

Grzegorz SŁAWIŃSKI<sup>1</sup>, Piotr MALESA<sup>1</sup>, Tadeusz NIEZGODA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

## NUMERYCZNE BADANIA MAT ENERGOCHŁONNYCH JAKO ELEMENT ZWIĘKSZAJĄCY BEZPIECZEŃSTWO ZAŁOGI POJAZDU WOJSKOWEGO

**Streszczenie:** W pracy zostały przedstawione wyniki modelowania oraz symulacji numerycznych paneli energochłonnych absorbujących energię pochodzącą od wybuchu. Przedstawiono syntetyczny sposób analizy zagadnienia od opracowania geometrii po przygotowanie modelu numerycznego. Wyniki w postaci sił obciążających charakterystyczne punkty pomiarowe manekina Hybryd III 50th w wersji Fast oraz pozostałe charakterystyki przedstawiono w formie wykresów.

**Słowa kluczowe:** bezpieczeństwo żołnierzy, maty energochłonne, MES, LS-Dyna

### 1. WSTĘP

Niniejsza praca w głównej mierze stanowi studium modelowania elementów chroniących zdrowie i życie załogi pojazdów wojskowych. Głównym celem pracy były symulacje numeryczne paneli absorbujących energię pochodzącą z detonacji różnego rodzaju ładunków wybuchowych.

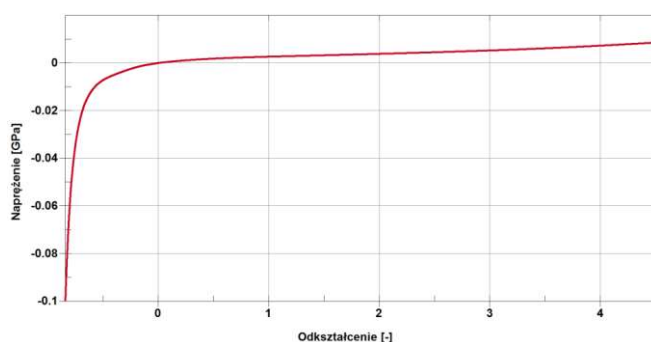
W obecnie nowoprojektowanych, czy też będących na wyposażeniu wojska pojazdach wojskowych szczególnie nacisk kładzie się na bezpieczeństwo przewożonych nimi załóg. Aby sprostać temu wymaganiu stosuje się wiele systemów ochrony załogi, których głównym zadaniem jest redukcja obciążeń pochodzących od wybuchu i działających na przebywających w jego wnętrzu żołnierzach. Dowodem na to może być gwałtowny wzrost ofert rynkowych systemów ochrony pasażerów dla pojazdów bojowych oraz liczne publikacje związane tą tematyką [1,2,3]. Przetawione rozwiązania opisują koncepcję zastosowania mat ochronnych pozwalających na zredukowanie sił oddziaływujących na nogi załoganta umieszczone bezpośrednio na podłodze. Wykonany został model geometryczny opisywanej maty, który następnie poddano dyskretyzacji oraz opisano przy pomocy danych materiałowych wyznaczonych na podstawie badań eksperymentalnych. Symulacje numeryczne zostały przeprowadzone z wykorzystaniem algorytmu CONWEP przy pomocy kodu obliczeniowego LS-Dyna.

