

Mariusz RUCHWA

ZASTOSOWANIE ELEMENTÓW ZE SPIENIONYCH METALI JAKO ZABEZPIECZEŃ KONSTRUKCJI PRZED DZIAŁANIEM OBCIĄŻEŃ UDAROWYCH

STRESZCZENIE

Specyficzne właściwości mechaniczne spienionych metali stwarzają możliwość zastosowania elementów wykonanych z materiałów tego typu jako zabezpieczeń konstrukcji nośnych, pochłaniających energię obciążeń uderowych. W pracy zwrócono uwagę na właściwości spienionych metali, możliwości zastosowań oraz konieczność stosowania odpowiednich modeli materiałowych w przypadku numerycznej analizy konstrukcji. Zaprezentowano również przykład analizy numerycznej ilustrującej skutek jaki można osiągnąć, stosując zabezpieczenie konstrukcji żelbetowej w postaci trójwarstwowej aluminiowej płyty o spienionym wypełnieniu. W analizie przewidziane były dwa przypadki obciążenia konstrukcji, w postaci oddziaływania powybuchowej fali uderzeniowej oraz uderzenia przez mały pojazd. Zadanie zostało rozwiązane przy pomocy Metody Elementów Skończonych, poprzez bezpośrednie jawne całkowanie równań ruchu. W obu przypadkach obciążenia uzyskano korzystniejszy rozkład końcowych uszkodzeń materiałowych konstrukcji w porównaniu z odpowiedzią konstrukcji bez zabezpieczenia. Wyniki przeprowadzonej analizy potwierdzają korzystny udział zabezpieczeń ze spienionych metali w pochłanianiu energii obciążeń uderowych.

Słowa kluczowe: dynamika, obciążenia uderowe, spienione metale, Metoda Elementów Skończonych

1 WPROWADZENIE

Spienione metale wykazują wiele korzystnych cech, w porównaniu z materiałami litymi, związanych m.in. z ich niską gęstością, względnie dużą sztywnością w stosunku do gęstości, wysokim poziomem pochłaniania energii mechanicznej i akustycznej, odpornością pożarową oraz łatwością obróbki mechanicznej i recyklingu [1, 2].

Obecne metody wytwarzania pian metalowych w znacznym stopniu pozwalają na produkcję materiałów o zaprojektowanej strukturze oraz zaprojektowanych podstawowych parametrach wytrzymałościowych. Wytwarzane są elementy o zróżnicowanych kształtach, wśród nich duże elementy przestrzenne, ale również płyty trójwarstwowe o spienionym wypełnieniu oraz metalowe pręty o różnych kształtach przekrojów poprzecznych, wzorowane na cienkościennych przekrojach zamkniętych, wypełnione pianą metalową.

Coraz częściej elementy wykonane ze spienionych metali są stosowane do tworzenia struktur energochłonnych oraz jako zabezpieczenia konstrukcji nośnych przed działaniem obciążeń uderowych [3, 4].

2 WŁAŚCIWOŚCI SPIENIONYCH METALI ORAZ ICH MODELOWANIE

Właściwości mechaniczne spienionych metali różnią się w istotny sposób od właściwości metali bazowych, będących ich litymi odpowiednikami. Na rysunku 1. przedstawiono przykładowe wykresy zależności pomiędzy logarytmicznym odkształceniem plastycznym i naprężeniem Cauchy'ego, w przypadku stopu aluminium AW-5754 oraz aluminiowych pian o różnej gęstości, wykonanych na bazie tego samego stopu.

