

Roman DYGA, Małgorzata PŁACZEK

e-mail: r.dyga@po.opole.pl

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Przepuszczalność i współczynnik inercji pian aluminium o komórkach otwartych

Wstęp

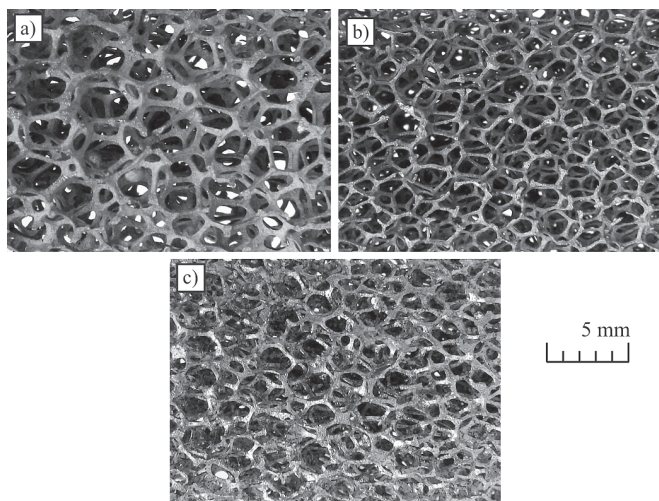
Piany metalowe o strukturze otwartej są stosunkowo mało znaną grupą materiałów komórkowych. Wysoka, przekraczająca 90 % porowatość oraz połączone przestrzenie sąsiadujących ze sobą komórek pian metalowych powoduje, że przetłaczanie płynów przez te materiały jest znacznie mniej energochłonne niż przez inne materiały porowate. M.in. z tego względu oraz z uwagi na dużą powierzchnię właściwą, piany metalowe coraz częściej znajdują zastosowanie jako wypełnienia strukturalne przepływowych wymienników ciepła i masy.

Zjawiska hydrodynamiczne występujące przy przepływie płynów przez piany metalowe często opisywane są w oparciu o teorię przepływu przez ziarniste ośrodki porowate. W takim ujęciu parametrami charakteryzującymi piany są przepuszczalność K oraz współczynnik inercji β . W literaturze [Edouard i in., 2008; Smorygo i in., 2011] panuje pogląd, że wielkości te zależą przede wszystkim od parametrów geometrycznych piany, takich jak kształt szkieletu komórkowego, rozmiar komórek, porowatość oraz powierzchnia właściwa. W przypadku przepływu laminarnego przepuszczalność ma wartość stałą dla danej piany, natomiast gdy przepływ ma charakter przejściowy lub turbulentny zarówno K jak i β są wielkościami zależnymi od warunków hydrodynamicznych przepływu. Medraj i in. [2007] wykazali, że przepuszczalność i współczynnik inercji zależą od prędkości płynu natomiast Bonnet i in. [2008] obserwowali również wpływ właściwości płynu.

W ramach prac własnych podjęto badania hydrodynamiki przepływu płynu przez piany aluminiowe. Badania te ukierunkowane były m.in. na poznanie wpływu parametrów geometrycznych oraz warunków hydrodynamicznych przepływu na wartość przepuszczalności i współczynnika inercji badanych pian.

Opis badań doświadczalnych

Przedmiotem badań były trzy piany ze stopów aluminium. Badane piany cechowały się podobną strukturą komórkową. Powiązane ze sobą cienkie włókna aluminium tworzą przestrzenny szkielet komórkowy (Rys. 1). Sąsiadujące komórki połączone są dużymi oknami, co umożliwia swobodny przepływ płynu przez przestrzeń komórkową. W objętości pian nie występują komórki zamknięte i nieprzelotowe. Poszczególne



Rys. 1. Struktura pian aluminiowych: a) 20 PPI, b) 30 PPI, c) 40 PPI

ne piany cechowały się różną gęstością upakowania porów PPI , średnią średnicą komórki d_c oraz porowatością ε .

