

**Piotr SASKA\***  
**Jerzy CZMOCHOWSKI\*\***

## **PROBLEMY ODDZIAŁYWANIA WYBUCHU NA POJAZDY MINOODPORNE MRAP**

*Pojazdy minoodporne MRAP pomimo zwiększonej odporności na działania wybuchu narażone są na uszkodzenia, będące wynikiem ataków z użyciem min i improwizowanych urządzeń wybuchowych. Fakt ten powoduje, że w wielu ośrodkach naukowych prowadzi się badania, zmierzające do wprowadzenia rozwiązań konstrukcyjnych, które pozwoliłyby znacząco zminimalizować tego typu niebezpieczeństwo. W artykule przedstawiono zagrożenia, będące wynikiem eksplozji ładunków wybuchowych i ich wpływ na pojazdy. Dokonano charakterystyki elementów konstrukcyjnych MRAP, mających wpływ na podniesienie wytrzymałości na zjawisko wybuchu. Zdefiniowano zagrożenia będące wynikiem obciążenia odbitą falą uderzeniową oraz zaprezentowano metody określania jej parametrów.*

**Słowa kluczowe:** *pojazdy opancerzone minoodporne, MRAP, wybuch, fala uderzeniowa*

### **WSTĘP**

Wojska biorące udział we współczesnych konfliktach zbrojnych, takich jak wojna w Iraku czy Afganistanie narażone są na ataki ugrupowań terrorystycznych. Głównym środkiem walki stosowanym przez rebeliantów są wszelkiego rodzaju ładunki wybuchowe w postaci min lądowych oraz improwizowanych urządzeń wybuchowych (IED). Obiektem ataków rebeliantów są pojazdy wojskowe i poruszający się nimi żołnierze. Duża ilość zdarzeń z użyciem materiałów wybuchowych skierowanych przeciwko przemieszczającym się kolumnom wojskowym skutkuje ofiarami wśród żołnierzy wojsk uczestniczących w konflikcie. Sytuacja taka powoduje, że wprowadzenie na wyposażenie walczących oddziałów wozów bojowych, zapewniających poruszającym się nimi żołnierzom ochronę przed generowaną przez detonację ładunków wybuchowych

---

\* kpt. mgr inż. Piotr SASKA – Wydział Planowania i Koordynacji Badań Naukowych Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych

\*\* dr hab. inż. Jerzy CZMOCHOWSKI, prof. nadzw. PWr – Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej

falę uderzeniową jest priorytetowym zadaniem dla państw biorących udział w działaniach zbrojnych.

W 2007 r. w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej uruchomiono specjalny program pod nazwą MRAP (Mine Resistant Ambush Protected), którego celem było stworzenie pojazdów zapewniających ochronę żołnierzom, biorącym udział w walkach w Iraku i Afganistanie przed minami lądowymi i improwizowanymi urządzeniami wybuchowymi [9]. W efekcie prowadzonych prac powstała dość liczna grupa pojazdów, która pomimo wielu różnic konstrukcyjnych posiada wiele cech wspólnych, z których najważniejszą jest wysoka odporność na działanie ładunków wybuchowych, osiągnięta przez odpowiednio ukształtowane dno pojazdu w kształcie litery „V” (V-shape). Taka geometria zapewnia zwiększenie kąta pomiędzy kierunkiem padania fali, a powierzchnią kadłuba oraz pozwala uniknąć zjawiska obciążenia dna pojazdu falą odbitą (niekiedy wielokrotnie) od podłoża [6]. Dzięki tej właściwości pojazdy MRAP są powszechnie używane przez armię amerykańską i jej sojuszników, w tym wojsko polskie w misjach stabilizacyjnych.

## 1. ZJAWISKO WYBUCHU I ZAGROŻENIA Z NIEGO WYNIKAJĄCE

W pracach [23, 24] wybuch określany jest jako zjawisko fizycznej, chemicznej lub jądrowej przemiany układu, której towarzyszy zamiana energii potencjalnej na pracę mechaniczną. Praca ta wykonywana jest przez rozprężające się gazy, występujące przed wybuchem w skompresowanym stanie lub powstające w czasie wybuchu. Specyficznymi cechami wybuchu są: nagły skok ciśnienia w miejscu przemiany, zmienna i duża prędkość rozprzestrzeniania się procesu – większa od prędkości dźwięku w ośrodku niezaburzonym, mierzona w tysiącach metrów na sekundę i niewielka zależność tej prędkości od czynników zewnętrznych. Mechaniczne oddziaływanie wybuchu charakteryzuje się gwałtownym uderzeniem gazowych produktów wybuchu na otaczające środowisko, powodującym trwałe odkształcenia lub zniszczenia struktur znajdujących się w pobliżu miejsca wybuchu.

Materiały wybuchowe są termodynamicznie metastabilnymi układami, w których na skutek zewnętrznych oddziaływań (mechanicznych, elektrycznych lub cieplnych) zachodzą, w sposób gwałtowny, samopodtrzymujące się egzotermiczne reakcje chemiczne<sup>1</sup>. Towarzyszy im zawsze wydzielanie się silnie sprężonych gazów lub par zdolnych do wykonania pracy mechanicznej [23, 24].

Zasadniczą charakterystyką materiału wybuchowego są parametry fali detonacyjnej. Natomiast osnową hydrodynamicznej teorii fal detonacyjnych są fale uderzeniowe. Stanowią one główne źródło opisu zjawisk towarzyszących wybuchom oraz ich oddziaływaniu na środowisko [23, 24]. Parametrami fali uderzeniowej wpływającymi na powstawanie zagrożeń dla otoczenia jest impuls nadciśnienia i nadciśnienie fali uderzeniowej. Obciążenie falą uderzeniową rzeczywistego układu powoduje zmianę rozkładów naprężeń w jego strukturze, która przejawia się odchyleniami od stanu równowagi bądź generuje odkształcenia układu [8, 20].

<sup>1</sup> Egzotermiczność reakcji odpowiedzialna jest za samopodtrzymywanie przebiegu procesu przemiany niezależnie od zewnętrznych warunków stwarzanych przez otoczenie. Głównym parametrem określającym miarę egzotermiczności reakcji jest ciepło wybuchu, oznaczane literą  $q$ .

