

IMPACT LOADS OF COMBAT VEHICLE HULL IN THE CONTEXT OF HUMANS TOLERANCE LIMITS

Piotr Rybak¹⁾, Krzysztof Papliński²⁾

¹⁾Military University of Technology
S. Kaliskiego 2 Str., 00-908 Warsaw
tel.: +48 22 6839752, fax: +48 22 6837370
email: p.rybak@wme.wat.edu.pl
²⁾Ministry of National Defense
Al. Niepodległości 218, 00-911 Warsaw
ktoippk@wp.mil.pl
tel.: +48 22 6874884

Abstract

To ensure humans security in combat vehicles, while action condition thread especially in situation when troops take part in peace kipping missions in various world regions, is one of the most important direction of scientific teams investigation. Were described what kind of assumption is necessary to take into consideration when requirements for combat vehicles are formulated. Obviously that it is very difficult to achieve full security. However, when exist chance of partial security or to minimize impact loads results, generated by combat materials, should be taken advantage of it.

In the paper were presented main factors which humans are endanger in combat vehicle, using published data as well as authors test results. Were put together tolerance limits for man when such factors affects.

Presented results could contribute to point at further direction of investigations connected with man protection in the vehicle as well as searching for new technique and technology that could be used to limit bad results of considered events.

Keywords: combat vehicle, tests, loads, pressure, acceleration

OBCIĄŻENIA UDAROWE KADŁUBA WOZU BOJOWEGO A GRANICE ODPORNOŚCI CZŁOWIEKA

Streszczenie

Zapewnienie bezpieczeństwa ludziom w wozach bojowych podczas działań w warunkach zagrożenia, szczególnie w sytuacji, gdy wojska biorą udział w misjach pokojowych w różnych regionach świata, jest jednym z ważniejszych kierunków działania zespołów naukowo – badawczych. Określono, jakie założenia należy uwzględnić przy formułowaniu wymagań dla wozów bojowych. Jest przy tym zrozumiałe, że trudno jest uzyskać pełne zabezpieczenie. Jednakże, jeżeli istnieje możliwość chociażby częściowej ochrony lub też zminimalizowania skutków obciążeń udarowych, generowanych środkami bojowymi, to należy ją wykorzystać.

W pracy przedstawiono główne czynniki, na które jest narażony człowiek w wozie bojowym wykorzystując dane literaturowe jak i wyniki badań własnych. Zestawiono wartości graniczne odporności jego organów na tego typu obciążenia.

Przedstawione rezultaty mogą przyczynić się do wskazania kierunków dalszych badań nad ochroną ludzi w pojazdach oraz poszukiwania nowoczesnych technik i technologii do zastosowania w aspekcie zmniejszenia skutków przedstawionych zdarzeń.

Słowa kluczowe: wóz bojowy, badania, obciążenie, ciśnienie, przyspieszenie,

1. Wprowadzenie

Od wielu lat głównym celem naukowców zajmujących się bezpieczeństwem w pojazdach jest opracowanie i wprowadzenie takich zabezpieczeń, które mogą uchronić ich użytkowników przed poważnymi uszkodzeniami ciała, a w skrajnych przypadkach przed kalectwem lub śmiercią.

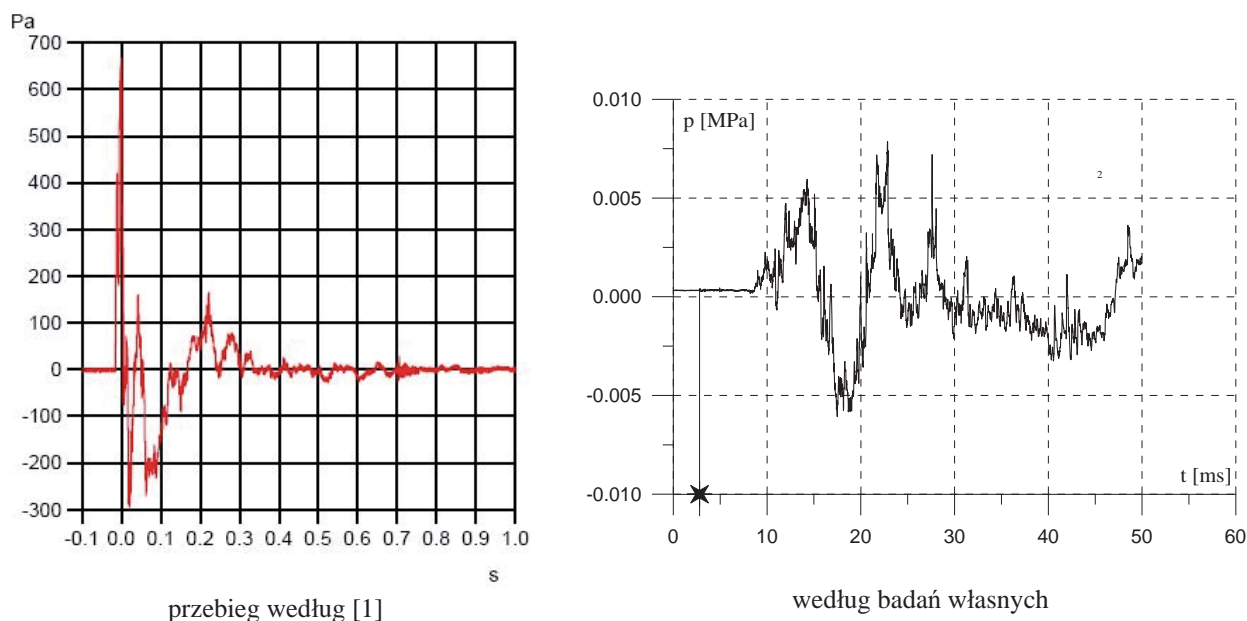
Rozwój motoryzacji i lotnictwa oraz społeczne konsekwencje ich wypadków oraz zagrożenia w działaniach bojowych, spowodowały szybki rozwój badań dotyczących oddziaływania obciążeń uderowych na pojazdy i ich skutków dla ludzi oraz wyposażenia wewnętrznego.

