

Andrzej **MORKA**  
Sebastian **STANISŁAWEK**  
Tadeusz **NIEZGODA**  
Dariusz **RUDNIK**

## ZASTOSOWANIE METOD MODELOWANIA KOMPUTEROWEGO I SYMULACJI DO WERYFIKACJI SYSTEMU MONTAŻU DODATKOWEGO OPANCERZENIA

**Streszczenie.** Artykuł omawia zagadnienie weryfikacji systemu montażu dodatkowego opancerzenia z zastosowaniem metod modelowania komputerowego i symulacji. Dla realizacji tego celu opracowano modele numeryczne istotnych elementów konstrukcji systemu mocowania oraz panelu i reprezentatywnej części płyty kadłuba. Dokonano selekcji odpowiednich modeli konstytutywnych wykorzystywanych materiałów oraz doboru właściwych parametrów materiałowych. Badane panele poddano obciążeniom normatywnym wg Normy Obronnej NO-06-A 103/2005 dla grupy N11 oraz uderzeniu pocisku AP 14,5x114 mm B32 zgodnie z wytycznymi zawartymi w STANAG 4569. Rezultaty uzyskane na drodze analiz numerycznych w szczególności rozpatrywano pod względem możliwości wystąpienia trwałych odkształceń plastycznych w elementach systemu mocowania opancerzenia dodatkowego. Stwierdzono, że w badanych przypadkach uderzenie pocisku powoduje powstanie trwałych (plastycznych) odkształceń w elementach mocowania (tulejki, spoiny spawu), ale ilościowo są one dalekie od wartości niszczących. W śrubach, podkładkach oraz dla połączeń gwintowych nie zidentyfikowano niepokojących wartości naprężenia i odkształceń. Jedyną sytuacją wymagającą uwagi są trwałe odkształcenia w obszarze zagniecenia nitonakrętek zaobserwowane dla obciążeń udarem jednokrotnym i wielokrotnym. Analiza wariantów uderzenia pocisku AP 14,5 centralnie w osi śruby układu mocowania wykazuje brak zdolności ochronnej w tym obszarze. Pocisk perforuje elementy systemu mocowania bez istotnego oporu tracąc nieznaczną część swojej energii, tym samym stanowi nadal zagrożenie dla perforacji kadłuba.

**Słowa kluczowe:** mechanika komputerowa, symulacja.

### 1. WSTĘP

Współczesne systemy opancerzenia odgrywają niezwykle istotną rolę zarówno na polu walki, jak i w zastosowaniach cywilnych. Wciąż znacznie większą uwagę poświęca się systemom pasywnym [1], [2] niż systemom aktywnym [3], głównie ze względu na ich znacznie niższy koszt i relatywnie prostą budowę. Większość prac z tego zakresu przyjmuje założenie, że badany fragment pancerza stanowi oddzielny panel balistyczny i podlega jedynie lokalnej interakcji z zagrożeniem. W efekcie przyjmuje się, że sposób mocowania nie odgrywa znaczącej roli. Takie podejście pozwala na wiarygodne porównanie różnego typu materiałów. Jednak praktyka konstrukcyjna wymaga zastosowania systemu mocowania, który może mieć istotny wpływ na wytrzymałość balistyczną konstrukcji. Tym zagadnieniem pragną zająć się autorzy niniejszego artykułu.

Przedmiotem analizy jest często spotykane mocowanie panelu balistycznego na wspornikach przymocowanych do konstrukcji nośnej w określonych punktach. We wspornikach występują śruby, nitonakrętki, tuleje, podkładki oraz spoiny łączące elementy konstrukcyjne do kadłuba. Mocowany panel jest odsunięty od powierzchni kadłuba na odległość 35 mm. Do analizy koncepcji systemu montażu autorzy wykorzystali metodę

modelowania komputerowego i symulacji. W tym celu opracowali odpowiednie modele numeryczne proponowanych rozwiązań technicznych, a następnie poddali je obciążeniom normatywnym wg Normy Obronnej NO-06-A 103/2005 [4] dla grupy N11 oraz uderzeniu pocisku AP 14,5x114 mm B32 zgodnie z wytycznymi zawartymi w STANAG 4569 [5].

