MARCIN PIĄTEK[1], ANNA GANCARCZYK[1], MARZENA IWANISZYN[1], MIECZYSŁAW JAROSZYŃSKI[1], BOŻENA JANUS[1], ROMAN PĘDRYS[2], TADEUSZ KLESZCZ[1], JOANNA KRYCA[1], FRANCISZEK OWCZAREK[1], ANDRZEJ KOŁODZIEJ[1]

PARAMETRY MORFOLOGICZNE I WSPÓŁCZYNNIKI TRANSPORTOWE SZKLISTYCH PIAN WĘGLOWYCH (RVC)

1 - Instytut Inżynierii Chemicznej PAN Gliwice, ul. Bałtycka 5, 44-100 Gliwice
2 - Uniwersytet Jagielloński, Instytut Fizyki, ul. Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków

W pracy przedstawiono parametry morfologiczne oraz współczynniki transportowe dla szklistych pian węglowych (RVC) o gęstości porów wynoszącej 30 i 80 PPI. Parametry morfologiczne pian określono za pomocą mikrotomografu SkySkan 1172. Współczynniki wnikania ciepła wyznaczono ogrzewając pianę przepływającym przez nią prądem elektrycznym. Współczynniki wnikania masy wyznaczono w oparciu o analogię Chiltona-Colburna.

In this paper, the morphological parameters and transport coefficients are studied for the reticulated vitreous carbon (RVC) foams of pore density 30 and 80 PPI. SkySkan 1172 X-ray microtomograph was used to study the foam structure. Heat transfer coefficients were determined by foam heating by electric current flowing directly through it. Mass transfer coefficients were determined based on the Chilton-Colburn analogy.

1. WPROWADZENIE

Szklista piana węglowa (*reticulated vitreous carbon* (*RVC*) *foam*) o otwartej strukturze porów postrzegana jest jako ultralekki materiał charakteryzujący się dużą odpornością chemiczną oraz małą wartością współczynnika rozszerzalności cieplnej. W warunkach nieutleniających piany te mogą pracować w bardzo wysokich temperaturach (do ok. 3500ºC). Ze względu na unikalne właściwości tych pian, znalazły one liczne zastosowania w lotnictwie oraz w przemyśle, między innymi jako materiały izolacyjne, pochłaniacze energii, ogniwa paliwowe, testowane są również w medycynie jako implanty kości [1,2]. Biorąc pod uwagę dużą powierzchnię właściwą pian węglowych oraz ich znaczną porowatość (ok. 97%), piany te rozpatrywane są również jako nośniki katalizatorów w reaktorach wielofazowych [3].

Niezależnie od sposobu zastosowania piany stałej, kluczowa jest znajomość jej parametrów morfologicznych (porowatość, powierzchnia właściwa, średnica porów i mostków), które mają duży wpływ zarówno na hydrodynamikę (opory przepływu, zawieszenie cieczowe) jak również na współczynniki transportu masy i ciepła pian. Ponadto, znajomość ich jest niezbędna do wyznaczenia bezwymiarowych liczb kryterialnych (np. Reynoldsa, Nusselta, Schmidta, Sherwooda), stosowanych w modelach matematycznych opisujących pracę reaktorów. Struktura pian zwykle opisywana jest za pomocą gęstości porów (*pore per inch*, PPI) podawanej przez producenta. Wartość ta może wahać się od 10 do nawet 100. Większa wartość PPI oznacza równocześnie większą powierzchnię właściwą piany, jednak zależność ta niekoniecznie jest proporcjonalna. Również zależność pomiędzy wartością PPI a porowatością piany jest bardziej złożona. Parametry morfologiczne pian zależą w dużym stopniu od materiału, z którego są one wykonane, jak również technologii produkcji. Przykładowo, średnice porów pian ceramicznych i metalowych o identycznej wartości PPI porów różnią się znacznie [4].

W celu wyznaczenia parametrów morfologicznych pian stałych stosuje się obecnie kilka technik. Najbardziej zaawansowane metody to: mikrotomografia komputerowa (μ-CT) oraz obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego (MRI). Za pomocą mikroskopii optycznej lub elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) można wyznaczyć średnice porów i mostków, natomiast piknometria helowa pozwala wyznaczyć porowatość piany stałej z zależności [5]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_p}{\rho_{sp} V_p} \tag{1}$$

Do matematycznego opisu struktury przestrzennej pian zwykle wykorzystywane są tzw. modele „piłki futbolowej" (dodecahedron, tetrakaidecaherdon) lub prosty model sześcienny (cubic cell, CC). Przegląd i opis dostępnych modeli zamieścili w swojej pracy Gibson i Ashby [6].

Celem prezentowanej pracy było wyznaczenie parametrów morfologicznych piany stałej (szklista piana węglowa) metodą mikrotomografii komputerowej oraz parametrów transportowych (współczynniki transportu ciepła i masy).

