SAFETY OF CRITICAL INFRASTRUCTURES - CHOSEN MODELING STUDIES OF ENERGY INFRASTRUCTURE ELEMENTS

BEZPIECZEŃSTWO INFRASTRUKTURY KRYTYCZNEJ – WYBRANE BADANIA MODELOWE ELEMENTÓW INFRASTRUKTURY ENERGETYCZNEJ

Małachowski Jerzy, Niezgoda Tadeusz

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny

jerzy.malachowski@wat.edu.pl

Abstract: *This research has been inspired by security concerns due to the recent increase in the terrorist threat to gas and crude oil transportation around the world, especially in regions that are of significant value for the energy supplies. Computational mechanics methods will be used in this research to apply shock wave analysis for possible damage assessment of the affected pipelines. These methods may be also used for pipelines at power plants, which are usually placed high on the homeland security priority list. This study is primarily focused on the behaviour of some type of pipeline elements existing in gas pipeline system which can be subjected to the shock wave produced by the detonation of highly explosive (HE) materials. In this kind of studies the numerical coupling procedure describing interaction between gas and solid domain was implemented. Outcomes of this research are very important in preventing damage progression of pipelines under the blast loading.*

Keywords: *impulse loading, energetic infrastructure, numerical simulation*

Streszczenie: *Sektor paliwowo energetyczny ma strategiczne znaczenie dla gospodarki i obronności państwa. Ostatnio, sytuacja zarówno w kraju, jak też i na świecie, pokazuje, iż działań o charakterze terrorystycznym praktycznie możemy się spodziewać w każdej chwili, z uwagi na łatwość dostępu do instalacji służących do transportu gazu i paliw płynnych. W przedstawionym obszarze istnieje potrzeba wykonywania złożonych badań symulacyjnych z użyciem bardzo zaawansowanych metod, w tym metod komputerowych mechaniki. Dzięki badaniom tego typu można nie tylko wyselekcjonować słabe miejsca w konstrukcji, ale także zaproponować lepsze rozwiązania ukierunkowane na poprawę bezpieczeństwa. W poniższej pracy przedstawione pewne wybrane wyniki z analiz numerycznych oddziaływania detonacyjnego na elementy rur przesyłowych stosowanych do transportu medium energetycznego.*

Słowa kluczowe: *obciążenie impulsowe, infrastruktura energetyczna, symulacja numeryczna*

1. Wstęp

Sektor energetyczny ma strategiczne znaczenie dla gospodarki i obronności państwa, zwłaszcza w sytuacji uzależnienia od zewnętrznych dostaw ropy i gazu oraz znacznego tranzytu tych mediów przez jego terytorium. Problemy związane z eksploatacją systemów rurociągowych mają niezmiennie szeroki zakres. Obejmują m.in. następujące działy nauki: detekcja, komputerowe systemy przetwarzania i interpretacji sygnału, gromadzenie informacji, sztuczna inteligencja, diagnostyka, automatyka, zautomatyzowane systemy podejmowania decyzji, organizacja i zarządzanie.

Ostatnio mieliśmy dowody na to, że istnieje możliwość wystąpienia działań o charakterze terrorystycznym, których – z uwagi na wspomnianą łatwość dostępu do tego typu elementów transportu gazu i paliw płynnych – praktycznie możemy się spodziewać w każdej chwili. Codzienna prasa przynosi nam mnóstwo informacji dotyczących działań terrorystycznych skierowanych przeciwko takim obiektom. W Polsce praktycznie tego typu badań nikt do pewnego czasu nie prowadził, szczególnie na takich obiektach, jak rurociągi przesyłowe i związana z nimi infrastruktura. W literaturze można już znaleźć aplikacje metod numerycznych, które pozwalają na symulację rozchodzenia się fal powstałych po detonacji materiałów wybuchowych i efekty ich oddziaływań na rzeczywiste obiekty [2,4,5,6]. Badania te nie są na razie powszechnie stosowane z uwagi na wielkość zadań, które za pomocą tych metod się rozwiązuje. Generowane modele numeryczne osiągają wielkości milionów stopni swobody, a otrzymanie rozwiązania komplikuje fakt, że do uzyskania wiarygodnych wyników potrzebne jest rozwiązywanie skomplikowanych układów równań macierzowych z bardzo krótkim krokiem całkowania (ok. 10^{-9} s), co skutkuje koniecznością rozwiązywania układu równań dla każdego kroku czasowego. Jest to uwarunkowane potrzebą bardzo dokładnej symulacji rozchodzącej się z bardzo dużą prędkością fali wybuchowej. Dodatkowo wymagana jest przy tym zmiana tradycyjnego podejścia, gdyż tego typu symulacje zmuszają do prowadzenia jednocześnie obliczeń w dwóch ośrodkach o odmiennych właściwościach. Pozwala to jednak bardzo wiarygodnie przewidzieć skutki takich zjawisk, a co najważniejsze – daje możliwość formułowania wytycznych dla projektantów obiektów, pozwalających na zwiększenie odporności konstrukcji na zniszczenie. W niniejszej pracy Autorzy przedstawiają przykłady zrealizowanych badań konstrukcji rurociągowych poddanych zewnętrznym impulsom ciśnienia (np. od procesu detonacji) wraz z przyjętymi założeniami modelowymi. Główne elementy tej pracy zostały opublikowane w monografii, której przedmiotem była tematyka procesu interakcji pomiędzy falą ciśnienia a wybranymi konstrukcjami rurociągowymi [8].

