

**Edyta KRZYSTAŁA\***  
**Arkadiusz MEŻYK**  
**Sławomir KCIUK**

## **ANALIZA ZAGROŻENIA ZAŁOGI W WYNIKU WYBUCHU ŁADUNKU POD KOŁOWYM POJAZDEM OPANCERZONYM**

*Zapewnienie odpowiedniej ochrony przeciwminowej załogi staje się podstawowym celem nowoczesnych konstrukcji pojazdów wojskowych. Istotą rozwoju metod i środków ochrony przeciwminowej jest identyfikacja wpływu oddziaływania fali uderzeniowej wybuchu na konstrukcję pojazdu oraz jego załogę. Informacje na temat przeciążeń pochodzących od oddziaływania wybuchu min lądowych na człowieka są trudno dostępne lub niewystarczająco szczegółowe. Podstawą do ich pozyskiwania staje się prowadzenie badań eksperymentalnych oraz modelowych. W artykule zaprezentowano podstawowe problemy i zagrożenia załogi w wyniku eksplozji min lądowych oraz IED stosowanych jako zasadnicze środki walki w obecnych konfliktach zbrojnych. Na podstawie badań literatury określono części ciała załogi najbardziej narażone na impulsowe wymuszenia wynikające z oddziaływania fali uderzeniowej wybuchu na pojazdy specjalne. Ponadto, zaprezentowano metodykę oraz przykładowe wyniki badań eksperymentalnych identyfikujących wpływ wymuszeń impulsowych na załogę w charakterystycznych antropometrycznych punktach ciała. Przedstawiono również kryteria oceny urazów oraz poziomu zagrożenia załogi w wyniku eksplozji ładunków wybuchowych pod pojazdem. Celem tak kompleksowej analizy wpływu fali uderzeniowej wybuchu na pojazdy specjalne oraz ich załogę jest rozwój nowoczesnych i skutecznych środków ochrony.*

**Słowa kluczowe:** *ochrona załogi pojazdów specjalnych, miny lądowe, kryteria oceny urazów, badania doświadczalne*

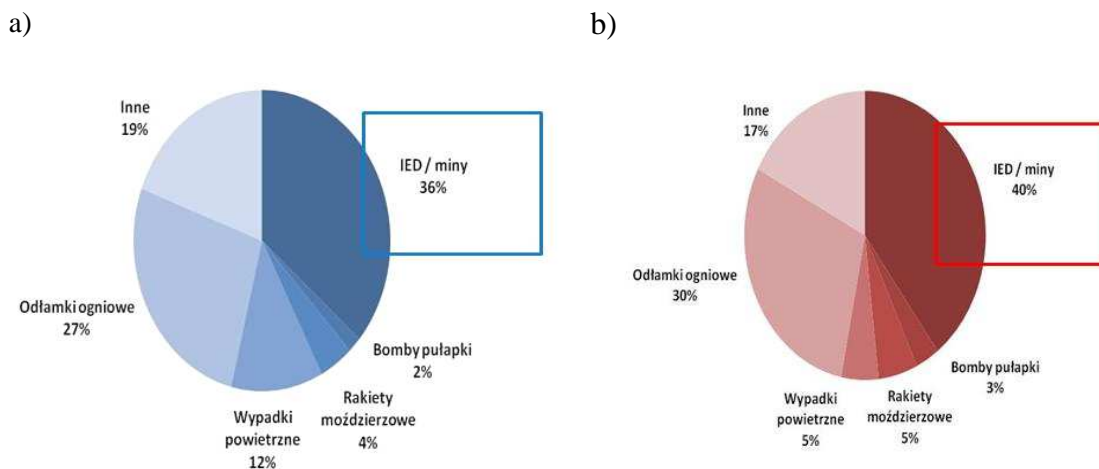
### **WSTĘP**

Obecnie najskuteczniejszą, śmiertcionołą bronią, stosowaną w asymetrycznych konfliktach zbrojnych są miny lądowe, improwizowane urządzenia wybuchowe (IED) oraz pociski formowane wybuchowo (EFP). Najczęściej zanotowanymi - ok. 40% przyczynami

---

\* mgr inż. Edyta KRZYSTAŁA, prof. dr hab. inż. Arkadiusz MEŻYK, dr inż. Sławomir KCIUK – Katedra Mechaniki Stosowanej Politechniki Śląskiej

śmierci żołnierzy walczących w Iraku i Afganistanie w latach 2001 – 2010 stanowią miny lądowe oraz IED ( rys.1) [8, 10, 11].



