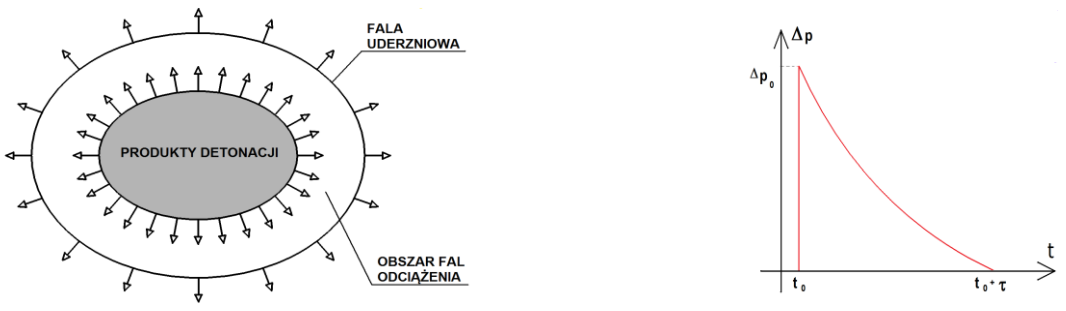
STARCZEWSKI Lech[1]
NYC Robert[1]
KOŚLIK Piotr[2]
WILK Zenon[2]

Symulacje numeryczne i wstępne badania eksperymentalne modeli układów ochronnych narażonych na wybuch ładunków o masie 2-6 kg TNT w warunkach określonych dokumentem NATO AEP-55

1. WPROWADZENIE

Przedstawiona praca została wykonano w ramach jednego z zadań naukowo - badawczych projektu realizowanego przez Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej w Sulejówku dotyczącego układów ochronnych pojazdów przed wybuchem.

Mechaniczne działanie fal uderzeniowych i propagujących się za nimi fal odciążenia jest głównym czynnikiem rażącym wybuchu. W wyniku gwałtownej przemiany chemicznej materiału wybuchowego pojawia się obszar nagrzanego ośrodka gazowego nazywanego produktami detonacji. Ciśnienie produktów detonacji materiałów wybuchowych przewyższa ciśnienie atmosferyczne kilkaset tysięcy razy. Działa ono na ośrodek otaczający produkty detonacji, wytwarzając w nim intensywne fale uderzeniowe ciśnienia (rysunek 1a). Wytworzona wybuchem fala uderzeniowa (rysunek 1b) dociera do rażonego obiektu (człowiek, pojazd, konstrukcja) powodując gwałtowny wzrost ciśnienia działającego na jego powierzchnie.



a) b)

Rys. 1. Mechanizm tworzenia się fali uderzeniowej w skutek wybuchu (a) i kształt impulsu ciśnienia wywieranego na powierzchnię obiektu poddanego działaniu fali podmuchowej (b)

[1] Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej; 05-070 Sulejówek; ul. Okuniewska 1. Tel.: +48 22 68-11-012, Fax: +48 22 68-11-073, sekretariat@witpis.eu
[2] Instytut Przemysłu Organicznego Warszawa – Oddział Krupski Młyn; 42-693 Krupski Młyn; ul. Zawadzkiego 1; Tel.: +48 32 382-11-91, Fax: +48 32 382-11-92, zenon.wilk@ipo.waw.pl

Ten gwałtowny przyrost nadciśnienia jest głównym czynnikiem rażącym wybuchu na człowieka (tabela 1).

Tab. 1. Wpływ wielkości nadciśnienia na ciało człowieka [1]

Zakres	Przedział nadciśnienia [MPa]	Efekt oddziaływania na człowieka
I	$\Delta p < 0,01$	Nadciśnienie bezpieczne
II	$0,01 \leq \Delta p < 0,0175$	Uszkodzenie słuchu
III	$0,0175 \leq \Delta p < 0,04$	Uszkodzenie układu oddechowego
IV	$0,04 \leq \Delta p < 0,3$	Poważne uszkodzenie ciała (możliwe zmiażdżenie części miękkich)
V	$\Delta p \geq 0,3$	Śmierć

Dokument NATO AEP - 55 określa wymagania dla poligonowych układów badawczych systemów ochronnych pojazdów (np. KTO, czołgów). Podaje szczegółowe parametry układów testowych, np. test prosty wybuch miny pod płytą stalową 35 mm lub test wybuchu miny pod płytą stalową 35 mm z obciążeniem (stanowiącym ekwiwalent masy pojazdu, np. 3,5T).

Dokument AEP-55 podaje także szczegółowe parametry testowych ładunków wybuchowych tj. materiał wybuchowy, kształt i masa miny oraz sposób jej użycia (np. wybuch miny w gruncie lub wybuch ze stalowej płyty detonacyjnej).

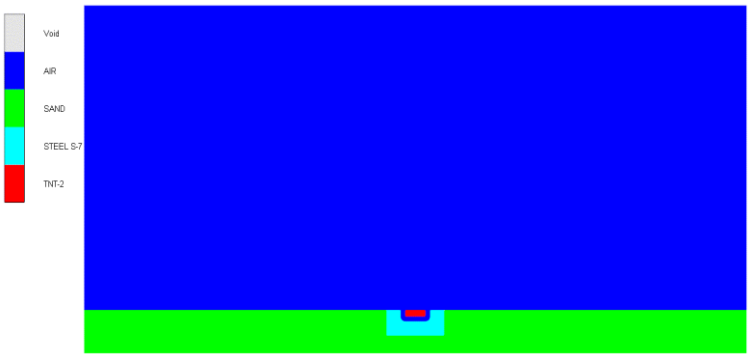
Zadanie dotyczące wstępnych analiz numerycznych, symulacji komputerowych i eksperymentów poligonowych realizowano w Oddziale Instytutu Przemysłu Organicznego w Krupskim Młynie.

Instytut Przemysłu Organicznego w Warszawie - Oddział w Krupskim Młynie posiada licencję na stosowanie specjalizowanego programu Ansys Autodyna. Jest on bardzo uniwersalnym narzędziem pozwalającym modelować i analizować złożone zjawiska takie jak: ekspansja produktów detonacji, rozchodzenie się fali uderzeniowej, szybkie odkształcenia. Symulacje i analizy z zastosowaniem systemu Ansys Autodyna na etapie badawczym projektu pozwalają na zmniejszenie ilości drogich modeli i prototypów do eksperymentów, skracają wprowadzenia produktu na rynek.

W ramach pracy wykonane zostały wstępne komputerowe badania symulacyjne zjawiska oddziaływania i propagacji fali ciśnienia w powietrzu wywołane detonacją ładunków o masie do 6 kg TNT. Badania te wykonano głównie w celu analizy występujących w czasie detonacji ładunków ciśnień fali uderzeniowej, jej rozprzestrzeniania się i prędkości fali podmuchowej w powietrzu na małych odległościach od centrum wybuchu (do 4 m). Badania te pozwoliły na ocenę bezpieczeństwa prowadzenia zaplanowanych dalszych eksperymentalnych prac poligonowych. Na podstawie badań symulacyjnych możliwe było precyzyjne określenie odpowiednich wymaganych parametrów czujników pomiarowych (ciśnienia, przyspieszeń) w miejscach ich rozmieszczenia.