2. Założenia przyjęte do realizacji badań numerycznych

Określenie optymalnych parametrów procesu współpracy konstrukcji poddanych działaniu ciśnienia gazów pochodzących ze spalania materiału wysokoenergetycznego może być wsparte badaniami symulacyjnymi. Na styku

obu ośrodków zachodzą bardzo złożone procesy fizyczne. Ogólne analityczne wyznaczanie stanów naprężeń i stanów krytycznych w sposób ścisły w badanych układach nie jest możliwe. Jediną możliwością rozwiązania tego typu zagadnień stwarza trójwymiarowe modelowanie komputerowe. Poprawny opis zagadnienia dynamiki wymaga wówczas zastosowania układu równań (równania ruchu, równania geometryczne, równania konstytutywne, równania stanu) oraz warunków początkowo-brzegowych, w tym np. warunków początkowych pierwszego i drugiego rodzaju oraz warunków naprężeniowych [1,4,8].

Opis realizacji procesu sprężenia dla procesu rozchodzenia się fali detonacyjnej i oddziaływania z konstrukcją

Przy realizacji numerycznej procesu detonacji, niezbędne są równania stanu i izentropy produktów detonacji (PD). Przy rozwiązywaniu zagadnień granicznych z udziałem PD konieczna jest znajomość konkretnych postaci równań stanu PD (dla procesów adiabatycznych) i izentrop (dla procesów izentropowych). W przypadku opisu fali detonacyjnej wymagana jest również znajomość równania stanu. Równanie stanu jest podstawowym elementem przy badaniu zjawiska inicjacji detonacji i struktury fali detonacyjnej.

Do opisu numerycznego procesu pomiędzy ośrodkiem ciała stałego, a ośrodkiem gazowym wykorzystano algorytm oparty na procedurze ALE (Arbitrary Lagrangean-Eulerian) zaimplementowany w kodzie do analiz dynamicznych - LS-Dyna [3,10]. Procedura ALE składa się z następujących po sobie kolejno kroków: kroku odwzorowawczego i kroku adwekcyjnego. Krok adwekcyjny przeprowadzany jest przy założeniu, że zmiany położenia węzłów są bardzo małe w porównaniu z wielkościami charakterystycznymi (długościami krawędzi) elementów otaczających te węzły. Dodatkowym atutem wykorzystania tej procedury jest zapewnienie stałej topologii siatki MES. Dokładność tę uzyskuje się dzięki algorytmowi użytemu w niej do odwzorowania rozwiązania z siatki zniekształconej do wygładzonej, który realizuje to z dokładnością do małych drugiego rzędu.

Jedną z form realizacji sprężenia pomiędzy ciałem stałym a ośrodkiem gazowym jest zastosowanie metody obliczeniowej bazującej na funkcji kary [1,8]. Schemat ideowy wraz z odniesieniem do realizacji numerycznej dla powyższego zagadnienia zaprezentowany jest na rys. 1.