Rys. 1. Przyczyny śmierci żołnierzy walczących w Afganistanie i Iraku w latach 2001-2010:  
a) w Iraku, b) w Afganistanie

Źródło: Opracowano na podstawie [14, 3]

Pojazdy wojskowe wykorzystywane w obecnych konfliktach zbrojnych powinny zatem zapewniać odpowiednią ochronę balistyczną dostosowaną do nowych zagrożeń (rys. 2). Dokumentem klasyfikującym i standaryzującym poziomy ochrony balistycznej pojazdów opancerzonych jest norma STANAG 4569. Istotą tego dokumentu jest standaryzacja poziomu ochrony pojazdów wojskowych poprzez ocenę zagrożenia życia załogi [4, 8, 9, 10, 11].



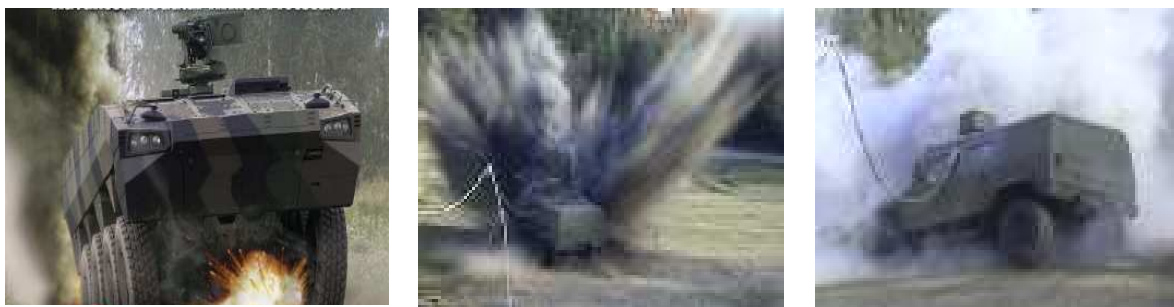
Rys. 2. Zagrożenia kołowych transporterów opancerzonych występujące w obecnych konfliktach zbrojnych

Źródło: Opracowano na podstawie [7]

## 1. ANALIZA WPŁYWU FALI UDERZENIOWEJ WYBUCHU NA KOŁOWE POJAZDY OPANCERZONE ORAZ ICH ZAŁOGĘ

Konstrukcja pojazdu znajdującego się w strefie wybuchu miny przeciwpancernej lub IED narażona jest na silne oddziaływanie fali uderzeniowej. W momencie wybuchu miny tworzy się fala uderzeniowa, która rozchodzi się we wszystkich kierunkach z prędkością większą niż prędkość dźwięku. Fala ta, otaczając kadłub pojazdu, oddziałuje na jego elementy, powodując przeciążenia wewnątrz kabiny. Po detonacji ładunku wybuchowego, w zależności od jego masy i rodzaju inicjacji, powstające połączenie fali uderzeniowej wybuchu oraz odłamków powoduje impulsowe obciążenia dna pojazdu. Impuls ten w kilka milisekund wywołuje wysokie przyspieszenie powodując urazy a nawet śmierć załogi [4, 9].