2. SYMULACJE KOMPUTEROWE – WSTĘP DO BADAŃ ZGODNYCH Z DOKUMENTEM AEP-55

Do wstępnych analiz numerycznych przyjęty został model, który zakładał wybuch MW (miny) ze stalowej formy - płyty detonacyjnej, o wymiarach 700 mm x 300 mm jak w specyfikacji normy do badań poligonowych (wg. klasyfikacji NATO AEP-55). Widok układu – modelu wybuchu przedstawiono na rysunku 2.

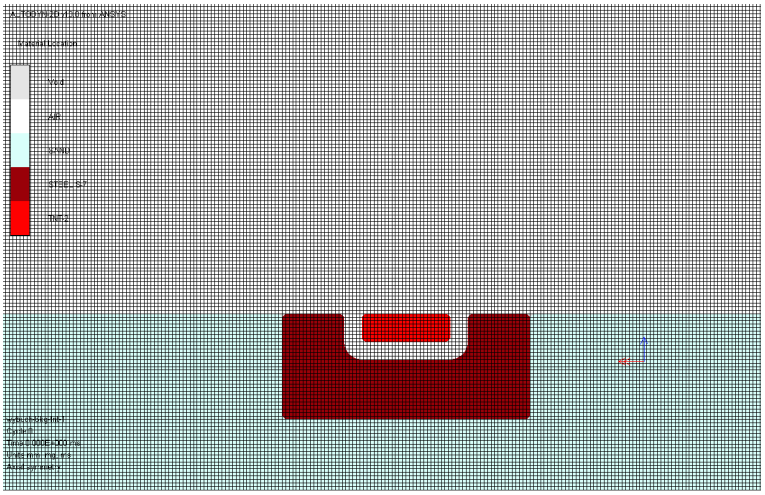


Rys. 2. Widok układu - modelu ułożenia ładunku TNT w stalowej płycie detonacyjnej

Model numeryczny oparto na założeniach EULERA, tj. w przypadku tego typu opisu, produkty detonacji przemieszczają się na tle siatki elementów skończonych. Model obejmuje przestrzeń powietrza o wysokości 4 m nad podłożem i średnicy 8 m. W przestrzeni o takich wymiarach zaplanowane były eksperymenty poligonowe i rozmieszczenie czujników pomiarowych. Na rysunku 3 przedstawiono dla przykładu fragment siatki numerycznej modelu ładunku, w otoczeniu powietrza, umieszczonego w płycie detonacyjnej, która z kolei posadowiona jest w gruncie.

W modelu przyjęto dane materiałowe z dostępnej bazy danych programu Ansys Autodyn (odpowiednio AIR, SAND, STEEL S-7, TNT-2).

Stan zachowania się powietrza w analizowanym układzie model opisuje za pomocą równań stanu dla gazów doskonałych. Dla powietrza w wszystkich analizowanych modelach przyjęto ciśnienie normalne.



Rys. 3. Widok fragmentu siatki numerycznej modelu ładunku TNT umieszczonego w płycie detonacyjnej

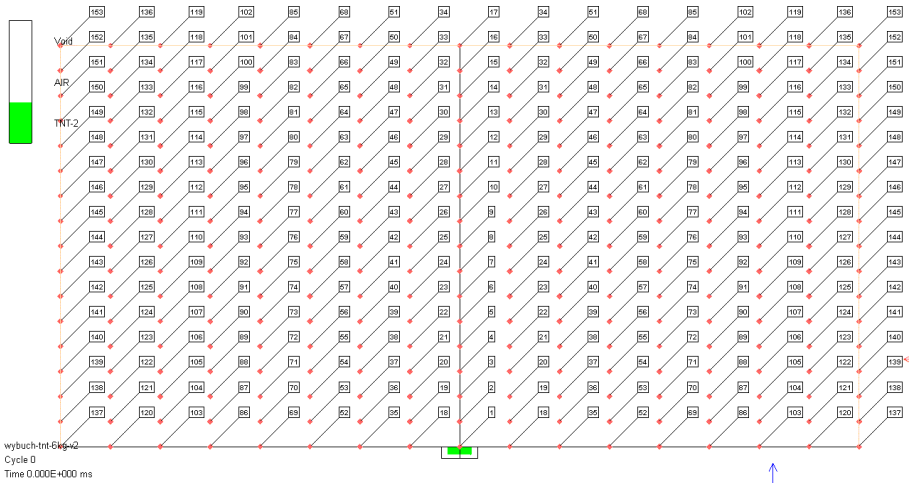
Dla opisu procesu detonacji materiału wybuchowego zastosowano równania stanu EOS JWL (równanie Jones, Wilkins i Lee). Parametry użyte do opisu równania stanu materiału wybuchowego zestawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Parametry materiałowe dla TNT do równania stanu JWL

Materiał wybuchowy	ρ_0 [g/cm^3]	A [GPa]	B [GPa]	p_{CJ} [GPa]	R_1	R_2	E_0 [GPa]	$D_{śr}$ [m/s]	ω
TNT	1,63	371,2	3,231	21,0	4,15	0,95	7,0	6930	0,3

2.1. Wybrane wyniki analizy z symulacji wybuchu 6 kg TNT z płyty detonacyjnej – wybuch w powietrzu otwarty

Widok układu i modelu 2D wybuchu 6 kg TNT ze stalowej płyty detonacyjnej przyjętego do wstępnych analiz przedstawiono na rysunku 2. Dla analizy parametrów fizycznych w procesie wybuchu (ciśnienia, prędkości, gęstości, energie i in.) w modelu tym naniesiono w przestrzeni regularną siatkę 153 punktów kontrolnych, co przedstawia rysunek 4. Odległości miedzy punktami kontrolnymi wynoszą 0,25 m w osi pionowej (X) i 0,5 m w osi poziomej (Y).

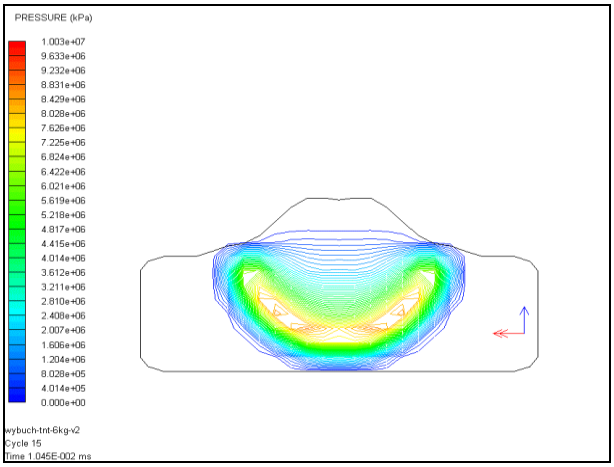


Rys. 4. Widok modelu wybuchu 6 kg TNT z naniesionymi punktami pomiarowymi

Na kolejnych obrazach przedstawiono przykłady obrazów z symulacji, widok konturów ciśnień w wybranych chwilach proces detonacji i rozprzestrzeniania się fali podmuchowej.

