

MARCIN PIĄTEK, MARZENA IWANISZYN, MIECZYŚLAW JAROSZYŃSKI,  
BOŻENA JANUS, TADEUSZ KLESZCZ, ANNA GANCARCZYK

## WPLYW STRUKTURY MORFOLOGICZNEJ PIAN NA TRANSPORT CIEPŁA

Instytut Inżynierii Chemicznej PAN Gliwice, ul. Bałtycka 5, 44-100 Gliwice

Piany metalowe są obiecującym nośnikiem katalizatorów dla szybkich procesów katalitycznych. Posiadają one wiele interesujących właściwości, z których najważniejsze to duża powierzchnia właściwa, duża wolna objętość (porowatość) oraz stosunkowo małe opory przepływu. Piany można traktować jako rozwiązanie pośrednie pomiędzy monolitami a złożem ziaren. W artykule przedstawiono wyniki badania wnikania ciepła dla piany chromoniklowej NC 2733 oraz trzech pian aluminiowych o różnej gęstości porów.

Metallic foams appear as promising catalyst carriers for fast catalytic reactions. They combine many beneficial properties, like large specific surface area, high porosity and relatively low pressure drop. The foams can be regarded as an intermediate between monolith and packed bed. In this paper, the heat transfer characteristic were studied for a 30 pores per inch NC 2733 and three Al foams.

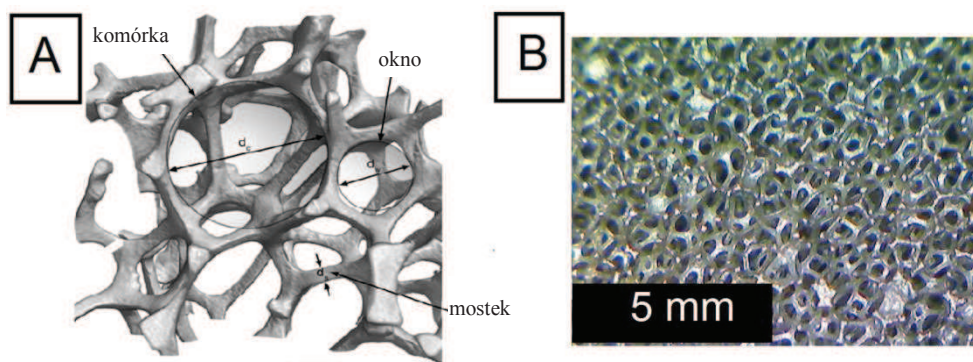
### 1. WPROWADZENIE

Piany stałe o otwartej strukturze porów reprezentują nowoczesną generację materiałów porowatych, które już od wielu lat wzbudzają duże zainteresowanie. Spowodowane to jest ich interesującymi cechami, a zwłaszcza dużą porowatością, co skutkuje relatywnie małymi oporami przepływu; do zalet należy także lekkość i sprężystość pian. Ponadto, piany stałe charakteryzują się dużą powierzchnią właściwą, na której możliwe jest osadzenie aktywnej warstwy katalizatora. Współczynniki wnikania masy i ciepła są znaczne [1,2]. Dodatkowo, piany mogą być wytwarzane z wielu różnych materiałów, m.in. z: metali, ceramiki, węgla, szkła i tworzyw sztucznych [3]. Wszystkie te właściwości sprawiają, że piany stałe znalazły zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu (m.in. wymienniki ciepła, elektrody) i w procesach ochrony środowiska (strukturalne reaktory chemiczne) [4,5]. Celem pracy było wyznaczenie

współczynników transportu ciepła dla piany niklowo-chromowej NC 2733 oraz dla trzech pian aluminiowych Al charakteryzujących się różną gęstością porów na cal (ang. *pores per inch, PPI*). Podjęto również dyskusję na temat wpływu morfologii pian na charakterystykę transportu ciepła.

