

# NUMERYCZNE MODELOWANIE ZJAWISKA WYBUCHU

Witold Ogierman<sup>1a</sup>

<sup>1</sup>*Institut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej, Politechnika Śląska*

<sup>a</sup>*witold.ogierman@polsl.pl*

## Streszczenie

---

W artykule przedstawiono metodykę numerycznego modelowania zjawiska wybuchu przy użyciu metody elementów skończonych (MES) oraz bezsiatkowej metody SPH (Smoothed Particle Hydrodynamic). Zaprezentowano i porównano wyniki symulacji otrzymane wymienionymi metodami. Wartości ciśnienia fali uderzeniowej wyznaczone numerycznie zostały porównane z istniejącymi w literaturze zależnościami empirycznymi. Możliwości metod numerycznych w analizie zjawiska wybuchu przedstawiono na przykładzie analizy oddziaływania fali uderzeniowej na przykładową konstrukcję.

**Słowa kluczowe:** modelowanie zjawiska wybuchu, sprzężenie opisów Lagrange'a i Eulera, bezsiatkowa metoda SPH

## NUMERICAL MODELING OF EXPLOSION PHENOMENON

### Summary

---

This article presents methodology of numerical modeling of explosion phenomenon by using the finite element method (FEM) and meshless SPH (Smoothed Particle Hydrodynamic) method. Obtained simulations results are presented and compared. Computed numerically shock wave pressure values were compared with existing empirical solutions. Testing the influence of blast wave on the exemplary structure is presented as an example of capabilities of numerical methods in modeling of the explosion phenomenon.

**Keywords:** modeling of the explosion, Euler-Lagrange coupling, smoothed particle hydrodynamic (SPH)

## 1. WSTĘP

Wybuch to zjawisko polegające na gwałtownej zmianie pierwotnego ładunku w produkt gazowy o bardzo wysokim ciśnieniu poprzez proces chemiczny [1]. Po detonacji ładunku produkty gazowe w postaci fali uderzeniowej rozprzestrzeniają się z prędkością ponaddźwiękową. Parametry fali uderzeniowej zależne są m.in. od masy i kształtu ładunku, własności fizykochemicznych materiału wybuchowego oraz ośrodka propagacji. Ze względu na kosztowne i niebezpieczne badania eksperymentalne wyznaczanie charakterystyk fal uderzeniowych i ich wpływu na otoczenie coraz częściej realizuje się przy użyciu zaawansowanych metod numerycznych. Najpopularniejszą metodą numeryczną stosowaną w analizie zjawiska wybuchu jest metoda elementów skończonych (MES). W przypadku analizy wpływu fali uderzeniowej na konstrukcję najczęściej rozpatrywane

jest zagadnienie interakcji ciała stałego z gazem [2,3,4]. Ciało stałe dyskretyzuje się elementami skończonymi sformułowanymi w opisie Lagrange'a, a ośrodek gazowy elementami sformułowanymi w opisie Eulera. W pewnych szczególnych przypadkach zamiast elementów Eulera używa się elementów o sformułowaniu ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian), które jest uogólnieniem opisów Lagrange'a i Eulera. Oprócz metody elementów skończonych coraz częściej wykorzystywana jest bezsiatkowa metoda SPH (Smoothed Particle Hydrodynamic)[1,3,4,5].

W artykule przedstawiono możliwości oraz porównano cechy wyżej wymienionych metod. Porównano także uzyskane numerycznie wartości ciśnień fali uderzeniowej z istniejącymi w literaturze wartościami wyznaczonymi na podstawie badań doświadczalnych. Dodatkowo

przedstawiono wyniki obliczeń, które pozwalają oszacować wpływ fali uderzeniowej powstałej w wyniku detonacji ładunku trotylu na fragment konstrukcji pojazdu samochodowego. Do obliczeń numerycznych zastosowano oprogramowanie LS-DYNA, wykorzystując procedurę jawnego całkowania po czasie.

## 2. PROCEDURY NUMERYCZNE

### 2.1 MODELOWANIE DETONACJI

Jednym z podstawowych elementów modelu matematycznego zjawiska wybuchu jest model zachowania się ładunku wybuchowego po detonacji. Zachowanie takie opisuje się odpowiednim równaniem stanu. Najpopularniejszym wykorzystywanym równaniem stanu modelującym wybuch jest równanie Jones-Wilkins-Lee (JWL) [1,2,3,4,5]:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega\eta}{R_1} \right) e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B \left( 1 - \frac{\omega\eta}{R_2} \right) e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega\eta\rho_0 e \quad (1)$$

gdzie:  $\eta$  - stosunek gęstości gazu  $\rho$  w danej chwili czasu do gęstości początkowej  $\rho_0$ ,  $e$  - właściwa energia wewnętrzna ładunku,  $A$ ,  $B$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $\omega$  - współczynniki wyznaczone eksperymentalnie.

Równanie to pozwala wyznaczać ciśnienie  $p$  produktów detonacji na podstawie znajomości stałych związanych z danym materiałem wybuchowym.

