

# Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

## Modern material technologies in aerospace industry

### Metaliczne materiały kompozytowe w aplikacjach lotniczych w tym materiały typu Glare

### Composite metallic materials in aviation applications (including Glare-type materials)

Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Politechnika Śląska, Instytut Lotnictwa w Warszawie  
Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk

#### Wyniki badań Results

Opracowanie technologii wytwarzania korundowych kształtek o budowie piany jako preformów do infiltracji metalem.

Design of alumina bodies having foam structure as a performs for metal infiltration

#### Wprowadzenie

Materiały ceramiczne o porowatości otwartej mają szerokie zastosowanie praktyczne w wielu urządzeniach, m.in. jako podłoża do katalizatorów, filtry do cieczy i gazów, porowate kształtki do infiltracji metalami lub polimerami. Podstawowym parametrem oraz kryterium ich zastosowania jest w tym przypadku ich przepuszczalność dla różnych mediów, czyli wskaźnik rozpraszania energii kinetycznej niesionej przez ciecz lub gaz.

#### Introduction

Ceramic materials with open porosity have a wide range of practical applications, for example as catalyst supports, gas and liquid filters, performs for producing interpenetrating composites by metal or polymer infiltration. The major parameter and criterion of application of ceramic foams is their permeability for different media, e.g. a factor of gas or liquid medium kinetic energy dissipation.

#### Główne wyniki zrealizowanych badań.

Przepuszczalność określa się za pomocą funkcji przepływu uwzględniającej spadek ciśnienia  $\Delta p$  występujący na długości próbki L przy stałym przekroju poprzecznym A. Dla bardzo małych wartości prędkości przepływu płynu zachowane jest prawo Darcy'ego mówiące o wprost proporcjonalnym spadku ciśnienia wraz z prędkością przepływu:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\mu}{k_1} v \quad (1)$$

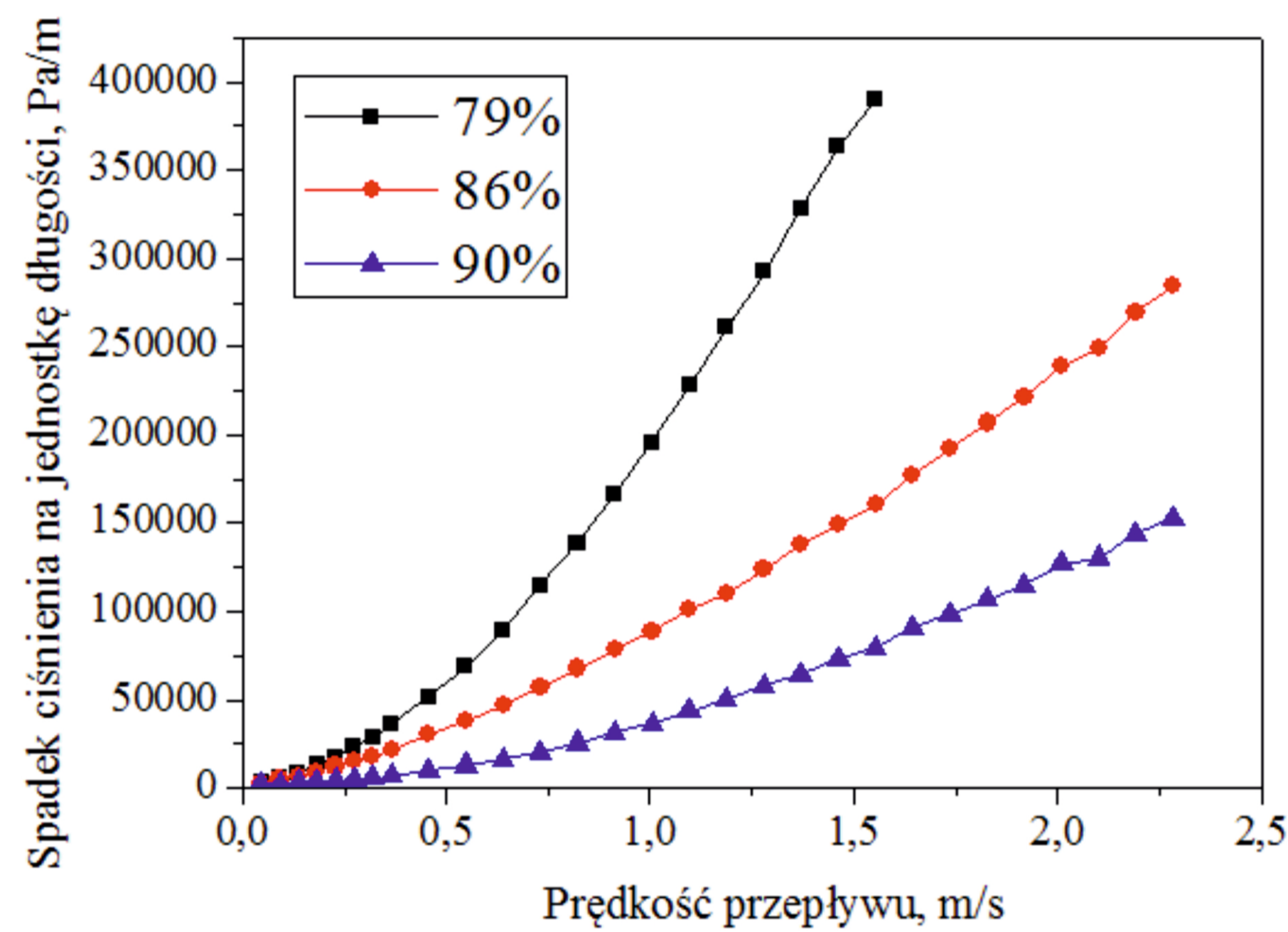
gdzie:  
 $\mu$  - lepkość przepływającego medium [Pa·s],  
 $v$  - liniowa prędkość przepływu [m/s],  
 $k_1$  - przepuszczalność Darcy'ego [m<sup>2</sup>].