## 2. METODYKA POMIARÓW

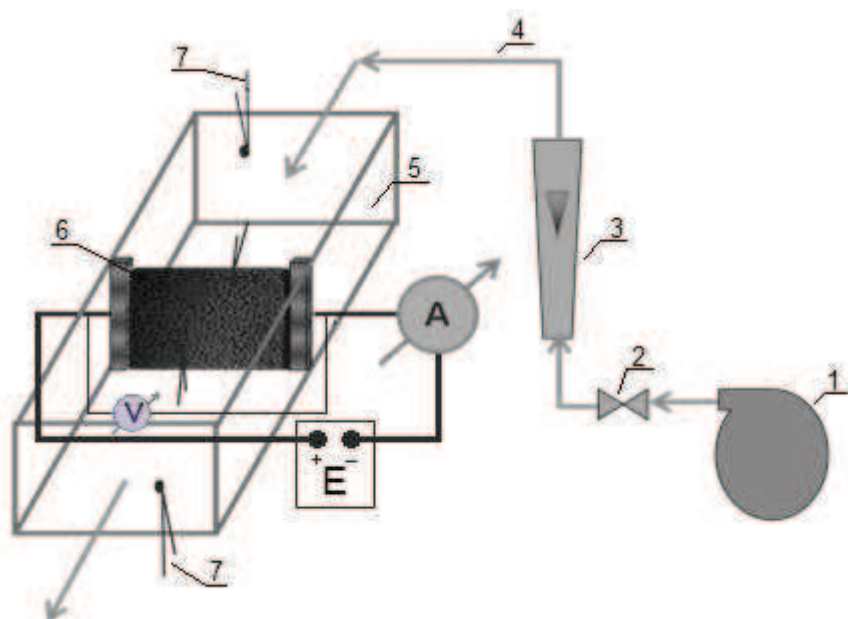
Na rys. 1A przedstawiono podstawowe elementy struktury morfologicznej pian stałych: komórkę (o średnicy  $d_c$ ), okno łączące sąsiadujące komórki ( $d_w$ ) i mostek ( $d_s$ ). Rys. 1B przedstawia zdjęcie wykonane mikroskopem optycznym piany NC 2733 wykonanej ze stopu chromu i niklu, której deklarowana przez producenta (Recemat B.V., Holandia) gęstość porów mieści się w zakresie 27...33 porów na cal (*pores per inch, PPI*). Eksperymenty przeprowadzono również dla pian aluminiowych o wartości PPI wynoszącej 10, 20 oraz 40 (ERG Materials and Aerospace Corp., USA)



Rys. 1. Piana NC2733. A–komputerowa rekonstrukcja obrazu z mikrotomografii komputerowej;  
B–zdjęcie z optycznej mikroskopii cyfrowej

Fig. 1. NC 2733 metallic foam. A–computer visualization of microtomography image;  
B–digital microscope image

Badania transportu ciepła 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. Experimental set-up: E – electric power generation system; 1 – blower; 2 – valve;  
 3 – rotameter; 4 – rubber wire; 5 – reactor; 6 – foam sample; 7 – thermocouples

Piany ogrzewane były przy użyciu prądu elektrycznego przepływającego bezpośrednio przez metalowy szkielet piany, o natężeniu dochodzącym do 150 A. Próbki umieszczano prostopadle do strumienia powietrza tłoczonego dmuchawą. Temperatury przepływającego powietrza oraz powierzchni piany mierzono za pomocą termopar.

Właściwości fizyczne powietrza obliczane były dla średniej temperatury przepływającego gazu. Do obliczeń współczynników wnikania ciepła użyto średniej logarytmicznej różnicy temperatur pomiędzy powierzchnią piany a strumieniem powietrza, która utrzymywana była na poziomie 5-15 K.

Parametry morfologiczne pian określono za pomocą mikroskopu optycznego (Delta Optical Smart 2MP, Polska) oraz mikrotomografu komputerowego (SkyScan 1172, Belgium).

Wyniki uzyskane dla pian zostały porównane z klasycznymi wypełnieniami reaktorów: monolitem 100 cpsi oraz złożem usypanych ziaren o śr. 2 mm. Liczby Nusselta obliczono używając równania podanego przez Wakao i Kagui [6] dla złoża ziaren oraz ze wzorów Hawthorne'a [7] dla monolitu ceramicznego.

