

ANALYSIS OF INFLUENCE OF THE SHAPE OF PROTECTIVE STRUCTURES ON THEIR ENERGY-ABSORBING CAPABILITIES

Wiesław Barnat, Tadeusz Niezgoda

Military University of Technology
2 Kaliskiego Street, 00-908 Warsaw 49, Poland
tel.: +48 22 683 94 61
e-mail: barnat@vp.pl

Abstract

The paper presents results of numerical investigation of the influence of the shape of a protective element on its energy-absorbing capabilities from the point of view of its resistance to the impact of a shock wave. The works carried out so far confirm that – as far as the energy-absorbing capabilities are concerned – the shape of the protective element is an important factor. In the paper, results of numerical analysis of basic protective structures in the shape of pyramids, cones and hemispheres were presented. In the numerical models under consideration, dimensions of the base and height of the element were settled. The shape of the base determines the lateral surface of a cone. For the settled dimensions, a cone has the smallest area of the lateral surface and a sphere – the largest. For the models of basic structures, computations were performed with the use of the Dytran programme. As a result of the analysis, deformation of the structures, energy of deformation, velocities and accelerations were obtained. In the paper, a criterion for the assessment of energy absorption capabilities was proposed. It consisted in comparing the results for plates with a protection structure with those for a basic smooth plate in order to assess the level of energy absorbed by the protected plate with respect to the basic one (without protection). The comparison of results for the basic plate and the one with a spherical element shows that the application of the structure would cause the relative displacement of the plate protected a spherical element 50 percent lower than the relative displacement of the plate without protection.

Keywords: influence of shape on energy-absorbing capability, pressure impulse, energy-absorbing capabilities

ANALIZA WPŁYWU KSZTAŁTU STRUKTUR OCHRONNYCH NA ICH ENERGOCHŁONNOŚĆ

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki z przeprowadzonych badań numerycznych nad wpływem kształtu elementu ochronnego na energochłonność pod kątem odporności na działanie fali uderzeniowej. Dotychczasowe prace nad elementami energochłonnymi potwierdzają, iż dość ważnym z punktu widzenia energochłonności jest kształt elementu energochłonnego. W artykule przedstawiono wyniki z analizy numerycznej podstawowych struktur energochłonnych w postaci ostrosłupów stożków i półsfery.

W modelach numerycznych ustalono wielkość podstawy oraz wysokość elementu struktury. Kształt podstawy determinuje pole powierzchni elementu. Najmniejsze pole powierzchni bocznej ma stożek. Największe pole powierzchni charakteryzuje sferę. Dla modeli struktur podstawowych wykonano obliczenia programem Dytran. W wyniku analizy numerycznej otrzymano postacie deformacji struktur, energię odkształcenia prędkości oraz przyspieszenia. W pracy przyjęto kryterium oceny energochłonności, polegające na porównaniu wyników płyt ze strukturą ochronną z płytą bazową gładką, w celu oceny zmiany poziomu energii pochłoniętej przez płytę zabezpieczoną w stosunku do płyty bazowej (bez zabezpieczenia). Porównanie wyników dla blachy bazowej i blachy z elementem sferycznym pokazuje, że zastosowane struktury powodowały względne przemieszczenie węzła płyty chronionej elementem sferycznym mniejsze o 50% od względnego przemieszczenia płyty.

Słowa kluczowe: wpływ kształtu na energochłonność, impuls ciśnienia, energochłonność

1. Wstęp

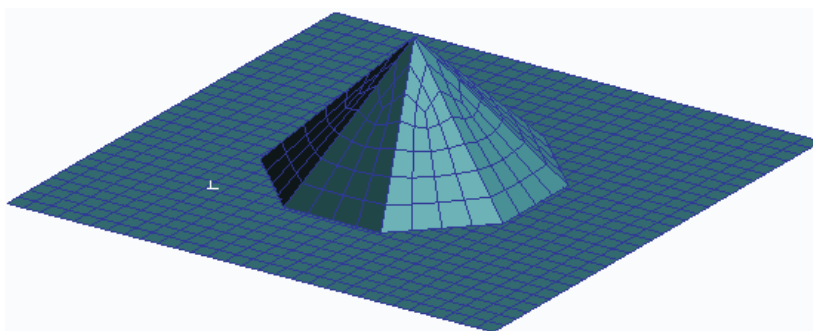
Działania stabilizacyjne prowadzone w zapalnych rejonach świata sprawiły, iż lekkie pojazdy opancerzone stały się podstawowym sprzętem wykorzystywanym poprzez siły zbrojne. Znaczący wpływ na to ma duża samodzielność działania jednostek oraz właściwości bojowe - wysoka ruchliwość, duża moc ogniowa w dowolnych warunkach klimatycznych i terenie. Lekkie pojazdy bojowe z powodu na małe grubości pancerza są narażone na działanie większości środków ogniowych, którymi dysponuje przeciwnik, w tym m.in. działania artylerii lufowej, systemów raketowych, min przeciwpancernych oraz broni masowego rażenia.

Współczesne wymagania taktyczno-techniczne determinują kształtowanie kadłubów pancernych wozów bojowych pod kątem zapewnienia im przetrwania na polu walki.

Ochrona załogi i wyposażenia wewnętrznego przed środkami ogniowymi przeciwnika, z określoną skutecznością jest głównie realizowana przez pancerz podstawowy. Wiadomo, iż niektóre jego obszary oraz węzły można przy obecnym poziomie technologii odpowiednio kształtować i konfigurować pod względem materiałowym oraz geometrycznym. Dotychczasowe prace nad dopancerzeniem pojazdów były skierowane na powiększenie grubości płyt lub zastosowanie obrony czynnej [1]. Istnieje jednak możliwość uzyskania lekkiej warstwy [2] o dużej sztywności i odporności na zniszczenie.