Początek badań sięga okresu przedwojennego (USA) i obejmował problemy wypadków lotniczych, gdzie analizowano urazowe rany głowy i pęknięcia czaszek ofiar oraz wykorzystane do tego celu znieczulone zwierzęta. W latach czterdziestych oraz sześćdziesiątych i na początku siedemdziesiątych przeprowadzono szereg badań dotyczących wpływu przyspieszeń liniowych na organizm ludzki a w szczególności na mózg.

Duży wkład wniosły badania zmierzające do opracowania bezpiecznych foteli do awaryjnego katapultowania pilotów. Od wielu lat prowadzone są także badania nad zabezpieczeniem głowy zawodników hokeja, krykieta, baseball czy rugby. Obecnie badania dotyczące biomechaniki uderzeń prowadzone są przez szereg placówek naukowo-badawczych wielu krajów. Intensywne badania prowadzi się także dla wojska w celu uniknięcia lub zminimalizowania uszkodzeń ciała w wozach bojowych podczas działań bojowych, a w szczególności podczas wybuchu miny i ostrzału.

1.1. Mechanizm działania detonacji miny i uderzenia pocisku

Podczas detonacji miny generowana jest fala uderzeniowa rozchodząca się w powietrzu z prędkością przekraczającą prędkość dźwięku, we wszystkich kierunkach. Fala uderzeniowa działa na strukturę pojazdu i jego elementy: dno, boki i dach wprawiając je w drgania, które wywołują silne oscylacje ciśnienia wewnątrz pojazdu. Drgania te dodatkowo są wzmacniane przez falę uderzeniową wnikającą do wnętrza przez otwory i nieszczelności kadłuba. Oscylacje te trwają nawet do kilkuset milisekund powodując uszkodzenia słuchu i organów wewnętrznych (płuca, żołądek, jelita) u ludzi znajdujących się wewnątrz pojazdu. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe przebiegi zmian ciśnienia zmierzone podczas wybuchu miny na zewnątrz pojazdu trażącego [1] oraz pod dnem pojazdu podczas badań własnych.



Rys.1. Przykładowy przebieg zmian ciśnienia wewnątrz pojazdu podczas wybuchu miny
 Fig. 1. Example of pressure-time history inside the vehicle while mine explosion

Amplituda i częstotliwość drgań kadłuba pojazdu zależy od siły wybuchu (masy i rodzaju ładunku wybuchowego) oraz masy i własności sprężysto-tłumiących konstrukcji (rozmiarów, kształtów, grubości, rodzaju materiału). Drgania kadłuba przenoszą się na siedziska załogi z intensywnością zależną od miejsca i sposobu ich mocowania do kadłuba (dno, boki czy strop) oraz własności sprężysto – tłumiących siedzisk i ich zawieszenia. Siły generowane przyspieszeniami podłogi pojazdu powodują uszkodzenia kości stóp i kostek natomiast przyspieszeniami siedzisk uszkodzenia kręgosłupa członków załogi. Uderzenia głową o burty i strop pojazdu powodować mogą uszkodzenia czaszki, mózgu i kręgosłupa. Dodatkowo występują urazy mechaniczne zerwanymi śrubami, oderwanymi urządzeniami i osprzętem montowanymi wewnątrz pojazdu.

Podobny efekt akustyczny, przyspieszenia i odrywanie się od ścian zamocowanych tam elementów lub fragmentów pancerza powoduje uderzenie pocisku w pojazd. Mniejsza jest tylko skala zjawiska, zaś przy większych kalibrach następuje penetracja kadłuba, ale wtedy trudno już mówić o jakiegokolwiek ochronie.

Analizując wymagania, jakie powinien spełniać wóz bojowy narażony na działanie min lub pocisków, aby zapewnić bezpieczeństwo żołnierzy w nim się znajdujących, należy uwzględnić następujące podstawowe założenia wyjściowe:

- miejsca siedzące znajdują się w przedziale kierowania, bojowym i desantowym;
- mina eksploduje bezpośrednio pod pojazdem a pocisk uderza w jego burtę;
- głównymi czynnikami powodującymi uszkodzenia ciała są nadciśnienie fali uderzeniowej i przyspieszenia;
- najbardziej wrażliwym, ulegającym najczęściej uszkodzeniom podczas działania nadciśnienia fali uderzeniowej jest organ słuchu (płuca i układ pokarmowy są zwykle mniej wrażliwe);
- przyspieszenia pionowe są najgroźniejsze dla kości stóp i kostek, gdy stopy spoczywają bezpośrednio na dnie zaś dla kręgosłupa, gdy stopy nie mają bezpośredniego kontaktu z podłogą;
- przyspieszenia odśrodkowe są najgroźniejsze dla mózgu,
- poziom wszystkich rodzajów obciążeń oddziałujących na ludzi powinien być na tyle niski aby nie powodować trwałych uszkodzeń ciała.

2. Granice tolerancji człowieka na podwyższone ciśnienie

Najbardziej wrażliwym na wzrost ciśnienia organem ludzkim jest organ słuchu. Norma obronna USA MIL-STD-1474D z 1997 roku [3] określa dzienny limit ekspozycji organizmu na hałas. Ilość impulsów obliczana jest według zależności (1) i (2):

$$N_1 = 10^x \quad \text{dla } x = \frac{1}{5} \left[177 - L + 6,64 \log_{10} \frac{200}{T} \right], \quad (1)$$

$$N_2 = 20N_1, \quad (2)$$

gdzie:

