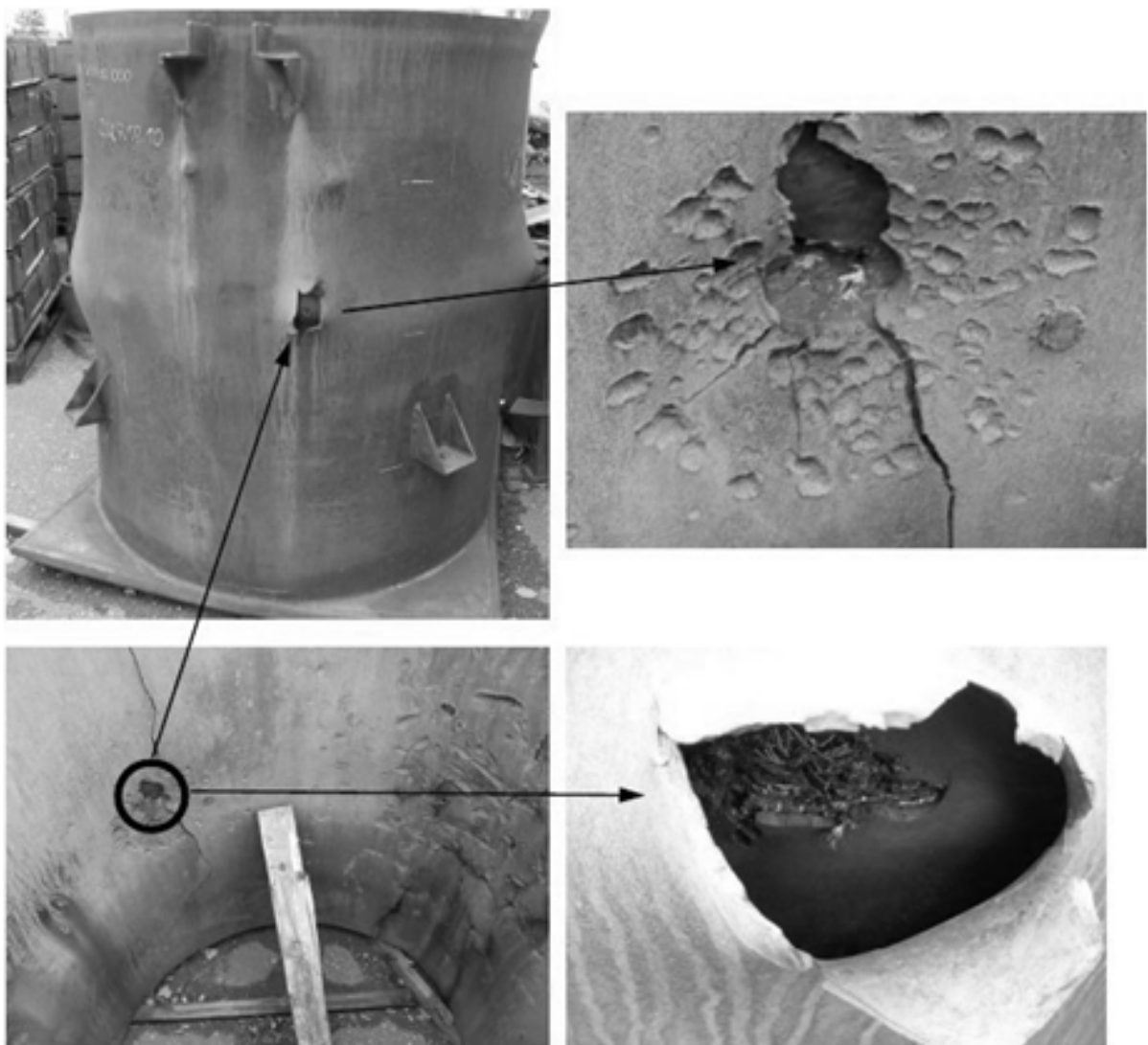
2.2. Przebieg badań poligonowych

Badania poligonowe przeprowadzono dla dwóch pojemników wykonanych odpowiednio ze stali S235JR oraz 18G2. W pojemnikach tych zdetonowano pociski kalibru 152,4 mm. Masa ładunku wybuchowego w każdym zbiorniku wynosiła 6,25 kg TNT. Na rys.3 przedstawiono schemat zbiornika i usytuowany w nim pocisk.