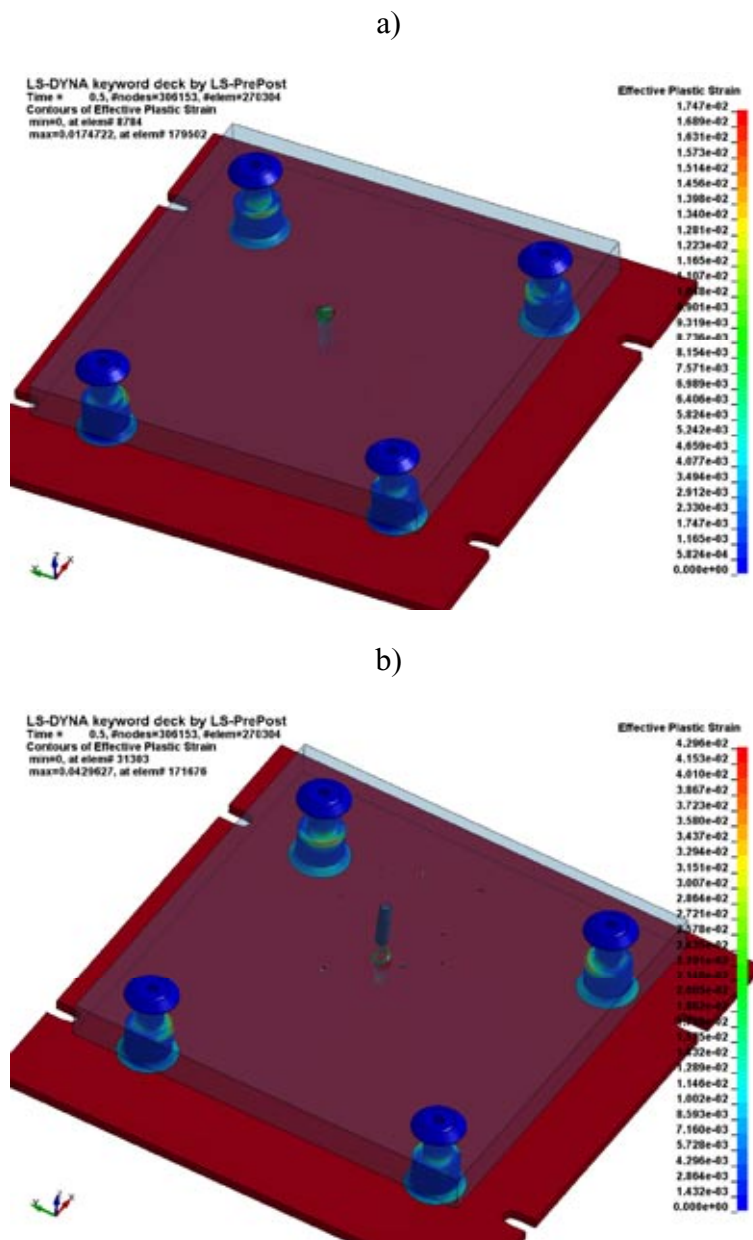
## 2. OPIS PROBLEMU

W pierwszym etapie opracowania modeli numerycznych dokonano dyskretyzacji przestrzennej istotnych elementów konstrukcji systemu mocowania oraz panelu i reprezentatywnej części płyty kadłuba. Podział na elementy skończone musiał uwzględnić najważniejsze cechy geometrii konstrukcji oraz ograniczone zasoby systemu obliczeniowego (wydajność i ilość dostępnych procesorów, pamięć operacyjna RAM oraz przestrzeń do przechowywania i przetwarzania danych). Drugi etap opracowywania modeli numerycznych polegał na wyborze odpowiednich modeli konstytutywnych wykorzystywanych materiałów oraz doborze właściwych parametrów materiałowych. Zastosowano techniki komputerowej symulacji próby rozciągania w celu określenia charakterystyki naprężenie-odkształcenie w mierze rzeczywistej. Podstawą były dostępne dane producentów najczęściej prezentowane w miarach inżynierskich. Zestawy parametrów materiałowych opracowano dla modelu liniowo-sprężystego stali ArmoX 500 (zastępcze modele paneli) oraz dwuliniowego sprężysto-plastycznego: stali S355JR, stali nierdzewnej 1.4570 (nitonakrętki), stali sprężynowej 65G/1.1260 (podkładka) oraz stali 10.9 (śruby). W przypadku mosiądzu (płaszcz pocisku AP 14,5) oraz stali HHS (rdzeń pocisku AP 14,5) zastosowano model materiału Johnson-Cook. Trzeci, ostatni etap budowy modeli komputerowych koncentrował się na określeniu numerycznej implementacji warunków początkowo-brzegowych. W tej części badania opracowano charakterystykę wymuszenia (siła, czas) dla obciążeń udarem pojedynczym i wielokrotnym. Na podstawie danych literaturowych i normatywnych określono kształt i czas trwania impulsów, a następnie metodą badań parametrycznych oszacowano wartości amplitud gwarantujące osiągnięcie przyśpieszeń zawartych w normie. W przypadkach uderzenia pocisku AP 14,5 zadano prędkość początkową równą 910 m/s. Warunki brzegowe występujące w modelach miały bardzo złożony charakter i wymagały szczególnej uwagi. Dokonano tu m.in. modelowania oddziaływań kontaktowych z uwzględnieniem sił tarcia metodą funkcji kary po przyjęciu logiki kontaktu segment-segment (lub inaczej ścianka-ścianka elementu skończonego), opisano połączenia spawane i gwintowane oraz numeryczną realizację wstępnego sprężenia śrub.