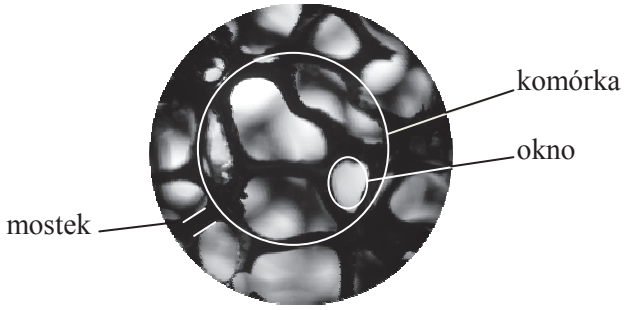
2. METODYKA POMIARÓW

2.1. MORFOLOGIA SZKLISTYCH PIAN WĘGLOWYCH

W badaniach wykorzystano szkliste piany węglowe (ERG Materials and Aerospace Corp., Emeryville, USA) o różnej gęstości porów: 30 i 80 PPI (rys. 1), określanych w dalszej części pracy odpowiednio jako C-30 i C-80.

Parametry morfologiczne pian (średnicę porów, średnicę mostków, porowatość, powierzchnię właściwą) uzyskano przy użyciu mikrotomografu SkyScan 1172 (Aarselaar, Belgia) o mocy lampy rentgenowskiej 8 W i maksymalnym napięciu 80 keV. Z punktu widzenia tej metody pomiarowej, piany węglowe należą do materiałów

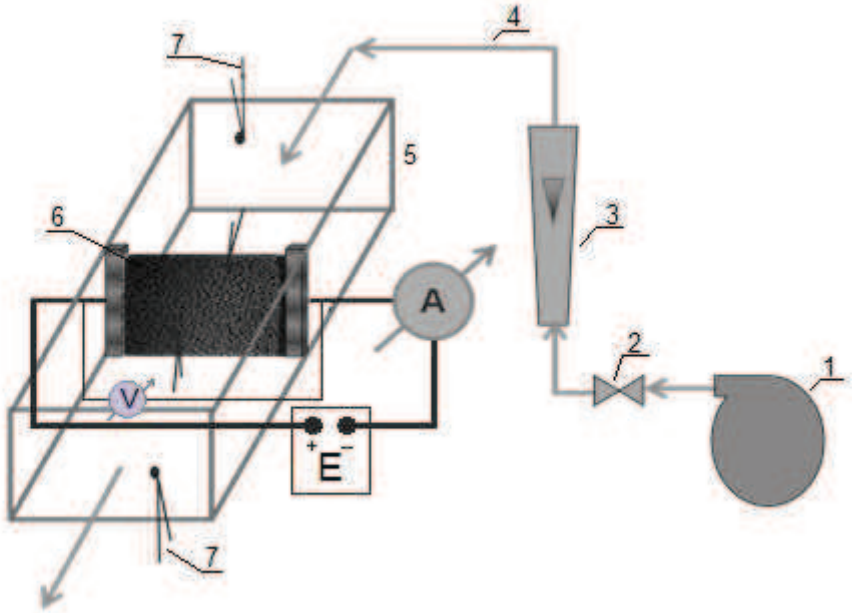
stwarzających szereg trudności eksperymentalnych. Jest to związane z małą wartością liczby atomowej tego pierwiastka. Należało zatem zwrócić uwagę na staranny dobór parametrów pracy aparatu, które zapewniłyby optymalny czas pomiaru oraz wysoką jakość otrzymanych wyników. W przypadku pian węglowych użyto zatem energii dwukrotnie niższej od maksymalnej. Wynikało to z małej liczby atomowej (Z=6), którą charakteryzują się atomy węgla. W efekcie przez niski liniowy współczynnik osłabienia badane próbki były niemal niewidoczne przy maksymalnej energii 80 keV. Obniżenie energii do 40 keV spowodowało większe pochłanianie wiązki w materiale piany i poprawiło kontrast oraz stosunek sygnału do szumu na obrazie projekcji. Ponadto, w odróżnieniu od pian metalowych (np. NiCr), piany węglowe badane były z ponad trzykrotnie większą rozdzielczością (wielkość piksela wynosiła ok. 3 μm). Zastosowanie wielkości piksela ~10 μm (jak to miało miejsce w przypadku np. piany chromoniklowej) prowadziłoby do reprezentowania średnicy mostków jedynie przez trzy piksele. Zrekonstruowane projekcje nie pozwalałyby w takim wypadku na wykonanie precyzyjnych obliczeń parametrów morfologicznych dla pian węglowych.