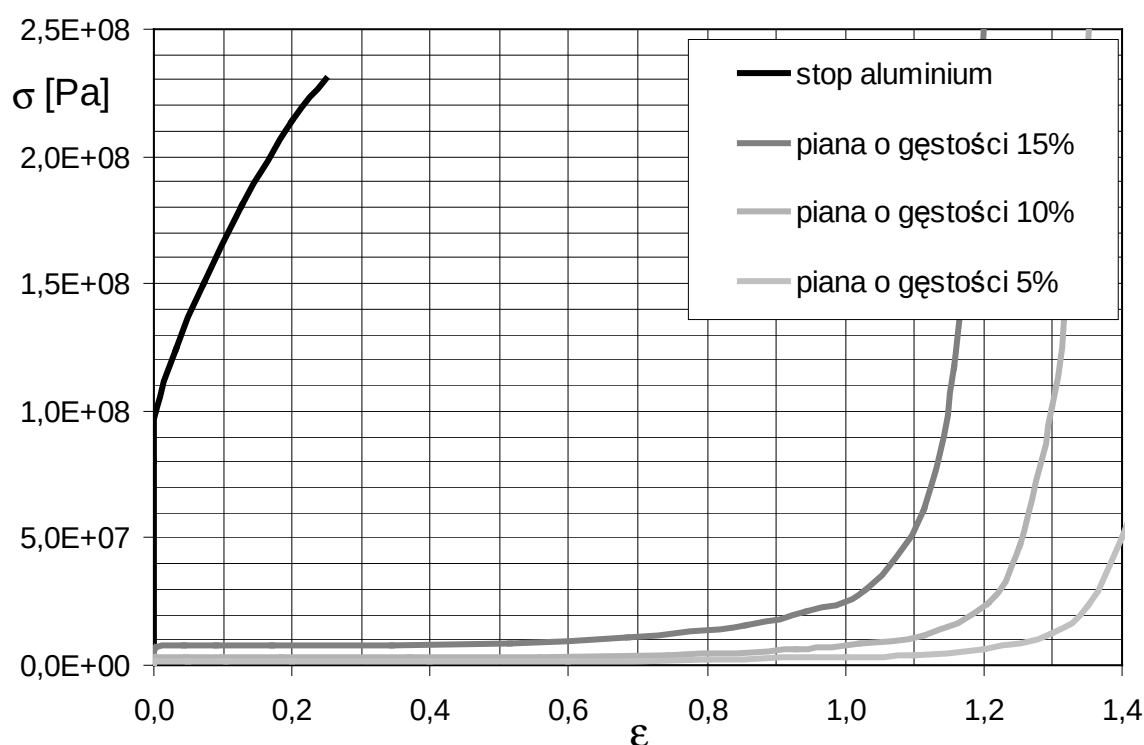


Fig. 1. Przykładowe wykresy zależności pomiędzy logarytmicznym odkształceniem plastycznym i naprężeniem Cauchy'ego, w przypadku stopu aluminium AW-5754 oraz aluminiowych pian o różnej gęstości.

Na wykresie zależności odkształcenie-naprężenie pian metalowych można zauważyć, że granica plastyczności piany jest zdecydowanie niższa od granicy plastyczności materiału bazowego oraz w funkcji naprężenia ściskanej piany pojawia się obszar *plateau*, w którym następuje duży wzrost odkształceń plastycznych, przy niewielkich zmianach naprężenia, w trakcie którego materiał ulega stopniowemu zagęszczaniu, co w końcowym rezultacie prowadzi do tzw. densyfikacji, związanej z istotnym wzrostem gęstości materiału i coraz większymi wartościami naprężeń. Wymienione cechy sprężysto-plastyczne pian metalowych decydują o możliwości zastosowania materiału w strukturach pochłaniających energię obciążeń uderowych.

W wielu przypadkach analiz konstrukcji, w tym konstrukcji obciążonych uderowo, rozpatrywane jest rozwiązanie odpowiedzi konstrukcji numerycznie, np. z uwagi na brak możliwości przeprowadzenia eksperymentu. Bardzo częstą metodą analizy jest Metoda Elementów Skończonych [5]. Dlatego ważnym zagadnieniem jest modelowanie właściwości materiałowych nie tylko materiałów konstrukcyjnych, ale również takich materiałów jak piany meta-

lowe. Należy uwzględnić w opisie konstytutywnym ważną cechę pian metalowych jaką jest ich ściśliwość oraz dostosować do ich specyfiki warunków plastyczności, opis potencjału plastycznego oraz opis wzmocnienia. Nie jest możliwe zwykłe przeskalowanie tradycyjnych reguł opisu sprężysto-plastycznego.

