

VALIDATION OF NUMERICAL MODELS OF METALLIC FOAMS FROM THE ASPECT OF ENERGY ABSORPTION

**Joanna Włodarczyk, Tadeusz Niezgoda
Wiesław Barnat, Paweł Dziewulski**

*Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny
Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej
Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Poland
tel.: +48 22 6839849 fax +48 22 6839355
e-mail: barnat@vp.pl*

Abstract

The main objective of the paper is to assess the energy absorbing capabilities of metallic foams. The results of experimental investigation of energy absorbing capabilities for three metallic foams under kinematic loading are presented. The tests were conducted on the INSTRON Dynamic Testing System. The numerical computations were carried out using the LS DYNA code. For metallic foam modelling, MAT_26 (MAT_HONEYCOMB) was used; it is normally used for "honeycombs" and anisotropic foams modelling. For numerical calculations, two types of numeric elements were used: SOLIDE and Plate types. SOLID type elements were used for foam modelling, and Schell types – for charge definition. A numeric diagram is presented on drawing 10. As in the case of real tested elements, the foam element was charged by a plate of velocity of 5 m/s.

The metallic foam was checked in Mechanics and Applied Informatics Faculty of Military University of Technology. Tests were made on INSTRON resistance machine. The charge was made using cinematic input function. Presented results are preliminary one, the experiment was made in order to choose a foam material having the best energy absorption characteristics.

The conclusion of preliminary estimation of obtained results is that the samples with the smallest pores have the most important energy absorption level. Nevertheless, the following stage of the works should be impact resistance tests: deceleration test in the aspect of security improvement.

Keywords: *transport, metallic foams, energy absorption capabilities, experimental investigations, Finite Element Methods*

WALIDACJA MODELI NUMERYCZNYCH PIANEK METALICZNYCH W ASPEKCIE ENERGOCHŁONNOŚCI

Streszczenie

Głównym celem pracy była ocena zdolności pochłaniania energii przez piany metaliczne. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań energochłonności trzech pian metalicznych obciążonych przemieszczeniem. Analizę numeryczną pianki metalicznej przeprowadzono w oprogramowaniu LS DYNA. Do modelowania piany metalicznej zastosowano MAT_26 (MAT_HONEYCOMB) który jest używany głównie do modelowania „plastrów miodu” i pianek z właściwościami anizotropowymi. Do obliczeń numerycznych wykorzystano dwa rodzaje elementów numerycznych: typu SOLID i Plate. Elementy typu SOLID były wykorzystywane do modelowania pianki a typu Schell wykorzystywano do zdefiniowania obciążenia. Model numeryczny przedstawiono na rys. 10. Element piankowy został podobnie jak w przypadku badanych obiektów rzeczywistych obciążony płytą poruszającą się z prędkością 5 m/s.

Pianę metaliczną przebadano w Katedrze Mechaniki i Informatyki Stosowanej WAT. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej INSTRON. Obciążenie realizowano przez wymuszenie kinematyczne.

Przedstawione wyniki są wstępne, eksperyment został przeprowadzony w celu wybrania materiału piankowego o największej energochłonności.

Na podstawie wstępnej oceny uzyskanych wyników można powiedzieć, że próbki z najmniejszymi porami

posiadają największą energochłonność. Jednakże kolejnym etapem prac powinny być badania udarowościowe pomiaru opóźnień w aspekcie zwiększenia bezpieczeństwa.

Słowa kluczowe: transport, energochłonność, piany metaliczne, badania doświadczalne i MES

1. Wstęp

Nawet najlepszy program MES, bez weryfikacji eksperymentalnej i doświadczenia użytkownika, nie pozwala na uzyskanie pewnych wyników z analizy numerycznej. Coraz lepiej rozbudowane oprogramowanie i coraz szybsze komputery pozwalają na analizę złożonych przypadków numerycznych.