Rys. 1. Obraz szklistej piany węglowej 30 PPI w optycznej mikroskopii cyfrowej
Fig. 1. Optical digital microscope image of RVC 30 PPI foam

2.2. TRANSPORT CIEPŁA I MASY

Eksperymenty zostały przeprowadzone w laboratoryjnym reaktorze o przekroju prostokątnym, o wymiarach 45x30 mm. Schemat instalacji badawczej przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat instalacji badawczej: E – źródło prądu elektrycznego; 1 – dmuchawa; 2 – zawór; 3 – rotametr; 4 – przewód gumowy; 5 – reaktor; 6 – badana piana; 7 – termopary

Fig. 2. Scheme of the experimental set-up: E – electric power generation system; 1 – blower; 2 – valve; 3 – rotameter; 4 – rubber wire; 5 – reactor; 6 – foam sample; 7 – thermocouples

Powietrze do reaktora tłoczone było dmuchawą. W zależności od rodzaju piany (gęstości porów) uzyskano maksymalne prędkości gazu wynoszące 10,9-14,9 $m \cdot s^{-1}$. Natężenie przepływu powietrza mierzono za pomocą rotametrów. Stosowano piany dopasowane do wewnętrznych wymiarów reaktora, wypełniające w pełni przekrój poprzeczny, wymiar w kierunku przepływu powietrza (grubość piany) wynosił 5 mm. Badane piany były ogrzewane prądem elektrycznym o maksymalnym natężeniu 5,5 A. Do pomiaru temperatur przepływającego powietrza oraz powierzchni piany użyto kilku termopar typu K. Termopary o średnicy 0,05 mm przyklejono do powierzchni piany za pomocą kleju, który zapewniał doskonałą izolację elektryczną i dobre przewodnictwo cieplne.

Rozważając modelowanie reaktorów wypełnionych materiałem o wysokiej porowatości, jak np. siatki metalowe czy piany stałe, stosowane są dwa podejścia: opływ ciała stałego lub przepływ przez kapilarę. Biorąc po uwagę budowę pian stałych, do modelowania reaktora użyte zostało drugie podejście.

Współczynniki wnikania ciepła obliczono na podstawie średniej logarytmicznej różnicy temperatur pomiędzy powierzchnią piany i przepływającym strumieniem powietrza. Otrzymane wyniki opisano równaniem:

$$Nu = C\,\mathrm{Re}^{A}\,\mathrm{Pr}^{B} \tag{2}$$

gdzie liczbę Reynoldsa zdefiniowano z wykorzystaniem rzeczywistej prędkości gazu ($w=w_0/\varepsilon$) i średniej średnicy porów d_p:

$$\mathrm{Re} = \frac{w_0 d_p \rho}{\varepsilon \eta} \tag{3}$$

Badania transportu masy nie zostały przeprowadzone. Jednak, wykorzystując analogię Chiltona-Colburna dla przepływu laminarnego (Re<2100) [7] możliwe jest wyznaczenie współczynników transportu masy:

$$j^H = St^H \,\mathrm{Pr}^{\frac{2}{3}} = \frac{Nu}{\mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}^{\frac{1}{3}}} = j^M = St^M Sc^{\frac{2}{3}} = \frac{Sh}{\mathrm{Re}\,Sc^{\frac{1}{3}}} \tag{4}$$

co można sprowadzić do relacji:

$$\frac{Sh}{Nu} = \frac{Sc^{1/3}}{\mathrm{Pr}^{1/3}} \tag{5}$$

W pracy błąd średni mierzonych wartości był obliczany z zależności:

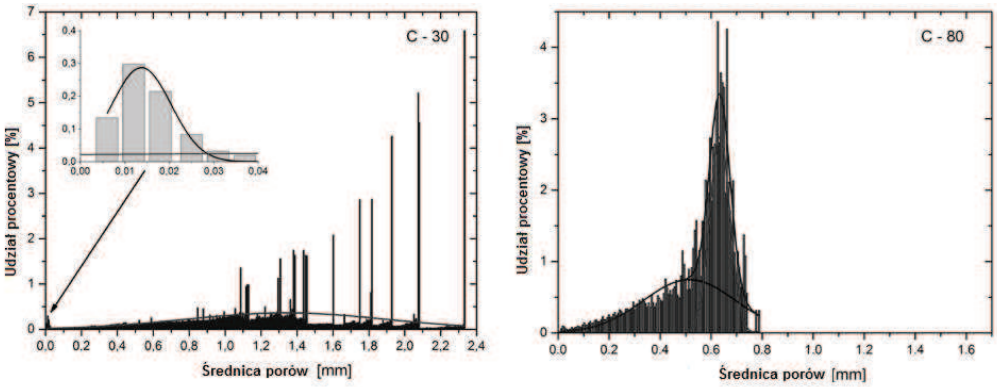
$$e_m = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{x_{\exp-i} - x_{obl-i}}{x_{obl-i}}\right| = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} e_i \tag{6}$$