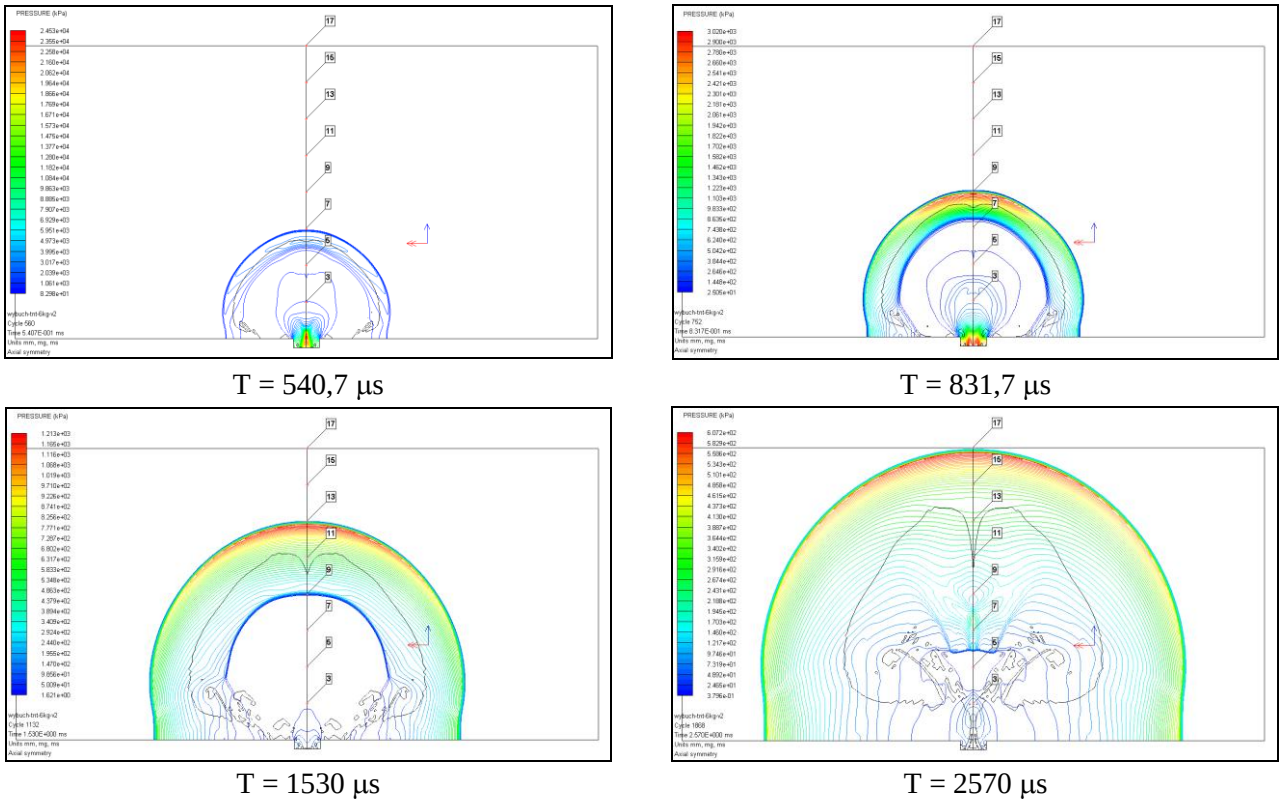
Na rysunku 5 przedstawiono widok ładunku 6 kg TNT (przyjmowano we wszystkich układach ekwiwalent miny o stałych proporcjach wymiarowych; średnicy/wysokość = 3:1) w trakcie detonacji (dla chwili T = 10,45 μs).

Obserwowane ciśnienie produktów w fazie detonacji ładunku MW jest maksymalne, ok. 10,03GPa.



Rys. 5. Detonacja ładunku 6 kg TNT - kontury ciśnień dla czasu T = 10,45 μs

Rysunek 6 przedstawia zestawienie obrazów konturów ciśnień ilustrujących rozprzestrzenianie się fali podmuchowej w powietrzu i powstałych produktów detonacji w analizowanym obszarze.



Rys. 6. Przebieg rozprzestrzeniania się fali podmuchowej w powietrzu (obrazy konturów ciśnień dla T=540,7µs; 831,7µs; 1530µs; 2570µs), wybuch 6kg TNT w płycie detonacyjnej

Na podstawie przedstawionych wybranych obrazów przemieszczania się frontów ciśnienia w powietrzu na skutek wybuchu (rysunek 6) możliwe jest oszacowanie prędkości fali podmuchowej. Poniżej obliczono prędkości fali w powietrzu w kierunku pionowym, w osi X: dla czasów T=540,7 µs i T=831,7 µs front fali uderzeniowej w powietrzu przemieszcza się od punktu kontrolnego nr 7 (X=1,5 m) do pkt. 9 (X=2,0 m). Szacowana na tym odcinku prędkość frontu fali wynosi: {(2,0-1,5)/(831,7-540,7)}*10^6 [m/s] = 0,5/291 = 1718,2 m/s.

Analogicznie, dla czasów: T=831,7 µs i T= 1530 µs front fali uderzeniowej w powietrzu przemieszcza się od punktu kontrolnego nr 9 (X=2,0 m) do pkt. 13 (X=3,0 m). Szacowana na tym odcinku prędkość frontu fali wynosi: 1432 m/s. Następna szacowana dla czasów: T=1530 µs i T= 2570 µs prędkość frontu fali uderzeniowej w powietrzu, przemieszczania się od punktu kontrolnego nr 13 (X=2,0 m) do pkt. 17 (X=4,0 m) wynosi: 961,5 m/s. Obserwuje się spadek prędkości fali podmuchowej w powietrzu wraz z odległością od centrum wybuchu. Prędkość fali podmuchowej w kierunku poziomym (oś Y) w pobliżu podłoża (na wysokości do ok 1 m) jest znacznie nisza. Np. dla chwili T= 2570 µs front fali uderzeniowej w powietrzu w kierunku poziomym znajduje się na odległość Y = 3,0 m. W tym momencie front fali w kierunku pionowym (jak wyliczono wcześniej o prędkości ok. 960 m/s) jest na wysokości X=4 m. Dla tej chwili prędkość fali w kierunku poziomym można oszacować proporcjonalnie: Vy=3/4* 960 = 720 m/s.

Na podstawie przedstawionych obrazów konturów ciśnień można również podać ich wartości maksymalne dla wybranych chwil czasu w kierunku pionowym X:

- Dla czasu T=831,7 µs; na wysokości X= 2 m (pkt. 9) ciśnienie maksymalne wynosi 3020 kPa;
- Dla czasu T=1530 µs; na wysokości X= 3 m (pkt.13) ciśnienie maksymalne wynosi 1231 kPa;
- Dla czasu T=2,570 ms; na wysokości X=4 m (pkt.17) ciśnienie maksymalne wynosi 607,2 kPa.

Bardzo dokładne analizy w tym zakresie i inne można przeprowadzić wykorzystując dane otrzymane w każdym cyklu obliczeniowym modelu, które zawarte są w generowanej bazie wyników (dla odpowiednio wybranych parametrów i punktów kontrolnych w modelu).

Należy podkreślić, że w prezentowanym modelu wybuchu ładunku miny ze stalowej płyty detonacyjnej, obserwowane ciśnienia i prędkości fali podmuchowej w kierunku pionowym (tj. nad nieodkształcalnym wgłębieniem) są najwyższe.