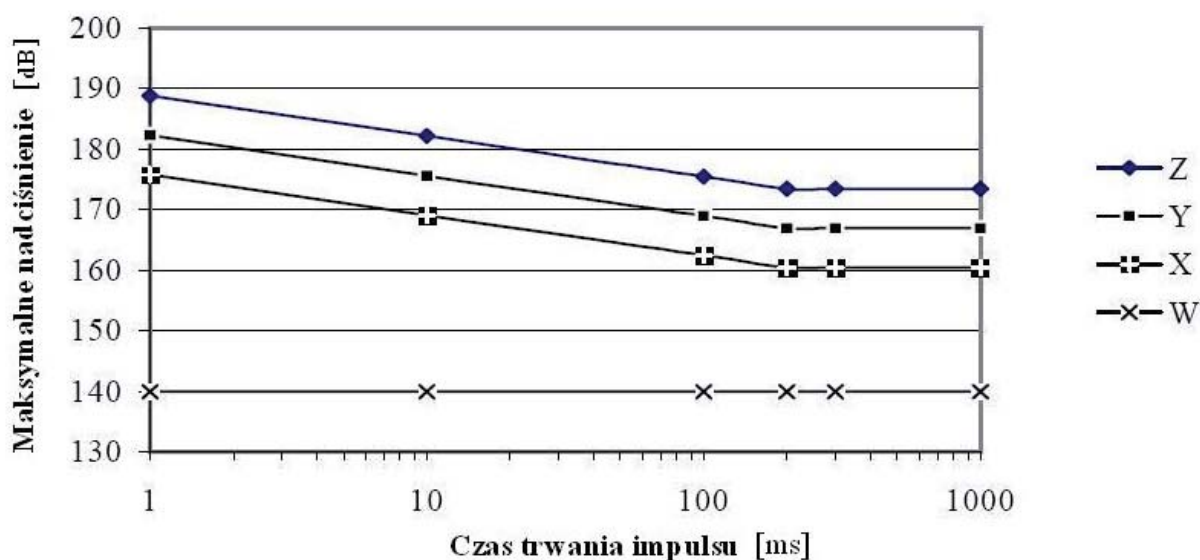
- N_1 – dopuszczalna ilość impulsów na dzień (przy ochronie pojedynczej),
- N_2 – dopuszczalna ilość impulsów na dzień (przy ochronie podwójnej),
- L – mierzony maksymalny poziom ciśnienia w dB – zgodnie z [3],
- T – mierzony czas trwania impulsu w milisekundach – zgodnie z [3].

W tabeli 1 zestawiono dzienne limity ekspozycji człowieka na nadciśnienie bez zabezpieczenia jego słuchu oraz z pojedynczą i podwójną osłoną.

Tab. 1. Limity dzienne ekspozycji na hałas impulsowy [1,3]
 Table 1. Impulse noise daily exposure limit [1,3]

Limity dla hałasu impulsowego	Maksymalna dopuszczalna ilość ekspozycji N_1, N_2 w ciągu dnia		
	Bez zabezpieczenia słuchu	Z zatyczkami lub osłonami uszu N_1 (ochrona pojedyncza)	Z zatyczkami i osłonami uszu N_2 (ochrona podwójna)
Z	0	5	100
Y	0	100	2000
X	0	2000	40000
W	Nieograniczona ekspozycja		

Na rysunku 2 przedstawiono dopuszczalne nadciśnienia dla organizmu ludzkiego w funkcji czasu trwania impulsu mierzonego według [3].



Rys. 2. Poziom maksymalnego nadciśnienia i graniczny czas trwania impulsu [1,3]
 Fig. 2. Maximum over-pressure level and duration limit impulse noise [1,3]

Zgodnie z normą dla nadciśnienia większego od 200 Pa (co odpowiada natężeniu dźwięku 140 dB) muszą być stosowane zabezpieczenia słuchu. Dzienna ilość dopuszczalnych wystawień na działanie nadciśnienia zależy od jego szczytowej wartości, czasu trwania, dynamiki narastania i zastosowanego sposobu ochrony słuchu. Im dłuższy czas trwania tym niższa wartość nadciśnienia może być tolerowana (dla czasu ekspozycji poniżej 200 msec – rys. 2).

Przekroczenie poziomu krzywej Z jest niedopuszczalne. Dla nieosłoniętych uszu istnieje jednoprocetowe ryzyko drobnych pęknięć bębenków i pewnego osłabienia słuchu jeśli maksymalne nadciśnienie wyniesie 19 kPa (co odpowiada natężeniu dźwięku 179,6 dB) [1]. Poziom ciśnien niebezpiecznych dla innych organów wypełnianych powietrzem takich jak płuca czy jelita i żołądek jest znacznie wyższy. Nawet dla dłuższej trwającego nadciśnienia próg, powyżej którego następują uszkodzenia płuc wynosi 69 kPa (to jest 190,8 dB). Przy krótkotrwałych ekspozycjach jest wyższy (nawet ponad 100 kPa).

Projektując sposób ochrony słuchu przyjmuje się jako górny dopuszczalny poziom powodujący uszkodzeń jego uszkodzeń krzywą Z (rys. 2). Z badań wynika, że przy nadciśnieniu 350 hPa może nastąpić perforacja bębenków zaś przy nadciśnieniu 1000 hPa istnieje prawdopodobieństwo perforacji 50%.

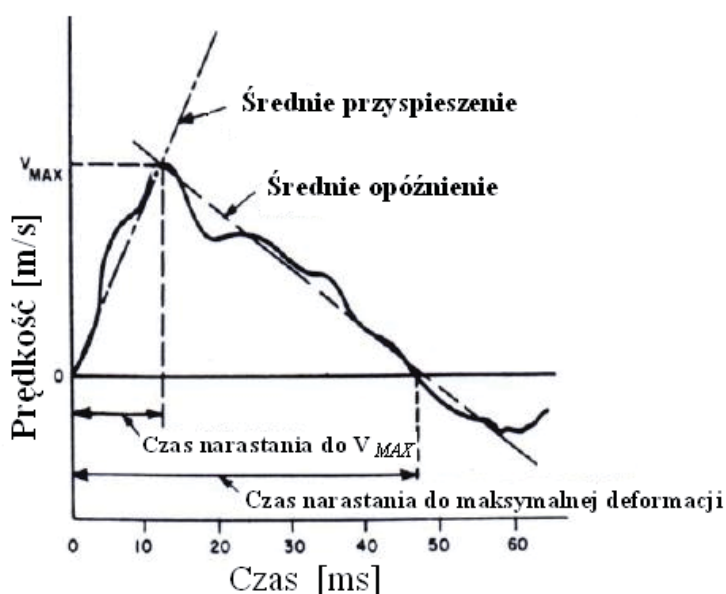
Dla organów wypełnianych powietrzem bardzo ważna jest dynamika narastania ciśnienia. Zgodnie z niepublikowanymi danymi rosyjskimi przyrost ciśnienia do 200 hPa w czasie 0,05 sekundy lub do 300 hPa w czasie 0,09 sekundy powoduje natychmiastową śmierć.