### 2.2. OPISY: LAGRANGE'A, EULERA I ALE W MODELOWANIU MES

Położenia ciała w procesie przemieszczania i odkształcania może być opisywane na dwa sposoby: Lagrange'a lub Eulera [6]. W opisie Lagrange'a zmiennymi niezależnymi są pozycje początkowe  $X$  punktów materialnych w czasie  $t$ . Ruch ciała można przedstawić jako:

$$x = f(X, t) \quad (2)$$

gdzie:  $x$  - pozycja punktu materialnego w czasie  $t$ , który zajmował pozycję  $X$  w czasie  $t=0$ .

Przykładowo pole skalarne w opisie Lagrange'a  $F$  może być reprezentowane jako:

$$F = F(X, t) \quad (3)$$

W opisie Eulera zmiennymi niezależnymi są punkty przestrzenne  $x$  w czasie  $t$ .

$$f = f(x, t) \quad (4)$$

Z opisem Lagrange'a jest więc związany układ materialny  $\Omega_0$ , a z opisem Eulera układ przestrzenny  $\Omega$ . Wprowadzając sformułowanie ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) rozpatruje się układ referencyjny  $\Omega_r$ . Punkty  $a$

w układzie referencyjnym  $\Omega_r$  są odwzorowywane na punkty  $x$  w układzie przestrzennym  $\Omega$  [7]:

$$x = \hat{f}(a, t) \quad (5)$$

gdzie odwzorowanie  $\hat{f}$  jest arbitralnym odwzorowaniem układu  $\Omega_r$  na układ  $\Omega$ .

Porównując równania (2) i (5), stwierdza się, że prawdziwa jest zależność:

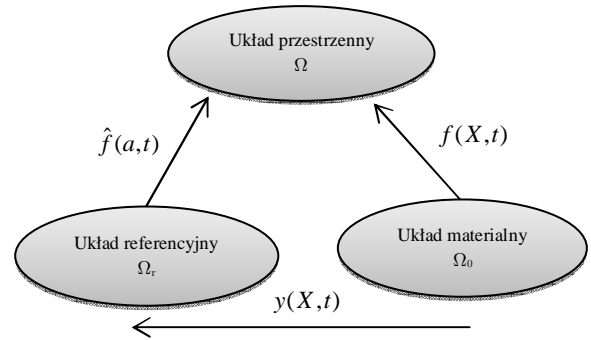
$$x = \hat{f}(a, t) = f(X, t) \quad (6)$$

gdzie:  $x$  jest punktem w opisie Eulera,  $X$  jest punktem w opisie Lagrange'a,  $a$  jest punktem w opisie ALE.

Analizując równanie (6), można zauważyć, że w szczególnym przypadku, jeżeli współrzędna  $a$  zostanie zdefiniowana jako współrzędna w opisie materialnym  $X$ , odwzorowanie  $\hat{f}$  jest odwzorowaniem materialnym  $f$ . Sformułowanie ALE jest więc uogólnieniem opisów Lagrange'a i Eulera. Punkty  $a$  w układzie referencyjnym mogą być odwzorowane do punktów  $x$  w układzie przestrzennym jako:

$$a = y(X, t) = \hat{f}^{-1}(f(X, t), t) \quad (7)$$

Na rys. 1 przedstawiono schematycznie odwzorowywanie pomiędzy opisami Lagrange'a, Eulera i ALE.

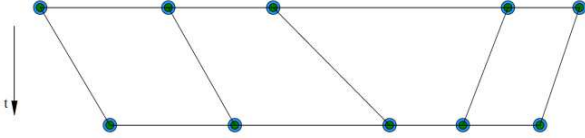


Rys. 1. Odwzorowywanie pomiędzy opisami Lagrange'a, Eulera i ALE [7]

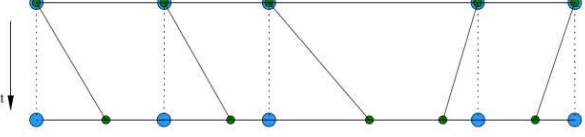
Różnice w kinematyce przedstawionych opisów ilustruje tabela 1. W opisie Lagrange'a ruch siatki elementów skończonych jest tożsamy z ruchem punktów materialnych (rys. 2). W opisie Eulera siatka jest utwierdzona w przestrzeni (rys. 3), a materiał przemieszcza się w obrębie elementów. Sprzężenie ALE łączy cechy opisów Eulera i Lagrange'a (rys. 4).

Tabela 1. Ruch i przemieszczenie materiału i siatki w opisach ALE, Lagrange'a i Eulera [7]

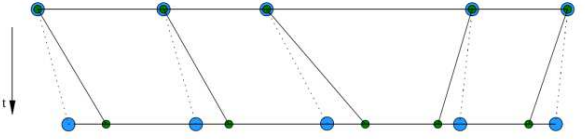
Opis		ALE	Lagrange	Euler
Ruch	Materialu	$x = f(X, t)$	$x = f(X, t)$	$x = f(X, t)$
	Siatki	$x = \hat{f}(a, t)$	$x = f(X, t)$	$x = I(x)$
Przemieszczenie	Materialu	$u = x - X$	$u = x - X$	$u = x - X$
	Siatki	$\hat{u} = x - a$	$\hat{u} = x - X = u$	$\hat{u} = x - x = 0$



Rys. 2. Przemieszczanie się materiału i siatki w czasie w jednym wymiarze w opisie Lagrange'a



Rys. 3. Przemieszczanie się materiału i siatki w czasie w jednym wymiarze w opisie Eulera



Rys. 4. Przemieszczanie się materiału i siatki w czasie w jednym wymiarze w sprzężeniu ALE

Legenda do rys. 2-4:

- Węzeł siatki
- Położenie cząsteczki materiału
- Ruch cząsteczki materiału
- Ruch siatki.

