



Porównanie dwóch koncepcji pojazdu minoodpornego opartego na komercyjnym podwoziu

ARTUR ILUK

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn,
50-371 Wrocław, ul. Łukaszczyka 7/9

Streszczenie. W artykule przedstawiono porównanie dwóch koncepcji pojazdu minoodpornego opartego na podwoziu komercyjnym samochodu ciężarowego. Rozpatrywane były dwie koncepcje umieszczenia pancerza przeciwminowego w stosunku do ramy terenowego samochodu ciężarowego, który może być podstawą analizowanego terenowego pojazdu minoodpornego (M-ATV). W jednej z nich osłona denna jest umieszczona pod ramą nośną, w drugiej — nad ramą nośną pojazdu. Przedstawione zostały wady i zalety obu rozwiązań w aspekcie bezpieczeństwa dla różnych rodzajów zagrożeń.

W celu weryfikacji kryteriów oceny analizowanych rozwiązań przeprowadzono serię symulacji numerycznych z wykorzystaniem programu ABAQUS/Explicit. Zbudowany został uproszczony model osłony, który następnie poddano udarowym obciążeniom odpowiadającym eksplozji ładunku o mocy 8 kg TNT centralnie pod osłoną. Parametry fali udarowej działającej na pojazd określone zostały eksperymentalnie dla warunków maksymalnie zbliżonych do rzeczywistych.

Słowa kluczowe: mechanika, metoda elementów skończonych, symulacja eksplozji, pojazdy minoodporne, M-ATV

Symbole UKD: 623.437.4

1. Wstęp

Warunki, w których przyszło działać polskim żołnierzom, wywołały potrzebę wyposażenia polskiej armii w pojazdy, które byłyby w stanie zwiększyć bezpieczeństwo żołnierzy w przypadku ataku z użyciem min lub improwizowanych ładunków wybuchowych (IED). Jednocześnie rysuje się tendencja do odchodzenia od typowych, ciężkich pojazdów typu MRAP (*Mine Protected Ambush Resistant*) na rzecz bardziej mobilnych pojazdów określanych jako M-ATV (MRAP — *All Terrain Vehicle*).

Obecnie na świecie trwają intensywne prace konstrukcyjne nad tego typu pojazdami. Część z nich to konstrukcje opracowywane od podstaw, bazujące zazwyczaj na sztywnym nadwoziu, do którego mocowane są elementy zawieszenia, inne bazują na dostępnych komponentach pojazdów standardowych. Ze względu na ograniczone możliwości finansowe polskiej armii korzystne byłoby wykorzystywanie pojazdu zbudowanego w oparciu o gotowe podwozia samochodów ciężarowych, co pozwala ograniczyć koszty. Przykładem tego typu konstrukcji może być polski Żubr. Inną zaletą tego rozwiązania jest możliwość użycia sprawdzonych podwozi terenowych samochodów ciężarowych, jak np. Unimog U5000 stosowany między innymi w Dingo 2.

Celem przedstawionej pracy była ocena dwóch typów konstrukcji pojazdu minoodpornego opartego na komercyjnym podwoziu.

2. Opis problemu

Pojazdy typu MRAP i M-ATV powinny cechować się odpornością na wybuchy min pod pojazdem oraz ataki z użyciem IED (*Improvised Explosive Device*) zazwyczaj odpalane z pobocza drogi i obciążające falą udarową bok pojazdu. W pracy tej skupiono się głównie na odporności na wybuchy min pod pojazdem.

Największymi problemami w zagadnieniu odporności na wybuch min są odporność podłogi pojazdu na przebicie, chwilowa deformacja podłogi przez falę uderzeniową i siły pochodzące od przyspieszenia działającego na załogę. Wielkości te są funkcją całkowitego impulsu siły przekazanego na pojazd, na który to impuls znaczący wpływ mają:

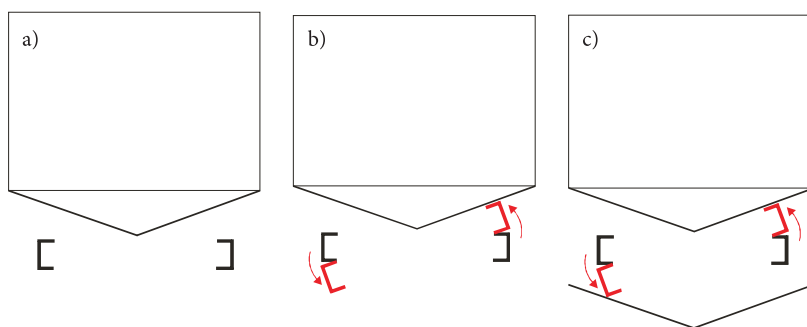
- geometria dna pojazdu (V-shape),
- odległość osłony od miejsca eksplozji (prześwit),
- materiał i grubość osłony.