3.WYNIKI BADAŃ

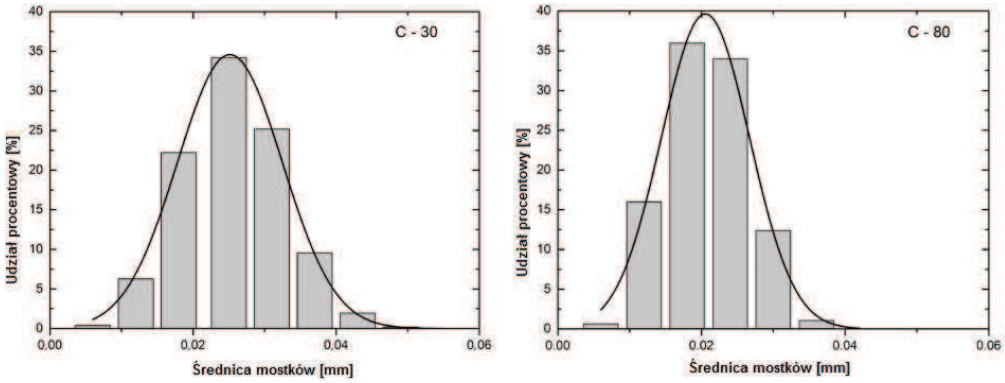
3.1. MORFOLOGIA

Przy rekonstrukcji struktury pian została wykorzystana tzw. metoda globalnego progowania (GT). Otrzymany rozkład średnic porów dla obu badanych pian węglowych przedstawiono na rys. 3. Otrzymane rozkłady posiadają własne indywidualne cechy: dla piany C-30 można zauważyć szereg pojedynczych pików po stronie dużych wartości średnic i względnie dobrze określony rozkład po stronie małych wymiarów. W pianie tej dominują pory o dużych średnicach, większych od 1,2 mm. Dla piany o gęstości 80 PPI można zauważyć dobrze określone rozkłady zarówno po stronie małych jak i po stronie dużych wymiarów. Jednak, w tym przypadku zakres dużych średnic mieści się w zakresie 0,5-0,7 mm. Tym samym redukcja wymiarów porów ze wzrostem PPI jest wyraźnie widoczna. W przeciwieństwie do rozkładów porów, otrzymane rozkłady średnic mostków dla obu badanych pian są bardzo podobne, co przedstawiono na rys. 4. Dotyczy to zarówno zakresu rejestrowanych średnic, jak też położenia maksimów. Wyjątkowość szklistych pian węglowych polega zatem na nie-

mal identycznym rozmiarze szkieletu. Parametry morfologiczne badanych pian zostały zestawiono w Tabeli 1.



Rys. 3. Rozkłady średnicy porów pian węglowych
Fig. 3. Structure separation of RVC foams

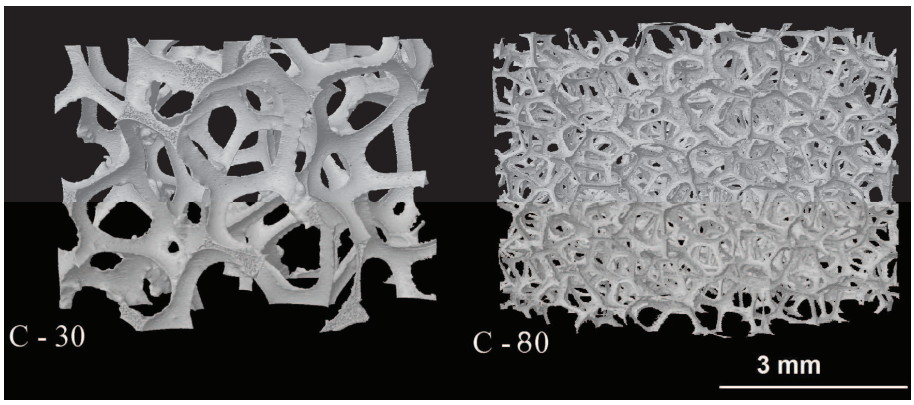


Rys. 4. Rozkłady średnicy mostków pian węglowych
Fig. 4. Structure thickness of RVC foams

Tabela 1. Parametry pian węglowych
Table 1. Parameters of RVC foams

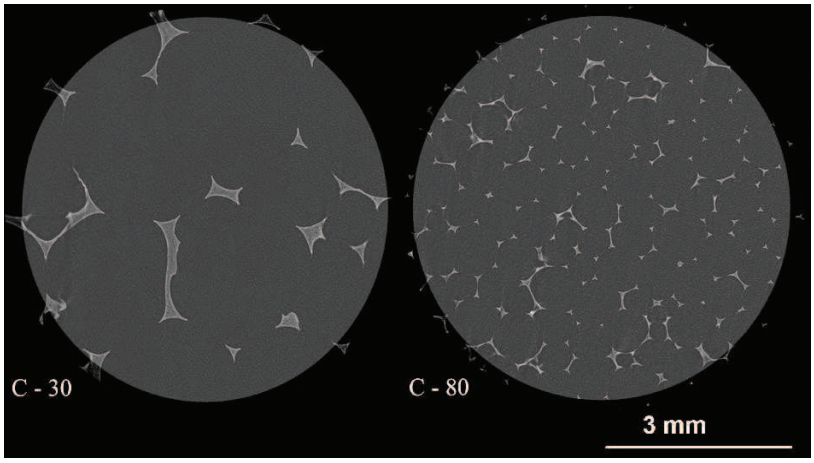
Piana	30 PPI	80 PPI
Średnia średnica porów, d_p, mm	1,43	0,55
Średnia średnica mostków, d_m, mm	0,02	0,02
Porowatość, ε	0,97	0,97
Powierzchnia właściwa, a, m^{-1}	3122	4130

Na podstawie pomiarów otrzymanych metodą μ-CT wykonano trójwymiarową rekonstrukcję badanych pian węglowych. Przykład takiej rekonstrukcji przedstawiono rys. 5.