## 3. ROZWIĄZANIE PROBLEMU I ANALIZA REZULTATÓW

Pierwszą rozważaną sytuacją było uderzenie pocisku AP 14,5 B32 w środek panelu balistycznego (płaska płyta). Rys.1 a)-b) przedstawiają, w postaci mapy kolorów, rozkład efektywnych odkształceń plastycznych w elementach układu mocowania panelu do kadłuba (śruba, tulejka, podkładka, spoina). Aby poprawić widoczność poszczególnych elementów, panel pokazany został jako materiał półprzezroczysty. Wstępne założenie, zgodnie z którym panel był materiałem liniowo-sprężystym, okazało się nadmiernym uproszczeniem: w jego przypadku pocisk podlegałby znacznie silniejszemu hamowaniu niż w przypadku uderzenia w wielowarstwowy panel ceramiczno-metalowy. Taki pancerz jako bardziej wytrzymały (przedmiot oddzielnej analizy pominiętej w tej pracy) spowalnia pocisk w większym stopniu. Z tego względu model sprężysty zastąpiono dwuliniowym sprężysto-plastycznym. Umowną granicę plastyczności dla panelu, określono tak, aby osiągnąć realne wartości opóźnień pocisku. Niestety, przy takim podejściu odwzorowanie wszystkich cech oddziaływania panelu na pocisk nie jest możliwe. Z uwagi na ten fakt zbadano zachowania się systemu mocowania

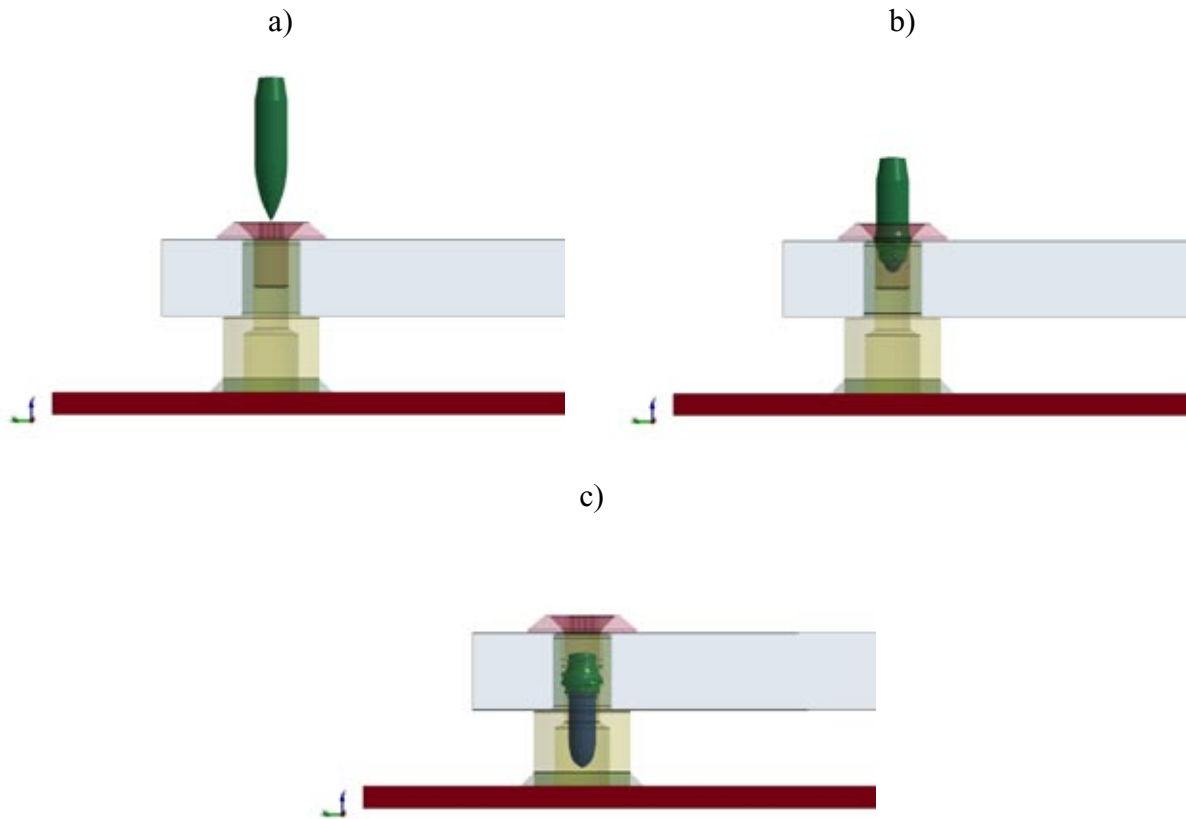
dla dwóch wartości granicy plastyczności (a)  $\sigma_y=1$  GPa oraz (b)  $\sigma_y=2$  GPa. Dla pierwszej z nich osiągnięto zbliżoną wartość opóźnień pocisku, ale pocisk dokonał perforacji panelu. W przypadku drugim pocisk, został zatrzymany przez panel, ale uzyskane opóźnienia dwukrotnie przekroczyły wartości obserwowane dla paneli ceramiczno-metalowych. Z analizy rysunków wynika, że w obu sytuacjach pojawiły się odkształcenia trwałe w elementach mocowania: spawie i tulejkach. Największa wartość (około 0,04) wystąpiła (wariant b) w pobliżu krawędzi tulejek, jednak okazuje się ona daleka od niszczącej, która wynosi 0,3. Rozkład uzyskanych odkształceń dla wszystkich czterech węzłów mocowania jest analogiczny, co świadczy o symetrycznym rozkładzie obciążeń z dominującą tendencją do zginania w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni panelu.