Rys. 3. Schemat zbiornika z pociskiem.

Zbiornik ze stali S235JR po detonacji w jego wnętrzu pocisku przedstawiono na rys. 4, a ze stali 18G2 na rys. 5.



Rys. 4. Zbiornik ze stali S235JR po detonacji z widoczną miejscową perforacją.



Rys. 5 Zbiornik ze stali 18G2 po detonacji.

Przeprowadzone badania poligonowe wykazały jak bardzo istotny jest materiał z którego wykonano zbiorniki. Zbiornik wykonany ze stali (18G2) o wyższych parametrach wytrzymałościowych nie ulega perforacji tak jak zbiornik ze zwykłej stali. Ponadto zaobserwowano na podstawie przeprowadzonych badań, że zbiornik ze stali S235JR nie uległ zniszczeniu bezpośrednio od ciśnienia wywołanego detonacją ładunku wybuchowego. Jego perforacja była spowodowana oddziaływaniem odłamków. Najbardziej destrukcyjne jest oddziaływanie odłamka uformowanego z tylnej części pocisku. Odłamek taki zachowuje się jak pocisk, który z prędkością powyżej 1000 m/s przebił zbiornik [2, 9].

3. ZALEŻNOŚCI OPISUJĄCE ZJAWISKA WYBUCHU

Jednym z bardzo istotnych problemów fizyki wybuchu jest badanie zjawiska inicjacji procesu detonacji materiałów wybuchowych. Zagadnienie to jest bardzo złożone i nie do końca rozwiązane. Płaskim ruchem gazu rządzą równania, wyrażające odpowiednie prawa zachowania masy i impulsu [7]

$$\rho_0 = \rho(1 + u_{,r}) \quad (1)$$

$$u_{,tt} = -\frac{1}{\rho_0} p_{,r} \quad (2)$$

oraz równanie stanu

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma \quad (3)$$

gdzie: p , ρ , u i γ - odpowiednio ciśnienie, gęstość, przemieszczenie i wykładnik politropy gazu,
 p_0 , ρ_0 odpowiednio początkowe parametry stanu gazu,
 r – współrzędna Lagrange'a,

t – czas.

Równania (1) i (2) można zredukować do jednego równania falowego

$$u_{,tt} = a^2(u_{,r})u_{,rr} \quad (4)$$

lub zastąpić dwoma równaniami zwyczajnymi, spełnionymi wzdłuż charakterystyk

$$du_{,t} = \pm a(u_{,r})du_{,r} \quad (5)$$

dla

$$dr = \pm a(u_{,r})dt \quad (6)$$

gdzie: $a(u_{,r})$ – prędkość rozprzestrzeniania się zaburzeń we współrzędnych Lagrange'a.

Dla gazu politropowego wyraża się ona wzorem

$$a(u_{,r}) = c_0(1 + u_{,r})^{-\frac{\lambda+1}{2}} = c_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\lambda+1}{2\gamma}}, \quad c_0 = \left(\gamma \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Po podstawieniu wyrażenia (7) do (5) i ich scałkowaniu, uzyskujemy

$$u_{,t} = v = \frac{2c_0}{\gamma-1} \left[1 - (1 + u_{,r})^{-\frac{\gamma-1}{2}} \right] + J_+ = \frac{2c_0}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \right] + J_+ \quad (8)$$

dla $dr = adt$ oraz

$$\begin{aligned} u_{,t} = v &= -\frac{2c_0}{\gamma-1} \left[1 - (1 + u_{,r})^{-\frac{\gamma-1}{2}} \right] + J_- = -\frac{2c_0}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \right] + J_- \\ &= -\frac{2c_0}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \right] + J_- \end{aligned} \quad (9)$$

dla $dr = -adt$,

gdzie: v – prędkość przepływu ośrodka,

J_+ , J_- – niezmienniki Riemana zachowujące stałe wartości wzdłuż odpowiednich charakterystyk. Ich wartości określamy z warunków granicznych danego zagadnienia.