3. Granice tolerancji człowieka na przyspieszenia

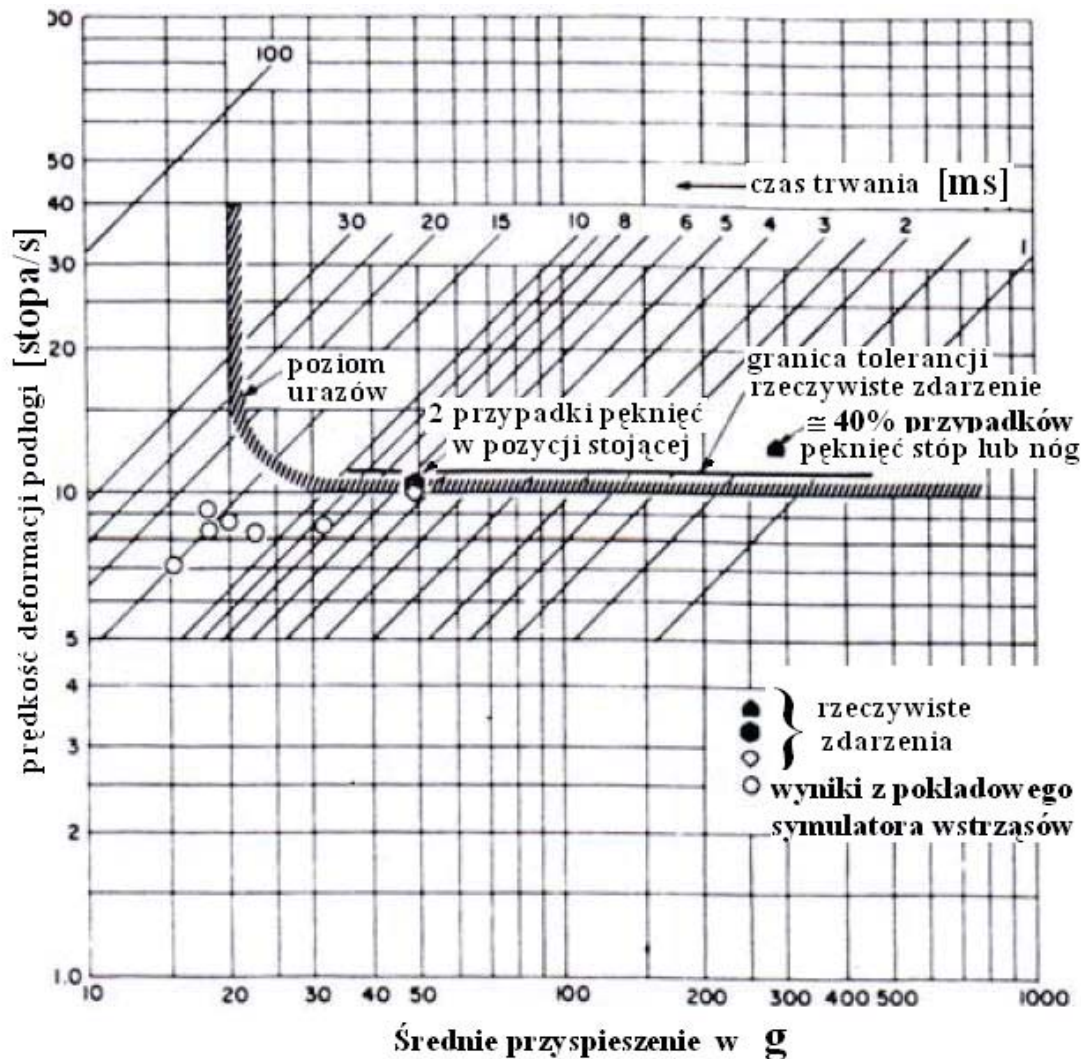
Podczas wybuchu miny pod kadłubem pojazdu lub w jego pobliżu najbardziej narażone na działanie przyspieszeń liniowych od dna pojazdu są kości stóp i kostek, kości nóg a następnie kręgosłup ludzi znajdujących się w jego wnętrzu. W latach sześćdziesiątych minionego stulecia opublikowano pracę A.E. Hirscha, która do chwili obecnej stanowi punkt odniesienia dla rozważań na temat ochrony załogi pojazdu od skutków działania min. W powyższej pracy przedstawiono model służący do określania granic tolerancji na przyspieszenia dla stóp i kostek oraz kości nóg dla człowieka stojącego w pozycji wyprostowanej wewnątrz statku podwodnego w czasie wybuchu miny. Analizując dane pochodzące z różnych zaistniałych eksplozji autor doszedł do wniosku, że towarzysząca jej gwałtowna, znaczna deformacja pokładu może być opisana poprzez krzywą obrazującą zmianę jego prędkości pionowej w funkcji czasu (rys. 3). Te informacje w połączeniu z wynikami badań na ochotnikach, z użyciem symulatora wstrząsów pokładu oraz rozważania teoretyczne doprowadziły do opracowania zespołu krzywych określających granice tolerancji kończyn na przyspieszenia pionowe (rys. 4). Z analizy rysunku wynika, że dla krótkotrwałych impulsów przyspieszeń (czas narastania do wartości maksymalnej mniejszy niż 10 ms) granicę uszkodzeń stanowi zmiana prędkości maksimum 3 m/s. Dla impulsów trwających dłużej granica uszkodzeń jest powyżej przyspieszenia 20g. Powyżej tych granic notowane były pęknięcia kości pięty i kostek. Są to bardzo bolesne uszkodzenia wymagające długotrwałej rekonwalescencji.

W powyższej pracy nie przedstawiono żadnych rozważań dotyczących ludzi w pozycji siedzącej oraz gdy nogi nie spoczywają bezpośrednio na podłodze. Dla wyznaczenia bezpieczeństwa załogi pojazdu ciągle wykorzystywany jest model stojącego człowieka dla przypadku kiedy ludzie siedzą a obydwie stopy spoczywają bezpośrednio na podłodze.

Podczas badań i prac projektowych z zarejestrowanych przebiegów przyspieszeń można wyznaczyć maksymalne zmiany prędkości pionowej w funkcji czasu i minimalny czas narastania prędkości w różnych punktach siedzisk załogi. Wyniki te odnosi się następnie do kryteriów opracowanych przez Hirscha dla człowieka stojącego.