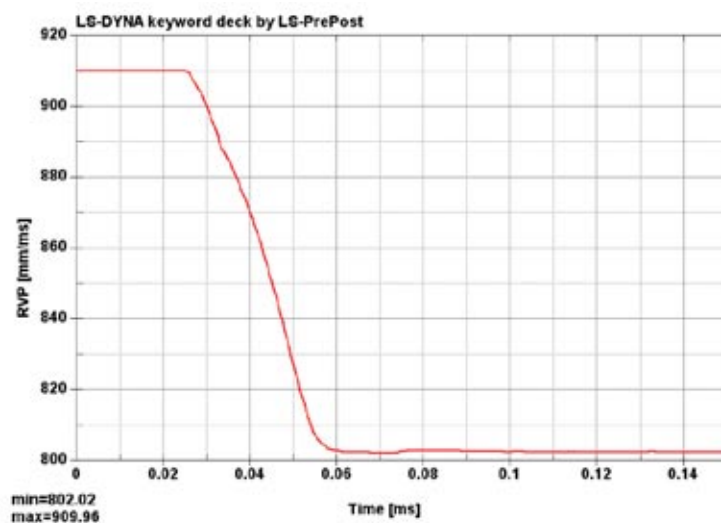
**Rys. 1. Centralne uderzenie pocisku AP 14,5 B32, 4 otwory, panel odsunięty od kadłuba, początkowa prędkość pocisku 910 m/s: a)  $\sigma_y=1$  GPa, b)  $\sigma_y=2$  GPa**

Kolejnym analizowanym przypadkiem była symulacja uderzenia pocisku AP 14,5x114 mm B32 w śrubę układu mocowania (rys. 2). Elementy systemu mocowania oraz

panel zilustrowano w trybie półprzezroczystym. Z analizy rysunku wynika, że pocisk bez większych problemów dokonał perforacji układu, niszcząc śrubę oraz tracąc niewielką część prędkości początkowej rzędu 100 m/s (rys. 3). Tym samym nadal stanowi zagrożenie dla pojazdu. Sytuację może poprawić umieszczenie wewnątrz tulejki, od strony płyty ArmoX, elementu ceramicznego w postaci walca o odpowiedniej średnicy i wysokości.