Dla większych prędkości przepływu uwzględniony jest człon opisujący efekt przepływu turbulentnego – równanie Forchheimer'a:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\mu}{k_1} v + \frac{\rho_m}{k_2} v^2 \quad (2)$$

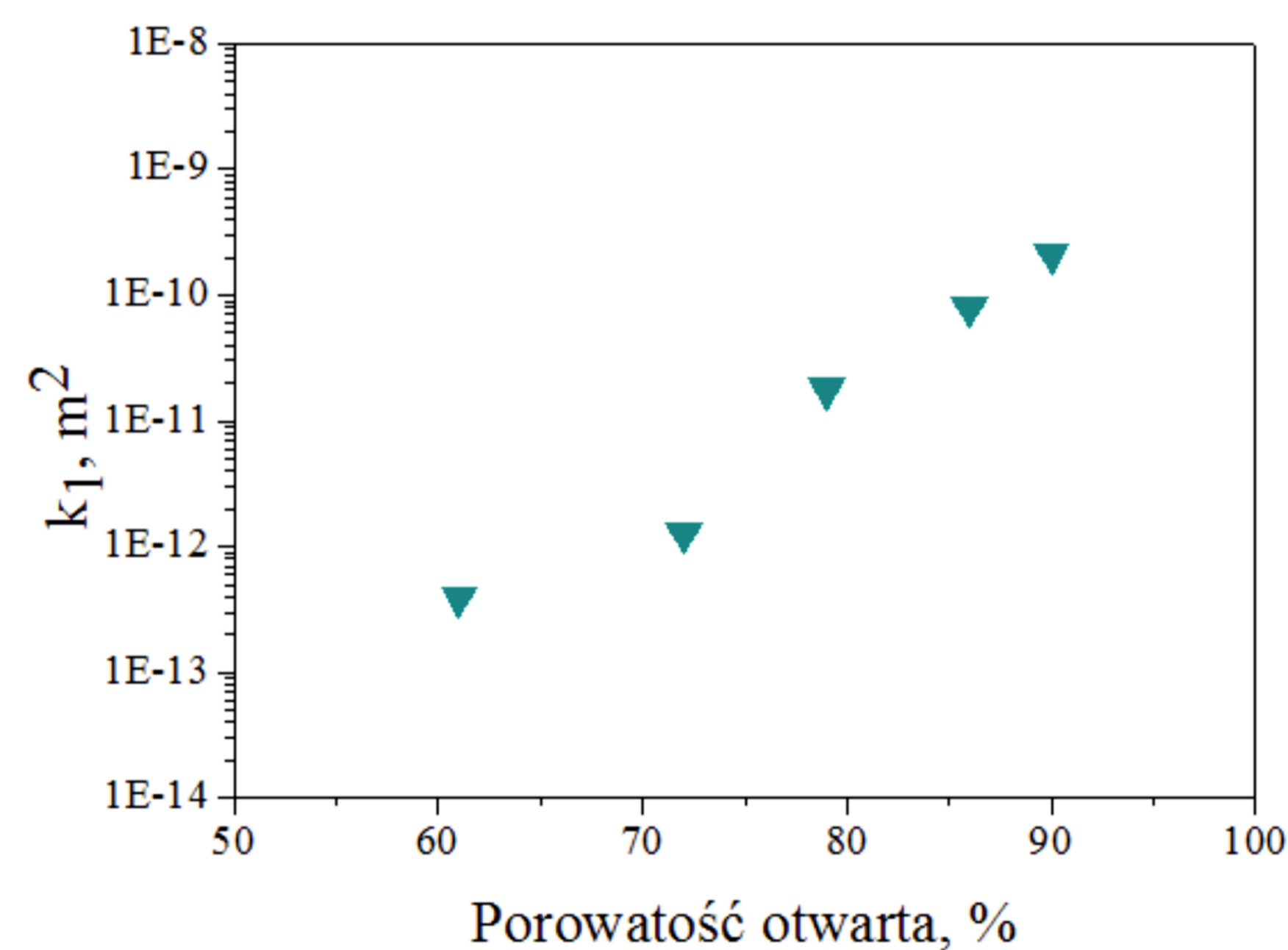
gdzie:  
 $\rho_m$  – gęstość przepływającego medium [kg/m<sup>3</sup>],  
 $k_2$  – przepuszczalność uwzględniająca efekt przepływu turbulentnego, zwana także w literaturze przepuszczalnością niedarcianowską [m].