Zasadniczy problem pojawia się przy tworzeniu skutecznej ochrony załogi i wyposażenia zewnętrznego przed środkami minowymi [3]. Ogromny postęp technik obliczeniowych pozwala na modelowanie wielu zjawisk fizycznych, począwszy od spalania ładunku wybuchowego, kończąc na oddziaływaniu fali uderzeniowej na różne konstrukcje [4, 5]. Duże problemy z powodu złożoności fizyki zjawiska powoduje opis samego wybuchu i propagacji fali uderzeniowej. Temu zjawisku poświęcono wiele uwagi w literaturze [6 - 10].

W artykule przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań numerycznych nad wpływem kształtu elementu ochronnego na energochłonność pod kątem odporności na działanie fali uderzeniowej. Dotychczasowe prace nad elementami energochłonnymi potwierdzają, iż z punktu widzenia energochłonności dość ważny jest kształt elementu energochłonnego. W artykule przedstawiono wyniki z analizy numerycznej podstawowych struktur energochłonnych w postaci ostrosłupów stożków i sfery. Ogólny widok badanych elementów energochłonnych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Ogólna konfiguracja badanych modeli numerycznych
Fig. 1. Overall view of investigated numerical models

Dokonana analiza wyników będzie przydatna przy doborze rodzajów i parametrów warstw energochłonnych, będzie także użyteczna w badaniach, których celem będzie określenie optymalnych parametrów struktur energochłonnych przewidywanych do wykorzystania w budowie pojazdów opancerzonych.

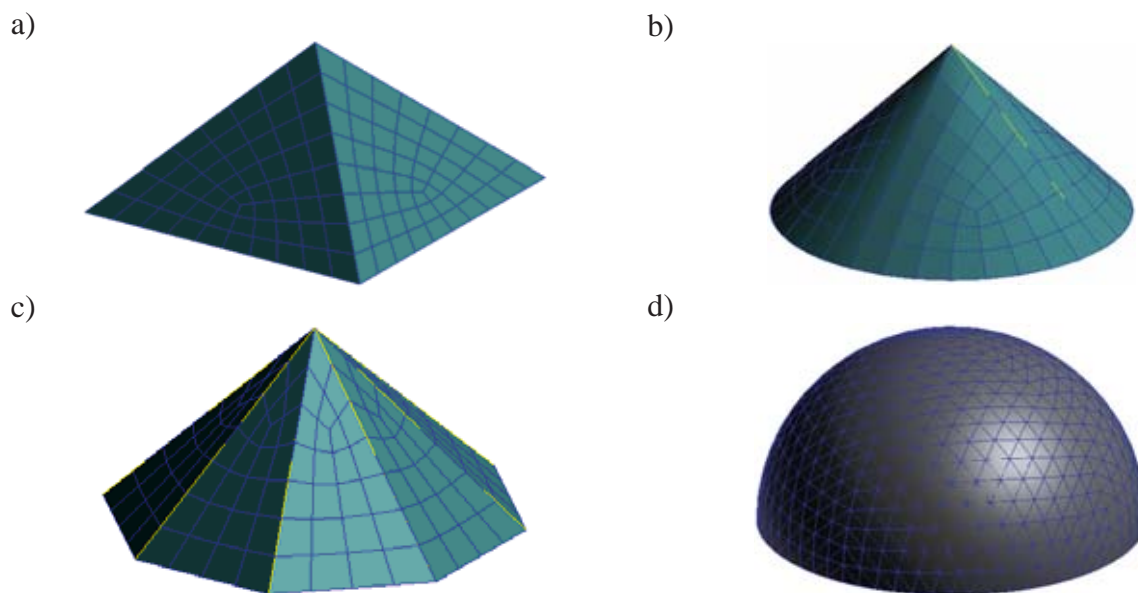
W pracy rozważono cztery kształty podstawowe: stożek, ostrosłup o podstawie kwadratowej, ostrosłup o podstawie ośmiokąta oraz półsferę (rys. 2). W modelach ustalono wielkość podstawy oraz wysokość elementu struktury. Kształt podstawy determinuje pole powierzchni elementu.

Najmniejsze pole powierzchni bocznej ma stożek. Największe pole powierzchni charakteryzuje sferę.

Dla modeli struktur podstawowych wykonano obliczenia programem Dytran. W wyniku analizy numerycznej otrzymano postacie deformacji struktur, energię odkształcenia prędkości oraz przyspieszenia. Wyniki dla zadanego ciśnienia przedstawiono w tabelach 1-3.

2. Opis modeli

W pracy opisano wyniki analizy numerycznej dla podstawowych struktur energochłonnych przedstawionych na rysunku 2.



Rys. 2. Przykład analizowanych struktur energochłonnych:
a) ostrosłup o podstawie kwadratowej,
b) stożek,
c) ostrosłup o podstawie ośmiokątnej,
d) półsfera

Fig. 2. Examples of analysed energy-absorbing structures:
a) square based pyramid,
b) cone,
c) octagonal pyramid,
d) hemisphere

Dokonano dynamicznych analiz numerycznych dla pięciu wariantów modeli:

- model 1 płyta;
- model 2 płyta z elementem energochłonnym w postaci ostrosłupa na podstawie kwadratowej;
- model 3 płyta z elementem energochłonnym w postaci stożka;
- model 4 płyta z elementem energochłonnym w postaci ostrosłupa na podstawie ośmiokątnej;
- model 5 płyta z elementem energochłonnym w postaci półsfery.

Wszystkie modele struktur zostały porównane z płytą bez elementów energochłonnych.

Badane elementy oraz płyta chroniona zostały zamodelowane jako elementy cienkościenne wykonane ze stali o następujących własnościach materiałowych:

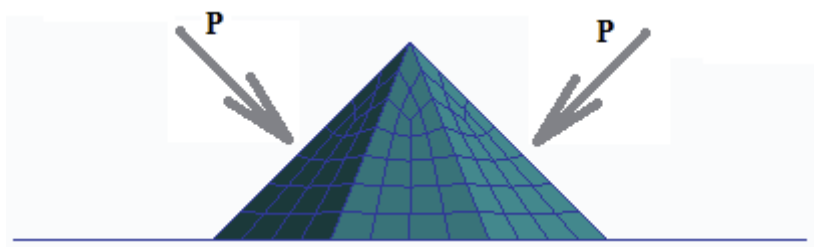
$\nu = 0.3$, $E = 2E11$ Pa, $E_h = 6E9$ Pa, $R_e = 4E8$ Pa, $\rho = 7800$ kg/m³. Do obliczeń numerycznych wykorzystano model zniszczenia max naprężeń 4E9 Pa.