### 2.3. METODA SPH (SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMIC)

W metodzie SPH rozpatrywany stan układu jest reprezentowany przez zbiór cząsteczek. Cząsteczki opisane są poprzez wielkości takie jak masa, wektor prędkości, wektor położenia itp. Tworzą one dyskretną przestrzeń dla rozwiązywania różniczkowych równań zachowania masy, pędu, energii oraz równania stanu (zawarte kolejno w układzie równań) [8]:

$$\begin{cases} \frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla v \\ \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p \\ \frac{du}{dt} = -\frac{p}{\rho} \nabla v \\ p = p(\rho, u) \end{cases} \quad (8)$$

gdzie:  $\rho$  - gęstość,  $u$  - energia wewnętrzna,  $p$  - ciśnienie,  $v$  - wektor prędkości.

W metodzie SPH wykorzystywana jest koncepcja całkowitej reprezentacji funkcji  $f(x)$ :

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x') \delta(x - x') dx' \quad (9)$$

gdzie  $f$  jest funkcją wektora położenia  $x$ ,

a  $\delta(x - x')$  to funkcja wyrażona jako:

$$\delta(x - x') = \begin{cases} 1 & x = x' \\ 0 & x \neq x'. \end{cases} \quad (10)$$

Jeżeli zastąpi się funkcję  $\delta(x - x')$  w wyrażeniu (9) tzw.

funkcją wygładzającą w postaci  $W(x - x', h)$ , całkowita reprezentacja funkcji  $f(x)$  jest określona przez równanie:

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x') W(x - x', h) dx' \quad (11)$$

gdzie  $h$  to długość wygładzania.

Wprowadzając pomocniczą funkcję  $\theta$  można wyrazić funkcję wygładzającą  $W$  poprzez równanie:

$$W(x - x', h) = \frac{1}{h^d} \theta\left(\frac{|x - x'|}{h}\right). \quad (12)$$

Indeks  $d$  związany z długością wygładzania określa ilość rozpatrywanych wymiarów przestrzennych. Najczęściej stosowaną funkcją wygładzającą jest krzywa B-sklejana, która jest definiowana poprzez funkcję  $\theta$  jako [9]:

$$\theta(u) = C \times \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}u^2 + \frac{3}{4}u^3 & \text{dla } u \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2 - u)^3 & 1 < \text{dla } u \leq 1 \\ 0 & \text{dla } u > 2 \end{cases} \quad (13)$$

gdzie  $C$  jest stałą zależną od wymiaru zadania.

Używając wygładzania można, podobnie jak funkcję  $f(x)$ , zapisać jej gradient  $\nabla f(x)$  jako:

$$\nabla f(x) = \int_{\Omega} \nabla f(x') W(x - x', h) dx'. \quad (14)$$

Jeżeli infinitesimalna objętość  $dx'$  w równaniach całkowitych dla cząsteczki  $j$  zostanie zastąpiona przez skończoną objętość cząsteczki  $\Delta V_j$ , która jest związana z masą cząsteczki  $m$  poprzez równanie (15), to można zapisać ciągłą reprezentację całkową SPH w postaci dyskretnej (16), (17):

$$m_j = \Delta V_j \rho_j \quad (15)$$

$$f(x_i) = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W_{ij} \quad (16)$$

$$\nabla f(x_i) = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) \nabla W_{ij} \quad (17)$$

gdzie  $W_{ij} = W(x_i - x_j, h)$ .

Używając metody SPH, można zapisać równania zachowania masy, pędu i energii w postaci dyskretnej jako [8]:

$$\begin{cases} \frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j (v_i - v_j) \nabla_i W_{ij} \\ \frac{dv_i}{dt} = -\sum_{j=1}^N m_j \left( \frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} \\ \frac{du_i}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left( \frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) (v_i - v_j) \nabla_i W_{ij} \end{cases} \quad (18)$$

gdzie  $\Pi_{ij}$  to sztuczna lepkość, wprowadzona w celu stabilizacji obliczeń numerycznych.

### 3. CIŚNIENIE FALI UDERZENIOWEJ

Jednym z podstawowych parametrów określanych w trakcie analizy oddziaływania wybuchu na otoczenie jest ciśnienie fali uderzeniowej. Na podstawie danych zgromadzonych eksperymentalnie wielu badaczy wyprowadziło wzory, które pozwalają oszacować ciśnienie frontu fali uderzeniowej. W ramach artykułu przedstawiono najpopularniejsze, odnalezione w literaturze zależności związane z analizą wybuchu sferycznego ładunku w powietrzu. W szczególności podano wzory wyprowadzone przez:

- Kinneya [10,11]

$$p(Z) = \frac{808 \left[ 1 + \left( \frac{Z}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left( \frac{Z}{0.048} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{Z}{0.32} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{Z}{1.35} \right)^2}}, \quad (19)$$