Wyniki badań spadku ciśnienia azotu przepływającego przez pianki korundowe wykazały, że parametr ten opisywany jest równaniem Forchheimer'a (rys. 1).

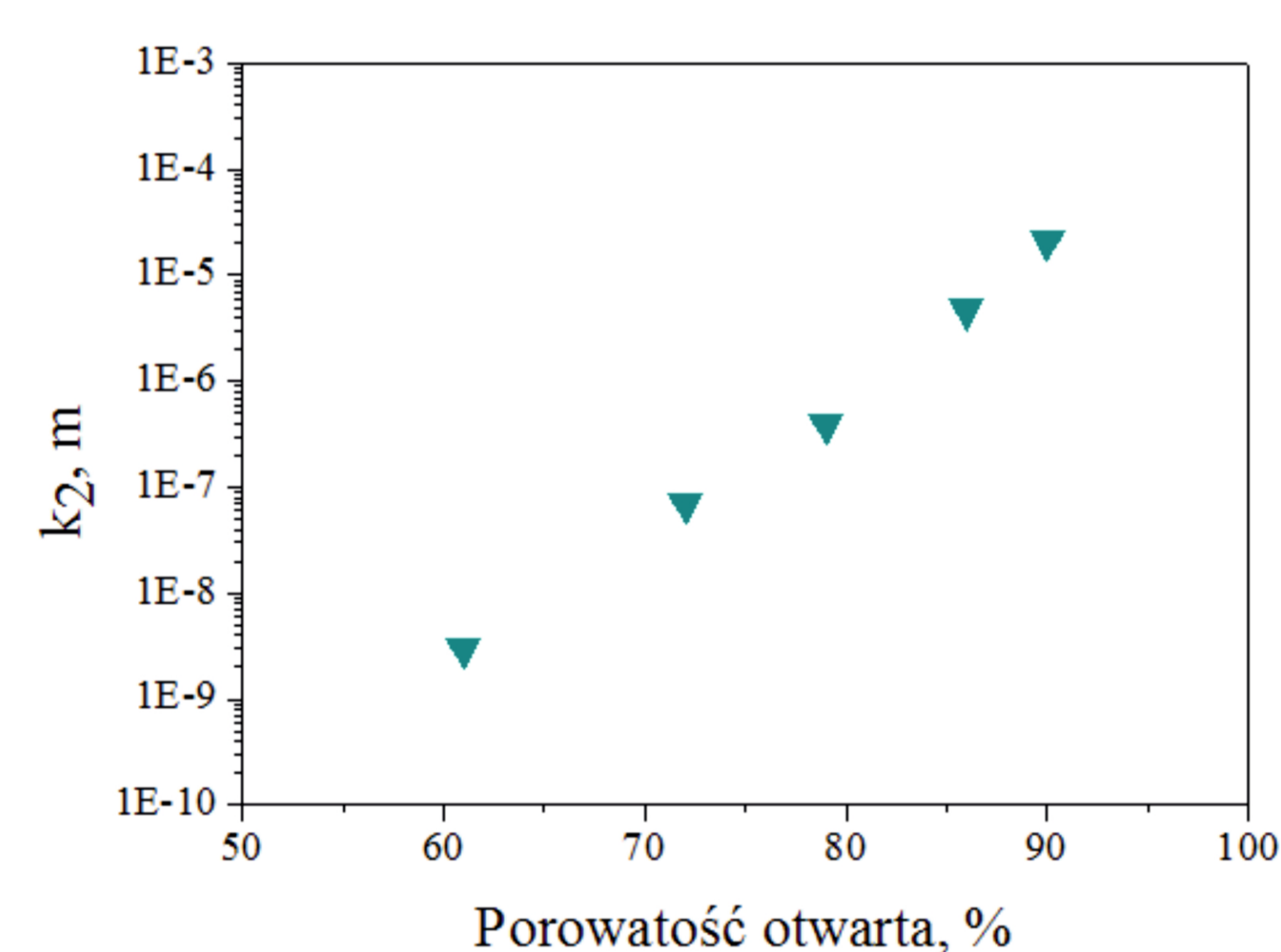


Rys. 1. Spadek ciśnienia na jednostkę długości pianki w funkcji prędkości przepływu gazu.  
Fig. 1. Pressure drop as a function of gas velocity

W zależności od porowatości otwartej pianek korundowych, składową darcianowską i niedarcianowską można regulować w zakresie kilku rzędów wielkości (rys.2 i 3).