Obecnie popularne w pojazdach typu MRAP ukształtowanie dna pojazdu w kształcie litery V ma na celu zwiększenie kąta pomiędzy kierunkiem padania fali a powierzchnią pancerza oraz uniknięcie zjawiska obciążenia dna pojazdu falą odbitą (niekiedy wielokrotnie) od podłoża, jak to ma miejsce w przypadku czołgów i transporterów opancerzonych z płaskim dnem. Kąty pomiędzy podłożem a dnem dochodzą w niektórych konstrukcjach do 43 stopni (RG-31), co skutkuje jednak znacznym ograniczeniem przestrzeni wewnątrz pojazdu oraz podniesieniem środka ciężkości pojazdu. Podniesienie środka ciężkości powoduje z kolei problemy ze statecznością poprzeczną przy pokonywaniu pochylonego terenu oraz zwiększenie prawdopodobieństwa przewrócenia pojazdu przy uderzeniu falą udarową z boku pojazdu (ładunki IED na poboczu).

Stosowanie osłon o tak dużych kątach wyklucza też stosowanie konstrukcji z ramą nośną i wymusza mocowanie zawieszenia do pancerza.

Kluczowe znaczenie dla odporności dna ma prześwit pomiędzy podłożem a dnem kadłuba. Dane doświadczalne pokazane w [1] świadczą, że wraz ze wzrostem odległości od ładunku szybko spada wartość maksymalnego ciśnienia działającego na dno oraz impuls siły przekazywany na dno przez falę uderową.

W przypadku koncepcji stosowania komercyjnego podwozia do pojazdu minoodpornego, problemem jest duża podatność ramy pojazdu i ruchliwość zawieszenia w porównaniu ze sztywną, opancerzoną kabiną. Podatne ramy terenowych pojazdów ciężarowych wymagają dużej przestrzeni na odkształcenia w czasie jazdy. Problem ten pokazano schematycznie na rysunku 1.



Rys. 1. Położenie osłony w stosunku do ramy pojazdu: a) osłona nad ramą; b) osłona nad podatną ramą; c) osłona pod podatną ramą

Przypadek z rysunku 1a odpowiada pojazdowi zabudowanemu na stosunkowo sztywnej ramie. Osłona może być wówczas umieszczona w stosunkowo niewielkiej odległości od ramy. Jednakże nowoczesne podwozia terenowych samochodów ciężarowych zawdzięczają swoje właściwości trakcyjne nie tylko podatności zawieszenia, ale również podatności skrętnej ramy. Taką ramę i problemy wynikające z jej podatności pokazano schematycznie na rysunku 1b i 1c. Odształcająca się rama wymaga przestrzeni zarówno pod nią jak i nad nią. W przypadku umieszczenia osłony nad ramą wymagane jest podniesienie nadwozia (rys. 1b). W przypadku umieszczenia osłony pod ramą, oprócz uniesienia nadwozia, musimy umieścić osłonę stosunkowo nisko, co zmniejsza prześwit i pogarsza właściwości terenowe podwozia. W tej sytuacji wybór usytuowania pancerza w stosunku do ramy pojazdu nie jest prosty.

Umieszczenie osłony pod ramą pojazdu powoduje zwiększenie odległości pomiędzy pancerzem a załogą, co pozwala na większe odkształcenia osłony bez szkody dla załogi. Istnieje możliwość mocowania osłony do nadwozia lub ramy poprzez dodatkowe absorbery energii oraz osłonięcie elementów podwozia przed skutkami wybuchu mniejszych ładunków i ostrzałem. Zaletą jest też obniżenie środka ciężkości pojazdu.

Niekorzystne jest zmniejszenie prześwitu pod dnem, co powoduje przyjęcie przez osłonę znacznie większego impulsu siły podczas wybuchu oraz konieczność zapewnienia nad osłoną przestrzeni dla odkształcającej się podczas jazdy ramy i zawieszenia (co powoduje dalsze obniżenie osłony). Zwiększeniu ulega też masa całkowita pojazdu. Przykładem pojazdu o takiej konstrukcji może być Dingo 2 lub Żubr.

Z kolei umieszczenie osłony nad ramą pojazdu powoduje znaczne zwiększenie prześwitu pod osłoną (mniejszy impuls ciśnienia przyjmowany przez osłonę) oraz pozostawienie przestrzeni dla odkształcającej się ramy pojazdu. Wadą jest mała odległość pomiędzy osłoną a załogą, co ogranicza przestrzeń na odkształcanie osłony w czasie wybuchu. Niekorzystne jest też podwyższenie środka ciężkości pojazdu oraz ekspozycja ramy i zawieszenia pojazdu na eksplozje (*mobility kill*). Przykład konstrukcji takiego typu pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Przykład konstrukcji pojazdu, w którym osłonę umieszczono nad ramą nośną

Ocena wpływu wyboru miejsca umieszczenia osłony na bezpieczeństwo w czasie eksplozji wydaje się być istotnym zagadnieniem w procesie projektowania pojazdu odpornego na wybuchy min. Próbę takiej oceny przedstawiono poniżej, składa się ona z dwóch etapów.

