

Wiesław **BARNAT**

NUMERYCZNE BADANIE ODPOWIEDZI KADŁUBA POJAZDU SPECJALNEGO NA OBCIĄŻENIE UDAROWE NA PRZYKŁADZIE SAMOBIEŻNEJ ARMATOHABICY KRAB

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki analiz numerycznych odpowiedzi kadłuba armatohauby na strzał armatni w różnych położeniach armaty w stosunku do kadłuba. Rozpatrzono kilka strzałów dla różnych kątów podniesienia lufy, w tym dla najbardziej niekorzystnych z punktu widzenia wytrzymałości konstrukcji. Analizę numeryczną przeprowadzono metodą wykorzystywaną do obliczeń zjawisk szybkozmiennych-explicite. Za główne kryterium oceny odpowiedzi kadłuba przyjęto wyteżenie materiału.

Słowa kluczowe: strzał, pojazdy gąsienicowe, analiza numeryczna.

1. WSTĘP

Ciągły wyścig „pancerz-pocisk” wymusza na konstruktorach dążenie do opracowywania nowych konstrukcji pojazdów. Moda lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku sprawiała wrażenie, że pociski raketowe wyprą tradycyjną artylerię. Jednak uwarunkowania ekonomiczne (cena pojedynczego pocisku oraz nieustanny wzrost możliwości amunicji artyleryjskiej, szczególnie środków miotających) sprawiły, iż podstawowym elementem wsparcia działania wojsk jest artyleria lufowa. Zasięg współczesnej artylerii lufowej wynoszący ok. 40 km pozwala na umiejscowienie armaty z dala od przeciwnika. Jednak są takie sytuacje, kiedy istnieje potrzeba zamontowania działa na silnie opancerzonym podwoziu zdolnym do działania w styczności z przeciwnikiem. Takim przykładem jest najnowsza armatohauba KRAB. Celem zbadania odpowiedzi kadłuba na strzał armatni przeprowadzono szereg symulacji numerycznych przy wykorzystaniu Metody Elementów Skończonych (MES) [1]. Ze względu na charakter zjawiska postanowiono zagadnienie badawcze rozwiązać metodą explicite. Zagadnienia odpowiedzi dynamicznej konstrukcji były rozpatrywane przez wielu autorów [2]. Ciągły rozwój metod obliczeniowych sprawia, iż analizy numeryczne pozwalają na opis takich zagadnień, jak modelowanie zniszczenia materiałów [3, 4, 5]. Dodatkowo współczesne programy pozwalają na analizę numeryczną oddziaływania wybranych zagadnień odpowiedzi dynamicznej konstrukcji: przebijalności [6] wybuchów w różnych środowiskach [7].

W artykule przedstawiono wyniki analiz numerycznych pojazdu pancernego. Dokonano oceny odpowiedzi kadłuba w aspekcie wytrzymałości na obciążenia związane wystrzałem armatnim w ekstremalnych położeniach armaty.

2. WYBÓR METODY ROZWIĄZANIA

Głównym obiektem badań była ciężka armatohaubica. Model pojazdu był obciążony impulsem ciśnienia pochodzącym od wystrzału dla różnych konfiguracji położenia wieży i działa (w zenicie i elewacji). Otrzymane wyniki przedstawiono w postaci map naprężeń zredukowanych.

Ostatnimi czasy Metoda Elementów Skończonych (MES) stanowi podstawową metodę analizy procesu oddziaływania wystrzału na kadłub pojazdu. W pracy przyjęto następujące założenia do analizy numerycznej wykonanej w systemie LS-DYNA [1]:

- algorytm typu explicit (jawny) do rozwiązywania równań dynamiki konstrukcji z zakresie nieliniowym;
- sprężysto-plastyczny model materiału;
- model materiału sztywnego;
- odkształcalne elementy powłokowe typu SHELL (typ 2) [1];
- odkształcalne elementy bryłowe typu SOLID (typ 1) [1];
- warunki początkowo-brzegowe uwzględniające zjawisko grawitacji;
- duże odkształcenia i przemieszczenia.