Wybuch miny przeciwpancernej pod kadłubem pojazdu może powodować następujące skutki: efekt lokalny, efekt globalny, wyrzucenie pojazdu oraz efekt wtórny, czyli jego opadanie (rys. 3) [3]. Efekt lokalny powstaje po inicjacji wybuchu pod pojazdem. Tworząca się fala uderzeniowa wybuchu uderza w dno pojazdu po około 0,5 ms. Następnie odbijając się powoduje miejscowe (lokalne) impulsowe przeciążenia. Po około 5 ms po detonacji następuje odkształcenie dna pojazdu, a uginająca się płyta powoduje w następstwie deformacje ścian bocznych konstrukcji pojazdu [11, 6].



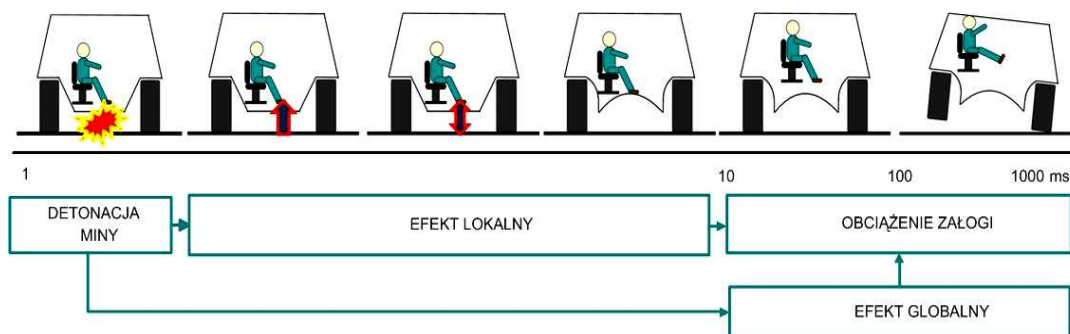
Rys. 3. Następstwa wybuch miny przeciwpancernej pod kadłubem kołowego pojazdu opancerzonego

*Źródło: Opracowano na podstawie [7]*

W przypadku efektu globalnego odbijająca się fala wybuchu powoduje wyrzucenie całego pojazdu. Efekt globalny następuje po około 10 do 20 ms po detonacji. Pojazd po osiągnięciu maksymalnej wysokości wyrzutu, która zależy między innymi od masy pojazdu oraz wielkości materiału wybuchowego, następuje opadanie pojazdu po około 100 do 300 ms. Skutkiem eksplozji miny lub prowizorycznego urządzenia wybuchowego w pobliżu pojazdu może być również wywrócenie pojazdu [6, 11, 8].

Stopień zagrożenia załogi zależy od jej odległości od miejsca detonacji, konstrukcji pojazdu, a w szczególności konstrukcji dna kadłuba od zamocowania i rodzaju siedzisk [12]. Istotny wpływ ma także aranżacja wnętrza przedziału załogowego oraz sposób przewożenia i zamocowania wyposażenia osobistego. Podczas wybuchu najbardziej narażone na urazy są kończyny dolne. Spowodowane jest to najbliższym położeniem od miejsca detonacji i oddziaływaniem podłogi. Eksplozja powoduje wyrzucenie ciała w górę, w wyniku siły oddziaływania siedziska, a to skutkuje urazami głowy oraz kręgosłupa, prowadzącymi często do kalectwa, a nawet

śmierci. Uproszczony schemat procesu obciążenia załogi w trakcie wybuchu przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wpływ wybuchu miny lądowej na załogę pojazdów specjalnych

Źródło: Opracowano na podstawie [6, 8, 11]