Na powierzchniach silnych nieciągłości wyrażenia różniczkowe i pochodne tracą sens. W takich przypadkach korzystamy z prawa zachowania masy i impulsu w formie skończonej

$$(d_n - v_n)\rho_n = (d_n - v_{n-1})\rho_{n-1} \quad (10)$$

$$P_n - P_{n-1} = (d_n - v_{n-1})(v_n - v_{n-1})\rho_{n-1} \quad (11)$$

gdzie: d_n – prędkość propagacji czoła n -tej fali uderzeniowej,

$n-1$ – parametry stanu gazu przed czołem,

n – parametry stanu gazu na czole fali uderzeniowej.

Dla gazu politropowego, równanie adiabaty uderzeniowej, które jest uzupełnieniem zależności (10) i (11) przyjmuje postać

$$\frac{p_n}{p_{n-1}} = \frac{(\gamma+1)\rho_n - (\gamma-1)\rho_{n-1}}{(\gamma+1)\rho_{n-1} - (\gamma-1)\rho_n} \quad (12)$$

lub

$$\frac{\rho_n}{\rho_{n-1}} = \frac{(\gamma+1)p_n + (\gamma-1)p_{n-1}}{(\gamma-1)p_n + (\gamma+1)p_{n-1}} \quad (13)$$

Warunki graniczne należy formułować w trakcie rozwiązywania problemu w poszczególnych obszarach płaszczyzny falowej r, t [7].

Stopień tłumienia fali uderzeniowej w powietrzu, jako skutku zastosowania określonych rozwiązań technicznych, określono poprzez zastosowanie teorii podobieństwa wybuchu. Nadciśnienie fali uderzeniowej przy detonacji kulistego ładunku trotylu swobodnie zawieszzonego w powietrzu można obliczyć z wystarczającą do celów praktycznych dokładnością, wykorzystując zależność Sadowskiego [8]

$$\Delta P = 84 \cdot R_z^{-1} + 270 \cdot R_z^{-2} + 700 \cdot R_z^{-3} \quad [\text{kPa}] \quad (14)$$

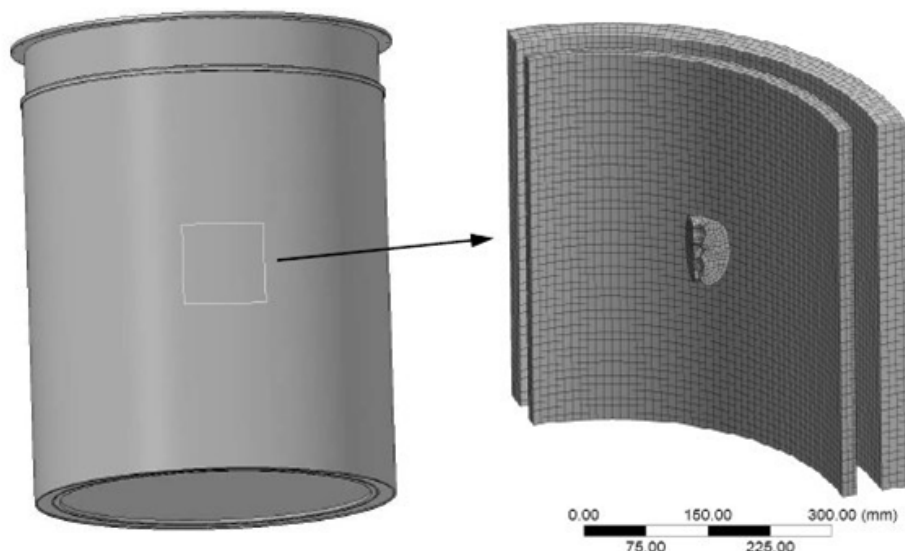
gdzie: R_z – "odległość zredukowana" wyznaczona z zależności

$$R_z = R \cdot G^{-\frac{1}{3}}$$

gdzie: G – masa ładunku wyrażona w kg trotylu.