Parametry charakteryzujące wykorzystywane w badaniach piany zestawiono w tab. 1. Bezpośrednim celem badań były pomiary oporów przepływu wody oraz powietrza przez piany. Pomiary realizowano przy przepływie płynów przez poziome kanały o średnicy 0,02 m i długości 2,61 m. Kanały na całej długości wypełnione były poszczególnymi pianami. Opory przepływu mierzono jako różnicę ciśnień płynu na odcinku o długości 1 m w odległości 1,15 m od wlotu kanału.

Różnicę ciśnień rejestrowano za pomocą czujników piezoelektrycznych. Ponadto rejestrowano również wartość ciśnienia bezwzględnego w kanale (na początku odcinka pomiarowego), co umożliwiło określenie gęstości powietrza. Z uwagi na ściślność powietrza jego strumień mierzono za pomocą przepływomierzy masowych. W pomiarach strumienia wody wykorzystywano przepływomierze turbinowe. Sygnały wyjściowe aparatury pomiarowej rejestrowano komputerowo.

Tab. 1. Charakterystyka pian aluminiowych wykorzystanych w badaniach własnych

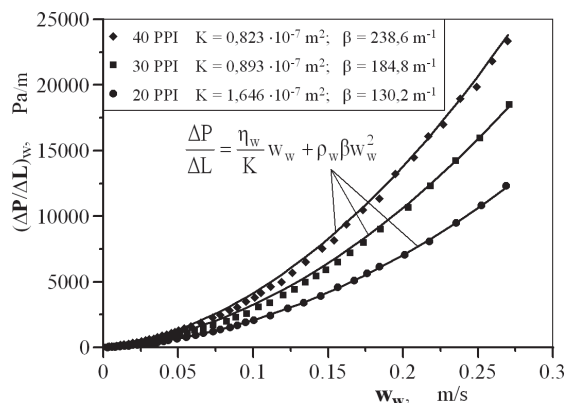
Piana (stop)	ε , %	$d_c \cdot 10^3$, m
20 PPI (AlSi7Mg)	93,4	3,452
30 PPI (AlSi7Mg)	9,46	2,255
40 PPI (Al 6101)	9,29	2,386

Badania prowadzono w stosunkowo szerokim zakresie zmian prędkości pozornej w płynów (liczonej w odniesieniu do przekroju pustego kanału). Prędkość powietrza wynosiła $w_a = 0,03 \div 9,88$ m/s, a wody $w_w = 0,003 \div 0,27$ m/s.

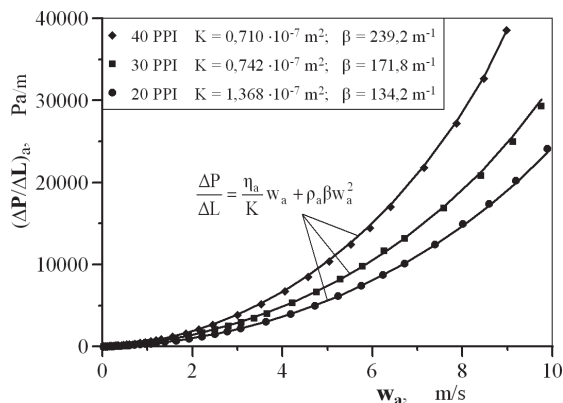
Wyniki badań i ich analiza

Zmierzone opory przepływu powietrza (Rys. 2) i wody (Rys. 3) zwiększają się wraz ze wzrostem prędkości płynu. Najmniejsze opory zarejestrowano przy przepływie przez pianę 20 PPI a największe przy przepływie przez pianę 40 PPI. Piany 20 PPI ma największe komórki przez co stawia przetłaczanemu przez nią płynowi mniejszy opór niż piany o mniejszych komórkach. Mimo, że rozmiar komórek piany 40 PPI jest nieznacznie większy niż piany 30 PPI to opory przepływu przez pianę 40 PPI są wyraźnie większe niż w przypadku przepływu przez pianę 30 PPI. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest mniejsza porowatość oraz liczne lokalne deformacje szkieletu piany 40 PPI.