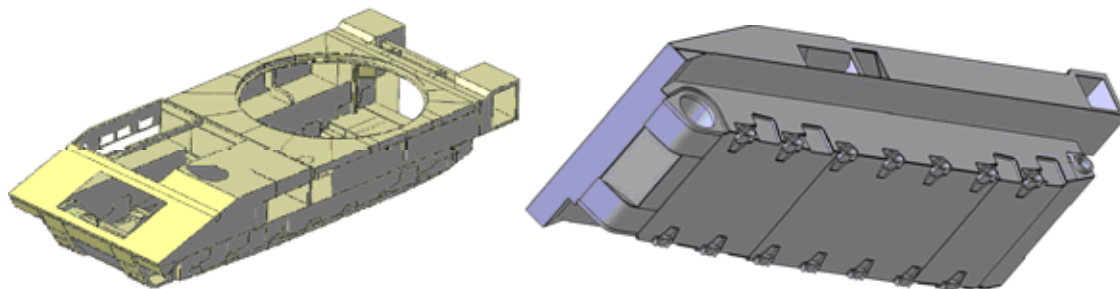
Warto zauważyć, iż zjawiska poruszane w artykule:

- należą do szybkozmiennych w czasie (czas trwania wystrzału);
- charakteryzują się dużymi nieliniowościami geometrycznymi (duże odkształcenia, przemieszczenia, kontakt) i fizycznymi (nieliniowości materiałowe);
- wymagają małego przyrostu czasu Δt .

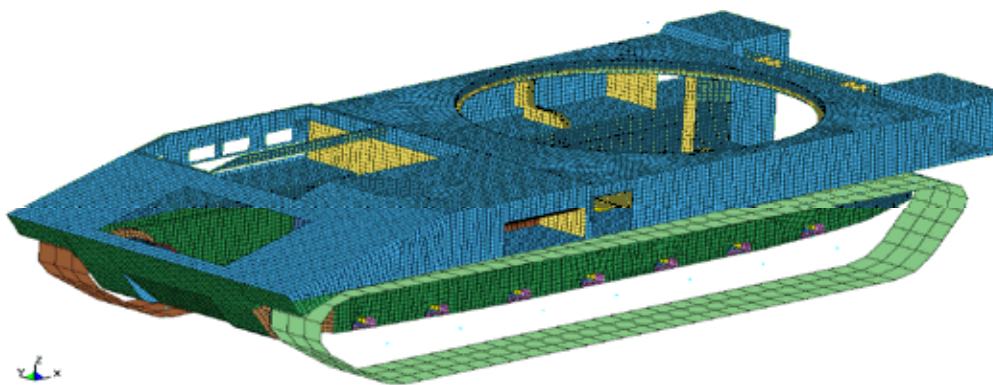
Do symulacji tego typu zjawisk stosuje się algorytm typu explicit.

3. MODEL NUMERYCZNY

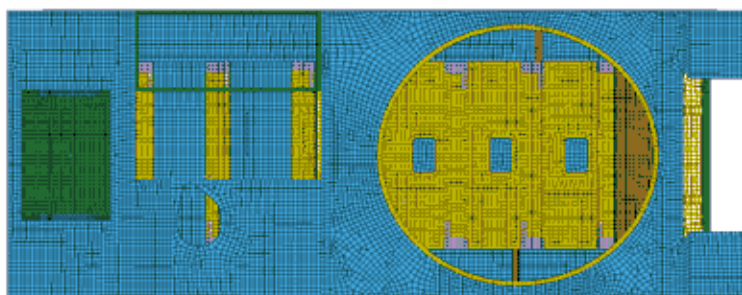
Główną trudnością przy modelowaniu wszelkiego rodzaju pojazdów jest odpowiedni podział geometrii (rys. 1) na elementy skończone z zachowaniem optymalnej ilości węzłów oraz punktów Gaussa. Następnie elementom nadaje się odpowiednie właściwości uwzględniające m.in. grubości, rodzaj definiowanego materiału i połączeń między poszczególnymi częściami pojazdu. Po dokonaniu ww. czynności powstaje model numeryczny pojazdu (rys. 2 - 8). Do analiz numerycznych zastosowano model materiału sprężysto-plastycznego (ze wzmocnieniem dynamicznym) o następujących właściwościach: $E = 210$ GPa – moduł Younga, $\nu = 0,3$ – liczba Poisson'a, $R_e = 1000$ MPa – granica plastyczności.