W pierwszej części podjęto próbę pomiaru rzeczywistego impulsu ciśnienia przekazanego w obu wypadkach na pojazd w czasie eksplozji. W drugim etapie ocenie podlegało zachowanie pojazdu poddanego zmierzonym impulsom ciśnienia.

3. Pomiar impulsu ciśnienia

W literaturze można znaleźć empiryczne zależności pomiędzy wielkością ładunku a impulsem ciśnienia przekazywanego na obiekt poddany działaniu fali udarowej [1, 2]. Znaleźć można również zależności opisujące wpływ kąta padania fali na wzmocnienie impulsu ciśnienia [3], co ma znaczenie w przypadku stosowania osłon w kształcie litery „V”. Badania nad oddziaływaniem fali udarowej na pojazdy zostały przedstawione też m.in. w [4, 5, 6], jednak parametry fali silnie zależą od wielu czynników, np. od sposobu umieszczenia ładunku w gruncie czy rodzaju

podłoża [7]. W celu uwzględnienia tych efektów postanowiono przeprowadzić pomiar wartości impulsu ciśnienia w warunkach rzeczywistych. W tym celu została opracowana oryginalna metoda pomiaru impulsu ciśnienia.

Pomiar polegał na umieszczeniu nad ładunkiem makiety osłony balistycznej wykonanej ze stali konstrukcyjnej S355. Kształt, wymiary i wysokość umieszczenia makiety nad podłożem odpowiadały rzeczywistej osłonie. Makieta spoczywała swobodnie podparta na podporach nad ładunkiem umieszczonym w gruncie.

Stosunkowo podatny materiał został wybrany w celu obserwacji deformacji w czasie wybuchu (zdjęcia z szybkiej kamery) oraz trwałych odkształceń po próbie. Dodatkową zaletą była dostępność danych materiałowych dla dużych prędkości odkształcania [8].



Rys. 3. Widok makiety na podporach — wysokość 1000 mm nad gruntem

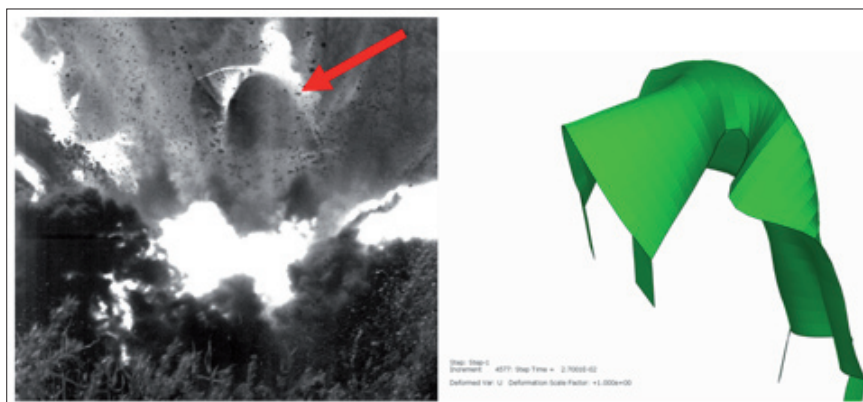
Detonacja ładunku spowodowała wywarcie na makiętę impulsu ciśnienia o wartości analogicznej, jak podczas eksplozji pod pojazdem. Przyjęto założenie, że masa makiety jest wystarczająco duża, aby efekty związane z interakcją fali i osłony (*Fluid Structure Interaction*) nie miały istotnego wpływu na wielkość przekazanego impulsu siły [9, 10].

Impuls rozpędzał makiętę, nadając jej prędkość pionową, którą zmierzono za pomocą szybkiej kamery filmującej przebieg eksplozji. Pomiaru dokonano dla kilku widocznych w czasie ruchu punktów na powierzchni makiety, a następnie na ich podstawie oszacowano prędkość środka ciężkości makiety.

Pomiar prędkości, a więc pośrednio energii kinetycznej przekazanej makięcie, pozwala na oszacowanie całkowitego impulsu ciśnienia działającego podczas eksplozji na makiętę, z uwzględnieniem wszystkich towarzyszących eksplozji zjawisk, takich jak wielokrotne odbicie fali, uderzenie fali w osłonę pod kątem różnym od prostego, wpływ sposobu umieszczenia ładunku w podłożu itd. Dodatkowo dzięki szybkiej kamerze i pomiarom geometrii makiety po eksperymencie możliwa była ocena deformacji makiety.

Eksperyment przeprowadzono dla makiety umieszczonej na dwóch wysokościach, odpowiadających umieszczeniu osłony nad ramą (1000 mm nad podłożem) i pod ramą pojazdu (350 mm nad podłożem). Dla takich dwóch przypadków oszacowany został poprzez pomiar energii kinetycznej makiety po ustaniu odkształcania plastycznego całkowity impuls ciśnienia działający na osłonę.

