

dr inż. Mariusz Ruchwa\*

# Wykorzystanie spienionych metali do ochrony konstrukcji przed obciążeniami udarowymi

## *Application of metallic foams in structural protection against impulsive loads*

**S**pienione metale to porowate wyroby metalowe (piany, pianki) wytwarzane wg różnych technologii metalurgicznych w celu uzyskania lekkich, sztywnych struktur na wzór budowy materiałów naturalnych [1]. Mogą one mieć bardzo różną strukturę, ale najpopularniejsze dwa rodzaje, to pianki o porach zamkniętych, przypominające sklezione ze sobą pęcherzyki, szczelne bańki oraz pianki o porach otwartych, które w swojej strukturze wyglądają jak skomplikowane układy szkieletowe.

Piany metalowe są tworzone przede wszystkim na bazie takich metali, jak aluminium, miedź i nikiel. W zależności od zastosowanej technologii wytwarzania i uzyskanej struktury, materiały takie mają wiele ciekawych właściwości w porównaniu z ich litymi odpowiednikami. Są to m.in. mała gęstość oraz zdolność do pochłaniania energii mechanicznej podczas trwałej deformacji materiału.

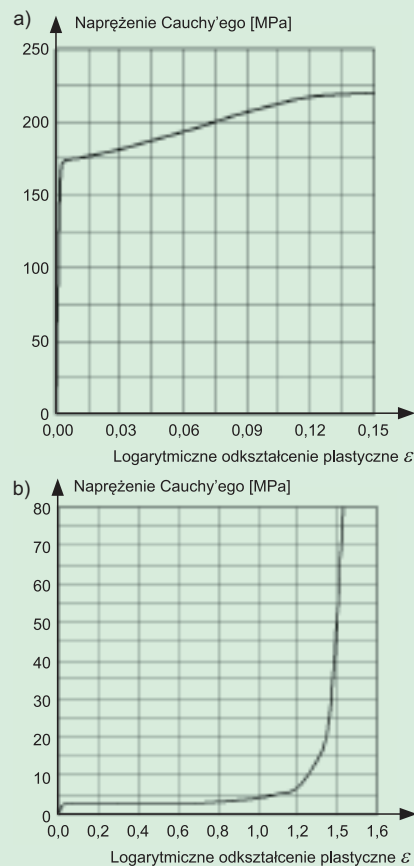
Spienione metale są stosowane jako: rdzeń w konstrukcjach trójwarstwowych (belki, płyty); wypełnienie cienkościennych profili narażonych na utratę stateczności; struktury energochłonne oraz detale architektoniczne.

### Właściwości spienionych metali

Podstawowym parametrem opisującym spieniony metal jest gęstość. Bardzo często wyraża się ją jako część gęstości materiału litego, wytwarzanego z tego samego materiału podstawowego, wyrażaną w procentach. Najczęściej gęstość pian metalowych wynosi od 3 – 5% do 16%. Wraz ze zmianą gęstości zmieniają się pozostałe właściwości materiału w porównaniu z materiałem podstawowym (litym).

\* Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji, Katedra Mechaniki Budowli

Różnicę pomiędzy najważniejszymi właściwościami dwóch przykładowych materiałów podano w tabeli. W obu przypadkach spienione metale charakteryzują się zdecydowanie mniejszymi wartościami modułów sprężystości (Younga, Kirchhoffa), granicy plastyczności oraz przewodności cieplnej, w porównaniu z ich litymi odpowiednikami. Szczególnie interesujące są cechy mechaniczne pian metalowych, co doskonale pokazuje porównanie wykresów zależności naprężenia od odkształcenia uzyskiwanych podczas testów ściskania. Rysunek 1a przedstawia zależność pomiędzy odkształceniem logarytmicznym i naprężeniem Cauchy'ego, dotyczący stopu aluminium 6101-T6, natomiast rysunek 1b analogiczny wykres dotyczący piany o gęstości 8%, wykonanej z tego samego stopu. Oprócz istotnej różnicy w wartości granicy plastyczności widoczna jest na tych wykresach jeszcze jedna cecha, a mianowicie zakres możliwych do wystąpienia odkształceń plastycznych jest zdecydowanie większy w przypadku spienionego metalu. Jest to oczywiście efektem specyficznej budowy strukturalnej materiału oraz powstających w nim deformacji podczas obciążania. Płaska część wykresu (rysunek 1b) jest nazywana plateau, a związany z nią zakres odkształceń plastycznych pozwala na stwierdzenie, jak duża ilość energii mecha-