Struktury podstawowe opisano elementami powłokowymi typu QUAD4 [7].

Poszczególnym elementom energochłonnym odebrano translacyjne stopnie swobody w kierunku X i Y (płaszczyzny płyty chronionej), natomiast płycie odebrano translacyjne stopnie swobody w kierunku X Y Z.

Płyta chroniona o wymiarach 0.2x0.2 m miała grubość 1.5 mm. Na podstawie poprzednich doświadczeń z elementami cienkościennymi [11] założono grubość elementów energochłonnych 0.25 mm. Elementy energochłonne miały wysokość 0.05 m. Charakterystyki geometryczne elementów energochłonnych przedstawiono w tabeli 1.

Elementy energochłonne zostały obciążone jednakowym impulsem ciśnienia. Sposób obciążenia przedstawiono na rysunku 3.

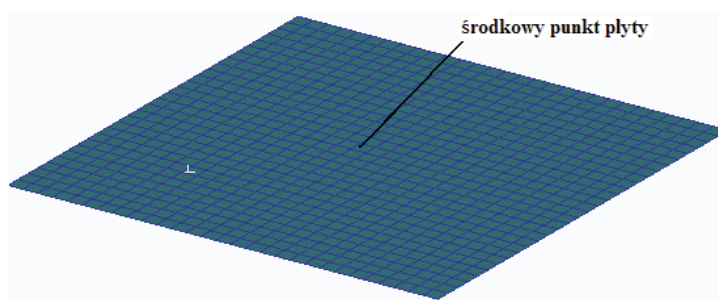


Rys. 3. Sposób obciążenia model
Fig. 3. Loading of the model

Tab. 1. Charakterystyki geometryczne elementów energochłonnych
Tab. 1. Geometrical characteristics of the energy-absorbing elements

	Kształt podstawy osłony	Pole obciążenia (pole osłony) [m ²]
1	sama płyta	0.01069
2	kwadrat	0.014
3	koło	0.0111
4	ośmiokąt	0.0112
5	półsfery	0.0157

W celu opisu uzyskanych wyników przyjęto do porównań węzeł środkowy płyty chronionej, którego położenie przedstawiono na rysunku 4.



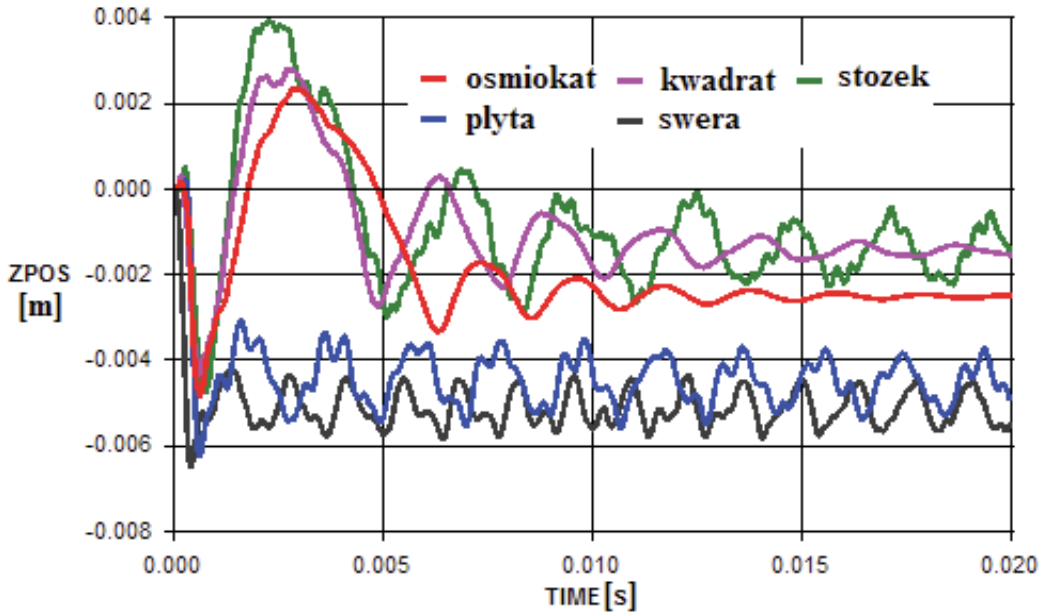
Rys. 4. Położenie środkowego punktu na płycie chronionej
Fig. 4. Location of the central point on the protected plate

Aby porównanie było bardziej przejrzyste, wprowadzono pojęcia względnego przemieszczenia, względnej siły itp. Które zdefiniowano jako dana wielkość została odniesiona do wielkości powierzchni obciążoną impulsem ciśnienia.