Przy założeniu, że rozkład ciśnienia na powierzchni makiety i zmienność w czasie mogą zostać zdefiniowane wg danych empirycznych podanych w [1], opracowany został z użyciem kodu ABAQUS/Explicit model numeryczny makiety i obciążenia. Obciążenie ciśnieniem zostało następnie dopasowane do wyników eksperymentu poprzez liniowe przeskalowanie w taki sposób, aby modelowany impuls ciśnienia powodował nadanie makiecie takiej energii kinetycznej, jak zmierzona podczas eksperymentu. To podejście pozwala na realistyczne uwzględnienie podczas modelowania takich czynników jak kształt dna, sposób umieszczenia ładunku w gruncie itp. Na rysunku 3 pokazano widok stanowiska do pomiaru impulsu ciśnienia.



Rys. 4. Widok stanowiska w 27 ms po inicjacji ładunku oraz modelu numerycznego w tym samym czasie — próba na wysokości 350 mm nad gruntem

Widok makiety podczas eksperymentu oraz modelu numerycznego pokazano na rysunku 4. Porównanie wyników eksperymentu i symulacji pozwoliło na zweryfikowanie opracowanego modelu obliczeniowego, który umożliwia ocenę działania fali udarowej na osłonę i cały pojazd. Należy podkreślić, że ten sposób pomiaru nie może zostać użyty do oceny odporności dna pojazdu ze względu na niską masę makiety. Celem pomiaru było wyłącznie oszacowanie impulsu ciśnienia działającego w rzeczywistych warunkach na kadłub pojazdu.

4. Symulacja

W celu porównania ilości energii przekazywanej pojazdowi w wyniku wybuchu miny, wykonano symulację takiej eksplozji działającej na osłonę zamontowaną na pojeździe.

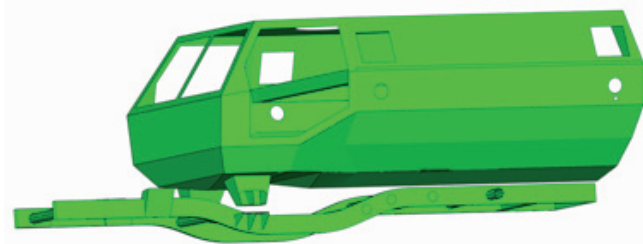
Należy podkreślić, że wyników takiej symulacji nie można traktować jako odpowiedzi ilościowych na postawione pytania, ponieważ zależą one od szczegółów konstrukcyjnych pojazdu. Otrzymane wyniki mają raczej charakter jakościowy, pozwalający na wyciągnięcie ogólnych wniosków co do kierunku dalszych prac. Pojazd użyty jako model do obliczeń jest obecnie w fazie projektowania.

Do porównania działania fali na pojazd przyjęto trzy konfiguracje osłony:

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

Model obliczeniowy wykonany w technice powłokowej zawierał bryłę nadwozia oraz model ramy. Pozostałe elementy pojazdu zastąpione zostały odpowiednio zamocowanymi elementami masowymi.

Model dyskretny pokazano na rysunkach 5 i 6. Dolne powierzchnie modelu obciążone zostały zmiennym w czasie i przestrzeni polem ciśnienia. Obliczenia przeprowadzono przy użyciu programu ABAQUS/Explicit.

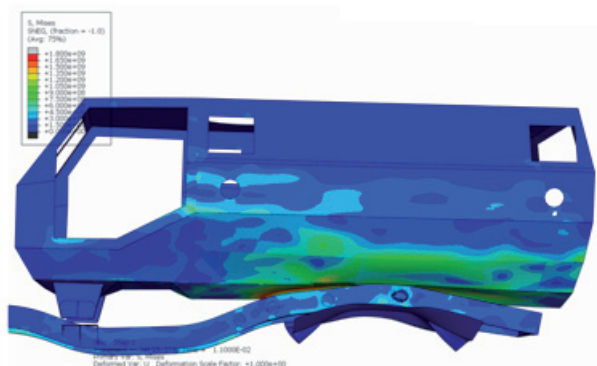


Rys. 5. Model pojazdu — osłona górna



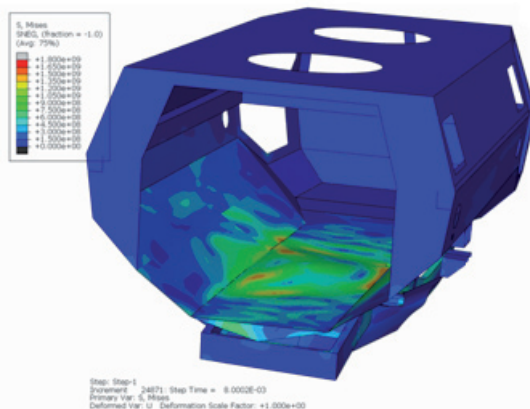
Rys. 6. Model pojazdu — dodatkowa osłona dolna

Na rysunkach 7 i 8 przedstawione zostały przykładowe wyniki symulacji w postaci warstwic naprężeń zredukowanych i postaci deformacji w wybranych chwilach symulacji. Widoczne jest duże odkształcenie plastyczne ramy pojazdu, która w przypadku osłon dolnych pełni funkcję dodatkowego elementu pochłaniającego energię.