Praktykowana przez ugrupowania terrorystyczne w Iraku i Afganistanie taktyka polegająca na atakowaniu przemieszczających się wozów bojowych przy pomocy min i improwizowanych urządzeń wybuchowych (IED) skutkuje uszkodzeniami konstrukcji pojazdów oraz ofiarami wśród załóg. Rozmiar oraz rodzaj strat i uszkodzeń zależy od wielu czynników, wśród których najważniejsze to:

- budowa pojazdu - odporność na oddziaływanie fali uderzeniowej wybuchu;
- typ użytego materiału (ładunku)wybuchowego, jego kształt oraz masa;
- miejsce ustawienia ładunku wybuchowego oraz rodzaj podłoża;
- sposób, miejsce oraz odległość detonacji ładunku od pojazdu.

Zagrożeniem dla pojazdów mechanicznych używanych przez wojsko jest eksplozja ładunku wybuchowego, którego ciężar przekracza 5 kg. Szczególnie niebezpieczne są zdarzenia, w których wybuch następuje centralnie pod pojazdem, którego dno jest płaskie i posiada mały prześwit. W takim przypadku następują obciążenia dna samochodu falą odbitą (niekiedy wielokrotnie) od podłoża [6]. Na rysunku 1 przedstawiono polski HMMWV po wybuchu miny o masie 6 kg. Pomimo widocznych zniszczeń nikt z członków załogi nie zginął [5].



Rys. 1. Polski HMMWV po wybuchu miny o masie 6 kg

*Źródło: G. Hołdanowicz, Czas kupić pojazdy na misje [w:] Raport 9/2007*

W listopadzie 2008 roku na wyposażenie Polskiego Kontyngentu Wojskowego w Afganistanie zostały wprowadzone pojazdy minoodporne – Cougar 4x4 [9]. Od momentu, kiedy znalazły się w arsenale naszego wojska, Cougary przejęły większość zadań, wykonywanych uprzednio przez HMMWV. W okresie listopad 2008 – kwiecień 2009 były trzykrotnie atakowane przy pomocy improwizowanych urządzeń wybuchowych. Najgroźniejszy był wybuch ładunku o orientacyjnej masie 5 – 8 kg, pod przednią osią pojazdu. W wyniku eksplozji zostały urwane błotniki wraz z filtrem powietrza oraz uszkodzony układ pneumatyczny i ABS. Pojazd pomimo stosunkowo niewielkich uszkodzeń nie nadawał się do samodzielnej jazdy, ale możliwe było jego holowanie. Drugim zdarzeniem był wybuch IED, złożonego prawdopodobnie z kilku pocisków moździerzowych oraz miny przeciwpiechotnej – w sumie około 2 kg materiału wybuchowego. Efektem wybuchu było przebicie opony przedniego prawego koła. Podczas kolejnego incydentu wybuch ładunku o masie kilku kilogramów pod pojazdem nie

spowodował żadnych uszkodzeń [9]. We wszystkich trzech zdarzeniach, nie zginął żaden żołnierz, co wydaje się najważniejszą zaletą konstrukcji Cougara, która jest w stanie zapewnić przeżycie załogi podczas wybuchu cięższych ładunków.

W przypadku eksplozji ładunków wybuchowych, których ciężar przekracza kilkadziesiąt czy nawet kilkaset kilogramów, pojazd ulega zniszczeniu lub poważnemu uszkodzeniu, które dyskwalifikuje go z dalszej eksploatacji. Na rysunku 2 przedstawiono pojazd Cougar 6x6, należący do Kontyngentu Amerykańskich Sił Zbrojnych, stacjonującego w Iraku, pod którym zdetonowano improwizowane urządzenie wybuchowe IED, o szacowanej masie 136 – 226 kg [14, 25]. W wyniku obciążenia falą uderzeniową wybuchu pojazd uległ zniszczeniu, a niektóre jego części (silnik, koła) zostały odrzucone na odległość około 40 m od pojazdu.

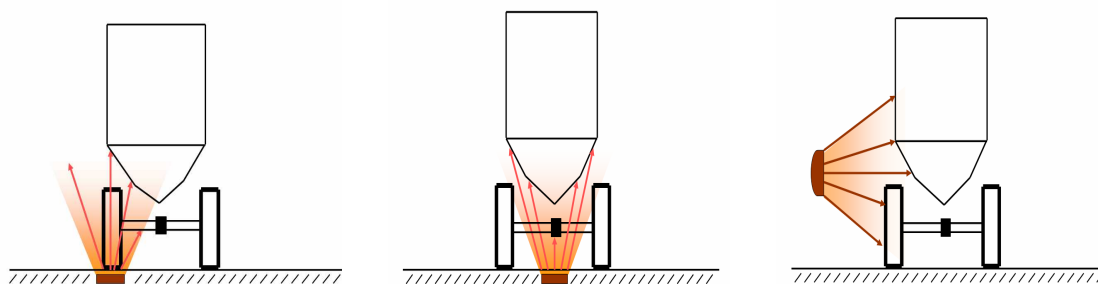


Rys. 2. Amerykański Cougar 6x6 po eksplozji improwizowanego urządzenia wybuchowego IED o szacowanej masie około 136 - 226 kg

Źródło: [online]. [dostęp: 01.10.2010]. Dostępny w Internecie:  
<http://img209.imageshack.us/f/viewer3.png>, oraz <http://www.m4carbine.net/showthread.php?t=51166>

Zagrożenia związane z oddziaływaniem wybuchu na pojazdy wymusiły stworzenie odpowiednich wymagań ochrony balistycznej, samochodów opancerzonych, wprowadzanych na wyposażenie sił zbrojnych. Dokumentem określającym te wymagania jest umowa standaryzacyjna STANAG 4569 [21]. Obciążenie konstrukcji pojazdu zjawiskiem wybuchu w tym dokumencie rozpatrywane jest w trzech charakterystycznych miejscach: pod kołem, centralnie pod kadłubem oraz z boku (rys. 3).





Rys. 3. Wymagania minoodporności i odłamkoodporności według umowy standaryzacyjnej STANAG 4569

*Źródło: Opracowanie własne*

## 2. CHARAKTERYSTYKA ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH POJAZDÓW MRAP MAJĄCYCH WPŁYW NA ZWIĘKSZENIE ICH MINOODPORNOŚCI

Odpowiadając na zapotrzebowanie wojska na pojazdy odporne na eksplozje ładunków wybuchowych, na początku 2007 r. w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej stworzono program Mine Resistance Ambush Protected (MRAP). W jego efekcie na wyposażenie armii amerykańskiej oraz innych państw dostarczono stosunkowo dużą gamę pojazdów, które podzielono na trzy grupy (kategorie):

- grupa I – pojazdy lekkie na podwoziu kołowym 4x4;
- grupa II – pojazdy średnie na podwoziu kołowym 6x6;
- grupa III – pojazdy ciężkie na podwoziu kołowym 6x6.