## 2. ANALIZY NUMERYCZNE PANELI ENERGOCHŁONNYCH

Materiały takie jak guma zdolne do bardzo dużych odkształceń zaliczane są do materiałów hipersprężystych, wymagających odpowiednich modeli konstytutywnych oraz wiarygodnego ich doboru w konkretnym przypadku. Hipersprężystość oznacza zdolność materiału do ulegania dużemu odkształceniu sprężystemu pod wpływem małych sił, bez utraty pierwotnych właściwości. Materiał hipersprężysty wykazuje zachowanie nieliniowe, co oznacza, że jego deformacja nie jest wprost proporcjonalna do przyłożonego obciążenia. W analizowanym problemie jako materiał, z którego wykonano matę energochłonną wybrano elastomer Asmaprene Q 55. Parametry wytrzymałościowe niezbędne do opisu modelu numerycznego zostały zbadane na drodze eksperymentu a następnie przypisane przy pomocy modelu materiału SIMPLIFIED\_RUBBER/FOAM\_WITH\_FAILURE (Tabela 1). Należy zauważyć, że zaplecze sprzętowe, którym dysponowano pozwalało na badanie charakterystyki w warunkach statycznych i quasi statycznych. Planowane jest uzupełnienie pracy o szersze badania w późniejszym czasie.

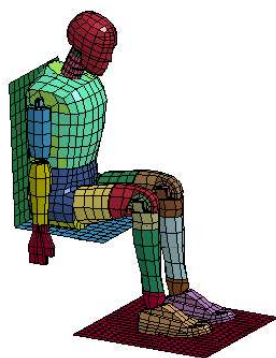
**Tabela 1. Dane materiałowe elastomeru Asmaprene Q 55  
(MAT\_SIMPLIFIED\_RUBBER\_FOAM\_WITH\_FAILURE)**

Parametr	Jednostka	Wartość
Density	kg/mm <sup>3</sup>	1.25e-6
Linear bulk modulus	GPa	0.2333
PR/BETA	-	0.45
Material failure paramete K	-	100
Material failure paramete GAMA1	-	0
Material failure paramete GAMA2	-	0.02
Damage parameter EH	-	0.001
Specimen gauge length	-	1
Specimen width	-	1
Specimen thickness	-	1

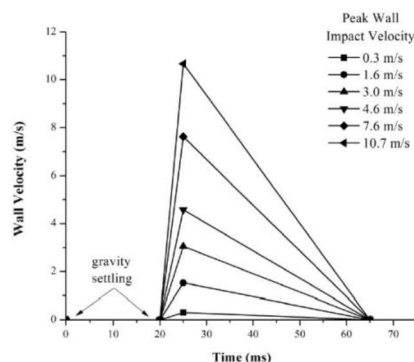


**Rys. 1. Charakterystyka napężenia w funkcji odkształcenia użyta do opisu modelu**

Do badania przydatności stosowania mat energochłonnych wykorzystano model manekina Hybryd III 50th w wersji Fast. Poprawność jego funkcjonowania sprawdzono w odniesieniu do pracy Nilakantana [4]. Siedzisko na którym siedział manekin zostało utwierdzone. Wymuszenie w postaci przemieszczenia płyty na której spoczywały nogi zrealizowano z zadaną przy pomocy krzywej (Rys. 3) prędkością, której maksymalna wartość wynosiła 10,7 m/s.