Generalnie funkcja ta może być nałożona na przemieszczenia normalne w sformułowaniu przemieszczeniowym, na prędkości normalne zdefiniowane w ujęciu prędkościowym oraz – najczęściej stosowana forma – na przemieszczenia normalne w sformułowaniu prędkościowym. Niepoprawne działanie procedury opartej na funkcji kary może doprowadzić do dodatkowych problemów związanych z niezachowaniem stabilności schematu całkowania numerycznego i uzyskaniem mylnych wyników, które niekiedy prowadzą do przeciwnych wniosków dotyczących obiektów poddanych numerycznej analizie.

Rys. 1 Schemat ideowy sprężenia w odniesieniu do równań równowagi w ujęciu metody elementów skończonych [8]

W przypadku realizacji procesu sprężenia pomiędzy gazem a ciałem stałym z uwagi na nieprawidłowy opis pola współpracy pomiędzy oboma ośrodkami (np. niedostateczna liczba punktów całkowania na granicy ośrodków [8]), może wystąpić efekt „sztucznego otworu” i wnikanie (penetracja) gazu do ciała stałego (rys. 2).

Rys. 2 Efekt tzw. sztucznego otworu i wnikania medium gazowego do ciała stałego [8]

Model spalania ładunku wybuchowego

Wybuch chemiczny określa się wówczas jako szybkie (mikrosekundowe) [11], egzotermiczne procesy chemiczne zachodzące w stałych i ciekłych materiałach wybuchowych (MW) oraz w wybuchowych mieszaninach gazowych i układach dyspersyjnych. Materiały wybuchowe są nazywane termodynamicznie metastabilnymi układami, gdyż na skutek zewnętrznych oddziaływań (mechanicznych, elektrycznych lub cieplnych) zachodzą w nich, w sposób gwałtowny, samopodtrzymujące się egzotermiczne reakcje chemiczne. Reakcjom tym towarzyszy powstanie silnie sprężonych, gorących gazów lub par, zdolnych do wykonania pracy mechanicznej. Gazowe produkty wybuchu (GPW), na skutek wyjątkowo dużej szybkości reakcji, w początkowej chwili wypełniają praktycznie objętość zajmowaną przez MW i znajdują się w stanie silnej kompresji (z wyjątkiem GPW powstałych z gazowych mieszanin i aerozoli wybuchowych) [11]. Dlatego po wybuchu, na granicy kontaktu GPW z otaczającym je ośrodkiem, pojawia się gwałtowny skok ciśnienia, rzędu kilkudziesięciu GPa. Do realizacji numerycznej procesu detonacji wykorzystano modele uwzględniające dwie fazy wybuchu. Pierwszą fazą jest detonacja materiału wybuchowego opisana za pomocą równania stanu JWL; równanie to opracowali Jones, Wilkins i Lee [11]. Drugą fazą jest rozchodzenie się fali detonacyjnej. Równanie to ma następującą postać [3,11]:

$$p_e = A_e \left(1 - \frac{\omega_e}{R_{1e} V_e} \right) e^{-R_{1e} V_e} + B_e \left(1 - \frac{\omega_e}{R_{2e} V_e} \right) e^{-R_{2e} V_e} + \frac{\omega_e E_e}{V_e}, \quad (1)$$

gdzie: E_e – energia wewnętrzna na jednostkę objętości, V_e – objętość względna materiału wybuchowego, $A_e, B_e, \omega_e, R_{1e}, R_{2e}$ – współczynniki określone eksperymentalnie.

Ciśnienie produktów detonacji w tym modelu wyraża się następującą zależnością [3,11]:

$$p_p = A_p \left(1 - \frac{\omega_p}{R_{1p} V_p} \right) e^{-R_{1p} V_p} + B_p \left(1 - \frac{\omega_p}{R_{2p} V_p} \right) e^{-R_{2p} V_p} + \frac{\omega_p E_p}{V_p}, \quad (2)$$

gdzie: E_p – energia wewnętrzna na jednostkę objętości, V_p – objętość względna produktów detonacji, $A_p, B_p, \omega_p, R_{1p}, R_{2p}$ – współczynniki określone eksperymentalnie.

Drugą fazą jest rozchodzenie się fali detonacyjnej w powietrzu opisane za pomocą wielomianowego równania stanu [3]:

$$p = (C_4 + C_5 \mu) E \quad (3)$$

gdzie: $\mu = \rho / \rho_0$, C_4 i C_5 - stałe wyznaczone empirycznie, ρ - gęstość, ρ_0 – gęstość początkowa, E = energia wewnętrzna.