### 3. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Podstawowe parametry morfologiczne wyznaczone za pomocą obu stosowanych technik zostały zebrane w tabeli 1. Należy tu podkreślić, że na podstawie wyników uzyskanych metodą mikrotomografii komputerowej trudno rozróżnić średnicę okien i komórek. Dlatego, w metodzie tej używa się pojęcia „por”, które obejmuje łącznie okna i komórki, zatem wartość  $d_p$  jest średnią ważoną arytmetyczną wielkości  $d_w$  i  $d_c$ . Podane w tabeli 1 wielkości są średnimi z wielu pomiarów (ok. 150 dla mikroskopii optycznej i do kilku tysięcy dla tomografii).

Tabela 1. Parametry morfologiczne pian Al i NC 2733 otrzymane przy użyciu różnych technik  
Table 1. Morphological parameters of the Al and NC foams derived using diverse techniques

Piana	Mikrotomografia komputerowa				Cyfrowa mikroskopia optyczna		
	Średnia średnica mostka $d_s$ , mm	Średnia średnica porów $d_p$ , mm	Porowatość $\varepsilon$	Powierzchnia właściwa $a$ , $m^{-1}$	Średnia średnica		
					mostka $d_s$ , mm	okna $d_w$ , mm	komórki $d_c$ , mm
Al 10	0,44	2,48	0,90	866	0,45	1,90	4,73
Al 20	0,39	2,02	0,91	1000	0,37	1,74	4,04
Al 40	0,34	1,70	0,90	1218	0,3	0,92	2,58
NC 2733	0,12	0,68	0,88	3900	0,14	0,29	0,85

Wyniki eksperymentalnych badań transportu ciepła przedstawiono w postaci zależności liczby Nusselta od liczby Reynoldsa (rys. 3, tabela 2):

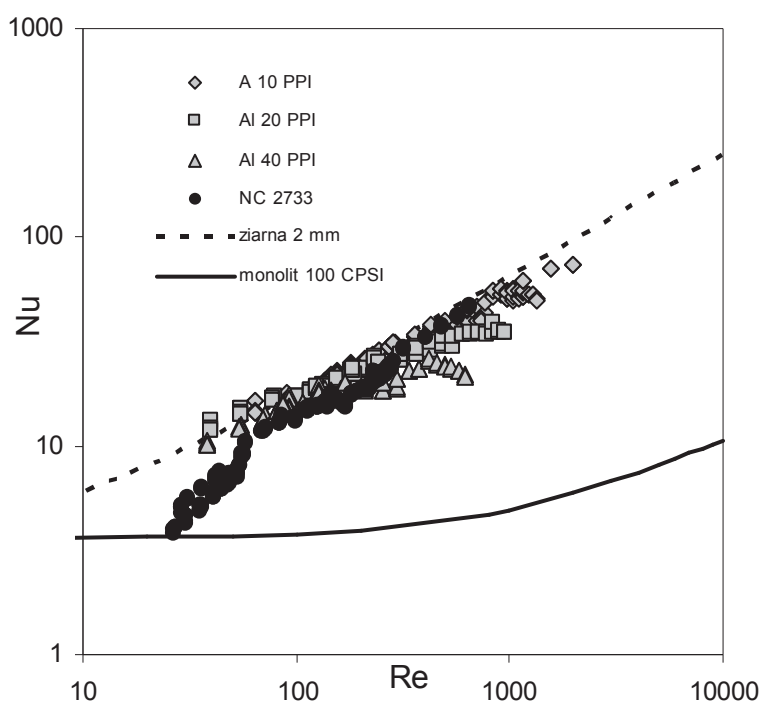
$$Nu = C Re^A Pr^B \quad (1)$$

gdzie liczbę Reynoldsa zdefiniowano z wykorzystaniem rzeczywistej prędkości gazu ( $w=w_0/\varepsilon$ ):

$$Re = \frac{w_0 D_h \rho_g}{\varepsilon \eta} \quad (2)$$

natomiast średnicę hydrauliczną jako:

$$D_h = \frac{4\varepsilon}{a} \quad (3)$$



Rys. 3. Wyniki eksperymentalne badań transportu ciepła  
 Fig. 3. Heat transfer experimental results