Rys. 7. Model z osłoną dolną, czas 11 ms — naprężenia zredukowane wg Hubera-Misesa [Pa]

Pokazane na rysunku 8 wewnątrz pojazdu pozwala zaobserwować dużą deformację podłogi pojazdu podczas eksplozji. Wysokie naprężenia występują w miejscu połączenia podłogi pojazdu ze ścianami bocznymi, co wskazuje na konieczność zwrócenia szczególnej uwagi na sposób łączenia i odpowiednią wytrzymałość połączenia. Jest to jeden z przykładów praktycznych informacji, które uzyskane nawet z przybliżonego, jakościowego modelu mogą pomóc w procesie projektowania pojazdu.



Rys. 8. Model z osłoną dolną, czas 8 ms — naprężenia zredukowane wg Hubera-Misesa [Pa]

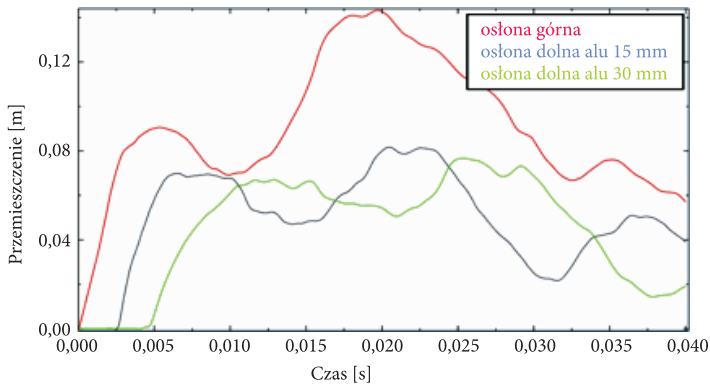
Do oceny zachowania pojazdu z punktu widzenia bezpieczeństwa załogi najbardziej istotne są dwa kryteria:

- przyspieszenie działające na punkt mocowania fotela, od którego zależy siła działająca na kręgosłup,
- przyspieszenie podłogi, na której mogą opierać się stopy, co określa siłę działającą na stawy kolanowe.

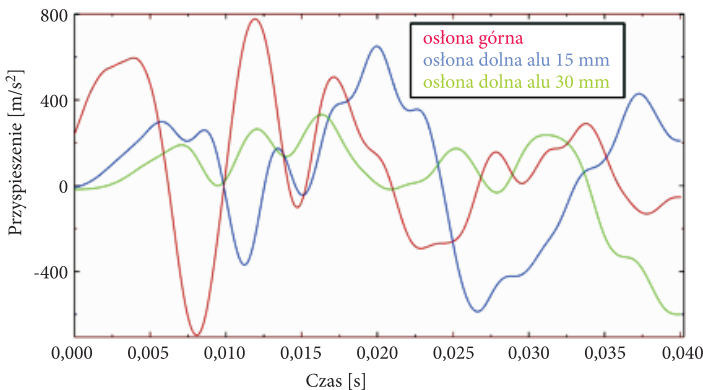
Dodatkowo sprawdzono względne przemieszczenie punktu mocowania fotela nad miejscem wybuchu oraz przemieszczenia maksymalne podłogi w tym miejscu.

Wartości liczbowe tych parametrów zależą oczywiście od elementów, których model nie zawiera, np. od konstrukcji fotela (który może zapewniać zmniejszenie sił działających na kręgosłup) czy mat amortyzujących na podłodze, zmniejszających przyspieszenie stóp. Nieuwzględnienie tych elementów nie przeszkadza jednak w jakościowym porównaniu zachowania analizowanych wariantów podczas eksplozji.

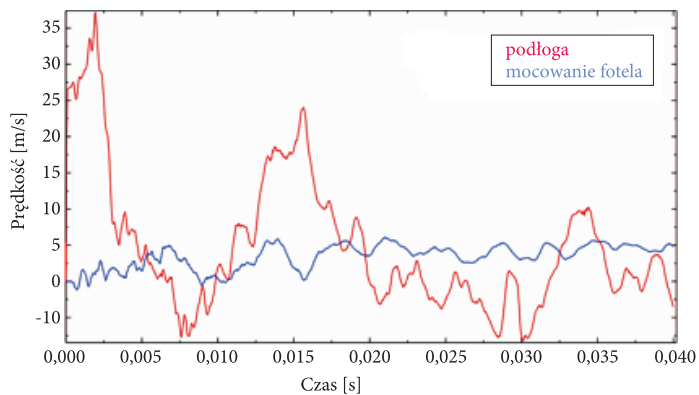
Na rysunkach 9-18 pokazano wybrane wyniki symulacji w postaci wykresów.



