

Elżbieta Koza¹, Marcin Leonowicz², Stefan Wojciechowski³

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa

ANALIZA STRUKTURALNA PIAN ALUMINIOWYCH

Uzyskano piany aluminiowe ze stopu AlSi12Mg1-1%TiH₂ wykonane metodą metalurgii proszków. Otrzymane w różnych temperaturach piany poddano pomiarom gęstości, analizie strukturalnej i jednoosiowej próbie ściskania. Przeprowadzone badania wykazały, że wraz z malejącą gęstością (będącą wynikiem wzrostu temperatury spieniania) maleją liczba porów na jednostkę powierzchni N_A i powierzchnia względna w objętości jednostkowej S_V , a objętość porów V_V rośnie. Nieco inną charakterystykę przedstawia piana o gęstości względnej 0,2, która ma najbardziej jednorodną strukturę pod względem wielkości i kształtu porów. Piana ta charakteryzuje się również najwyższą względną wytrzymałością na ściskanie ($\sigma_c/d = 37$ MPa; σ_c - wytrzymałość na ściskanie, $d = \rho/\rho_s$ - gęstość względna). Tylko piany o gęstości względnej mniejszej od 0,3 wykazują charakterystyczne dla pian tzw. plateau.

STRUCTURAL ANALYSIS OF ALUMINIUM FOAM

The precursor material, in a form of a rectangular rod 20x5 mm, was prepared by extrusion of a mixture of powders: AlSi12Mg1-1%TiH₂. The samples of the precursor rod (20x20x5 mm) were foamed at temperatures in the range of 600÷800°C, in times 3÷30 min. The density of the foams was measured after removing their surface metallic skin, which for small samples had a substantial influence on the mechanical properties. The foam structure was studied using computer image analysis method. The foams, which were foamed at various temperatures, exhibited different structure (Fig. 1). Even without special analysis one can see that the foam, which had relative density 0.2, exhibited most regular and homogeneous pore structure. In Figure 2a the parameters such as relative number of pore sections N_A , relative pore area within a unit volume S_V and relative pore volume V_V are plotted versus relative density. With decreasing density the volume parameter V_V increased and the parameters S_V and N_A decreased. However, when the pores in the walls were neglected the parameters, N_A and S_V showed a maximum for the foam, which had relative density 0.2. The dependence for V_V did not change (Fig. 2b). The calculated values of average pore size and shape of pores were substantially influenced by the small pores in the walls. The best structural homogeneity, represented by the narrow distribution of equivalent diameter - d_2 , was found again for the foam having relative density 0.2 (Fig. 4). The foams processed at temperatures lower and higher than 700°C exhibited much broader distribution of the pore size. The lowest density foams showed large pores with the equivalent diameter up to 7÷8 mm. The appearance of very large pores for the foams, which had been processed at high temperature, was supposed to be caused by a fast growth of small pores and their interconnections. Another significant parameter in structural analysis of metallic foams is the pore shape. For the characterisation of the pore shape such parameters as the elongation and convexity were calculated. The most circular pore structure showed the foam with relative density 0.2.

The foams were subjected to the compressive tests. The deformation was parallel to the foaming direction. The specimens having densities between 0.1 and 0.26 exhibited curves typical of foam materials with characteristic, extended plateau, ranging up to 60% strain (Fig. 5). The sample with density 0.49 did not show plateau. The highest relative compressive strength (37 MPa) attained the foam having relative density 0.2. The best mechanical properties exhibited foam, which had the maximum value of stereological parameters S_V and N_A and the most regular and homogeneous pore structure. The experiments proved that the mechanical properties of aluminium foam depend not only on their density, but also on the pore structure.

WPROWADZENIE

Piany metalowe są to porowate materiały, których budowę można opisać jako geometrycznie nieuporządkowane rozmieszczenie porów w metalowej osnowie. Piany metalowe mogą być więc traktowane jako dwufazowy kompozyt metal-gaz. Piany wytwarzane są głównie z metali lekkich lub stopów tych metali. Materiały takie, ze względu na strukturę, wykazują szereg własności, których nie można osiągnąć w litym materiale. Przy bardzo małej gęstości względnej (0,1÷0,3) piany aluminiowe odznaczają się dużą sztywnością, dużą zdolnością do absorbowania energii przy małej masie, zdolnością do tłumienia dźwięków i drgań. Są niepalne, mają małe przewodnictwo cieplne i elektryczne. Do korzystnych

cech należy również łatwość obróbki mechanicznej i recyklingu. Takie własności pian metalowych umożliwiają dość szerokie ich zastosowanie, np. na elementy stref zgniotu w pojazdach mechanicznych, lekkie i sztywne konstrukcje mechaniczne i budowlane, a także jako ekrany termiczne. Ze względu na małą masę właściwą i zdolność absorpcji energii piany mogą być wykorzystywane do wypełniania pustych profili w pojazdach, zapewniając im lepsze charakterystyki wytrzymałościowe.