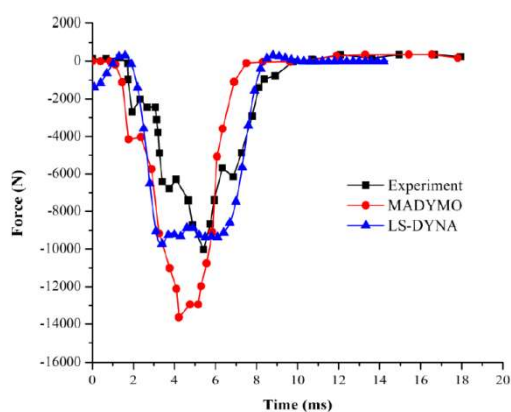


Rys. 2. Widok aksonometryczny modelu manekina użytego w analizach numerycznych

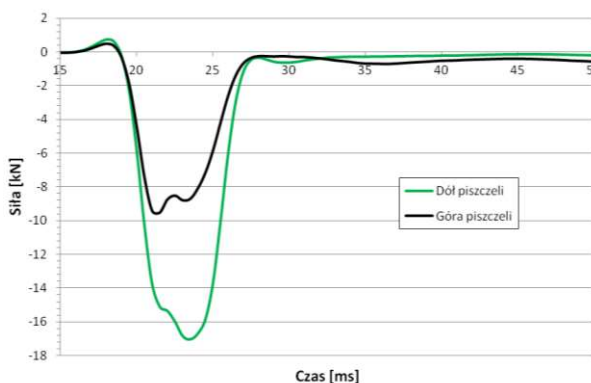


Rys. 3. Wykres zmiany prędkości w funkcji czasu opisujący obciążenie podłogi

W wynikach badań zamieszczonych w literaturze uzyskano wartość siły w piszczelach manekina równą 10 kN dla badań eksperymentalnych, w symulacji Ls-Dyna 9 kN, natomiast w symulacji Madymo 14 kN. Analizy wykonane na potrzeby opisywanego zagadnienia wykazały wystąpienie siły o wartości około 10 kN. Przesunięcie charakterystyki w czasie wyniku z uwzględnienia na wykresie czasu swobodnego opadania nóg manekina na podłogę.



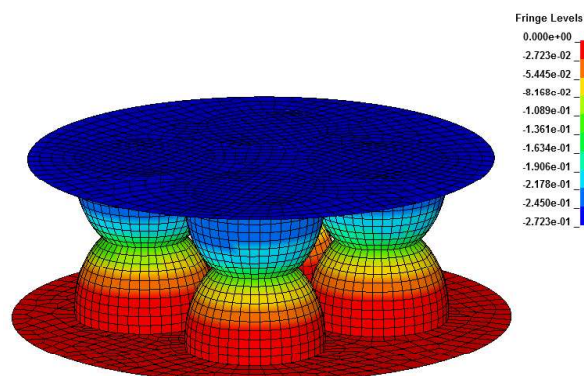
Rys. 4. Wykres siły obciążającej kość piszczelową w funkcji czasu – wyniki z literatury



Rys. 5. Wykres siły obciążającej kość piszczelową w funkcji czasu - wyniki z analizy numerycznej

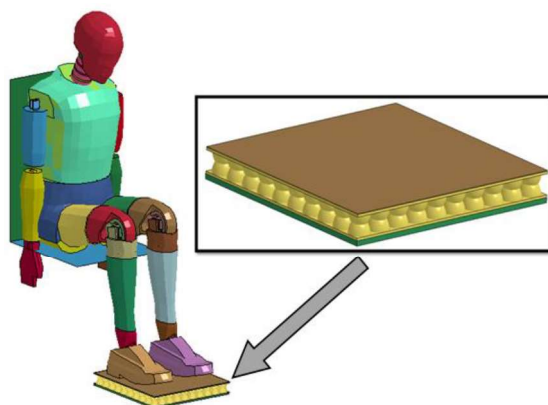
Po sprawdzeniu poprawności działania modelu numerycznego manekina przystąpiono do budowy geometrii paneli energochłonnych a następnie jej dyskretyzacji. Struktura składała się z szeregu półeliptycznych profili, których wysokość wynosiła 36 mm, maksymalna średnica 30 mm a minimalna 18 mm. Grubość struktury ustalono na 4 mm.

Pierwsza z analiz miała na celu sprawdzenie zachowania badanej maty przy zadanym obciążeniu w postaci ciśnienia symulującego masę załoganta tj. 80 kg. Maksymalne ugięcie segmentu maty zbudowanego z 4 półeliptycznych tulejek wyniosło 0,27 mm co obrazuje poniższy rysunek (Rys. 6).