- Brode'a [11,12,13]

$$p(Z) = 0.0975Z^{-1} + 0.1455Z^{-2} + 0.585Z^{-3} - 0.0019 \quad (20a)$$

dla  $0.01 < p < 1$  MPa

$$p(Z) = 0.1 + 0.67Z^{-3} \quad (20b)$$

dla  $p > 1$  MPa,

- Henrycha [11,13]:

$$p(Z) = 6.194Z^{-1} - 0.326Z^{-2} + 2.132Z^{-3} \text{ [bar]} \quad (21a)$$

dla  $0.3 < Z < 1$

$$p(Z) = 0.662Z^{-1} + 4.05Z^{-2} + 3.228Z^{-3} \text{ [bar]} \quad (21b)$$

dla  $1 < Z < 10$

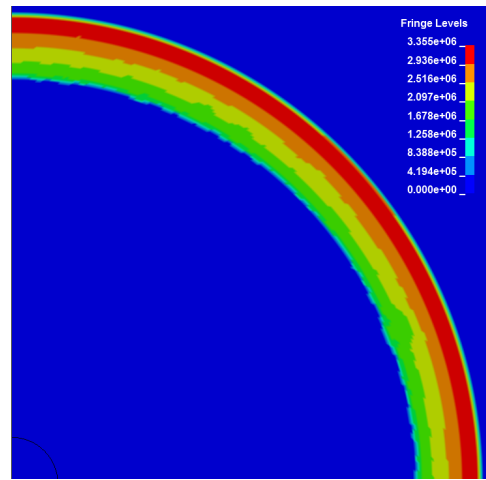
- Sadowskiego [11,12]:

$$p(Z) = 0.085Z^{-1} + 0.3Z^{-2} + 0.8Z^{-3} \text{ [MPa]}. \quad (22)$$

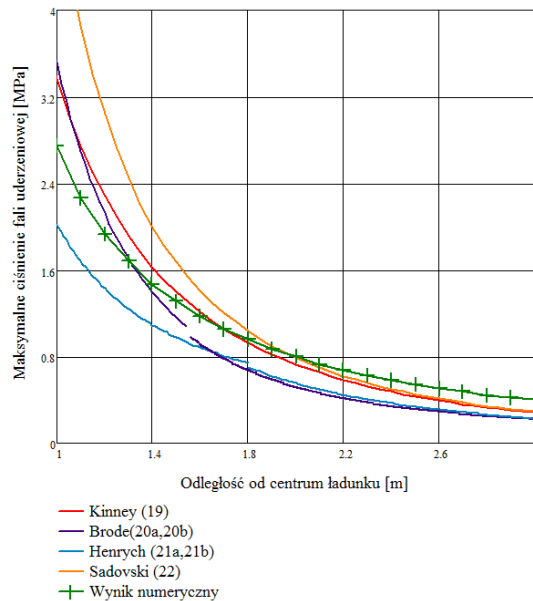
Występujący w przedstawionych wzorach składnik  $Z$  nazywany odległością zredukowaną, jest zależny od masy ładunku  $m$  i odległości od środka ładunku  $R$  zgodnie z równaniem:

$$Z = \frac{R}{m^{\frac{1}{3}}}. \quad (23)$$

W ramach prowadzonych badań porównano charakterystyki ciśnienia fali uderzeniowej w funkcji odległości od ładunku wybuchowego uzyskane na podstawie wzorów (19-22) oraz metody elementów skończonych. Porównania dokonano, analizując swobodny wybuch sferycznego ładunku 5 kg trotylu. Model dyskretny utworzono, wykorzystując osiowosymetryczne elementy o sformułowaniu Eulera. Definiując parametry ładunku wybuchowego uwzględniono równanie stanu (1). Mapę rozkładu ciśnienia fali uderzeniowej w czasie  $t=0.3$  ms po detonacji przedstawia rys. 5. Rys. 6 przedstawia natomiast porównawczy wykres ciśnienia frontu fali uderzeniowej w funkcji odległości od miejsca detonacji ładunku.



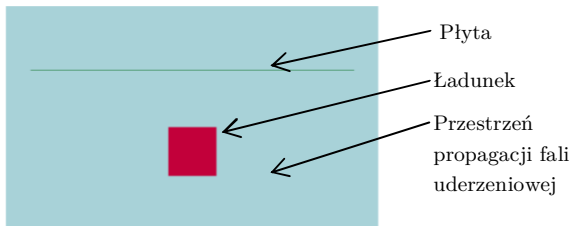
Rys. 5. Ciśnienie fali uderzeniowej w czasie 0.3 ms po detonacji ładunku 5 kg trotylu (widok na ćwiartkę układu) [Pa]



Rys. 6. Maksymalne ciśnienie fali uderzeniowej w funkcji odległości od miejsca wybuchu ładunku 5 kg trotylu