Istnieje kilka metod wytwarzania pian metalowych. Należą do nich: metalurgia proszków, osadzanie chemiczne lub elektrochemiczne, naporowywanie próżnio-

¹ mgr inż., ² prof. dr hab., ³ prof. zw. dr hab. inż.

we, metody ciekło-fazowe. Duże zainteresowanie wśród naukowców i przemysłu wzbudzą ostatnio piany metalowe wytwarzane metodą metalurgii proszków, ze szczególnym uwzględnieniem pian aluminiowych.

Zainteresowanie pianami wytwarzanymi metodą metalurgii proszków wynika z prostoty tej metody [1-3] oraz ponoszonych w związku z tym niższych kosztów produkcji. Metoda ta polega na zmieszaniu proszku danego metalu (najczęściej aluminium lub jego stopu) z czynnikiem spieniającym (zwykle 0,4÷1% wag. TiH_2 lub ZrH_2), zagęszczeniu poprzez wyciskanie do gęstości bliskiej użytego materiału. Otrzymany w ten sposób prekursor poddaje się spienianiu w temperaturze wyższej niż temperatura topnienia stopu.

METODYKA BADAŃ

Proszek siluminu o składzie $AlSi12Mg1$ zmieszano ze środkiem spieniającym TiH_2 w ilości 1% wag. i poddano zagęszczaniu przez wyciskanie. Prekursor w formie prętów 20x20x5 mm poddano wygrzewaniu w temperaturach 600÷800°C przez 3÷30 min. Uzyskane piany po usunięciu skórki (warstwy litego materiału otaczającego pianę) poddano pomiarom gęstości. Na przekrojach tych pian została przeprowadzona szczegółowa ocena strukturalna za pomocą komputerowej analizy obrazu. Własności wytrzymałościowe pian określono w próbie ściskania z użyciem maszyny wytrzymałościowej MTS 810.

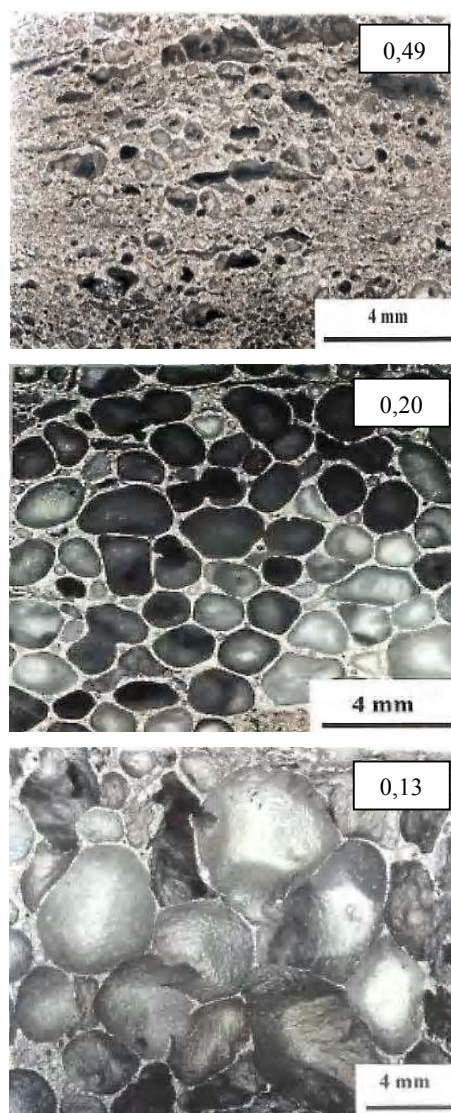
WYNIKI BADAŃ I ANALIZA WYNIKÓW

Struktura pian aluminiowych

Do analizy strukturalnej użyto pian aluminiowych o różnych gęstościach (rys. 1). Warstwa litego materiału otaczająca piany została usunięta, ponieważ w przypadku próbek o niewielkich wymiarach wpływa ona istotnie na własności. Gęstość piany ze skórką może być większa nawet o 30÷40%. Ocenie zostały poddane powierzchnie przekrojów pian o różnych gęstościach. Określono porowatość pian, główne parametry stereologiczne, dla każdego pora zostały obliczone podstawowe, charakterystyczne wartości, takie jak: pole powierzchni pora, jego obwód, średnice minimalne, maksymalne i równoważne.