W ostatnich latach pojawiło się wiele modeli matematycznych materiałów piankowych, w tym pian metalowych. Można wśród nich wymienić modele: *Deshpande-Fleck*, *Miller*, *Schreyer* oraz *Ehlers* [6, 7]. Z pewnymi implementacjami tych modeli można się spotkać w programach analizy konstrukcji Metodą Elementów Skończonych. W programie ABAQUS znajduje się model m.in. model *Crushable Foam Plasticity* [8], będący odpowiednikiem modelu *Deshpande-Fleck*, natomiast w programie LS-DYNA [9], możliwe do zastosowania są modele: *Bilkhu/Dubois Foam Model* (Material Model 75), *Crushable Foam* (Material Model 26) oraz *Crushable Foam* (Material Model 63).

Duża liczba modeli konstytutywnych materiałów piankowych jest związana z ukierunkowaniem rozwiązań na zastosowanie w modelowaniu szczególnych materiałów (pian), w określonym zakresie gęstości, odkształceń, prędkości odkształceń oraz przy uwzględnieniu specyficznych warunków plastyczności, wzmocnienia, jak również odmiennych odpowiedzi materiału przy ściskaniu i rozciąganiu. Niektóre z modeli pozwalają jednocześnie na modelowanie nie tylko pian metalowych, ale również pian syntaktycznych, gazarów, czy też pian kompozytowych.

Szerokim zakresem zastosowań cechuje się model *Crushable Foam Plasticity* dostępny w programie ABAQUS, który jest implementacją modelu *Deshpande-Fleck* [7, 8]. W modelu uwzględniona jest zmiana właściwości materiału przy ściskaniu i rozciąganiu, ściśliwość materiału oraz duże odkształcenia. Dostępne są dwa rodzaje wzmocnienia – objętościowe oraz izotropowe, możliwe jest również uwzględnianie wpływu prędkości odkształcenia.

Model *Deshpande-Fleck* jest popularnym i sprawdzonym opisem, jednak nawet w przypadku stosowania tego modelu konieczne jest właściwe wyskalowanie parametrów materiału, na podstawie wiarygodnych wyników doświadczalnych, uzyskanych podczas podstawowych prób obciążania oraz wyników dotyczących wpływu prędkości odkształcenia.

3 PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA

Ponieważ ideą przykładu jest jedynie prezentacja skutku jaki można osiągnąć, stosując elementy wykonane ze spienionych metali, jako zabezpieczenia konstrukcji przed działaniem obciążeń uderowych, ograniczono się wyłącznie do przedstawienia wyników badań numerycznych przeprowadzonych przy zastosowaniu sprawdzonych modeli materiałowych.

Rozpatrywana jest monolityczna ściana żelbetowa pokryta trójwarstwową płytą o wypełnieniu w postaci spienionego aluminium. Ściana o szerokości 4,0 m, wysokości 4,0 m i grubości 0,25 m stanowi fragment większej konstrukcji żelbetowej, wykonanej z betonu klasy B50 oraz stali zbrojeniowej klasy A-II. Zabezpieczeniem konstrukcji nośnej jest przymocowana do niej, na całej zewnętrznej powierzchni, trójwarstwowa płyta aluminiowa o zewnętrznych okładzinach (grubości 15 mm) wykonanych ze stopu G.AL 250 oraz wypełnieniu (grubości 70 mm) z piany aluminiowej, której gęstość stanowi 8% gęstości stopu bazowego AW-5754 H111.

Sprawdzeniu podlegało zachowanie konstrukcji w dwóch różnych przypadkach obciążenia uderowego. W pierwszym przypadku, obciążenie konstrukcji stanowi fala uderzeniowa generowana przez wybuch 1 tony trotylu w odległości 20 m od konstrukcji, w drugim przypadku, obciążenie jest związane z uderzeniem o ścianę niedużego pojazdu o masie 700,0 kg i prędkości początkowej 40,0 km/h.