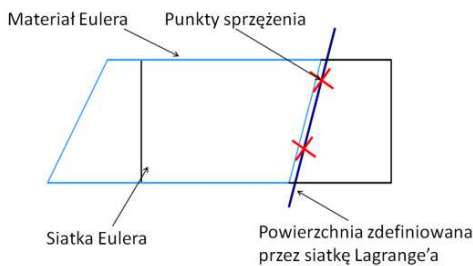
#### 4. PORÓWNANIE METOD MES I SPH

Porównanie wykorzystania metod MES i SPH w modelowaniu zjawiska wybuchu przedstawiono na przykładzie symulacji wybuchu sześciennego ładunku wybuchowego o wymiarach  $0.3 \times 0.3 \times 0.3$  m w pobliżu płyty o wymiarach  $2 \times 2 \times 0.01$  m. Założono, że ładunek znajduje się 0.5 m od powierzchni płyty. Rozpatrywany układ przy wykorzystaniu MES przedstawia rys. 7. Ładunek oraz przestrzeń propagacji fali uderzeniowej zdyskretyzowano ośmiowęzłowymi elementami sześciennymi o sformułowaniu Eulera, płytę natomiast zdyskretyzowano czterowęzłowymi elementami powłokowymi.



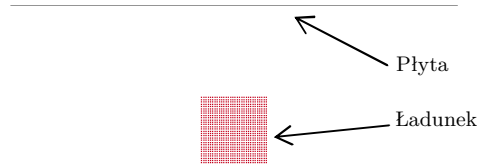
Rys. 7. Modelowanie układu w sprzężeniu elementów Lagrange'a i Eulera (widok w przekroju przez środek symetrii ładunku)

W sprzężeniu elementów Lagrange'a i Eulera, elementy Lagrange'a spełniają rolę geometrycznego ograniczenia dla materiału przemieszczającego się w siatce Eulera. Materiał Eulera natomiast wywiera ciśnienie na siatkę Lagrange'a (rys. 8). Sprzężenie między obszarami zostało zrealizowane za pomocą metody opartej na zastosowaniu funkcji kary. Aby uniknąć przenikania materiału Eulera przez siatkę Lagrange'a, stosuje się odpowiednią liczbę punktów całkowania na granicy dwóch obszarów [9].



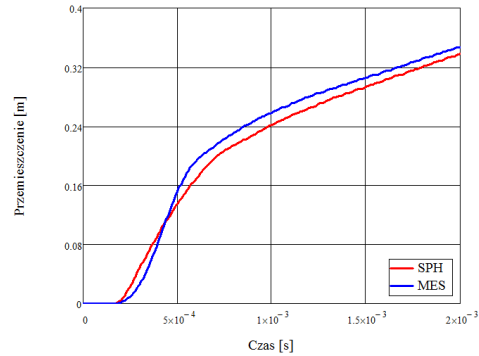
Rys. 8. Sprzężenie między materiałem Eulera, a płytą zdyskretyzowaną elementami powłokowymi

Stosując metodę SPH, nie dyskretyzowano przestrzeni propagacji fali uderzeniowej. Dyskretną reprezentację ładunku wybuchowego utworzono za pomocą cząsteczek SPH, a płytę podzielono na powłokowe elementy skończone analogicznie jak w poprzednim przypadku (rys. 9). Sprzężenie cząsteczek SPH z elementami skończonymi jest realizowane poprzez algorytm kontaktu [9].



Rys. 9. Dyskretyzacja cząsteczkami w metodzie SPH

Na rys. 10 przedstawiono przemieszczenia środkowego punktu płyty w funkcji czasu wyznaczone dwoma metodami. Analizując uzyskane wyniki, można zauważyć niewielkie różnice w charakterystykach przemieszczeń. Wartości przemieszczeń są na podobnym poziomie.

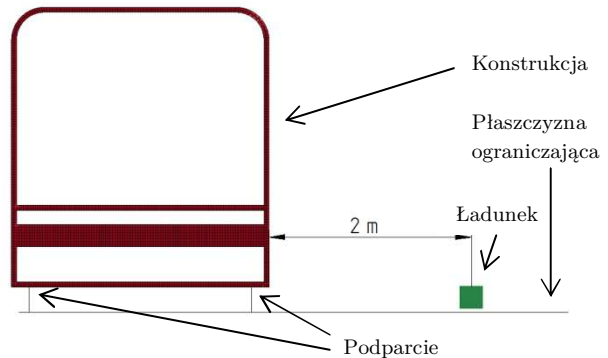


Rys. 10. Przemieszczenia środkowego punktu płyty w funkcji czasu wyznaczone metodami MES i SPH

#### 5. PRZYKŁAD SYMULACJI

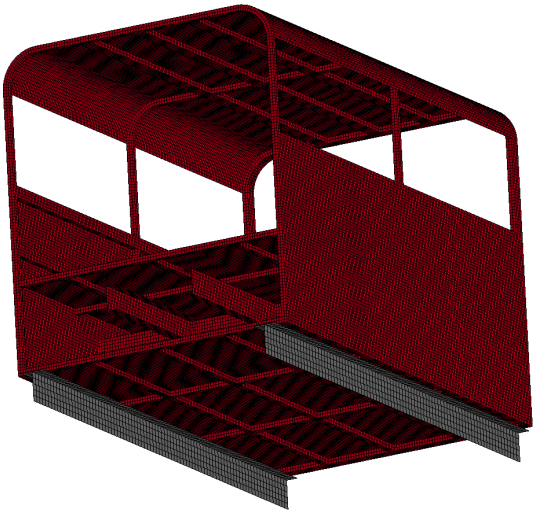
##### 5. 1. OPIS ANALIZOWANEGO PROBLEMU

Metodę SPH wykorzystano do przeprowadzenia symulacji numerycznej wpływu oddziaływania fali uderzeniowej powstałej w wyniku wybuchu ładunku trotylu na fragment konstrukcji przedstawionej na rys. 11. Konstrukcję, wykonaną ze stopu aluminium Al7075 zdyskretyzowano czterowęzłowymi elementami powłokowymi. Wprowadzono także płaszczyznę ograniczającą propagację fali uderzeniowej oraz belki, na których podparta jest badana konstrukcja. Rozpatrzono wybuch ładunku o masie 16 kg, którego środek ciężkości oddalony jest o 2 m od konstrukcji (rys. 11). Ładunek zdyskretyzowano cząsteczkami SPH.