Nad zagadnieniami energochłonności w aspekcie zastosowanych materiałów dokonano wielu prac numerycznych [1, 2] i doświadczalnych [3]. Lekkie konstrukcje energochłonne mają powszechne zastosowanie w przemyśle lotniczym. Początkowo konstrukcje te spełniały rolę konstrukcji przekładkowych których zadaniem było uzyskanie maksymalnej sztywności konstrukcji przy zachowaniu minimalnej masy [4]. Głównym zadaniem elementów absorbujących energię uderzenia jest ochrona ludzi lub ograniczenie zniszczenia całej konstrukcji w przypadku np. katastrofy śmigłowców, samochodów itp. Pianowe aluminiowe elementy pianowe posiadają dużą względną energię absorpcji [5]. Postępujące w miarę równomiernie zniszczenie sprawia, że praca zużyta na zniszczenie elementu energochłonnego powoduje znaczne ograniczenie skutków obciążenia udarowego np. uderzenia śmigłowca o ziemię lub samochodu w barierę. Innym zadaniem układu elementów energochłonnych może być rozpatrywanie ich jako układu rozpraszającego energię uderzenia pojazdu w barierkę ochronną lub energię wybuchu [6]

Celem niniejszej pracy było zbadanie możliwości zastosowania oprogramowania MSC Dytran do modelowania globalnego pian metalicznych.

2. Opis badanych obiektów

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych trzech pian metalicznych (AK9/SiC z małymi pęcherzami, AK9/SiC oraz spienianego aluminium TiH₂). Dodatkowo dokonano analizy numerycznej dla piany AK9/SiC oprogramowaniem MSC Dytran. Przykład badanych próbek przedstawiono na rys. 1.

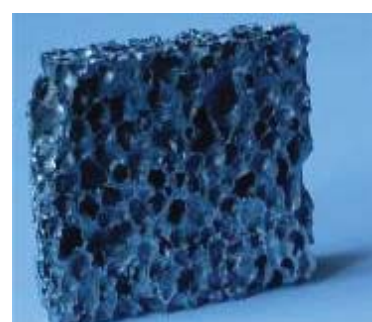
a)



b)

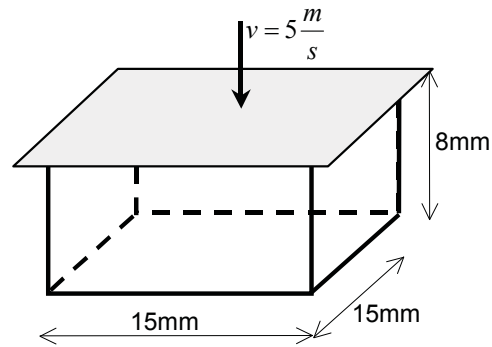


c)



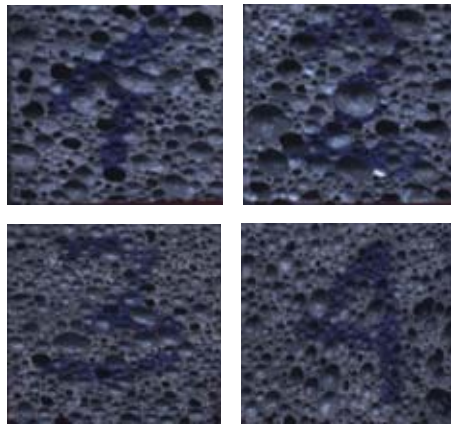
Rys. 1. Badane materiały: a) AK9/SiC z małymi pęcherzami, b) AK9/SiC, c) spieniane aluminium TiH₂
Fig. 1. Tested materials: a) AK9 / SiC in the form of small blisters, b) AK9 / SiC, c) foamed aluminium TiH₂

Badane materiały pocięto na próbki o jednakowym kształcie prostopadłościennym o następujących wymiarach 15x15x8 mm. Numerycznie i doświadczalnie próbki były ściskane jednoosiowo z prędkością 5m/s (rysunek 2) aż do uzyskania przemieszczenia górnej płyty o 7mm.