W celach porównawczych analizowana jest również konstrukcja bez zabezpieczenia.

3.1 Model numeryczny

Uproszczony widok ściany przedstawiono na rysunku 2., z dwóch stron (zewnętrznej, zabezpieczonej przed działaniem obciążenia oraz wewnętrznej), na którym pokazano również fragmenty pozostałej konstrukcji oraz zaznaczono obszar, który podlegał analizie Metodą Elementów Skończonych przy zastosowaniu programu ABAQUS [6, 7].

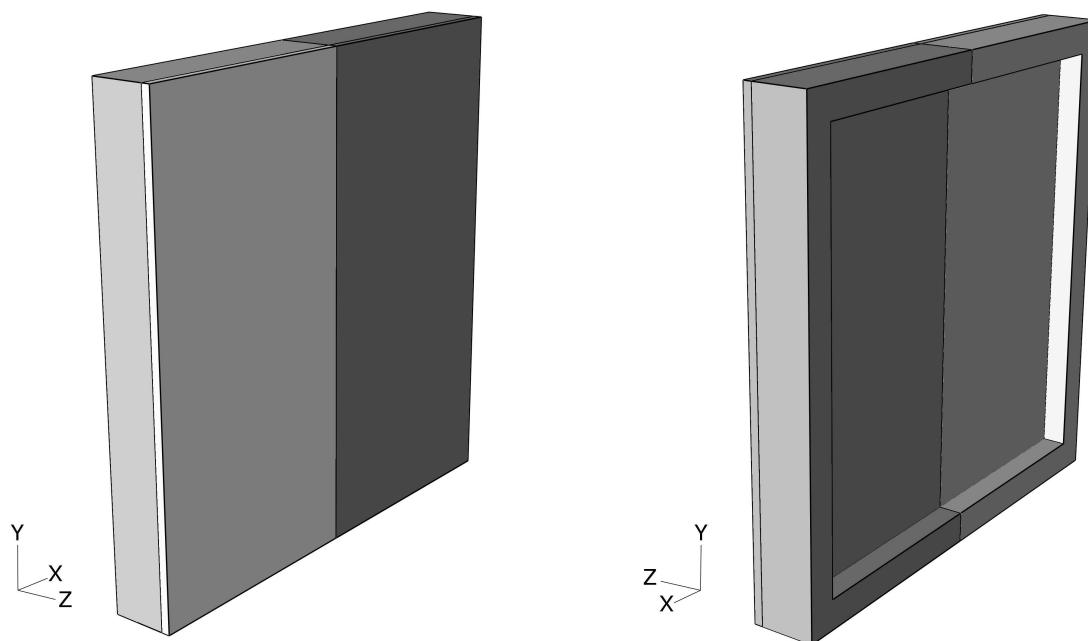


Fig. 2. Modelowana ściana żelbetowa w widoku od zewnątrz (po lewej) oraz od wewnątrz (po prawej stronie). Ciemniejszym kolorem oznaczono część modelowaną numerycznie.

Betonowa część konstrukcji oraz wypełnienie płyt warstwowych były dyskretyzowane ośmiowęzłowymi elementami bryłowymi, aluminiowe okładziny płyty warstwowej elementami powłokowymi o czterech węzłach, natomiast zbrojenie ściany elementami prętowymi (kratowymi) o dwóch węzłach. We wszystkie zastosowanych elementach skończonych przyjęto opis uwzględniający duże przemieszczenia, skończone odkształcenia oraz zredukowane całkowanie.

Właściwości betonu opisano przy pomocy modelu *Concrete damaged plasticity* [7], natomiast do opisu właściwości zbrojenia oraz zewnętrznych okładzin aluminiowych płyt trójwarstwowych wykorzystano typowe modele sprężysto-plastyczne z izotropowym wzmocnieniem. Właściwości aluminiowej piany zostały zdefiniowane przy pomocy modelu *Crushable foam plasticity* [7, 8].