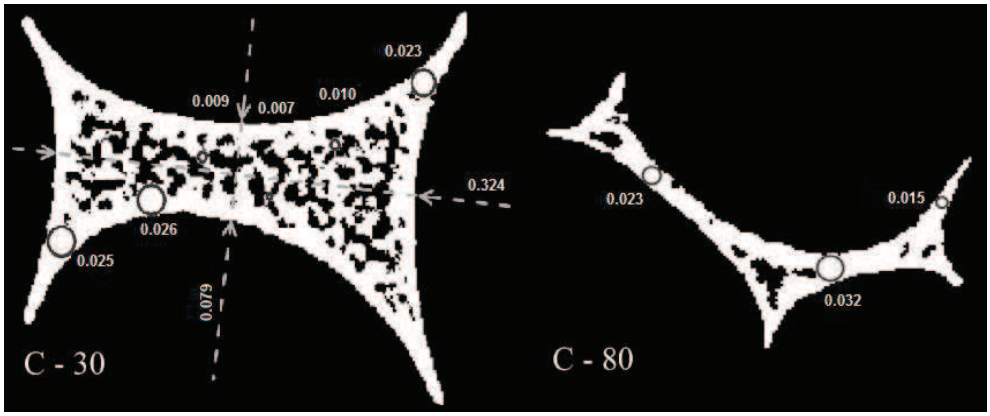
Rys. 5. Trójwymiarowa wizualizacja pian węglowych 30 oraz 80 PPI
Fig. 5. 3-D visualization of RVC 30 and 80 PPI foams

Szkielet piany węglowej składa się z sieci połączonych ze sobą mostków o cienkich, wklęsłych powierzchniach ograniczonych ostrymi, nieregularnymi krawędziami. W węzłach, tj. miejscach połączeń mostków, nie obserwowano pogrubienia materiału, charakterystycznego dla pian wykonanych z innych materiałów. Stwierdzono również, że krawędzie szkieletu są wyraźnie „postrzępione". Analizując otrzymane obrazy przekrojów poprzecznych pian (rys. 6) wyraźnie widać, że rozmiar szkieletu piany ulega zmianie wraz ze zmianą gęstości porów. Nie znalazło to jednak odzwierciedlenia w otrzymanych rozkładach średnic mostków (rys. 4).



Rys. 6. Przykładowe przekroje poprzeczne pian węglowych 30 oraz 80 PPI
Fig. 6. Exemplified of cross-sections of RVC 30 and 80 PPI foams

Dopiero dokładna analiza otrzymanego obrazu szkieletu piany przy odpowiednim powiększeniu, co pokazano na rys. 7, oraz otrzymanych rozmiarów mostków pozwoliła na wyjaśnienie tego zjawiska.



Rys. 7. Fragmenty mostków pian węglowych 30 i 80 PPI po rekonstrukcji. Linią przerywaną oznaczono wymiary mostka, a okręgami przykładowe przekroje sfer wykorzystywanych do wyznaczenia rozkładu średnic mostków (structure thickness). Wszystkie wymiary na rysunku 7 podane są w milimetrach
Fig. 7. Fragments of the struts of RVC 30 and 80 PPI foams after reconstruction. The dotted line shows the dimensions of the strut, and spheres sectional sample used to determine the diameter distribution of strut (structure thickness). All dimensions in Figure 7 are given in millimeters

Można zauważyć, że przekrój poprzeczny mostków piany węglowej uwidacznia tzw. „gąbczastą strukturę". Wyraźnie widać, że dla piany C-30 ta „gąbczasta struktura" rozciąga się wzdłuż całej długości mostka. W pole mostka można zatem wpisać tylko kręgi o średnicach co najwyżej rzędu setnych części mm. Należy zatem stwierdzić, że rozkład średnic mostków przedstawiony na rys. 4 nie odzwierciedla rzeczywistych zewnętrznych (poprzecznych) wymiarów mostków ze względu na obecność wewnętrznej struktury z licznymi porami. Oszacowanie ich rozmiarów wynika z rozkładu średnic porów piany (rys. 3) z wyeksponowaną częścią rozkładu dla najmniejszych średnic. Ta część rozkładu reprezentuje wymiary małych porów wnętrza mostka. Jak widać, wymiary te są rzędu 0,01 mm. Wielkość ta jest zgodna z wymiarami, które otrzymano na podstawie rys. 7.

Ilość wewnętrznych porów w mostku piany C-80 jest dużo mniejsza, stąd rozkład średnic mostków (rys. 4) zawiera częściowo wartości związane z ich zewnętrznymi, poprzecznymi wymiarami (okręgi na rysunku dla C-80). Zatem średnice mostków otrzymane metodą mikrotomografii komputerowej należy zweryfikować inną metodą pomiarową.