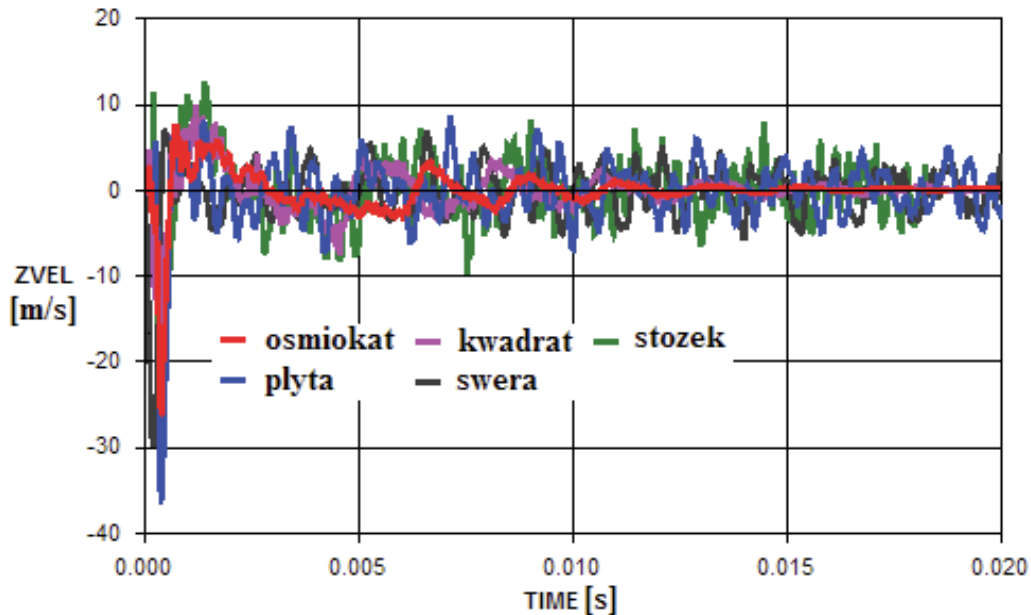
3. Wyniki analizy numeryczne dla modelu 1 – płyty

Model pierwszy był płytą stalową o grubości 1.5 mm obciążoną impulsem ciśnienia przyłożonym na powierzchni 0.01069 m². Taki obszar przyłożonego ciśnienia (odpowiadający polu podstawy ostrosłupa o podstawie kwadratowej) został przyjęty ze względu na porównanie

wyników z innymi modelami. W wyniku obciążenia impulsem ciśnienia węzeł przemieścił się maksymalnie 0.006451 m, dla czasu 0.0004271 s (rys 5). Po uwzględnieniu wielkości pola obciążającego płytę węzeł ten przemieścił się o 0.6035 m/m². Trwałe przemieszczenie węzła wyniosło 5.16E-03 m a względne trwałe przemieszczenie wyniosło 4.83E-01 m/m². Zestawienie ww. wielkości przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 5. Porównanie wykresów przemieszczenia węzła środkowego analizowanych modeli
 Fig. 5. Comparison of the central node displacement of the analysed models



Rys. 6. Porównanie wykresów prędkości węzła środkowego analizowanych modeli
 Fig. 6. Comparison of the central node velocity of the analysed models

Przebieg zmiany prędkości węzła dla płyty przedstawiono na rysunku 6. Maksymalna prędkość węzła płyty obciążonej wybuchem wyniosła 29.76 m/s dla czasu 0.00021 s. Względna maksymalna prędkość wyniosła 2783.91 [(m/s)/m²]. Maksymalne przyśpieszenie dla węzła płyty wyniosło 237800 m/s² dla czasu 0.00031 s. Względne maksymalne przyśpieszenie wyniosło 2.22E+07 [(m/s²)/m²].

Tab. 2. Zestawienie przemieszczeń
 Tab. 2. Comparison of displacements

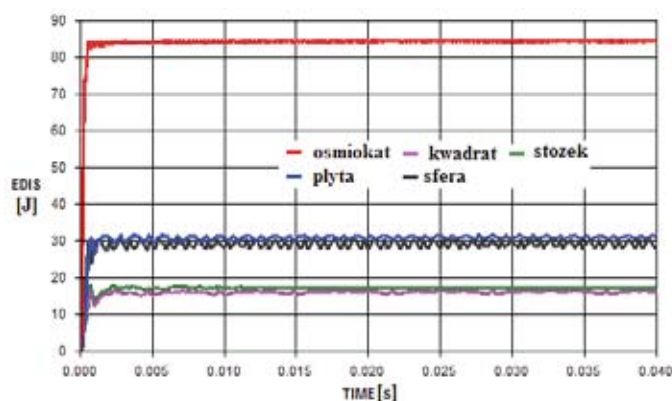
Model.	Kształt podstawy osłony	Maksymalne przemieszczenie węzła płyty [m]	Czas [s]	Względne maksymalne przemieszczenie węzła płyty [m/m ²]	Trwałe przemieszczenie węzła płyty [m]	Względne trwałe przemieszczenie węzła płyty [m/m ²]
1	płyta	0.006451	0.0004271	0.6035	5.16E-03	4.83E-01
2	ostrosłup - kwadrat	0.00619	0.000648	0.4421	4.64E-03	3.31E-01
3	koło	0.004248	0.00058	0.3827	1.43E-03	1.29E-01
4	ostrosłup - ośmiokąt	0.004827	0.000649	0.4310	2.61E-03	2.33E-01
5	półsfery	0.00479	0.000839	0.3051	1.41E-03	8.99E-02

Maksymalna energia odkształcenia, przedstawiona na rysunku 7 dla płyty bez osłony wyniosła 31 J. Po uwzględnieniu wielkości obszaru uderzenia impulsu ciśnienia względna energia wyniosła 2899.91 J/m². Zestawienie ww. wielkości przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Zestawienie prędkości przyspieszeń i energii
 Tab. 3. Comparison of velocities, accelerations and energy

Model	Prędkość maksymalna [m/s]	Czas [s]	Względna prędkość maksymalna [(m/s)/m ²]	Przyspieszenie maksymalne [m/s ²]	Czas [s]	Względne przyspieszenie maksymalne [(m/s ²)/m ²]
1	29.76	0.00021	2783.91	237800	0.00031	2.22E+07
2	36.52	0.00041	2608.57	1000000	0.0003	7.14E+07
3	23.485	0.000372	2115.77	585160	0.000278	5.27E+07
4	26.451	0.0004	2361.70	771260	0.0003	6.89E+07
5	24.36	0.00038	1551.59	670000	0.00023	4.27E+07

