

Roman DYGA, Stanisław WITCZAK, Gabriel FILIPCZAK

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

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

## Symulacja przepływu cieczy przez pianę metalową FEC z wykorzystaniem periodycznego modelu geometrycznego piany

### Wstęp

Piany metalowe o komórkach otwartych są grupą specyficznych materiałów komórkowych o dość zróżnicowanej strukturze geometrycznej. Szkielet komórkowy, w zależności od zastosowanej technologii wytwarzania piany, może występować np. w postaci przestrzennej sieci włókien o przekroju okrągłym tworzących przylegające do siebie prawie całkowicie otwarte komórki, jak również w postaci połączonych cienkich płytek, które w znacznie większym stopniu zamykają przestrzeń komórkową. Kształt i rozmiar komórek są czynnikami istotnie wpływającymi na warunki przepływu płynów w przestrzeni komórkowej piany, a opis hydrodynamiki przepływu wymaga odrębnego traktowania poszczególnych typów pian. Badania zjawisk przepływowych w przestrzeni komórkowej realizowane są na ogół w sposób doświadczalny, co wymaga zbudowania stanowiska laboratoryjnego a określenie zjawisk zachodzących w skali pojedynczej komórki wymaga zastosowania zaawansowanych technik pomiarowych. Alternatywą dla kosztownych badań doświadczalnych jest numeryczne modelowanie przepływu przez piany.

Ponieważ przestrzeń wypełniona pianą metalową jest zwykle wielokrotnie większa od rozmiarów pojedynczych komórek symulacje przepływu przez piany najczęściej prowadzi się w skali makro tzn. w oparciu o rozwiązywanie uśrednionych w czasie równań *Naviera-Stokesa*, które w obszarze piany uzupełnione są dodatkowym członem źródłowym ujmującym przepuszczalność oraz współczynnik inercji materiału komórkowego. Dyskretyzacji nie podlegają pojedyncze komórki a jedynie przestrzeń w której znajduje się piany. W takim ujęciu obszar wypełniony pianą metalową traktowany jest jako przestrzeń o pewnych zastępczych właściwościach fenomenologicznych, które wprawdzie wynikają ze struktury wewnętrznej piany, jednak nie są bezpośrednio zdefiniowane przez żadne parametry geometryczne piany, takie jak, np. średnica komórki czy kształt szkieletu. Nie można zatem określić wpływu tych i innych parametrów geometrycznych piany na zjawiska hydrodynamiczne w przestrzeni komórkowej. W tym celu konieczne jest rozpatrywanie przepływu w skali mikro z dokładnym odwzorowaniem kształtu i wymiarów szkieletu komórkowego, np. za pomocą skanowania tomograficznego [Michailidis i in., 2013]. W takiej sytuacji, z uwagi na konieczność stosowania bardzo gęstej siatki dyskretyzacyjnej, symulacja numeryczna przepływu wymaga dużej mocy obliczeniowej.

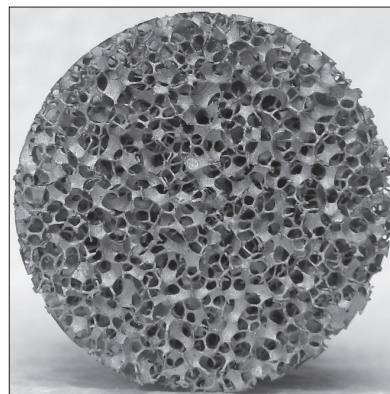
Moc obliczeniową można znacznie zmniejszyć traktując pianę metalową jako strukturę periodyczną. Modelowanie ogranicza się wtedy do analizy, reprezentatywnej dla całego układu, elementarnej objętości (REV), którą jest pojedyncza komórka. Taki sposób symulowania przepływu płynu przez piany metalowe z powodzeniem wykorzystywali [Bai i Chung, 2011; Boomsma i in., 2003]. Prace tych i innych autorów dotyczą przepływu przez piany metalowe oraz ceramiczne o podobnym szkielecie komórkowym utworzonym przez włókna prętowe.