Rys. 2. Zależność przepuszczalności darcianowskiej (k1) pianek korundowych od porowatości otwartej  
Fig. 2. Darcian permeability (k1) of alumina foams as a function of open porosity



Rys. 3. Zależność przepuszczalności niedarcianowskiej (k2) pianek korundowych od porowatości otwartej  
Fig. 3. Non-Darcian permeability (k2) of alumina foams as a function of open porosity

W zastosowaniu materiałów o porowatości otwartej niezwykle istotne jest przewidywanie wartości przepuszczalności w zależności od cech geometrycznych materiału. Problem ten został rozwiązany tylko w nielicznych materiałach porowatych cechujących się prostą geometrią. Na przykład Ergun dla nieskonsolidowanych układów ziarnistych podał empiryczne równania pozwalające obliczyć przepuszczalność w zależności od porowatości układu i średniej średnicy ziarna:

$$k_1 = \frac{p^3 d^2}{150(1-p)^2} \quad (3)$$

$$k_2 = \frac{p^3 d}{1,75(1-p)} \quad (4)$$

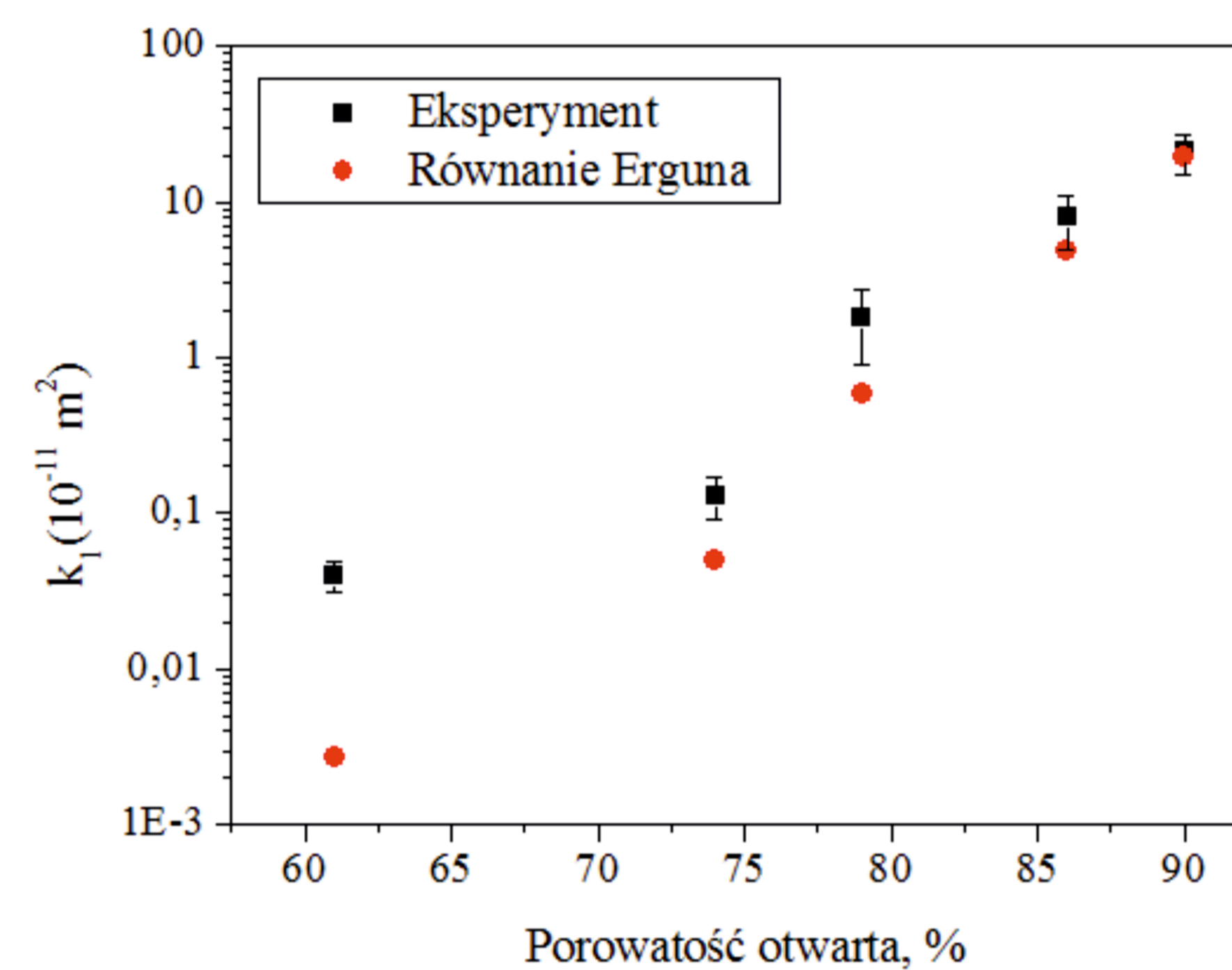
gdzie: p - porowatość nieskonsolidowanego układu ziarnistego, d – średnia średnica ziarna.

