

# METODA OPTYMALIZACJI GEOMETRII RDZENIA ENERGOCHŁONNYCH PANELI OCHRONNYCH

Gabriel Mura<sup>1a</sup>

<sup>1</sup>Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Śląska  
gabriel.mura@polsl.pl

## Streszczenie

W pracy przybliżono podstawowe informacje dotyczące eksplozji materiałów wybuchowych, sposoby ochrony przed ich skutkami oraz jedną z metod ich modelowania. Ponadto zaproponowano metodę optymalizacji geometrii rdzenia energochłonnych paneli ochronnych z uwzględnieniem funkcji \*LOAD\_BLAST programu LS-Dyna i algorytmu genetycznego..

**Słowa kluczowe:** energochłonne panele ochronne, wybuch, optymalizacja, algorytm genetyczny

## GEOMETRY OPTIMIZATION METHOD OF THE CORE OF THE ENERGY-ABSORBING PANEL

## Summary

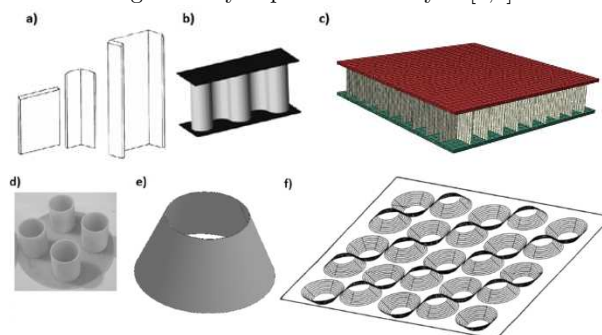
This work presents a basic information about blast of explosive materials, ways to protect against their effects and one of the methods of its modeling. Moreover proposed a optimization method of the geometry of the core of the energy-absorbing panels using the finite element method with regard to \*LOAD\_BLAST function and genetic algorithm.

**Keywords:** energy-absorbing protective panels, explosion, optimization, genetic algorithms

## 1. WSTĘP

Eksplozje ładunków wybuchowych (np. min przeciwpancernych, granatów) stanowią poważne zagrożenie dla pojazdów specjalnych oraz ich załóg. W zależności od rodzaju inicjacji i masy ładunku połączenie fali wybuchu oraz powstałych odłamków powoduje impulsowe obciążenia konstrukcji pojazdu. Impuls ten zaledwie w kilka milisekund skutkuje wysokim przyspieszeniem, powodując nie tylko trwałe uszkodzenia pojazdu, uniemożliwiające jego dalsze funkcjonowanie, nierzadko wykluczające opłacalność jego remontu, ale i urazy członków załogi, a nawet ich śmierć [2,3]. Dlatego jednym z ważniejszych problemów badawczych jest zwiększenie odporności pojazdów wojskowych i cywilnych na działanie fali uderzeniowej spowodowanej eksplozją lub na uderzenie ciała obcego [4,5]. Obecnie rozwijane jest opracowywanie

ciężkich, bardzo wytrzymałych pancerzy [1,11] oraz lekkich energochłonnych paneli ochronnych [1,3].



Rys.1. Różne kształty rdzeni paneli energochłonnych:

a) kształtowniki, b) o przekroju falistym, c) plaster miodu lub „kanapki”, d) rurki, e) ścięte stożki, f) wytłaczanka na jaja [1]

Panele energochłonne wykonuje się zwykle w postaci struktur przekładkowych, w których skład wchodzi okładziny i rdzeń. Rdzenie mogą występować w postaci układów rurek, stożków ściętych, kształtowników, cienkich powłok falistych, warstwy w postaci plastra miodu itp., jak przedstawiono na rys. 1. Ponadto rdzenie paneli mogą być wypełnione tworzywami spienionymi. Najczęściej stosowanymi materiałami do budowy paneli energochłonnych są kompozyty. W pojazdach opancerzonych dąży się do zminimalizowania masy, dlatego kompozytowe panele znajdują w nich zastosowanie. Dzięki małej masie pojazdy mogą zaoszczędzić paliwo, pokonywać przeszkody wodne oraz mogą być transportowane drogą lotniczą [1].