W ramach prac własnych przeprowadzono badania mające na celu określenie możliwości wykorzystania metody REV do symulacji przepływu przez piany ze szkieletem zbudowanym z włókien płaskich.

### Symulacja przepływu

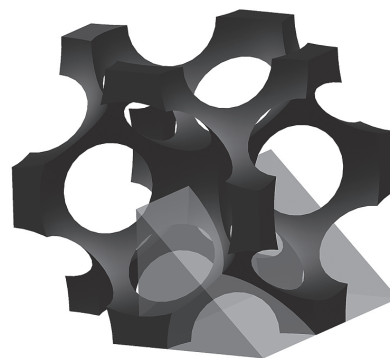
Przedmiotem analizy numerycznej był przepływ wody przez, przedstawioną na rys. 1, pianę metalową ze stopu FeCrAlY (FEC). Szkielet tej piany zbudowany jest z cienkich płytek, które częściowo zamykają komórki. Niemniej jednak wszystkie komórki są przestrzeniami przepływowymi. Wyznaczone za pomocą pomiarów mikroskopowych średni

rozmiar komórki  $d_c$  wynosi 1,58 mm a średnia grubość płytki szkieletu 0,2 mm. Zmierzona porowatość piany wynosi 91,4%.



Rys. 1. Piana FEC

W modelowaniu przepływu z wykorzystaniem reprezentatywnej elementarnej objętości kluczowe znaczenia ma model geometryczny komórki, który z uwagi na wymaganą periodyczność musi być bryłą regularną, jednocześnie możliwie wiernie odzwierciedlającą kształt rzeczywistej komórki. Strukturę pian metalowych najczęściej przybliża się za pomocą regularnych wielościanów – dodekahedronów lub tetrakaidekahedronów. Próby wykorzystania tych brył do modelowania przepływu przez pianę FEC już na wstępnym etapie prac wskazywały na konieczność poszukiwania innego modelu komórki, który lepiej oddawałby płytkowy kształt szkieletu. Ostatecznie szkielet piany odzwierciedlono za pomocą, periodycznej i izotropowej struktury geometrycznej, której podstawową komórkę przedstawia rys. 2. Ze względu na symetrię komórki względem wszystkich trzech płaszczyzn układu kartezjańskiego, wzorem *Xu i in.* [2008], analizowany obszar przepływu zawężono do 1/8 komórki. Na rys. 2 jaśniejszym kolorem przedstawiono przestrzeń komórki, która stanowi reprezentatywną dla piany FEC objętość elementarną REV obejmującą wycinek szkieletu oraz płynu wypełniającego komórkę. Dalszej analizie podlegał jedynie obszar REV.

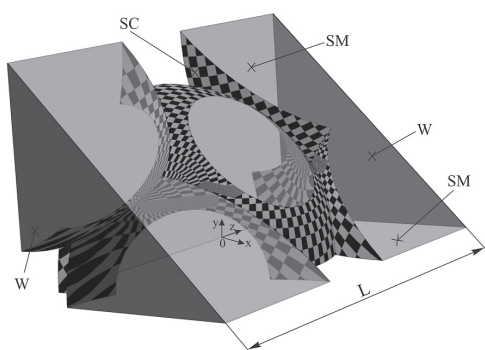


Rys. 2. Element REV na tle modelu geometrycznego komórki

Komputerowa symulację przepływu realizowano dla warunków zgodnych z przeprowadzonymi wcześniej badaniami doświadczalnymi, tzn. z zachowaniem porowatości piany, rozmiaru komórki oraz prędkości wody. Z uwagi na stosunkowo szeroki zakres zmian prędkości, przepływ symulowano w oparciu o model przepływu turbulentnego

realizable  $k - \epsilon$  z uwzględnieniem zjawisk przyściennych. Model ten dobrze oddaje zjawiska hydrodynamiczne zarówno w przypadkach przepływów z niewielkim stopniem burzliwości, jak i przy przepływach z recyrkulacją czynnika i odrywaniem się strugi w obszarach o znacznych krzywiznach i dużych gradientach prędkości.