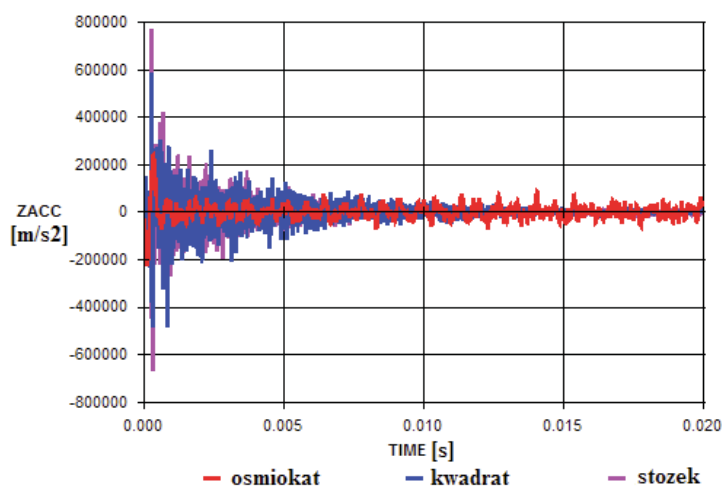
Model	Maksymalna energia odkształcenia elementu ochronnego [J]	Względna maksymalna energia odkształcenia elementu ochronnego [J/m ²]	Maksymalna energia odkształcenia płyty [J]	Względna maksymalna energia odkształcenia płyty [J/m ²]
1			31.00	2899.91
2	115	8214.29	16.00	1142.86
3	31	2792.79	17.00	1531.53
4	75	6696.43	85.00	7589.29
5	55	3503.18	28.00	1783.44



Rys. 7. Wykresy zmiany wartości energii płyt
Fig. 7. Energy change plots for the plate

3. Wyniki analizy numeryczne dla modelu 2 – podstawa kwadratowa

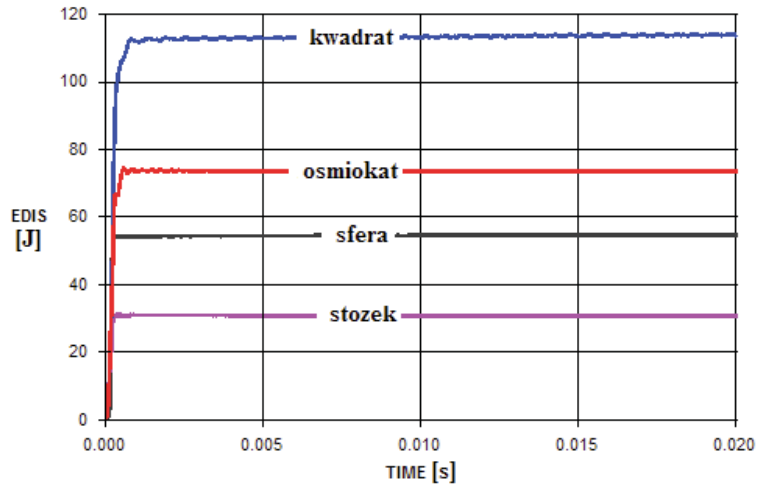
Model drugi był płytą stalową o grubości 1.5 mm z elementem energochłonnym w postaci ostrosłupa o podstawie kwadratu obciążoną impulsem ciśnienia przyłożonym na bocznej powierzchni ścian 0.014 m^2 . W wyniku obciążenia impulsem ciśnienia węzeł przemieścił się maksymalnie o 0.00619 m dla czasu 0.000648 s (rys 5). Po uwzględnieniu wielkości pola obciążającego model węzeł ten przemieścił się 0.4421 m/m^2 . Trwałe przemieszczenie węzła wyniosło $4.64 \text{E-}03 \text{ m}$ a względne trwałe przemieszczenie wyniosło $3.31 \text{E-}01 \text{ m/m}^2$. Zestawienie ww. wielkości przedstawiono w tabeli 2.



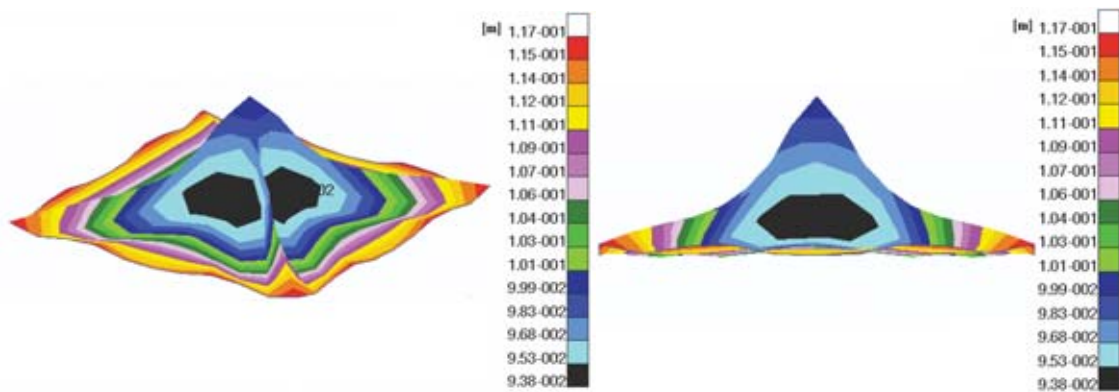
Rys. 8. Porównanie wykresów przyspieszenia węzła środkowego analizowanych modeli
Fig. 8. Comparison of the central node acceleration of the analysed models

Przebieg zmiany prędkości węzła dla płyty przedstawiono na rysunku 6. Maksymalna prędkość węzła płyty obciążonej wybuchem wyniosła 36.52 m/s, dla czasu 0.00041 s. Względna maksymalna prędkość wyniosła $2608.57 \text{ (m/s)/m}^2$. Maksymalne przyspieszenie, przedstawione na rysunku 8, dla węzła środkowego płyty wyniosło 1000000 m/s^2 dla czasu 0.0003 s. Względne maksymalne przyspieszenie wyniosło $7.14 \text{E+}07 \text{ (m/s}^2\text{)/m}^2$.