Na podstawie obserwacji makroskopowej można wstępnie ocenić strukturę pian. Piany aluminiowe wytworzone w niższych temperaturach, a zatem o większych gęstościach, mają mniejsze pory, a ich ilość jest znacznie większa, czyli wraz z malejącą gęstością maleje liczba porów na jednostkę powierzchni (N_A), a ich objętość (V_V) rośnie. Potwierdza to przeprowadzona analiza komputerowa (rys. 2). Przy ocenie strukturalnej pian powstaje jednak problem z wyborem porów do

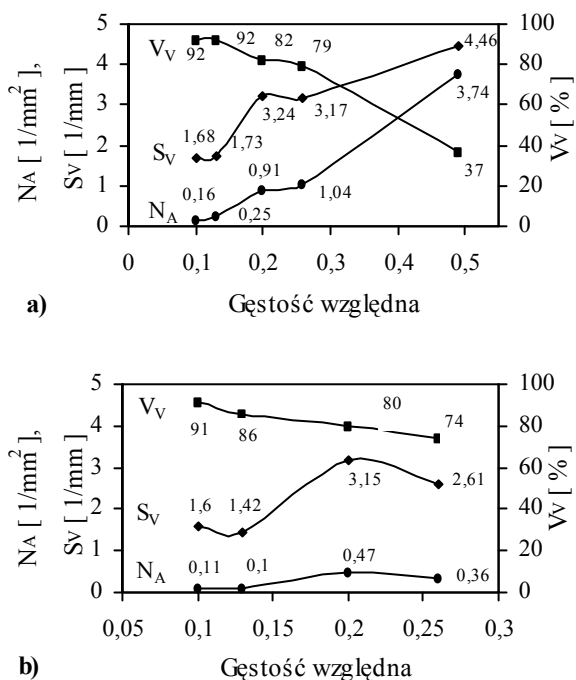
analizy. Każda z pian, oprócz dużych porów, posiada również pory znacznie mniejsze, znajdujące się w ściankach (rys. 3). Ilość tych porów zwiększa się wraz ze wzrostem gęstości pian, dochodząc nawet do ok. 40% przy gęstości względnej 0,26. Ma to istotne znaczenie przy określaniu parametrów stereologicznych. Przy uwzględnieniu porów w ściankach wartości parametrów stereologicznych N_A i S_V maleją wraz z gęstością, natomiast objętość porów V_V rośnie (rys. 2a). Pominięcie porów w ściankach zmienia zależność parametrów stereologicznych od gęstości (rys. 2b). Dla N_A i S_V występują wyraźne maksima przy gęstości względnej 0,2, co prawdopodobnie jest związane z większą regularnością struktury (rys. 1). Krzywa dla V_V ma podobny przebieg w obu przypadkach.



Rys. 1. Struktury pian aluminiowych o gęstościach względnych: 0,49, 0,20 i 0,13

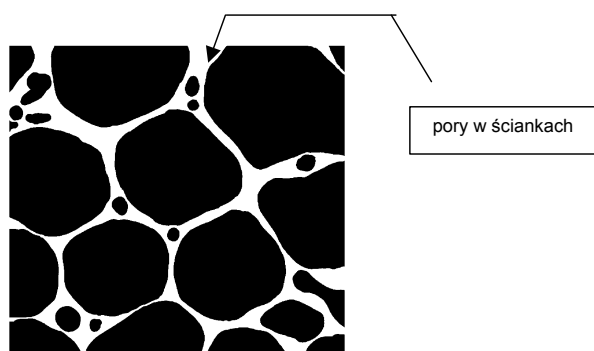
Fig. 1. Structure of aluminium foams, for relative density: 0.49, 0.20 and 0.13

Uwzględnienie porów w ściankach wpływa również na statystyczny opis struktury przy ocenie średniej wielkości porów, ich średniego obwodu czy przy opisie kształtu porów. Duża ich ilość powoduje znaczne zróżnicowanie wielkości porów w strukturze. Odrzucenie porów w ściankach pozwala na taką analizę struktury, w której piany o różnych gęstościach mają inne charakterystyki. Najbardziej jednorodną pianą pod względem wielkości porów jest ta, dla której występują maksima parametrów stereologicznych N_A i S_V (rys. 2b).