Rys.3. Przykładowy przebieg zmian prędkości deformacji dna podczas wybuchu [1]
Fig. 3. Example velocity-time history of bottom deformation while explosion [1]



Rys. 4. Granice tolerancji dla stóp i kostek na impulsy przyspieszeń pionowych, dla stojącego na wyprostowanych nogach człowieka [1]

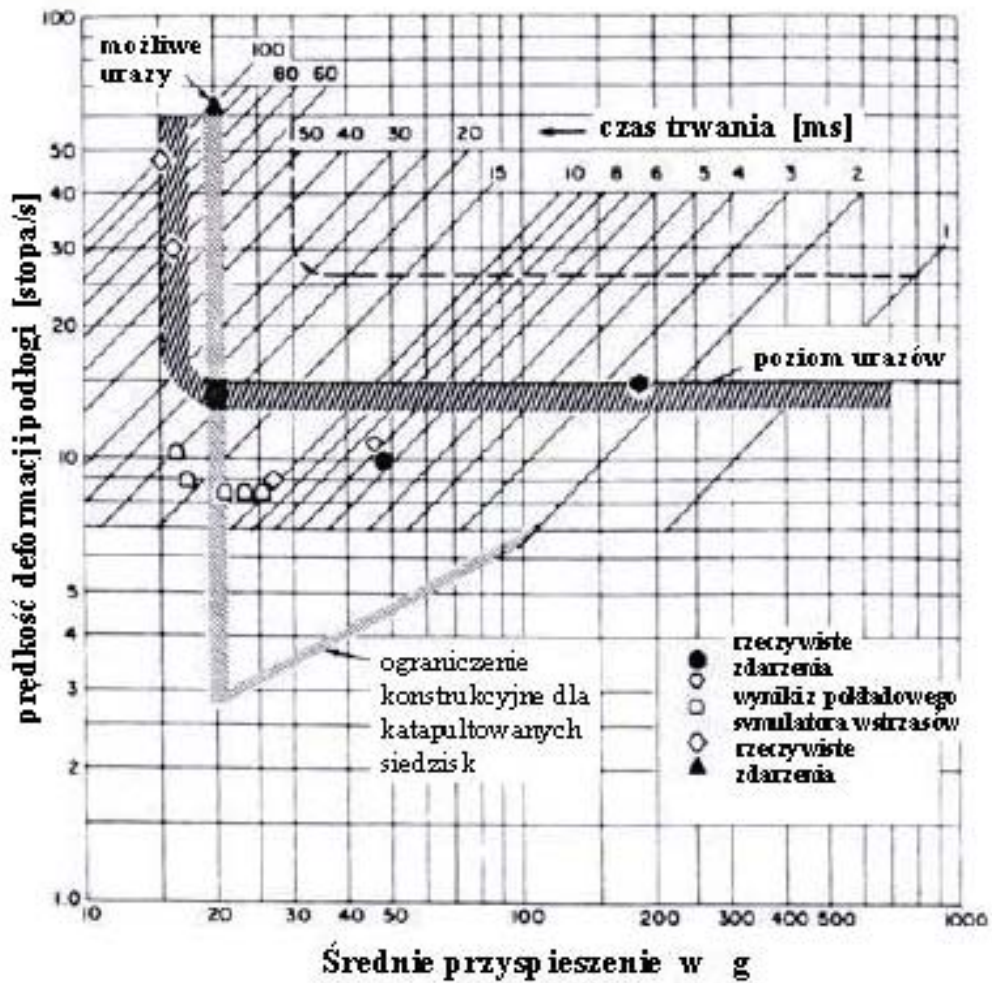
Fig. 4. Tolerance limits for foot and ankle to vertical impulse acceleration for stiff-legged standing man [1]

W pracy A.E. Hirscha przedstawiony został podobny zespół krzywych określających granice tolerancji kręgosłupa na przyspieszenia pionowe dla siedzącego w wyprostowanej pozycji człowieka (rys. 5). Typowym uszkodzeniem w takiej sytuacji są pęknięcia kręgosłupa. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowy przebieg zmian przyspieszeń pomierzony na siedzisku kierowcy pojazdu trażącego podczas wybuchu miny oraz wozu bojowego obciążonego miną przeciwdenną.

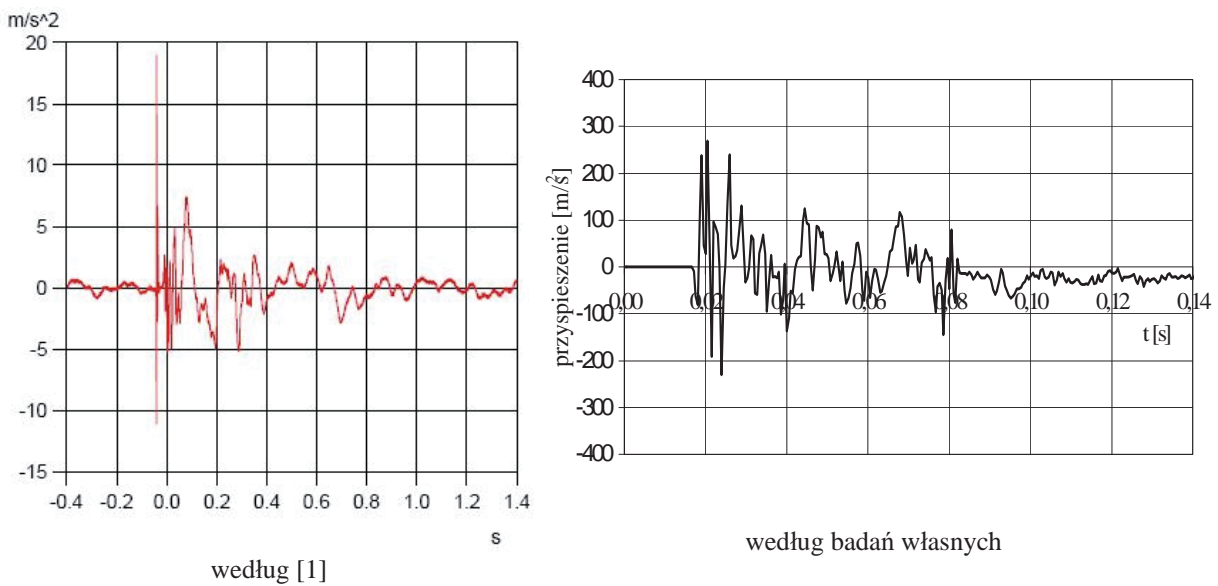
Z analizy rysunku 5 wynika, że dla krótkotrwałych impulsów przyspieszeń (czas narastania do wartości maksymalnej mniejszy niż 20 ms) granicę uszkodzeń stanowi zmiana prędkości maksimum 4,5 m/s. Dla dłuższych trwających impulsów granica uszkodzeń jest powyżej przyspieszenia 15g.