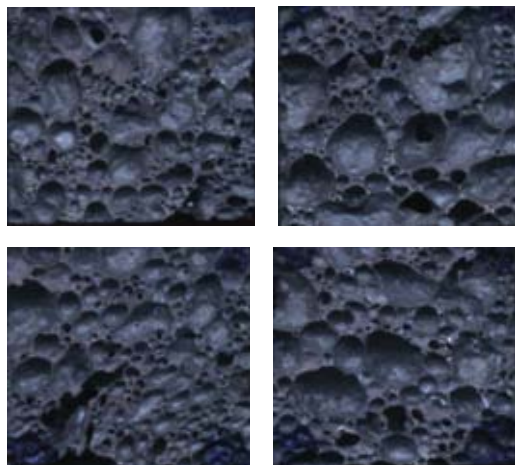
Rys. 2. Sposób obciążenia próbki
Fig. 2. Loading method of the specimen

Jako pierwszy doświadczalnie badany był materiał AK9/SiC z małymi pęcherzami, próbki z tego materiału przedstawia rysunku 3. Piana składała się z krzemu (8,5-10,5%), magnezu (0,2-0,4%), manganu (0,25-0,5%) oraz z węgliku krzemu. Porowatość pianki wynosiła 73%.



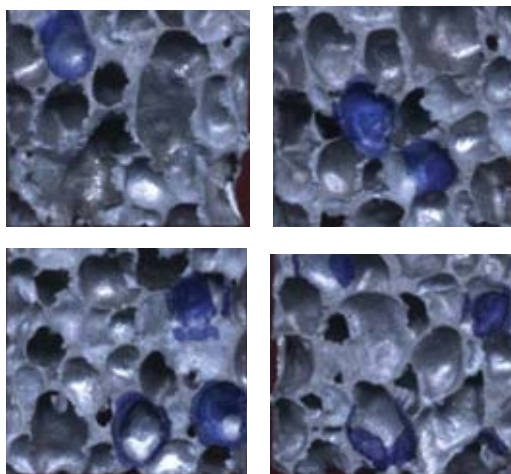
Rys. 3. Próbkę z piany metalicznej AK9/SiC (małe pęcherze)
Fig. 3. Metallic foam AK9 / SiC specimen (small blisters)

Drugi badany materiał, dla którego zbliżenie próbki przedstawiono na rysunku 4, to AK9/SiC składający się z krzemu (8,5-10,5%), magnezu (0,2-0,4%), manganu (0,25-0,5%) oraz z węgliku krzemu. Jego porowatość wynosiła 85%.



Rys. 4. Próbkę z piany metalicznej AK9/SiC
Fig. 4. Metallic foam AK9 / SiC specimen

Próbki z trzeciego materiału o porowatości 91 %, spienianego aluminium TiH₂, przedstawiono na rysunku 5.



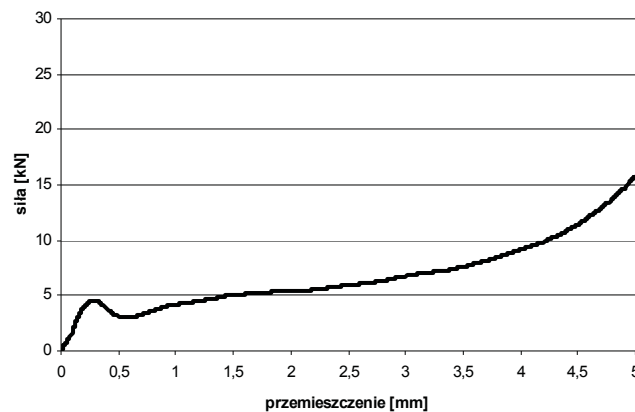
Rys. 5. Próbki ze spienianego aluminium TiH₂
Fig. 5. Foamed aluminum TiH₂ specimens

3. Wyniki badań eksperymentalnych dla pierwszego obiektu badań - pianki metalicznej AK9/SiC (małe pęcherze)

Proces niszczenia obiektu pierwszego przedstawiono na rysunku 6. Wykres siły ściskającej dla obiektu 1 przedstawiono na rysunku 7. Ze względu na sprężysty zakres obciążenia w początkowym okresie eksperymentu próbka przypominała monolit (charakterystyczny garb początkowy na rysunku 7). Kolejnym krokiem w procesie niszczenia próbki było zamykanie się porów. Charakterystycznym dla tego etapu jest występowanie siły ściskającej o wartości stałej. W miarę ściskania próbki zauważono charakterystyczne dla pian metalicznych występowanie wypchanych ścianek porów (rys. 6). W kolejnych etapach eksperymentu następowało ściskanie litego materiału, charakteryzującym się wzrostem siły obciążenia – końcowy przebieg rysunek 7.