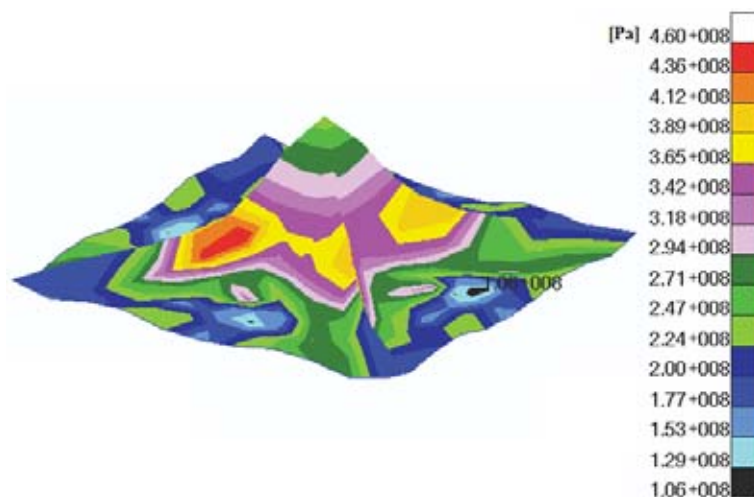
Maksymalna energia odkształcenia, przedstawiona na rys 7 dla płyty bez osłony wyniosła 16 J. Po uwzględnieniu wielkości obszaru uderzenia impulsu względna energia wyniosła 8214.29 J/m^2 . Maksymalna energia odkształcenia elementów energochłonnnych, przedstawiona na rysunku 9 wyniosła 115 J. Po uwzględnieniu wielkości obszaru uderzenia impulsu względna energia odkształcenia dla elementów energochłonnnych wyniosła 1142.86 J/m^2 . Zestawienie ww. wielkości przedstawiono w tabeli 3.



Rys. 9. Wykresy zmiany wartości energii elementów energochłonnych
 Fig. 9. Energy change plots for the energy-absorbing elements



Rys. 10. Deformacje struktury w kształcie ostrosłupa o podstawie kwadratowej
 Fig. 10. Deformations of the square-based pyramid structure



Rys. 11. Mapa wyężenia dla elementu energochłonnego w postaci ostrosłupa o podstawie kwadratowej
 Fig. 11. Reduced stress contour plot for the energy-absorbing element in the shape of a square-based pyramid

Deformacje struktury podstawowej pod wpływem obciążenia impulsowego pokazano na rysunkach 10 -11. Maksymalne wyężenie dla elementu energochłonnego w postaci ostrosłupa o podstawie kwadratowej wyniosło 460 MPa (rys. 11).

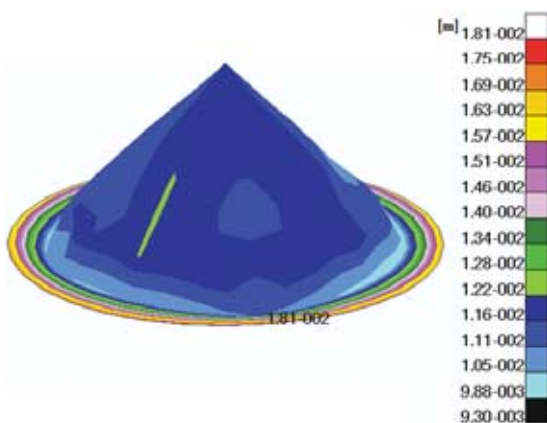
4. Wyniki analizy numeryczne dla modelu 3 – stożek

Model trzeci był płytą stalową o grubości 1.5 mm z elementem energochłonnym w postaci stożka obciążonego impulsem ciśnienia przyłożonym na powierzchni 0.0111 m². W wyniku obciążenia impulsem ciśnienia węzeł przemieścił się maksymalnie o 0.004248 m dla czasu 0.00058 s (rys. 5). Po uwzględnieniu wielkości pola obciążającego model węzeł ten przemieścił się o 0.3827 m/m². Trwałe przemieszczenie węzła wyniosło 1.43E-03 m a względne trwałe przemieszczenie wyniosło 1.29E-01 m/m². Zestawienie ww. wielkości przedstawiono w tabeli 2.

Przebieg zmiany prędkości węzła dla płyty przedstawiono na rys 6. Maksymalna prędkość węzła płyty obciążonej wybuchem wyniosła 23.485 m/s dla czasu 0.000372 s. Względna maksymalna prędkość wyniosła 2115.77 (m/s)/m². Maksymalne przyspieszenie, przedstawione na rysunku 8, dla węzła środkowego płyty wyniosło 585160 m/s² dla czasu 0.000278 s. Względne maksymalne przyspieszenie wyniosło 5.27E+07 (m/s²)/m².

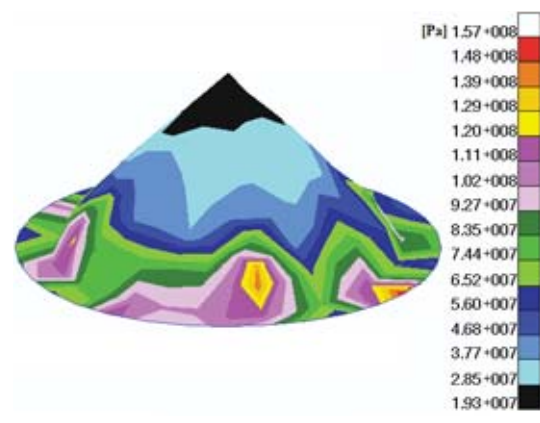
Maksymalna energia odkształcenia dla płyty wyniosła 31 J (rys. 7). Po uwzględnieniu wielkości obszaru uderzenia impulsu względna energia wyniosła 2792.79 J/m². Maksymalna energia odkształcenia elementów energochłonnych wyniosła 17 J(rys. 9). Po uwzględnieniu wielkości obszaru uderzenia impulsu względna energia odkształcenia dla elementów energochłonnych wyniosła 1531.53 J/m². Zestawienie ww. wielkości przedstawiono w tabeli 3

Deformacje struktury podstawowej pod wpływem obciążenia impulsowego są pokazane rys. 12. Maksymalne wyężenie dla elementu energochłonnego w postaci ostrosłupa o podstawie kwadratowej wyniosło 150 MPa (rys. 13).