**Pojazdy grupy I** w literaturze anglojęzycznej określane są jako Mine Resistant Utility Vehicle (MRUV). Charakteryzują się napędem 4x4 oraz odpornością przeciwołamkową na poziomie 7 kg TNT pod kadłubem i 14 kg TNT pod kołem. Przeznaczone są do przewozu sześciu członków załogi (wliczając kierowcę, dowódcę i strzelca uzbrojonego). W ramach misji stabilizacyjnych wykorzystywane są do prowadzenia zadań patrolowych w terenie zurbanizowanym lub innym, ograniczającym swobodę manewru. Do tej kategorii zalicza się następujące pojazdy: Caiman 4x4, RG-31 MK - 3 (MK - 5) Nyala, Cougar 4x4, RG-33 4x4 oraz MaxxPro.

Najbardziej znanym przedstawicielem grupy jest pojazd koncernu BAE Systems, RG -31 Nyala w dwóch odmianach MK – 3 lub MK – 5 (rys. 4). W jego konstrukcji wykorzystano elementy podwozia samochodu ciężarowego, a także układy napędowe i przeniesienia napędu w połączeniu ze specjalnie wyprofilowanym, samonośnym, opancerzonym nadwoziem typu monocoque, którego spód ma kształt litery „V” [1]. Taka sylwetka dna pojazdu pozwala rozproszyć energię fali uderzeniowej wybuchu, generowanej przez eksplozję miny lub IED poprzez zwiększenie kąta pomiędzy kierunkiem padania fali a powierzchnią pancerza oraz uniknięcie zjawiska obciążenia dna pojazdu falą odbitą (niekiedy wielokrotnie) od gruntu. Kąt pomiędzy podłożem a dnem pojazdu w przypadku RG-31 wynosi 43° [7]. Dzięki temu fala podmuchowa powstała na skutek detonacji ładunku pod podwoziem uderza przede wszystkim w mosty napędowe, które są zamontowane poniżej nadwozia, a siła wybuchu rozchodzi się na boki. W takim przypadku zniszczeniu ulegają koła lub montowane do kadłuba dodatkowe pojemniki, jednak część pasażerska pozostaje ochroniona.



Rys. 4. RG-31 Nayala podczas targów MSPO 2009

*Źródło: Opracowanie własne*

Cechą charakterystyczną Nyali, przedstawionego na rysunku 4, jest kadłub. Jest on węższy niż osie napędowe, przez co koła pojazdu wystają poza jego obrys. W przypadku najechania na minę koło powinno odpaść, nie wyrządzając większych szkód całej konstrukcji [1].

Kolejną właściwością RG-31, o której wspomniano wcześniej, jest duży kąt pomiędzy podłożem a dnem pojazdu, który zapewnia rozpraszanie energii wybuchu. Dla konstrukcji cecha ta skutkuje jednak znacznym ograniczeniem przestrzeni wewnątrz pojazdu oraz podniesieniem jego środka ciężkości. Podniesienie środka ciężkości powoduje z kolei problemy ze statecznością poprzeczną przy pokonywaniu pochylonego terenu oraz zwiększenie prawdopodobieństwa przewrócenia pojazdu przy uderzeniu falą podmuchową z boku pojazdu [7].

Konstrukcjami zbliżonymi, a przez niektórych porównywalnymi lub zaliczanymi do kategorii I MRAP, są pojazdy niemieckiej firmy Krauss-Maffei Wegmann (KMW), Dingo 1 i Dingo 2 (rys. 5). Podobnie jak RG-31, Dingo posiadają napęd 4x4 i zbudowane są na podwoziu samochodu ciężarowego. W tym przypadku jest to podwozie Unimog. Według dostępnych danych Dingo pierwszej generacji wytrzymuje wybuch miny o masie 4 kg, zaś Dingo 2, 8 kg pod kadłubem i 10 kg pod kołem [15, 21]. Cechą charakterystyczną obydwu odmian jest budowa nadwozia pojazdu. Składa się ono z 4 modułów: przedniego wraz z osłoną silnika, kabiny z szybami kuloodpornymi, tylnego, będącego przedziałem ładunkowym oraz modułu dennego (rys. 6).



Rys. 5. Pojazdy Dingo: a) Dingo 1, b) Dingo 2

*Źródło: [online]. [dostęp: 01.10.2010]. Dostępny w Internecie:*

*[http://www.deagel.com/library/KMW-Dingo-2-all-protected-4x4\\_vehicle\\_m02008062000099.aspx](http://www.deagel.com/library/KMW-Dingo-2-all-protected-4x4_vehicle_m02008062000099.aspx)*

Modułowa budowa pojazdu obniża sztywność nadwozia, co zmniejsza podatność na rozprzestrzenianie się odkształceń przy wybuchu miny. Poszczególne moduły przemieszczają się względem siebie niezależnie, co uwidacznia się podczas jazdy w trudnym terenie [12]. W przypadku Dingo 1 zasadniczą rolę w ochronie pojazdu przed oddziaływaniem energii wybuchu odgrywa deflektor. Ma on kształt litery „V” i jest żebrowany od wewnętrznej strony. Zwiększa to jego sztywność, dzięki czemu jest trudniejszy do zniszczenia. Zasadniczą różnicą w porównaniu z RG – 31 jest to, że stanowi on oddzielny element od kadłuba i jest umieszczony pod podwoziem.



Rys. 6. Schemat modułowej budowy Dingo 1

Źródło: [online]. [dostęp: 01.10.2010]. Dostępny w Internecie: <http://defense-update.com/products/d/dingo-kmw.htm>

Dingo 2 nie posiada deflektora umieszczonego centralnie pod kadłubem. Jego zadanie spełnia zewnętrzna wielowarstwowa podłoga kabiny, która posiada kształt spłaszczonej litery „U”, z krawędziami wygiętymi pod kątem do góry.