Rys. 2. Względna liczba przekrojów porów (N_A), powierzchnia względna porów w objętości jednostkowej (S_V) i względna objętość porów (V_V) w funkcji gęstości względnej: a) dla wszystkich porów piany, b) bez porów w ściankach

Fig. 2. Relative number of pore sections (N_A), relative pore area within a unit volume (S_V) and relative pore volume (V_V) versus relative density: a) for all pores, b) without pores in the walls

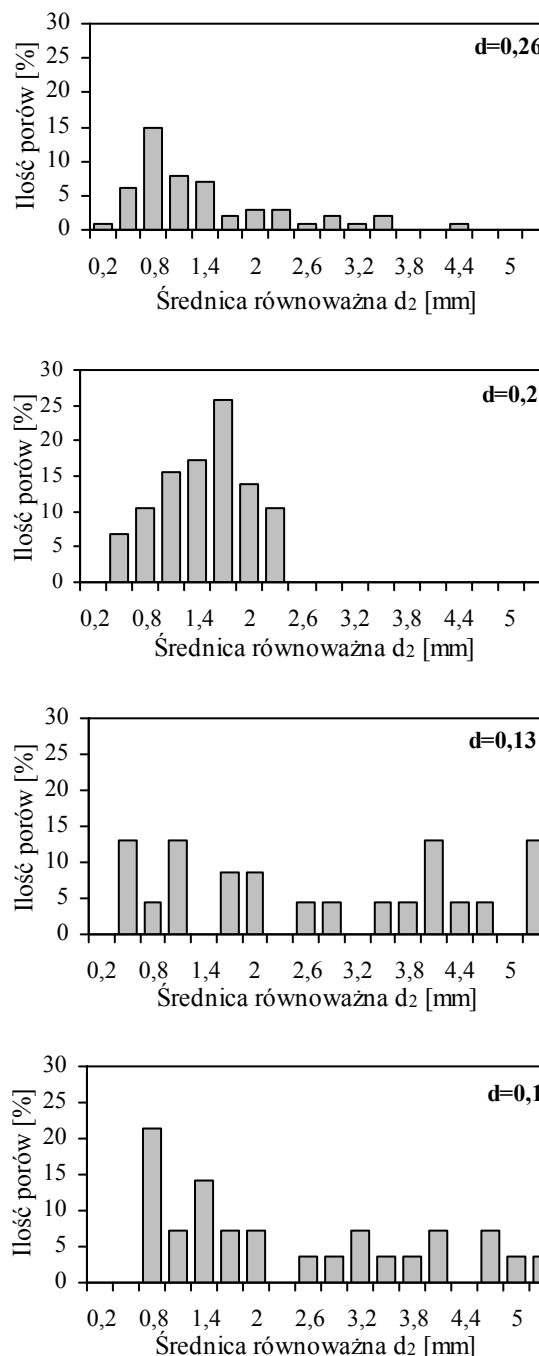


Rys. 3. Struktura piany aluminiowej (pow. ok. 15x)

Fig. 3. Structure of aluminium foam (magn. x15)

W odróżnieniu od pozostałych pian o gęstości względnej 0,2 przedstawia najmniejszy rozrzut średnic równo-

ważnych porów (rys. 4). Zarówno piany o niższych, jak i o wyższych gęstościach charakteryzują się znaczną rozbieżnością ujętej w ten sposób wielkości porów.



Rys. 4. Rozkład wielkości porów dla pian aluminium o różnych gęstościach względnych (z pominięciem porów w ściankach)

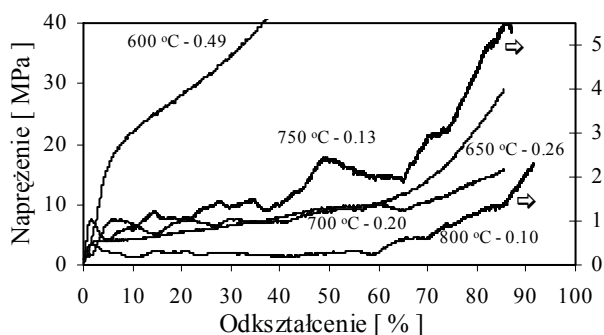
Fig. 4. Distribution of pore size for aluminium foams having different relative densities (without pores in the walls)

W pianach o niższych gęstościach pojawiają się pojedyncze pory o bardzo dużych rozmiarach, dochodzących nawet do 7÷8 mm średnicy. Przyczyną pojawiania się wraz ze wzrostem temperatury spieniania coraz większych porów jest prawdopodobnie szybki ich rozrost kosztem mniejszych.

