

Roman DYGA

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

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

## Parametry przepływowe wypełnienia porowatego ze spienionej stali

### Wstęp

Obserwowany w ostatnich latach rozwój technologii wytwarzania spienionych metali umożliwia stosowanie tego stosunkowo nowego rodzaju materiału na skalę przemysłową. Wysoka porowatość i powierzchnia właściwa oraz całkowicie otwarta struktura porów daje szerokie możliwości wykorzystania spienionych metali w aparaturze przepływowej. Materiały te znajdują zastosowanie m.in. w wymiennikach i regeneratorach ciepła, filtrach oraz stabilizatorach przepływu. Właściwości przepływowe spienionych metali zależą od ich struktury wewnętrznej, którą charakteryzują takie wielkości jak: porowatość, gęstość porów, średnica porów oraz rozmiar i kształt wiązań tworzących pory. W zależności od zastosowanej technologii produkcji, wytwarzane z różnych materiałów piany metalowe w wielu przypadkach dość istotnie różnią się strukturą wewnętrzną. Fakt ten w znacznym stopniu utrudnia uogólnienie opisu zjawisk hydraulicznych przy przepływie płynu przez różnego rodzaju spienione metale. Dla określonego układu przepływowego płyn – piana metalowa konieczne jest na ogół przeprowadzenie badań doświadczalnych. Wielkości trudne do eksperymentalnego wyznaczenia, jak np. rozkład prędkości, próbuje się w wielu przypadkach określać na drodze numerycznej.

Jednym ze stosowanych w praktyce rodzajów spienionych metali są piany stali stopowej FeCrAlY (FEC). W odróżnieniu od spienionych stopów aluminium, miedzi czy niklu spienione stale mają wiązadła porów w postaci cienkich blaszek. Niektóre z nich mają tak dużą szerokość, że częściowo zamykają pory. W związku z tym materiał ten cechuje się innymi właściwościami hydraulicznymi niż w pełni otwarta struktura innych lepiej dotychczas poznanych spienionych metali.

### Przepuszczalność i współczynnik bezwładności

Podobnie jak w przypadku innych rodzajów wypełnień porowatych jako podstawowe parametry opisujące właściwości przepływowe spienionych metali przyjmuje się przepuszczalność  $K$  [m<sup>2</sup>] oraz współczynnik bezwładności  $\beta$  [m<sup>-1</sup>]. Wielkości te można wyznaczyć w oparciu o opory przepływu płynu przez materiał porowaty.

W ramach prac własnych przeprowadzono badania doświadczalne hydrodynamiki przepływu powietrza i wody przez spienioną stal stopową FEC o porowatości 92% i gęstości porów 40 PPI (por na cal) co odpowiada średniej średnicy porów ok. 1,6 mm.

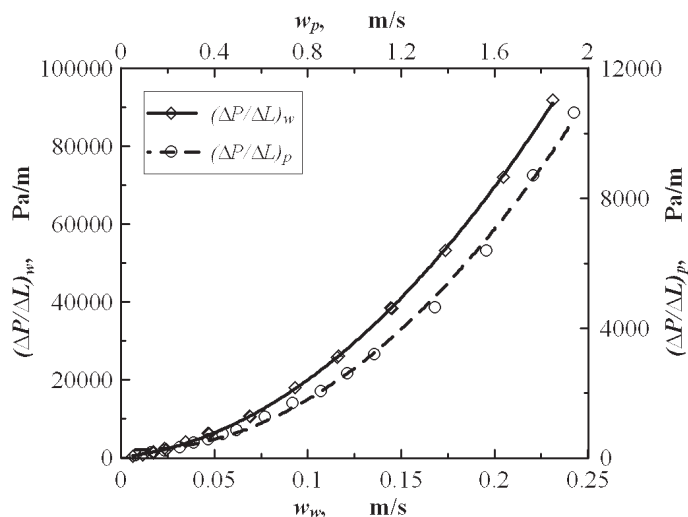
Spieniona stal stanowiła wypełnienie poziomego kanału o długości całkowitej 2,8 m, przekroju kołowym i średnicy wewnętrznej 21 mm. Bezpośrednim celem badań był pomiar oporów przepływu. Wielkość tę mierzono na długości 1,1 m za pomocą elektronicznych czujników różnicy ciśnień. Badania prowadzono przy prędkości pozornej (liczonej w odniesieniu do przekroju kanału bez wypełnienia) powietrza w zakresie  $w_p = 0,06 \div 1,94$  m/s i wody  $w_w = 0,006 \div 0,23$  m/s.