Specyfiką modelowania przepływu przez struktury periodyczne jest brak klasycznego wlotu i wylotu płynu do i z obszaru obliczeniowego. Rolę wlotu a zarazem wylotu (płaszczyzny W na rys. 3) pełnią zewnętrzne, normalne do kierunku przepływu, płaszczyzny elementu REV. Przy przepływie wody, a więc płynu lepkiego i nieściśliwego, wartości składowych wektora prędkości są równe i powtarzalne w odstępach o długości  $L$  równej rozmiarowi elementu REV. Szkielet komórki (powierzchnie SC oznaczone szachownicą na rys. 3) potraktowano jako hydraulicznie gładki i omywany przez płyn w sposób bezpoślizgowy. Powierzchnie SM (boczna, dolna i skośna) elementu REV są płaszczyznami symetrii. Dla płaszczyzn tych przyjęto warunek *Neumanna*, zgodnie z którym gradient prędkości w kierunku normalnym do płaszczyzny symetrii ma wartość zero.



Rys. 3. Graficzna interpretacja warunków brzegowych dla elementu REV

Tak zdefiniowane warunki brzegowe powodują, że mimo modelowania przestrzennego można wyróżnić jeden główny kierunek przepływu (oś  $z$ ), co odpowiada warunkom przepływu w instalacji doświadczalnej.

### Analiza wyników

Podstawą weryfikacji wyników symulacji numerycznych były zmierzone w ramach badań doświadczalnych opory przepływu wody. Rys. 4 przedstawia porównanie oporów przepływu uzyskanych na drodze numerycznej z odpowiadającymi im oporami zmierzonymi. Średnia różnica pomiędzy wartościami oporów obliczonych  $(\Delta P/\Delta L)_{num}$  i zmierzonych  $(\Delta P/\Delta L)_{exp}$  wynosi  $\delta(\Delta P) = 4,7\%$ .

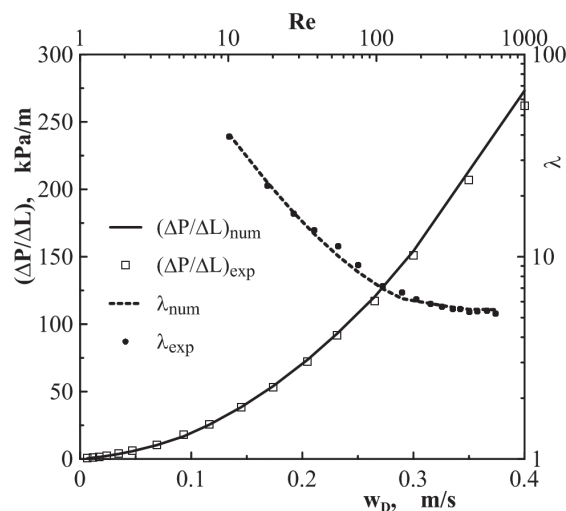
Wyniki numeryczne poprawnie oddają również krzywoliniowy charakter zmian oporów przepływu. Jest to typowy przebieg tej wielkości dla przepływów w ośrodkach porowatych wykraczających poza reżim laminarny. Występowanie różnych reżimów przepływu potwierdza również przebieg liczby oporu  $\lambda_{exp}$  (Rys. 4). Parametr ten wyznaczono za pomocą równania (1) w oparciu o zmierzone opory przepływu. Jako wymiar charakterystyczny dla przepływu przez spieniony materiał przyjęto rozmiar komórki  $d_c$ .