Rys. 6. Sposób niszczenia pierwszej próbki wykonanej z pianki metalicznej AK9/SiC (małe pęcherze)
Fig. 6. Failure mode for the metallic foam AK9 / SiC specimen No. 1 (small blisters)

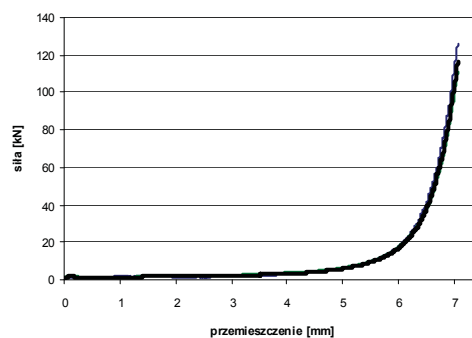


Rys. 7. Wykres przyrostu siły uzyskany eksperymentalnie- pierwsza próbka
Fig. 7. The force-displacement plot – specimen No. 1

4. Wyniki badań eksperymentalnych dla drugiego obiektu badań - pianki metalicznej AK9/SiC

Podobnie jak próbka pierwsza niszczyła się próbka druga. Wykres siły ściskającej dla obiektu 2 przedstawiono na rysunku 8. charakter niszczenia dla piany metalicznej przedstawiono na rysunku 8. W początkowym okresie obciążenia) próbka przypominała monolit. Praktycznie pianka ta była ściskana w zakresie sprężystym (charakterystyczny garb początkowy na rysunku 10) Kolejnym krokiem w procesie niszczenia próbki było zamykanie się porów. Charakterystycznym dla tego etapu jest występowanie stałej siły ściskającej. Następnie w miarę ściskania próbki zauważono charakterystyczne dla pian metalicznych występowanie wypchanych ścianek porów (rys. 8).

Następnie próba przebiega poprzez ściskanie niemalże litego materiału, charakteryzującym się wzrostem siły obciążenia – końcowy przebieg rysunek 10.



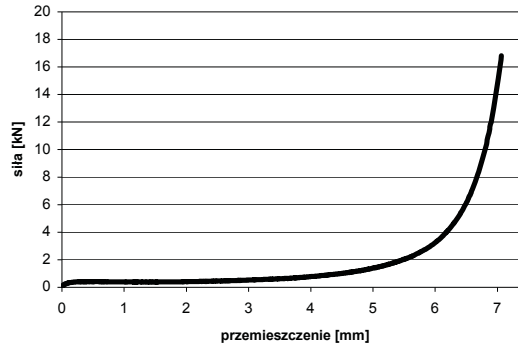
Rys. 8. Wykres przyrostu siły uzyskany eksperymentalnie- druga próbka
Fig. 8. The force-displacement plot – specimen No. 2

5. Wyniki badań eksperymentalnych dla trzeciego obiektu badań - spienianego aluminium TiH2

Wyniki uzyskane dla spienianego aluminium TiH2 przedstawiono na rysunku 9. Spienione aluminium niszczyło się w sposób zbliżony do poprzednich modeli.

Wykres siły ściskającej dla obiektu 3 przedstawiono na rysunku 9. Podobnie jak dla poprzednich obiektów badań. W początkowym okresie obciążenia) próbka przypominała monolit. Praktycznie pianka była ściskana w zakresie sprężystym (charakterystyczny garb początkowy na rysunku 9) Kolejnym krokiem w procesie niszczenia próbki było zamykanie się porów.

Charakterystycznym dla tego etapu jest występowania stałej siły ściskającej. Następnie w miarę ściskania próbki zauważono charakterystyczne dla pian metalicznych występowanie wypchanych ścianek porów. Następnie próba przebiega poprzez ściskanie niemalże litego materiału, charakteryzującym się wzrostem siły obciążenia.



Rys. 9. Wykres przyrostu siły uzyskany eksperymentalnie- trzecia próbka
 Fig. 9. The force-displacement plot – specimen No. 3

6. Wyniki obliczeń MES

Analizę numeryczną pianki metalicznej przeprowadzono w oprogramowaniu LS DYNA. Do modelowania piany metalicznej zastosowano MAT_26 (MAT_HONEYCOMB) [7] który jest używany głównie do modelowania „plastrów miodu” i pianek z właściwościami anizotropowymi.