Bazując na danych z wypadków drogowych granica uszkodzeń klatki piersiowej została ustalona powyżej 60 g dla zmian prędkości większych od 3 m/s.

Alternatywną metodę opracowano dla przemysłu lotniczego przy pracach nad katapultowaniem siedzeń pilotów. Wskaźnik dynamiczny reakcji DRI (Dynamic Response Index) został wprowadzony dla przewidywania prawdopodobieństwa uszkodzeń kręgosłupa podczas awaryjnego katapultowania siedziska pilota. Wskaźnik DRI wykorzystuje prosty model masowo-sprężysto-tłumiący dla przewidywania reakcji pilota poddanego nagłemu przyspieszeniu pionowemu.



Rys. 5. Granice tolerancji kręgosłupa, dla człowieka siedzącego w pozycji wyprostowanej, na krótkotrwałe przyspieszenia pionowe [1]
 Fig. 5. Tolerance limits for spine to short duration vertical acceleration for seated man in upright position [1]



Rys. 6. Przebieg czasowy przyspieszeń na siedzisku kierowcy pojazdu podczas wybuchu miny
 Fig. 6. Acceleration-time history in vehicle drivers seat while mine explosion

Na rys. 7 przedstawiono rezultat oddziaływania wybuchu miny przeciwdennej na siedzisko mechanika – kierowcy wozu bojowego oraz elementy wyposażenia wewnętrznego.



Rys. 7. Efekt wybuchu miny przeciwdennej
Fig. 7. Result of anti - bottom mine explosion

Równanie DRI ma następującą postać (3) według [1]:

$$DRI = (\omega_n)^2 \delta_{\max} / g, \quad (3)$$

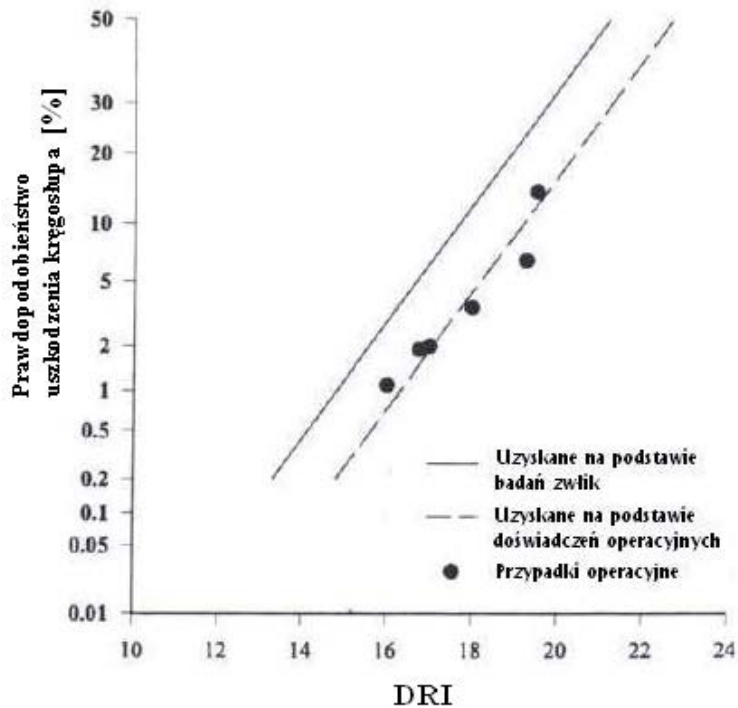
gdzie:

ω_n – częstość własna systemu, przyjmowana na poziomie 52.9 radianów/s (8.4 Hz),

δ_{\max} – maksymalna strzałka ugięcia przy ściskaniu wynikająca z sił działających podczas jazdy lub przyspieszeń pionowych przy współczynniku tłumienia $\zeta=0.224$,

g – przyspieszenie ziemskie.

Wskaźnik DRI został skorelowany z danymi dotyczącymi uszkodzeń kręgosłupa pochodzącymi z badań laboratoryjnych i doświadczeń operacyjnych. Rys. 8 przedstawia prawdopodobieństwo uszkodzenia kręgosłupa w funkcji DRI.



Rys. 8. Prawdopodobieństwo uszkodzenia kręgosłupa w funkcji DRI [1]
Fig. 8. Probability of spinal injury versus DRI [1]

Jako bezpieczny, bez uszkodzeń przyjęto poziom wskaźnika równy $DRI=16$. Odpowiada on, bazując na doświadczeniach operacyjnych, jednoprocetowemu ryzyku uszkodzenia kręgosłupa.

Typowe uszkodzenia głowy następują zarówno podczas bezpośredniego uderzenia jak i pośrednio, kiedy kadłub i szyja doznają gwałtownego przyspieszają lub opóźnienia. Głowa doznaje wtedy przyspieszeń liniowych i odśrodkowych. Ostatnie badania patologów wykazały, że uszkodzenia mózgu nie muszą być powiązane z pęknięciami czaszki. Hełm czy kask chroni przed uszkodzeniami czaszki i wydatnie powoduje zmniejszenie oddziałujących na głowę przyspieszeń liniowych, ale nie zmniejsza przyspieszeń odśrodkowych. Podczas swoich badań w 2001 roku W.N. Hardy [5] stwierdził, że przy przyspieszeniu liniowym $200g$ mózg przemieszczał się względem czaszki $\pm 1mm$ zaś przy przyspieszeniu odśrodkowym $10,000 \text{ rad/s}^2$ aż $\pm 5mm$ [5]. Duże przyspieszenia mózgu powodują pęknięcia naczyń krwionośnych powodujące upośledzenia umysłowe.

Dla pełniejszego zrozumienia biomechaniki uszkodzeń głowy i możliwości sformułowania kryteriów, które mogą być użyte do projektowania i dalszego rozwoju urządzeń i systemów służących do jej zabezpieczenia opracowano kryterium uszkodzeń głowy HIC (Head Injury Criterion). Jest to funkcja uwzględniająca, wynikające z przemieszczeń, przyspieszenia liniowe głowy i czas trwania impulsu [7].