W obliczeniach uwzględniono obciążenie konstrukcji ciężarem własnym oraz wprowadzono dwa warianty zasadniczego obciążenia związane z oddziaływaniem powybuchowej fali uderzeniowej oraz uderzeniem przez niewielki pojazd.

Obliczenia przeprowadzono stosując całkowanie równań ruchu metodą różnic centralnych, przy uwzględnieniu w modelu warunków brzegowych wynikające z symetrii konstrukcji oraz połączeń z pozostałymi elementami konstrukcji żelbetowej.

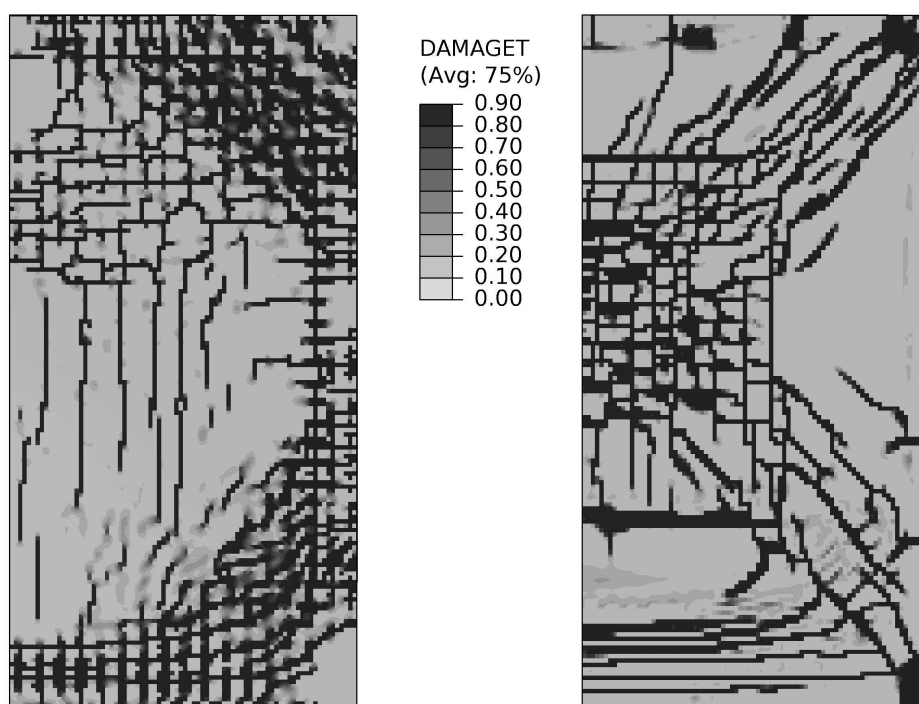


Fig. 3. Rozkład uszkodzeń materiałowych po zewnętrznej stronie żelbetowej ściany poddanej działaniu powybuchowej fali uderzeniowej. Widok ściany niezabezpieczonej (po lewej) oraz zabezpieczonej (po prawej).