Zmierzone opory przepływu zwiększają się wraz ze wzrostem prędkości płynu w sposób krzywoliniowy a opór hydrauliczny badanych pian może być opisany równaniem Forchheimera:



Rys. 2. Opory przepływu wody



Rys. 3. Opory przepływu powietrza

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \eta K^{-1} w + \rho \beta w^2 \quad (1)$$

Dla danego płynu równanie *Forchheimera* może być więc zapisane w postaci funkcji kwadratowej, w której zmienną jest tylko prędkość płynu

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = Aw + Bw^2 \quad (2)$$

a przepuszczalność oraz współczynnik inercji związane są ze stałymi *A* i *B*

$$A = \eta K^{-1} \quad (3)$$

$$B = \rho \beta \quad (4)$$

Zależność (2) opisuje wartości dyskretne (pomiarowe) punktów w układzie ($w_i, (\Delta P/\Delta L)_i$), w związku z tym stałe *A* i *B* mogą być wyznaczone za pomocą metod aproksymacji. Wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów dla funkcji nieliniowych, stałe *A* i *B* wyznaczone w oparciu o następujące zależności:

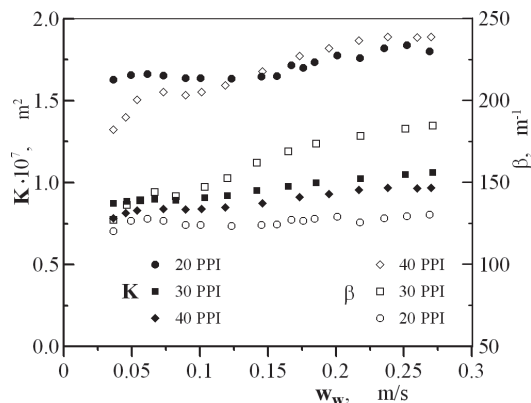
$$A = \frac{\left[\sum_{i=1}^n w_i \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_i \right] \left(\sum_{i=1}^n w_i^4 \right) - \left[\sum_{i=1}^n w_i^2 \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_i \right] \left(\sum_{i=1}^n w_i^3 \right)}{\left(\sum_{i=1}^n w_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n w_i^4 \right) - \left(\sum_{i=1}^n w_i^3 \right) \left(\sum_{i=1}^n w_i^3 \right)} \quad (5)$$

$$B = \frac{\left[\sum_{i=1}^n w_i^2 \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_i \right] \left(\sum_{i=1}^n w_i^2 \right) - \left[\sum_{i=1}^n w_i \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_i \right] \left(\sum_{i=1}^n w_i^3 \right)}{\left(\sum_{i=1}^n w_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n w_i^4 \right) - \left(\sum_{i=1}^n w_i^3 \right) \left(\sum_{i=1}^n w_i^3 \right)} \quad (6)$$

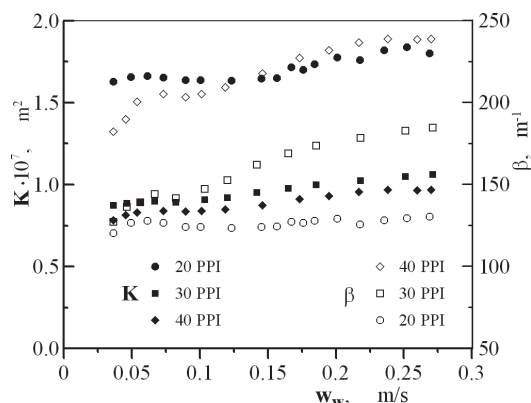
Znajomość tych stałych oraz równania (3) i (4) pozwalają wyznaczyć wartość przepuszczalności i współczynnika inercji piany.

