

Artur ILUK*

WYBRANE ASPEKTY KSZTAŁTOWANIA ODPORNOŚCI PRZECIWMINOWEJ TERENOWEGO POJAZDU OPANCERZONEGO

W artykule przedstawiono wybrane aspekty kształtowania odporności przeciwminowej pojazdów opancerzonych ze szczególnym uwzględnieniem wpływu niektórych cech na właściwości terenowe pojazdów. Przedstawione zostały mechanizmy działania poszczególnych cech konstrukcyjnych zwiększających bezpieczeństwo pojazdu i załogi. Zaprezentowane zostały przykładowe modele symulacyjne oraz wyniki symulacji ilustrujące działanie omawianych mechanizmów. Omówiono zalety i wady stosowanych układów konstrukcyjnych współczesnych samochodów minoodpornych. Przedstawione w artykule wnioski zostały praktycznie wykorzystane przy konstrukcji prototypu pojazdu minoodpornego M-ATV G10.

Słowa kluczowe: *mechanika, metoda elementów skończonych, symulacja eksplozji, odporność przeciwminowa, pojazdy opancerzone minoodporne, M-ATV G10*

WSTĘP

Narastające w ostatnich latach zagrożenie pojazdów wojskowych atakami z użyciem min i IED spowodowało przykładanie większej wagi do odporności pojazdów na ten rodzaj zagrożenia. Odporność przeciwminowa była wcześniej domeną pojazdów przeznaczonych do rozminowywania, z wyjątkiem dalekiej Rodezji, a później RPA, gdzie tego typu ataki stanowiły bardzo istotne zagrożenie już w latach sześćdziesiątych. Tam też rozwijane były pierwsze pojazdy, w których wykorzystywano różne koncepcje zwiększania odporności pojazdu na wybuchy min-pułapek oraz przeżywalność załogi. Przykład takiego pojazdu pokazano na rysunku 1.

Konstrukcja tych pojazdów opracowywana była wówczas metodą prób i błędów, nie było nowoczesnych narzędzi numerycznych pozwalających ocenić skutki działania ładunków na konstrukcję bez prób praktycznych. Znane były jednak już prawa rządzące wielkością impulsu ciśnienia powodowanego przez detonację ładunku wybuchowego.

* dr inż. Artur ILUK - Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej



Rys. 1. Pojazd minoodporny Buffel, jeden z pierwszych pojazdów typu MRAP

Źródło: Opracowanie własne

Pojazdy ówczesne do zwiększenia odporności przeciwminowej wykorzystywały następujące cechy konstrukcyjne [1, 6]:

- maksymalne oddalenie dna pojazdu od powierzchni ziemi – potencjalnego miejsca detonacji ładunku-pułapki;
- ukształtowanie dna pojazdu w kształcie litery „V”;
- dna pojazdu z blach stalowych o dużej grubości,
- możliwie dużą masę pojazdu.

Cechy te stanowią również podstawę konstrukcji współczesnych pojazdów minoodpornych, w których pojawiają się dodatkowe elementy:

- tzw. deflektory umieszczane pod dnem pojazdu, które mają zadanie podobne do wcześniej stosowanego dna pojazdu w kształcie litery „V”;
- stosowanie podwójnych ścian, zwłaszcza w obrębie dna pojazdu, pomiędzy którymi umieszczane są niekiedy dodatkowe elementy pochłaniające energię;
- „pływające” podłogi odseparowane od dna pojazdu, które chronią stopy przed bezpośrednim uderzeniem;
- elastyczne wykładziny na podłodze, amortyzujące uderzenie w stopy;
- fotele mocowane możliwie daleko od punktu uderzenia fali – do ścian lub do dachu;
- fotele zawierające elementy pochłaniające energię uderzenia fali i przez to zmniejszające obciążenia działające na kręgosłup.

Poniżej przedstawiono mechanizmy działania wybranych cech konstrukcyjnych pozwalających na kształtowanie odporności pojazdów opancerzonych na wybuchy min i improwizowanych ładunków wybuchowych. Działanie poszczególnych mechanizmów zostało zbadane na drodze eksperymentów numerycznych [5] oraz wykorzystane w praktyce w procesie konstruowania pojazdu minoodpornego. Omówiono mechanizm działania wybranych cech konstrukcyjnych.