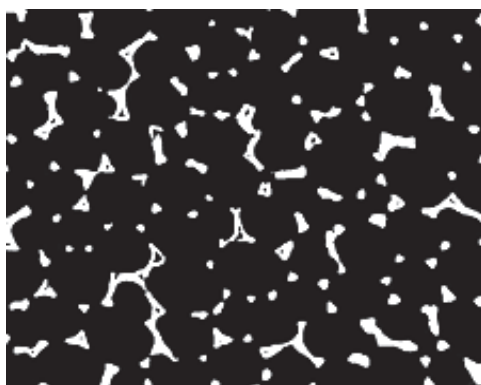
Tabela 2. Korelacje opisujące transport ciepła  
 Table 2. Heat transfer correlations

Piana	Korelacja
Al 10	$Nu = 2,43 Re^{0,46} Pr^{1/3}$
Al 20	$Nu = 3,90 Re^{0,35} Pr^{1/3}$
Al 40	$Nu = 4,83 Re^{0,28} Pr^{1/3}$
NC 2733	$Nu = 0,53 Re^{0,71} Pr^{1/3}$

Można zauważyć, że dla wszystkich stosowanych pian otrzymano podobne wartości  $Nu$  przy porównywalnych wartościach  $Re$ . Ponadto nie zaobserwowano istotnych zmian współczynników transportu ciepła wraz ze zmianą gęstości porów i średnicy mostka. Również w przypadku piany NC 2733, pomimo znacznie mniejszej wartości

$d_s$ , ale bardzo rozwiniętej powierzchni właściwej (patrz tabela 1), stwierdzono zbliżone wartości liczby  $Nu$  do pian Al dla tych samych wartości  $Re$ .

Wydaje się, że można to wyjaśnić porowatą strukturą mostków tworzących szkielet piany NC 2733, co wyraźnie widać na zdjęciu tomograficznym (rys. 4). Proces produkcji pian NC, w przeciwieństwie do pian aluminiowych wytwarzanych z ciekłego metalu, wykorzystuje metalizowany szkielet wykonany z piany poliuretanowej, która jest na pewnym etapie wypalana w wysokiej temperaturze. Efektem tego są wspomniane wewnętrzne nieciągłości w strukturze szkieletu piany metalowej, czyli wewnętrzna porowatość mostków ( $\epsilon_p$ ). Może ona wpływać na eksperymentalne wyniki badań transportu ciepła powodując lokalne przegrzania szkieletu piany. Zjawisko to będzie występować wyłącznie w przypadku elektrycznego ogrzewania pianek metalowych.



Rys. 4. Wewnętrzna porowatość piany NC 2733 widoczna na zbinaryzowanym obrazie mikrotomograficznym. Mostki mają kolor biały, natomiast wolna objętość zaznaczona jest kolorem czarnym

Fig. 4. NC 2733 foam inertial porosity visible in the microtomography binarized picture. The solid struts are white and the empty volume black

Zakładając oporność elektryczną wyrażoną prawem Ohma i powiązany z prawem Joule'a-Lenza strumień ciepła:

$$R = \rho_e \frac{l}{f} ; \quad Q = RI^2t = \frac{l}{f} I^2 \rho_e \quad (4)$$

gdzie  $l$  jest długością i  $f$  przekrojem poprzecznym przewodnika o oporności właściwej  $\rho_e$ . Przekształcając równania (4) w jednostkowy strumień ciepła otrzymamy:

$$q = \frac{Q}{2\pi r l} = \frac{I^2 \rho_e}{2\pi r f} \quad (5)$$

przy założeniu, że  $r$  jest promieniem cylindrycznego przewodnika.