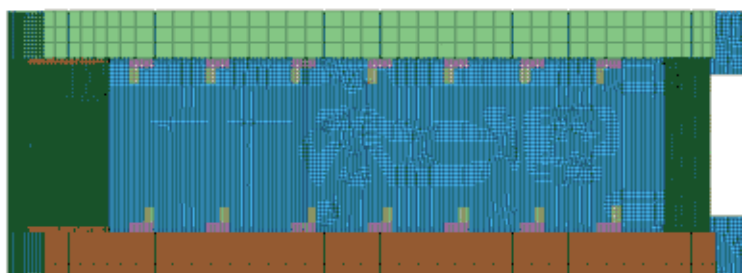
Rys. 1. Model geometryczny pojazdu



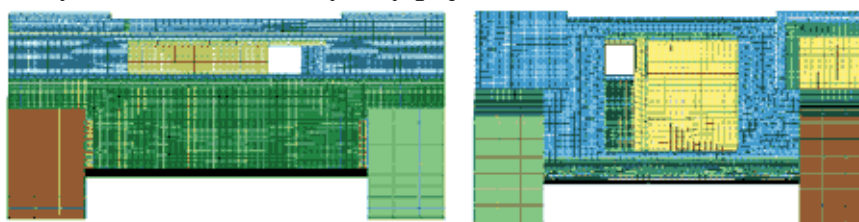
Rys. 2. Model numeryczny pojazdu KRAB – widok ogólny



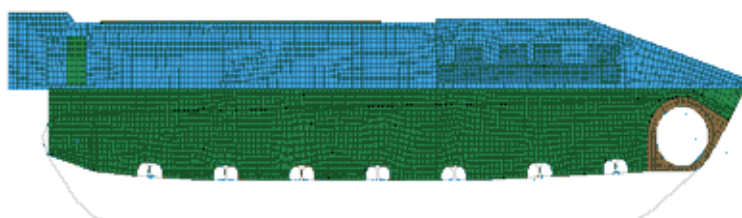
Rys. 3. Model numeryczny pojazdu KRAB – widok z góry



Rys. 4. Model numeryczny pojazdu KRAB – widok z dołu



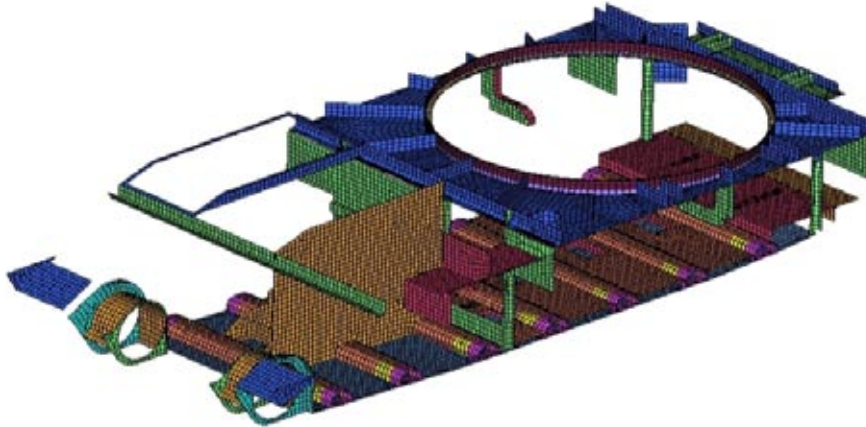
Rys. 5. Model numeryczny pojazdu KRAB – widok z przodu i z tyłu