Charakter zmian zmierzonych oporów przepływu zarówno wody jak i powietrza (Rys. 1) wskazuje, że opór hydrauliczny badanej piany stalowej opisuje równanie Forchheimera (1).

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

Oznacza to, że wraz ze wzrostem prędkości przepływu zwiększa się wpływ sił bezwładności na straty ciśnienia przy przepływie przez badane wypełnienie. Siły te powinny być uwzględniane już przy prędkości wody ok. 0,05 m/s.

Przy zachowaniu stałej wartości gęstości i lepkości płynu równanie to jest funkcją kwadratową a jedyną zmienną jest prędkość przepływu płynu. Równanie (1) może być więc zapisane w postaci:



Rys. 1. Opór przepływu przez spienioną stal

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

gdzie:

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

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

Zależność (2) opisuje wartości dyskretne (pomiarowe) punktów w układzie  $(w_p, (\Delta P/\Delta L)_p)$ , w związku z tym stałe  $A$  i  $B$  mogą być wyznaczone za pomocą metod aproksymacji. Wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów dla funkcji nieliniowych, stałą  $A$  i  $B$  wyznaczone w oparciu o zależności (5) i (6)

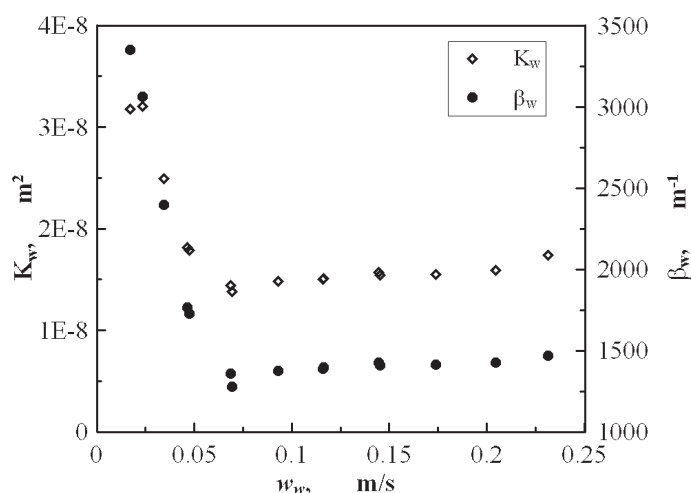
$$A = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_i\right) \left(\sum_{i=1}^n w_i^4\right) - \left(\sum_{i=1}^n w_i^2 \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_i\right) \left(\sum_{i=1}^n w_i^3\right)}{\left(\sum_{i=1}^n w_i^2\right) \left(\sum_{i=1}^n w_i^4\right) - \left(\sum_{i=1}^n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

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

Znajomość tych stałych oraz równania (3) i (4) pozwoliły wyznaczyć wartość przepuszczalności i współczynnika bezwładności dla badanej piany stalowej. W przypadku wody  $K_w = 1,7367 \cdot 10^{-8}$  m<sup>2</sup>,  $\beta_w = 1470,9$  m<sup>-1</sup>, natomiast dla powietrza  $K_p = 2,0735 \cdot 10^{-8}$  m<sup>2</sup> i  $\beta_p = 1554,8$  m<sup>-1</sup>. Jak widać wyznaczone parametry różnią się dość istotnie dla obydwu płynów.

Ponadto w przypadku wody stwierdzono, że dla małych prędkości przepływu wartość przepuszczalności i współczynnika bezwładności jest odwrotnie proporcjonalna do prędkości. Parametry te mogą być traktowane jako stałe przy prędkości wody powyżej 0,07 m/s (Rys. 2). Wtedy też w sposób ścisły obowiązuje prawo Forchheimera.