Powyższe równania są prawidłowe dla pian ciągłych, nie posiadających wewnętrznych porowatości szkieletu. W przypadku struktur, które posiadają wewnętrzne pory powierzchnia przekroju poprzecznego metalu (przewodnika) jest mniejsza o wartość  $(1 - \varepsilon_p)$ :

$$q_p = \frac{I^2 \rho_e}{2\pi r f (1 - \varepsilon_p)} \quad (6)$$

Zakładając, że współczynnik wnikania ciepła  $\alpha = \frac{q}{\Delta T}$  zależy wyłącznie od wartości natężenia przepływu (lub liczby  $Re$ ), a zatem można przyjąć, że  $\alpha \approx \alpha_p$ , po przegrupowaniu, różnica temperatur  $\Delta T$  pomiędzy powierzchnią piany a płynem wyniesie:

$$\Delta T_p = \frac{\Delta T}{(1 - \varepsilon_p)} > \Delta T \quad (7)$$

Z przeprowadzonej analizy wynika, że wewnętrzna porowatość pianki może powodować miejscowy wzrost temperatury prowadzący do zwiększenia  $\Delta T$ , a więc pozornego spadku współczynnika wnikania ciepła. Z drugiej jednak strony, przewodzenie ciepła w pustej objętości wewnątrz mostka wyrównuje częściowo temperaturę powierzchni. Lokalne przegrzania tłumaczą zatem, dlaczego, pomimo gorszych właściwości piany niklowo-chromowej (mniejsza przewodność cieplna jak i elektryczna) od pian aluminiowych, eksperymentalnie otrzymane wyniki transportu ciepła dla obu typów pian są do siebie bardzo zbliżone.

## WNIOSKI

Z przedstawionej analizy wynika, że wewnętrzna porowatość może wywoływać lokalne wzrosty temperatury. Tym samym morfologia pian, będąca efektem zastosowanej technologii produkcji, znacząco może wpływać na intensywność wnikania ciepła. Ich podstawowe parametry morfologiczne, takie jak średnice mostków, porów, komórek i okien, powierzchnia właściwa, porowatość, mają decydujący wpływ na właściwości transportowe pian. Jednak ich drugorzędne cechy morfologiczne (chropowatość powierzchni piany, porowatość wewnętrzna szkieletu, kształt mostków i węzłów łączących mostki), mogą także istotnie wpływać na właściwości pian. Te, wydawałoby się mniej istotne cechy budowy szkieletu piany, są, jak dotąd, słabo rozpoznane i zbadane.

## OZNACZENIA - SYMBOLS

a – powierzchnia właściwa,  $m^{-1}$

	specific surface area
A, B, C	– stałe (rów. (1)) constants (eq. (1))
$c_p$	– ciepło właściwe, $J\ kg^{-1}K^{-1}$ specific heat
$d_c$	– średnia średnica komórki, m average cell diameter
$D_h$	– średnica hydrauliczna, m hydraulic diameter
$d_s$	– średnia średnica mostka, m average strut diameter
$d_w$	– średnia średnica okna, m window diameter
$d_p$	– średnia średnica poru, m average pore diameter
f	– pole przekroju poprzecznego przewodnika, $m^2$ cross section of the conductor
I	– natężenie prądu, A current
l	– długość, m length
Nu	– liczba Nusselta, $Nu = \alpha D_h \lambda^{-1}$ Nusselt number
Pr	– liczba Prandtla, $Pr = c_p \eta \lambda^{-1}$ Prandtl number
q	– gęstość strumienia ciepła, $W\ m^{-2}$ heat flux
Q	– ilość ciepła, J heat
r	– promień przewodnika, m conductor radius
R	– opór elektryczny, $\Omega$ electrical resistance
Re	– liczba Reynoldsa, $Re = w_0 D_h \rho_g \eta^{-1}$ Reynolds number
t	– czas, s time
T	– temperatura, K temperature
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
$\alpha$	– współczynnik wnikania ciepła, $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ heat transfer coefficient
$\varepsilon$	– porowatość porosity
$\lambda$	– współczynnik przewodzenia ciepła, $W\ m^{-1}K^{-1}$ thermal conductivity
$\eta$	– dynamiczny współczynnik lepkości, Pa s



	dynamic viscosity
$\rho_e$	– opór właściwy przewodnika, $\Omega$ m
	specific electrical resistance
$\rho_g$	– gęstość gazu, $\text{kg m}^{-3}$
	density