Rys. 6 Model numeryczny pojazdu KRAB – widok prawej burty

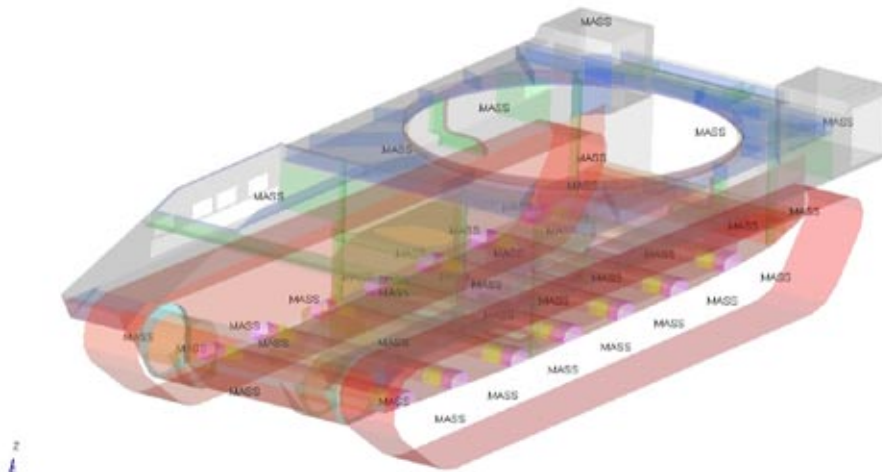


Rys. 7. Model numeryczny pojazdu KRAB – widok lewej burty



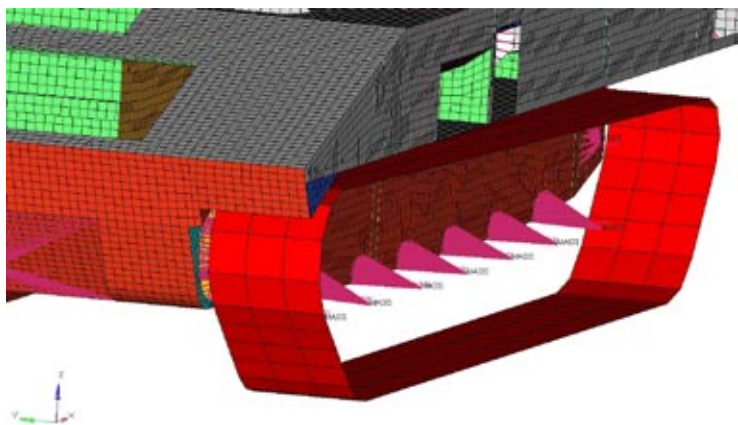
Rys. 8. Wnętrze pojazdu KRAB

Główne elementy masowe, takie jak: wieża, zbiorniki, akumulatory itp. są opisane poprzez masy skupione. Schematyczne rozmieszczenie mas skupionych przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Rozmieszczenie mas skupionych w modelu numerycznym

Kadłub poprzez elementy sprężysto-tłumiące został połączony z nieodkształcalnymi gąsienicami o masie odpowiadającej rzeczywistym gąsienicom. Zamodelowane elementy sprężysto-tłumiące są odpowiednikiem zawieszenia w rzeczywistym pojeździe (rys.10). Dodatkowo w analizach numerycznych uwzględniono oddziaływanie gąsienic pojazdu z podłożem, polegające na zastosowaniu funkcji kontaktu (z uwzględnieniem tarcia). Na podstawie ogólnodostępnej literatury przyjęto współczynnik tarcia statycznego i kinetycznego równy 0,8.



Rys. 10. Połączenie zawieszenia z kadłubem zrealizowane przy pomocy więzów interpolacyjnych

Wieża w przyjętym modelu jest zdefiniowana poprzez element masowy (masą punktową połączoną z łożyskiem oporowym znajdującym się na kadłubie poprzez równania więzów). W czasie analiz numerycznych realizowane jest obciążenie grawitacyjne, aby zapewnić realne zachowanie się pojazdu w czasie trwania zjawiska strzału. Obciążenie grawitacyjne realizowane jest w początkowej fazie analizy poprzez opcję DYNAMIC_RELAXATION [1]. Podejście takie eliminuje powstawanie niestabilności podczas gwałtownego obciążenia modeli oddziaływaniem grawitacyjnym.

Dodatkowo celem zwiększenia szybkości analizy numerycznej dokonano tzw. skalowania masy (mass scaling) wybranych elementów. Wiadomo, że krok czasowy w algorytmie rozwiązania explicit zależy przede wszystkim od wielkości elementów, z których zbudowany jest model. Zastosowanie skalowania jest możliwe przy spełnieniu kryterium stabilności Couranta [1].

4. WARIANTY OBLICZEŃ

Podczas analiz numerycznych model pojazdu w pierwszej fazie obciążono oddziaływaniem grawitacyjnym. Po odpowiednim czasie stabilizacji pojazd został obciążony impulsem siły (symulującym wystrzał) zmieniającej się w czasie. Podczas badań numerycznych zbadano wpływ sześciu konfiguracji kierunków wystrzału:

- 1) azymut 0° elewacja 0° - strzał do przodu,
- 2) azymut 0° elewacja 70° - strzał do przodu,
- 3) azymut 90° elewacja 0° - strzał w bok,
- 4) azymut 90° elewacja 70° - strzał w bok,
- 5) azymut 180° elewacja 0° - strzał do tyłu,
- 6) azymut 180° elewacja 70° - strzał do tyłu.

Wyniki dla każdego wariantu obciążenia przedstawiono w postaci map naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera. Ze względu na ograniczoną objętość artykułu przedstawiono najbardziej wyteżone wyniki uzyskane w przypadku analiz numerycznych.