Rys. 11. Założenia symulacji

Sposób dyskretyzacji konstrukcji i podpierających ją belek przedstawia rys. 12.



Rys. 12. Widok szczegółowy na dyskretyzację konstrukcji i belek podporowych

### 5.2. MODELE KONSTITUTYWNE

W modelowaniu zjawisk związanych z dynamiczną deformacją ciał, aby poprawnie odwzorować zachowanie materiału, najczęściej stosuje się modele plastycznego płynięcia, które uwzględniają efekty lepkościowe. Najczęściej stosowanymi modelami konstytutywnymi tego typu są modele Cowpera-Symonds [9]:

$$\sigma = \left( 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^p \right) \sigma_0 \quad (24)$$

gdzie:  $\sigma$  to dynamiczna granica plastyczności,  $\dot{\epsilon}$  szybkość odkształceń,  $\sigma_0$  statyczna granica plastyczności,  $C, p$  parametry empiryczne,

oraz Johnsona-Cooka [4,9,14]:

$$\sigma = \left[ A + B \epsilon_p^n \right] \left[ 1 + C \ln \dot{\epsilon}_p^* \right] \left[ 1 - T^{*m} \right] \quad (25)$$

gdzie:  $A, B, C, n, m$ - parametry empiryczne,  $\epsilon_p$  - efektywne odkształcenia plastyczne,  $\dot{\epsilon}_p^* = \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0}$  efektywna szybkość odkształceń dla  $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ ,  $T^*$  - unormowana szybkość zmian temperatury.

Modele te pozwalają na opis ośrodków sprężysto-plastycznych z uwzględnieniem warunku plastyczności Hubera-Misesa, umocnienia oraz wpływu prędkości odkształceń. W przeprowadzonych obliczeniach uwzględniono model konstytutywny Johnsona-Cooka, którego parametry dla rozpatrywanego materiału zawiera tabela 2.

Tabela 2. Parametry modelu Johnsona-Cooka dla stopu aluminium Al7075-T651 [14]

A [MPa]	B [MPa]	n	C	m
527	575	0.72	0.017	1.61

Aby uwzględnić zniszczenie materiału zastosowano model zniszczenia Johnsona-Cooka, który określa odkształcenie niszczące zgodnie z zależnością [9,14]:

$$\epsilon_f = \left[ D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^* \right] \left[ 1 + D_4 \ln \epsilon^* \right] \left[ 1 + D_5 T^* \right] \quad (26)$$

gdzie:  $D_1, D_5$ - stałe materiałowe,  $\sigma^* = \frac{p}{\sigma_{eff}}$  - stosunek

ciśnienia  $p$  do naprężeń efektywnych  $\sigma_{eff}$ .

Stale związane z przyjętym modelem zniszczenia przedstawia tabela 3. Dany element skończony jest usuwany jeżeli odkształcenia w elemencie, w danym kroku czasowym przekroczą wartość odkształcenia niszczącego.

Tabela 3. Parametry modelu zniszczenia dla stopu aluminium Al7075-T651 [14]

$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$
0.110	0.572	-3.446	0.016	1.099

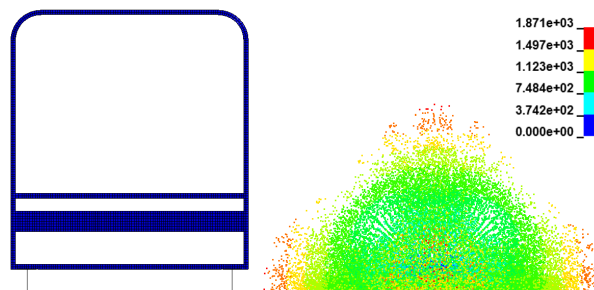
Stale równania stanu JWL (1) przyjęte dla trotylu przedstawia tabela 4.