## 2. METODYKA MINIMALIZACJI ZAGROŻENIA ZAŁOGI W WYNIKU EKSPLOZJI MIN LĄDOWYCH POD POJAZDAMI KOŁOWYMI

Charakterystyczną cechą obecnych konfliktów zbrojnych jest stosowanie jako zasadniczego środka walki min lądowych oraz improwizowanych urządzeń wybuchowych (IED). Nowoczesne pojazdy specjalne powinny charakteryzować się odpowiednim stopniem ochrony załogi minimalizujący skutki eksplozji ładunków wybuchowych pod pojazdem. Stosowanie przez rebeliantów improwizowanych urządzeń wybuchowych uniemożliwia oszacowanie skutków ich działania ze względu na niepowtarzalność oraz nieprzewidywalność wielkości ładunku. Jeśli analizę zagrożenia zawężać do ładunków wybuchowych w postaci min lądowych, to znając ich dokładne parametry, istnieje możliwość przeciwdziałania skutkom i następstwom ich eksplozji zgodnie ze STANAG 4569. Podstawą rozwoju nowych metod i środków minimalizujących skutki wybuchu min lądowych na kołowe pojazdy specjalne jest w pierwszej kolejności identyfikacja zagrożenia załogi. Ponieważ obecnie informacje na temat przeciążeń wynikające z oddziaływania wybuchu min lądowych na człowieka są trudno dostępne lub niewystarczająco szczegółowe, projektowanie nowych rozwiązań ochrony przeciwminowej poparte powinno być badaniami eksperymentalnymi oraz symulacjami numerycznymi. Ważnym aspektem projektowania nowych środków ochrony przeciwminowej jest wykorzystanie efektu synergii metod badawczych w celu uzyskania optymalnych cech geometrycznych i zapewnienia zadanych parametrów eksploatacyjnych (rys. 5) [8].

Złożona analiza odporności pojazdów kołowych na wybuchy min lądowych powinna zawierać następujące etapy:

- analizę problemu i opracowanie założeń;
- opracowanie dopuszczalnych kryteriów urazu załogi na podstawie dostępnych dokumentów standaryzacyjnych;
- modelowanie wirtualne;
- badania doświadczalne;
- obliczenia numeryczne w zakresie modeli stereomechanicznych i dynamicznych;

- integracja metod;
- optymalizacja rozwiązań konstrukcyjnych.

Poszczególne etapy badań nie są realizowane sekwencyjnie, lecz równolegle, a ponadto występują wzajemne sprzężenia pomiędzy nimi.



Rys. 5. Etapy identyfikacji oddziaływania fali uderzeniowej wybuchu miny lądowej na załogę pojazdów specjalnych

*Źródło: Opracowanie własne*

Ocena zagrożenia życia i zdrowia załogi w wyniku wymuszeń impulsowych przenoszonych poprzez wzajemne oddziaływanie ciała żołnierza i siedziska powinna opierać się na złożonej i kompleksowej analizie omawianego zjawiska ze względu na niejednokrotnie nieprzewidywalny charakter omawianego zjawiska.

### 3. OCENA ZAGROŻENIA ZAŁOGI W WYNIKU EKSPLOZJI ŁADUNKU WYBUCHOWEGO

Podstawą rozwoju nowoczesnych środków ochrony przeciwminowej powinna być w pierwszej kolejności identyfikacja oddziaływania fali wybuchu nie tylko na strukturę pojazdu ale przede wszystkim na załogę. Badania identyfikujące przeciążenia działające na załogę pojazdów wojskowych prowadzone są według standardów ochrony przeciwminowej zawartych w dokumencie HFM – 090/TG-25. Dokument ten zawiera metodologię przeprowadzania badań, wykaz niezbędnej aparatury jak również sposoby weryfikacji zagrożenia załogi spowodowanej wybuchem min lądowych.

Standardowe kryteria oceny zagrożenia życia załogi dotyczą kończyn dolnych, odcinka piersiowo – lędźwiowego kręgosłupa – DRIZ (Dynamic Response Indeks), odcinka szyjnego kręgosłupa i głowy, klatki piersiowej oraz organów wewnętrznych [4, 11].

Wśród kryteriów najczęściej stosowanym do oceny stopnia urazu załogi w wyniku wybuchu min lądowych jest wskaźnik DRI. Wskaźnik ten informuje o maksymalnym ścisnieniu odcinka piersiowo – lędźwiowego kręgosłupa na skutek przyspieszenia przenieszonego przez siedzisko. DRI bazuje na modelu o jednym stopniu swobody opisującym dynamikę ciała człowieka poddanego przeciążeniom w kierunku osi z (rys. 6) [11, 8, 1].