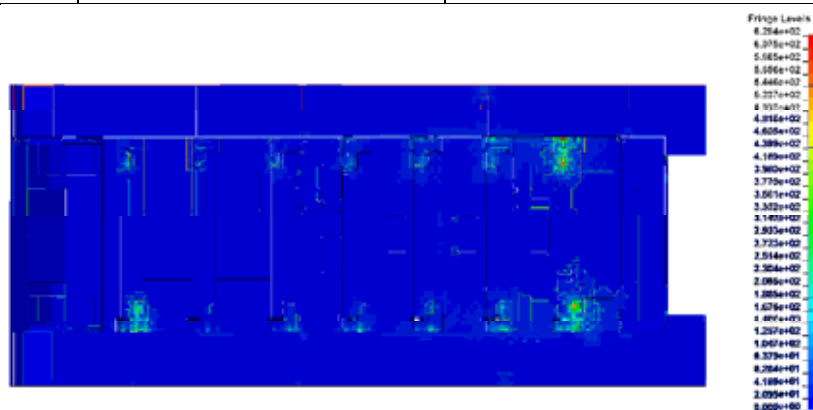
5. WYNIKI DLA WARIANTU 2 - 70° STRZAŁ DO PRZODU

Ze względu na przeznaczenie bojowe najbardziej prawdopodobnym sposobem użycia armato-haubicy jest strzał do przodu z lufą uniesioną pod kątem 70 stopni. W takim przypadku najbardziej wyteżonym elementem pojazdu jest zawieszenie oraz dno pojazdu. Dodatkowo rozkłady naprężeń nie są równomierne i głównemu obciążeniu podlega tył

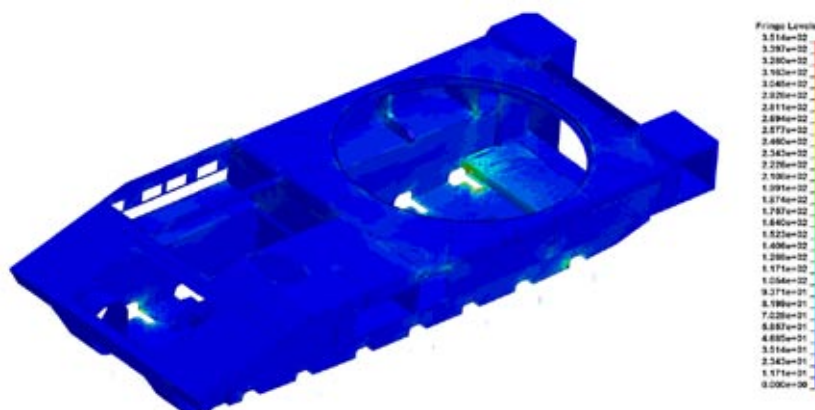
pojazdu. Praktycznie w przypadku takiego strzału kadłub zostaje „wbity” w grunt. W przypadku oceny wytrzymałości maksymalna wartość naprężeń zredukowanych nie przekraczała granicy plastyczności zadeklarowanego materiału i wyniosła 628 MPa. Rozpatrując kierunki główne naprężeń, również nie dopatrzono się przekroczenia granicy plastyczności. Rozkład naprężeń przedstawiono na rys. 11 i 12 oraz w tabelicy 1.

Tablica. 1. Maksymalne naprężenia zredukowane w analizowanych modelach

Lp.	Wariant	Max naprężenia zredukowane [MPa]
1.	0° strzał do przodu	581
2.	70° strzał do przodu	628
3.	0° strzał w bok	515
4.	70° strzał w bok	506
5.	0° strzał do tyłu	451
6.	70° strzał do tyłu	357



Rys. 11. Mapa naprężeń zredukowanych [MPa]



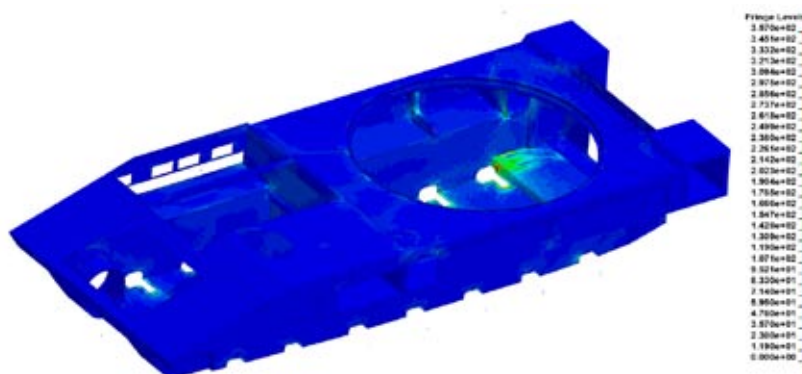
Rys. 12. Mapa naprężeń zredukowanych [MPa]