Proces detonacji i następnie rozchodzenie się fali detonacyjnej zrealizowano w przeprowadzonych badaniach numerycznych w układzie współrzędnych Eulera [3,8].

Model opisu obiektów strukturalnych

Z punktu widzenia badań numerycznych prowadzonych dla konstrukcji rurowych, ich opis realizowano w układzie współrzędnych Lagrange’a. Do opisu wykorzystano pełnocalkowalne elementy powłokowe. Z punktu widzenia założeń kinematycznych pozwalało to na realizację procesu deformacji zarówno w zakresie warunków przemieszczeń, jak również obrotów węzłów z jednoczesnym uwzględnieniem procesu ścinania w płaszczyźnie powłoki. Związki kinematyczne (rys. 3) dla takiego przypadku w płaszczyźnie powłoki, jak również poza nią, przedstawiają się następująco:

$$\begin{aligned}\beta_\alpha &= u_{3,\alpha} - \gamma_\alpha, \\ u_\alpha(x_1, x_2, x_3) &= -\beta_\alpha(x_1, x_2)x_3, \\ u_3(x_1, x_2, x_3) &= u_3(x_1, x_2),\end{aligned}\quad (4)$$

gdzie: $-t/2 \leq x_3 \leq t/2$, $\alpha=1,2$, γ_α jest kątem ścinania i t jest grubością powłoki.

Pełnocalkowalne elementy wykorzystane w analizie numerycznej spełniały trzy zasady pola wg Hu-Washizu [3]. Zasady te zawarte są w poniższym równaniu i bazują na zasadzie prac wirtualnych:

$$0 = \delta \Pi(\mathbf{v}, \bar{\mathbf{D}}, \bar{\boldsymbol{\sigma}}) = \int_{\Omega} \delta \bar{\mathbf{D}} : \boldsymbol{\sigma}(\bar{\mathbf{D}}) d\Omega + \int_{\Omega} \delta [\bar{\boldsymbol{\sigma}} : (\mathbf{D}(\mathbf{v}) - \bar{\mathbf{D}})] d\Omega - \delta P_{ext} + \delta P_{kin}, \quad (5)$$

gdzie: $\mathbf{v}$ jest prędkością, $\bar{\mathbf{D}}$ jest prędkością odkształceń, a $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ jest tensorem naprężeń zależnym od prędkości odkształceń (w zastosowanej aplikacji jest to przyjęty do analiz model Johnsona-Cooka [4,8] dla opisu elementów stalowych rur). δP_{kin} i δP_{ext} są pracami wirtualnymi opisującymi odpowiednio działanie siły bezwładności i siły zewnętrznej, przez Ω oznaczono zaś powłokowy element skończony.

Rys. 3 Konfiguracja do przyjętych analiz numerycznych dla elementów powłokowych [8]

3. Analiza oddziaływania fali detonacyjnej na wybrany element rurowy

W przeprowadzonych badaniach numerycznych podjęto się realizacji dwóch przypadków: w pierwszym przypadku oddziaływaniu fali wybuchu poddano wycinek rurociągu bez warstwy ochronnej, a drugim przypadku z zastosowaniem warstwy elastomeru. Rozwiązanie równania równowagi dynamicznej dla obu przypadków przeprowadzono z wykorzystaniem schematu całkowania metodą różnic centralnych [3,7]. Stabilność rozwiązania została zapewniona poprzez dobór długości kroku aktualnego całkowania Δt_i w taki sposób, aby był on mniejszy-równy od pewnego czasu krytycznego Δt_{kr} , zależnego od własności całego badanego układu. W przypadku badań ciał stałych z uwzględnieniem ich cech zarówno fizycznych, jak też i mechanicznych, poszukiwana wartość kroku całkowania musi spełniać kryterium stabilności wyznaczane z zależności bazującej na kryterium Couranta-Friedrichsa-Levy'ego [3]. W przypadku zagadnienia sprężenia z ośrodkiem gazowym, opisanym w układzie współrzędnych Eulera, taką analizę wykonuje się, wykorzystując bardziej uogólnioną formułę, w której o wielkości kroku całkowania decyduje długość charakterystyczna elementów siatki metody elementów skończonych użytych do opisu ośrodka gazowego oraz lokalna prędkość dźwięku w danym ośrodku gazowym. Na podstawie obu wykonanych analiz dla wszystkich badanych układów opisanych z wykorzystaniem metody elementów skończonych (zarówno w układzie Lagrange'a oraz układzie współrzędnych Eulera), poszukuje się dla aktualnego kroku czasowego wielkości minimalnej, która staje się w danym kroku wielkością kroku całkowania.