Kolejnym zabezpieczeniem, w tym przypadku, przed obciążeniem energią wybuchu generowaną przez improwizowane urządzenie wybuchowe IED, detonowanymi z boku pojazdu, są dolne ekrany mocowane do kadłuba [15].

Prześwit pojazdów w przypadku Dingo 1 wynosi 420 mm, Dingo 2 – 480 mm (RG-31 - 389 mm) [13]. Taka odległość powoduje, że fala podmuchowa, zanim dotrze do deflektora, ulega znacznemu rozproszeniu. Dodatkowo kształt deflektora zapobiega obciążeniu jego powierzchni falą wielokrotnie odbitą od podłoża. Równie ważnym elementem, co prześwit i sylwetka dna pojazdu, zwiększającym bezpieczeństwo członków załogi w przypadku Dingo starszej generacji, jest odległość od deflektora do opancerzonej kabiny – kadłuba. Wynosi ona 250 mm i znacząco wpływa na zniwelowanie wartości parametrów fali uderzeniowej wybuchu [12].

**Grupa II pojazdów MRAP**, określana jest jako Joint Explosive Ordnance Disposal Rapid Response Vehicle (JERRV). Pojazdy tej kategorii charakteryzują się napędem 6×6 oraz odpornością przeciwminową na poziomie 14 kg TNT pod kadłubem i 21 kg TNT pod kołem. Przeznaczone są do przewozu dziesięciu członków załogi. W ramach misji stabilizacyjnych wykorzystywane są do zadań związanych z neutralizacją ładunków wybuchowych, osłoną konwojów, transportu żołnierzy oraz ewakuacji medycznej i zabezpieczenia technicznego. Do grupy tej zalicza się następujące pojazdy: RG-33L 6×6, Caiman 6×6, MaxxPro XL, Cougar HE 6×6.



Jednym z najbardziej znanych przedstawicieli pojazdów kategorii II MRAP jest Cougar HE 6×6 (rys. 7), amerykańskiej firmy Force Protection Industries. Pojazd ten zbudowany jest podobnie jak większość pojazdów minoodpornych. Podstawowym elementem jest nadwozie typu monocque, którego dolna część na całej długości ma kształt spłaszczonej litery „V”. Takie rozwiązanie sprawia, że w przypadku eksplozji miny lub improwizowanego urządzenia wybuchowego pod pojazdem, zarówno na wysokości silnika, jak i pod kabiną energia fali uderzeniowej ulega rozproszeniu na boki pojazdu [16].



Rys. 7. Pojazdy Cougar 6x6, należące do amerykańskich sił zbrojnych

Źródło: [online]. [dostęp: 04.10.2010]. Dostępny w Internecie: [http://www.olivedrab.com/idphoto/id\\_photos\\_mrap\\_cougar.php](http://www.olivedrab.com/idphoto/id_photos_mrap_cougar.php)

Dodatkowym rozwiązaniem konstrukcyjnym, wpływającym na zwiększenie minoodporności pojazdu, jest zamontowany w środkowej części, pomiędzy osiami deflektor. Jego zadaniem jest ochrona skrzyni rozdzielczej oraz wałów napędowych przed obciążeniem tych podzespołów falą odbitą od podłoża. Podobnie jak dolna część kadłuba, deflektor swoim kształtem przypomina literę „V” [16].

**Pojazdy grupy III MRAP** to pojazdy ciężkie, określane w literaturze angielskiej jako Mine Protected Clearance Vehicle (MPCV). Charakteryzują się napędem 6×6 i odpornością na wybuch ładunku wybuchowego o masie 21 kg TNT zarówno pod kadłubem, jak i pod kołem pojazdu. MPCV są wyspecjalizowanymi wozami saperskimi, wykorzystywanymi do oczyszczania dróg i przyległego terenu z improwizowanych urządzeń wybuchowych, min oraz przedmiotów niebezpiecznych. Konstrukcja pojazdu zapewnia przewóz w zależności od ilości zainstalowanego wyposażenia specjalistycznego od 5 do 6 żołnierzy [11].

Przedstawicielem tej kategorii pojazdów jest Buffalo (rys. 8), amerykańskiej firmy Force Protection Industries. Ten ważący 23 tony pojazd wykonany jest w oparciu o samoosne nadwozie typu monocque, wyprofilowane w dolnej części w kształcie litery „V” [4]. Takie rozwiązanie w połączeniu z prześwitem w granicach 406 mm oraz deflektorem zabezpieczającym skrzynię rozdzielczą znacząco wpływa na rozproszenie generowanej przez wybuch fali uderzeniowej oraz zapobiega obciążeniu podzespołów wozu falą odbitą od podłoża. Dotyczy to zdarzeń, w których eksplozja następuje pod kadłubem lub kołem pojazdu. W przypadku ładunków detonowanych z boku, w niewielkiej odległości ze względu na podniesienie środka ciężkości, spowodowanym przez duży kąt pomiędzy podłożem a dnem pojazdu, Buffalo narażony jest na utratę stateczności i wywrócenie.

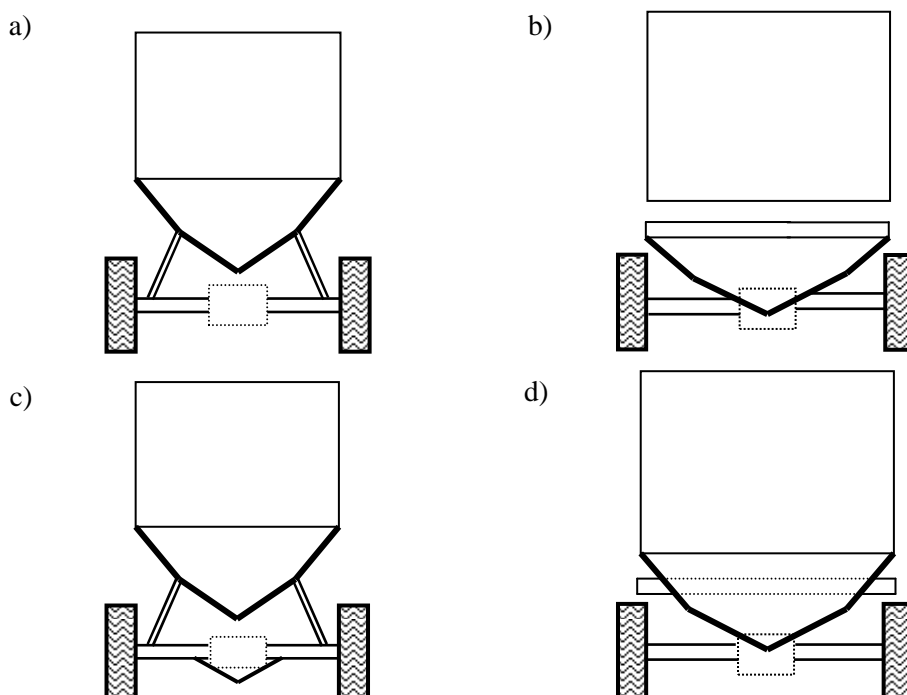




Rys. 8. Pojazd Buffalo

Źródło: [online]. [dostęp: 01.10.2010]. Dostępny w Internecie: [www.military-today.com](http://www.military-today.com) oraz [www.visulainet.net](http://www.visulainet.net)