Przy opisywaniu struktury porów pian ważnym parametrem jest ich kształt. Określono współczynniki kształtu porów charakteryzujące wydłużenie ($\alpha = d_{\max}/d_2$; d_{\max} - średnica maksymalna pora) i ich wypukłość (p/p_C ; p - obwód pora, p_C - obwód Cauchy'ego). Również w tym przypadku piany wytworzone w temperaturze 700°C o gęstości względnej 0,2 charakteryzuje się spośród pozostałych najmniej wydłużonymi i najbardziej wypukłymi porami, co oznacza, że jej pory mają najbardziej zbliżony kształt do kuli, charakterystyczny przy tworzeniu się porów w stanie ciekłym stopu.

Wytrzymałość na ściskanie pian aluminiowych

Badania wytrzymałości na ściskanie zostały przeprowadzone na pianach, które wcześniej były poddane analizie strukturalnej. Wyniki próby ściskania przedstawiono na rysunku 5.



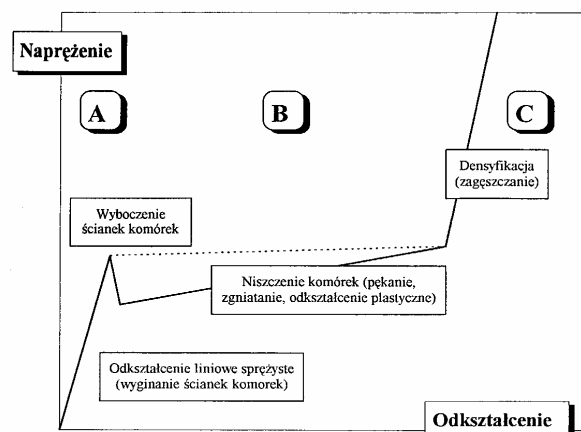
Rys. 5. Krzywe naprężenie-odkształcenie dla pian aluminiowych o różnych gęstościach względnych

Fig. 5. Stress-strain curves for aluminium foams having different relative densities

Próbki o gęstościach względnych od 0,1 do 0,26 wykazały charakterystyczne dla pian wydłużone plateau, sięgające do ok. 60% odkształcenia. Schemat zmiany naprężenia wraz z odkształceniem podczas ściskania przedstawiono na rysunku 6 [4]. Piany o gęstości względnej 0,49 jako jedyna nie pokazała tego typowego dla pian obszaru charakteryzującego absorpcję energii. Najwyższą względną wytrzymałość na ściskanie (stosunek wytrzymałości na ściskanie do gęstości względnej piany) otrzymano dla piany o gęstości 0,2÷37 MPa. Pozostałe piany prezentują znacznie niższe wytrzymałości (4÷16 MPa), które maleją wraz z gęstością.

Istnieje dobra korelacja własności wytrzymałościowych z parametrami stereologicznymi. Najwyższe własności wytrzymałościowe wykazują piany, dla których występują maksima S_V i N_A oraz największa jednorodność struktury pod względem wielkości i kształtu porów. Pominięcie, w analizie struktury, porów w ścianach

umożliwiło wyodrębnienie piany o najwyższych własnościach wytrzymałościowych.



Rys. 6. Schemat zagęszczania piany - zależność odkształcenia od naprężenia

Fig. 6. Scheme of foam densification (stress-strain curve)

WNIOSKI

Przeprowadzone badania wykazały, że własności mechaniczne zależą nie tylko od gęstości, ale również od ilości, wielkości i kształtu porów. Zaobserwowane zależności wymagają weryfikacji w toku dalszych badań. Tylko piany o gęstości względnej poniżej 0,3 wykazują typowe dla pian własności mechaniczne (wydłużone plateau). Piany o najbardziej regularnych kształtach porów ($d = 0,2$) i najmniejszym rozrzucie ich wielkości miała najwyższą względną wytrzymałość na ściskanie (37 MPa). Określenie parametrów stereologicznych pian S_V , N_A również pozwoliło na wstępną ocenę ich własności mechanicznych - dla piany o gęstości względnej 0,2 zaobserwowano ich maksima.

Praca finansowana z grantu KBN nr 7T08A 041 19.

LITERATURA

- [1] Banhart J., Baumeister J., Proc. MRS Symposium, San Francisco 1998, 121.
- [2] Simancik F., Schörghuber F., Hartl E., Austrian Patent application 1996.
- [3] Baumeister J., Banhart J., Weber M., German Patent DE 4 426 627, 1997.
- [4] Sobczak J., Piany metalowe monolityczne i kompozytowe oraz gazary, Instytut Odlewnictwa, Kraków 1998.

Recenzent
Jerzy Sobczak