Przy przepływie powietrza nie zaobserwowano wyraźnego wpływu prędkości przepływu na wartość  $K_p$  i  $\beta_p$ . Wpływ rodzaju płynu oraz warunków przepływu na wartość  $K$  i  $\beta$  spienionych metali sygnalizują również autorzy pracy [1].

Rys. 2. Wpływ prędkości przepływu wody na wartość  $K$  i  $\beta$ 

### Profil prędkości

Złożona struktura wewnętrzna materiałów porowatych poważnie utrudnia doświadczalne wyznaczenie lokalnych wartości prędkości płynu. Z tego względu profil prędkości płynu przepływającego przez badane wypełnienie wyznaczono numerycznie przy wykorzystaniu pakietu oprogramowania *Gambit* i *Fluent*.

Modelowanie numeryczne (w przestrzeni 3D) prowadzono w kanale o takiej samej średnicy i geometrii jak w przypadku badań doświadczalnych. Wiernie odwzorowano również sposób zasilania kanału płynem oraz element odprowadzający płyn. Zmniejszono natomiast długość modelowanego kanału, co znacznie skróciło czas obliczeń. Przestrzeń zajmowaną przez wypełnienie zdyskretyzowano elementami polihedrycznymi (w rdzeniu kanału) oraz hexahedrycznymi o zmniejszającym się (w kierunku ścianki) rozmiarze. W sumie na przekrój poprzeczny wypełnienia składa się 852 elementów.

W przypadku przepływu płynów przez struktury porowate brak jest jednoznacznych kryteriów określających charakter przepływu. Trudno jest wskazać wymiar charakterystyczny w liczbie *Reynoldsa* oraz jej wartość graniczną rozdzielającą przepływ laminarny i turbulentny. Dlatego we wstępnym etapie prac numerycznych prowadzono obliczenia w oparciu o model przepływu laminarnego oraz dwa modele przepływu turbulentnego – jednorównaniowy model *Spalart-Allmaras* oraz dwurównaniowy model *k-ε*. W przypadku modeli laminarnego oraz *k-ε* nie osiągnięto zbieżności obliczeń na zadawalającym poziomie. Często, zwłaszcza dla wody, występowały również rozbieżności w bilansie masy. Ostatecznie przyjęto model turbulentny *Spalart-Allmaras*. Model ten został pozytywnie zweryfikowany m.in. przez autorów pracy [2]. Również przebieg zmierzonych oporów przepływu wskazuje na burzliwy charakter przepływu.

Model transportu płynu nieściśliwego *Spalart-Allmaras* oparty jest na równaniu (7)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{v} w_i) = G_v + \frac{1}{\sigma_v} \left[ \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\eta + \rho \tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left( \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_v + S_v \quad (7)$$

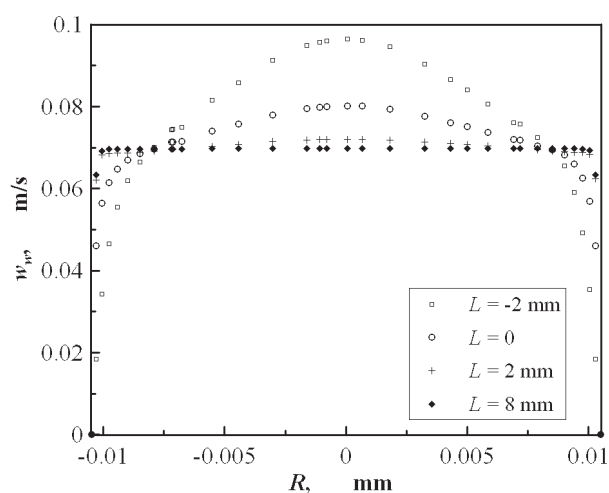
W strefie przepływu przez izotropowe wypełnienie porowate model przepływu uzupełniony jest członem ujmującym zmiany ciśnienia

$$S_i = - \left( \frac{\eta}{\alpha} w_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |w| w_i \right), \quad (8)$$

gdzie:  $\alpha = K$ ,  $C_2 = 2\beta$ .