Równanie dla przedstawionego modelu jest następujące:

$$\ddot{z}(t) = \ddot{\delta} + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n^2 \cdot \delta \quad (1)$$

gdzie:

$\ddot{z}(t)$  - przyspieszenie w kierunku pionowym pochodzące od oddziaływania od siedziska,

$\delta$  - względne przemieszczenie systemu  $\delta = \xi_1 - \xi_2$  oraz  $\delta > 0$

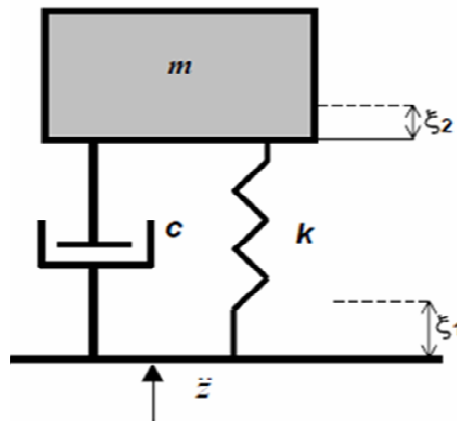
$\zeta$  - współczynnik tłumienia systemu wynoszący 0,224

$\omega_n$  - częstość drgań własnych systemu wynosząca 52,9 [rad/s] [11].

Wskaźnik DRI obliczany jest dla maksymalnego względnego przemieszczenia  $\delta_{\max}$  częstości drgań własnych i przyspieszenia ziemskiego  $g$ :

$$DRI = \frac{\omega_n^2 \cdot \delta_{\max}}{g} \quad (2)$$

Zgodnie ze skalą AIS, dla dopuszczalnego 10% ryzyka urazu, wskaźnik DRI powinien być nie większy niż 17,7.



Rys. 6. Schemat modelu do obliczania DRI

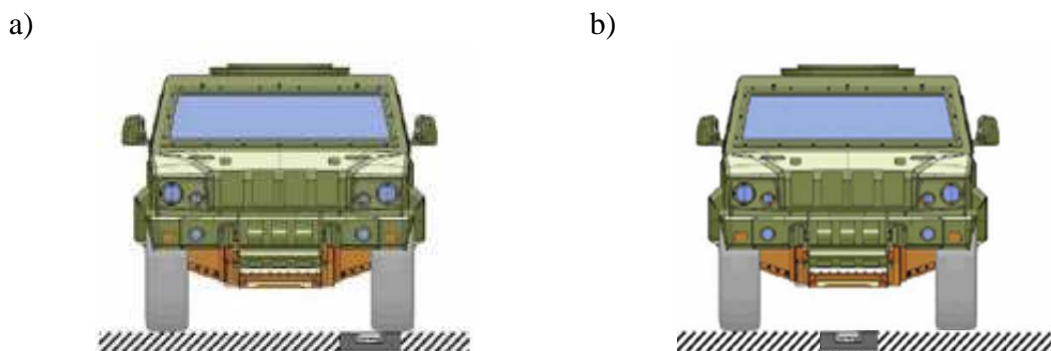
Źródło: Opracowano na podstawie [11]

Przedstawione kryteria urazów stosowane są do oceny zagrożenia życia załogi w wyniku oddziaływania fali uderzeniowej wybuchu na konstrukcję pojazdów oraz weryfikacji nowoczesnych środków ochrony przeciwwinowej pojazdów specjalnych.

#### 4. POLIGONOWE BADANIA EKSPERYMENTALNE ODPORNOŚCI POJAZDU KOŁOGO NA WYBUCH ŁADUNKU

Efektywność zastosowanych środków ochrony żołnierza przed skutkami wybuchów należy zweryfikować za pomocą wyników badań doświadczalnych w warunkach poligonowych. Badania takie, z wykorzystaniem rzeczywistych pojazdów, stają się nieodłącznym etapem procesu projektowo - konstrukcyjnego współczesnych pojazdów wojskowych i mają dowodzić ich niezawodności i skuteczności zastosowanych technik ochronnych przed wybuchami w wyniku ich eksploatacji [8].

