

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 metalami i polimerami.
Design of alumina bodies having foam structure as a performs for metal and polymer infiltration

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. Ze względu na upraszczające założenia modelu Gibsona-Ashbiego nie obserwuje się dobrej zgodności pomiędzy wartościami doświadczalnymi wybranymi właściwościami mechanicznymi ceramicznymi a tych przewidzianych przez model. W tym celu, w poprzednich badaniach opracowano numeryczny model budowy przestrzennej pianki, a obecnie przeprowadzono jego weryfikację z doświadczeniem.

Opracowano także technologię wytwarzania kompozytów ceramiczno-polimerowych (korund-żywica poliuretanowa).

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. For simplified assumptions of Gibson-Ashby model there were not observed good accordance between some mechanical properties of experimental values of ceramic foams and those predicted by the model. For this reason in our previous study a numerical model of a ceramic foam was determined and it was proved in this study that the simulated values of the elastic modulus of gel-cast foams showed good agreement with real experimental tests.

A manufacturing method of ceramic-polymer composites (alumina-polyurethane resin) was also studied

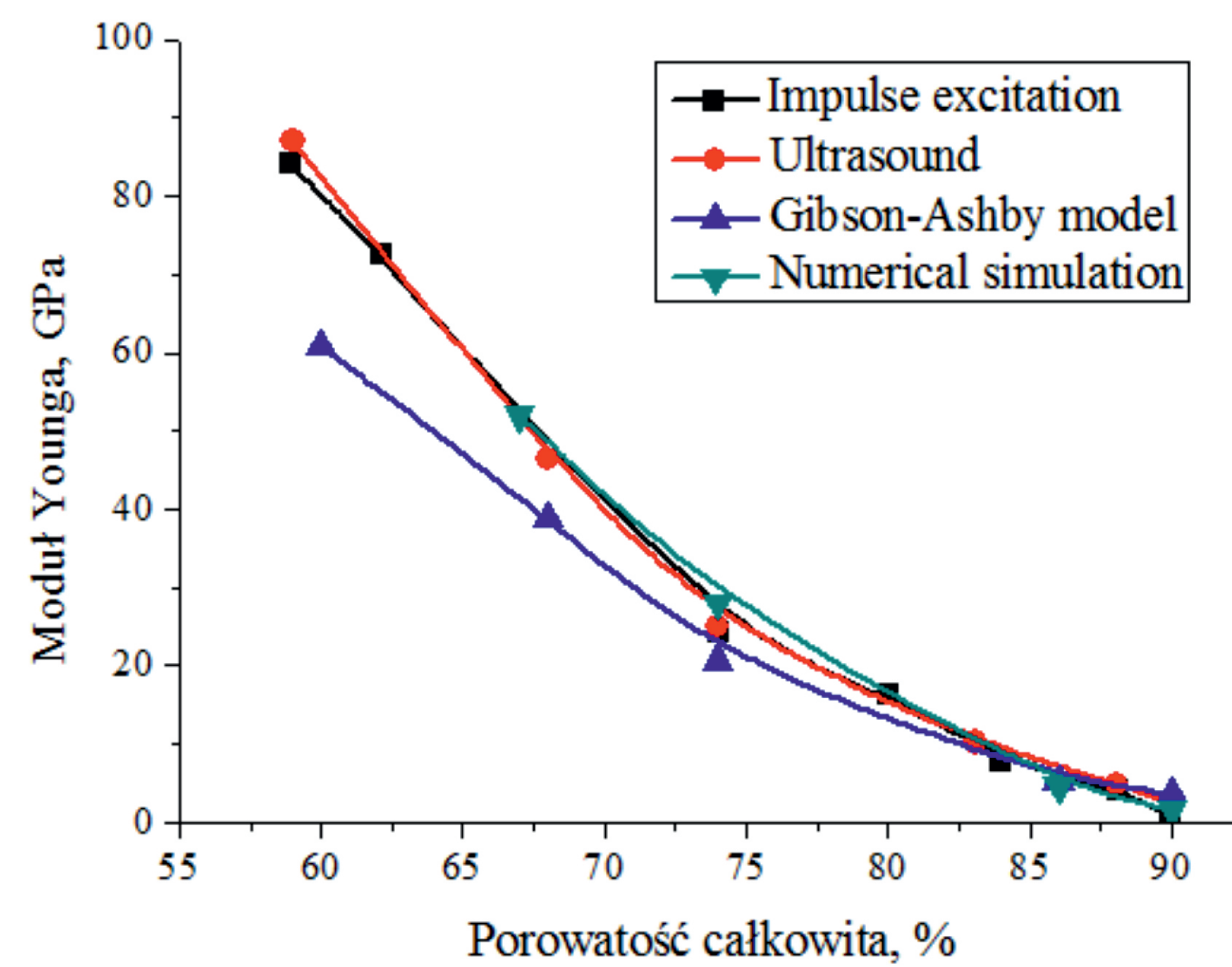
Wartości modułów Younga pianek korundowych uzyskane metodą symulacji numerycznej i wyznaczone doświadczalnie