1. WPŁYW WYBRANYCH CECH NA ODPORNOŚĆ PRZECIWMINOWĄ

Każda z wymienionych cech konstrukcyjnych zwiększa odporność pojazdu lub bezpieczeństwo załogi w wypadku wybuchu miny lub IED pod pojazdem, jednak ich zastosowanie nie zawsze jest możliwe ze względu na ograniczenia konstrukcyjne i inne wymagania. Cechy te mogą stać w sprzeczności z takimi parametrami jak dopuszczalna masa całkowita, wymagania dotyczące stabilności pojazdu (wysokość środka ciężkości), czy wymagania dotyczące możliwości transportu pojazdu drogą lotniczą (ograniczenie wymiarów i masy). Nie bez znaczenia są też ograniczenia natury ekonomicznej, zastosowanie niektórych cech konstrukcyjnych zwiększających bezpieczeństwo powoduje znaczne podniesienie kosztu pojazdu.

Kluczowymi parametrami, które decydują o odporności kadłuba na działanie fali uderzeniowej i o ilości energii przejmowanej przez kadłub pojazdu od fali jest odległość dna pojazdu lub osłony przeciwminowej od podłoża oraz kształt i masa osłony.

1.1. Wpływ prześwitu

Wartość impulsu ciśnienia działającego na pojazd spada szybko ze wzrostem odległości pomiędzy ładunkiem a dnem pojazdu. Jedną z zależności opisujących działanie fali uderzeniowej wyraża wzór [2]

$$\frac{r_1}{W_1^{\frac{1}{3}}} = \frac{r_2}{W_2^{\frac{1}{3}}} \quad (1)$$

gdzie:

r_1, r_2 – odległości ładunek - punkt pomiaru ciśnienia

W_1, W_2 – masy ładunków

Wynika z niego, że dwukrotne zwiększenie prześwitu daje takie same skutki, jak ośmiokrotne zmniejszenie masy ładunku. W rzeczywistości efekt ten może być wyraźniejszy, ponieważ oddalenie dna pojazdu od podłoża zmniejsza ryzyko wtórnego uderzenia fali w wyniku jej odbicia od dna, a następnie od podłoża.

Zwiększanie prześwitu jest niezwykle skutecznym sposobem zmniejszania ilości energii przejmowanej przez pojazd od fali uderzeniowej, jednak powoduje nieuchronne zwiększenie wysokości środka ciężkości pojazdu. To z kolei zmniejsza stateczność pojazdu określaną maksymalnym kątem pochylenia bocznego terenu, po którym pojazd może się poruszać.

Jedynym sposobem przeciwdziałania utracie stateczności jest zwiększenie poprzecznego rozstawu kół. Często jest to jednak niemożliwe ze względu na założone wymiary pojazdu wynikające np. z możliwości transportu lotniczego (np. skrajnia samolotu Herkules) czy przepisów o ruchu drogowym.

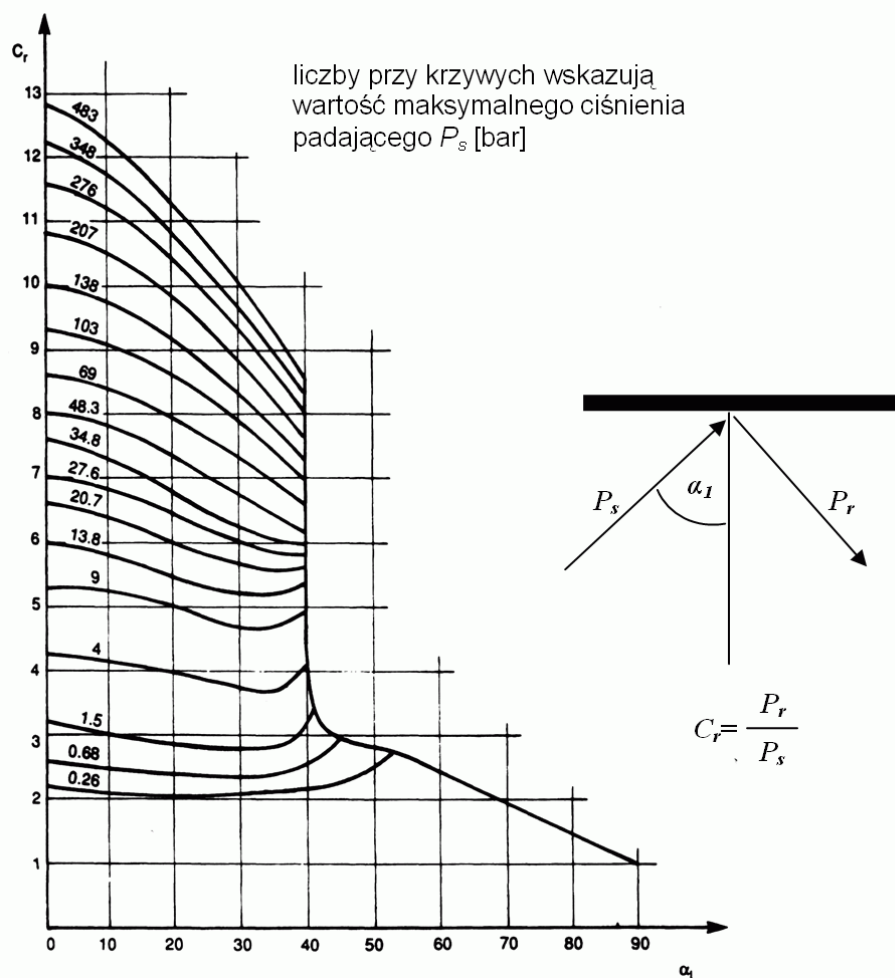
Zwiększanie prześwitu jako środek zwiększający odporność przeciwminową stoi w bezpośredniej sprzeczności ze zdolnością pojazdu do poruszania się poza drogami. Z drugiej strony w pojazdach pozbawionych ramy (o czym mowa poniżej) zwiększanie prześwitu może pozwolić na pokonywanie przeszkód o większej wysokości, a więc pozytywnie wpływa na właściwości terenowe pojazdu.