2.2. Badania poligonowe wybuchu TNT z pomiarami ciśnienia fali podmuchowej

Dla weryfikacji modelu numerycznego wybuchu ładunków TNT na twardym podłoży, jakim jest stalowa płyta detonacyjna wykonano serię badań poligonowych z pomiarem ciśnień fali podmuchowej. W badaniu detonowano miny z materiału wybuchowego – ekwiwalent TNT o masach: 1000 g oraz 2000 g. Detonację ładunków inicjowano centralnie, w osi ładunku z górnej powierzchni za pomocą zapalników elektrycznych typu ERG (rysunek 7).

Rys. 7. Widok miny/ładunku TNT przygotowanego do testu ułożonego w stalowej płycie detonacyjnej

Czujniki do pomiarów ciśnienia fali podmuchowej rozmieszczone zostały w trzech odległościach: 2 m, 3 m oraz 4 m, mierząc od środka ładunku. Czujniki zostały skierowane do osi układu tj. w kierunku ładunku. Wysokości położenia poszczególnych czujników byłą jednakowa i wynosiła 1 metr nad powierzchnią podłoża.

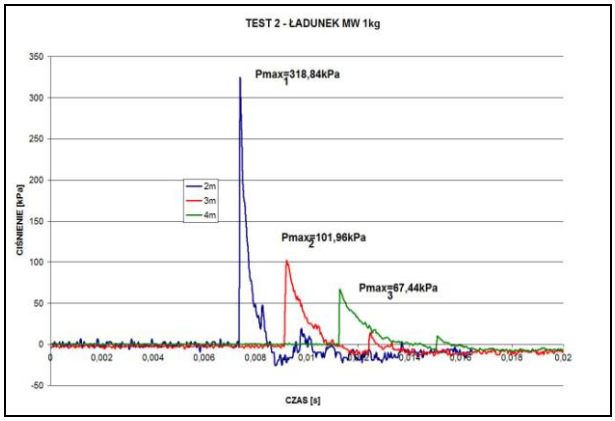
W badaniach wykorzystano specjalistyczne czujniki ciśnienia piezoelektryczne firmy *PCB PIEZOTRONICS* serii 137. Ich konstrukcja pozwala na rejestrację fali nadciśnienia o bardzo dużych wartościach i w bliskich odległościach od wybuchu.

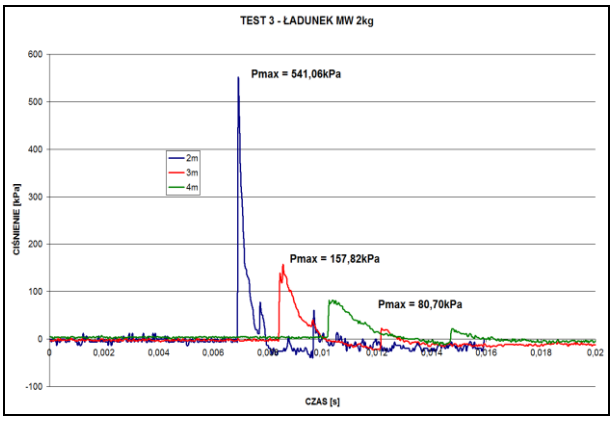
Parametry techniczne użytych czujników podano w tabeli 3.

Tab. 3. Parametry czujników ciśnienia

Parametr	Jednostka miary	Typ czujnika 137A22 Sn: 7233	Typ czujnika 137A23 Sn: 7282	Typ czujnika 137A23 Sn: 7283
Zakres pomiarowy	kPa	0-3448	0-345	0-345
Rozdzielczość	kPa	0,069	0,069	0,069
Czułość nominalna	mV/kPa	1,242	14,32	13,88
Ciśnienie maksym.	kPa	6895	6895	6895

Rejestrację ciśnień wykonano za pomocą cyfrowego oscyloskopu wielokanałowego GwINSTEK GDS-2204 – maksymalna szybkość próbkowania 1Gs s^{-1}. Na rysunku 8 przedstawiono rejestracje ciśnień w odległościach 2 m, 3 m oraz 4 m po detonacji ładunków o masach 1 kg i 2 kg MW (ekwiwalent TNT). Rejestracje zsynchronizowane były z początkiem detonacji.





Rys. 8. Przebiegi ciśnienia po wybuchu ładunku 1kg i 2 kg TNT w odległościach 2, 3 i 4 m

W tabeli 4 przedstawiono zestawienie wyników dla testu wybuchu 1 kg i 2 kg TNT - wartości maksymalnych ciśnień i czasu dotarcia czoła fali uderzeniowej do poszczególnych czujników.

Tab. 4. Zestawienie wyników dla testu wybuchu 1 kg i 2 kg TNT

Masa MW	Odległość 2 m		Odległość 3m		Odległość 4m	
	Czas pomiaru Pmax	Pmax	Czas pomiaru Pmax	Pmax	Czas pomiaru Pmax	Pmax
1000 g	7,44ms	318,4kPa	9,20ms	101,96kPa	11,32ms	67,44kPa
2000 g	6,96 ms	541,06 kPa	8,56 ms	157,82 kPa	10,24 ms	80,70 kPa

Na podstawie danych w tabeli 4 można oszacować średnią prędkość czoła fali uderzeniowej na odległościach określonych przez położenie czujników.

Dla testu wybuchu 1 kg TNT, średnia prędkość fali uderzeniowej oszacowana między czujnikiem znajdującym się w odległości 2 m a czujnikiem znajdującym się w odległości 3 m wynosi 568,2 m/s. Analogicznie szacowana między czujnikiem znajdującym się w odległości 3 m a czujnikiem znajdującym się w odległości 4 m wynosi 471,7 m/s.

Dla testu wybuchu 2 kg TNT średnie prędkość fali uderzeniowej oszacowane w sposób jak wyżej wynoszą 625m/s i 595,2m/s. W tabeli 5 podano obliczone na podstawie rejestracji ciśnień w testach wybuchu 1 kg i 2 kg TNT wartości impulsu na odległościach umieszczenia czujników pomiarowych.

Tab. 5. Wartości impulsu ciśnienia dla testu wybuchu 1 kg i 2 kg TNT

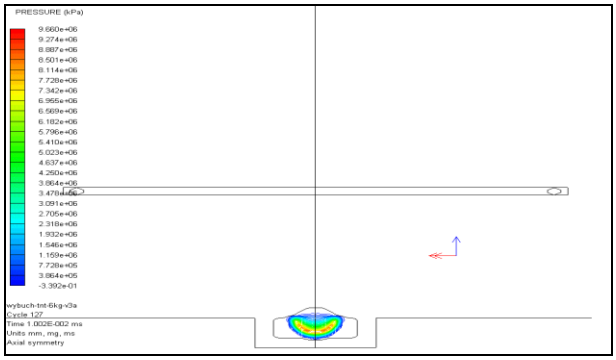
Masa MW	W odległości 2 m	W odległości 3 m	W odległości 4 m
1000 g	98,615 Pa*s	74,609 Pa*s	53,810 Pa*s
2000 g	136,296 Pa*s	97,737 Pa*s	85,504 Pa*s

Uzyskane w eksperymentach poligonowych wartości ciśnień pozwoliły na odpowiedni dobór czujników ciśnienia do dalszych badań poligonowych i rozmieszczenia ich w bezpiecznych odległościach od centrum wybuchu.