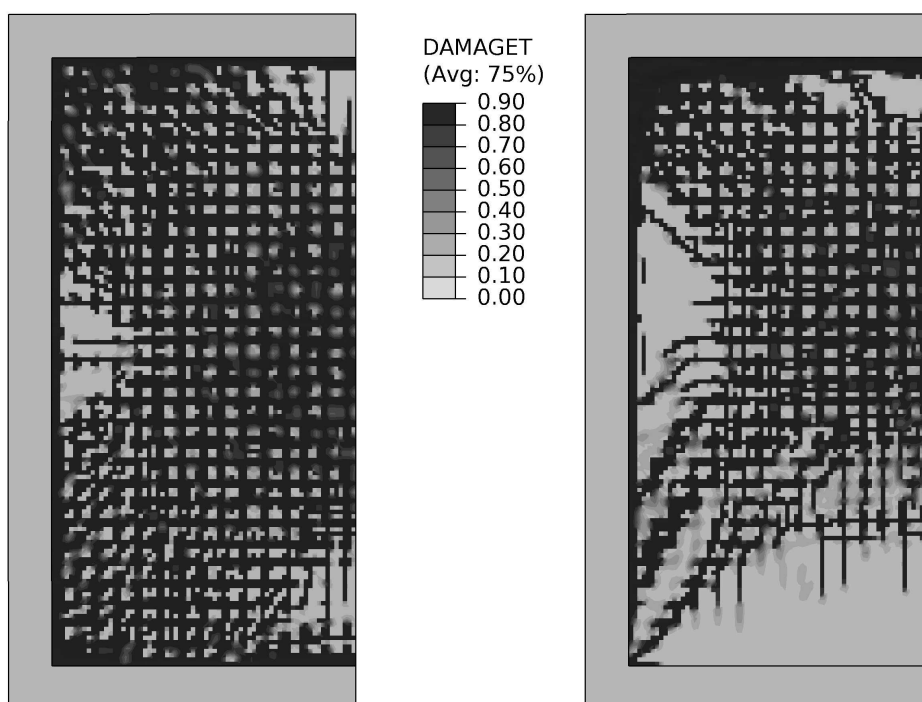


Fig. 4. Rozkład uszkodzeń materiałowych po wewnętrznej stronie żelbetowej ściany poddanej działaniu powybuchowej fali uderzeniowej. Widok ściany niezabezpieczonej (po lewej) oraz zabezpieczonej (po prawej).

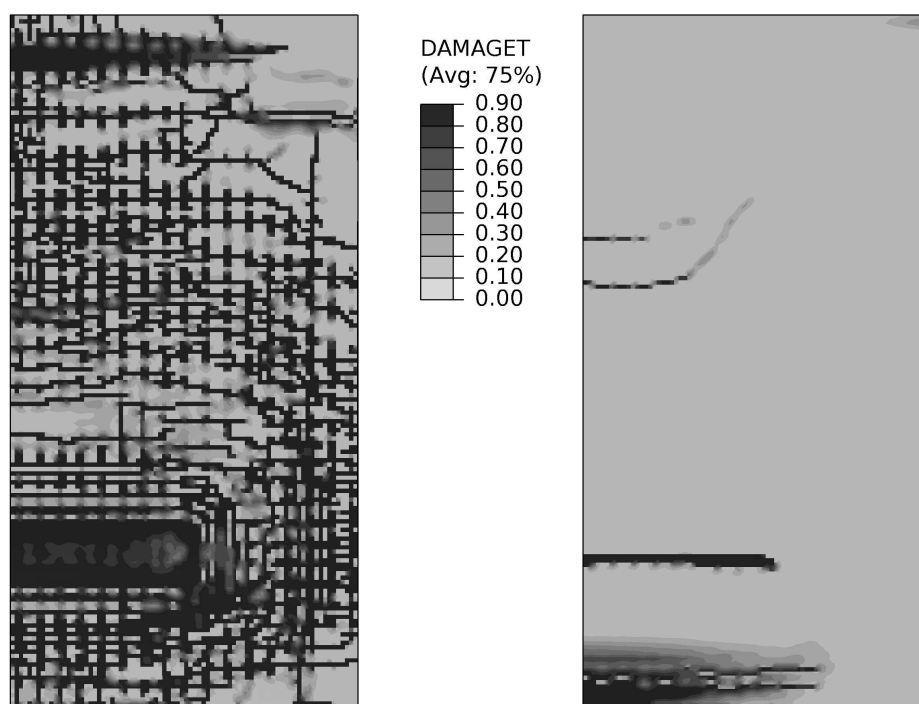


Fig. 5. Rozkład uszkodzeń materiałowych po zewnętrznej stronie żelbetowej ściany, po uderzeniu przez pojazd. Widok ściany niezabezpieczonej (po lewej) oraz zabezpieczonej (po prawej).