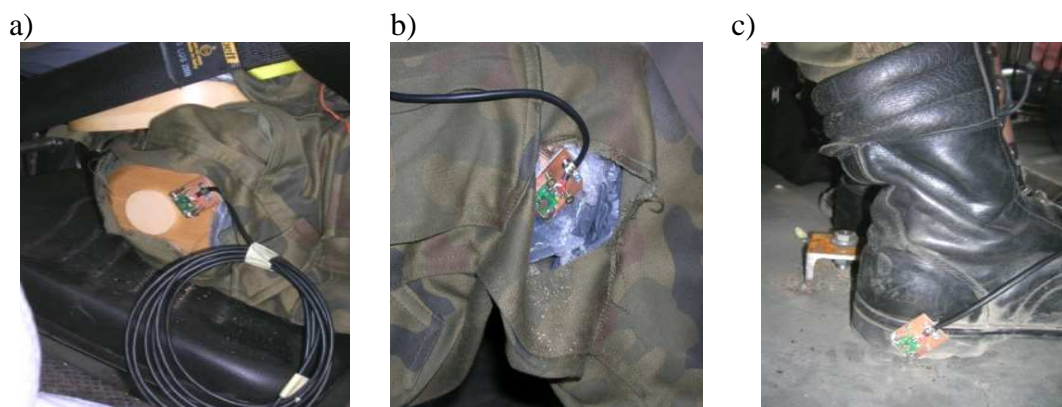
Dzięki współpracy interdyscyplinarnego zespołu badawczego przeprowadzono poligonowe badania eksperymentalne, których celem było zweryfikowanie odporności na wybuchy kołowego pojazdu specjalnego. W trakcie badań wykonano próby, w wyniku których doszło do wybuchu 10 kg ładunku TNT pod kołem oraz pod środkiem kadłuba (rys. 7).



Rys. 7. Rozmieszczenie ładunku wybuchowego w trakcie przeprowadzanych poligonowych badań eksperymentalnych: a) pod kołem, b) pod środkiem kadłuba

*Źródło: Opracowano na podstawie [7]*

W ramach omawianych badań poligonowych dzięki zamocowaniu czujników przyspieszeń w charakterystycznych punktach na manekinie podjęto się identyfikacji przeciążenia załogi w najbardziej narażonych częściach ciała. Pomiarom podlegały pionowe przyspieszenia oddziałujące na kończyny dolne oraz miednicę (rys. 8).



Rys. 8. Rozmieszczenie czujników przyspieszeń w charakterystycznych antropometrycznych punktach ciała żołnierza: a) miednica, b) udo, c) stopa

*Źródło: Opracowanie własne*

W celu zarejestrowania sygnałów przyspieszeń w wybranych punktach ciała załogi i określeniu parametrów biomechanicznych załogi zastosowano dedykowany, autonomiczny system pomiarowy. Rejestrator przyspieszeń opracowany w Katedrze Mechaniki Stosowanej, jest obecnie przedmiotem zgłoszenia patentowego. Na rysunku 9a i 9b przedstawiono poglądowe wyniki przeprowadzonych prób poligonowych.

Wyniki badań doświadczalnych identyfikujące przeciążenia załogi w charakterystycznych antropometrycznych punktach ciała żołnierza posłużą do wyznaczenia współczynników zgodnie z HFM – 090/TG-25 określających poziom

ochrony załogi. Przebiegi czasowe przyspieszeń zarejestrowane w miednicy zastosowane będą do wyznaczenia współczynnika DRI. W dalszej kolejności wyniki te posłużą jako dane wejściowe do badań modelowych oraz symulacji numerycznych.

