PROTECTION OF OCCUPANTS MILITARY VEHICLES AGAINST MINE THREATS AND IMPROVISED EXPLOSIVE DEVICES (IED)

OCHRONA ZAŁOGI POJAZDU WOJSKOWEGO PRZED WYBUCHEM MIN I IMPROWIZOWANYCH URZĄDZEŃ WYBUCHOWYCH (IED)

Grzegorz Sławiński, Tadeusz Niezgoda

Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego,
e-mail: grzegorz.slawinski@wat.edu.pl

Abstract: Risk of danger for military vehicle crew life and health increases when explosion under vehicle appears. Consideration of this phenomenon in the aspect of soldiers safety is based on coupled analysis of soldier's body, car seat and vehicle construction elements. As the effect of blast wave interaction the vibrations of construction and passenger body acceleration appear. In the paper the analysis of improvised explosive device (IED) detonation under the military vehicle was carried out in the aspect of soldier neck spine injury. The analysis was made with the usage of numerical methods in LS Dyna computer code and considered the changeable values of displacement and acceleration registered during detonation.

Keywords: Improvised Explosive Device (IED), blast wave, numerical simulations

Streszczenie: W wyniku eksplozji pod pojazdem militarnym wzrasta ryzyko zagrożenia życia i zdrowia załogi. Rozpatrywanie tego zdarzenia pod kątem bezpieczeństwa żołnierzy sprowadza się do złożonej analizy wzajemnych oddziaływań ciała żołnierza, siedziska i elementów konstrukcji pojazdu. W efekcie działania fali uderzeniowej występują oddziaływania powodujące drgania wynikające z wibracji konstrukcji oraz przyspieszenie ciała pasażera. W pracy podjęto próbę analizy wpływu eksplozji improwizowanego ładunku wybuchowego (IED) pod pojazdem militarnym na ryzyko powstania urazów kręgosłupa szyjnego żołnierzy. Analiza została wykonana z wykorzystaniem metod numerycznych w programie LS-DYNA i prowadzona była uwzględniając zmienne wartości przemieszczenia oraz przyspieszenia rejestrowane podczas wybuchu.

Słowa kluczowe: Improwizowane urządzenia wybuchowe, fala uderzeniowa, symulacje numeryczne

1. Wstęp

Pojazdy wojskowe poruszające się w strefie konfliktu zbrojnego asymetrycznego, powinny zapewnić bezpieczeństwo pasażerom w przypadku detonacji ładunku wybuchowego lub IED. Z powyższego powodu pojazdy LV i LAV powinny spełniać odpowiednie wymagania w zakresie ochrony przeciwminowej, przeciwodłamkowej i przed IED. Aby spełnić te wymagania niezbędne jest wykorzystanie energochłonnych i przeciwodłamkowych osłon balistycznych wykonanych z zaawansowanych materiałów energochłonnych [1, 2, 3].

W celu zapewnienia odpowiedniej ochrony dotychczas użytkowanych pojazdów koncentrowano się wyłącznie na zdefiniowanych w dokumencie STANAG 4569 poziomach ochrony odnoszących się wyłącznie do odporności przeciwminowej pojazdu. Obecny rozwój metod badawczych i technologii pozwala na skupieniu się, przede wszystkim na żołnierzach przebywających w pojeździe narażonym na wybuch miny lub IED. Zdefiniowane kryteria urazu tj. maksymalna wartość osiowej siły ściskającej w dolnej części piersi czy też dynamiczny wskaźnik odpowiedzi wyliczony na podstawie przyspieszenia podłużnego miednicy, znacznie lepiej odzwierciedlają możliwość wystąpienia urazów lub nawet śmierci żołnierza. Dostępność baz danych dotyczących zaistniałych zdarzeń z użyciem min i IED w Iraku i w Afganistanie zgromadzonych w Dowództwie Operacyjnym Rodzajów Sił Zbrojnych oraz baz danych medycznych w Wojskowym Instytucie Medycznym pozwala na etapie badań symulacyjnych opracować wiarygodne modele odzwierciedlające fizykę zjawisk oraz rzeczywiste zachowanie się konstrukcji i prognozujące wystąpienie właściwych urazów odpowiadających zaistniałym rzeczywistym przypadkom [4,5].

2. Wymagania i kryteria badania bezpieczeństwa załogi pojazdu wojskowego

Warunki badań i kryteria urazu członków załogi LV i LAV poddanych działaniu fali uderzeniowej wybuchu miny AT są określone w załączniku E do standardu NATO [6]. W testach eksperymentalnych układów pojazd/manekin, poddanych działaniu fali uderzeniowej wybuchu miny AT, wymaga się wykorzystanie co najmniej jednego manekina 50-centylowego antropomorficznego (Hybrid III ATD) oraz czujników w czterech krytycznych położeniach podanych w tabeli 1, natomiast wartości krytyczne zestawiono w tabeli 2.

