

Roman DYGA

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

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Opór hydrauliczny przy przepływie gaz-ciecz w kanałach wypełnionych pianami aluminiowymi

Wstęp

W aparatach, w których istnieje konieczność rozwinięcia powierzchni wymiany ciepła bądź masy rolę wypełnień strukturalnych mogą pełnić piany metalowe o komórkach otwartych.

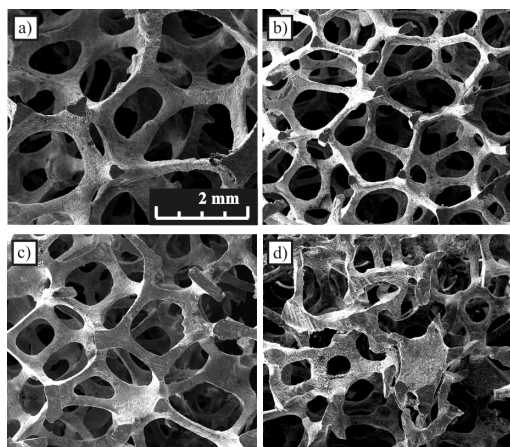
Piany metalowe to specyficzna grupa materiałów komórkowych, w których metal występuje w postaci przestrzennego szkieletu, tworząc osnowę dla stosunkowo dużych i pustych komórek. Komórki mają postać zwartych wielościennych brył, a ich rozmiar może być nawet o rząd większy od rozmiarów poprzecznych szkieletu. Taka budowa zapewnia pianom bardzo wysoką porowatość, na ogół przekraczającą 90 %. Dodatkowo rozmiar i liczba okien łączących poszczególne komórki jest na tyle duża, że możliwy jest stosunkowo swobodny przepływ płynów przez te materiały, co znajduje odzwierciedlenie w znacznie mniejszych stratach ciśnienia płynu niż w przypadku przepływu przez materiały porowate o porównywalnej powierzchni właściwej.

Przepływy wielofazowe przez piany metalowe wymagają dalszych badań mimo rosnącej w ostatnich latach liczbie prac poświęconych wykorzystaniu pian metalowych w budowie aparatury procesowej. Dotychczas opublikowano zaledwie kilka prac z zakresu przepływowego wrzenia w kanałach wypełnionych pianami metalowymi [Ji i Xu, 2012; Wang i in., 2013; Hu i in., 2014] oraz przepływu gaz-ciecz w aparatach kolumnowych [Stemmet i in., 2007; Pangarkar i in., 2010].

W ramach prac własnych prowadzono badania hydrodynamiki przepływu jednofazowego oraz dwufazowego gaz-ciecz przez piany aluminiowe. Badania te były ukierunkowane na poznanie wpływu parametrów geometrycznych pian oraz warunków hydrodynamicznych przepływu (prędkości i właściwości fizycznych płynów oraz struktur przepływu) na wartość oporów przepływu.

Badania doświadczalne

Materiały. W badaniach wykorzystano trzy rodzaje pian aluminiowych o komórkach otwartych i gęstości upakowania porów 20, 30 oraz 40 PPI. Piany różniły się również porowatością ε i wielkością komórek d_c . Ponadto szkielet piany 40 PPI cechował się wyraźnie mniej regularną budową niż pozostałe piany, w wielu miejscach występowały lokalne deformacje szkieletu.