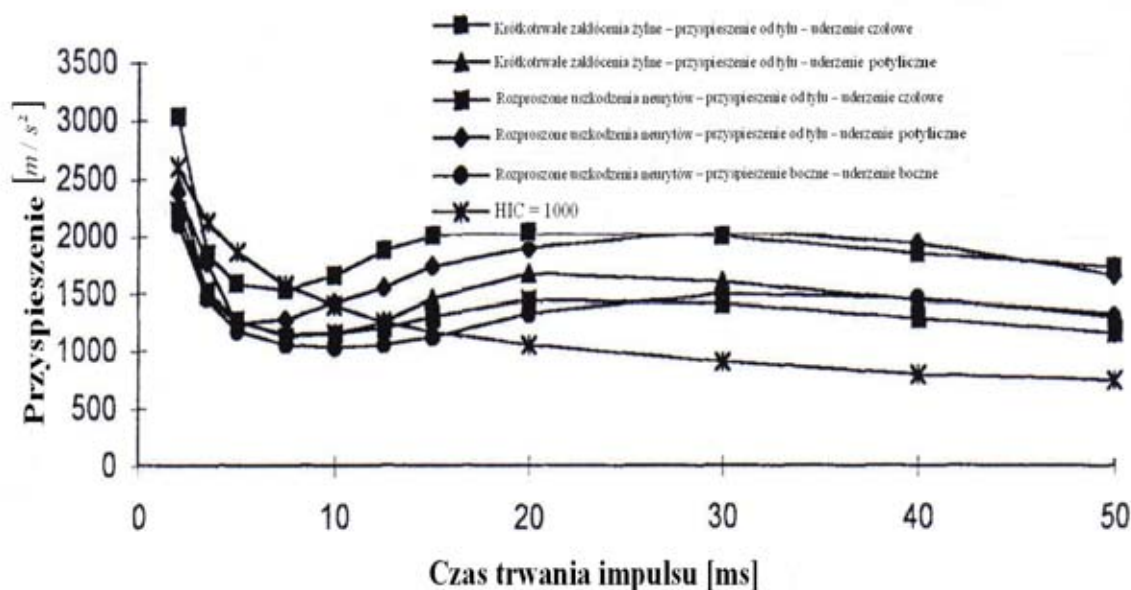
$$HIC = \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1), \quad (4)$$

gdzie:

$(t_2 - t_1)$ – czas trwania impulsu,

a – przyspieszenie liniowe głowy.

Kryterium to wykorzystywane jest do przewidywania uszkodzeń głowy przy projektowaniu urządzeń szczególnie w technice samochodowej. Z badań wynika, że wartość $HIC=1000$ przyjmuje się jako graniczny poziom do zaakceptowania ze względu na ryzyko uszkodzeń głowy – rys. 9. Szacuje się, że wartość ta odpowiada 8,5% ryzyku śmierci z powodu uszkodzeń głowy. Nie ma ciągle wyznaczonej (szeroko akceptowanej) granicy tolerancji, po przekroczeniu, której występują łagodne traumatyczne urazy mózgu MTBI (Mild Traumatic Brain Injury). Przyjmuje się, że 50% prawdopodobieństwa ich wystąpienia istnieje dla $HIC=235$.

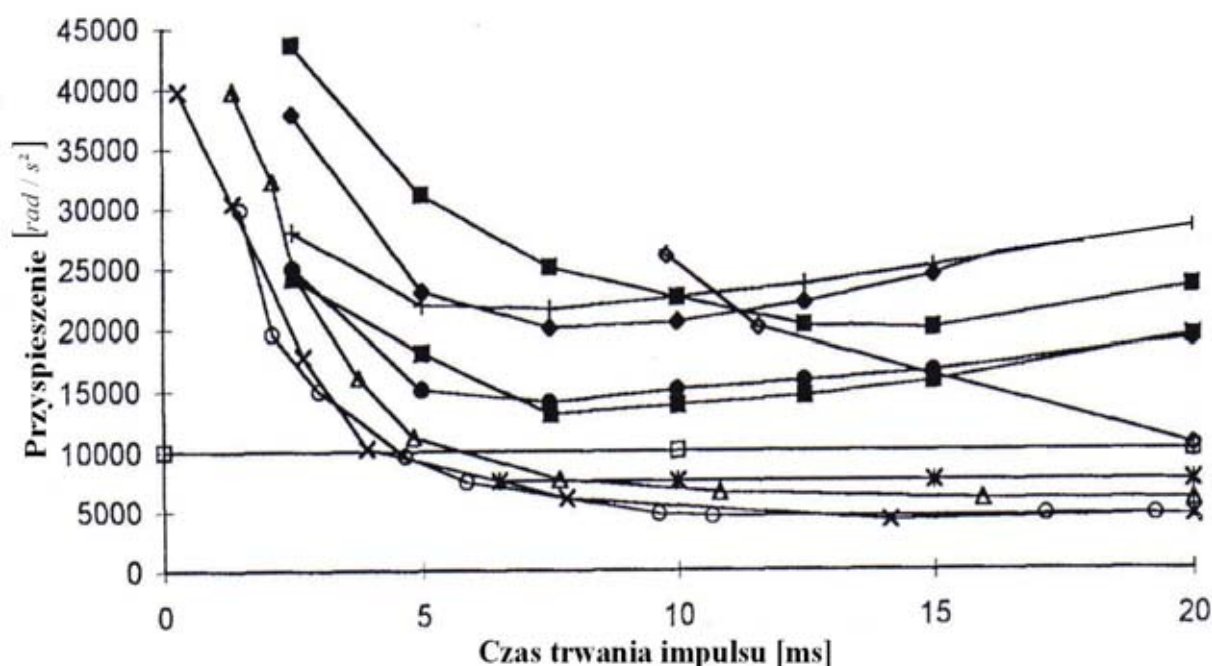


Rys. 9. Krzywe określające granice tolerancji dla uszkodzeń głowy wskutek przyspieszeń liniowych [7]

Fig. 9. Translational acceleration head injury tolerance curves [7]

Kryterium HIC jest często krytykowane, ponieważ nie uwzględnia przyspieszeń odśrodkowych głowy. Na rysunku 10 przedstawiono szereg krzywych, opracowanych przez różnych badaczy [7], określających granice tolerancji dla uszkodzeń głowy wskutek przyspieszeń odśrodkowych. Zgodnie z [6] średni poziom przyspieszeń odśrodkowych, przy którym występują MTBI wynosi 6400 rad/s^2 , a poniżej poziomu 5000 rad/s^2 są one bezpieczne.