Właściwościami wykorzystywanymi do modelowania materiału równań konstytutywnych jest możliwość nieliniowego, elastoplastycznego zdefiniowania zachowania materiału oddzielnie dla naprężeń normalnych i ścinających.

Mat 26 opisują wybrane parametry karty materiałowej:

V_F - Względna objętość, w którym plaster miodu jest w pełni ściśnięty.

M_U - współczynnik tłumienia materiału (zalecany 0.05),

L_{ca} - krzywa zależności względnej objętości od naprężeń,

E_{aa} - Moduł Younga dla pianki nie sprasowanej,

E_{bb} - Moduł Younga dla pianki nie sprasowanej ,

E_{cc} - Moduł Younga dla pianki nie sprasowanej,

G_{ab} - Moduł sztywności poprzecznej dla pianki nie sprasowanej,

G_{bc} - Moduł sztywności poprzecznej dla pianki nie sprasowanej,

G_{ca} - Moduł sztywności poprzecznej dla pianki nie sprasowanej.

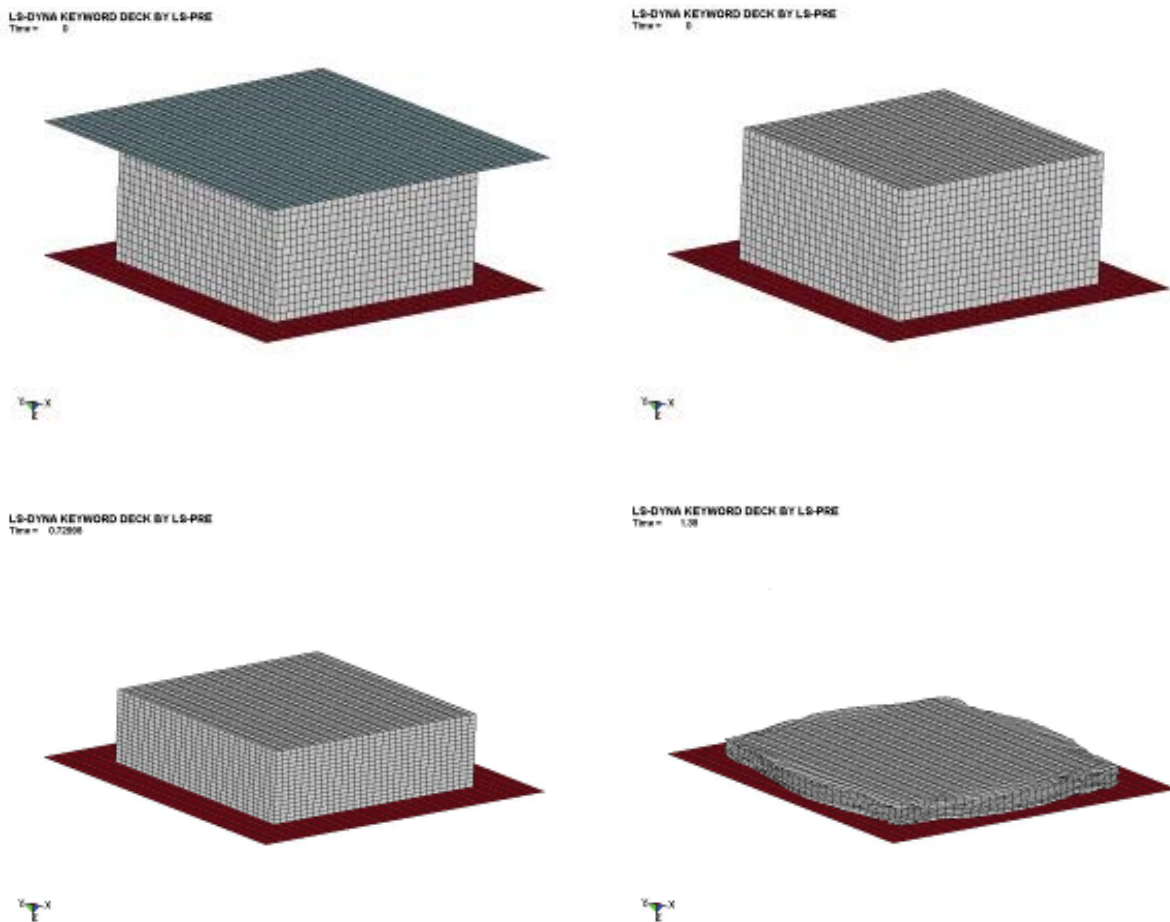
Zachowanie materiału przed ściskaniem jest ortotropowe, a moduł Younga zmienia się w zależności od objętości od początkowych wartości do w pełni zgęszczonych wartości w V_f , linearnie ze względną objętością V :