Podstawową właściwością wszystkich pojazdów MRAP, niezależnie od ich przeznaczenia, jest zwiększona odporność na oddziaływanie powstałej wskutek eksplozji fali uderzeniowej wybuchu. Na rysunku 9 przedstawiono stosowane najczęściej rozwiązania konstrukcyjne, mające zapewnić wytrzymałość tego typu pojazdów na atak z użyciem materiałów wybuchowych.



Rys. 9. Rozwiązania konstrukcyjne stosowane w pojazdach MRAP, zwiększające ich odporność przed oddziaływaniem energii wybuchu:

- a) samonośne nadwozie typu monocoque z wyprofilowanym dnem, b) deflektor (osłona) umieszczony pod ramą nośną, c) samonośne nadwozie typu monocoque z wyprofilowanym dnem i dodatkową osłoną skrzyni rozdzielczej i mostów, d) wyprofilowana osłona zintegrowana z samonośnym nadwoziem umieszczona nad ramą nośną

Źródło: Opracowanie własne

## 2.1. Pojazdy minoodporne o wysokiej mobilności

Odpowiadając na opracowany w Stanach Zjednoczonych w 2008 r. program MRAP All-Terrain Vehicle (M - ATV), w którym wskazano na potrzebę wprowadzenia na wyposażenie armii pojazdu, odpornego na oddziaływanie zjawiska wybuchu oraz mogącego poruszać się w trudnym terenie, w wielu ośrodkach naukowych rozpoczęto prace badawcze zmierzające do spełnienia tego oczekiwania. W efekcie prowadzonych badań opracowano szereg nowych konstrukcji, które są wprowadzane na wyposażenie wojska lub mają szansę znaleźć się w jego arsenale. Wśród firm biorących udział w programie znaleźli się przede wszystkim producenci pojazdów MRAP, użytkowanych obecnie przez siły zbrojne. Pierwszym pojazdem zakupionym przez armię amerykańską został jednak M-ATV Oshkosha, firmy znanej wcześniej z produkcji ciężarówek [17].

Pomimo tego, że program M-ATV jest domeną Amerykanów, to armie wielu innych państw zgłaszają potrzebę posiadania opancerzonego pojazdu patrolowego o wysokiej mobilności i odporności balistycznej. W wojsku polskim procedurę przygotowania zakupu Lekkich Opancerzonych Samochodów Patrolowych uruchomiono w 2007 r. W jej ramach ogłoszono zapytanie w sprawie możliwości dostarczenia 120 sztuk takich pojazdów. Odpowiedziało 11 firm [18]. Wśród oferentów był Germaz, który wspólnie z Politechniką Wrocławską, w ramach konsorcjum przystąpił do realizacji finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego projektu celowego nr 381/BO/B. Jego celem była budowa prototypu pojazdu minoodpornego. W efekcie prowadzonych prac powstała całkowicie nowa konstrukcja, której nadano roboczą nazwę M-ATV G-10 (rys. 10).

Zasadnicze właściwości M-ATV Germaz to:

- odporność przeciwminowa na poziomie 4 STANAGU 4569;
- wysoka mobilność, osiągnięta dzięki podwoziu samochodu terenowego Unimog oraz samonośnemu nadwoziu, mieszczącemu 10 członków załogi;
- uniwersalność i wielozadaniowość pojazdu [7].



Rys. 10. Pojazd M-ATV G-10

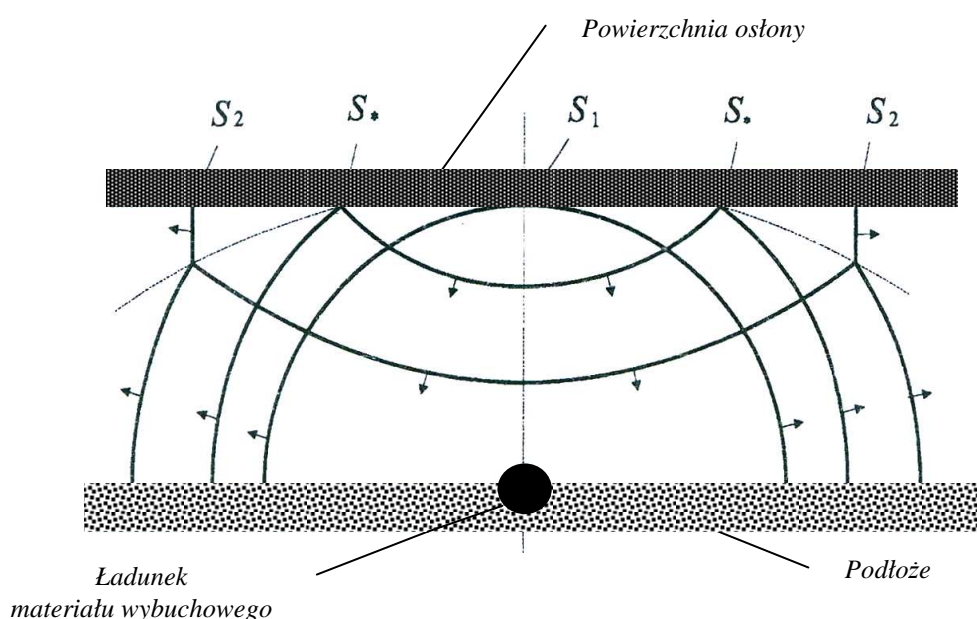
Źródło: *Materiały firmy Germaz*

Proponowany przez firmę Germaz pojazd został zbudowany w oparciu o samonośne nadwozie wykonane z blachy pancernej, zabudowane na ramie podwozia bazowego typu Mercedes Unimog U 500 w wersji militarnej. Ściany boczne nadwozia są pochylone na kształt „Diamond – Shape”, dzięki temu pojazd posiada zwiększoną od-

porność balistyczną na przebiecie pocisków [7]. Minoodporność konstrukcji zapewnia wyprofilowana w kształcie litery „V” podłoga przedziału załogowego zintegrowana z samonośnym nadwoziem.