Rys. 12. Deformacja struktury w kształcie stożka

Fig. 12. Deformation of the cone-shaped structure



Rys. 13. Mapa wyężenia dla elementu energochłonnego w postaci stożka

Fig. 13. Reduced stress contour plot for the energy-absorbing element in the shape of a cone

5 Wyniki analizy numeryczne dla modelu 4 – ośmiokąt

Model czwarty był płytą stalową o grubości 1.5 mm z elementem energochłonnym w postaci ostrosłupa o podstawie ośmiokątą obciążonego impulsem ciśnienia przyłożonym na powierzchni 0.0112 m². W wyniku obciążenia impulsem ciśnienia węzeł przemieścił się maksymalnie o 0.004827 m dla czasu 0.000649 s (rys. 5). Po uwzględnieniu wielkości pola obciążającego model węzeł ten przemieścił się o 0.4310 m/m². Trwałe przemieszczenie węzła wyniosło 2.61E-03 m a względne trwałe przemieszczenie wyniosło 2.33E-01 m/m². Zestawienie ww. wielkości przedstawiono w tabeli 2.

Maksymalna prędkość węzła płyty obciążonej wybuchem wyniosła 26.451 m/s dla czasu 0.0004 s (rys. 6). Względna maksymalna prędkość wyniosła 2361.70 (m/s)/m². Maksymalne

przyśpieszenie, przedstawione na rys 8, dla węzła środkowego płyty wyniosło 771260 m/s^2 dla czasu 0.0003 s . Względne maksymalne przyspieszenie wyniosło $6.89\text{E}+07 \text{ (m/s}^2\text{)/m}^2$.

Maksymalna energia odkształcenia dla płyty wyniosła 75 J (rys. 7). Po uwzględnieniu wielkości obszaru uderzenia impulsu względna energia wyniosła 6696.43 J/m^2 . Maksymalna energia odkształcenia elementów energochłonnych wyniosła 85 J (rys. 9). Po uwzględnieniu wielkości obszaru uderzenia impulsu względna energia odkształcenia dla elementów energochłonnych wyniosła 7589.29 J/m^2 . Zestawienie ww. wielkości przedstawiono w tabeli 3

Deformacje struktury podstawowej pod wpływem obciążenia impulsowego przedstawiono na rysunku 14.

Maksymalne wyężenie dla elementu energochłonnego w postaci ostrosłupa o podstawie kwadratowej wyniosło 600 MPa (rys. 15).



Rys. 14. Deformacja struktury w kształcie ostrosłupa o podstawie ośmiokątnej

Fig. 14. Deformation of the octagonal pyramid structure



Rys. 15. Mapa wyężenia dla elementu energochłonnego o podstawie ośmiokątnej

Fig. 15. Reduced stress contour plot for the energy-absorbing element in the shape of an octagonal pyramid

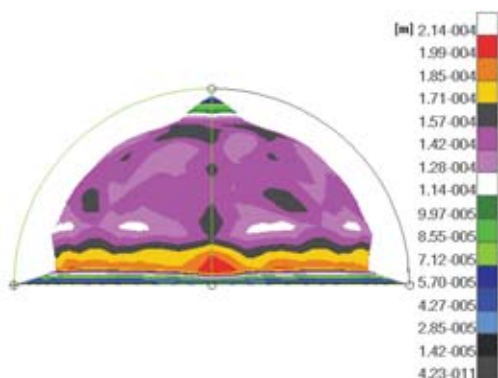
6 Wyniki analizy numeryczne dla modelu 5 – półsfera

Model piąty był płytą stalową o grubości 1.5 mm , z elementem energochłonnym w postaci sfery obciążonej impulsem ciśnienia przyłożonym na powierzchni 0.0157 m^2 . W wyniku obciążenia impulsem ciśnienia węzeł przemieścił się maksymalnie o 0.00479 m dla czasu 0.000839 s (rys. 5). Po uwzględnieniu wielkości pola obciążającego model węzeł ten przemieścił się 0.3051 m/m^2 . Trwałe przemieszczenie węzła wyniosło $1.41\text{E}-03 \text{ m}$ a względne trwałe przemieszczenie wyniosło $8.99\text{E}-02 \text{ m/m}^2$. Zestawienie ww. wielkości przedstawiono w tabeli 2.

Przebieg zmiany prędkości węzła dla płyty przedstawiono na rysunku 6. Maksymalna prędkość węzła płyty obciążonej wybuchem wyniosła 24.36 m/s dla czasu 0.00038 s . Względna maksymalna prędkość wyniosła $1551.59 \text{ (m/s)/m}^2$. Maksymalne przyśpieszenie, przedstawione na rys 8, dla węzła środkowego płyty wyniosło 670000 m/s^2 dla czasu 0.00023 s . Względne maksymalne przyspieszenie wyniosło $4.27\text{E}+07 \text{ (m/s}^2\text{)/m}^2$.

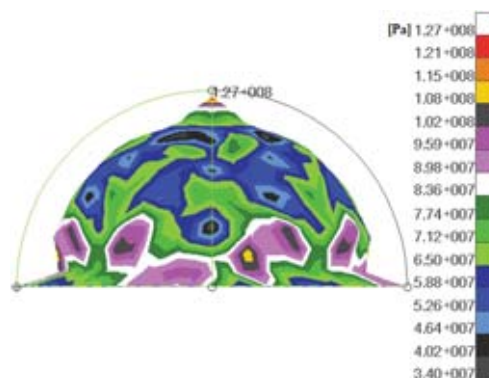
Maksymalna energia odkształcenia dla płyty wyniosła 55 J (rys. 7). Po uwzględnieniu wielkości obszaru uderzenia impulsu względna energia wyniosła 3503.18 J/m^2 . Maksymalna energia odkształcenia elementów energochłonnych wyniosła 28 J (rys. 9). Po uwzględnieniu wielkości obszaru uderzenia impulsu względna energia odkształcenia dla elementów energochłonnych wyniosła 1783.44 J/m^2 . Zestawienie ww. wielkości przedstawiono w tabeli 3

Deformacje struktury podstawowej pod wpływem obciążenia impulsowego pokazano na rysunku 16. Maksymalne wyężenie dla elementu energochłonnego w postaci ostrosłupa o podstawie kwadratowej wyniosło 127 MPa (rys. 17).