W przypadku materiałów piankowych przewidywanie wartości przepuszczalności na podstawie cech geometrycznych jest bardzo utrudnione. Wynika to z niejednorodnej budowy pianki, a także z wielu parametrów geometrycznych opisujących budowę pianki, takich jak: średnica komórki, średnica okna w ściance komórki, grubość ścianek pianki, kształt komórek pianki. Ponieważ przepuszczalność związana jest z transportem cieczy lub gazu przez pory przelotowe - w tej pracy średnią średnicę ziarna w oryginalnym równaniu Erguna zastąpiono średnicą połączeń między komórkami pianki wyznaczoną na podstawie porozymetrii rてciowej. Skorygowane równania Erguna dla materiału piankowego przyjmują postać:

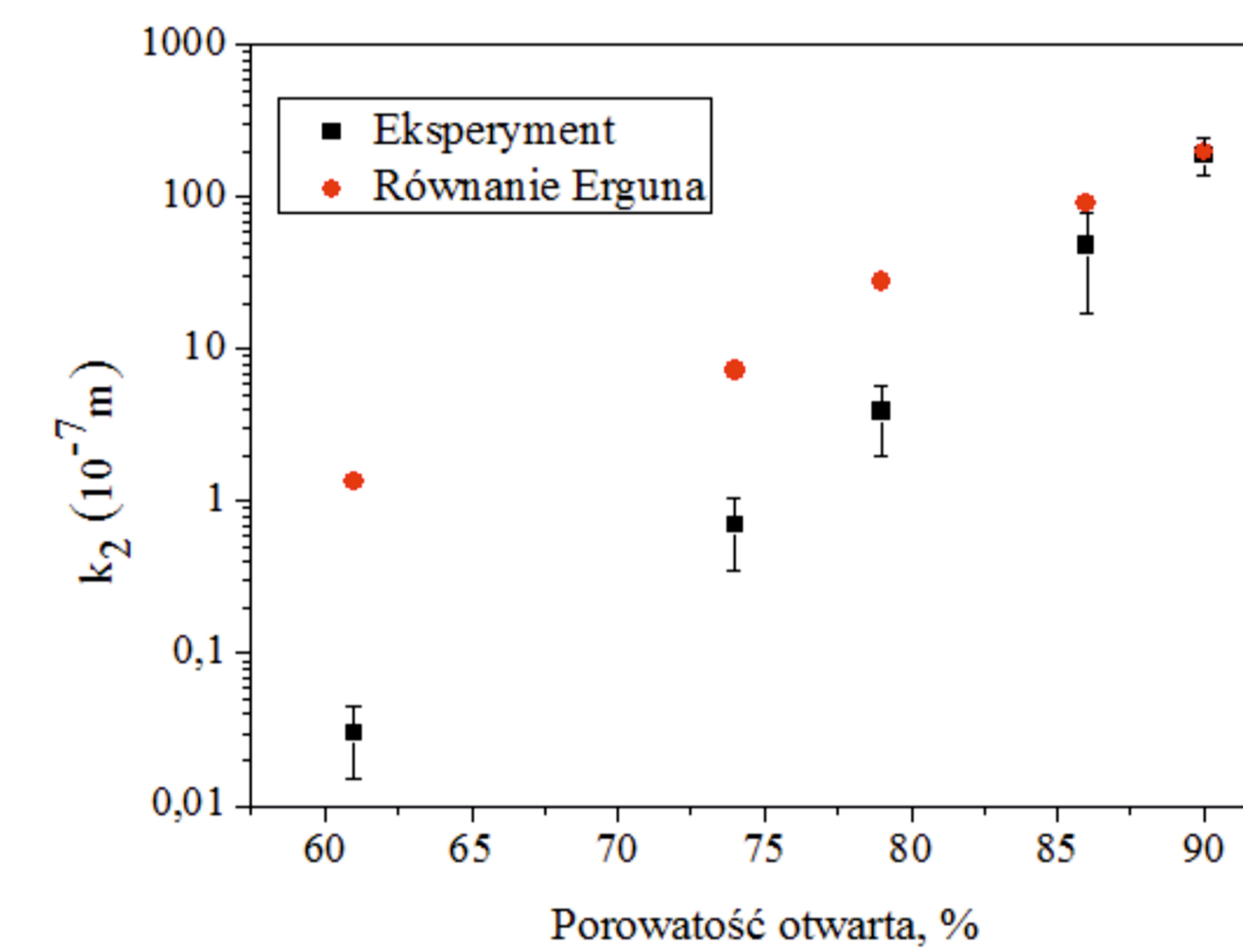
$$k_1 = \frac{0,025}{150} \frac{p_o^3 d_{Hg}^2}{(1-p_o)^2} \quad (5)$$