### 3. METODY OKREŚLANIA PARAMETRÓW ODBITEJ FALI UDERZENIOWEJ

Zasadniczym zagrożeniem dla pojazdów wojskowych, poddanych oddziaływaniu zjawiska wybuchu, jest fala uderzeniowa, które rozprzestrzeniając się we wszystkich kierunkach, obciąża część denną i boczne powierzchnie pojazdu. W przypadku konstrukcji z płaskim dnem oraz ze względu na jego stosunkowo niewielką odległość (prześwit) od podłoża, obciążenie to polega na kolejno następujących po sobie odbiciach fali uderzeniowej od wymienionych powierzchni (rys. 11). W efekcie konstrukcja poddawana jest działaniu intensywnych, szybkozmiennych obciążeń, rozchodzących się wzdłuż jej powierzchni ze skończoną prędkością [3].

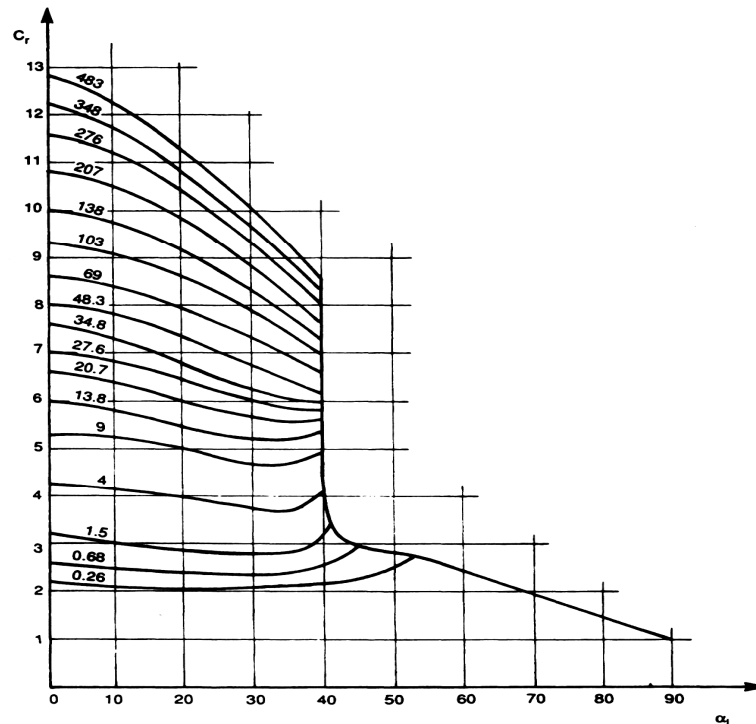


Rys. 11. Kolejne etapy odbicia kulistej fali uderzeniowej od płaskiej osłony

Źródło: Borkowski W., Rafa J., Łęgowski Z., Rybak P., *Modelowanie propagacji powybuchowych fal uderzeniowych w przestrzeni ograniczonej dwiema sztywnymi płaszczyznami* [w:] „Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej” nr 11/1998, s. 90

W pracy [3] autorzy zauważają, że specyficzne cechy oddziaływania fali uderzeniowej wybuchu na konstrukcję wynikają z faktu, że z upływem czasu, w miarę jak fala rozchodzi się wzdłuż przeszkody, maleje ciśnienie na jej czole i jednocześnie rośnie kąt padania  $\alpha$  od zera (tzw. normalne padanie) aż do wartości bliskich  $90^\circ$  (padanie poślizgowe). W związku z tym dla wartości czasu  $t$  bliskich momentowi dotarcia fali pierwotnej do powierzchni odbijającej,  $0 \leq t \leq t^*$  (gdzie  $t^*$  oznacza pewną wartość krytyczną) odbicie ma charakter regularny, co oznacza, że padająca i odbita fala uderzeniowa przecinają się na powierzchni ścianki i przemieszczają się wzdłuż niej z tą samą prędkością jako stabilna konfiguracja fal. Dla dużych wartości kąta padania ten model oddziaływania nie może być realizowany (nie można spełnić wszystkich warunków przepływu w otoczeniu punktu odbicia) i dla  $t > t^*$  powstaje bardziej złożony nieregularny układ fal [3].

Najbardziej narażonymi pojazdami wojskowymi na obciążenie odbitą falą uderzeniową są te, które posiadają płaską część denną (równoległą) w stosunku do podłoża. W takim przypadku kąt padania fali uderzeniowej jest prostopadły do dna pojazdu i fala uderzeniowa ulega odbiciu. Zjawisko to powoduje wzrost wartości głównych parametrów fali jakimi są ciśnienie i impuls ciśnienia. Wartość ciśnienia odbitego może być wielokrotnie wyższa od ciśnienia na czole fali uderzeniowej padającej na przeszkodę. W pracy [2] określono, że może być ono większe od 2 do 8 razy w stosunku do ciśnienia fali swobodnej. Na rysunku 12 przedstawiono zależność współczynnika wzmocnienia ciśnienia  $C_r$  na czole fali uderzeniowej od kąta padania  $\alpha_1$  na przeszkodę (osłonę).



Rys. 12. Zależność współczynnika wzmocnienia  $C_r$  ciśnienia padającego podczas odbicia fali od kąta padania  $\alpha_1$

Źródło: Smith P.D., Hetherington J.G.: *Blast and Ballistic Loading of Structures*, Butterworth-Heinemann 1994, s. 49.

Wartość ciśnienia odbitej fali uderzeniowej znacznie maleje przy kącie padania  $\alpha_1$  większym niż  $40^\circ$ . Fakt ten ma zasadnicze znaczenie przy projektowaniu konstrukcji pojazdów MRAP, których większość posiada osłony w kształcie litery „V”, nachylnych w stosunku do podłoża pod kątem zbliżonym lub większym niż  $40^\circ$ . Dzięki takiemu rozwiązaniu fala uderzeniowa, która ulega odbiciu, trafiając w ukształtowaną w ten sposób osłonę (deflektor), zmienia swój kierunek, rozchodząc się na boki i po ponownym odbiciu od podłoża nie dociera do pojazdu.