Analiza oddziaływania na konstrukcję bez osłony

W badaniach zaproponowano modelowanie działania fali podmuchowej dla ładunku umieszczonego w pewnej odległości od ścianki rury. W pierwszym etapie przeprowadzono symulację numeryczną dla ładunku wybuchowego umiejscowionego w odległości 100 mm od ścianki rury. Przypadek ten odpowiadał badaniom przeprowadzonym w warunkach poligonowych (rys. 4). Użyta w badaniach kostka 100g TNT o wymiarach 50×25×50 mm została opisana w środowisku współrzędnych Eulera za pomocą ośmiowęzłowych elementów skończonych o wymiarach 5×5×5 mm. Z punktu widzenia realizowanych warunków oddziaływań wynikających z działania fali ciśnienia generowanej przez proces „numerycznego spalania ładunku”, zdecydowano się na wygenerowanie siatki Eulera obejmującej swoją objętością tylko ten obszar rury, na który będzie działać padająca fala (rys. 5a). Była to przestrzeń o wymiarach 415×345×475 mm. Do jej opisu zastosowano jednolitą siatkę dyskretną, co zapewnia uzyskanie rozwiązania numerycznego obarczonego stosunkowo małym błędem, a zarazem zgodnie z warunkami szacowania krytycznego kroku całkowania zapewnia uzyskanie stabilnego rozwiązania podczas całkowania dynamicznego równania ruchu. Na brzegach tego układu przyjęto warunki bezodbiciowe.

Rys. 4. Widok stanowiska wykorzystanego do badań poligonowych

W trakcie realizowanych badań numerycznych rozkładu ciśnienia działającego na ściankę rury można zaobserwować, że największe wartości występują w najbliższej odległości od ładunku. Wraz z oddalaniem się po obwodzie od punktu środkowego na obwodzie, wartość działających ciśnień (ciśnienie na czole fali odbitej) obniża się z jednoczesnym zanikiem efektu wzmocnienia na skutek odbicia fali od ścianki rury (rys. 5b). Rozkłady prędkości przebiegu fali ciśnienia w ośrodku gazowym przedstawiono na rys. 6, gdzie widoczny jest efekt opływu fali wokół ścianki rury wraz z zaburzeniem powstałym wskutek jej deformacji. Przemieszczanie się ścianki rury do wnętrza wymusza jednocześnie ruch cząstek gazu zawartych wewnątrz konstrukcji.

Rys. 5 Charakterystyka fali ciśnienia zarejestrowana w obszarze rurociągu położonym bezpośrednio pod ładunkiem
(widoczny rezultat wzrostu ciśnienia wynikający z efektu fali odbitej):
a) zarys modelu numerycznego rury i otaczającego ją ośrodka gazowego,
b) wykresy zmian ciśnienia z wybranych obszarów wokół modelu rury

Rys. 6 Wektory prędkości ośrodka gazowego [mm/s] – rozchodzenie się fali podmuchowej od fazy inicjacja procesu detonacji, aż do momentu współdziałania ze ścianką rury i opływu gazu wokół ścianki rury

Przy tak realizowanych warunkach oddziaływania falą ciśnienia na ściankę rury, nastąpił efekt deformacji ścianki w postaci wystąpienia wgłębienia ścianki do wnętrza rury. Wartość trwałego przemieszczenia się ścianki wynosiła z badań numerycznych 10,1 mm, zmierzona po badaniach eksperymentalnych wynosiła 10,4 mm. Dla tej wartości deformacji w materiale ścianki wystąpiły trwałe odkształcenia, które przy badaniach numerycznych wyniosły 9,5% (rys. 7), a podczas rejestracji z użyciem tensometrów elektrozestancyjnych były na poziomie 11% [8]. Otrzymane wyniki potwierdziły dużą wiarygodność opracowanego modelu numerycznego procesu sprzężenia pomiędzy ośrodkiem gazowym, a ciałem stałym i dały możliwość prowadzenia bardziej dogłębnych analiz z wykorzystaniem wyników badań numerycznych. Analizując charakterystykę przyrostu odkształceń trwałych w ściance rury, można zaobserwować efekt wtórnego działania fali ciśnienia. Objawia się to tym, iż w pewnej chwili czasowej następuje nagła zmiana zwrotu wektora prędkości punktu na ściance rury, któremu jednocześnie, wskutek działania sił bezwładności, towarzyszy przyrost uplastycznienia.