**Rys. 1. Zależność pomiędzy logarytmicznym odkształceniem plastycznym  $\epsilon$  i naprężeniem Cauchy'ego: a) w przypadku jednoosiowego ściskania aluminium 6101-T6 (aproxymacja wyników doświadczalnych); b) w przypadku jednoosiowego ściskania spienionego aluminium 8% stopu 6101-T6 (aproxymacja wyników doświadczalnych)**

**Podstawowe właściwości stopu 6101-T6 i spienionego aluminium oraz stopu C10100 i spienionej miedzi**

Właściwości materiału	Stop aluminium 6101-T6	Pianka aluminiowa 8%, 6101-T6	Stop miedzi C10100	Pianka miedziana 8% C10100
Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	2700	216	8940	715
Moduł Younga (przy ściskaniu) [GPa]	70,3	0,1031	117	0,736
Moduł Kirchhoffa [GPa]	26	0,200	45	0,282
Granica plastyczności [MPa]	170	2,53	69	0,903
Współczynnik rozszerzalności cieplnej [1/K]	0,0000235	0,0000236	0,0000169	0,0000170
Przewodność cieplna [W/(m·K)]	220	5,8	391	10,1

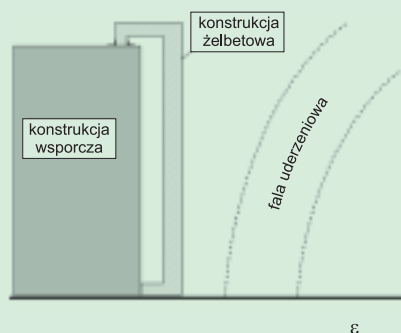
nicznej musi być zużyta podczas deformacji materiału. Dodatkowym, bardzo charakterystycznym elementem na tego typu wykresie w przypadku wszystkich spienionych metali jest coraz szybszy wzrost wartości naprężeń w końcowej części wykresu. Jest to związane z densyfikacją, która polega na zagęszczaniu się spienionego materiału podczas rozwoju dużych odkształceń plastycznych, co skutkuje coraz większą wartością naprężeń. Te właściwości pian metalowych sprawiają, że wykorzystuje się je jako zabezpieczenia chroniące np. inne ważne elementy konstrukcyjne przed działaniem obciążeń o charakterze udarowym [2].

Badania doświadczalne dowodzą, że zachowanie spienionych metali w zakresie sprężysto-plastycznym zdecydowanie różni się w swoim mechanizmie od powszechnie stosowanego opisu plastyczności litych metali [3] i w przypadku tworzenia opisu matematycznego konieczne jest zastosowanie modeli konstytutywnych uwzględniających odmienne warunki plastyczności oraz inny charakter rozwoju odkształceń plastycznych [4, 5].

### Przykład zastosowania

Interesującym przykładem badań doświadczalnych z wykorzystaniem spienionych metali jest eksperyment przeprowadzony przez A. Schenkera i innych [6]. Badaniu poddano kilka konstrukcji żelbetowych (w postaci załamanych płyt wysokości 3,63 m, szerokości 1,40 m i grubości 0,24 m), opartych o masywne konstrukcje wsporcze, zabezpieczonych płytami warstwowymi oraz niezabezpieczonych. Konstrukcje były wykonane z dwóch klas betonu (C 25/30 i C 90/105), a jako opcjonalne zabezpieczenia wykorzystano aluminiowe płyty warstwowe składające się z okładzin w formie aluminiowych blach o niewielkiej grubości oraz rdzenia (wypełnienia) ze spienionego aluminium. Konstrukcje obciążono falą uderzeniową wywołaną przez wybuch 1 tony trotylu, w odległości 20 m od konstrukcji (rysunek 2). Więcej informacji o badaniu można znaleźć w pracy [6].