1.2. Wpływ kąta osłony

Oslony przeciwminowe w kształcie litery „V” są najbardziej rozpoznawalnym atrybutem pojazdów przeciwminowych. Skuteczność ich działania opiera się na trzech mechanizmach:

Zmniejszenie ilości energii przejmowanej przez osłonę od fali uderzeniowej

Fala uderzeniowa padając na przeszkodę, ulega odbiciu, przy czym wartość ciśnienia fali odbitej P_r może wielokrotnie przekraczać wartość ciśnienia na czole fali padającej na przeszkodę P_s . Współczynnik wzmocnienia ciśnienia na czole fali C_r w funkcji kąta α_1 pod jakim fala pada na osłonę pokazano na rysunku 2.

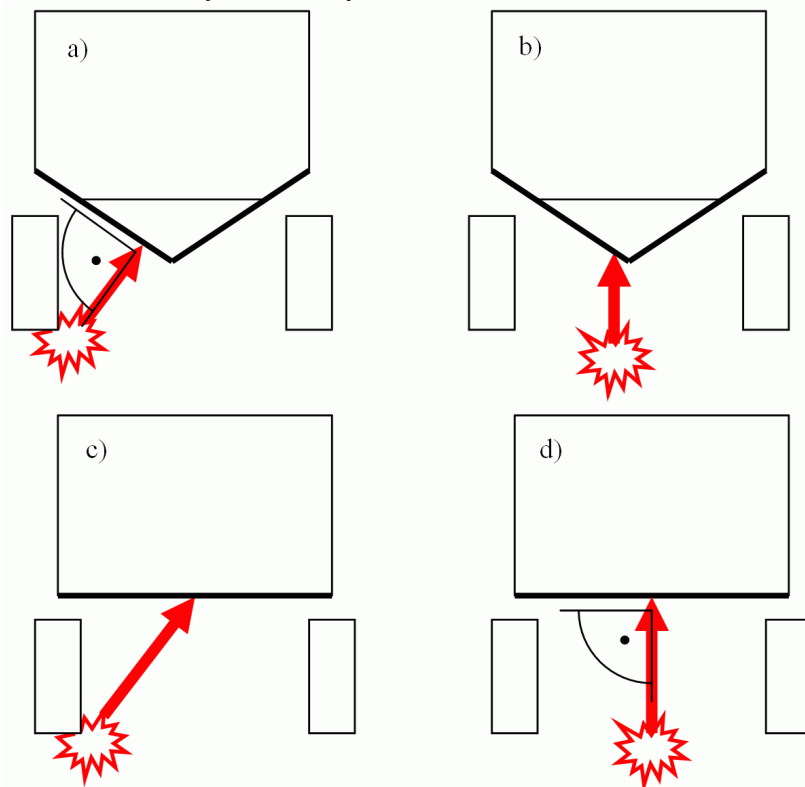


Rys. 2. Zależność współczynnika wzmocnienia C_r ciśnienia padającego podczas odbicia fali od kąta padania α_1 [2]

Ciśnienie odbite P_r osiąga wartość maksymalną przy prostopadłym uderzeniu fali w osłonę. Jak wynika z wykresu, przy kącie padania α_1 większym niż 40 stopni wartość ciśnienia odbitego P_r (a więc i wartość impulsu ciśnienia przekazywanego na konstrukcję) gwałtownie spada [3].