Tabela 4. Parametry równania stanu JWL dla trotylu [3,5,8]

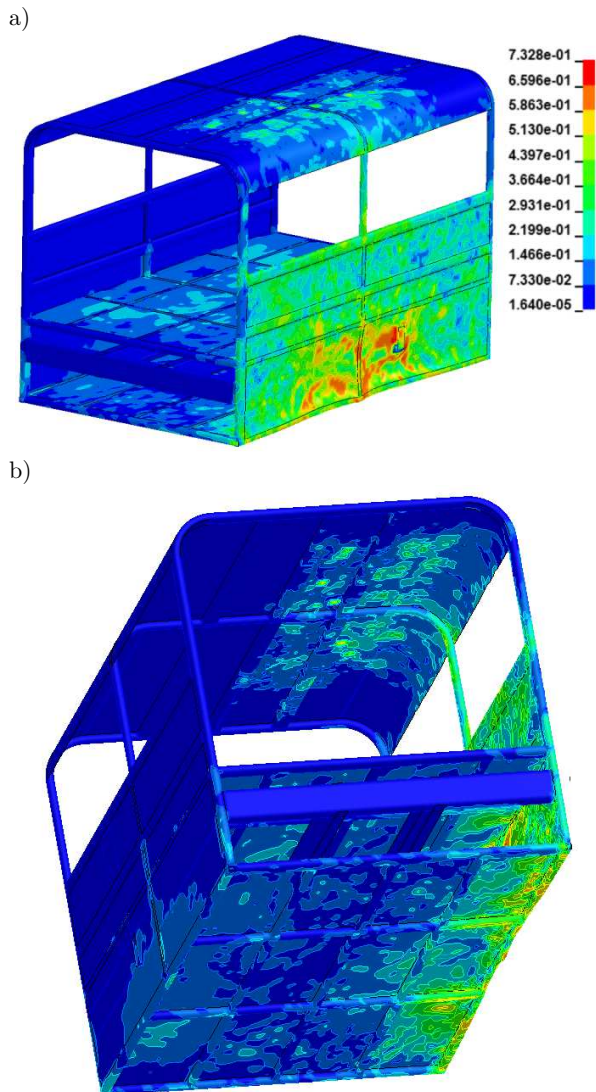
$\rho_0$ , kg/m <sup>3</sup>	A, GPa	B, GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	e, MJ/kg
1630	371.2	3.23	4.15	0.95	0.3	4.29

### 5.3. WYNIKI SYMULACJI

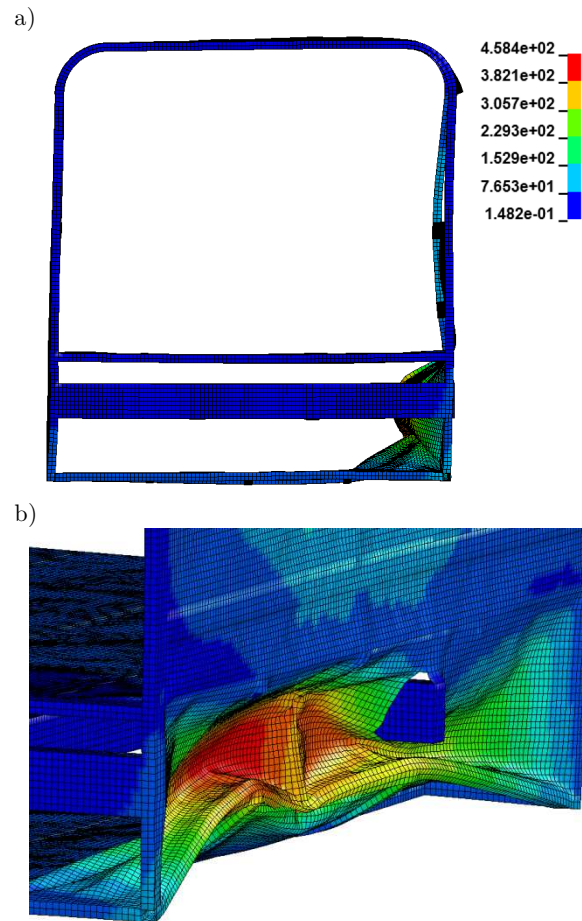
Wyniki obliczeń przeprowadzonych z wykorzystaniem programu LS-DYNA przedstawiono w postaci barwnych map. Widok na stan układu po czasie  $t=0.36 \text{ ms}$  od detonacji przedstawia rys. 13. Mapy naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa po czasie  $t=1.6 \text{ ms}$  od detonacji przedstawia rys. 14a,b. Mapy przemieszczeń wypadkowych po czasie  $t=10 \text{ ms}$  od detonacji ilustruje rys. 15a,b.



Rys. 13. Stan układu po czasie  $t=0.36 \text{ ms}$ , mapa przemieszczeń wypadkowych produktów gazowych detonacji [mm]

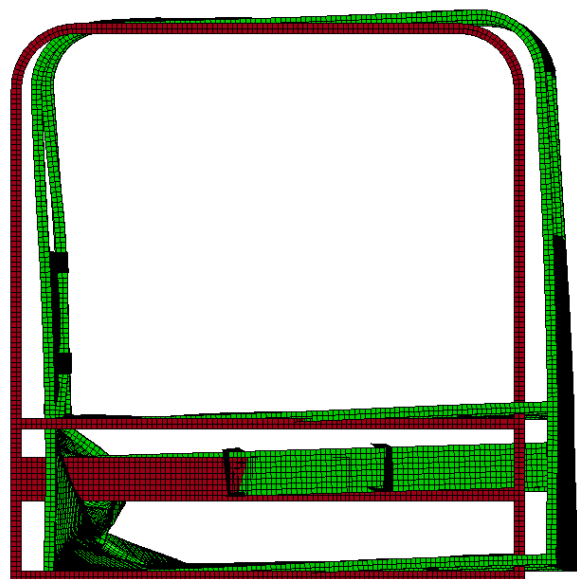


Rys. 14. Mapy naprężeń redukowanych Hubera-Misesa po czasie  $t=1.6$  ms [GPa]: a) widok izometryczny b) widok od dołu



Rys. 15. Mapy przemieszczeń wypadkowych po czasie  $t=10$  ms [mm]: a) widok od przodu konstrukcji, b) widok szczegółowy na fragment konstrukcji związany z największymi przemieszczeniami

Deformację konstrukcji po czasie  $t=60$  ms po detonacji w odniesieniu do stanu początkowego przedstawia rys. 16.