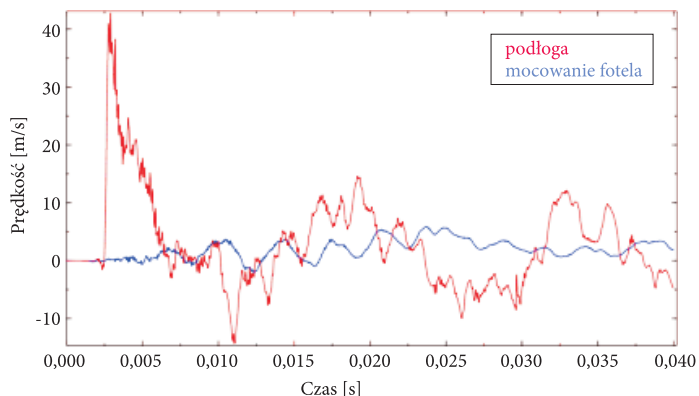
Rys. 9. Przebieg względnych przemieszczeń podłogi i mocowania fotela w czasie



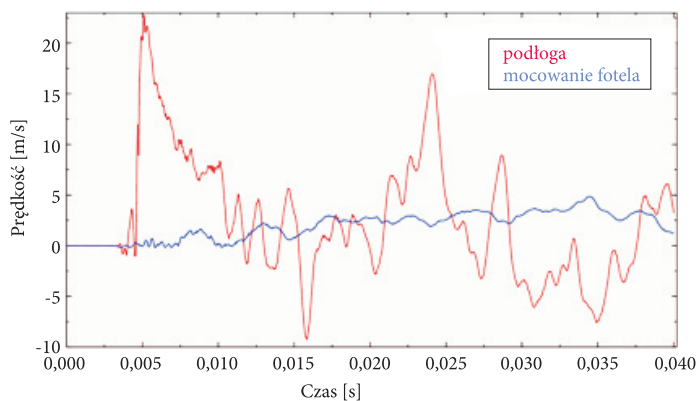
Rys. 10. Przyspieszenia w punkcie mocowania fotela; wyniki po przefiltrowaniu filtrem dolnoprzepustowym 120 Hz



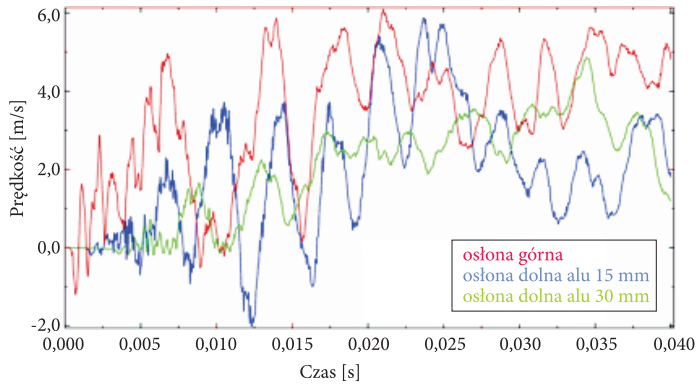
Rys. 11. Przebieg prędkości pionowych podłogi i mocowania fotela w czasie — osłona górna



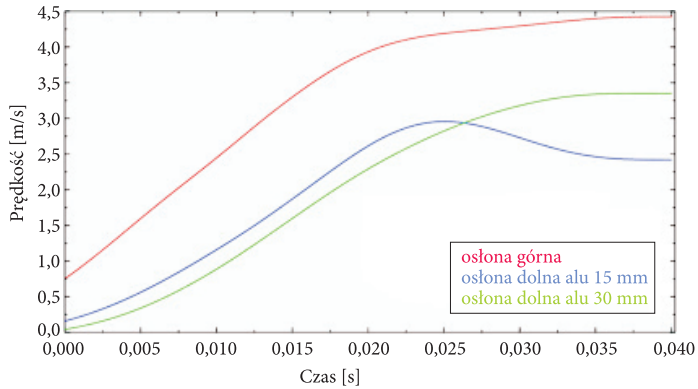
Rys. 12. Przebieg prędkości pionowych podłogi i mocowania fotela w czasie; osłona dolna — stop aluminium, grubość 15 mm



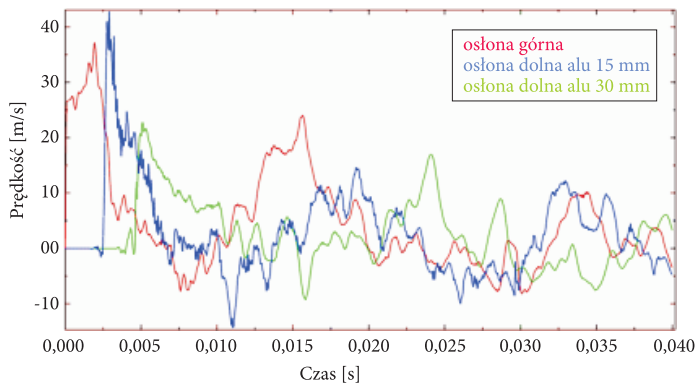
Rys. 13. Przebieg prędkości pionowych podłogi i mocowania fotela w czasie; osłona dolna — stop aluminium, grubość 30 mm