Rys. 1. Struktura szkieletu komórkowego pian: a) 20 PPI, b) 30 PPI, c) 40 PPI, d) lokalne deformacje szkieletu komórkowego piany 40 PPI

Tab. 1. Charakterystyka pian i warunków realizacji badań doświadczalnych

| Piana (stop) | 20 PPI (AlSi7Mg) | 30 PPI (AlSi7Mg) | 40 PPI (Al 6101) |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| ε , [%] | 93,4 | 94,3 | 92,9 |
| d_c , [m] | $3,452 \cdot 10^{-3}$ | $2,255 \cdot 10^{-3}$ | $2,386 \cdot 10^{-3}$ |
| Warunki przepływu | | | |
| Płyn f | Przepływ jednofazowy | | Przepływ dwufazowy |
| | w_f , [m/s] | w_f , [m/s] | ξ_f , [-] |
| powietrze | $0,028 \div 9,88$ | $0,028 \div 2,39$ | $0,313 \div 0,998$ |
| woda | $0,003 \div 0,270$ | $0,006 \div 0,061$ | $0,002 \div 0,988$ |
| olej | $0,003 \div 0,167$ | $0,006 \div 0,061$ | $0,002 \div 0,988$ |

Budowę szkieletu pian przedstawiono na rys. 1, a ich charakterystyczne parametry geometryczne zestawiono w tab.1.

Jako płyny robocze zastosowano powietrze, wodę i olej maszynowy *Velol-9Q* oraz mieszaniny powietrza z tymi cieczami. Gęstość oleju w temperaturze 20 °C wynosiła $\rho_{ol} = 859,8 \text{ kg/m}^3$, a lepkość $\eta_{ol} = 8,78 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Stanowisko doświadczalne oraz aparaturę pomiarową szerzej opisano w pracy [Dyga i Troniewski, 2015]. Badania prowadzono w stosunkowo szerokim zakresie zmian prędkości pozornych płynów w_f (liczonych w odniesieniu do przekroju pustego kanału, z pominięciem obecności piany oraz drugiego płynu) oraz wlotowych udziałów objętościowych faz ξ_f (stosunek zmierzzonego strumienia fazy f do sumy strumieni powietrza i cieczy).

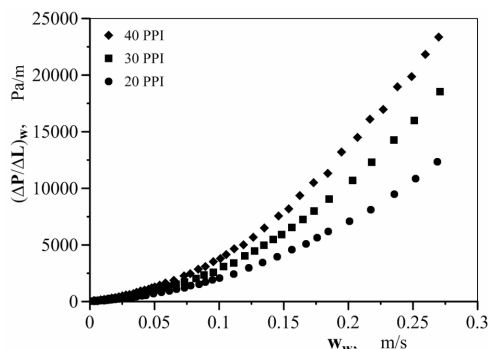
Metodyka. Bezpośrednim celem badań były pomiary oporów przepływu. Pomiary realizowano przy przepływie płynów przez poziome kanały o średnicy 0,02 m i długości 2,61 m. Kanały na całej długości wypełnione były pianami (dla każdej piany przygotowano niezależny kanał). Opory przepływu mierzono jako różnicę ciśnień płynu na odcinku o długości 1 m w odległości 1,15 m od wlotu kanału. Różnica ciśnień mierzona była za pomocą czujników piezoelektrycznych. Ponadto rejestrowano wartość ciśnienia bezwzględne w kanale, co umożliwiało określenie gęstości powietrza.

Równocześnie z pomiarami oporów przepływu mierzono rzeczywiste udziały objętościowe faz w mieszaninie gaz-ciecz oraz obserwowano kształtujące się w kanale struktury przepływu.

Wyniki i dyskusja

Przykładowo na rys. 2 przedstawiono przebieg zmian oporów przepływu wody przez wszystkie trzy piany. Najmniejsze opory zarejestrowano przy przepływie przez pianę 20 PPI, a największe przy przepływie przez pianę 40 PPI. Opory przepływu jednofazowego wszystkich trzech wykorzystywanych w badaniach płynów zwiększają się monotonicznie wraz ze wzrostem prędkości płynu. Zmiany oporów przepływu w funkcji prędkości płynu mają charakter potęgowy.