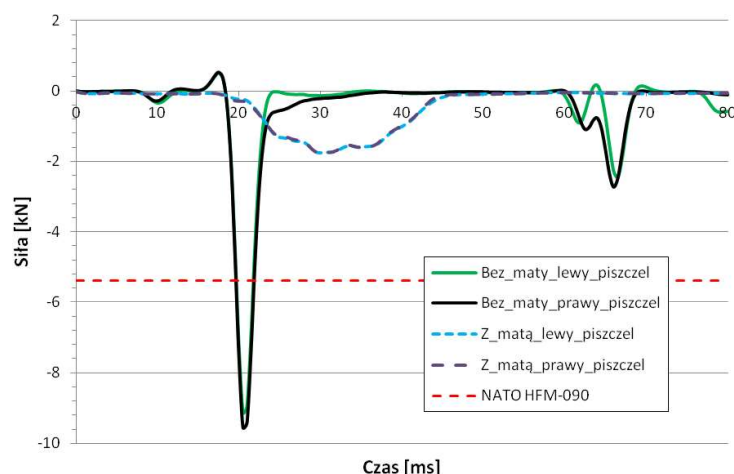
**Rys. 6. Mapa przemieszczeń elementów struktury cienkościennej przy obciążeniu odwzorowującym człowieka o masie 80 kg**

Kolejnym krokiem było numeryczne badanie wpływu maty energochłonnej na wartości sił uzyskiwanych w piszczelach manekina. Górna powierzchnia maty została wzmocniona płytą aluminiową o grubości 2 mm, której celem było jej usztywnienie oraz wypełnienie otworów w wewnętrznej części maty. Od dołu przytwierdzono płytę o grubości 8 mm wykonaną ze stali. Do zespolenia wszystkich elementów składowych maty wykorzystano funkcję kontaktu `Tied_nodes_to_surface_offset`, która symuluje fizyczną spójność ww. warstw. Algorytm kontaktu utrzymuje niezmienną odległość pomiędzy wybraną grupą węzłów, a powierzchnią elementów. Sprawilo to zwiększenie sztywności maty a co więcej doprowadziło do tego, że deformacji ulegają również te elementy cienkościenne, które nie znajdują w bezpośrednim obszarze nacisku stóp. W modelu referencyjnym bez maty pod nogami manekina umieszczono jedynie stalową płytę o grubości 8 mm. Biorąc pod uwagę, że badania dotyczą ochrony nóg załoganta nie uwzględniano zabezpieczenia manekina pasami bezpieczeństwa. Siedzisko pozostało w dalszym ciągu utwierdzone na stałe.