3.2. MODELOWANIE STRUKTURY PRZESTRZENNEJ

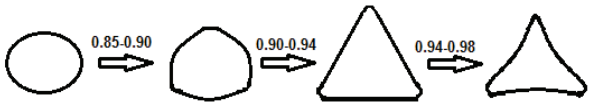
Struktura przestrzenna pian stałych opisywana jest najczęściej za pomocą dwóch modeli przestrzennych: modelu sześciennego (ang. cubic cell, CC) oraz modelu tetrakaidekahedronalnego (ang. tetrakaidecahedron, TTKD) z jego licznymi modyfikacjami. Podstawowe modele przedstawiono schematycznie na rys. 8.

Model sześcienny Model tetrakaidekahedronalny

Rys. 8. Modele opisujące strukturę przestrzenną pian stałych

Fig. 8. Models describing spatial structure of solid foams

Analizując rzeczywistą przestrzenną budowę piany węglowej (rys. 1) można zauważyć, że jest ona bardziej zbliżona do modelu TTKD, natomiast kształt mostków jest zbliżony do hipocykloidy (deltoidy) Steinera (ang. *concave triangular strut* [8]). Jest to zgodne z wnioskami przedstawionymi w pracy Bhattacharya i wsp. [9], którzy stwierdzili, że przekrój poprzeczny mostków zależy od porowatości piany stałej i zmienia się od okrągłego do trójkątnego, wg zależności przedstawionej na rys. 9.



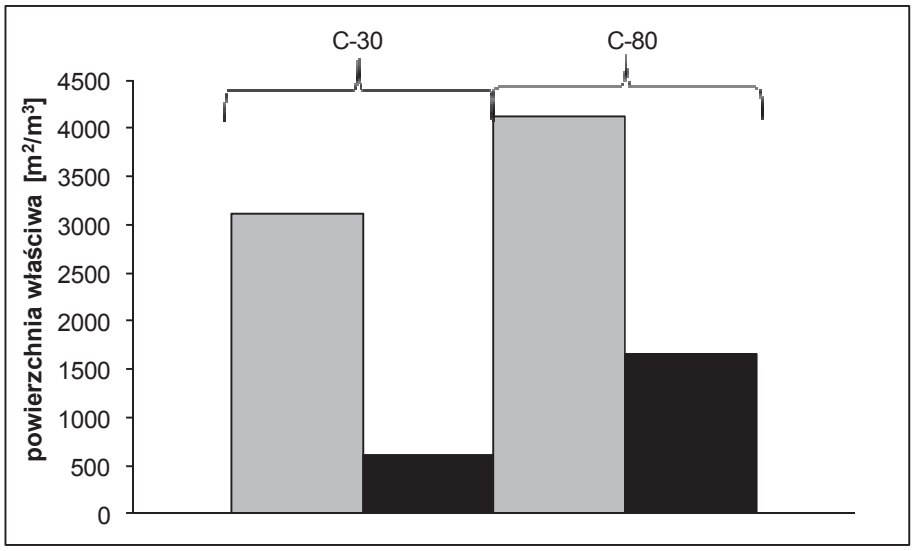
Rys .9. Kształt przekroju poprzecznego mostka w zależności od porowatości piany stałej.

Fig. 9. Cross-sectional shape of the strut according to the porosity of the solid foam.

Biorąc pod uwagę cechy charakteryzujące pianę węglową, spośród dostępnych w literaturze modeli wybrano model zaproponowany przez Inayata i wsp. [8], który, w oparciu o model tetrakaidekahedronalny, zmodyfikowany został w zależności od kształtu mostka. Dla mostka o przekroju hipocykloidy Steinera, powierzchnia właściwa piany wyrażona jest wówczas zależnością:

$$a = 6{,}49\frac{\left[1-0{,}971\left(1-\varepsilon\right)^{0,5}\right]}{d_o\left(1-\varepsilon\right)^{0,5}}\left(1-\varepsilon\right) \tag{7}$$

Porównanie powierzchni właściwej wyznaczonej w oparciu o badania mikrotomograficzne oraz obliczonej na podstawie równania (7) przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Porównanie powierzchni właściwej eksperymentalnej (wyznaczonej z μ-CT) (szare) i obliczonej na podstawie równania (7) (czarne) dla pian węglowych 30 i 80 PPI

Fig. 10. Comparison of the experimental (from μ-CT) (gray) and calculated from the equation (7) (black) specific surface area for the 30 and 80 PPI RVC foams