Rys. 16. Deformacja konstrukcji, widok od przodu: kolor czerwony reprezentuje stan początkowy, kolor zielony reprezentuje stan konstrukcji po czasie  $t=60$  ms

## 6. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych symulacji można wnioskować, że obydwie zaprezentowane metody są skuteczne w modelowaniu zjawiska wybuchu. Zaobserwowano niewielkie różnice w wynikach obliczeń przeprowadzonych z wykorzystaniem sprzężenia opisów Lagrange'a i Eulera w metodzie elementów skończonych oraz metody bezsiatkowej SPH. Każda z metod posiada wady i zalety, których znajomość pozwala na wybór odpowiedniej metody z perspektywy rozwiązywania konkretnego problemu. Przygotowanie modelu numerycznego przy użyciu metody MES jest bardziej pracochłonne niż w przypadku metody SPH. Wymagana jest siatka elementów skończonych zarówno ładunku wybuchowego, jak i obszaru, w którym propaguje fala uderze-

niowa. Dodatkowo poprawność obliczeń jest w dużej mierze uzależniona od jakości i odpowiedniej gęstości siatki. W metodzie SPH nie jest wymagana dyskretyzacja obszaru propagacji fali uderzeniowej, wystarczy zdyskretyzować jedynie ładunek. Z drugiej strony, w przypadku analiz, w których trzeba uwzględnić ośrodek propagacji fali uderzeniowej sytuacja się komplikuje. W MES uwzględnienie tego ośrodka jest proste i naturalne, natomiast w przypadku metody SPH może generować dodatkowe trudności. Opis Lagrange'a, którym operuje metoda SPH, pozwala na badanie podczas symulacji nieograniczonego obszaru propagacji fali uderzeniowej natomiast w MES obszar obliczeń jest ograniczony do obszaru zdyskretyzowanego elementami Eulera.

## Literatura

1. Liu M.B., Liu G.R., Zong Z., Lam K.Y.: Computer simulation of high explosive explosion using smoothed particle hydrodynamics methodology. "Computers & Fluids" 2003, No 23, p. 305 - 322.
2. Tabatabaei Z., Volz J.: A comparison between three different blast methods in LS-DYNA: LBE, MM-ALE, Coupling of LBE and MM-ALE. In: 12th International LS-DYNA Users Conference. Dearborn: Livermore Software Technology Corp., 2012.
3. Baranowski P., Małachowski J.: Wybrane numeryczne metody modelowania obciążenia falą podmuchową podwozia pojazdu terenowego- analiza porównawcza. Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej 2012, Vol. LXI, No 3, s. 117 - 128.
4. Małachowski J., Mazurkiewicz P.: Elastic-plastic half cylindrical surface response under blast loading. In: 19th International Conference on Computer Methods in Mechanics. Warsaw: Publ. House of the Warsaw University of Technology, 2011. Short papers p. 341 - 342.
5. Toussaint G., Durocher R.: Finite element simulation using SPH particles as loading on typical light armoured vehicles. In: 10th International LS-DYNA Users Conference. Dearborn: Livermore Software Technology Corp., 2008.
6. Donea J., Huerta A., Ponthot J.-Ph., Rodriguez-Ferran A.: Arbitrary Lagrangian-Eulerian methods. Encyclopedia of Computational Mechanics, Wiley, 2004.
7. Belytschko T., Liu W.K., Moran B.: Nonlinear finite elements for continua and structures. New York: John Wiley & Sons, 2000.
8. Liu G.R., Liu M.B.: Smoothed particle hydrodynamic- a meshfree particle method. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2003.
9. Hallquist J.O.: LS-DYNA theory manual. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2006.
10. Larcher M.: Pressure-time functions for the description of air blast waves. JRC Technical Note, JCR 46829, European Communities, 2008.
11. Goel M.D., Matsagar V.A., Gupta A.K., Marburg S.: An abridged review of blast wave parameters. "Defence Science Journal" 2012, Vol. 62, No. 5, p. 300 - 306.
12. Chang D.B., Young C.S.: Probabilistic estimates of vulnerability to explosive overpressures and impulses. "Journal of Physical Security" 2010, Vol 4, p. 10 - 29.
13. Saska P., Krzystała E., Czmochoński J.: Analiza parametrów fali uderzeniowej wybuchu wyznaczonych empirycznie i z wykorzystaniem ultraszybkich kamery optycznej. „Modelowanie Inżynierskie” 2011, nr 42, t. 11, s. 385 - 393.
14. Brar N.S., Joshi V.S., Harris B.W.: Constitutive model constants for Al7075T651 and Al7075T6. AIP Conf. Proc. 1195. Nashville 2009, p. 945 - 948.