6. WYNIKI DLA WARIANTU 4 - 70° STRZAŁ Z BOKU

Drugim interesującym przypadkiem analiz numerycznych jest strzał boczny. W takim wariantcie obciążenia, ze względu na pewnego rodzaju mimośrodowość wieży, występuje pewnego rodzaju spiętrzenie naprężeń po stronie przeciwnej do oddania strzału. Mapa naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera przedstawiono na rys. 13 i 14. Warto zauważyć iż podobnie jak w przypadku strzału na wprost z kątem uniesienia armaty 70°, naprężenia nie przekraczały granicy plastyczności materiału. Oznacza to, iż wszystkie odkształcenia kadłuba występowały w zakresie sprężystym.



Rys. 13. Mapa naprężeń zredukowanych [MPa]



Rys. 14. Mapa naprężeń zredukowanych [MPa]

7. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono ważne z punktu widzenia projektowania inżynierskiego zagadnienie dotyczące odpowiedzi konstrukcji pojazdu wojskowego obciążonego impulsem wystrzału. Zaprezentowane symulacje były wykonywane najbardziej zaawansowanymi metodami numerycznymi, które uwzględniały zarówno nieliniowości fizyczne, jak i geometryczne.

Wyniki obliczeń wskazują, że dno pojazdu spełnia kryteria wytrzymałościowe w zakresie obciążeń dynamicznych.

Prezentowane w artykule metody numeryczne są wykorzystywane od niedawna do inżynierskich obliczeń pojazdów wojskowych.

Zaletą przedstawionych metod jest to, iż prezentowane metody komputerowe działają z przybliżoną dokładnością. Celem upewnienia się co do trafności uzyskanych wyników

wskazane jest przeprowadzenie weryfikacji obliczeń poprzez badania doświadczalne. Praktycznie w żadnym wariancie obciążenia nie została przekroczona granica plastyczności w dnie i bokach pojazdu. W kolejnych pracach planuje się obciążyć dno pojazdu dużym ładunkiem wybuchowym celem oceny poziomu ochrony przeciwminowej.

8. LITERATURA

- [1] LS-Dyna Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, 2006.
- [2] Karolczuk A., Kowalski M., Bański R., Żok F.: Fatigue phenomena in explosively welded steel–titanium clad components subjected to push–pull loading, *International Journal of Fatigue* 48 (2013) 101–108.
- [3] Burak M., Skibicki D., Stopel M.: Analysis of cdm model in the scope of low-cycle fatigue life estimation, *Key Engineering Materials* Vol. 598 (2014) pp 32-38.
- [4] Barnat W., Kordys M., Moćko W., Dybcio P., Panowicz R.: Numerical simulation of dynamic weld compression, *Journal of KONES Powertrain and Transport* 2012, 19, 2.
- [5] Burak M., Skibicki D., Stopel M., Analysis of CDM model in the scope of low-cycle fatigue life estimation, *Key Engineering Materials* Vol. 598 (2014).
- [6] Barnat W., Gotowicki P., Dybcio P., Gieleta R., Kosiuczenko K.: Ballistic performance of FRP – steel layered structures, *Journal of KONES*, 2013, 20, 2, 15-20.
- [7] Szturomski B., Grządziela A.: Impact Modeling of Underwater Explosion, *Solid State Phenomena, Mechatronic Systems Mechanics and Materials* Vol. 180, Zurich, pp. 288÷296, ISSN 1012-0394, 2012.

NUMERICAL STUDY OF THE RESPONSE OF THE BODY OF A HEAVY VEHICLE TO AN IMPACT LOAD AS EXEMPLIFIED BY THE KRAB SELF-PROPELLED GUN-HOWITZER

Abstract. The paper presents results of numerical analyses of the response of the body of a gun-howitzer to gun shot in different positions of the gun in relation to the body. Shots at several different barrel elevation angles were analyzed, including the worst cases in terms of structure strength. Numerical analysis was performed using the explicit method of computing fast-changing phenomena. The adopted main criterion of body response assessment was material effort.

Keywords: shot, tracked vehicles, numerical analysis.