Experimental and simulated values of Young modulus of alumina foams

Warunki pracy większości pianek ceramicznych prognozowane są w zakresie odkształceń sprężystych. Stąd symulacje numeryczne przeprowadzono tylko w zakresie odkształceń sprężystych. Zakładając liniową sprężystość, izotropię materiału i małe deformacje (do 1%) zależność między przyłożoną siłą a przemieszczeniem pionowym w symulacji numerycznej jest liniowa. Jako równanie konstytutywne zastosowano równanie teorii sprężystości Hooke'a, w którym wartość modułu Younga (E) i współczynnika Poissona (ν) materiału szkieletu pianki przyjęto na podstawie danych dla gęstego korundu (E=380 GPa, ν= 0,22).

Wyniki symulacji numerycznej próby ściskania pianek korundowych pozwoliły na określenie ich modułu Younga w funkcji porowatości (rys. 1). Na rys. 1 porównano także wartości modułu Younga pianek korundowych określone na podstawie symulacji numerycznej oraz obliczone na podstawie modelu Gibsona-Ashbiego z wartościami eksperymentalnymi metodą ultradźwiękową oraz metodą wzbudzenia impulsów zgodnie z normą ASTM [1]

[1] Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration, ASTM Designation: C 885-87; pp. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa.



Rys. 1. Wartości modułu Younga pianek korundowych określone na podstawie symulacji numerycznej i wyznaczone z modelu Gibsona-Ashbiego oraz wyznaczonymi eksperymentalnie metodą ultradźwiękową i metodą wzbudzenia impulsów.