$$k_2 = \frac{0,037}{1,75} \frac{p_o^3 d_{Hg}}{(1-p_o)} \quad (6)$$

gdzie:  $p_o$  – oznacza porowatość otwartą materiału piankowego,  $d_{Hg}$  – modalną średnicę połączeń pomiędzy makroporami pianki wyznaczoną metodą porozymetrii rてciowej. Porównanie wartości przepuszczalności wyznaczonych doświadczalnie i obliczonych na podstawie zmodyfikowanych równań Erguna wskazuje na zgodność tych dwóch parametrów tylko w zakresie bardzo dużych porowatości (rys. 4 i 5). Brak zgodności w szerszym zakresie porowatości związany jest przede wszystkim ze złożoną budową pianki.



Rys. 4. Porównanie doświadczalnych wartości przepuszczalności darcianowskiej (k1) z wyliczonymi na podstawie skorygowanego równania Erguna.  
Fig. 4. Comparison between the experimental Darcian permeability data and values predicted by corrected Ergun equation.



Rys. 5. Porównanie doświadczalnych wartości przepuszczalności niedarcianowskiej (k2) z wyliczonymi na podstawie skorygowanego równania Erguna.  
Fig. 5. Comparison between the experimental non-Darcian permeability data and values predicted by corrected Ergun equation.

Obok przepuszczalności istotnym parametrem odpowiedzialnym za właściwości fizyczne i chemiczne pianek ceramicznych jest ich powierzchnia właściwa. Powierzchnię właściwą pianek korundowych wyznaczono metodą wielopunktowej adsorpcji BET na urządzeniu firmy Micrometric. Wyniki badań powierzchni właściwej w funkcji porowatości otwartej pianek korundowych zestawiono w tabeli 1.

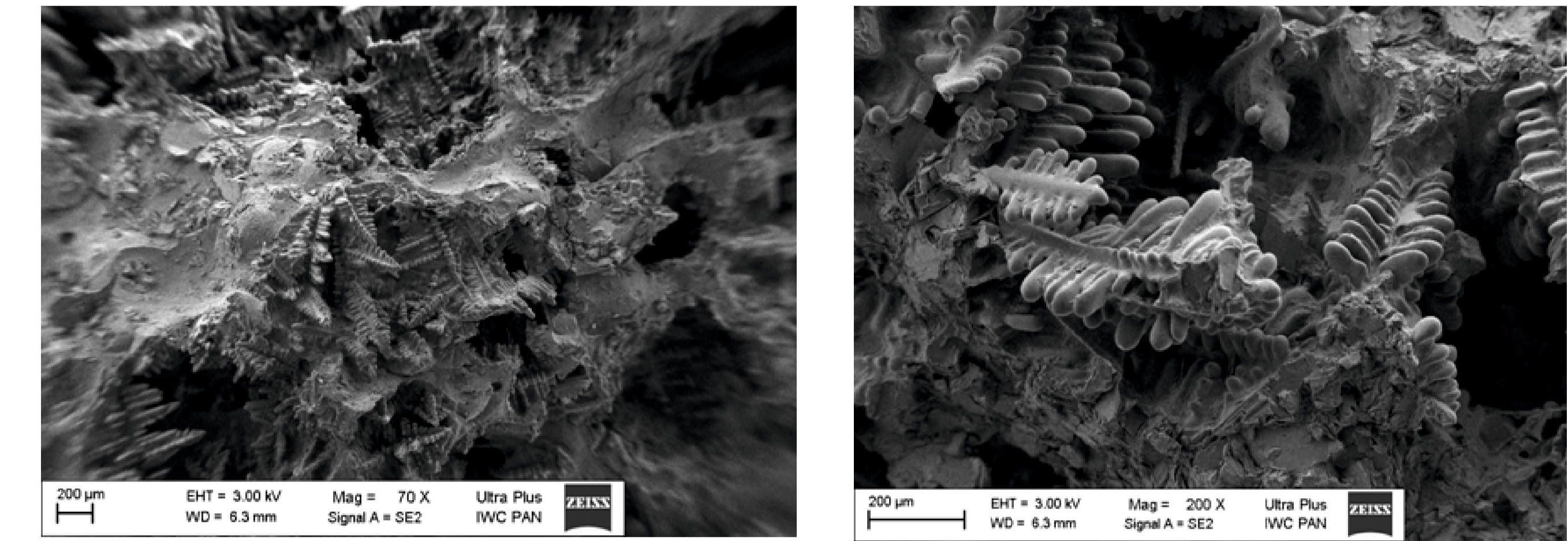
Tabela 1. Wyniki badań powierzchni właściwej pianek korundowych o różnej porowatości  
Table 1. Specific surface area of ceramic foams with different porosity