Podczas wypadków komunikacyjnych, które często wykazują duże podobieństwo do oddziaływań podczas wybuchu miny bardzo ważnym kryterium, które należy uwzględnić, ze względu na możliwość uszkodzeń kręgosłupa szyjnego, jest moment zginający. Zgodnie z danymi publikowanymi przez D. Bergerona wytrzymałościowa tolerancja kręgosłupa na moment gnący jest na poziomie 135 Nm [2]. Powyżej tej wartości kręgosłup ulega złamaniu.



Rys. 10. Krzywe określające granice tolerancji dla uszkodzeń głowy wskutek przyspieszeń odśrodkowych [7]
Fig. 10. Rotational acceleration head injury tolerance curves [7]

4. Podsumowanie

Najlepszym, akceptowalnym poziomem uszkodzeń ciała dla załóg pojazdów wojskowych jest brak jakichkolwiek uszkodzeń. Po wybuchu miny żołnierze nie powinni odnieść żadnych poważnych obrażeń ciała i być w stanie kontynuować misję w swoim lub innym pojeździe. Jednakże należy mieć świadomość, że w skrajnych warunkach podczas oddziaływań na kadłub dużych obciążeniach z niewielkich odległości uniknięcie pewnych uszkodzeń ciała staje się niemożliwe. Dlatego bardzo ważne jest także określenie granic, po przekroczeniu, których zagrożone jest życie ludzkie. Ponieważ wrażliwość organizmu ludzkiego na różne czynniki zależy głównie od wieku i płci, dlatego też określając granice tolerancji zawęża się je do 50% populacji mężczyzn w średnim wieku. Ograniczenie to jest trafne w zastosowaniach wojskowych, ale w odniesieniu do osób cywilnych powoduje gorsze zabezpieczenie kobiet i dzieci (a w szczególności ludzi starszych).

Dopuszczalne poziomy obciążeniach niepowodujące uszkodzeń ciała oraz wartości graniczne, po przekroczeniu, których zagrożone jest życie ludzkie zestawiono w tabeli 2, przy czym granice tolerancji wynikają z nadciśnienia w przestrzeni pojazdu i przyspieszeń na siedziskach załogi z rozbięciem na zagrożone partie ciała.

Tabela 2. Dopuszczalne poziomy obciążeń ciała ludzkiego [1,2,3,6,7]
 Table 2. No injury tolerance levels for humans body [1,2,3,6,7]

Oddziałujący czynnik	Część ciała	Dopuszczalny poziom obciążeń
Ciśnienie	Uszy	Poniżej krzywej W (140 dB), niewymagana żadna ochrona
		Powyżej krzywej W (rys.2), ale poniżej krzywej Z, wymagana ochrona, powyżej krzywej Z poziom niedopuszczalny
		Powyżej 350 hPa może nastąpić perforacja bębenków
	Płuca	Powyżej 69 kPa mogą nastąpić uszkodzenia płuc
Przyspieszenie liniowe	Stopy i kostki	Bezpieczne średnie przyspieszenia mniejsze od 20g lub maksymalne zmiany prędkości mniejsze od 3 m/s
	Kręgosłup	Bezpieczne średnie przyspieszenia mniejsze od 15g lub maksymalne zmiany prędkości mniejsze od 4,5 m/s
		Dla DRI ≤ 16 jednoczesne ryzyko uszkodzenia
	Kręgosłup szyjny	Moment zginający nie wyższy niż 135 Nm – granica złamań
	Klatka piersiowa	Powyżej 60 g dla zmian prędkości większych od 3 m/s – granica uszkodzeń
Mózg	HIC=235 – ryzyko wystąpienia MTBI 50% HIC ≤ 1000 – ryzyko zagrożenia życia poniżej 8,5%	
Przyspieszenie kątowe	Mózg	Granica wystąpienia MTBI wynosi 6400 rad / s^2

Niektóre z przedstawionych wyników badań (zawartych w [1,2,3,6,7]) różnią się od rezultatów badań eksperymentalnych własnych, odnoszących się do wozu bojowego bezpośrednio obciążonego wybuchem ładunku materiału wybuchowego. Wskazuje to na konieczność realizacji dalszych prac nad rozpoznaniem zjawisk towarzyszących oraz zmniejszaniem skutków obciążeń uderzeniowych na ludzi znajdujących się w pojazdach bojowych.

Literatura

- [1] Axelsson, H., Sundqvist, O., *Mine Clearance Vehicles. Crew Safety Standard*, The Swedish Defence Material Administration Test range Karlsborg 08.01.2003.
- [2] Bass, C. R., *Development of a procedure for evaluating demining protective equipment*, University of Virginia, 2000.
- [3] Department of Defense, *Design Criteria standard. Noise Limits*. MIL-STD-1474D, 12 February 1997.
- [4] Ketten D. R., *Experimental measures of blast and acoustic trauma in marine mammals*, Department of Biology Woods Hole Oceanographic Institution and Woods Hole as well as Department of Otology and Laryngological Harvard Medical School Boston, Massachusetts.

- [5] King A.I., Yang K. H., Zhang L., Hardy W., Viano D. C., *Is head injury caused linear or angular acceleration ?*, Bioengineering Centre, Wayne State University and Mild Traumatic Brain Injury Subcommittee, National Football League.
- [6] King A.I., *The goal of impact biomechanics is to protect vehicle occupants from serious injury*, Department of Biomedical Engineering at Wayne State University, 2004.
- [7] Lawson A.R., Sadeghi M.M., *Finite element modelling of blunt or non-contact head injuries*, Cranfield Impact Centre, U K, Paper nr 98-S9-P-26.
- [8] Makris A., Nerenberg J., Chichester C., *Full scale evaluation of lightweight personal protection ensembles for demining*, Med-Eng Systems Inc. and U.S. Army CECOM NVESD, 2003.