Zjawisko to leży u podstaw skuteczności osłon w kształcie litery „V”, jest też powodem stosowania np. w pojazdach RG 31 osłon nachylonych do podłoża pod kątem

43 stopni. Niestety, miejsce detonacji ładunku niekoniecznie położone jest dokładnie pod środkiem pojazdu. Detonacja ładunku nieco z boku może przy takiej konfiguracji spowodować, że fala uderzy w pochyloną ścianę osłony prostopadle, generując większy impuls ciśnienia, niż przy płaskiej poziomej osłonie. Skuteczność pochylania ścian osłony zależy w dużym stopniu od miejsca detonacji ładunku. Mechanizm tego zjawiska pokazano schematycznie na rysunku 3.



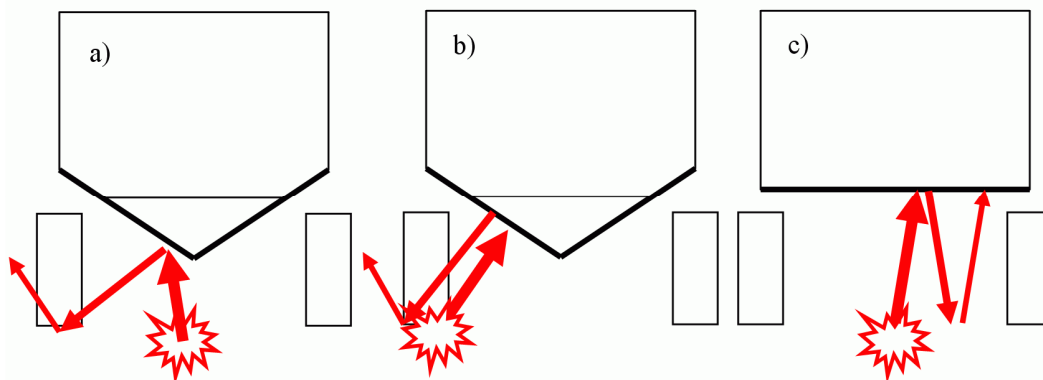
Rys. 3. Schemat kątów padania dla różnych kształtów dna i różnych miejsc detonacji ładunku

Źródło: Opracowanie własne

Uniknięcie wielokrotnego odbicia fali uderzeniowej

W pojazdach z płaskim dnem podczas detonacji ładunku pod pojazdem po odbiciu fali uderzeniowej od dna pojazdu następuje wielokrotne odbicie słabnącej fali pomiędzy podłożem a dnem pojazdu. Każde kolejne odbicie fali od osłony powoduje przekazanie dodatkowej porcji energii i zwiększa sumaryczny impuls ciśnienia działający na pojazd [4].

Pochylenie ścian osłony dolnej powoduje, że fala po odbiciu od osłony zostaje skierowana nieco w bok i po kolejnym odbiciu od podłoża nie trafia ponownie w pojazd. Mechanizm ten można uznać za dominujący w zwiększaniu odporności pojazdu poprzez zastosowania osłon o pochylonych ścianach, ponieważ ustawienie ścian osłony nierównoległe do podłoża znacznie zmniejsza prawdopodobieństwo wtórnego uderzenia fali w osłonę niezależnie od miejsca detonacji ładunku (rys. 4).



Rys. 4. Mechanizm odbicia fali uderzeniowej poza obrys pojazdu:
 a) detonacja pod środkiem pojazdu, b) detonacja z boku pojazdu, c) wielokrotne odbicie w przypadku płaskiego dna

Źródło: Opracowanie własne

Zwiększenie sztywności kadłuba

Ostatni z wymienionych efektów zastosowania osłon o pochylonych ścianach występuje w przypadku, kiedy osłona o pochylonych ścianach jest zintegrowana z kadłubem. Kształt litery „V” nadaje dolnej części pojazdu znacznie większą lokalną sztywność w stosunku do podłogi płaskiej. Pozwala to na zmniejszenie przemieszczeń pionowych dna pojazdu podczas uderzenia fali, co ma pierwszorzędne znaczenie zwłaszcza dla ochrony dolnych kończyn załogi pojazdu przez urazami [5].

Stosunkowo mała sztywność płaskiego dna pojazdu jest drugą, obok występowania zjawiska wielokrotnego odbicia, przyczyną występowania w takich pojazdach dużego przemieszczenia pionowego podłogi pojazdu powodującego uszkodzeni kończyn dolnych załogi, a w przypadku mocowania foteli do podłogi – również kręgosłupa.

1.3. Wpływ masy i materiału osłony

W przypadku stosowania pod pojazdem oddzielnych osłon przeciwminowych (tzw. deflektorów) duży wpływ na sposób działania osłony ma jej masa. Jest to związane z faktem, że oddziaływanie fali polega na przekazaniu na osłonę impulsu ciśnienia, który dla określonej powierzchni osłony staje się impulsem siły.