Porowatość otwarta [%]	Powierzchnia właściwa [m <sup>2</sup> /g]
90	3,1
86	2,7
79	2,1
72	1,4
61	0,5

Otrzymane wartości powierzchni właściwej są typowe dla materiałów makroporowatych – poniżej kilku m<sup>2</sup>/g. Wartości powierzchni właściwej wynikają także z niskiej powierzchni właściwej wyjściowego proszku korundowego użytego do wytworzenia pianek metodą żelowania spienionej zawiesiny - 7,0 m<sup>2</sup>/g.

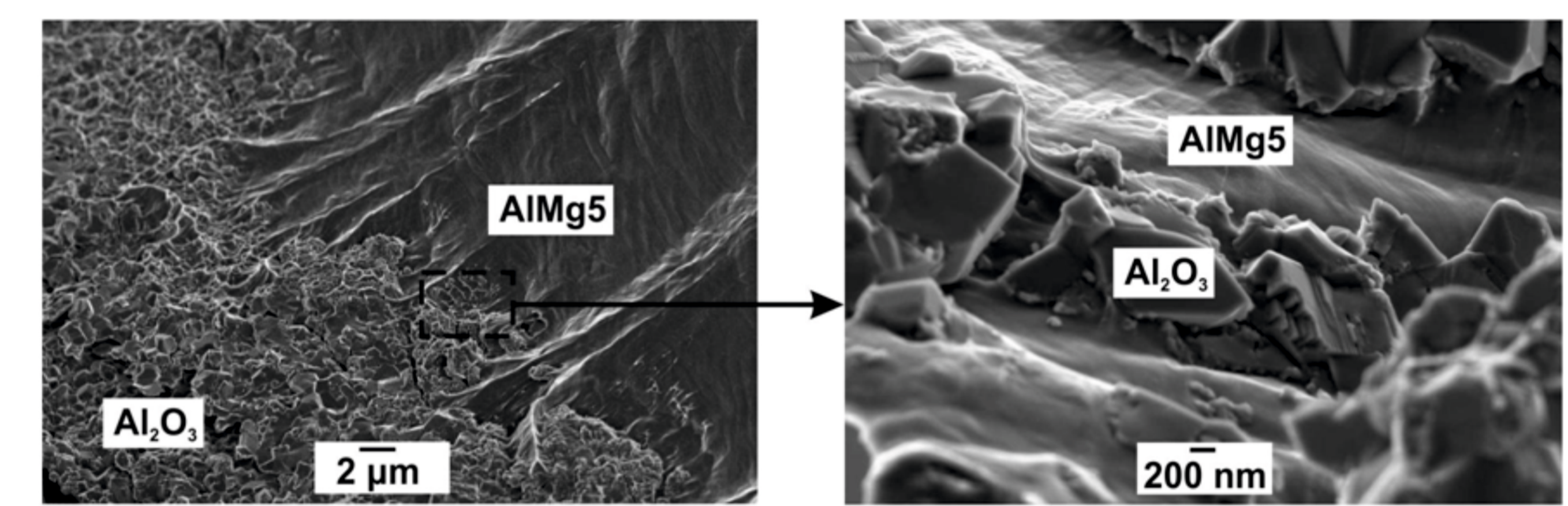
Infiltracja pianek ceramicznych ciekłymi metalami stwarza możliwość wytwarzania nowych kompozytów o wzajemnie przenikających się szkieletach fazy ceramicznej i metalicznej. Ze względu na niewystarczającą zwilżalność wielu metali do ceramiki konieczna jest infiltracja ciśnieniowa. Podstawowym kryterium doboru i projektowania ceramicznych materiałów piankowych jako kształtek do infiltracji ciśnieniowej ciekłymi metalami jest porowatość o charakterze prawie wyłącznie otwartym, wytrzymałość na ściskanie większa od ciśnienia progowego infiltracji i możliwie duża wartość przepuszczalności.