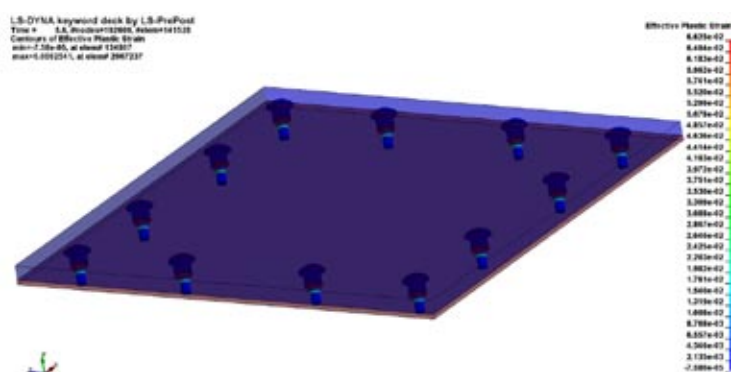
**Rys. 2. Uderzenie pocisku AP 14,5 B32 w śrubę, 4 otwory, panel odsunięty od kadłuba, początkowa prędkość pocisku 910 m/s: a)  $t=0$  ms, b)  $t=0,04$  ms, c)  $t=0,1$  ms**



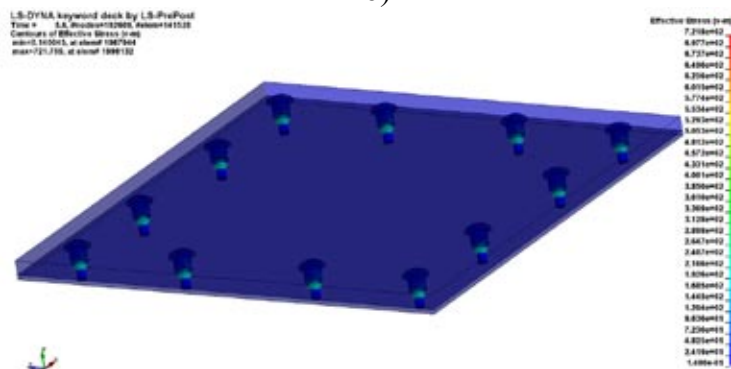
**Rys. 3. Uderzenie pocisku AP 14,5 B32 w śrubę - zmiana prędkości rdzenia w czasie**

Przedmiotem dalszych analiz było zagadnienie uderzenia wielokrotnego. W tym przypadku mocowanie panelu do kadłuba było zrealizowane za pomocą połączenia zawierającego śrubę, tulejkę, podkładkę oraz nitonakrętkę (w każdym z dwunastu słupków). Panel obciążano ciśnieniem w kierunku stycznym do powiedzeni panelu, tak by uzyskać amplitudę drgań zgodną z normą [4]. Z analizy rysunków wynika, że maksymalna wartość odkształceń plastycznych sięga 0,065 przy wartości niszczonej równej 0,4 i występuje w obszarze zagniecenia nitonakrętki. Rozkład uzyskanych odkształceń dla wszystkich węzłów mocowania jest zbliżony, co świadczy o równomiernym rozkładzie obciążeń. Maksymalne wartości naprężenia zredukowanego przekraczają 700 MPa i zlokalizowano je w pobliżu krawędzi podkładek sprężystych, ale nie powoduje to wystąpienia odkształceń trwałych. Należy przypuszczać, że tak duża koncentracja naprężenia w podkładkach jest nieznacznie przeszacowana ze względu na uproszczony opis geometrii podkładki oraz ograniczenie liczby elementów skończonych.

a)

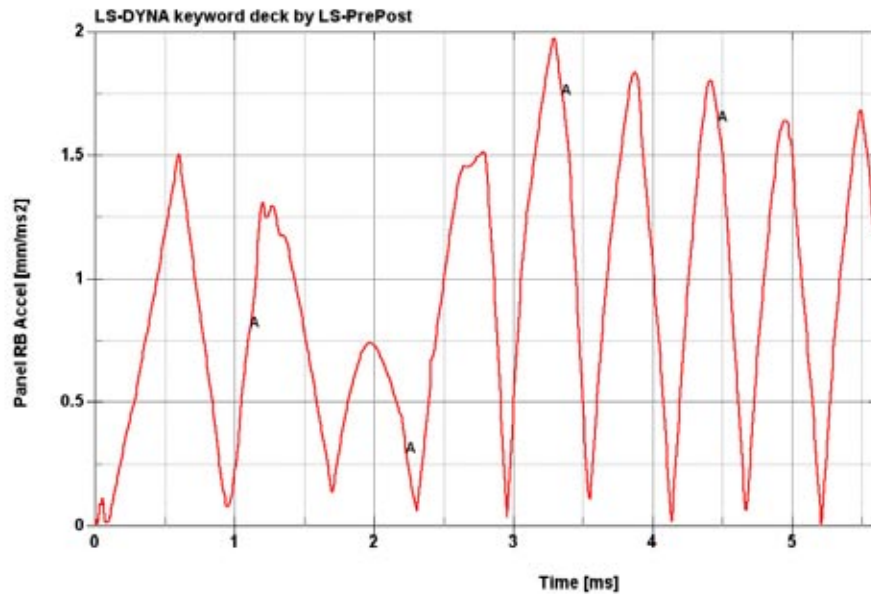


b)