$$\left. \begin{aligned} E_{aa} &= E_{aa} + \beta(E - E_{aa}) \\ E_{bb} &= E_{bb} + \beta(E - E_{bb}) \\ E_{cc} &= E_{cc} + \beta(E - E_{cc}) \\ G_{ab} &= G_{ab} + \beta(G - G_{ab}) \\ G_{bc} &= G_{bc} + \beta(G - G_{bc}) \\ G_{ca} &= G_{ca} + \beta(G - G_{ca}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

gdzie:

$$\beta = \max \left[\min \left(\frac{1-V}{1-V_{\gamma}} \right), 0 \right].$$

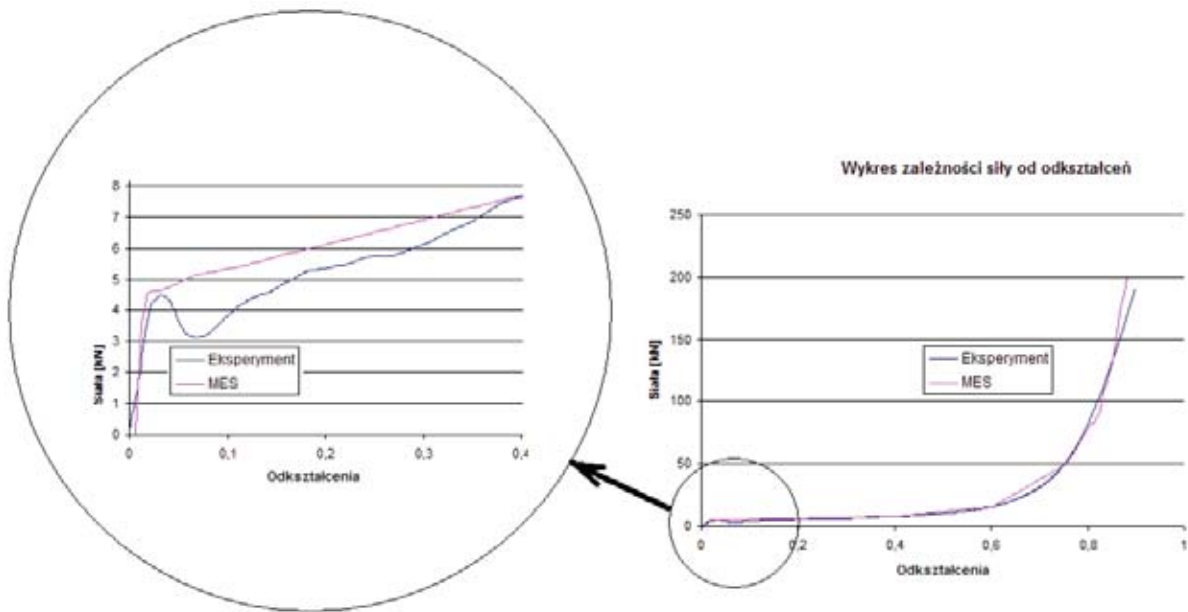
Do obliczeń numerycznych wykorzystano dwa rodzaje elementów numerycznych: typu SOLID i Plate. Elementy typu SOLID były wykorzystywane do modelowania pianki a typu Schell wykorzystywano do zdefiniowania obciążenia. Model numeryczny przedstawiono na rys. 10. Element piankowy został podobnie jak w przypadku badanych obiektów rzeczywistych obciążony płytą poruszającą się z prędkością 5 m/s.



Rys. 10. Schemat modelu numerycznego badanej piany metalicznej
 Fig. 10. Numerical model of the metallic foam under investigation

W wyniku przeprowadzonych badań numerycznych nad modelem numerycznym energochłonnego elementu pianowego otrzymano wykres zależności siły ściskającej od przemieszczenia (rys. 11).