Pianki korundowe o porowatości 90% zastosowano do wytworzenia kompozytów AlSi11/Al2O3 i AlMg5/Al2O3. Gęstość kompozytów AlSi11/Al2O3 wynosiła 2,58 g/cm<sup>3</sup>, a porowatość 7%. Obserwacje przelomów kompozytów AlSi11/Al2O3 wykonane metodą skaningowej mikroskopii elektronowej wykazały wypełnienie makroporów w piance Al2O3 stopem AlSi11, a także dendrytyczną morfologię stopu AlSi11 (rys. 6)



Rys. 6. Obraz spod skaningowego mikroskopu elektronowego przelomu kompozytu AlSi11/Al2O3: (a) - powiększenie 70x, (b) - powiększenie 200x  
Fig. 6. SEM image of the fracture section of AlSi11/Al2O3 composite: (a) - magnification 70x, (b) - magnification 200x

Obserwacje granic międzyfazowych w kompozytach AlMg5/Al2O3 nie wykazały obecności AlMgO4 ani MgO – faz typowych dla połączeń dyfuzyjnych. Zastosowane w tej pracy warunki obróbki cieplnej (temperatura infiltracji 740oC, czas infiltracji 4 min, a następnie szybkie chłodzenie do 450oC) ze względów kinetycznych utrudniają wytworzenie spinelu MgAl2O4 na granicy międzyfazowej. Stąd, z dużym prawdopodobieństwem można przyjąć, że jeśli tworzony jest spintel MgAl2O4 to faza ta ma postać rozproszonych cząstek o rozmiarach kilku nm. Analiza EDX tych cząstek ze względu na ich rozmiar nie jest możliwa, a jednoznaczna identyfikacja fazy wymaga badań metodą dyfrakcji elektronowej. Obserwacje granic międzyfazowych w kompozytach AlMg5/Al2O3 wykonane pod wysokorozdzielczym mikroskopem skaningowym wykazały dobre przyleganie faz na granicy ceramika/metal.



Rys. 7. Obraz spod skaningowego mikroskopu elektronowego powierzchni międzyfazowej w kompozytach AlMg5/Al2O3.  
Fig. 7. SEM image of metal/ceramic interface in AlMg5/Al2O3 composite.

#### Wnioski Conclusions

1. Wyniki badań spadku ciśnienia gazu przepuszczanego przez pianki korundowe wykazały, że parametr ten opisywany jest równaniem Forchheimer'a – nakładanie się przepływu laminarnego i turbulentnego.
2. Wartości przepuszczalności wyznaczone doświadczalnie i przewidziane przez model materiału porowatego o prostej geometrii wykazywały zgodność tylko w zakresie porowatości >80%. Brak zgodności w szerszym zakresie porowatości spowodowany był przede wszystkim złożoną budową przestrzenną pianki ceramicznej.
3. Powierzchnia właściwa pianek korundowych o porowatości otwartej w zakresie 61 - 90% zawarta była w przedziale od 0,5 do 3,5 m<sup>2</sup>/g.
4. Kompozyty AlMg5/Al2O3 charakteryzowały się dobrym przyleganiem na granicy międzyfazowej ceramika/metal.

1. The permeability of alumina foams as a function of gas velocity was described by Forchheimer equation – laminar and turbulent flow.
2. The agreement between experimental permeability values and those calculated by model porous material of simple geometry was found only for high porosity level > 80%. This phenomena was due to a complex structure of ceramic foams.
3. The specific surface area of ceramic foams within open porosity of 61-90% was found in the range from 0.5 to 3.5 m<sup>2</sup>/g.
4. Microstructural characterization of AlMg/Al2O3 interpenetrating composites revealed a good integrity of metal/ceramic interface.

#### Przykłady zastosowania w lotnictwie Examples of application in aviation

Możliwości zastosowania w lotnictwie pianek ceramicznych i kompozytów wytworzonych przez infiltrację metalu lekkiego do pianki ceramicznej:

- pianki Al2O3 jako pochłaniacze dźwięku,
- kompozyty AlCu5/Al2O3 - styki elektryczne odporne na ścieranie,
- kompozyty Mg-Al/Al2O3 - elementy tłumienia hałasu i drgań,
- kompozyty AlMg5/Al2O3 – tarcze hamulcowe w elementach podwozia,
- kompozyty AlSi11/Al2O3 – denka tłoków

Possibility of aerospace applications of ceramic foams and composites fabricated by light metal infiltration into ceramic foams:

- Al2O3 foams as sound absorbers,
- AlCu/Al2O3 composites – sliding electrical contacts
- Mg-Al/Al2O3 composites – sound and vibration absorbers,
- AlMg5/Al2O3 composites – brake discs in landing gear elements,
- AlSi11/Al2O3 composites – piston crowns

#### Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

#### Referaty

M. Potoczek, R.E. Śliwa: "Different aerospace applications of ceramic foams" accepted to 7-th International Conference "Supply on the Wings", November 6-8, 2012, Frankfurt, Germany

#### Prace mgr, dr, hab.

#### Prace habilitacyjne

Tytuł: **Kształtowanie mikrostruktury piankowych materiałów ceramicznych**  
 Autor: Marek Potoczek  
 Status: *Monografia habilitacyjna wysłana do recenzji wydawniczej*