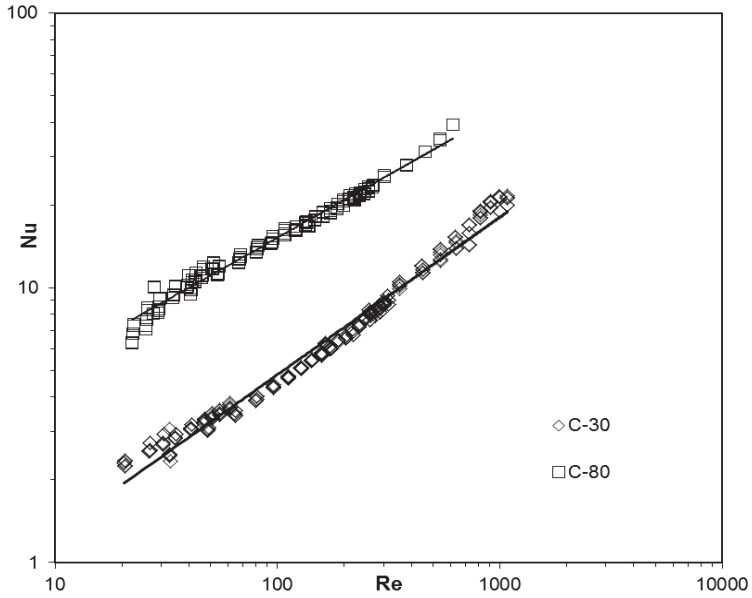
Tak duże rozbieżności pomiędzy otrzymanymi wynikami można tłumaczyć tym, że w równaniu (7), jako parametr charakterystyczny, brana jest pod uwagę średnica okien. W oparciu o badania tomograficzne możliwe jest wyznaczenie średniej średnicy porów (okna + komórki), a zatem wartości większej w porównaniu do średnicy okien. Ponieważ wartość ta występuje w mianowniku, powoduje to zaniżenie wartości obliczanej powierzchni właściwej. W celu weryfikacji poprawności rozpatrywanego modelu [9], konieczne jest zatem wyznaczenie średnicy okien za pomocą innych metod, np. metodą mikroskopii optycznej.

Wyniki wnikania ciepła dla pian węglowych zebrano w tab. 2.

Tabela 2. Korelacja transport ciepła dla pian węglowych
Table 2. Heat transfer correlation of RVC foams

Piana	30 PPI	80 PPI
Ilość punktów pomiarowych	239	168
Korelacja	$Nu = 0{,}38\,\mathrm{Re}^{0{,}573}\,\mathrm{Pr}^{1/3}$	$Nu = 2{,}07\,\mathrm{Re}^{0{,}457}\,\mathrm{Pr}^{1/3}$
Błąd średni/maksymalny, e,%	5,4/18,3	3,8/20,9
Współczynnik determinacji R^2	0,98	0,98

Rys. 11 przedstawia otrzymane wyniki eksperymentalne wraz z opracowanymi korelacjami w zależności od liczby Reynoldsa.



Rys. 11. Wnikanie ciepła dla pian węglowych– zależność liczby Nusselta od liczby Reynoldsa
Fig. 11. Heat transfer for RVC foams– Nusselt number vs. Reynolds number

Można zauważyć, że ze wzrostem wartości PPI, a zatem i powierzchni właściwej piany weglowej, rośnie liczba Nusselta. Również wzrost prędkości przepływającego gazu intensyfikuje transport ciepła. Stosując analogię Chiltona-Colburna dla przepływu laminarnego, omówioną w pracy Iwaniszyn i wsp. [7], otrzymano równanie dla transportu masy dla piany C-30:

$$Sh = 0{,}38\,\mathrm{Re}^{0{,}573}\,Sc^{1/3} \tag{8}$$

oraz dla piany C-80:

$$Sh = 2{,}07\,\mathrm{Re}^{0{,}457}\,Sc^{1/3} \tag{9}$$

WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów parametrów morfologicznych szklistych pian węglowych o gęstości porów 30 i 80 PPI oraz podjęto próbę wyznaczenia ich powierzchni właściwej za pomocą modelu matematycznego. Jednak zaprezentowane wyniki badań tomograficznych ukazują specyficzną strukturę wnętrza mostków pian węglowych, która wynika najprawdopodobniej z metody produkcji tych pian. Wynika stąd, że rozkłady średnic mostków otrzymane tą metodą pomiarową mogą być w różnym stopniu, w zależności od wartości PPI, zafałszowane. Dlatego należy do nich podchodzić z jak największą ostrożnością.

Zaproponowano korelacje opisujące transport ciepła i masy dla badanych pian węglowych, które z dobrą dokładnością opisują dane eksperymentalne.

OZNACZENIA - SYMBOLS

a	– powierzchnia właściwa, $a=P_o\,O_o^{-1}$, m^{-1} specific surface area
A	– pole przekroju poprzecznego próbki, m^2 cross section of the sample
d_m	– średnia średnica mostków, m average struts diameter
d_o	– średnia średnica okna, m average window diameter
d_p	– średnia średnica porów, m average pores diameter
m_p	– masa próbki piany, kg mass of the foam sample
Nu	– liczba Nusselta, $Nu=\alpha\,dp\,\lambda^{-1}$ Nusselt number
O_o	– objętość zrekonstruowanego obiektu, mm^3 volume of reconstructed object inside VOI
P_o	– powierzchnia zrekonstruowanego obiektu wewnątrz objętości próbki, mm^2 surface of reconstructed object inside VOI
Pr	– liczba Prandtla, $Pr=c_p\,\eta\,\lambda^{-1}$ Prandtl number
Re	– liczba Reynoldsa, $Re=w_0\,d_p\,\rho\,\eta^{-1}$