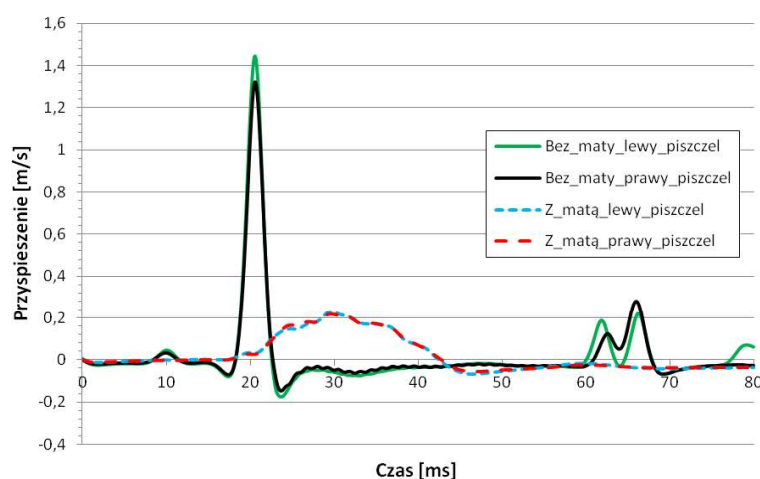


**Rys. 7. Widok analizowanego modelu numerycznego**

Bieżące analizy numeryczne zostały przeprowadzone z wykorzystaniem algorytmu CONWEP, przy pomocy którego zadano masę ładunku sferycznego TNT wynoszącą 6 kg oraz punkt detonacji znajdujący się centralnie pod nogami załoganta w odległości 430 mm od dolnej płyty dla modelu z zastosowaną matą ochronną. Wymuszenie realizowano poprzez ciśnienie pochodzące od wybuchu ładunku działające na spód płyty. Na krawędziach płyty zostały przyjęte warunki brzegowe umożliwiające jej przemieszczenie jedynie w kierunku pionowym. Czas trwania analizy został ustalony na 80 ms przy czym pierwsze 20 ms przeznaczono na swobodne usadzenie manekina na siedzisku oraz kontakt jego nóg z podłożem. Wyniki w postaci charakterystyki zmiany siły w funkcji czasu dla modelu bez oraz z zastosowaną matą przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Wykres siły obciążającej kość piszczelową w funkcji czasu dla modelu referencyjnego bez maty oraz z zastosowaną matą energochłonną. Zastosowano filtr BW o częstotliwości 180 Hz



Rys. 9. Wykres siły obciążającej kość piszczelową w funkcji czasu dla modelu referencyjnego bez maty oraz z zastosowaną matą energochłonną. Zastosowano filtr BW o częstotliwości 180 Hz

### 3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Analizowane modele numeryczne zostały przygotowane z dość dużym przybliżeniem bez uwzględniania wielu istotnych czynników mających niewątpliwie wpływ na przebieg procesu wybuchu i propagacji fali uderzeniowej. Walidacja modelu numerycznego na podstawie dostępnych zasobów literaturowych pozwoliła na sprawdzenie jego poprawności. Wymuszenie płyty, którego używano na etapie walidacji powodowało zbyt duże przemieszczenia podłogi dlatego we właściwych analizach numerycznych zdecydowano się na realizowanie wymuszenia bezpośrednio przy użyciu ciśnienia generowanego z wykorzystaniem algorytmu CONWEP. Uzyskane rezultaty dla modelu numerycznego, w którym zaimplementowano maty energochłonne mają odzwierciedlenie jedynie w odniesieniu do wyników dla modelu referencyjnego i w takim kryterium należy je rozpatrywać. Zmierzone na podstawie analiz numerycznych charakterystyki siły w funkcji czasu oraz przyspieszenia w funkcji czasu pozwalają zauważyć pięciokrotną redukcję wielkości badanych parametrów w przypadku zastosowania mat energochłonnych. Zastosowane rozwiązanie pozwala spełnić kryteria bezpieczeństwa zawarte w dokumencie NATO HFM-090 [5].

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

## LITERATURA

- [1] Gzik M., Wolański W, Gzik-Zroska B., Jozzko K., Burkacki M., Suchoń S.: Risk Factors Influencing Lower Limbs Injuries During IED Blast, Information Technologies in Medicine, Volume 472 of the series Advances in Intelligent Systems and Computing, p. 299-305
- [2] Klekiel T., Będziński R.: Finite element analysis of large deformation of articular cartilage in upper ankle joint of occupant in military vehicles during explosion, Archives of metallurgy and materials, Volume 60, 2015
- [3] Krzystała E., Męzyk A., Kciuk S.: Analiza zagrożenia załogi w wyniku wybuchu ładunku pod kołowym pojazdem opancerzonym, Zeszyty naukowe WSOWL, nr 1 (159), 2011.
- [4] Nilakantan G., Tabiei A.: Computational Assessment of Occupant Injury Caused by Mine Blasts under neath Infantry Vehicles, Int. J. Vehicle Structures & Systems, vol. 1(1-3), 2009, p. 50-58.
- [5] <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a473218.pdf>

## NUMERICAL STUDY OF ENERGY-ABSORBING MATS AS AN ELEMENT INCREASING THE SAFETY OF THE MILITARY VEHICLE CREW

**Abstract:** This study presents the results of numerical simulations of an energy absorbing panels as an element increasing the safety of the military vehicle crew. The simulations are made by a finite element method in LS-Dyna. A numerical Hybrid III 50th dummy is used to simulate the tibia axial compressive forces and accelerations. Simulations results are compared with literature data to validate the Hybrid III dummy. Forces and accelerations results are presented in the form of a charts.