Czynnikami odpowiadającymi za wielkość pochłoniętej energii przez rdzeń panelu energochłonnego: są rodzaj zastosowanego materiału, geometria rdzenia i sposób jego niszczenia. Wartość rozproszanej energii jest równa pracy siły, która wywołuje trwałe odkształcenia okładzin oraz zniszczenie rdzenia. Energochłonne panele ochronne służą do absorpcji energii kinetycznej ciała uderzającego lub energii fali uderzeniowej spowodowanej eksplozją materiałów wybuchowych [7,12]. Dostępna literatura [m.in. 1,6] dostarcza wyłącznie informacji, jak modyfikować istniejące rozwiązania konstrukcyjne, aby zwiększyć energochłonność paneli. Dlatego w pracy przedstawiono metodę optymalizacji cech geometrycznych stalowych rdzeni energochłonnych paneli ochronnych z uwzględnieniem najprostszej funkcji opisującej zjawisko wybuchu ConWep.

## 2. DEFINICJA WYBUCHU I METODY BADAŃ

Wybuchem nazywa się zespół zjawisk szybkozmiennych, które wynikają z przejścia układu z pierwotnego stanu równowagi do innego w bardzo krótkim czasie. Temu zjawisku towarzyszy wyzwolenie dużej ilości energii. Fale uderzeniowe powstałe podczas detonacji ładunku wybuchowego mogą zniszczyć lub uszkodzić konstrukcję znajdującą się w jego pobliżu. Mając na uwadze bezpieczeństwo i koszty realizacji eksperymentu, do badania tego typu zjawisk coraz częściej stosuje się analizy numeryczne [8].

Efektom detonacji ładunku wybuchowego jest powstanie w ośrodku fali ciśnienia o dużej intensywności, której przebieg przedstawiono na rys. 2. Powstała w taki sposób fala charakteryzuje się poprzez skok ciśnienia od wartości ciśnienia otoczenia do wysokiego ciśnienia, po czym następuje jego eksponentyjalny zanik. Zjawisko to można opisać zależnością Friendlera (1) [8,9,10].

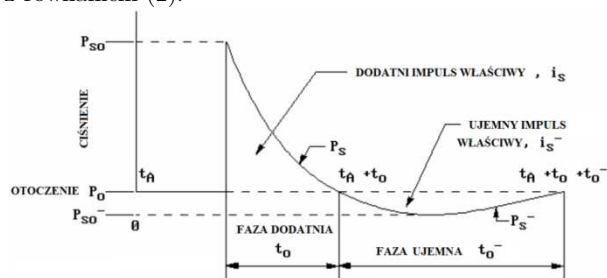
$$p(t) = (p_{max} - p_o) \left[ 1 - \frac{t-t_a}{t_d} \right] e^{\frac{a(t-t_a)}{t_d}} \quad (1)$$

Wartość impulsu dodatniego opisuje się poniższym równaniem:

$$I = \int_{t_a}^{t_a+t_d} p(t) dt \quad (2)$$

Głównymi parametrami opisującymi wybuch są:

- $t_a$  - czas nadejścia, czyli okres od wybuchu do czasu dotarcia fali uderzeniowej do rozważanego punktu,
- $p_{max}$  - maksymalne nadciśnienie,
- $t_d$  - czas trwania fazy dodatniej, czyli czas od odnotowania maksymalnego ciśnienia do spadku ciśnienia do poziomu otoczenia,
- $t_n$  - czas trwania fazy ujemnej, czyli czas od zakończenia fazy dodatniej do czasu wyrównania ciśnienia do ciśnienia atmosferycznego,
- $\alpha$  - parametr, opisujący rozkład krzywej ciśnienia,
- $I$  - dodatni impuls ciśnienia, czyli całka z nadciśnienia odnotowanego w czasie fazy dodatniej zgodnie z równaniem (2).



Rys.2. Przebieg ciśnienia w funkcji czasu dla fali uderzeniowej [8,9]

ConWep jest funkcją opracowaną przez Kingery'ego i Grahama na podstawie badań empirycznych. Dzięki tej funkcji jest możliwe wyznaczenie - na podstawie zależności analitycznych - parametrów wybuchu kulistego lub półkulistego. Znajac masę ładunku wyrażoną w postaci równoważnika trotylowego oraz jej położenia, można wyznaczyć parametry krzywej opisującej skok ciśnienia [9,10]:

$$Z = \frac{d}{\sqrt[3]{W}} \quad (3)$$

gdzie:

- $Z$  - odległość zredukowana,
- $d$  - odległość od środka ładunku wybuchowego,
- $W$  - równoważnik trotylu.