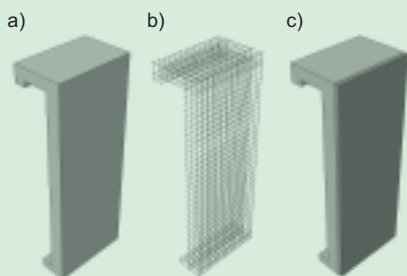
W związku z tym, że w doświadczeniu tylko niewielka liczba wyników została udokumentowana, w celu przed-



Rys. 2. Schemat sytuacyjny konstrukcji żelbetowej, konstrukcji wsporczej oraz oddziaływania fali uderzeniowej

stawienia pełniejszego wpływu obecności zabezpieczenia wykonanego ze spienionego aluminium w artykule skupię się na pokazaniu wyników analizy numerycznej, która została przeprowadzona jako symulacja opisanego doświadczenia. Informacje dotyczące szczegółów wykonanych analiz, porównania wyników z rezultatami doświadczenia oraz wyników w innych aspektach niż obecnie prezentowane można znaleźć w publikacjach M. Ruchwy i K. Cichockiego [7 i 8].

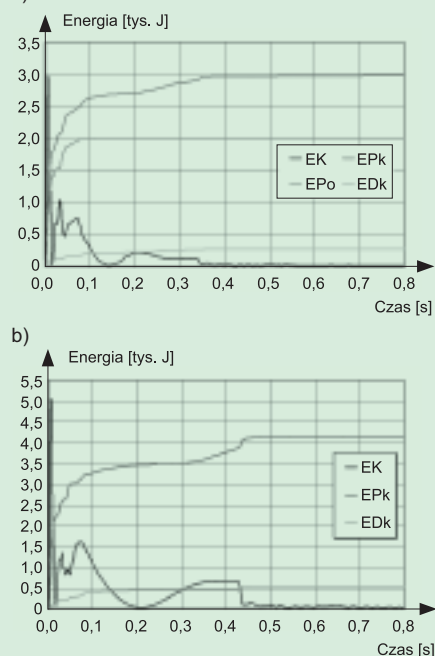
Analizę numeryczną przeprowadzono Metodą Elementów Skończonych (MES). Widok modelowanej konstrukcji żelbetowej pokazano na rysunku 3, wraz z rozkładem uwzględnionego zbrojenia (rysunek 3b) oraz opcjonalnego zabezpieczenia konstrukcji (rysunek 3c) od strony działania fali uderzeniowej. Istotnym elementem opracowanego modelu numerycznego jest opis właściwości materiałowych. W przypadku betonu zastosowano opis sprężysto-plastyczny z uwzględnieniem zniszczenia oraz odmiennych cech pracy betonu przy ścisnieniu i rozciąganiu, model wielokrotnie sprawdzony w różnych testach [9, 10]. Natomiast w przypadku modelowania cech



Rys. 3. Modelowana konstrukcja żelbetowa (a); układ zbrojenia konstrukcji (b); model konstrukcji żelbetowej zabezpieczonej płytą warstwową (c)

spienionego aluminium zastosowano model Deshpande-Flecka z dostosowanym warunkiem plastyczności oraz izotropowym wzmocnieniem [4, 5, 2]. Dodatkowo w modelu numerycznym został uwzględniony cały zespół cech rzeczywistej konstrukcji, w tym: specyficzne warunki brzegowe; ciężar własny konstrukcji; współpraca betonu ze zbrojeniem; kontakt pomiędzy konstrukcją i osłoną oraz obciążenie udarowe jako zmienna fala ciśnienia o przebiegu wartości zgodnym z pomierzonym podczas eksperymentu.