Wartości *K* oraz β badanych pian podano na rys. 2 i 3. Jak widać piany 20 PPI cechuje się wyraźnie większą przepuszczalnością i mniejszym współczynnikiem inercji niż pozostałe piany. W przypadku pian 30 i 40 PPI przepuszczalność przyjmuje podobne wartości, wyraźnie różne są natomiast wartości współczynnika inercji, co wiąże się z przebiegiem zmian oporów przepływu i dominacją sił bezwładności nad siłami lepkości w przepływach ze stosunkowo dużymi prędkościami płynów. Należy również zwrócić uwagę na fakt, że w przypadku wszystkich pian przepuszczalność przy przepływie wody jest o kilkanaście procent większa niż przy przepływie powietrza. W przypadku współczynnika inercji różnice te są znacznie mniejsze i nie wykazują żadnych prawidłowości.

Na rys. 4 i 5 przedstawiono wartości *K* oraz β wyznaczone dla różnych prędkości płynów. Można zauważyć, że przepuszczalność wszystkich pian ma stałą wartość, gdy prędkość wody nie przekracza ok. 0,1 m/s a powietrza 3 m/s. Dla większych prędkości widoczny jest wzrost *K* wraz ze wzrostem prędkości płynów. Ostatecznie jako wielkości charakteryzujące poszczególne piany, przyjęto wartość przepuszczalności wyznaczoną w zakresie przepływu laminarnego, kiedy *K* nie zależy od prędkości oraz wartość współczynnika inercji obliczonego dla największych prędkości. W ten sposób zachowano właściwy udział sił lepkości



Rys. 4. Wpływ prędkości wody na przepuszczalność i współczynnik inercji



Rys. 5. Wpływ prędkości powietrza na przepuszczalność i współczynnik inercji

oraz bezwładności w determinowaniu strat ciśnienia a równanie *Forchheimera* poprawnie opisuje przebieg oporów przepływu w całym zakresie prędkości.

Wnioski

Stwierdzono, że zarówno przepuszczalność jak i współczynnik inercji są wielkościami zależnymi od porowatości piany i rozmiaru komórek, warunków przepływu oraz właściwości płynu.

Przepuszczalność wszystkich trzech pian przyjmuje wartość stałą w przypadku przepływów ze stosunkowo małymi prędkościami płynu, kiedy przepływ ma charakter laminarny. Przy zmianie charakteru przepływu na burzliwy przepuszczalność wyraźnie rośnie. Dodatkowo badane piany wykazują różną przepuszczalność oraz współczynnik inercji w odniesieniu do gazu i cieczy.

Opory przepływu płynu przez piany aluminiowe można opisać równaniem *Forchheimera*.

LITERATURA

- Bonnet J-P, Topin F, Tadriss L., 2008. Flow Laws in Metal Foams: Compressibility and Pore Size Effects. *Transp. Porous Med.*, **73**, 233-254. DOI:10.1007/s11242-007-9169-5
- Edouard D., Lacroix M., Huu C.P., Luck F., 2008. Pressure drop modeling on SOLID foam: State-of-the art correlation. *Chem. Eng. J.*, **144**, 299-311. DOI:10.1016/j.cej.2008.06.007
- Medraj M., Baril E., Loya V., Lefebvre L-P., 2007. The effect of microstructure on the permeability of metallic foams *J. Mat. Sci.*, **42**, 4372-4383. DOI: 10.1007/s10853-006-0602-x
- Smorygo O., Mikutski V., Marukovich A., Ilyushchanka A., Sadykov V., Smirnova A., 2011. An inverted spherical model of an open-cell foam structure. *Acta Materialia*, **59**, 2669-2678. DOI: 10.1016/j.actamat.2011.01.005

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010–2013 jako projekt badawczy nr 3145/B/T02/2010/38.