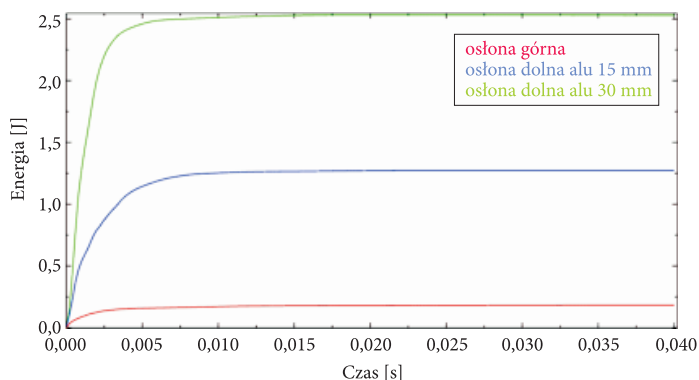
Rys. 14. Porównanie prędkości pionowych punktów mocowania fotela w czasie



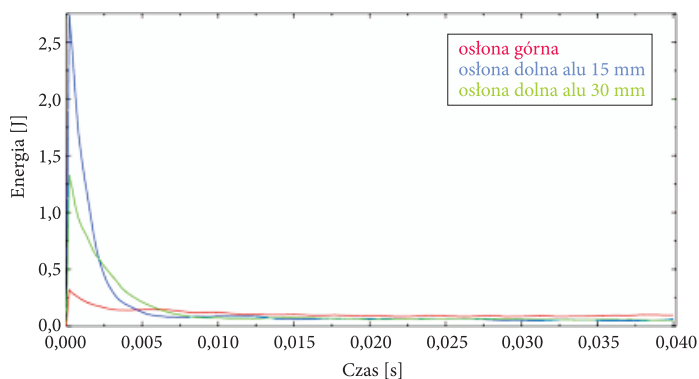
Rys. 15. Porównanie prędkości pionowych punktów mocowania fotela w czasie; wyniki po przefiltrowaniu filtrem dolnoprzepustowym 120 Hz



Rys. 16. Porównanie prędkości pionowych podłogi w czasie



Rys. 17. Porównanie pracy odkształcenia plastycznego dla różnych wariantów



Rys. 18. Porównanie energii kinetycznej dla różnych wariantów

5. Wnioski

Podatność osłony na odkształcanie podczas wybuchu ma istotny wpływ na energię przekazywaną z dna na pozostałą część pojazdu. Jeśli pancerz jest wykonany z podatnego materiału (stal konstrukcyjna, stopy aluminium, kompozyty), istotna część energii wybuchu zostanie pochłonięta przez odkształcenia plastyczne (rys. 17), co wymaga jednak pozostawienia odpowiedniej przestrzeni nad osłoną. Rozwiązanie to jest odpowiednie w przypadku umieszczania osłony pod ramą. Pochłanianie energii jest w tym wypadku tym bardziej istotne, że nisko umieszczona osłona przejmie od fali uderowej znacznie większą energię (rys. 18).

Inna sytuacja występuje, gdy osłona wykonana jest z materiału o wysokiej granicy plastyczności (np. stal balistyczna). Materiał ten jest mało podatny i pochłanianie energii w wyniku odkształceń plastycznych występuje w znacznie mniejszym stopniu, co powoduje przekazanie większej energii na pozostałą część pojazdu. Jest to

rozwiązanie odpowiednie w przypadku umieszczenia osłony nad ramą, ponieważ duży prześwit zmniejsza przyjmowaną energię (rys. 18), zaś mała odległość pomiędzy osłoną a przestrzenią zajmowaną przez załogę i tak wyklucza duże odkształcenia. Osłona, zachowując kształt litery „V”, stanowi w takim przypadku również część opancerzenia bocznego, co powoduje obniżenie całkowitej masy pojazdu.

Zwraca uwagę duże przemieszczenie pionowe podłogi pojazdu w wariancie z osłoną górną widoczne na rysunkach 9 i 11. Jest ono spowodowane bezpośrednim uderzeniem fali w kabinę i praktycznie niewielkim pochłanianiem energii przez podwozie.

Dokładniejsze oszacowanie części energii przejętej przez ramę i zawieszenie w przypadku osłony górnej wymagałoby użycia pełnego modelu propagacji fali uderzeniowej z uwzględnieniem, oprócz modelu pojazdu, również przestrzeni pomiędzy podłożem a pojazdem jako domeny z siatką Eulera [5]. Model taki pozwoliłby na uwzględnienie zjawisk lokalnych odbić fali od elementów podwozia.

Na rysunkach 11-13 pokazano różnice prędkości podłogi i mocowania fotela dla różnych wariantów. Widoczne są znacznie większe prędkości podłogi, co wynika ze stosunkowo wysoko umieszczonego punktu mocowania fotela. Wskazuje to na konieczność zwrócenia szczególnej uwagi na ryzyko uszkodzenia nóg podczas eksplozji.