Rys. 16. Deformacje struktury w kształcie półsfery

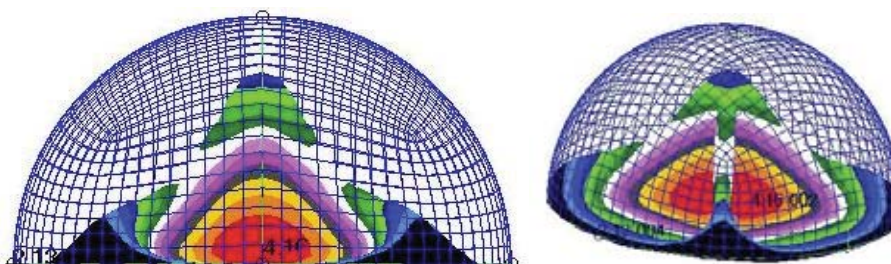
Fig. 16. Deformation of the hemisphere-shaped structure



Rys. 17. Mapa wyężenia dla elementu energochłonnego o kształcie półsfery

Fig. 17. Reduced stress contour plot for the energy-absorbing element in the shape of a hemisphere

Z poprzednich analiz uzyskiwano inny charakter deformacji przedstawionych na rysunku 18. Taki charakter deformacji można uzyskać przez zwiększenie wartości impulsu ciśnienia lub zmniejszenie grubości ścianki. Oznacza to, iż sfera jest najbardziej optymalnym kształtem dla konstrukcji ochronnych.



Rys. 18. Deformacje struktury w kształcie półsfery

Fig. 18. Deformation of the hemisphere-shaped structure

7. Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki analizy numerycznej wybranych podstawowych kształtów elementów ochronnych. Elementy ochronne rozpraszające energię wybuchu powinny mieć taką strukturę pochłaniającą energię uderzenia, aby skutki udaru były jak najmniejsze. Składowe elementy ww. konstrukcji są najczęściej budowane w postaci powłok przekładkowych, których rdzeniem jest układ odpowiednich kształtowników, cienkich powłok falistych, struktur w postaci plastra miodu lub materiałów porowatych. Na zdolność pochłaniania energii przez konstrukcje wpływa ich kształt. Wprowadzając pojęcie względnej energii, względnego przemieszczenia itp. uzyskano możliwość porównania poszczególnych elementów ochronnych. Dodatkowe polepszenie własności pochłaniania energii można uzyskać poprzez wypełnienie wolnych przestrzeni pianką. Stwierdzono także, iż kształt podstawy determinuje pole powierzchni obciążonej impulsem. Największe pole powierzchni charakteryzuje ostrosłup o podstawie kwadratowej. Maksymalne przemieszczenie węzła płyty jest zbliżone dla wszystkich analizowanych modeli. Największa wartość względna przemieszczenia węzła płyty występuje dla modelu 1 (sama płyta). W przypadku półsfery koniecznym jest doprowadzenie do uplastycznienia materiału płyty przez zmniejszenie granicy plastyczności lub zwiększenie impulsu siły.

Spośród badanych struktur najlepsze wyniki uzyskano dla obiektu 5 - półsfery. Zaletą badanego kształtu podstawowego jest to, iż normalna fali ciśnienia jest przykładana punktowo do powierzchni.

W pracy przyjęto kryterium oceny energochłonności, polegające na porównaniu wyników płyt ze strukturą ochronną z płytą bazową gładką, w celu oceny zmiany poziomu energii pochłoniętej przez płytę zabezpieczoną w stosunku do płyty bazowej (bez zabezpieczenia). Porównanie wyników dla blachy bazowej i blachy z elementem sferycznym pokazuje, że zastosowane struktury powodowały względne przemieszczenie wężła płyty chronionej elementem sferycznym mniejsze o 50% od względnego przemieszczenia płyty.

Warto zaznaczyć, iż element sferyczny nie odkształcił się, a uzyskane odkształcenia zostały uzyskane w zakresie sprężystym. Dlatego celowym jest pocienienie ścianek sfery. Pozwoliłoby to na zmniejszenie sztywności układu.

Wykonane modele i analizy dla obciążeń impulsowych stanowią podstawę do dalszych badań nad strukturami energochłonnymi.

Literatura

- [1] Barnat, W., Użycki, D., *Abrams*, Wydawnictwo Magnum X 2003.
- [2] Żmihorski, E., *Konstrukcje przekładkowe*, Wydawnictwo MON 1964.
- [3] Barnat, W., *Transporter Opancerzony Adi Bushmaster*, Myśl Wojskowa 5/2005.
- [4] Korzun, M., *Kariera Wybuchu*, Wydawnictwo MON 1980.
- [5] Kopaniejec, A., *Fale uderzeniowe*, Wydawnictwo MON 1965.
- [6] Włodarczyk, E.: *Wstęp do mechaniki wybuchu*, PWN, Warszawa, 1994.
- [7] *Dytran Theory Manual*, 2004.
- [8] Krzewiński, R., Rekucki, R., *Roboty budowlane przy użyciu materiałów wybuchowych*, Polcen, 2005.
- [9] Babul, W., *Odkształcanie metali wybuchem*, WNT Warszawa 1980.
- [10] Pokrowkij, G. I., *Wybuch*, Moskwa, 1980.
- [11] Niezgoda, T., Barnat, W., *Numeryczna analiza pochłaniania energii wybuchu przez warstwę ochronną*, IX Konferencja Naukowo -Techniczna „Programy MES w Komputerowym Wspomaganiu Analizy, Projektowania i Wytwarzania”; Giżycko, 19÷22 Października 2005.