Reynolds number

Sc – liczba Schmidta, $Sc=\eta\ \rho^{-1}\ D_A^{-1}$
Schmidt number

Sh – liczba Sherwooda, $Sh=k_C\ d_p\ D_A^{-1}$
Sherwood number

w – prędkość rzeczywista płynu, m s^{-1}
interstitial fluid velocity

w_0 – prędkość średnia płynu (liczona na przekrój pustego aparatu), m s^{-1}
superficial fluid velocity

V_p – objętość próbki piany, m^3
volume of the foam sample

α – współczynnik wnikania ciepła, W m^{-2} K^{-1}
heat transfer coefficient

ε – wolna objętość
void volume

η – dynamiczny współczynnik lepkości, Pa s
dynamic viscosity

λ – współczynnik przewodzenia ciepła, $Wm^{-1}K^{-1}$
thermal conductivity

ρ – gęstość, kg m^{-3}
density

ρ_{sp} – gęstość objętościowa szkieletu, kg m^{-3}
density of the solid material

INDEKSY DOLNE I GÓRNE – SUBSCRIPTS AND SUPERSCRIPTS

exp – wartość eksperymentalna
experimental

obl – wartość z korelacji
correlation

PIŚMIENNICTWO CYTOWANE - REFERENCES

[1] HTTP://WWW.ERGAEROSPACE.COM.

[2] GALLEGO N.G., KLETT J.W., *Carbon foams for thermal management*. Carbon, 2003, 41, 1461.

[3] WENMAKERS P.W.A.M., VAN DER SCHAAF J., KUSTER B.F.M., SCHOUTEN J.C., *Enhanced liquid–solid mass transfer by carbon nanofibers on solid foam as catalyst support*. Chem. Eng. Sci., 2010, 64, 247.

[4] DIETRICH B., *Pressure drop correlation for ceramic and metal sponges*. Chem. Eng. Sci, 2012, 74, 192.

[5] Dietrich B. Garrido G., Habisreuther P. et al., Morphological Characterization of Ceramic Sponges for Applications in Chemical Engineering, Ind. Eng. Chem. Res., 2009, 48, 10395.

[6] GIBSON L.J., ASHBY M.F., *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.

[7] IWANISZYN M., JAROSZYŃSKI M., OCHOŃSKA J., ŁOJEWSKA J., KOŁODZIEJ A., *Heat and mass transfer analogy: discussion of the problem*. Prace Naukowe IICH PAN, 2011, 15, 37.

[8] INAYAT A., FREUND H., ZEISER T., SCHWIEGER W., *Determining the specific surface area of ceramic foams: The tetrakaidecahedra model revisited,* Chem. Eng. Sci. 2011, 66, 1179.

[9] BHATTACHARYA A., CALMIDI V.V., MAHAJAN R.L., *Thermophysical properties of high porosity metal foams*, Int. J. Heat Mass Transf., 2002, 45, 1017.

MARCIN PIĄTEK, ANNA GANCARCZYK, MARZENA IWANISZYN, MIECZYSŁAW JAROSZYŃSKI, BOŻENA JANUS, ROMAN PĘDRYS, TADEUSZ KLESZCZ, JOANNA KRYCA, FRANCISZEK OWCZAREK, ANDRZEJ KOŁODZIEJ

MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS AND TRANSPORT COEFFICIENTS FOR RETICULATED VITREOUS CARBON (RVC) FOAMS

In this paper, the study on morphological parameters for RVC foams (pore density of 30 and 80 PPI called C-30 and C-80) is presented. The dimension distribution of the pore (Fig. 3) and strut (Fig. 4) were obtained using the X-ray microtomography (μ-CT). The pore distributions differ significantly for the foams of various pore density, however, the distributions of the struts dimensions are similar for both foams tested (C30 and C-80). Detailed analysis of the tomographic images showed specific inner structure of the RVC foams: the strut's interior porous (including many macro-pores) (Fig. 7), which probably results from the production method applied. This phenomenon leads to falsification of the obtained results (strut dimension).

The model proposed by Inayat et al. [2011] was selected for description of the foam specific surface area. The model belongs to the so-called "football models" class (Fig. 8). Starting from the basic tetrakaidecahedron model, the authors have modified it depending on the shape of the strut (and hence the porosity of the foam). The characteristic morphological parameter used by the authors was diameter of the window. However, based on the μ-CT method, the average diameter of the pore (combination of the cell and window diameters), is obtained. Therefore, a satisfactory agreement of the results was not achieved (Fig. 10).

In the next section, the results of the heat transfer measurements are gathered. The experimental set-up is presented in Fig. 2. The experimental results are shown in Fig. 11 in terms of Nusselt vs. Reynolds number together with the correlations derived. The correlations are summarized in Table 2, together with the estimation of their accuracy. Equations describing the mass transfer coefficients for C-30 and C-80 foams (Eq. 8 and 9) were obtained by means of Chilton-Colburn analogy.

In the conclusion, one can say that the application of the μ-CT method to determine the morphological parameters of the RVC foams should be used with a special care. Selection of the geometric parameters should be confirmed by another, alternative experimental method.