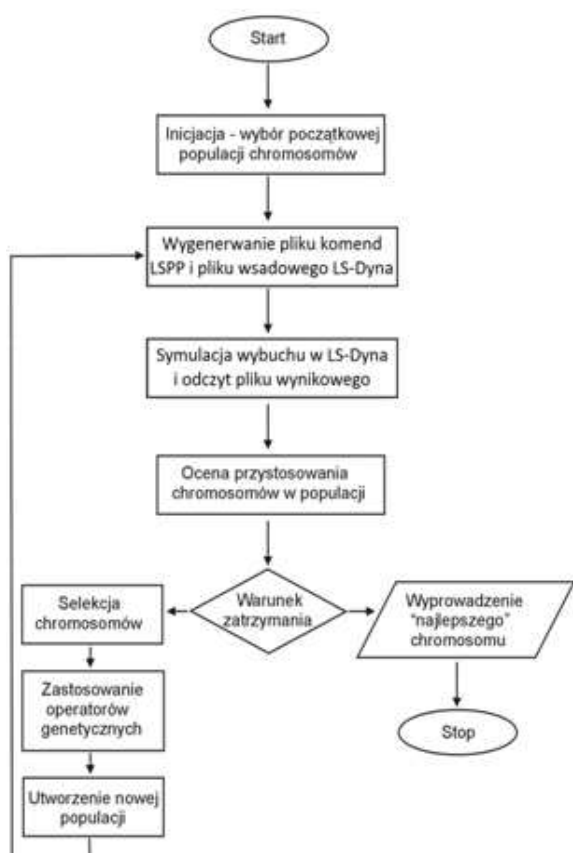
Funkcja \*LOAD BLAST zawarta w oprogramowaniu LS-Dyna bazuje na narzędziu ConWep. Funkcja ta wspomaga proces modelowania wybuchów powietrznych, czyli kolistych, oraz wybuchów naziemnych - półkolistych. Wartość impulsu ciśnienia jest wyznaczana za pomocą modeli empirycznych zawartych w ConWep, dzięki czemu można otrzymać maksymalne ciśnienie, czas dotarcia fali do przeszkody, czy efekt pojedynczego odbicia. Zależności związane ze wspomnianą funkcją umożliwiają otrzymanie poprawnych wyników wówczas,

gdy odległość między ładunkiem a analizowaną konstrukcją jest co najmniej 3 razy większa od wielkości charakterystycznej ładunku, np. średnicy czy wysokości, ponieważ powyżej tej odległości można założyć, że fala ma kształt sferyczny. Jedną z wad tej metody jest to, że wektor ciśnienia jest zawsze prostopadły do powierzchni konstrukcji, na którą oddziałuje fala ciśnienia, co może być przyczyną niedokładności w otrzymanych wynikach [8,9].

### 3. OPTIMALIZACJA RDZENIA PANELI ENERGOCHŁONNYCH

W literaturze możemy znaleźć kilka metod badań symulacyjnych wybuchu, jednakże dokładniejsze metody obliczeń wiążą się z większym zapotrzebowaniem na moc obliczeniową. Dlatego w niniejszym rozdziale przedstawiono propozycję metody optymalizacji rdzenia energochłonnych paneli ochronnych z zastosowaniem funkcji ConWep, która ma najmniejsze zapotrzebowanie na moc obliczeniową.

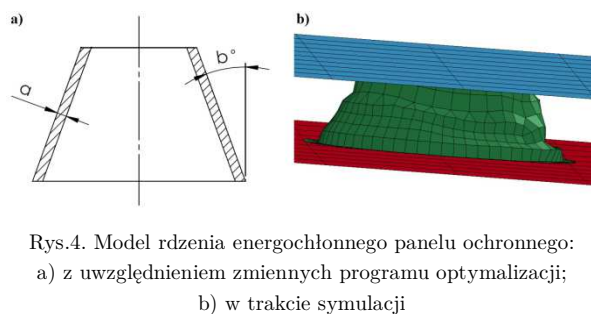
Metoda ta jest oparta na algorytmie genetycznym opracowanym w programie Matlab, w który wbudowano funkcje przygotowujące plik wsadowy do obliczeń w LS-Dyna oraz funkcje odczytujące wartości funkcji celu z pliku wynikowego.