$$\lambda_{exp(num)} = \frac{2 \left( \frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{exp(num)} d_c}{w_f \rho_f} \quad (1)$$

W przypadku przepływów z najmniejszymi prędkościami, liczba oporu zmniejsza się liniowo (w układzie podwójnie logarytmicznym) wraz ze wzrostem liczby *Reynoldsa* (równ. (2)), co odpowiada przepływowi laminarnemu *Darcy'ego*.

$$Re = \frac{w_f d_c \rho_f}{\epsilon \eta_f} \quad (2)$$

Część krzywoliniowa odzwierciedla zakres przepływu przejściowego kiedy to przy wzrastającej prędkości, w przepływie pojawiają się zaburzenia spowodowane rosnącymi siłami bezwładności. W zakresie przepływów opisanych największymi liczbami *Reynoldsa*, liczba oporu



Rys. 4. Przebieg zmian oporów przepływu oraz liczby oporu

ma wartość praktycznie stałą, co jest charakterystyczne dla przepływów w pełni burzliwych.

O występowanie różnych reżimów przepływu może również świadczyć rozkład prędkości wody. W przypadku przepływów bardzo małych strumieni wody profil prędkości w płaszczyźnie osiowej komórki ma, typowy dla przepływów laminarnych, kształt paraboliczny z wartością maksymalną w osi komórki. Przy wzroście strumienia wody przy ściankach szkieletu komórki pojawiają się zawirowania wody, zmienia się kierunek i zwrot wektora prędkości lokalnej. Obszary, w których widoczne są lokalne zaburzenia przepływu zwiększają się wraz ze wzrostem strumienia wody, a przepływ w coraz większym stopniu nabiera cech przepływu burzliwego.

### Wnioski

Mimo złożonej struktury geometrycznej pian metalowych możliwa jest numeryczna analiza przepływu przez tego typu materiały w oparciu o niewymagający dużych mocy obliczeniowych, uproszczony periodyczny model komórki. Ze względu na różnice w budowie geometrycznej poszczególnych rodzajów pian, konieczne jest opracowanie specyficznego dla danego materiału modelu geometrycznego komórki. Symulację numeryczną przepływu można ograniczyć do obszaru obejmującego zaledwie 1/8 część modelu komórki, co czyni ten rodzaj analizy numerycznej, przydatnym w praktyce inżynierskiej narzędziem, pozwalającym uzyskać dane dotyczące hydrodynamiki przepływu.

Wyznaczone na drodze numerycznej opory przepływu różnią się jedynie o kilka procent od odpowiadającym im wartościom zmierzonym. Uzyskane numerycznie pole prędkości wprawdzie nie oddaje wiernie rozkładu prędkości w przestrzeni komórkowej piany (model komórki ma geometrię inną niż rzeczywista piana), jednak umożliwia zaobserwowanie zmian jakościowych w przepływie świadczących np. o zmianie reżimu przepływu.

### LITERATURA

- Michailidis N., Stergioudi F., Omar H., Missirlis D., Vlahostergios Z., Tsipis S., Albanakis C., Granier B., 2013. Flow, thermal and structural application of Ni-foam as volumetric solar receiver *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **109**, 185-191. DOI: 10.1016/j.solmat.2012.10.021
- Bai M., Chung J.N., 2011. Analytical and numerical prediction of heat transfer and pressure drop in open-cell metal foams *Int. J. Thermal Sci.*, **50**, 869-880. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2011.01.007
- Boomsma K., Poulikakos D., Ventikos Y., 2003. Simulations of flow through open cell metal foams using an idealized periodic cell structure *Int. J. Heat Fluid Flow*, **24**, 825-834. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2003.08.002
- Xu W., Zhang H., Yang Z., Zhang J., 2008. Numerical investigation on the flow characteristics and permeability of three-dimensional reticulated foam materials, *Chem. Eng. J.*, **140**, 562-569. DOI:10.1016/j.cej.2007.12.010

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