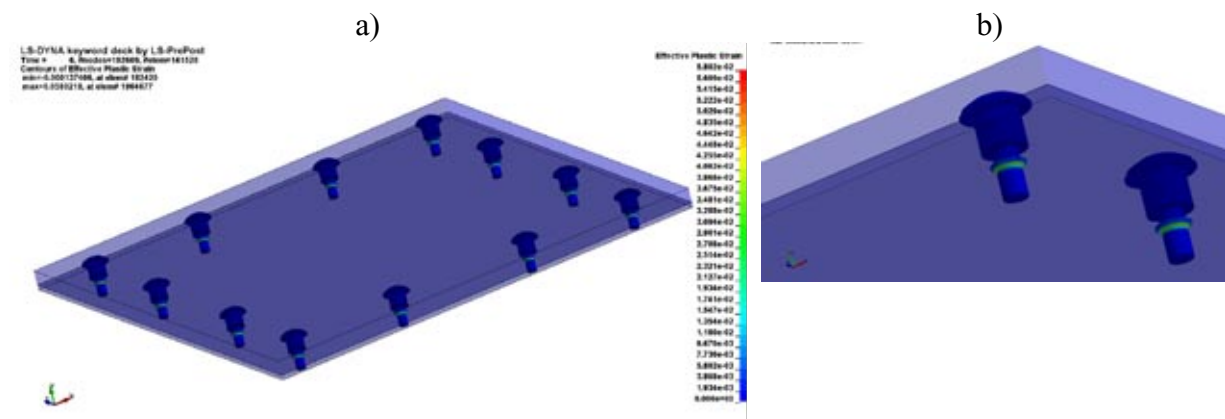
**Rys. 4. Udar wielokrotny, 12 otworów, panel montowany na kadłubie z zastosowaniem nitonakrętki: a) odkształcenie plastyczne, b) naprężenie**

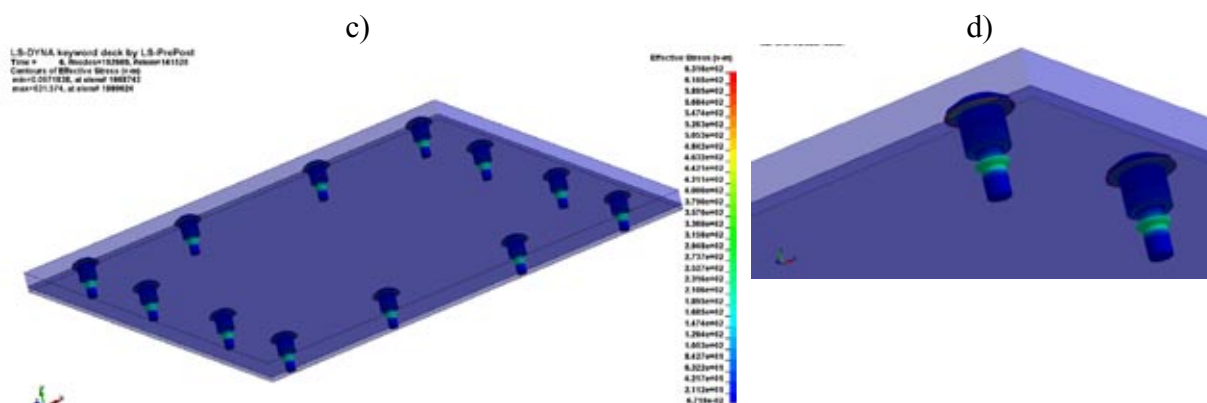
Na rys. 5 przedstawiono przebieg przyspieszenia panelu. Obserwowana amplituda spełnia wymagania normy  $1500 \text{ m/s}^2$ , natomiast częstotliwość drgań nie jest zbieżna z częstotliwością wymuszenia. Co świadczy zapewne o tym, że płyta drga z częstotliwością drgań własnych.