Impuls siły zgodnie ze wzorem

$$F\Delta t = m\Delta v \quad (2)$$

nadaje osłonie o masie m prędkość v , przekazując jej energię kinetyczną E_k .

$$\Delta E_k = \frac{m(\Delta v)^2}{2} = \frac{F^2(\Delta t)^2}{2m} \quad (3)$$

Przyrost energii kinetycznej przekazanej osłonie przez falę uderzeniową (ilość przejętej energii) jest odwrotnie proporcjonalna do masy osłony. Stosowanie lekkich osłon powoduje, że pojazd przejmie od fali więcej energii niż przy osłonach cięższych.

Równie istotna jak masa osłony jest jej zdolność do pochłaniania energii. Zastosowanie osłony wykonanej z materiału, który podczas wybuchu będzie podlegał

odkształceniom plastycznym, powoduje, że duża część energii przejętej od fali zostanie przekształcona w energię wewnętrzną trwałych odkształceń osłony. Zdolność do trwałych odkształceń mają osłony o stosunkowo małej masie, z czego można wysnuć wniosek o istnieniu dwóch, przeciwstawnych mechanizmów pracy osłon:

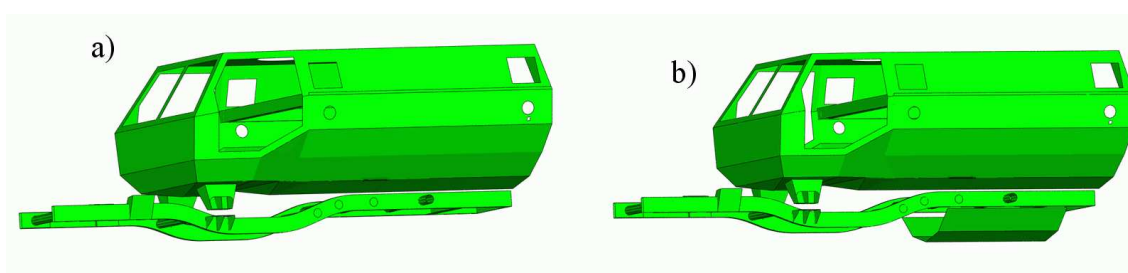
- osłony o dużej masie i sztywności (np. wykonane z blachy ze stali pancерnej o znacznej grubości) przyjmują mniej energii od fali, lecz brak odkształceń plastycznych powoduje, że energia ta w całości przekazywana jest na strukturę pojazdu - przypadek ten dotyczy również osłon będących jednocześnie dnem pojazdu (np. RG 31);
- osłony o małej masie i sztywności (np. wykonane ze stopów aluminium) przejmują od fali większą energię (mała masa), lecz są w stanie pochłoniąć jej część na drodze odkształcenia plastycznego, dzięki czemu przekazywana jest tylko na strukturę pojazdu energia kinetyczna mniejsza od energii przejętej od fali.

Całkowita energia przekazana na strukturę pojazdu zależy od bilansu energii przejętej od fali przez osłonę oraz energii pochłoniętej w wyniku odkształceń plastycznych osłony.

Na rysunkach poniżej przedstawiono przykładowe symulacje pracy osłon przeciwybuchowych chroniące kołowy pojazd opancerzony. Do porównania działania fali na pojazd przyjęto trzy konfiguracje osłony:

- osłona górna – zastosowanie jako osłony tylko dna kabiny załogowej wykonanej ze stali pancерnej;
- osłona górna plus osłona dolna umieszczona pod ramą pojazdu wykonana ze stopu aluminium o grubości 15mm;
- osłona górna plus osłona dolna umieszczona pod ramą pojazdu wykonana ze stopu aluminium o grubości 30mm.