#### INDEKSY DOLNE – SUBSCRIPTS

p	– odnosi się do pian z wewnętrzną porowatością foams with inert porosity
---	---

#### PIŚMIENNICTWO CYTOANE - REFERENCES

- [1] Edouard D., Lacroix M., Huu C., 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.
- [2] Grosse J., Dietrich B., Incerna Garrido G., Habisreuther P., Zarzalis N., Martin H., Kind M., Kraushaar-Czarnetzki B., 2009. Morphological characterization of ceramic sponges for applications in chemical engineering. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 48, 10395-10401. DOI: 10.1021/ie900651c.
- [3] Scheffler M., Colobmo P., 2005. Cellular ceramics, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. Weinheim
- [4] <http://www.recemat.nl/eng/products/>; dostęp 13.11.2015.
- [5] <http://www.ergaerospace.com/Material-Applications-guide.html>; dostęp 13.11.2015.
- [6] Wakao N., Kagueli S., 1982. Heat and mass transfer in packed beds, Gordon and Breach Science Publisher, New York.
- [7] Hawthorn R.D., 1974. Afterburner catalysis – effects of heat and mass transfer between gas and catalyst surface, *AIChE Symposium Series*, 70, 428-438.

MARCIN PIĄTEK, MARZENA IWANISZYN, MIECZYSLAW JAROSZYŃSKI, BOŻENA JANUS, TADEUSZ KLESZCZ, ANNA GANCARCZYK

#### THE IMPACT OF FOAMS STRUCTURE ON HEAT TRANSFER

This study investigates the heat transfer characteristic of Nickel-Chromium and three Aluminium solid foams. The foams supplied by two producers were applied during the study. The NC 2733 foam, made from nickel-chromium alloy, produced by Recemat B.V., with declared density of 27...33 pores per inch (PPI), and three Aluminium (Al) foams, with declared density of 10, 20 and 30 PPI, produced by ERG Aerospace Corp. The NC foam is depicted in Fig. 1.

Laboratory-scale reactor of rectangular cross-section 45x30 mm (Fig. 2) was used to carry the heat transfer experiments out. Foam samples were heated by strong electric current (up to 150A) flowing directly through them. The foam samples were put perpendicularly to the air stream flowing through them. A dozen thermocouples were used to measure temperatures of the flowing gas stream and the foam surface.

The foam morphology was studied using the digital optical microscopy (Delta Optical Smart 2MP, Poland) and the X-ray computed microtomography (SkyScan 1172, Belgium). Mean diameters of: strut,  $d_s$ ; pore,  $d_p$ ; window,  $d_w$  and cell,  $d_c$ , were determined and then, foam specific surface area  $a$  and porosity  $\varepsilon$  were derived.

Basic morphological parameters of the NC 2733 and all the Al foams derived using the computed microtomography and optical microscopy, are summarized in Table 1. The heat transfer experimental results are presented in terms of the Nusselt versus Reynolds numbers (Fig. 3). The experiments covered wide range of the air flow rates:  $0.23\div 10.9$  ms<sup>-1</sup> for NC 2733 foam and  $0.14\div 7.0$  ms<sup>-1</sup> for the Al foams.

Foam morphology, being an effect of the production technology, influences significantly the heat transport characteristics. Primary morphological features, like strut, pore, cell and window diameter, specific surface area or void volume, might be not the only decisive factor. Secondary morphological features (foams surface roughness, inner skeleton porosity, strut and strut-node shape, number and shape of cells and windows) might also influence the foams transport characteristics. These secondary morphological characteristics are, however, not recognized well enough so far.