**Rys. 5. Charakterystyka wartości przyspieszenia panelu pod wpływem udaru wielokrotnego działającego w kierunku stycznym do powierzchni panelu**

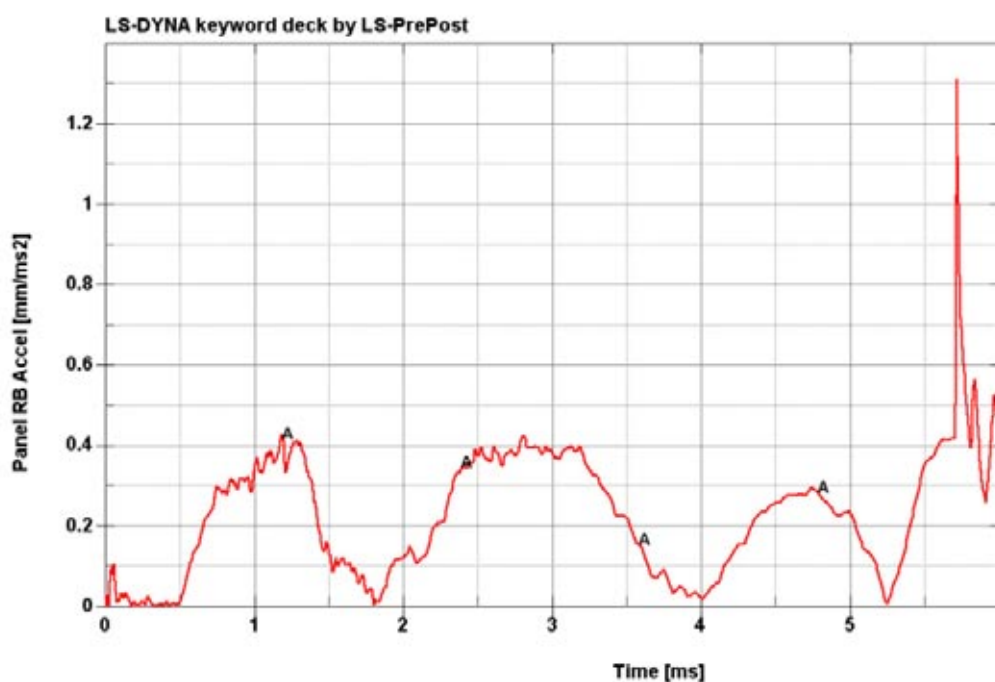
Analizie numerycznej poddano także zagadnienie udaru pojedynczego. Panel obciążano pojedynczym impulsem ciśnienia, prostopadle do panelu, tak aby uzyskać amplitudę drgań zgodną z normą [4]. Rys.6 przedstawia rozkład odkształceń plastycznych oraz naprężenia zredukowanego w elementach systemu mocowania panelu. Analogicznie do przypadku obciążenia udarem wielokrotnym, również dla udaru pojedynczego maksymalne wartości odkształceń plastycznych pojawiły się w zagniecionych częściach nitonakrętek. W tym wypadku osiągnęły 0,06, czyli nieznacznie mniej w stosunku do wariantu poprzedniego. Natomiast maksymalne wartości naprężenia zredukowanego przekraczające 630 MPa zlokalizowano w pobliżu krawędzi podkładek sprężystych, ale nie powodują one wystąpienia odkształceń trwałych. Interpretacja tego faktu jest analogiczna jak w przypadku poprzednim.





**Rys. 6. Udar pojedynczy, 12 otworów, panel montowany na kadłubie z zastosowaniem nitonakrętki: a) rozkład odkształceń plastycznych – widok ogólny, b) rozkład odkształceń plastycznych – widok w zbliżeniu, c) rozkład naprężenia zredukowanego – widok ogólny, d) rozkład naprężenia zredukowanego – widok w zbliżeniu**

Na rys.7 przedstawiono przebieg przyspieszenia panelu pod wpływem obciążenia udarem pojedynczym. Z analizy wykresu wynika fakt, że zadany impuls wzbudził w panelu drgania o amplitudzie ok.  $400 \text{ m/s}^2$  i częstotliwości ok.  $500 \text{ Hz}$ . Gwałtowny, krótkotrwały wzrost przyspieszenia w końcowej fazie analizy ma prawdopodobnie charakter numeryczny.