2.3. Wybrane wyniki analizy z symulacji wybuchu 6 kg TNT w płycie detonacyjnej – wybuch w powietrzu pod stalową przegrodą

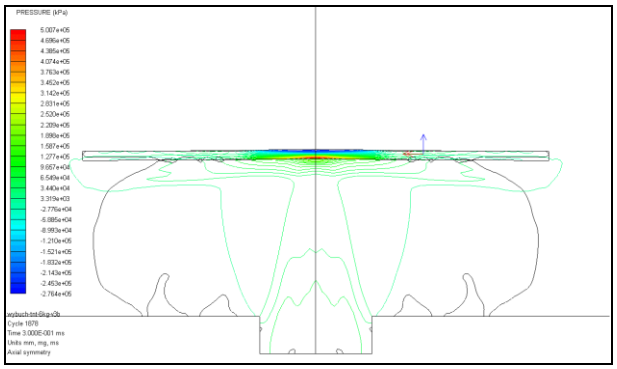
W kolejnym modelu analizowano wpływ (oddziaływanie) ciśnienia generowanego w wyniku detonacji ładunku 6 kg TNT z płyty detonacyjnej na stalową przegrodę swobodnie umieszczoną nad ładunkiem wybuchowym. Model ten przyjęto jako etap pierwszy do budowy modelu pełnego układu badawczego wg wymagań AEP-55, w którym płyta stalowa jest dodatkowo obciążona balastem (ekwiwalentem masy pojazdu np. 3,5 T).

Stalową przegrodę o wymiarach 1500 mm x 30 mm zamodelowano metodą Lagrang'a, i umieszczono swobodnie na wysokości 500 mm nad ładunkiem. Widok modelu wybuchu ze stalowa przegrodą przedstawiono na rysunku 8.

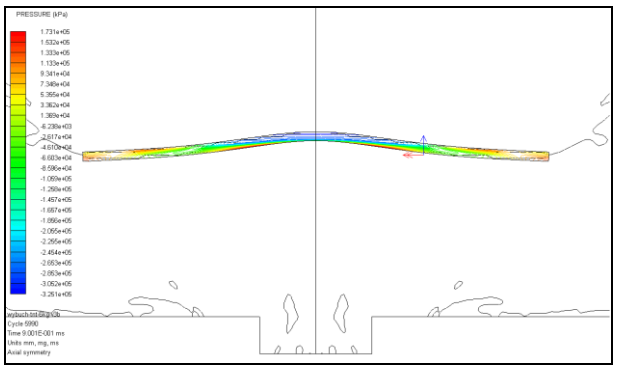


Rys. 8. Widok modelu wybuchu 6 kg TNT z płyty detonacyjnej - układu ze stalową przegrodą, T=10,02 μs

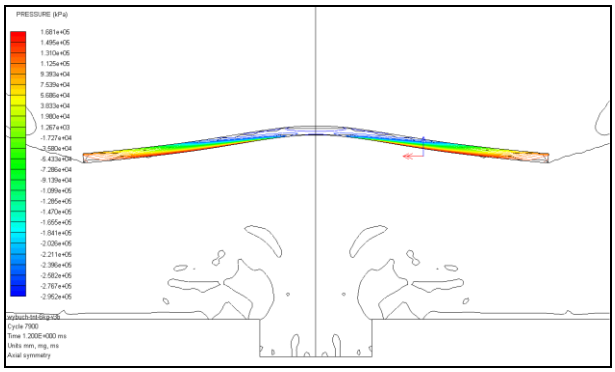
Dla przykładu, na kolejnych obrazach przedstawiono kontury ciśnień i obrazy deformacji płyty (rysunek 9) oraz wektory prędkości występujące w płycie (rysunek 10).



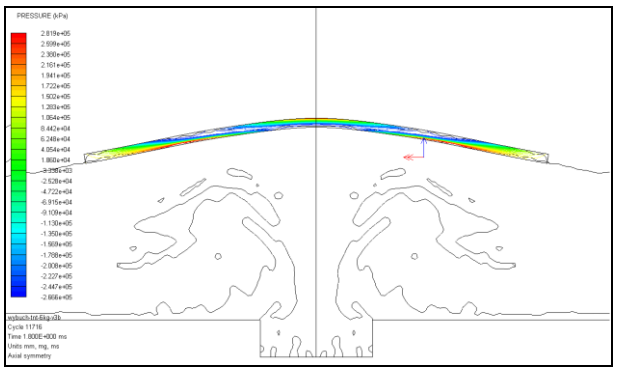
T = 300 μs



T = 900 μs

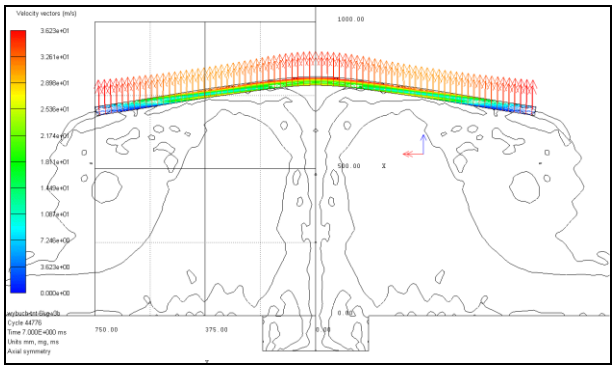


T = 1200 μs

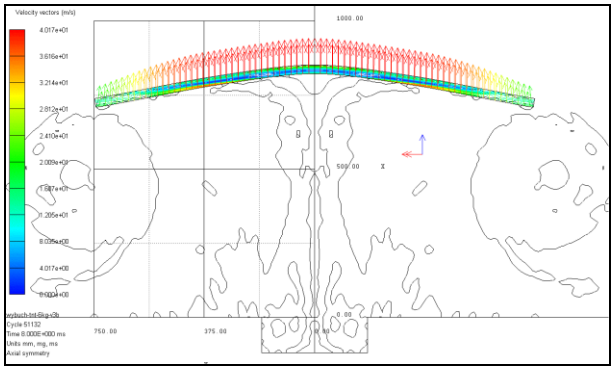


T = 1800 μs

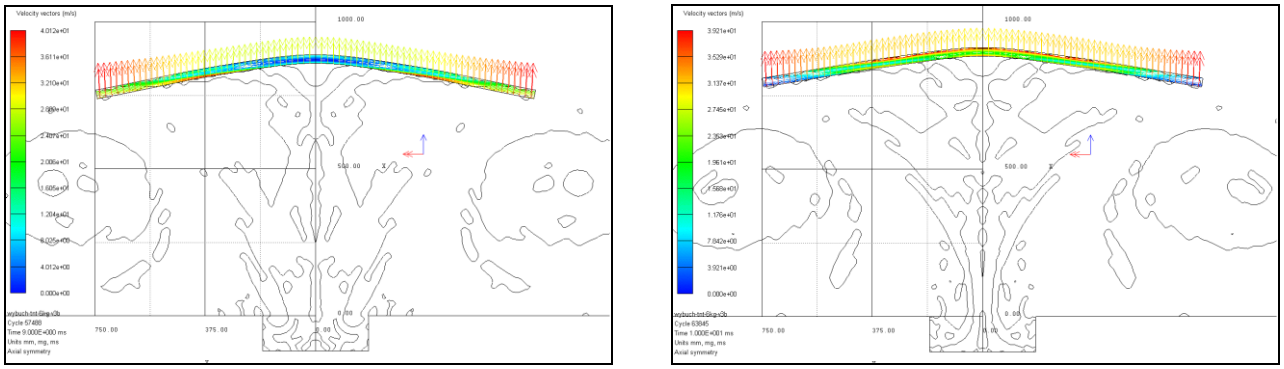
Rys. 9. Kontury ciśnień i obrazy deformacji stalowej przegrody – wybuch 6kg TNT z płyty detonacyjnej (T = 300 μs; T = 900 μs; T = 1200 μs; T = 1800 μs)