Przepuszczalność i współczynnik bezwładności zadano w oparciu o wartości tych parametrów uzyskane z badań doświadczalnych.

Obliczenia przeprowadzono dla przepływu stacjonarnego. Ze względu na stosunkowo małe prędkości przepływu założono, że zarówno woda jak i powietrze są płynami nieściśliwymi. Jako warunki brzegowe

Rys. 3. Rozkład prędkości lokalnej wody wzdłuż średnicy pionowej kanału w wybranych przekrojach poprzecznych ( $V_w = 2,26 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ )

przyjęto znaną z pomiarów prędkość średnią płynu na wlocie do kanału oraz wpływ płynu do przestrzeni pod ciśnieniem atmosferycznym.

Rys. 3 przedstawia profil prędkości lokalnej wody (wartość prędkości w funkcji promienia kanału  $R$ ) w wybranych przekrojach poprzecznych kanału. Położenie  $L$  rozpatrywanego przekroju określone jest w odniesieniu do początku wypełnienia porowatego. W pełni rozwinięty przepływ charakteryzuje się praktycznie stałą wartością prędkości (seria danych oznaczona symbolem „♦”), jedynie w bezpośrednim sąsiedztwie ścianki następuje gwałtowne zmniejszenie prędkości. Tego rodzaju „płaski” profil prędkości jest typowy dla przepływów przez materiały porowate [3, 4]. Na uwagę zasługuje krótki odcinek stabilizacji przepływu. Paraboliczny profil prędkości w części niewypełnionej kanału ( $L = -2$ ) zmienia się gwałtownie już w pierwszej warstwie porów ( $L = 2$ ). W zależności od strumienia wody, całkowita stabilizacja przepływu zachodzi na długości zaledwie 4–6 razy większej od rozmiaru porów. Długość odcinka kształtowania się profilu prędkości rośnie nieznacznie wraz ze wzrostem prędkości wody. Analogiczne wyniki uzyskano w przypadku modelowania przepływu powietrza.

Zaimplementowane w programie *Fluent* standardowe procedury modelowania przepływu przez materiały porowate nie uwzględniają struktury wewnętrznej materiału porowatego. Nie są definiowane żadne wielkości geometryczne typu, średnica i kształt porów oraz wiązań czy też gęstość porów. Dyskretyzacji nie podlegają pojedyncze pory a jedynie przestrzeń w której znajduje się materiał porowaty. Uzyskane w opisywanej analizie wartości prędkości lokalnych należy zatem traktować jako prędkości średnie dla niewielkich obszarów komórek elementarnych.

### Wnioski

Stwierdzono, wyraźny wpływ sił bezwładności na zmianę ciśnienia płynu przy przepływie przez spioną stal. Straty ciśnienia można opisać klasycznym dla materiałów porowatych równaniem *Forchheimera*. Badane wypełnienie charakteryzuje się różnymi właściwościami przepływowymi w odniesieniu do gazu i cieczy. Ponadto wartości przepuszczalności jak i współczynnika bezwładności są wielkościami zmiennymi w pewnym zakresie zmian prędkości płynu.

Wyniki symulacji numerycznej wykazują, że profil prędkości płynu jest praktycznie płaski, tzn. lokalna prędkość płynu jest stała w prawie całym przekroju poprzecznym wypełnienia. Długość strefy niestabilnego przepływu na początku wypełnienia nie przekracza kilku średnic pora i w małym stopniu zależy od prędkości przepływu.

### LITERATURA

- [1] J.-P. Bonnet, F. Topin, L. Tadriss: *Transp. Porous Med.*, **73**, 233, (2008).
- [2] S. Abdel-Khalik, M. Yoda, L. Crosatti, E. Gayton, D. Sadowski: *International HHFC Workshop*, San Diego, (2008).
- [3] A.V. Kuznetsov, M. Xiong: *Int. Journal of Thermal Sciences*, **42**, 913, (2003).
- [4] A.A. Mohamad: *Int. Journal of Thermal Sciences*, **42**, 385, (2003).