**Rys. 7. Charakterystyka wartości przyspieszenia panelu pod wpływem udaru pojedynczego działającego w kierunku normalnym do powierzchni panelu**



## 5. PODSUMOWANIE

Opisane rezultaty badań pozwoliły na określenie wpływu systemu montażu dodatkowego opancerzenia na odporność balistyczną panelu. Wyniki uzyskane na drodze analiz numerycznych w szczególności rozpatrywano pod względem możliwości wystąpienia trwałych odkształceń plastycznych w elementach systemu mocowania opancerzenia dodatkowego. Dodatkowo ocenie poddano rozkłady naprężenia zredukowanego, wartości przyspieszeń panelu oraz zmiany prędkości pocisku w trakcie perforacji panelu. Na podstawie tych danych stwierdzono, że w badanych przypadkach uderzenie pocisku powoduje powstanie trwałych (plastycznych) odkształceń w elementach mocowania (tulejki, spoiny spawu), ale ilościowo są one dalekie od wartości niszczących. W śrubach, podkładkach oraz dla połączeń gwintowych nie zidentyfikowano niepokojących wartości naprężenia i odkształceń. Jedyną sytuacją wymagającą uwagi są trwałe odkształcenia w obszarze zagniecenia nitonakrętek zaobserwowane dla obciążeń udarem jednokrotnym i wielokrotnym. Analiza wariantów uderzenia pocisku AP 14,5 centralnie w osi śruby układu mocowania wykazuje brak zdolności ochronnej w tym obszarze. Pocisk perforuje elementy systemu mocowania bez istotnego oporu, tracąc nieznaczną część swojej energii, tym samym stanowi nadal zagrożenie dla perforacji kadłuba. Możliwym rozwiązaniem tego problemu w przypadku wariantu z panelem odsuniętym od powierzchni kadłuba jest umieszczenie wewnątrz tulejki odpowiednio przygotowanej kształtki ceramicznej w kształcie krążka lub słupka. Należy jednak wziąć pod uwagę, że ze względu na kształt typowego kadłuba uderzenie prostopadłe jest stosunkowo mało prawdopodobne. W znamienitej większości przypadków pocisk uderzając pod kątem i trafiając w śrubę mocowania oddziałuje także z panelem balistycznym.

## 6. LITERATURA

- [1] Wiśniewski A.: *Pancerze, budowa, projektowanie i badanie*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2001. ISBN 83-204-2609-X.
- [2] Bhatnagar A.: *Lightweight ballistic composites: Military and law enforcement applications*. Woodhead Publishing Limited, Michigan, 2006.
- [3] Galiński C.: „Pancerze reaktywne i aktywna ochrona balistyczna”, *Szybkobieźne Pojazdy Gąsienicowe* (15), nr 1/2002 s. 1-11 OBRUM Sp. z o. o. Gliwice, 2002.
- [4] Norma obronna NO-06-A103: 2005. Uzbrojenie i sprzęt wojskowy. Ogólne wymagania techniczne, metody kontroli i badań. Wymagania środowiskowe.
- [5] STANG 4569, Edn 1, Protection Levels for Occupants of Logistic and Light Armoured Vehicles, NATO/PFP Unclassified. 2005.

*Artykuł powstał na podstawie wyników prac prowadzonych w ramach projektu nr DOBR-BIO4/024/13237/2013 pt. „Dodatkowe modułowe opancerzenie kołowych transporterów opancerzonych i platform gąsienicowych”, finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.*



## APPLICATION OF COMPUTER MODELLING AND SIMULATION METHODS IN VERIFICATION OF A SYSTEM OF ADDITIONAL ARMOUR INSTALLATION

**Abstract.** The paper discusses the problem of verifying systems of additional armour installation with the use of computer modelling and simulation methods. To achieve this purpose, numerical models of essential structural elements of the fastening arrangement, of the panel and of the representative portion of hull plate have been developed. Suitable constitutive models of the materials used and proper parameters thereof have been selected. Tested panels were subjected to group N11 standard loads in accordance with the Defence Standard NO-06-A 103/2005 and AP 14.5x114 mm B32 projectile impact in accordance with the guidelines included in STANAG 4569. The results obtained by means of numerical analyses were studied in particular in terms of establishing the probability of permanent plastic deformations in the elements of the additional armour fastening system. It was found that in the cases studied the impact of a projectile results in permanent (plastic) deformations in the fastening arrangement elements (bushings, welds), but in quantitative terms these were far from destructive. No disturbing stresses or strains have been identified in bolts, washers and threaded connections. The only situation that needs to be looked into are permanent strains in the crush area of blind rivet nuts observed for loads from single and repeated impacts. Analysis of the impact of an AP 14.5 projectile centrally along the axis of the bolt of the fastening arrangement showed lack of protective capacity in this area. The projectile perforates elements of the fastening arrangement with no significant resistance, while its energy decreases only slightly and thereby the threat of hull penetration is still retained.

**Keywords:** computer mechanics, simulation.