Tabela 1. Wielkości rejestrowane w czujnikach zamontowanych w manekinie Hybrid III ATD [6]

Położenie czujnika	Wielkość mierzona	Opis wielkości
górną część szyi	F _x	siła pozioma
	F _z	siła pionowa
	M _y	moment zginający
miednica	A _z	przyspieszenie pionowe
dolną część piersi	F _z	siła pionowa
klatka piersiowa	P _x	nadciśnienie

Tabela 2. Kryteria urazu i wartości krytyczne [6]

Nr kryt.	Część ciała	Opis kryterium	Parametr	Wartość krytyczna
1	Kończyna dolna	Maksymalna wartość osiowej siły ściskającej w dolnej części piszczeli	$(-F_z)_{\max}$	5,4 kN
2	Część piersiowo-lędźwiowa kręgosłupa	Dynamiczny wskaźnik odpowiedzi wyliczony na podstawie przyspieszenia podłużnego miednicy A_z	$DRIZ$	17,7
3	Górny odcinek szyi	Osiowa siła ściskająca w górnym odcinku szyi z uwzględnieniem czasu trwania	$[-F_z(t)]_{\max}$	4,0 kN dla 0 ms 1,1 kN dla ≥ 30 ms
4a	Górny odcinek szyi	Moment górnego odcinka szyi (zginanie do przodu)	$(M_{yp})_{\max}$	190 Nm
4b	Górny odcinek szyi	Moment górnego odcinka szyi (zginanie do tyłu)	$(-M_{yp})_{\max}$	57 Nm
5	Narządy wewnętrzne	Wskaźnik prędkości ugięcia klatki piersiowej	CWVP	3,6 m/s

Dynamiczny wskaźnik odpowiedzi w kierunku pionowym $DRIZ$ jest związany z ugięciem kręgosłupa. Ugięcie kręgosłupa jest wyznaczane z zastępczego układu o jednym stopniu swobody. Wymuszenie jest określone przez przyspieszenie pionowe miednicy A_z . Wskaźnik dynamicznej odpowiedzi $DRIZ$ wyznacza się w oparciu o wzór:

$$DRIZ = \frac{\omega_n \delta_{\max}}{g} \quad (1)$$

gdzie:

- ω_n - częstość drgań własnych,
- $\delta_{\max}$ - maksymalne ugięcie,
- g - przyspieszenie ziemskie.

Natomiast moment górnego odcinka szyi M_{yp} wyznacza się w oparciu o wyrażenie:

$$M_{yp} = M_y - F_x \cdot d \quad (2)$$

gdzie :

- M_y - moment zginający,
- F_x - siła pozioma,
- d - założona odległość (17,78 mm).

3. Uwarunkowania modelowania numerycznego

Analiza danych pochodzących z bazy Wojskowego Instytutu Medycznego wskazuje na duży odsetek urazów kręgosłupa szyjnego występujących u polskich żołnierzy służących w Afganistanie. W badaniach podjęto próbę oceny ryzyka wystąpienia urazu kręgosłupa szyjnego kierowcy pojazdu opancerzonego KTO

Rosomak wywołanego wybuchem miny-pułapki pod prawym, przednim kołem. Badania przeprowadzono na podstawie dynamicznej analizy numerycznej w programie LS-DYNA, wykorzystując metodę jawnego całkowania do rozwiązywania zagadnień szybkozmiennych w czasie. W pierwszym kroku badań przygotowano uproszczoną geometrię pojazdu KTO Rosomak (rys. 1) uwzględniając prawidłowe umiejscowienie kierowcy (P1). Model geometryczny zdyskretyzowano wykorzystując czterowęzłowe elementy powłokowe. W celu uwzględnienia masy pojazdu, w modelu zastosowano masy skupione najważniejszych elementów: wieżyczka – 2900 kg, jednostka napędowa 2200 kg oraz 8 kół wraz z zawieszeniem po 270 kg na koło. W modelu masy skupione występują jako zero-wymiarowe jednowęzłowe elementy. Masa całego modelu wynosiła 22000 kg.

a)

b)

Rys. 1 Model dyskretny pojazdu KTO Rosomak oraz rozmieszczenie pasażerów (P1 – kierowca)

Dane wejściowe związane z przemieszczeniem pojazdu niezbędne do analizy przemieszczeń ciała żołnierzy w warunkach eksplozji zostały dobrane na podstawie wytycznych podanych przez Nilakantan [7]. Dane wyjściowe uzyskano symulując wybuch pod prawym, przednim kołem, rejestrując rekordy przemieszczenia w punktach pomiarowych w czasie 300 ms.