Zmiana energii w badanym układzie przejawia się tym, że w początkowej fazie generowana jest energia kinetyczna związana z wymuszeniem ruchu struktury na skutek działającego pola ciśnień. Energia uzyskana w wyniku spalania ładunku TNT jest w części przekazana w strukturę rury, objawiając się jej trwałą deformacją, tzn. energia ta przekształca się w energię zaabsorbowaną przez materię (ściankę rury) i wynikający z tego faktu proces uplastycznienia rury (rys. 8). W ten sposób potwierdził się fakt, że w przypadku małych ładunków, a takim jest użyta w badaniach kostka TNT, skutki oddziaływań fali ciśnienia mają charakter lokalny. Dalsze badania potwierdziły ten bardzo niekorzystny skutek, który w konsekwencji

w łatwy sposób może w końcowym efekcie doprowadzić do lokalnego przerwania ciągłości struktury i zainicjować proces samozapłonu gazu.

Rys. 7 Charakterystyka procesu uplastycznienia w punkcie rury położonym bezpośrednio pod ładunkiem wybuchowym [8]

Rys. 8 Zmiana energii wewnętrznej dla wycinka rury [$\times 10^6$ kJ] [8]

Analiza oddziaływania fali ciśnienia na strukturę z warstwą osłonową

W pierwszym etapie zaproponowano badania z wykorzystaniem warstwy elastomeru o grubości 25 mm (standardowa minimalna grubość stosowana w przypadku napraw dróg lub mostów) [9]. Dla potrzeb analiz stworzono model numeryczny, który odzwierciedlał sytuację opisaną w punkcie 3.1 (rys. 9) z dodatkową warstwą elastomerowego panelu ochronnego. Model numeryczny

warstwy elastomeru opisano elementami skończonymi ośmiowęzłowymi. Na zewnętrznej ścianie elastomeru zaprojektowano dodatkowo osłonę w postaci blachy wykonanej ze stali St3S o grubości 1 mm, którą także wzięto pod uwagę prowadząc badania numeryczne z uwzględnieniem parametrów poprawnie opisujących model konstytutywny tego materiału, tzn. z uwzględnieniem wpływu prędkości odkształceń. Do badań numerycznych warstwy elastomeru zastosowano model konstytutywny wg Cowpera-Symonds z uwzględnieniem efektu wpływu prędkości odkształceń [3,4]. Wszystkie warunki początkowo-brzegowe realizowano zgodnie z opisem zawartym we wspomnianym punkcie 3.1.

Rys. 9 Schemat modelu numerycznego do obliczeń konstrukcji rury z warstwą elastomeru poddanego działaniu wybuchu ładunku 100 g TNT, umiejscowionego 100 mm nad warstwą ochronną

W wyniku tak zrealizowanej próby uzyskano bardzo zadowalające wyniki. Wielkość otrzymanego numerycznie ugięcia wyniosła ok. 2 mm i w stosunku do próby bez warstwy ochronnej była pięciokrotnie mniejsza. Analiza stanu odkształcenia w ścianie rury także potwierdziła bardzo korzystne tendencje. Wartość trwałych odkształceń wyniosła 3,5% (rys. 10) i była tym samym trzykrotnie mniejsza niż w poprzednim przypadku. Sytuacja ta spowodowana była faktem, że część tych oddziaływań pochłonęła właśnie warstwa elastomeru. W obszarze maksymalnego oddziaływania fali ciśnienia nastąpiła trwała deformacja elastomeru, która wiązała się ze zmianą jego grubości z 25,0 mm do ok. 23,8 mm. Przeprowadzona analiza bilansu energetycznego powyższego układu wykazała, że największa jej część została pochłonięta przez warstwę elastomeru (rys. 11). Wartość tej energii była dwukrotnie większa niż wartość energii

zaabsorbowanej przez ściankę rury. Jest to bardzo korzystny efekt, potwierdzający fakt, że tego typu konstrukcja warstwowa przy tej klasie oddziaływań ładunkiem trotylu spełniła oczekiwaną rolę i może być rozpatrywana jako element bardziej złożonych wielowarstwowych struktur ochronnych.