Parametry odbitej fali uderzeniowej możemy określić teoretycznie, przy pomocy zależności umożliwiających jej obliczenie, eksperymentalnie oraz przy zastosowaniu symulacji numerycznych.



W literaturze istnieje szereg wzorów umożliwiających oszacowanie parametrów fali odbitej. W pracach [2, 10] do określania ciśnienia fali uderzeniowej zaproponowano następujące równanie:

$$p_o = p_c \left( 2 + \frac{6p_c}{p_c + 7p_1} \right) \quad (1)$$

gdzie:

$p_o$  – ciśnienie fali odbitej;

$p_c$  – ciśnienie fali swobodnej;

$p_1$  – ciśnienie powietrza.

Inne wzory empiryczne do obliczenia maksymalnego nadciśnienia oraz impulsu całkowitego odbitej fali uderzeniowej dla ładunków trotylowych zaproponowano w pracy [22]:

$$\Delta p_r = \frac{8\Delta p_i^2 + 1,4\Delta p_i}{\Delta p_i + 0,7} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

$$I_r = A \frac{\sqrt[3]{m_T^2}}{R} \text{ [MP x s]} \quad \bar{R} \geq 0,5 \quad (3)$$

gdzie:

$\Delta p_r$  – maksymalne nadciśnienie fali odbitej;

$I_r$  – impuls całkowity;

$A = (0,49 \div 0,59) 10^{-3} \text{ MPa s m/kg}^{2/3}$ ;

$R$  – odległość od centrum ładunku [m];

$\Delta p_i$  – maksymalne nadciśnienie fali uderzeniowej swobodnej;

$m$  – masa ładunku trotylowego [kg].

Podczas przeprowadzania prób poligonowych, polegających na pomiarze parametrów odbitej fali uderzeniowej generowanej podczas detonacji różnego rodzaju ładunków wybuchowych, stosunkowo często wykorzystuje się czujniki ciśnienia (czujniki ciśnienia fali padającej oraz czujniki ciśnienia odbitego). W połączeniu z odpowiednio szybkimi rejestratorami pozwalają one wyznaczyć przebieg w czasie zmian ciśnienia w ośrodku wynikających z przejścia fali w wybranym punkcie przestrzeni [20].

Do określania zasadniczych parametrów fali uderzeniowej odbitej od przeszkody przeznaczone są czujniki ciśnienia odbitego, zazwyczaj wmontowywane w płaskie powierzchnie, w których chcemy zmierzyć spiętrzenie fali. Na rysunku 13 przedstawiono zaprojektowany do tego celu czujnik firmy PCB Piezotronics serii 134.



Rys. 13. Czujnik ciśnienia odbitej fali uderzeniowej firmy PCB Piezotronics serii 134

*Źródło: Materiały reklamowe firmy PCB Piezotronics*

Podstawowe parametry czujnika serii 134 to:

- zakres pomiarowy ciśnienia od 6,9 do 336 MPa;
- czułość 1,25 pC/psi;
- rozdzielczość czasowa  $\leq 0,2$  [ $\mu$ s];
- temperatura otoczenia pomiaru -  $0^{\circ} \div 49^{\circ}$ C.

Coraz większą rolę w badaniach energii fali uderzeniowej wybuchu odgrywają symulacje komputerowe. Umożliwiają one obniżenie kosztów i zwiększenie efektywności badań eksperymentalnych. Zastosowanie symulacji numerycznej procesów, będących wynikiem obciążenia impulsowego typu uderzenie lub fala uderzeniowa, pozwala na znaczne skrócenie czasu projektowania osłon pojazdów minoodpornych. Należy jednak pamiętać, że wyniki symulacji numerycznej mogą być niewiarygodne w przypadku braku weryfikacji eksperymentalnej [2].

W symulacji numerycznej dynamiki struktury obciążonej falą uderzeniową istotne znaczenie ma przyjęcie odpowiedniego modelu odkształcenia materiału, czyli przyjęcia modelu zależności naprężenia od prędkości odkształcenia (stress strain rate laws). W programach komercyjnych takich, jak PAM-Crash, LS-Dyna w zależności od zastosowanego materiału mamy do wyboru kilka modeli, np. Coopera-Symondsa, Johnsona-Cooka, Jonesa, Krupkowskiego, a ostatnio często polecany model Rusinka-Klepaczko [19, 20].

## **PODSUMOWANIE**

Znajomość oddziaływania zjawiska wybuchu na pojazdy minoodporne ma zasadnicze znaczenie w procesie projektowania nowych konstrukcji, wprowadzanych na wyposażenie wojska. Zapoczątkowany w 2007 r. w Stanach Zjednoczonych program MRAP, dzięki któremu żołnierze walczący w Iraku i Afganistanie otrzymali pojazdy chroniące ich przed minami i improwizowanymi urządzeniami wybuchowymi, ulega ewolucji. Przyczyną tego jest między innymi zmieniająca się taktyka działania ugrupowań terrorystycznych, które próbując skutecznie eliminować pojazdy o zwiększonej minoodporności, stosują ładunki wybuchowe, trudne do neutralizacji o dużej masie sięgającej w niektórych przypadkach kilkadziesiąt lub kilkaset kilogramów, detonowane w taki sposób, aby uniemożliwić wykorzystanie pojazdu w dalszej eksploatacji.

Innym powodem poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych w pojazdach o podniesionej wytrzymałości na działanie fali uderzeniowej wybuchu jest zwiększenie ich mobilności w trudnym terenie. Z tego też powodu w 2008 r. został wprowadzony projekt o nazwie MRAP All-Terrain Vehicle (M - ATV). Prowadzone prace badawcze nad udoskonaleniem konstrukcji pojazdów MRAP zmierzają zatem z jednej strony do ograniczenia oddziaływania zjawiska wybuchu, z drugiej strony do poprawienia trakcji pojazdu w niesprzyjających warunkach terenowych.

Wśród sposobów zwiększania odporności pojazdów na eksplozje min i IED zasadnicze znaczenie ma odpowiednie kształtowanie osłon. W większości przypadków przyjmują one kształt litery „V” lub „U” (Dingo 2). Takie ukształtowanie w połączeniu z odpowiednio dużym prześwitem pozwala skutecznie rozpraszać energię generowaną przez wybuch falą uderzeniową oraz zapobiega obciążeniu podzespołów wozu falą odbitą od podłoża, która w zależności od rodzaju gruntu (piasek, glina) może przybierać różne wartości.