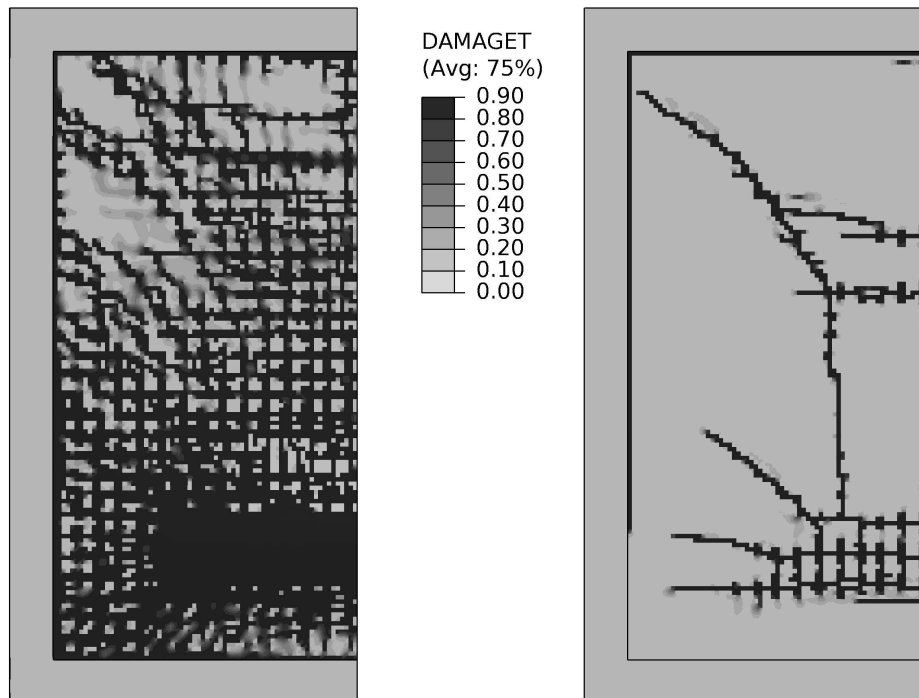


Fig. 6. Rozkład uszkodzeń materiałowych po wewnętrznej stronie żelbetowej ściany po uderzeniu przez pojazd. Widok ściany niezabezpieczonej (po lewej) oraz zabezpieczonej (po prawej).

3.2 Wyniki analizy

W każdym z rozpatrywanych wariantów obliczeń (dwa rodzaje obciążeń oraz uwzględnienie lub brak zabezpieczenia), analizowano rozwój uszkodzeń materiałowych w konstrukcji żelbetowej, końcowy rozkład uszkodzeń, poziom trwałych odkształceń w zbrojeniu, okładzinach aluminiowych i spienionym wypełnieniu, przemieszczenia oraz przebiegi wybranych form energii konstrukcji w funkcji czasu, m.in. energii kinetycznej oraz energii rozpraszanej podczas rozwoju odkształceń plastycznych. W pracy zilustrowano tylko wybrane wyniki.

Na rysunkach 3. i 4. pokazano końcowe rozkłady uszkodzeń materiałowych w żelbetowej ścianie poddanej działaniu powybuchowej fali uderzeniowej, po stronie zewnętrznej oraz wewnętrznej. Zobrazowano rozkłady uszkodzeń w ścianie niezabezpieczonej oraz zabezpieczonej pokryciem z płyt trójwarstwowych. Analogiczne rozkłady uszkodzeń w konstrukcji obciążonej uderzeniem przez pojazd pokazano na rysunkach 5. i 6. Na wszystkich czterech rysunkach przedstawiono rozkłady wartości bezwymiarowego parametru uszkodzenia (0 - brak uszkodzeń, 1 – zniszczenie materiału).

W wynikach dotyczących przypadku obciążenia konstrukcji falą uderzeniową, można zauważyć (Fig. 3 i 4) zmiany rozkładu oraz wartości uszkodzeń materiałowych w konstrukcji, wskazujące na pewne różnice w odpowiedzi konstrukcji, w rozwoju uszkodzeń.