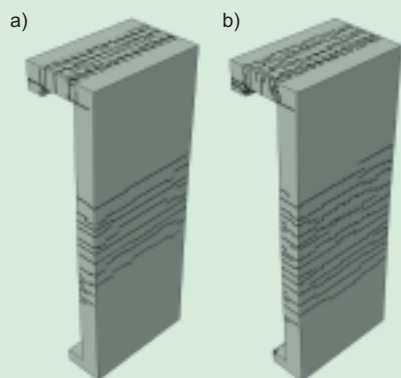
Z uwagi na szybki, silnie nieliniowy charakter analizowanego zadania, rozwiązanie uzyskano wg procedury różnic centralnych za pomocą oprogramowania ABAQUS/Explicit [7, 9]. Prezentowane wyniki dotyczą wariantów konstrukcji wykonanych z betonu C 90/105. Szczególną uwagę należy zwrócić na wykresy niektórych form energii związanych z rozpatrywanym modelem konstrukcji zabezpieczonej (rysunek 4a) i niezabezpieczonej płytami ze spienionego aluminium (rysunek 4b). Rysunki 4a i 4b pokazują, że



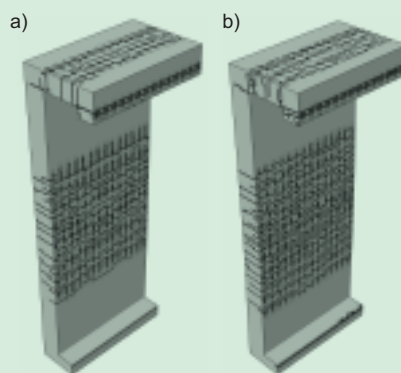
Rys. 4. Wybrane funkcje energii w zależności od czasu: a) konstrukcji zabezpieczonej; b) konstrukcji niezabezpieczonej. Oznaczenia: EK – energia kinetyczna całej konstrukcji; EPk – energia rozpraszana podczas niesprężystej deformacji konstrukcji żelbetowej; EPo – energia rozpraszana podczas niesprężystej deformacji osłony; EDk – energia rozpraszana podczas pęknięcia konstrukcji żelbetowej

uwzględnienie osłon zabezpieczających zmienia w pewnym stopniu przebieg dynamicznego procesu reakcji konstrukcji na obciążenie i nie jest to związane jedynie ze zmniejszeniem pochłoniętej energii przez konstrukcję podczas jej deformacji. Przebieg funkcji energii rozpraszanej podczas niesprężystej deformacji oraz pęknięcia konstrukcji żelbetowej w zależności od czasu (rysunek 4) jednoznacznie wskazuje na korzystny wpływ stosowania osłony ze spienionego aluminium. Wykres energii rozpraszanej podczas deformacji aluminiowej osłony (rysunek 4a) świadczy o stosunkowo dużym udziale osłony w przyjmowaniu energii obciążenia.

O skutkach działania obciążenia udarowego na konstrukcję zabezpieczoną i niezabezpieczoną można się przekonać, śledząc końcowy rozkład uszkodzeń w konstrukcji żelbetowej pokazany na rysunkach 5 i 6. Rysunek 5 pokazuje rozkład uszkodzeń od strony zewnętrznej, narażonej na dzia-



Rys. 5. Rozkład uszkodzeń w żelbetowej części konstrukcji zabezpieczonej (a) oraz niezabezpieczonej (b), widok od strony fali uderzeniowej



Rys. 6. Rozkład uszkodzeń w żelbetowej części konstrukcji zabezpieczonej (a) oraz niezabezpieczonej (b), widok od strony wewnętrznej

łanie obciążenia udarowego. Ciemne miejsca obrazują rozkład uszkodzeń w konstrukcji. Wyraźnie widać większy obszar uszkodzeń w przypadku konstrukcji niezabezpieczonej (rysunek 5a i 5b). Od strony wewnętrznej (rysunek 6a i 6b) różnice w rozkładzie i intensywności uszkodzeń są nieco mniej zauważalne, ale jednak wskazują na korzystny wpływ zastosowania aluminiowej osłony.