Rys.3. Schemat blokowy działania zaproponowanej metody optymalizacji

Po inicjacji populacji chromosomów generowany jest plik wsadowy z komendami dla LS Pre-Post, dzięki któremu otrzymuje się sparаметryzowany plik wsadowy do oprogramowania LS-Dyna. Uproszczony model rdzenia panelu ochronnego jest przygotowany do analizy wybuchu za pomocą funkcji \*LOAD \_BLAST. Po przeprowadzeniu symulacji generowany jest plik wynikowy, na którego podstawie ocenia się przystosowanie chromosomów w populacji. Jeżeli wynik jest zadowalający lub zostaje spełniony warunek zatrzymania, algorytm zostaje zatrzymany. W przeciwnym razie populacja chromosomów ulega modyfikacji poprzez operatory genetyczne, a algorytm wraca do kroku drugiego. Blokowy schemat tej metody przedstawiono na rys. 3.

W celu sprawdzenia działania opracowanego algorytmu przeprowadzono optymalizację dla dwóch parametrów geometrycznych rdzenia w kształcie ściętego stożka. Parametrami, które przyjęto jako zmienne w programie optymalizacji, są kąt pochylenia stożka i grubość materiału. W optymalizacji przyjęto następujące ograniczenia geometryczne rdzenia z blachy stalowej. Grubość blachy może zawierać się w przedziale od 0,2 mm do 2 mm, natomiast kąt pochylenia stożka może się wahać od 0° do 40°. Słuszność założenia tych ograniczeń autor upatruje w tym, że rdzeń wykonany z blachy cieńszej niż 0,2mm będzie niewystarczający do pochłaniania większej ilości energii lub będzie niemożliwy do wykonania. Natomiast rdzeń wykonany z blachy stalowej o grubości większej niż 2 mm może być zbyt sztywny i nie poddawać się obciążeniu. Ograniczenie wartości kąta pochylenia do 40° uzasadnia się tym, że dla wyższych wartości tego kąta stożek nie byłby już stożkiem ściętym. Ponadto w opracowanej analizie przyjęto ładunek wybuchowy TNT o masie 1kg, który jest oddalony od chronionej płyty o 1m i leży w osi obrotu stożka. Funkcja celu została przyjęta jako maksymalna wartość energii wewnętrznej odkształcenia rdzenia energochłonnego panelu ochronnego. Na rys. 4a przedstawiono graficznie przyjęte zmienne w programie optymalizacji, a na rys. 4b przedstawiono siatkę modelu numerycznego rdzenia (deformowany stożek pomiędzy płytami), płyty chronionej (dolna) i płyty zewnętrznej (górna) w czasie symulacji wybuchu.



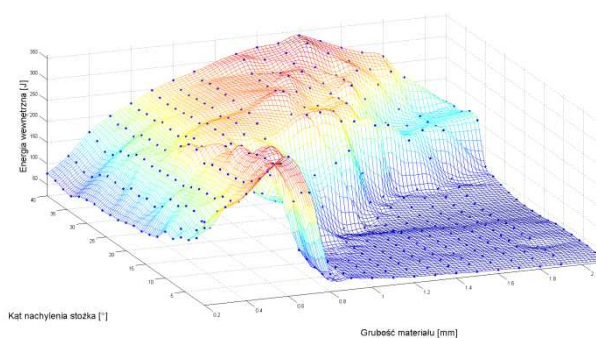
Rys.4. Model rdzenia energochłonnego panelu ochronnego:  
a) z uwzględnieniem zmiennych programu optymalizacji;  
b) w trakcie symulacji

#### 4. WYNIKI OPTIMALIZACJI

W wyniku przeprowadzonej optymalizacji geometrii rdzenia panelu energochłonnego (po 1000 iteracjach programu) otrzymano informację, że najwyższą wartość energii wewnętrznej odkształcenia 391 J otrzymano przy wartości 2° kąta nachylenia stożka i grubości materiału 0.62 mm. Niestety, na podstawie otrzymanych wyników optymalizacji z zastosowaniem algorytmu genetycznego nie uzyskano czytelnych przebiegów funkcji celu w zależności od przyjętych parametrów.

W celu zobrazowania przebiegu funkcji celu przeprowadzono dodatkową analizę, w której wyznaczono wartości funkcji celu dla siatki równomiernie rozłożonych 400 punktów na przestrzeni ograniczonych przedziałów zmiennych parametrów. Na podstawie przeprowadzonej analizy, której wyniki przedstawiono na rys. 5, można zaobserwować, że globalne ekstremum funkcji celu rozprzestrzeni się od kąta nachylenia 0° i grubości blachy 0.6 mm do kąta nachylenia 40° i grubości 1.4 mm. Wartość tego ekstremum mieści się w zakresie 250-350 J, natomiast najwyższą wartość otrzymano przy kącie nachylenia 0° i grubości blachy 0.6 mm. Poza wspomnianym ekstremum wartości funkcji celu są zbliżone do zera, dlatego też nie zaleca się stosowania blach stalowych o grubościach większych niż 0.8 mm przy małych kątach nachylenia stożka, dla materiału wybuchowego założonego w rozdziale 3. Ponadto zaobserwowano obniżoną wartość funkcji celu (ok. 200 J) w okolicach kąta nachylenia 15° i grubości blachy 0.8 mm.