Z przeprowadzonych badań wynika również, że wysoka temperatura i ciśnienie powstające wewnątrz przedziału załogowego prowadzą do ciężkich urazów a nawet śmierci. Zatem dalsze badania eksperymentalne należy rozszerzyć o identyfikację wpływu fali uderzeniowej wybuchu na klatkę piersiową oraz organy wewnętrzne.

a)



b)

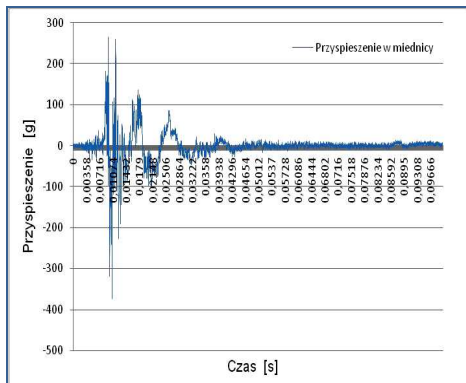


Rys. 9. Skutki eksplozji ładunku wybuchowego pod: a) kołem, b) środkiem kadłubem

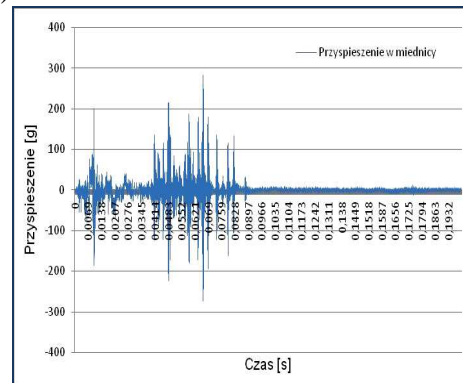
Źródło: Opracowanie własne

Przykładowe przebiegi pionowych przyspieszeń przedstawiono na rysunku 10.

a)



b)



Rys. 10. Zarejestrowane przebiegi przyspieszeń pionowych wyniku eksplozji ładunku: a) pod kołem, b) pod środkiem kadłuba

Źródło: Opracowanie własne

## PODSUMOWANIE

Struktura kadłuba pojazdu wykonana z certyfikowanych, znormalizowanych materiałów nie jest obecnie wystarczająca ażeby spełnić wszystkie wymagania osłony balistycznej. Istnieje potrzeba zapewnienia dodatkowej ochrony pasażerów, szczególnie przed wybuchem min i urządzeń wybuchowych. Zapewnienie wysokiego poziomu ochrony załogi jest możliwe dzięki zastosowaniu jednocześnie kilku elementów



konstrukcyjnych, takich jak: deflektory – V denne, bezpieczny przedział załogi z dodatkowym podwójnym dnem, podkładki antywybuchowe dla deflektora oraz przedziału załogowego, specjalne siedziska, jak również wielopunktowe pasy bezpieczeństwa dla członków załogi.

Wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych stanowiąc będą dane do obliczenia wskaźników oceny zagrożenia życia załogi pojazdów w badaniach modelowych. Celem tak kompleksowej analizy obejmującej wpływ fali uderzeniowej wybuchu na pojazdy specjalne oraz ich załogę jest rozwój nowoczesnych i skutecznych środków ochrony. Spełnienie kryteriów oraz założeń przedstawionych w artykule świadczyć będzie o bezpieczeństwie i niezawodności kołowych pojazdów opancerzonych współczesnego pola walki.