T = 7 ms



T = 8 ms

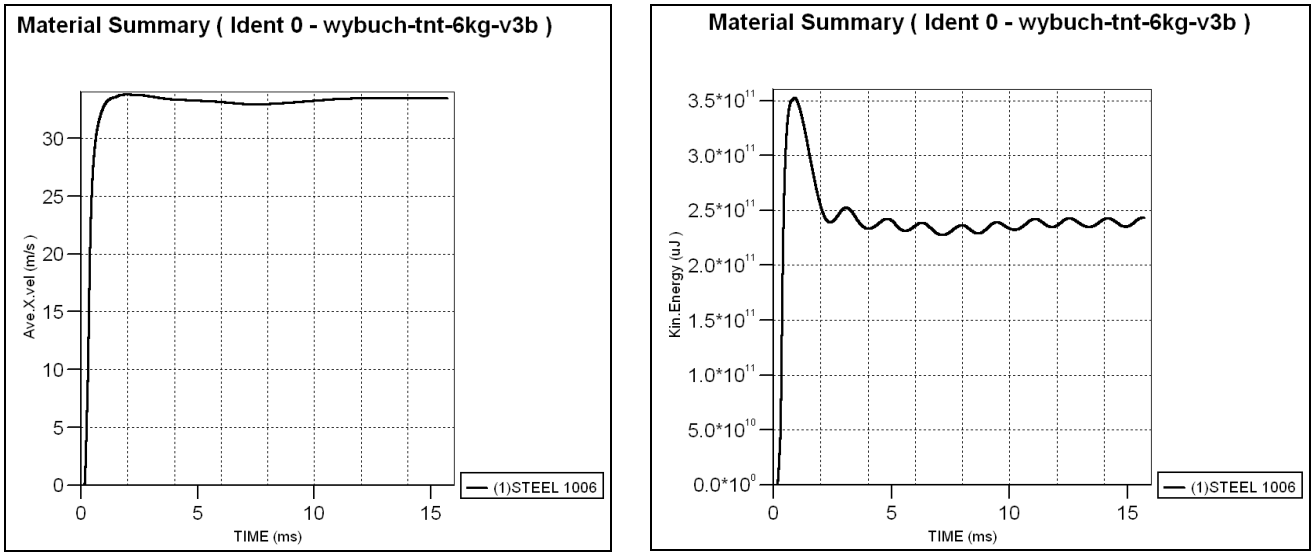


T = 9 ms T = 10 ms

Rys. 10. Obrazy deformacji stalowej przegrody i wektory prędkości – wybuch 6kg TNT z płyty detonacyjnej (T = 7 ms; T = 8 ms; T = 9 ms; T = 10 ms)

Przedstawione sekwencje obrazów deformacji przegrody i wektorów prędkości potwierdzają, że występują w niej silne drgania (elementy przegrody przemieszczają się ze zmieniającą się prędkością).

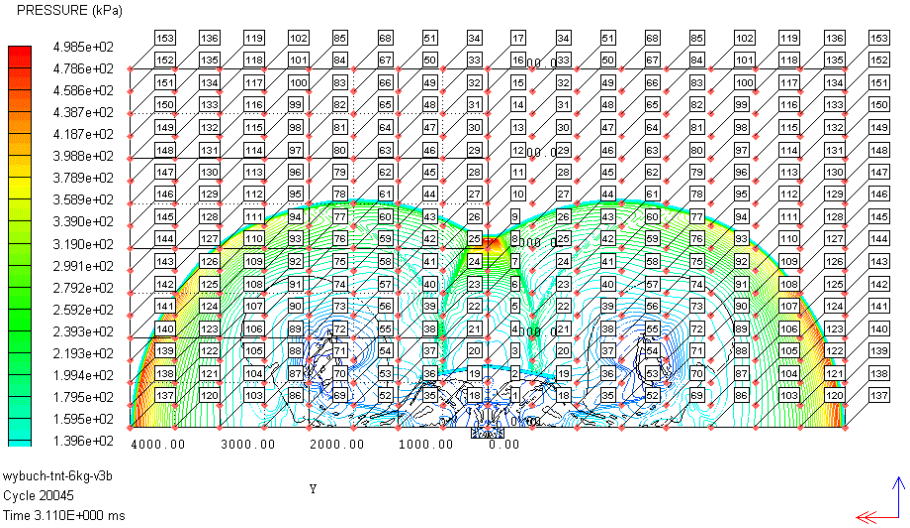
Prędkości maksymalne elementów przegrody dla analizowanego czasu po detonacji od T = 7 ms do T = 10 ms wynoszą ok. 36-40 m/s. Dla całego przebiegu symulacji wybuch (ok. 15 ms) przedstawiono średnią prędkość przegrody i jej energię kinetyczną (rysunek 11).



Rys. 11. Przebieg zmian średniej prędkości przegrody i jej energię kinetycznej (po czasie ok. 2 ms ustalona jest prędkość średnia płyty ok. 34 m/s i energia kinetyczna ok. $2{,}4*10^{11}$ μJ)

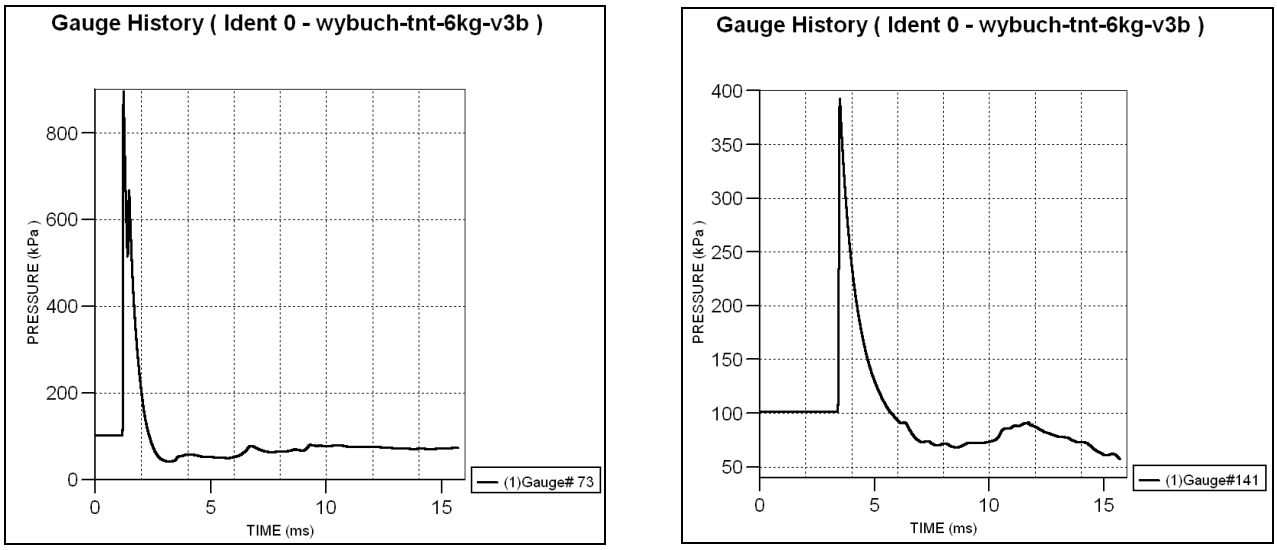
W analizowanym przypadku wybuchu ładunku 6 kg TNT z płyty detonacyjnej, z umieszczoną nad ładunkiem stalową przegrodą, odmienny jest obraz formującej się fali uderzeniowej i podmuchowej w powietrzu oraz kształt powstałych produktów detonacji. Na rysunku 12 przedstawiono obraz konturów ciśnień i położenia produktów detonacji dla czasu T = 3,11 ms.