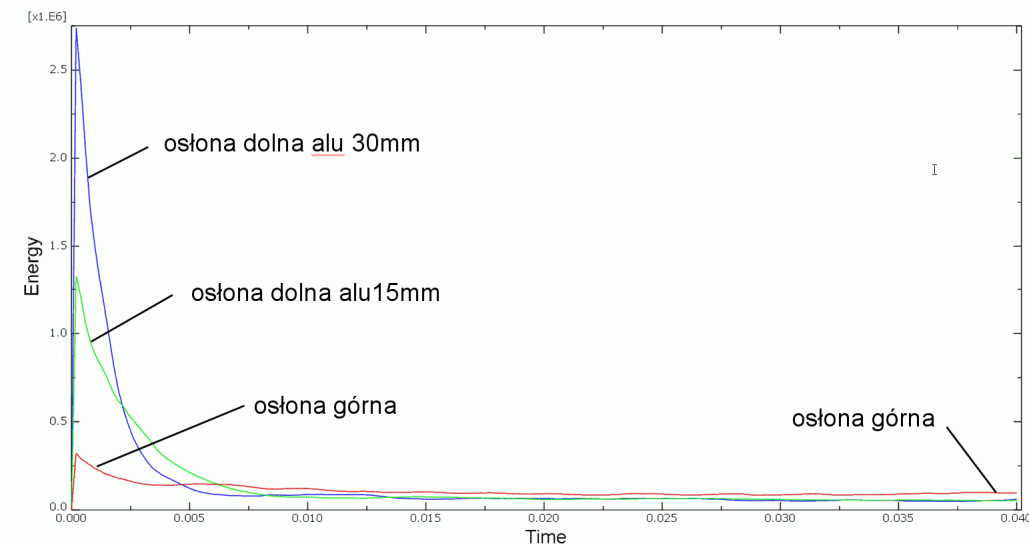
Model obliczeniowy wykonany z użyciem elementów powłokowych zawierał bryłę nadwozia oraz model ramy. Pozostałe elementy pojazdu zastąpione zostały odpowiednio zamocowanymi elementami masowymi. Model dyskretny pokazano na rysunku 5. Dolne powierzchnie modelu obciążone zostały zmiennym w czasie i przestrzeni polem ciśnienia opartym na pomiarach doświadczalnych. Obliczenia przeprowadzone zostały przy użyciu programu ABAQUS/Explicit.



Rys. 5. Model pojazdu do celów symulacji komputerowej skutków eksplozji pod pojazdem:
a) osłona górna, b) osłona górna + dodatkowa osłona dolna

Źródło: Opracowanie własne

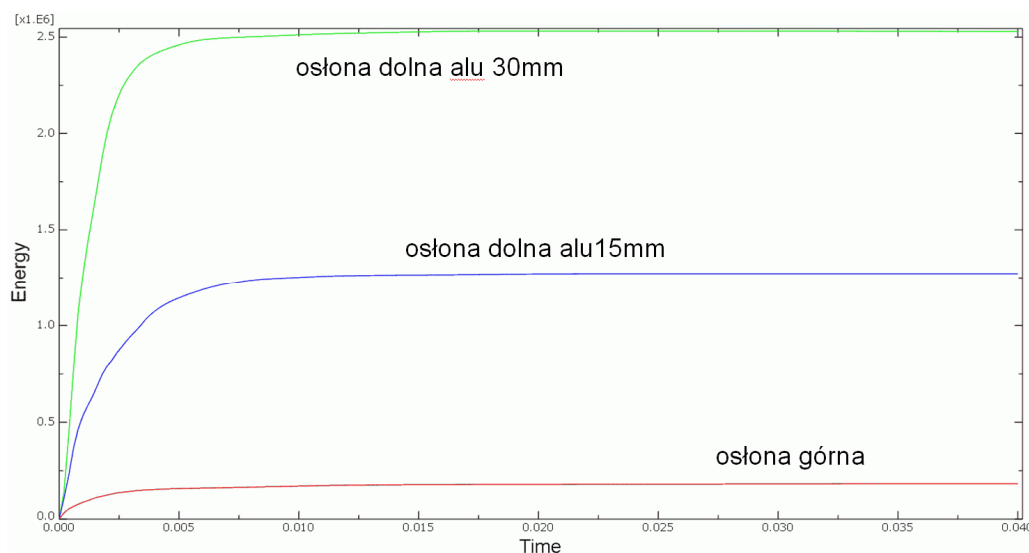
Na rysunku 6 pokazano porównanie zmian energii kinetycznej całego pojazdu w czasie dla trzech analizowanych modeli osłony. Porównanie przebiegu wartości energii kinetycznej podczas wybuchu pozwala zauważyć bardzo dużą różnicę w ilości energii przejmowanej od fali uderzeniowej w początkowej fazie przez poszczególne warianty osłony.



Rys. 6. Porównanie energii kinetycznej [J] dla różnych wariantów osłony

Źródło: Opracowanie własne

Najwięcej energii od fali uderzeniowej przejęła osłona dolna wykonana ze stopu aluminium o grubości 15mm, co wynika z jej niewielkiej masy oraz małej odległości od miejsca detonacji. Energia przejęta przez sztywniejszą osłonę górną jest wielokrotnie mniejsza. Pomimo tego końcowa energia kinetyczna modeli z osłonami dolnymi jest nieco mniejsza, co jest spowodowane pochłanianiem energii w wyniku plastycznego odkształcania osłony.