Opierając się na zbiorze danych przedstawionych przez zespół Nilakantan'a [7] wymuszenie pojazdu zostało określone jako impuls prędkości podłogi - 10.7 m/s. Wykres zadanej prędkości podłogi, wywołanego eksplozją ładunku został przedstawiony na rysunku 2 [7].

Rys. 2 Przewidywane prędkości podłogi pojazdu pod wpływem impulsu detonacji [7]

W drugim etapie rozpatrywano wpływ detonacji ładunku na ciało żołnierza kierującego pojazdem bojowym (P1). Dla każdego rozpatrywanego przypadku rozpatrzono wariant z zapiętym pasem biodrowym oraz jego. Jako model żołnierza w badaniach wykorzystano manekin typu Hybrid III 50th Male Dummy (rys. 3).

W trakcie analizy rejestrowano zmianę przyspieszenia oraz trajektorii przemieszczenia punktu pomiarowego zlokalizowanego na części szyjnej kręgosłupa, na wysokości kręgu C1 względem miejsca mocowania w układzie współrzędnych wnętrza pojazdu w czasie 140 ms.

Rys. 3. Model manekina typu Hybrid III 50th Male Dummy, głowy i kręgosłupa szyjnego z zaznaczeniem punktu pomiarowego oraz pasa biodrowego

4. Wyniki obliczeń numerycznych

Analiza wpływu detonacji na kołowy transporter opancerzony pod prawym przednim kołem, wykazała znaczne przemieszczenie w osi pionowej Z o 30 cm oraz niewielką rotację na boki (10 cm) zarówno w przypadku punktu pomiarowego umiejscowionego na podłodze jak również na ścianie przedziału desantowego na wysokości mocowania fotela, co przedstawiają rysunek 4.

Rys. 4 Wykresy składowych przemieszczeń kadłuba

Wyniki wpływu detonacji ładunku na przemieszczenie ciała żołnierza przedstawiono w postaci charakterystyk zależności składowych przemieszczeń

x,y,z w czasie (Rys. 5). Na wykresach występują różnice wartości zakresu przemieszczeń dla każdego z kierunków w układzie współrzędnych pojazdu. W przypadku żołnierza kierowcy najmniejsze przemieszczenie kręgosłupa szyjnego wynoszące maksymalnie 100 mm odnotowano wzdłuż osi y. Wskazuje to, że podczas wybuchu pod prawym kołem następuje mniejsze przesunięcie kierowcy na boki. Największe bezwzględne wartości przemieszczeń występują w kierunku x oraz z. U kierowcy (P1) z zapiętymi pasami i bez pasów duże przemieszczenia w kierunku x mogą powodować uraz odcinka szyjnego kręgosłupa typu „smagnięcia biczem” (z ang. whiplash), który jest spowodowany nagłym odgięciem głowy ku tyłowi, a następnie jej gwałtownym zgięciem do przodu. W kierunku z mogą wystąpić natomiast urazy kompresyjne kręgów. Przytwierdzenie kierowcy pasem do siedziska w trakcie wydarzenia powoduje, że wartości przemieszczeń w kierunku x nie mają charakteru liniowego, lecz falowy, co świadczy o pewnym ograniczeniu przemieszczenia szyi wraz z głową i wymuszeniu ich ruchu wahadłowego.

Rys. 5 Wykresy przemieszczenia punktu pomiarowego manekina kierowcy P1 z uwzględnieniem i pominięciem pasa bezpieczeństwa

5. Wnioski

Urazy pasażerów pojazdów militarnych są wynikiem występujących zmian przyspieszeń podłogi w wyniku działania ciśnienia od wybuchu. Mechanizm kompresyjnego ściskania kręgosłupa szyjnego powodowany jest uniesieniem żołnierza wraz z siedziskiem i uderzeniem głową w strop pojazdu. Analizując przypadki miejsca wybuchu w przedniej części pojazdu należy zwrócić uwagę, że jadący pojazd najeżdżając na ładunek wybuchowy w jego wyniku ulega wyhamowaniu i destabilizacji - przemieszczeniu w kierunku pionowym lub pionowo-bocznym co zostało zaobserwowane również w badanym przypadku. Powoduje to kumulację innych mechanizmów urazowych niż wyłącznie kompresyjny. Istotnym jest badanie zarówno przemieszczeń powodowanych wybuchem jak i przyspieszeń przenoszonych przez fotele na poszczególne segmenty ciał żołnierzy [8].