Jest to moment, gdy fala uderzeniowa w kierunku poziomym (posiada najwyższą prędkość przy powierzchni) dociera do granicy obszaru modelu, tj. na odległość 4 m



Rys. 12. Obrazy konturów ciśnień ilustrujących przebieg rozprzestrzeniania się produktów detonacji i fali podmuchowej w powietrzu z oznaczeniem punktów kontrolnych – wybuch 6 kg TNT z płyty detonacyjnej, układu ze stalową przegrodą (T = 3,11 ms)

Przykłady wykresów ciśnienia dla wybranych punktów pomiarowych (rysunek 12) na wysokości 1 m (X=1000 mm) przedstawia rysunek 13.

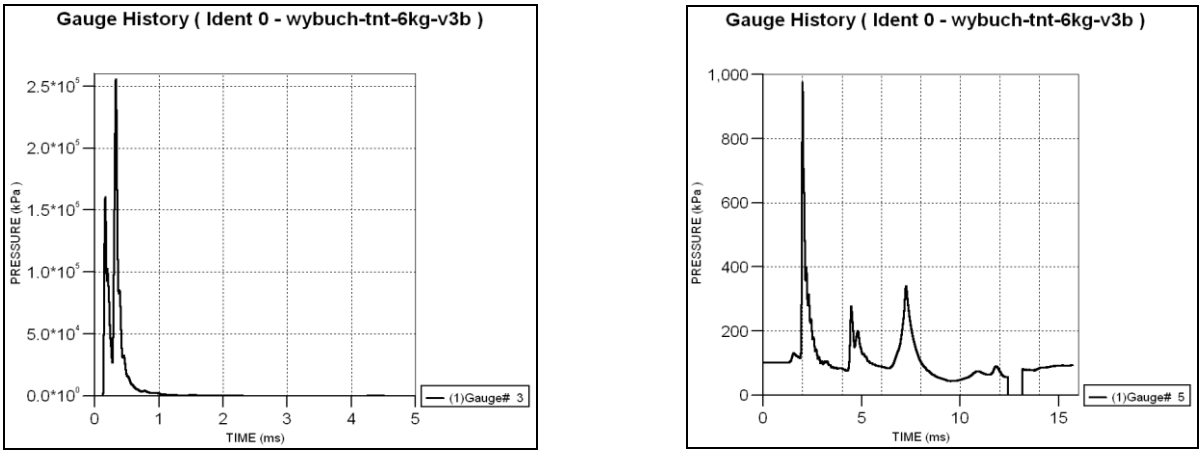


Rys. 13. Wykresy przebiegu ciśnienie na wysokości X=1000 mm w odległościach: 2 m (pkt. 73, Y=2000 mm) i 4 m (pkt. 141, Y= 4000 mm)

Wartości maksymalne ciśnienia frontu fali uderzeniowej w powietrzu w wybranych punktach wynoszą odpowiednio: 900 kPa (pkt. 73, odległość Y=2000 mm) i 395 kPa (pkt. 141, odległość Y=4000 mm). Oszacowana prędkość frontu fali między tymi punktami pomiarowymi wynosi ok. 900m/s.

Najwyższe wartości ciśnień obserwuje się w kierunku pionowym, w osi wybuchu (Y=0) poniżej płyty. Również nad płytą, dlatego że układ jest otwarty, dochodzi do kumulacji zbiegających się frontów fali i obserwuje się bardzo wysokie wartości impulsów ciśnienia.

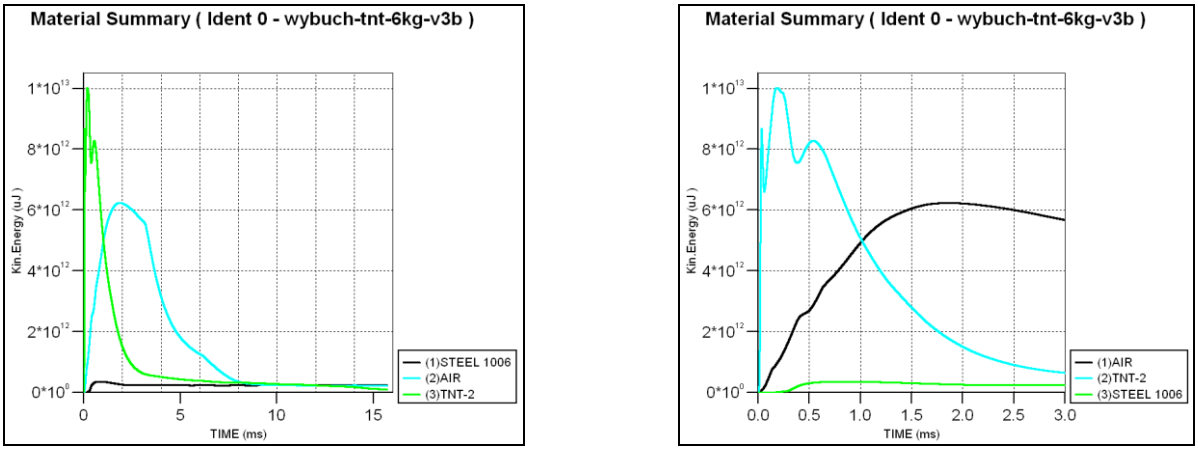
Na rysunku 14 przedstawiono dla przykładu obraz historii ciśnienia dla analizowanego układu w wybranych punktach pomiarowych pod płytą (pkt. 3, X=500 mm) i nad płytą (pkt. 5, X= 1000 mm).



Rys. 14. Obraz historii ciśnienia na osi pionowej układu (Y=0) w wybranych punktach pomiarowych pod płytą (pkt. 3, X=500 mm) i nad płytą (pkt. 5, X= 1000 mm

Charakterystyczne jest wystąpienie w punkcie pomiarowym poniżej przegrody (pkt. 3) podwójnego piku ciśnienia fali uderzeniowej. Pierwszy front fali o wartości ok. 165 MPa pochodzi od bezpośredniego działania wybuchu ładunku. Drugi front fali, o wartości znacznie większej ok. 260 MPa, wynika z działania skumulowanej fali odbitej od podłoża z zagłębieniem w płycie detonacyjnej.