Piana 20 PPI ma największe komórki przez co stawia przetłaczalnemu przez nią płynowi mniejszy opór niż piany o mniejszych komórkach. Mimo, że rozmiar komórek piany 40 PPI jest nieznacznie większy niż komórek piany 30 PPI, to opory przepływu przez pianę 40 PPI są wyraźnie większe niż w przypadku przepływu przez pianę 30 PPI. Przyczyną znacznie większego oporu hydraulicznego piany 40 PPI wydaje się być struktura geometryczna szkieletu tej piany. Komórki piany 40 PPI tworzą bardziej zamkniętą strukturę, z uwagi na obecność dużych węzłów u zbiegu włókien szkieletu.



Rys. 2. Opory przepływu wody

Liczne deformacje szkieletu piany 40 PPI (rys. 1d), niewątpliwie również zwiększają opór przepływu.

Przebieg zmian oporów przepływu oraz wpływ struktury piany na wartość oporów przepływu jednofazowego powietrza i oleju jest analogiczny jak w przypadku przepływu wody.

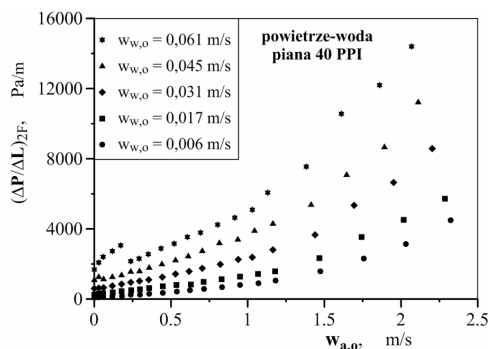
Charakter zmian oporów przepływu dwufazowego $(\Delta P/\Delta L)_{2F}$ na przykładzie przepływu powietrze-woda przez pianę 40 PPI przedstawiono na rys. 3. Opory przepływu powietrze-woda zdeterminowane są prędkościami faz i zwiększają się monotonicznie wraz ze wzrostem prędkości zarówno powietrza $w_{a,o}$, jak i wody $w_{w,o}$.

Jedynym odstępstwem od monotonicznego wzrostu oporów przepływu jest – widoczne na rys. 3 i 4 (seria punktów $w_{w,o} = 0,061$ m/s) – gwałtowne zmniejszenie się wartości oporów przepływu, które obserwowano w warunkach zmiany formy przepływu powietrze-woda z przepływu korkowego w przepływ rozwarstwiony. Pozornie nieuzasadnione zmniejszenie się wartości $(\Delta P/\Delta L)_{2F}$ mimo wzrostu prędkości powietrza jest wynikiem zmniejszenia się powierzchni zwilżanej przez wodę. W przepływie korkowym ciecz zwilża bowiem znacznie większą powierzchnię kanału i piany niż w przepływie rozwarstwowanym, a woda jako faza bardziej lepka w większym stopniu niż powietrze decyduje o wartości oporów przepływu powietrze-woda.

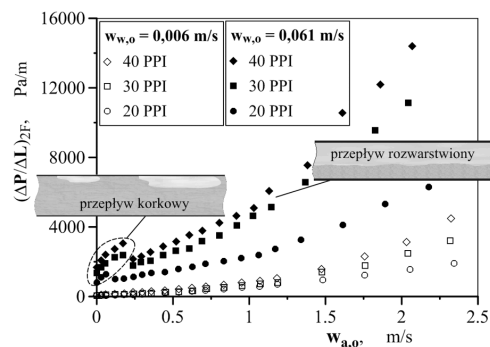
Przepływ powietrze-woda odbywał się głównie w formie przepływu rozwarstwowanego. Przy małych strumieniach powietrza wprowadzanego do kanału obserwowano przepływ korkowy. W przepływie powietrze-olej poza przepływami rozwarstwowanym i korkowym, obserwowano jeszcze przepływy rzutowy i tłokowy. Większa różnorodność form przepływu powietrze-olej skutkuje bardziej nieregularnym przebiegiem zmian oporów tego przepływu, zwłaszcza w przypadku przepływów ze stosunkowo dużymi prędkościami oleju (Rys. 5), kiedy to w kanale często występowały przepływy rzutowy oraz tłokowy.