Rys. 7. Porównanie pracy odkształcenia plastycznego [J] dla różnych wariantów osłony

Źródło: Opracowanie własne

Lekka, odkształcalna osłona przyjmując dużą energię, jest jednocześnie zdolna do rozproszenia znacznej jej części na drodze odkształcania plastycznego, co widoczne jest na rysunku 7.

Analiza wykresów prowadzi do wniosku, że konieczne jest zachowanie dużej ostrożności w stosowaniu różnego rodzaju osłon czy okładzin, które mają w założeniu pochłaniać energię fali uderzeniowej [7, 10]. Skutkiem ich nieumiejętnego użycia może być przejście od fali uderzeniowej większej energii, niż energia przez nie pochłonięta, co da skutek odwrotny do zamierzonego.

2. OGRANICZENIA KONSTRUKCYJNE

Odporność pojazdów na wybuchy min i improwizowanych ładunków wybuchowych zazwyczaj klasyfikowana jest wg kryteriów podanych w porozumieniu standaryzacyjnym NATO STANAG 4569 [8, 9]. Kształtowanie odporności pojazdu na wybuchy min do wymaganego poziomu jest zazwyczaj ograniczone przez przyjęte założenia konstrukcyjne. Jednym z najważniejszych jest dopuszczalna masa całkowita pojazdu (DMC) – parametr, którego wartość bardzo trudno jest podnieść na późniejszych etapach projektowania lub modernizacji konstrukcji. Poważnym ograniczeniem jest też typ przyjętego zawieszenia, który determinuje przestrzeń dostępną dla kształtowania elementów mających wpływ na odporność przeciwminową.

W pojazdach odpornych na wybuchy min stosowane są dwa rozwiązania konstrukcyjne:

1. Mocowanie elementów zawieszenia bezpośrednio do bryły nadwozia bez stosowania ramy. Przykładem takiego pojazdu może być RG31, czy wykorzystujący niezależne zawieszenie typu TAK-4 Oshkosh M-ATV (rys. 8a).
2. Zastosowanie komercyjnych podwozi samochodów ciężarowych jako bazy do budowy pojazdu. Przykładami takich konstrukcji są Dingo 2 (rys. 8b), czy francuski Aravis.

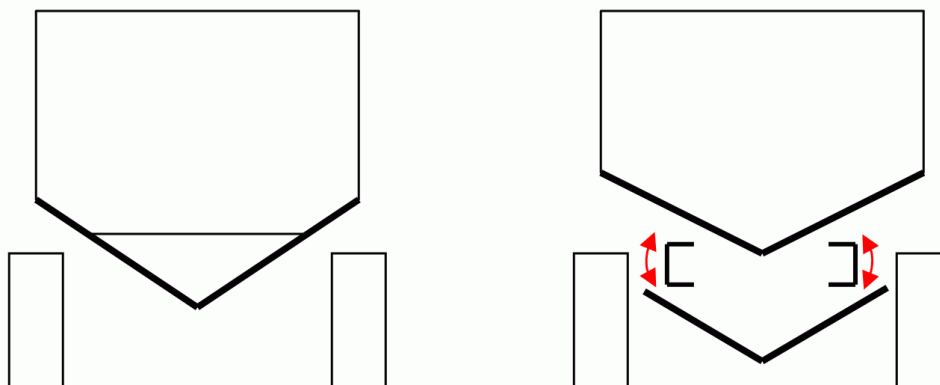


Rys. 8. Pojazdy minoodporne:
a) Oshkosh M-ATV, b) DINGO 2

Źródło: Materiały reklamowe

Pojazdy, w których zawieszenie mocowane jest bezpośrednio do nadwozia, oferują znacznie większe możliwości kształtowania bryły nadwozia, ponieważ to zawieszenie jest do niego dopasowywane. Możliwy jest wybór optymalnego ze względu na odporność na działanie fali uderzeniowej kształtu dna i swobodne zdefiniowanie prześwitu pomiędzy podłożem a dnem kadłuba. Zazwyczaj w pojazdach takich

stosowany jest duży kąt pomiędzy podłogiem a dnem, dochodzący w niektórych konstrukcjach do 43 stopni (jak w pojeździe RG-31).