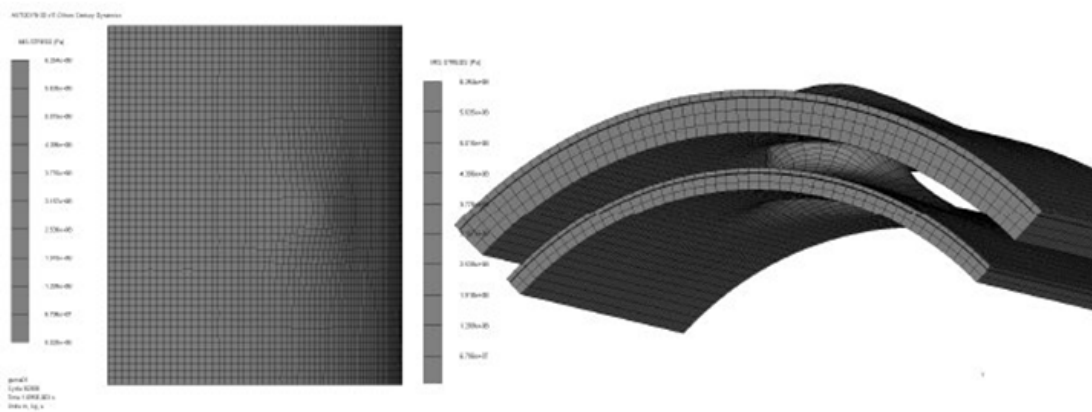
4. OBLICZENIA NUMERYCZNE

Model dyskretny zbiornika i pocisku wykonano w systemach CAD/CAE (rys. 6), zgodnie z dokumentacją [9]. Szczególną uwagę zwrócono na współpracę poszczególnych części. Tak przygotowane złożenie wprowadzono do systemu MES i poddano dyskretyzacji. Wykorzystując zawarte w systemie ANSYS®AUTODYN® procedury uwzględniono warunki brzegowo-początkowe dotyczące symulowanego procesu. Wewnątrz i na zewnątrz zbiornika uwzględniono powietrze jako ośrodek rozprzestrzeniania się fali detonacyjnej. Uwzględniono materiał wybuchowy w pocisku taki jaki jest w rzeczywistości (położenie, objętość, masę, kształt, punkt inicjowania detonacji). Każdy element zbiornika opisany został modelem materiałowym uwzględniającym plastyczne zachowanie się materiału, erozję i efekt pełnego zniszczenia.



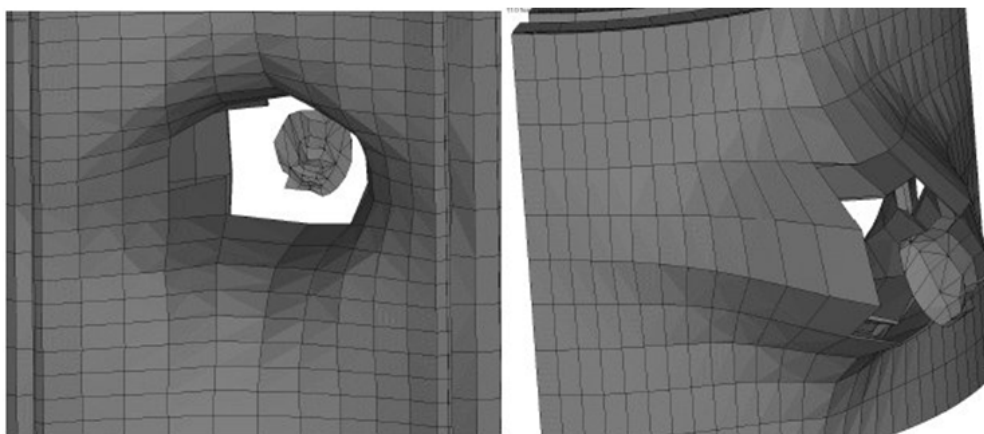
Rys. 6. Geometria przestrzenna i zdyskretyzowany wycinek zbiornika

Układ jest bardzo złożony i w każdym przypadku należy do systemu wprowadzić minimum 36 zmiennych materiałowych. Modeli materiałowych uwzględnianych podczas jednej symulacji może być od kilku do kilkunastu. Sam proces pozyskiwania danych materiałowych może być aspektem osobnych badań naukowych a od nich zależy przede wszystkim jakość uzyskiwanych wyników.