Na potrzeby prowadzonych badań skupiono się jedynie na analizie przemieszczeń punktu antropometrycznego kręgosłupa kierowcy pojazdu wojskowego, jako wielkości charakteryzującej możliwość wystąpienia pewnej klasy urazów.

W związku z przemieszczeniem w osi pionowej istnieje duże prawdopodobieństwo uderzenia głową w strop pojazdu tym samym wystąpienia urazu kompresyjnego kręgosłupa szyjnego. Wpływ mocowania pasami jest niewątpliwie znaczący, zabezpieczają one żołnierza przed przemieszczeniem pod wpływem sił masowych i uderzeniem głową w elementy wyposażenia kadłuba. Zastosowanie pasów bezpieczeństwa wpływa na trajektorię ruchu głowy względem tułowia, powodując wzrost przemieszczenia szyi w płaszczyźnie strzałkowej oraz bocznej.

***Praca została wykonana w ramach projektu
Nr DOBR-BIO4/022/13149/2013,
finansowanego przez NCBiR.***

6. Literatura

- [1] Miedzińska D. Niezgoda T., Numerical Simulation of shock energy absorption mechanism in metal foam microstructure, XII Pan American Congress of Applied Mechanics, Port of Spain, Trinidad & Tobago, January,
- [2] Mazurkiewicz Ł., Małachowski J., Baranowski P., Optimization of protective panel for critical supporting elements, Composite Structures, 134 2015, 493–505

- [3] Barnat W., Environmental influences on propagation of explosive wave on the dynamic response of plate, Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences, 2014, 62, 3, 423-429
- [4] Sławiński G., Niezgoda T., Barnat W., Numerical analysis of the influence of blast wave on human body, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 20, No. 3 2013
- [5] Krzystala E., Mężyk A., Kciuk S., Analiza zagrożenia załogi w wyniku wybuchu ładunku pod kołowym pojazdem opancerzonym, Zeszyty naukowe WSOWL Nr 1 (159) 2011
- [6] AEP-55, Vol. 2, Edn. 1, Procedures for Evaluating the Protection Levels of Logistic and Light Armoured Vehicle Occupants for Grenade and Blast Mine Threats Level, NATO/PFP Unclassified, 2005.
- [7] Nilakantan, A. Tabiei : Computational Assessment of occupant Injury Caused by Mine Blasts underneath Infantry Vehicles, Int. J. Vehicle Structures & Systems, 1 (1-3), pp. 50-5
- [8] Ramasamy A., Masouros S.D., Newell N., Hill A.M., Proud W.G., Brown K.A., Bull A.M.J., Clasper J.C., In-vehicle extremity injuries from improvised explosive devices: current and future foci, Phil. Trans. R. Soc. B (2011) 366, 160–170.

Prof. Tadeusz Niezgoda, Wojskowej Akademii Technicznej, kierownik Katedry Mechaniki i Informatyki Stosowanej na Wydziale Mechanicznym. Jest specjalistą z dziedziny komputerowej mechaniki konstrukcji. Autor metody numerycznej analizy różnych klas konstrukcji, w szczególności w warunkach obciążeń ekstremalnych, m.in. uderzenie pociskiem i wybuch miny, z zastosowaniem zaawansowanych systemów CAD/CAM/CAE. Jest autorem bądź współautorem ponad 300 artykułów naukowych oraz 3 monografii. Wyróżniony nagrodą Ministra Obrony Narodowej za całokształt dorobku, a zespół pod jego kierownictwem otrzymał nagrodę Ministerstwa Infrastruktury za innowacyjne rozwiązania z obszaru bezpieczeństwa uczestników ruchu drogowego i opracowanie transportu intermodalnego.

Dr inż. Grzegorz Sławiński (Adiunkt), pracownik naukowy Katedry Mechaniki i Informatyki Stosowanej Wydziału Mechanicznego Wojskowej Akademii Technicznej. Był lub jest głównym wykonawcą wielu projektów m.in.: Pasywna ochrona obiektów mobilnych przed oddziaływaniem pocisków AP; System ochrony biernej pojazdów opancerzonych przed pociskami opancerzonymi; System obrony aktywnej do ochrony obiektów mobilnych przed pociskami z głowicami kumulacyjnymi. Otrzymał wiele medali i nagród za osiągnięcia naukowo-badawcze i wynalazcze (np. Krzyż Kawalerski "Merite de L'Invention" za zasługi w ruchu wynalazczym, Bruksela, Belgia, 2013)

Protection of occupants military vehicles against mine threats and improvised...
Ochrona załogi pojazdu wojskowego przed wybuchem min i improwizowanych...