Zdecydowane zróżnicowanie stref uszkodzeń materiałowych można dostrzec w wynikach analizy konstrukcji uderzonej przez pojazd (Fig. 5 i 6). W tym przypadku również można dostrzec pewną zmianę w procesie odpowiedzi konstrukcji.

4 PODSUMOWANIE

Właściwości mechaniczne spienionych metali sprawiają, że jest to interesujący materiał z punktu widzenia możliwości zabezpieczania konstrukcji przed działaniem obciążeń o charakterze udarowym. Wśród wielu elementów wytwarzanych ze spienionych metali o funkcjach konstrukcyjnych oraz osłonowych, bardzo popularnymi są płyty trójwarstwowe, które mogą stanowić skuteczny sposób zabezpieczenia konstrukcji nośnej przed różnego typu oddziaływaniami udarowymi o zróżnicowanej intensywności.

Opisane w pracy symulacje dotyczące obciążenia konstrukcji żelbetowej powybuchową falą uderzeniową oraz uderzeniem małego pojazdu wskazują na różnice pomiędzy rozkładem uszkodzeń w konstrukcji zabezpieczonej płytą trójwarstwową o spienionym wypełnieniu i niezabezpieczonej. Zmianie uległy rozkłady stref uszkodzeń materiałowych w konstrukcji oraz wartości uszkodzeń końcowych. Różnice wystąpiły również w przebiegu procesu deformacji konstrukcji. Są to niewątpliwie sygnały korzystnego wpływu stosowania spienionych metali jako zabezpieczeń konstrukcji.

Praca została zrealizowana w ramach międzynarodowego niewspółfinansowanego projektu 457/N-COST/2009/0 "Analiza stateczności i integralności budynków wielokondygnacyjnych poddanych obciążeniom wyjątkowym".

PIŚMIENNICTWO

1. Sobczak J.: Kompendium wiedzy o metalowych strukturach komórkowych stosowanych w nowoczesnym projektowaniu technicznym. Wyd. Instytutu Odlewnictwa, Kraków, 1998.
2. Peroni L., Avalle M., Peroni M.: The mechanical behaviour of aluminium foam structures in different loading conditions. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35, pp. 644-658.
3. Jing L., Wang Z., Ning J., Zhao L.: The dynamic response of sandwich beams with open-cell metal foam cores. *Composites: Part B*, 2011, Vol. 42 (1), pp. 1-10.
4. Ruchwa M.: Ocena odporności konstrukcji żelbetowej na działanie wybuchu. *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, 2010, Vol. LIX, 4 (660), s. 269-280.
5. Belytschko T., Liu W.K., Moran B.: *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*. John Wiley & Sons, 2000.
6. Hanssen A.G., Hopperstad O.S., Langseth M., Ilstad H.: Validation of constitutive models applicable to aluminium foams. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2002, 44, pp. 359-406.
7. Deshpande V.S., Fleck N.A.: Isotropic constitutive models for metallic foams. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2000, 48, pp. 1253-1283.
8. *Abaqus Analysis User's Manual*. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence 2010.
9. *Hallquist J.O.: LS-DYNA Theory Manual*. Livermore Software Technology Corp., Livermore, 2006.

APPLICATION OF ELEMENTS MADE OF METALLIC FOAMS AS THE STRUCTURAL PROTECTION AGAINST IMPULSIVE LOADS

Summary

Particular mechanical characteristics of metallic foams enable the use of elements made of such materials as the protections of load carrying structures absorbing the energy of impulsive loads. In this study the special attention was focused on characteristics of metallic foams, possibility of their application and the necessity to apply the adequate material models for numerical analyses purposes. The example of numerical analysis was also presented in order to describe the results of reinforced structure protection realized as the three-layer aluminum plate filled with metallic foam. Two load cases were considered in the analysis: impulsive load produced by an explosion and the impact by a small vehicle. The problem has been solved by FEM by direct integration the system of equations of motion. In both load cases the results (i.e. the distribution of damages) were more advantageous for structures with protection. The results of performed analyses confirm the positive effect of application of protections realized with metallic foams to absorb the energy of impulsive loads.