## LITERATURA

- [1] Bril A., Du Bois P., *Numerical Simulation of the critical blast wave of mines on APV's crew member*, [in:] 7<sup>th</sup> European LS – DYNA Conference, 2009.
- [2] Goldenhuys C., *The Future of Light and Medium Armour in the Land Operational Environment for the South African Army*, [in:] Conference Materials at 8th Annual Light and Medium Armoured Vehicles 2-6 February 2009 London, [online]. [dostęp: 2010]. Dostępny w Internecie: <http://www.dynamore.de/documents/papers/euro2009/J-I-02.pdf>.
- [3] *Iraq Index, Tracking Variables of Reconstruction & Security in Post-Saddam Iraq*, [online]. [dostęp: 20.03.2010]. Dostępny w Internecie: <http://www.brookings.edu/saban/~media/Files/Centers/Saban/Iraq%20Index/index.pdf>.
- [4] Kania E., *„Projektowanie środków ochrony przeciwminowej pojazdów specjalnych*, [w:] „Górnictwo Odkrywkowe” 4/2010, Wrocław 2010, s. 272 – 276.
- [5] Kania E., *Ochrona przeciwminowa załogi pojazdów specjalnych*, [w:] „Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Stosowanej Zakładu Mechaniki Ogólnej i Biomechaniki”, Aktualne problemy biomechaniki nr 4/2010, w druku, Gliwice 2010, s. 289-294.
- [6] Kania E., *Development tendency of landmine protection devices*, [in:] “Modelling and Optimization of Physical Systems”, 8, Gliwice 2009, pp. 67-72.
- [7] Materiały informacyjne firmy IBD Ingenieurbüro, [online]. [dostęp: 2010]. Dostępny w Internecie: [www.ibd-deisenroth.de](http://www.ibd-deisenroth.de).
- [8] Męzyk A., *Nowoczesne technologie w projektowaniu pojazdów specjalnych*, 66 Inauguracja Roku Akademickiego w Politechnice Śląskiej, Gliwice 2010.
- [9] Mikulic D., Stojakovic V., Gasparic T., *Modelling of all protected vehicles*, [in:] 4th DAAAM International Conference on Advanced Technologies for Developing Countries, September 21 – 24, 2005, Slavonski Brod, Croatia.
- [10] Reinecke J. D., Snyman I. M., Ahmed R, Beetge F. J, *Vehicle landmine protection validation testing*, A CSIR Defence, Peace, Safety and Security, PO Box 395, Pretoria, 0001.

- [11] RTO Technical Report TR – HJN - 090 TECHNICAL REPORT TR-HFM-090 *Test Methodology for Protection of Vehicle Occupants against Anti-Vehicular Landmine Effects*.
- [12] Williams K., Fillion – Gourdeau F., *Numerical simulation of Light Armoured Vehicle Occupant Vulnerability to Anti Vehicle Mine Blast*, [in:] 7th International LS – DYNA Users Conference.
- [13] Williams K., Poon K., *A numerical analysis of the effect of surrogate anti-tank mine last on the M113, DREV TM-2000-007*, Defence Research Establishment Centre de Recherches pour la defence valcartier, Quebec, March 2004 Canada.
- [14] [online]. [dostęp: 2010]. Dostępny w Internecie: [www.icasulaities.org](http://www.icasulaities.org)

## **ANALYSIS OF THREAT TO CREW POSED BY EXPLOSION OF CHARGE PLACED UNDER WHEELED ARMOURED VEHICLE**

### **Summary**

*Provision of proper protection against landmines is a major aim of modern military vehicle designs. The point of developing the methods and means of countermine protection is to identify the shock wave impact on a vehicle construction and its crew. Information on overload coming from landmine explosions on a person are strictly confidential or not detailed enough. The basis to obtain them is to carry out experimental and numerical tests. This article presents basic issues and threats to crews as a result of landmine, IED or EFP explosions carried out by terrorists. The literature published has helped the authors to identify the main parts of body prone to the impulse load of a shock wave explosion on a wheeled military vehicle. The methodology and sample results of experimental tests identifying the shock wave load on a vehicle and its crew in a characteristic anthropometrics points of body are presented as well. Injury criteria and crew threat levels resulting from explosive load under a vehicle and its close area are outlined. The aim of such a complex analysis of shock wave load over wheeled military vehicles and their crews is the development of modern and effective protection devices.*

**Key words:** *protection of special vehicles crew, landmines, injury assessment criteria, experimental tests*

*Artykuł recenzował: prof. dr. hab. inż. Eugeniusz ŚWITOŃSKI*