W przypadku najważniejszego dla przeżycia kryterium — przyspieszeń działających na mocowanie foteli — różnice pomiędzy wariantami są niewielkie i trudne w interpretacji. Różnica jest lepiej widoczna przy porównaniu przebiegów prędkości (rys. 14). Zmiany prędkości widoczne po odfiltrowaniu wyższych częstotliwości na rysunku 15 pokazują, że zastosowanie osłony dolnej zmniejsza istotnie maksymalną prędkość pionową fotela.

Dokładniejsza ocena ryzyka zranienia lub śmierci pasażerów pojazdu wymagać będzie opracowania bardziej szczegółowego modelu pojazdu wraz z fotelami oraz wykorzystania w symulacji modelu człowieka (*dummy*) pozwalającego na ocenę ryzyka wg kryteriów podanych w STANAG 4569 [11, 12]. Symulacje takie będą stanowić kolejny etap pracy. Innym elementem, o który należałoby rozszerzyć model, jest uwzględnienie w nim zjawiska propagacji i odbić fali, zwłaszcza w modelu z osłoną górną, gdzie fala w drodze do dna pojazdu przechodzi pomiędzy elementami podwozia.

Wybór rozwiązania osłony zależy w dużym stopniu od określenia jasnych wymagań i priorytetów dla konstruowanego pojazdu, np. dopuszczalnej ze względu na nośność pojazdu masy osłony. Niektóre wymagania mogą się wzajemnie wykluczać, np. z punktu widzenia ograniczenia masy całkowitej pojazdu czy wysokości środka ciężkości. Dla poprawnego zaprojektowania pojazdu istotne wydaje się między innymi określenie kryteriów podziału dostępnej nośności podwozia pomiędzy ochronę załogi przed wybuchem, ochronę załogi przed ostrzałem i ochronę pojazdu przed ostrzałem (*mobility kill*) przy zachowaniu odpowiedniej mobilności pojazdu.

Artykuł wpłynął do redakcji 22.12.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2010 r.

LITERATURA

- [1] *Structures to resist the effect of the accidental explosion*, U.S. Army TM5-1300, 1990.
- [2] G. RANDERS-PERSON, K. BANNISTER, *Airblast loading model for DYNA2D and DYNA3D*, U.S. Army Research Laboratory, 1997.
- [3] P. D. SMITH, J. G. HETHERINGTON, *Blast and Ballistic Loading of Structures*, Butterworth-Heinemann, 1994.
- [4] W. BORKOWSKI, P. RYBAK, *Konstrukcyjne zwiększenie odporności wozu bojowego na obciążenia udarowe*, Biul. WAT, 51, 11, 2002.
- [5] A. DACKO, *Dynamika struktury obciążonej falą uderzeniową*, Biul. WAT, 53, 1, 2004.
- [6] W. TRZCIŃSKI, R. TRĄBIŃSKI, S. CUDZIŁO, *Investigation of the behaviour of steel and laminated fabric plates under blast wave load. Part I. Experimental approach*, Biul. WAT, 54, 2-3, 2005.
- [7] A. NEUBERGER, S. PELES, D. RITTEL, *Scaling the response of circular plate subjected to large and close-range spherical explosions. Part II. Buried charges*, Int. Journal of Impact Engineering, 34, 2007.
- [8] R. CHMIELEWSKI, L. KRUSZKA, W. MŁODOŻENIEC, *Badania właściwości statycznych i dynamicznych stali konstrukcyjnej 18G2*, Biul. WAT, 53, 11-12, 2004.
- [9] Z. XUE, J. W. HUTCHINSON, *A comparative study of impuls-resistant metal sandwich plates*, Int. Journal of Impact Engineering, 30, 2004.
- [10] N. KAMBOUCHEV, L. NOELS, R. RADOVITZKY, *Numerical simulation of the fluid-structure interaction between air blast waves and free-standing plates*, Computers and Structures, 85, 2007.
- [11] NATO Standardization Agreement 4569, Edition 1.
- [12] AEP-55, vol. 2, Edition 1, *Procedures for evaluating the protection level of logistic and Light Armoured Vehicles*.

A. ILUK

Comparison of two conceptions of mine-resistant vehicles built on a base of commercial undercarriage

Abstract. The comparison of two different conceptions of a mine-resistant vehicle built on the base of commercially available undercarriage of an off-road truck was presented. In particular, the main goal was to evaluate the influence of protective structure location in respect to the frame of M-ATV (MRAP — All Terrain Vehicle) on various parameters related to the safety of occupants. Two locations were evaluated — above and below the frame of truck. Evaluation process was conducted with the use of the Finite Element Method in ABAQUS/Explicit. In order to determine the real impulse of the pressure acting on the protective structure during explosion of 8 kg TNT charge below vehicle, value of this impulse was experimentally measured and the verified impulse value was used in simulation of a whole vehicle. Various characteristics of vehicle movement were presented and discussed.

Keywords: mechanics, finite element methods, explosion simulation, M-ATV

Universal Decimal Classification: 623.437.4