Maksymalne wartości w obu analizach nie są znacząco różniące się, jednakże należy zauważyć, że w pierwszej analizie wyniki były otrzymywane z większą dokładnością.



Rys.5. Przebieg funkcji celu dla zmiennych programu optymalizacji

#### 5. WYNIKI OPTIMALIZACJI

Dobór optymalnych cech geometrycznych i materiałowych energochłonnnych paneli ochronnych może mieć kluczowe znaczenie w redukcji masy pojazdów specjalnych, w ochronie przez zniszczeniem konstrukcji na skutek eksplozji ładunków wybuchowych, a nawet ochronie życia ludzkiego.

Zaproponowana metoda wymaga modyfikacji i przeprowadzenia badań przy innych kształtach rdzeni paneli energochłonnnych i innego rodzaju materiałach rdzeni. W szczególności należy uwzględnić materiały kompozytowe, które są zalecane do tego typu konstrukcji, oraz normy poziomu odporności wg STANAG.

Wyniki przeprowadzonych analiz nieznacznie różnią się od siebie, co może być spowodowane różnicami w dokładnościach w poszczególnych analizach lub błędami numerycznymi wynikającymi z wielkości siatki elementów skończonych rdzenia. Jednakże obszary występowania ekstremum są zgodne w obu analizach.

W dalszych pracach należy również uwzględnić większą liczbę analizowanych rdzeni, gdyż może to mieć również wpływ na wyniki optymalizacji.

*Praca realizowana ze środków projektu badawczego nr 2011/01/N/ST8/04636*

#### Literatura

1. Barnat W.: Wybrane problemy energochłonności nowych typów paneli ochronnych obciążonych falą wybuchu. Warszawa: BEL Studio Sp. z o.o., 2010.
2. Borkowski W.: Wybrane problemy ochrony gąsienicowych wozów bojowych przed obciążeniem udarowym. W: III konf. nauk - tech. „Odporność udarowa konstrukcji”: zbiór referatów. Warszawa: WAT, 2002, s. 47 - 56.
3. Dacko A.: Modele obciążeń dynamicznych od fali uderzeniowej wybuchu. W: III konf. nauk. - tech. „Odporność udarowa konstrukcji”: zbiór referatów. Warszawa: WAT, 1999, s. 53 - 61.
4. Borkowski W., Rybak P.: Modele obciążeń dynamicznych od fali uderzeniowej wybuchu. W: III konf. nauk. - tech. „Odporność udarowa konstrukcji”: zbiór referatów. Warszawa: WAT, 1999, s. 53 - 61.
5. Rybak P.: Protecting panels for special purpose vehicles. “Journal of Kones Powertrain and Transport” 2010, Vol. 17, No. 1, p. 357 - 364.
6. Barnat W.: Dobór podstawowych parametrów warstwy dennej lekkiego pojazdu wojsk powietrzno desantowych. „Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe” 2010, (24) nr 1, s. 79 - 89.

7. Babul W.: Odkształcanie metali wybuchem. Warszawa: WNT, 1980.
8. Panowicz R., Miedzińska D., Niezgoda T., Barnat W.: Wstępne modelowanie oddziaływania fali ciśnienia na półsferyczny element kompozytowy o zmiennej grubości. „Mechanik” 2011, R. 84, nr 2, s. 142 - 142.
9. Larcher M.: Pressure-time functions for the description of air blast waves. JRC Technical Notes, Ispra 2008.
10. Baker, Wilfrid E.: Explosions in the Air, University of Texas Pr., Austin, 1973.
11. Borkowski W., Rybak P.: Ochrona pasywna pojazdów specjalnych. „Journal of KONES Powertrain and Transport” 2007, Vol.14, No. 4, s. 59 - 66.
12. Niezgoda T., Ochelski S., Barnat W.: Wpływ kąta uderzenia na pochłanianie energii poprzez wybrane struktury kompozytowe. W: IX konf. nauk. – tech. „Programy MES w komputerowym wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania” Warszawa: WAT, 2005, s 411 - 419.