## LITERATURA

- [1] Bączyk N., *Niezniszczalne* [w:] „Polska Zbrojna”, 13/2008, Warszawa 2008, s. 43-45.
- [2] Barnat W., *Wybrane problemy energochłonności nowych typów paneli ochronnych obciążonych falą wybuchu*, Warszawa 2010, s. 80.
- [3] Borkowski W., Rafa J., Łęgowski Z., Rybak P., *Modelowanie propagacji powybuchowych fal uderzeniowych w przestrzeni ograniczonej dwiema sztywnymi płaszczyznami* [w:] „Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej”, nr 11/1998, s. 74.
- [4] Buslik M., *Saperski pojazd minoodporny Buffalo*, [w:] „Armia”, Warszawa 2009, 2/2009, s. 56.
- [5] Hołdanowicz G., *Czas kupić pojazdy na misje* [w:] „Raport” 9/2007, Warszawa 2007, s. 40-45.
- [6] Iluk A., *Porównanie dwóch koncepcji pojazdu minoodpornego opartego na komercyjnym podwoziu*, Konferencja Odporność Udarowa Konstrukcji, Pisz 2009.
- [7] Iluk A., *Koncepcja opancerzonego samochodu patrolowego*, [w:] „Górnictwo Odkrywkowe”, 4/2010, Wrocław 2010, s. 116-120.
- [8] Kuczaj A. K., *Modelling of detonation products scattering from a cylindrical explosive charge*, [online]. [dostęp: 12.09.2010]. Dostępny w Internecie: [http://www.kuczaj.pl/pages/msc/akuczaj\\_MastersThesis.pdf](http://www.kuczaj.pl/pages/msc/akuczaj_MastersThesis.pdf), Warszawa 1999.
- [9] Kupidura P., *Charakterystyka pojazdów MRAP Cougar oraz wnioski z ich eksploatacji w WP* [w:] „Problemy Techniki Uzbrojenia”, 2/2009, Zielonka 2009, s. 19-26.
- [10] Luccioni B., Ambrosini D., *Blast load assessment using hydrocodes* [w:] „Mecanica Computacional, vol XXIV/2005 s. 335.
- [11] Majsak D., *MRAP-y przeciw fugasom*, [online]. [dostęp: 20.09.2010]. Dostępny w Internecie: [http://www.kagero.pl/index.php?option=com\\_content&view=article&id=60:mrapp-y-przeci-fugasom&catid=35:armia&Itemid=29](http://www.kagero.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=60:mrapp-y-przeci-fugasom&catid=35:armia&Itemid=29).
- [12] Milcar E., *Dingo*, [online]. [dostęp: 12.09.2010]. Dostępny w Internecie: <http://www.motocaina.pl/DINGO,1,915,1971,1.html>

- [13] *Mine protection vehicles*, [online]. [dostęp: 01.10.2010]. Dostępny w Internecie: <http://www.gichd.org/fileadmin/pdf/publications/MDE-Cat-2010/MDE-Cat-2010-Section3.pdf>.
- [14] *MRAP Vehicle Survives 500lb IED*, [online]. [dostęp: 01.10.2010]. Dostępny w Internecie: <http://www.garywise.com/index.php?Itemid=34&id=229&option=comcontent&task=view>.
- [15] Multarzyński M., J., *Dingo 2* [w:] „Nowa Technika Wojskowa”, 5/2010, Warszawa 2010, s. 2-8.
- [16] Multarzyński M., J., *Amerykańskie Cougary dla PKW Afganistan* [w:] „Nowa Technika Wojskowa”, 10/2008, Warszawa 2008, s. 2-7.
- [17] Multarzyński M., J., *M-ATV czyli „terenowy” MRAP*, [w:] Nowa technika wojskowa”, 8/2009, Warszawa 2009, s. 24-28.
- [18] Multarzyński M., J., *Pierwszy M-ATV z Wrocławia*, [w:] „Nowa technika wojskowa”, 10/2010, Warszawa 2010, s. 62-68.
- [19] Rusinek A., Klepaczek J. R., *Shear testing of sweet steel at wide range of strain rate and a constitutive relation with strain-rate and temperature dependence of the flow stress*. Int. J. Plasticity, 17, 2001, s. 87-115.
- [20] Saska P., Czmochowski J., Iluk A., *Przegląd sposobów wyznaczania parametrów fali uderzeniowej wybuchu* [w:] „Górnictwo Odkrywkowe”, 4/2010, Wrocław 2010, s. 187-192.
- [21] Szudrowicz M., *Skuteczność opancerzenia pojazdów* [w:] „Biuletyn WITU”, 94/2005, Zielonka 2005, s. 80.
- [22] Trzciniński W. A., Paszula J., Trębiński R., *Badanie charakterystyk fali podmuchowej generowanej detonacją cylindrycznego ładunku kruszącego materiału wybuchowego* [w:] „Biuletyn WAT”, 2/2003, Warszawa 2003, s. 51.
- [23] Włodarczyk E., *Podstawy detonacji cz. 1*, Warszawa 1995, s. 17.
- [24] Włodarczyk E., *Wstęp do mechaniki wybuchu*, Warszawa 1994, s. 13-14.
- [25] [online]. [dostęp: 01.10.2010]. Dostępny w Internecie: <http://www.gardenstatesole.org/events/mar08brief.pdf>.

## **PROBLEMS OF EXPLOSION INFLUENCE ON MRAP MINE-RESISTANT VEHICLES**

### **Summary**

*MRAP mine-resistant vehicles are still endangered by attacks with mines and improvised explosive devices, despite their increased resistance to blasts. This has led to the situation in which numerous science institutions are carrying out research on new design elements which will minimise this kind of threat. The article presents threats caused by an explosion and its influence on vehicles. Moreover, the authors describe design elements of MRAP vehicles which im-*



*prove mine resistance. The authors also define threats resulting from the load of the reflected blast wave. The methods of its parameters determination are also presented.*

**Key words:** *mine-resistant vehicles, MRAP, explosion, blast wave*

*Artykuł recenzował: dr hab. inż. Tadeusz SMOLNICKI, prof. nadzw. PWr*