Rys. 9. Warianty umieszczenia osłony przeciwminowej względem kadłuba pojazdu:
 a) zawieszenie mocowane do kadłuba, osłona będąca dnem pojazdu, b) zawieszenie mocowane do ramy, osłona umiejscowiona nad lub pod podatną ramą

Źródło: Opracowanie własne

Zaletą pojazdów opartych na podwoziach samochodów ciężarowych jest przede wszystkim niższa cena i większa niezawodność wynikająca z użycia produkowanych seryjnie, dopracowanych produktów. Łatwiejsza jest też eksploatacja i serwisowanie takich pojazdów. Jednak z punktu widzenia kształtowania odporności przeciwminowej rozwiązanie to jest znacznie mniej korzystne. Obecność pod kadłubem ramy pojazdu poważnie ogranicza możliwość swobodnego kształtowania bryły nadwozia i ma zasadniczy wpływ na dwa parametry kluczowe dla odporności pojazdu na wybuchy min:

- kształt dna nadwozia (kąt osłony w kształcie litery „V”) - osłony o dużym nachyleniu umieszczone nad ramą powodowałyby znaczne uniesienie nadwozia i obniżenie stabilności pojazdu przy poruszaniu się po nachylonym terenie;
- prześwit pomiędzy podłogiem a osłoną chroniącą kadłub przed uderzeniem fali – obecność ramy determinuje położenie osłony, która może być umieszczona tylko nad lub pod ramą pojazdu.

Ponadto ramy terenowych pojazdów ciężarowych wykazują często znaczną elastyczność, co wymaga pozostawienia przestrzeni wokół ramy na deformację podczas jazdy w terenie (skręcanie). Powoduje to konieczność dalszego podniesienia nadwozia pojazdu. Ograniczenie to schematycznie pokazano na rysunku 9.

PODSUMOWANIE

Kształtowanie odporności przeciwminowej pojazdu opancerzonego jest, podobnie jak wiele innych charakterystyk określanych w procesie konstruowania, kompromisem pomiędzy często przeciwstawnymi wymaganiami. W omawianym przypadku przeciwstawnymi cechami są np. duży prześwit pod osłoną podnoszący środek ciężkości pojazdu i zdolność do pokonywania terenu o dużym nachyleniu.

Znajomość mechanizmów działania fali uderzeniowej na pojazd oparta na zweryfikowanych doświadczalnie eksperymentach numerycznych, pozwala na świadomy wybór postaci konstrukcyjnej pojazdu w oparciu o wymagania użytkownika,

co zostało wykorzystane w procesie konstruowania pojazdu M-ATV G10 zaprojektowanego na Politechnice Wrocławskiej w kooperacji z firmą Germaz w ramach projektu celowego nr 381/BO/B finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.



Rys. 10. Pojazd minoodporny Germaz M-ATV

Źródło: Materiały reklamowe

LITERATURA

- [1] Iluk A., *Porównanie dwóch koncepcji pojazdu minoodpornego opartego na komercyjnym podwoziu*, Konferencja Odporność Udarowa Konstrukcji, Pisz 2009.
- [2] Smith P.D., Hetherington J.G., *Blast and Ballistic Loading of Structures*, Butterworth-Heinemann 1994.
- [3] *Structures to resist the effect of the accidental explosion*, U.S. Army TM5-1300, 1990.
- [4] Dacko A., *Dynamika struktury obciążonej falą uderzeniową*, [w:] „Biuletyn WAT”, nr 1/2004.
- [5] Iluk A., Ptak J., Rusiński E., *Metody numeryczne w procesie konstruowania terenowego pojazdu minoodpornego*, X Międzynarodowa Konferencja Naukowa CAE, Szklarska Poręba 2010.
- [6] Borkowski W., Rybak P., *Konstrukcyjne zwiększenie odporności wozu bojowego na obciążenia udarowe*, [w:] „Biuletyn WAT”, nr 11/2002.
- [7] Xue Z., Hutchinson J. W., *A comparative study of impulse-resistant metal sandwich plates*, [in:] “Int. Journal of Impact Engineering”, 30, 2004.
- [8] *NATO Standardization Agreement 4569*, Edition 1.

- [9] *AEP-55 Volume 2, Edition 1, Procedures for evaluating the protection level of logistic and Light Armoured Vehicles.*
- [10] Rybak P., *Protecting panels for special purpose vehicles*, [in:] "Journal of Kones Powertrain and Transport", Vol. 17, No. 1, 2010

SELECTED ASPECTS OF MINE-RESISTANT DESIGN OF OFF-ROAD ARMoured VEHICLE

Summary

The paper presents selected aspects of the design of off-road armoured vehicles for mine-resistance. Special attention was paid to the influence of mine-resistance features on the vehicle's ability to move off-road. The ways in which selected safety-increasing features work are presented and illustrated with some numerical examples. The advantages and disadvantages of modern mine-resistant armoured vehicles designs are discussed. The conclusions presented in the paper have been used in practice while designing the prototype of the M-ATV G-10 mine resistant armoured vehicle.

Key words: *mechanics, finite elements method, explosion simulation, mine resistance, mine-resistant armoured vehicles, M-ATV G10*

Artykuł recenzował: dr hab. inż. Jerzy CZMOCHOWSKI, prof. nadzw. PWr