Inny przykład analizy (np. podział energii kinetycznej w układzie) na podstawie generowanych w trakcie symulacji bazy wyników przedstawiono na rysunku 15.



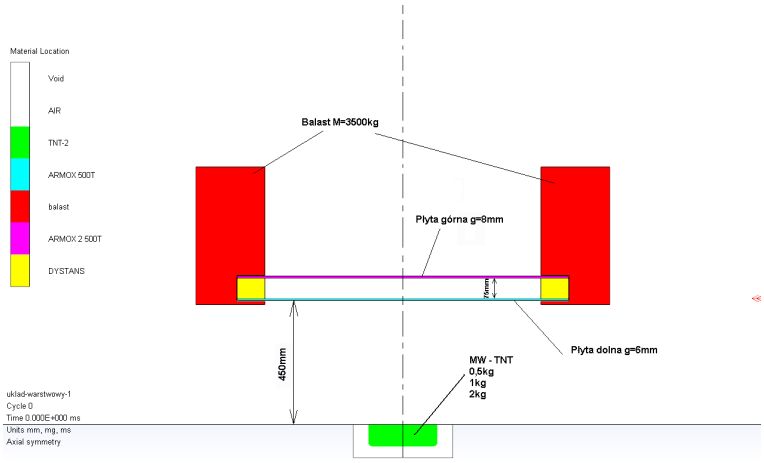
Rys. 15. Przykład analizy podziału energii kinetycznej w układzie: MW (produktów wybuchu), powietrza i stalowej przegrody (po czasie ok. 8 ms nie obserwuje się już znaczących zmian podziału energii)

3. PODSUMOWANIE

Wyniki wstępnych analiz numerycznych i symulacji komputerowych przedstawionych w pracy najprostszych modeli zgodnych z dokumentem AEP-55 potwierdziły prawidłowość ich funkcjonowania. Modele te można zastosować do dalszych różnorodnych analiz uwzględniających zmiany poszczególnych elementów układu takich jak: rodzaj materiału wybuchowego, geometria ładunku wybuchowego, zmiana punktu inicjowania detonacji, a także rozwinięcie przestrzeni o przeszkody, osłony itp.

Do prac w kolejnym etapie analiz numerycznych i prób poligonowych przygotowany został najbardziej złożony model – układu ochronnego warstwowego wg wymagań dokumentu AEP-55. Model geometryczny tego układu przedstawia rysunek 16. Składa się z układu warstwowego płyt ze stali pancernej typu ARMOX 500T odpowiednio o grubości 6 mm (płyta dolna) i 8 mm (płyta górna). Pomiędzy płytami znajduje się dystans o wysokości 76 mm. Układ ochronny jest równomiernie obciążony na krawędziach balastem o masie ok. 3500 kg. Zestaw płyt znajduje się na wysokości 450 mm nad właściwym ładunkiem wybuchowym (TNT). Do analiz i symulacji komputerowych przyjęto ładunki wybuchowe (miny) o masach wzrastających w kolejnych cyklach obliczeniowych: 0,5 kg; 1,0

kg; 2,0 kg. Model numeryczny wykonany jest w domenie Eulera (środowisko gazowe - powietrze), w której obserwuje się propagację fali uderzeniowej po wybuchu. Modele numeryczne płyt stalowych jak również balast i dystans wykonano w domenie Lagrange'a.



Rys. 16. Model geometryczny warstwowego układu ochronnego

Dla modelu z układem ochronnym warstwowym, opisanym wyżej, zaplanowany został i wykonany cykl analiz numerycznych i symulacji komputerowych poprzedzający próby poligonowe wytypowanych aplikacji konstrukcyjnych rozwiązań warstwowych układów ochronnych dla pojazdów.

Widok stanowiska do badań poligonowych projektowanych warstwowych układów ochronnych przedstawia rysunek 17. W szczególności analizowano na tym stanowisku prędkości i przyspieszenie występujące w płycie górnej, na jej powierzchni w części centralnej i stopień jej odkształcenia.

Rys. 17. Widok stanowiska do badań poligonowych układów ochronnych wg AEP-55

Praca sfinansowana przez Europejski Fundusz na Regionalny Rozwój w Polsce (projekt: „Technologie wytwarzania kompozytowych absorberów energii udarowej nowej generacji", nr projektu: POIG.01.03.01-14-031/12) i realizowana przez konsorcjum firm: Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej – Sulejówek oraz Mikanit - Warszawa.

Streszczenie

Praca zawiera opis modeli numerycznych zjawisk towarzyszących wybuchom równoważnym 2-6 kg TNT w układzie otwartym - powietrzu oraz pod przegrodą symulującą układ ochronny pojazdu, uwzględniających warunki prowadzenia badań zgodnych z wymaganiami dokumentu NATO AEP-55. Modele numeryczne zwalidowano eksperymentalnie wykonując badania dla 0,5 kg, 1,0 kg, 2kg TNT. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i przebiegi istotnych parametrów towarzyszących wybuchom. Zweryfikowany doświadczalnie model numeryczny układu z płaską stalową przegrodą, umożliwia zbudowanie modelu przestrzennego układu ochronnego, co znacznie ograniczy ilość eksperymentów poligonowych dla projektowanych rozwiązań aplikacyjnych.

Numeric simulations and experimental tests of vehicle protective systems in the aspect of NATO requirements determined in the AEP-55 document for 2-6 kg TNT

Abstract

The paper presents the description of numeric models of phenomena accompanying detonations corresponding to 2-6 kg TNT in two cases. The first one is the air (open system) and the second one is under the baffle simulating the protection system of a vehicle considering conditions of running the research compatible with requirements of NATO AEP-55 document. Numeric models were validated experimentally in tests with the use of 0,5kg, 1,0 kg and 2,0 kg of TNT. The results of the simulations and the relations of important parameters accompanying the detonations were presented. The numeric model with flat steal baffle, which was experimentally verified enables building the model of protection system in the real conditions, which will significantly reduce the number of firing range experiments for designed implementation solutions.

BIBLIOGRAFIA

1. *Prace minerskie i niszczenia.* Sztab Generalny WP Szefostwo Wojsk Inżynieryjnych, Inż. 572/94 MON Warszawa 1994,
2. AEP-55 Volume 2, Ed. 2, *Procedures for evaluating the protection level of armoured vehicles*, NATO/PfP UNCLASSIFIED, August 2011,
3. Ansys Autodyn *Manual, Help*
4. L.L. Davis & L.G. Hill, ANFO CYLINDER TESTS, CP620, *Shock Compression of Condensed Matter* - 2001. Baza danych Autodyn,
5. LS-DYNA *Keyword Use's Manual Version 970*, Livermore Software Technology Corporation, April 2003,
6. Hiermaier S.J., *Structures Under Crash and Impact, Continuum Mechanics, Discretization and Experimental Characterization*, Springer Science + Business Media 2008, USA,
7. Krzystała E., Mężyk A., Kciuk S., *Analiza oddziaływania wybuchu na kołowe pojazdy specjalne i ich załogi*, Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe (28) NR 2, 2011
8. Krzystała E., Mężyk A., Kciuk S.: *Analiza zagrożenia załogi w wyniku wybuchu ładunku pod kołowym pojazdem opancerzonym,* Zeszyty Naukowe WSOWL, str. 145-154, nr 1(159) 2011