## Podsumowanie

Spienione metale mogą być stosowane jako zabezpieczenie różnego typu konstrukcji przed działaniem obciążeń o charakterze udarowym. Możliwe jest wykorzystanie spienionych metali do zabezpieczenia obiektów militarnych, konstrukcji narażonych na uderzenia pojazdów komunikacyjnych, a także w postaci elementów przydrożnych barier ochronnych.

Wyniki dotyczące analizowanego przykładu wskazują, że zastosowanie osłon w postaci płyt trójwarstwowych o rdzeniu ze spienionego metalu może zmienić przebieg procesu udarowego oddziaływania na konstrukcję i co najważniejsze skutkiem takiego zabezpieczenia może być mniejszy zakres uszkodzeń w zasadniczej części konstrukcji.

*Obliczenia przeprowadzono w ACK CYFRONET AGH w ramach grantu obliczeniowego MNiSW/SGI3700/PKoszalin/044/2011 pt. Analiza konstrukcji obciążonych w sposób wyjątkowy.*

## Streszczenie

W publikacji przedstawiono podstawowe informacje dotyczące właściwości spienionych metali. Zwrócono uwagę na możliwość wykorzystania tego typu materiałów do pochłaniania energii mechanicznej. Dodatkowo został pokazany przykład analizy konstrukcji żelbetowej obciążonej falą uderzeniową, rozpatrywany w dwóch sytuacjach, z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych. Raz jako konstrukcji zabezpieczonej płytami warstwowymi z rdzeniem w postaci pianki metalowej i drugi raz jako konstrukcji niezabezpieczonej. Wskazano, jakie są różnice, korzyści w sytuacji zastosowania zabezpieczenia z użyciem spienionego metalu.

**Słowa kluczowe:** pianki metalowe, ochrona konstrukcji, oddziaływania udarowe.

## Abstract

In the study the general information concerning the characteristics of metallic foams are presented. Possible application of such materials as energy absorbers has been discussed. Additionally, the numerical example of concrete structure under blast load was studied in two cases, both using Finite Element Method. In first case the structure was protected by means of sandwich plates with metallic foam core. Second case concerns unprotected structures. Main benefits associated with application of metallic foams as protective layers have been presented.

## Literatura

- [1] Magnucki K., Szycc W., Wytrzymałość i stateczność belek i płyt trójwarstwowych z rdzeniem z pianki aluminiowej. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2012.
- [2] Ruchwa M., Zastosowanie elementów ze spienionych metali jako zabezpieczeń konstrukcji przed działaniem obciążeń udarowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, seria: Budownictwo i Inżynieria Środowiska, Z. 58, nr 3/III (276), 2011, 57 – 64.
- [3] Bednarski T., Mechanika plastycznego płynięcia w zarysie. PWN, Warszawa, 1995.
- [4] Deshpande V. S., Fleck N. A., Isotropic constitutive models for metallic foams. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 48, 2000, 1253-1283.
- [5] Ruchwa M., Analiza elementów konstrukcyjnych wykonanych ze spienionych metali. Materiały Budowlane, 10 (470), 2011, 76 – 79.
- [6] Schenker A., Anteby I., Gal E. i inni, Full-scale field tests of concrete slabs subjected to blast loads. International Journal of Impact Engineering. Vol. 35, No. 3, 2008, 184 – 198.
- [7] Ruchwa M., Ocena odporności konstrukcji żelbetowej na działanie wybuchu. Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, Vol. 59, nr 4, 2010, 269-280.
- [8] Cichocki K., Ruchwa M., Propagacja zniszczenia w konstrukcji obciążonej wybuchem. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, seria: Budownictwo i Inżynieria Środowiska, Z. 58, nr 3/III (276), 2011, 17 – 24.
- [9] Cichocki K., Numerical Analysis of Concrete Structures under Blast Load. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2008.
- [10] Głodkowska W., Ruchwa M., Static Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Composites. Archives of Civil Engineering, Vol. 56, nr 2, 2010, 111 – 122.