Wartości oporów przepływu powietrze-olej, z uwagi na wyższą od wody lepkość oleju, są wyraźnie większe niż w przypadku przepływu powietrza z wodą z tymi samymi prędkościami faz.

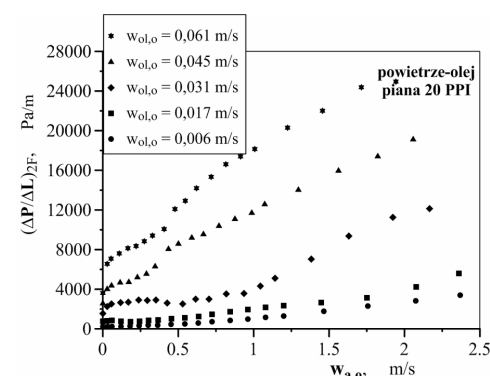
Zarówno w przepływie powietrze-woda, jak i powietrze-olej obserwowano analogiczny jak w przepływie jednofazowym wpływ geometrii szkieletu komórkowego na wartość oporów przepływu.



Rys. 3. Charakter zmian oporów przepływu powietrze-woda w funkcji prędkości faz



Rys. 4. Porównanie oporów przepływu powietrze-woda przez piany 20, 30 i 40 PPI



Rys. 5. Charakter zmian oporów przepływu powietrze-olej w funkcji prędkości faz

Najmniejsze opory przepływu zarejestrowano przy przepływie przez pianę 20 PPI, a największe w przypadku przepływu przez pianę 40 PPI.

Wnioski

Opory przepływu płynu przez kanały wypełnione pianami metalowymi, poza oczywistym wpływem prędkości i właściwości płynu, zależą od porowatości pian, wielkości komórek oraz kształtu szkieletu komórkowego. W przypadku przepływu dwufazowego znaczną rolę odgrywa również rozmieszczenie faz w kanale.

Przepływ gaz-ciecz przez piany metalowe może odbywać się w formie przepływu rozwarstwowanego, korkowego, rzutowego oraz tłokowego. Zmianom form przepływu mogą towarzyszyć skokowe, zmiany wartości oporów przepływu, włącznie z efektami redukcji oporów.

LITERATURA

- Dyga R., Troniewski L., 2015. Convective heat transfer for fluids passing through aluminum foams. *Arch. Therm.*, **36**, 1, 139-156. DOI: 10.1515/aoter-2015-0010
- Hu H., Zhu Y., Peng H., Ding G., Sun S., 2014. Effect of tube diameter on pressure drop characteristics of refrigerant-oil mixture flow boiling inside metal-foam filled tubes. *Appl. Therm. Eng.*, **62**, 433-443. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.09.051
- Ji X., Xu J., 2012. Experimental study on the two-phase pressure drop in copper foams. *Heat Mass Transfer*, **48**, 153-164. DOI: 10.1007/s00231-011-0860-2
- Pangarkar K., Schildhauer T.J., J.R. van Ommen, Nijenhuis J., Moulijn J.A., Kapteijn F., 2010. Heat transport in structured packings with co-current downflow of gas and liquid. *Chem. Eng. Sci.*, **65**, 420-426. DOI:10.1016/j.ces.2009.08.018
- Stemmet C.P., Meeuwse M., J. van der Schaaf, Kuster B.F.M., Schouten J.C., 2007. Gas-liquid mass transfer and axial dispersion in solid foam packings *Chem. Eng. Sci.*, **62**, 5444-5450. DOI: 10.1016/j.ces.2007.02.016
- Wang P., Liu D.Y., Xu C., 2013. Numerical study of heat transfer enhancement in the receiver tube of direct steam generation with parabolic trough by inserting metal foams. *Appl. Energy*, **102**, 449-460. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.07.026