Rys. 10 Wielkość zastępczego odkształcenia plastycznego w ściance rury wyniosła ok. 3,5% [8]

Rys. 11 Zmiana energii w badanym odcinku rury z warstwą panelu elastomerowego [$\times 10^{-6}$ kJ] (A – blacha osłonowa 1mm, B – panel elastomeru, C – ścianka rury) [8]

Badania numeryczne z warstwą ochronną w postaci elastomeru – ładunek wybuchowy umiejscowiony bezpośrednio na ścianie panelu ochronnego

W kolejnym etapie zdecydowano się przeanalizować sytuację opisaną w punkcie 3.2, odnoszącą się do wybuchu ładunku o masie 100 g TNT umiejscowionego bezpośrednio na warstwie ochronnej wykonanej z elastomeru i osłoniętej wspomnianą blachą o grubości 1 mm (rys. 12a). We wspomianej wcześniej sytuacji umiejscowienie ładunku bezpośrednio na ścianie rurociągu wiąże się z jego jednoczesną perforacją.

Analizowana numerycznie sytuacja i otrzymany wynik w postaci uzyskanego zniszczenia warstwy ochronnej został przedstawiony na rys. 12b. W miejscu, w którym zrealizowano numerycznie proces eksplozji ładunku, w strukturze elastomerowej warstwy ochronnej nastąpiło zniszczenie materii, które z tego punktu widzenia jest bardzo korzystne, gdyż pozwoliło zredukować wartość ciśnienia oddziałującego w swej „wędrówce” na ściankę rury. Rezultatem tego oddziaływania jest trwałe wgniecenie ścianki rury do jej wnętrza na głębokość ok. 25 mm (rys. 13). W obszarze tym wielkość trwałych odkształceń wyniosła ok. 18,0%.

Rys. 12 a) Schemat modelu numerycznego do obliczeń konstrukcji rury z warstwą elastomeru poddanego działaniu wybuchu ładunku 100 g TNT umiejscowionego bezpośrednio na panelu ochronnym – przekrój w połowie modelu, b) widok zniszczenia powstałego w wyniku eksplozji ładunku na warstwie elastomeru [8]

Analiza bilansu energetycznego (rys. 14) w sposób wyraźny obrazuje, że największy udział w absorpcji energii pochodzącej z fali podmuchowej mają warstwa blachy osłonowej i warstwa panelu elastomeru (rys. 14). W obu przypadkach następuje proces degradacji obu struktur, w wyniku zetknięcia się ze wspomnianym impulsem ciśnienia. Należy jasno i wyraźnie powtórzyć, że ten

wstępnie zaprojektowany układ warstw spełnił pokładaną w nim nadzieję, tzn. ochronił ściankę rury przed nieuniknionym procesem perforacji w przypadku bezpośredniego umiejscowienia ładunku na ścianie badanego elementu rurowego [8,9].

Rys. 13 Wielkość zastępczego odkształcenia plastycznego w ściance rury na poziomie ok. 18,5% przy 25 mm ugięcia [8]

Rys. 14 Zmiana energii wewnętrznej dla badanego elementu rury z warstwą panelu elastomerowego [$\times 10^6$ kJ] (A – blacha osłonowa 1mm, B – panel elastomeru, C – ścianka rury) [8]

4. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie zrealizowanych badań numerycznych zagadnienia symulacji oddziaływania pomiędzy ośrodkiem gazowym a ciałem stałym na przykładach konstrukcji rurociągowych można wyciągnąć następujące wnioski:

- opracowane modele numeryczne wiernie odzwierciedlają deformacje ośrodka ciała stałego (elementy rurociągów), poddanego impulsowemu oddziaływaniu ciśnienia fali podmuchowej,
- zastosowanie zaawansowanych modeli konstytutywnych materiałów w opisie numerycznym MES, uwzględniających ich sprężysto-lepkoplastyczne zachowanie, pozwala uwzględnić wiele zjawisk towarzyszących procesowi ich deformacji (pocienienie ścianki rur – a w konsekwencji proces utraty integralności – zniszczenie, proces absorpcji energii fali podmuchowej zarówno przez strukturę rury, jak też przez panel ochronny, procesy zjawisk falowych wywołanych impulsem fali ciśnienia oraz ich rozpraszanie, np. wskutek zjawiska dyspersji w strukturze materiału bądź w ośrodku gazowym),
- zastosowanie elementów osłonowych, np. w postaci paneli osłonowych wykonanych z elastomeru, pozwala zapobiec procesowi niszczenia konstrukcji rurociągu poprzez proces absorpcji energii wybuchu przez wspomniany panel, co przejawia się jego pocienieniem – plastyczną deformacją lub powstałym zniszczeniem w formie krateru w wyniku bezpośredniego oddziaływania fali podmuchowej na panel, w konsekwencji pozwala to zredukować wartość impulsu ciśnienia, który oddziaływał na strukturę ścianki, wywołując w niej tylko trwałą deformację w postaci lokalnego zagłębienia – wklęsnięcia ścianki do wnętrza rury,
- opracowana numeryczna metodyka badań pozwala nie tylko na analizę zjawisk sprężenia gaz – ciało stałe na poziomie lokalnym, ale także na poziomie globalnym, co zostało potwierdzone przeprowadzonymi badaniami na elementach infrastruktury rurociąkowej (zawór zaporowo-upustowy),
- opracowana w wyniku przeprowadzonych badań numerycznych metoda symulacji sprężenia ciało stałe – gaz została zweryfikowana badaniami eksperymentalnymi i pozwala z dużym prawdopodobieństwem, przy poprawnej definicji warunków początkowo-brzegowych oraz zastosowaniu zaawansowanych opisów dla ośrodka gazowego i ośrodka stałego, prowadzić badania numeryczne, a otrzymane rezultaty wykorzystać dla celów poprawy bezpieczeństwa już istniejących lub nowo projektowanych systemów rurociągowych należących do infrastruktury krytycznej.

5. Bibliografia

- [1] Belytschko T., Liu W.K., Moran B.: *Nonlinear finite elements for continua and structures*, John Wiley & Sons, England, 2000.
- [2] Cichocki K.: Effects of underwater blast loading on structures with protective elements. *International Journal of Impact Engineering*, 22, 1999, pp. 609–617.

- [3] Hallquist J.O.: LS-Dyna. Theoretical manual. California Livermore Software Technology Corporation, 1998.
- [4] Jach K.: Komputerowe modelowanie dynamicznych oddziaływań ciał metodą punktów swobodnych. Wydawnictwo PWN, Warszawa, 2000.
- [5] Krauthammer T. et al.: Development of progressive collapse analysis procedure and condition assessment for structure. National Workshop on Prevention of Progressive Collapse in Rosemont, IL. Multihazard Mitigation Council of the National Institute of Building Sciences, Washington, DC, 2002.
- [6] Louca L.A., Boh J. W. and Choo Y. S.: Design and analysis of stainless steel profiled blast barriers. *Journal of Constructional Steel Research*, 60, 2004, pp. 1699–1723.
- [7] Łodygowski T., Kąkol W.: Metoda elementów skończonych w wybranych zagadnieniach mechaniki konstrukcji inżynierskich. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1994.
- [8] Małachowski J.: Modelowanie i badania interakcji ciało stałe-gaz przy oddziaływaniu impulsu ciśnienia na elementy konstrukcji rurociągu. Bel Studio, Warszawa 2010.
- [9] Małachowski J., Gieleta R.: Security improvement for oil and gas pipeline infrastructure. *Journal of KONES*, 15, 2, 2008, pp. 295–300.
- [10] Matthies H.G., Niekamp R.: Numerical and algorithmic aspects of coupled problems. First South-East European Conference on Computational Mechanics, SEECCM-06, M. Kojić, M. Papadrakakis (Eds.), Kragujevac, Serbia University of Kragujevac, June 28–30.2006, pp. 31-38.
- [11] Włodarczyk E.: Podstawy detonacji. WAT, Warszawa, 1995.

***Jerzy Małachowski** is a professor at Military University of Technology and the associate dean for research at the Faculty of Mechanical Engineering. His main field of research is analysis (computational and experimental) of various structures behaviour under dynamic loadings and so called passive protection using hi-tech materials. He was involved in a few international programmes in the field of interest, including EU and NATO founded programmes.*

***Tadeusz Niezgoda** is a professor and the head of Department of Mechanics and Applied Computer Science at the Military University of Technology. He is an outstanding specialist in the field of computational methods in the area of safety and advanced materials implemented for protective aims. He was involved in a few international programmes in the field of interest, including EU and NATO founded programmes.*