Rys. 7. Eksperyment numeryczny zbiornika ze stali S235JR w którym widoczna jest perforacja odłamkiem

Niezbędne dane do obliczeń przyjęto z bazy materiałowej oprogramowania ANSYS®AUTODYN®. Narzędzie do przeprowadzenia symulacji jakim jest system ANSYS®AUTODYN® oparte jest na tzw. hydrokodach (Lagrange'a, Euler, SPH). Teoria w tym zakresie jest znana i opisana w literaturze [1, 3, 4]. Istotą tej symulacji jest wykazanie, czy efektywne może być zastosowanie tej teorii w odniesieniu do rzeczywistości poprzez walidację uzyskiwanych wyników. Odpowiedzialność za jej poprawne użycie spoczywa na przeprowadzającym obliczenia. Pełna symulacja wymaga zastosowania wieloprocesorowych klastrów obliczeniowych do których na tym etapie badań nie było dostępu. Ograniczono się zatem do analizy fragmentu zbiornika (rys. 6) i oddziaływania pojedynczego odłamka przy ustalonych warunkach początkowo-brzegowych. Po przeprowadzonych obliczeniach uzyskano wyniki, które zobrazowano na rys. 7 i 8.



Rys. 8. Eksperyment numeryczny; zbiornik ze stali 18G2 w którym brak perforacji odłamkiem

Wyniki obliczeń numerycznych odpowiadają efektom uzyskanym na próbach poligonowych.

5. WNIOSKI

Zasadniczo uzyskano cel pracy ponieważ wykazano, że procesy silnie nieliniowe poprzez wykorzystanie hydrokodu pozwalają na ich symulowanie. Wyniki przeprowadzonych obliczeń wykazały, że od strony programowej nie ma żadnych ograniczeń. Ponadto istnieje możliwość wprowadzania do systemu własnych procedur w przypadku niestandardowych modeli obliczeniowych.

W przypadku takich konstrukcji jak zbiorniki specjalne w których zachodzą złożone procesy i badania na rzeczywistych obiektach są bardzo kosztowne, zastosowania badań symulacyjnych powinno mieć zawsze pierwszeństwo przed badaniami na rzeczywistych obiektach. Szczególnie dotyczy to przypadków kiedy są ograniczone możliwości uzyskania niezbędnych danych ze względu np. na destrukcyjny charakter przebiegu eksperymentu spowodowany zniszczeniem badanej konstrukcji.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Dobrociński S.: Stabilność rozwiązań zagadnień odporności udarowej konstrukcji, ITE, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2000.
- [2] Zecevic B. et al.: Influence of Warhead Design on Natura Fragmentation Performances, 15th DAAAM International Symposium, Intelligent Manufacturing & Automation: Globalization–Technology–Men–Nature, Vienna, Austria 3-6th November 2004, 11-12.
- [3] Jach K.: Komputerowe modelowanie dynamicznych oddziaływań ciał metodą punktów swobodnych, PWN, Warszawa, 2005.
- [4] AUTODYN®Explicit Software for Nonlinear Dynamice, Theory Manual Revision 4.3, Century Dynamics, 2005.
- [5] Johnson & Cook.: LA-4167-MS Selected Hugoniot EOS, 7th Int. Symp. Ballistics, 1969.
- [6] <http://www.jakusz.com.pl/>.
- [7] Włodarczyk E.: Wstęp do mechaniki wybuchu, WAT, Warszawa 1992.
- [8] Sadowskij M. A.: Mechaniczeskoje dejstvije vosduhnych udarnych volon po donnym eksperymentalnych issledovanij. Fizika vzryva, 1952, nr 1.
- [9] Kyzioł L., Flis L.: The Initial Analysis of the Special Container Resistance under the Impact Loads, Polish J. of Environ. Stud. Vol. 17, No. 5A (2008), 37-44.