Ze względu na ograniczone dane materiałowe jakimi dysponowali autorzy nie udało się uzyskać w obliczeniach MES charakterystycznego dla badań eksperymentalnych spadku siły spęczania. Tym niemniej będą prowadzone dalsze prace badawcze nad walidacją modelu numerycznego.



Rys. 11. Porównanie wykresu uzyskanego w wyniku badań eksperymentalnych i numerycznych
 Fig. 11. Comparison of experimental and numerical results

7. Zakończenie

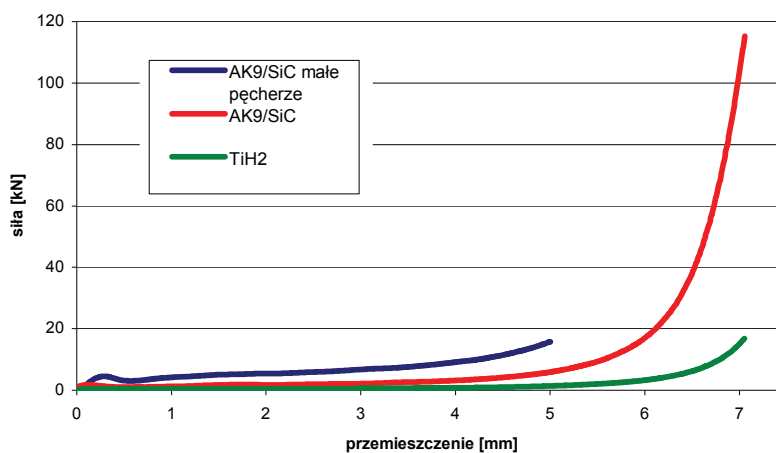
W pracy zostały przedstawione wyniki badań eksperymentalnych trzech aluminiowych materiałów piankowych, które przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej INSTRON oraz badań numerycznych dla jednego wybranego modelu piany.

Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono energię odkształcenia dla każdej z próbek dla $\Delta L=5\text{mm}$ i $\Delta L=7\text{mm}$.

Przedstawione wyniki są wstępnymi, eksperyment został przeprowadzony w celu wybrania materiału piankowego o największej energochłonności.

Na rysunku 13 przedstawiono zestawienie średnich wyników eksperymentu dla wszystkich obiektów.

Na podstawie wstępnej oceny uzyskanych wyników można powiedzieć, że próbki z najmniejszymi porami posiadają największą energochłonność. Jednakże kolejnym etapem prac powinny być badania udarnościowe pomiaru opóźnień w aspekcie zwiększenia bezpieczeństwa.



Rys. 13. Zestawienie wyników eksperymentu
 Fig. 13. Comparison of experimental results

Literatura

- [1] Niezgoda, T., Ochelski, S., Barnat, W., *Wpływ kąta uderzenia na pochłanianie energii poprzez wybrane struktury kompozytowe w transporcie*, IX Konferencja Naukowo-Techniczna „Programy MES w Komputerowym Wspomaganiu Analizy, Projektowania I Wytwarzania”; Giżycko, 19-22 Października 2005MSC 2005.
- [2] Niezgoda, T., Barnat, W., *Analiza pasa bariery drogowej wzmocnionej elementami kompozytowymi w zastosowaniu do poprawy energochłonności elementów infrastruktury*, 5s. (25-29) Górnictwo Odkrywkowe 5-6, 2006.
- [3] Barnat, W., Niezgoda, T., *Badania energochłonności elementów podatnych w aspekcie zastosowanych materiałów*, Journal of Kones Powertrain and Transport vol 14 No 1 2007.
- [4] *Konstrukcje przekładkowe*. Wydawnictwo MON.
- [5] Włodarczyk, J., Niezgoda, T., Barnat, W., Gieleta, R., Dziewulski, P., *Badania eksperymentalne energochłonności pian metalicznych*, IV Międzynarodowego Symposium Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji Augustów 2007.
- [6] Barnat, W., *Numeryczna analiza warstwy ochronnej pochłaniającej energię fali detonacyjnej*, rozdział w monografii Oficyna Wydawnicza WAT 2007.
- [7] LS DYNA THEORETICAL MANUAL 2007.