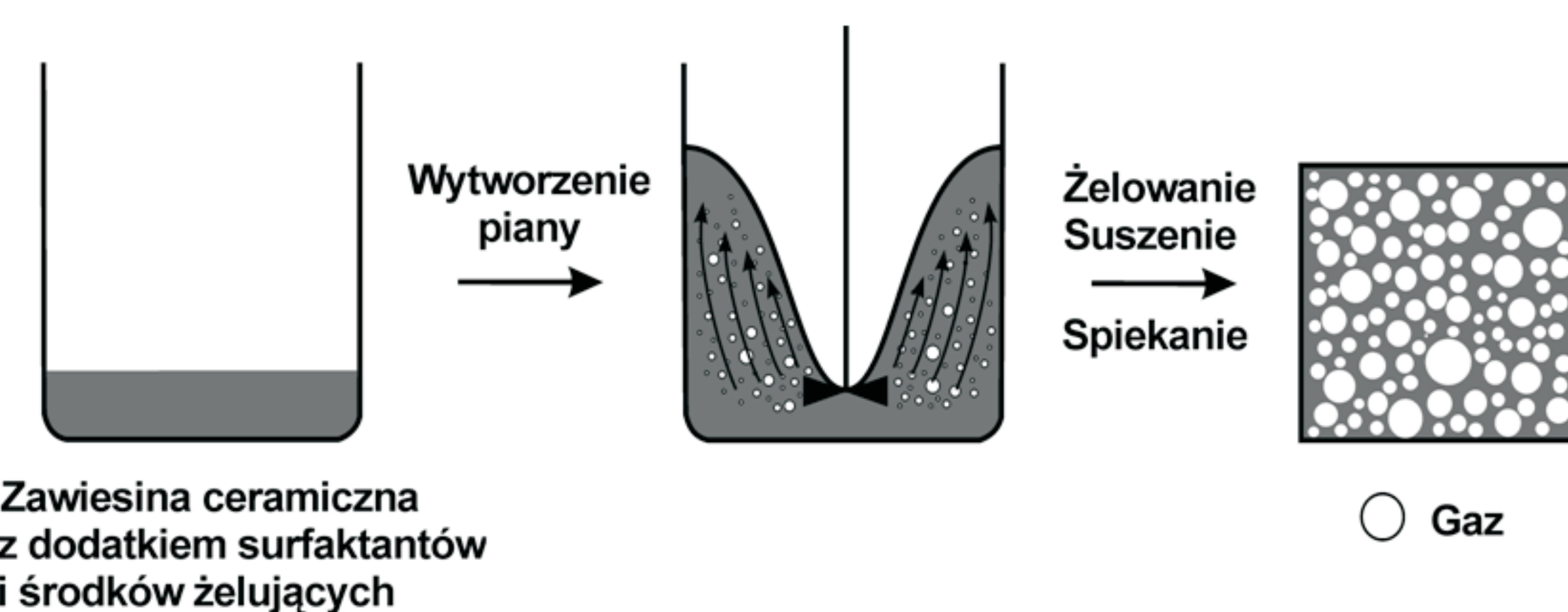
Fig. 1. Young modulus of alumina foams calculated on the base of numerical simulation and Gibson-Ashby model and those obtained by experimental ultrasonic and impulse excitation of vibration methods

Stwierdzono bardzo dobrą zgodność pomiędzy wartościami modułu Younga pianek korundowych wyznaczonych metodą symulacji numerycznej z wartościami eksperymentalnymi wyznaczonymi metodą ultradźwiękową i metodą wzbudzenia impulsów (rys. 1). Opracowany w tej pracy numeryczny model struktury przestrzennej pianki, a także zastosowana symulacja numeryczna w zakresie odkształceń liniowo-sprężystych nie uwzględniają występowania mikropęknięć w szkielecie ceramicznym. Stąd wartości modułu Younga wyznaczone na podstawie próby ściskania metodą symulacji numerycznej w warunkach nieniszczących pozostają w bardzo dobrej zgodności z wartościami wyznaczonymi eksperymentalnie metodami nieniszczącymi (rys. 1). Uzyskane wyniki potwierdzają krytyczne opinie na temat modelu Gibsona i Ashbiego przedstawione w literaturze, że przewidywanie wybranych właściwości mechanicznych ceramicznych materiałów piankowych na podstawie wspomnianego modelu jest ograniczone do zakresu bardzo dużych porowatości.

Opracowanie procesu wytwarzania kompozytów ceramiczno-polimerowych o wzajemnie przenikających się szkieletach

Infiltracja pianek ceramicznych ciekłymi metalami lub polimerami stwarza możliwość wytwarzania nowych kompozytów o wzajemnie przenikających się szkieletach fazy ceramicznej i polimerowej lub ceramicznej i metalicznej. Podstawowym kryterium doboru i projektowania ceramicznych materiałów piankowych jako kształtek do infiltracji ciśnieniowej ciekłymi metalami lub polimerami jest porowatość o charakterze prawie wyłącznie otwartym, wytrzymałość na ściskanie większa od ciśnienia progowego infiltracji i możliwie duża wartość przepuszczalności.

Do wytwarzania kompozytów Al₂O₃/żywica poliuretanowa zastosowano pianki korundowe o porowatości w zakresie 66-88% wytworzone metodą spieniania i żelowania przy użyciu agarozu jako środka żelującego. Schemat ideowy procesu wywarzania pianek ceramicznych metodą spieniania i żelowania (ang. gelcasting of foams) przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat ideowy procesu wywarzania pianek ceramicznych metodą spieniania i żelowania (ang. gelcasting of foams)

Fig. 2. Flowchart of gelcasting of foams method

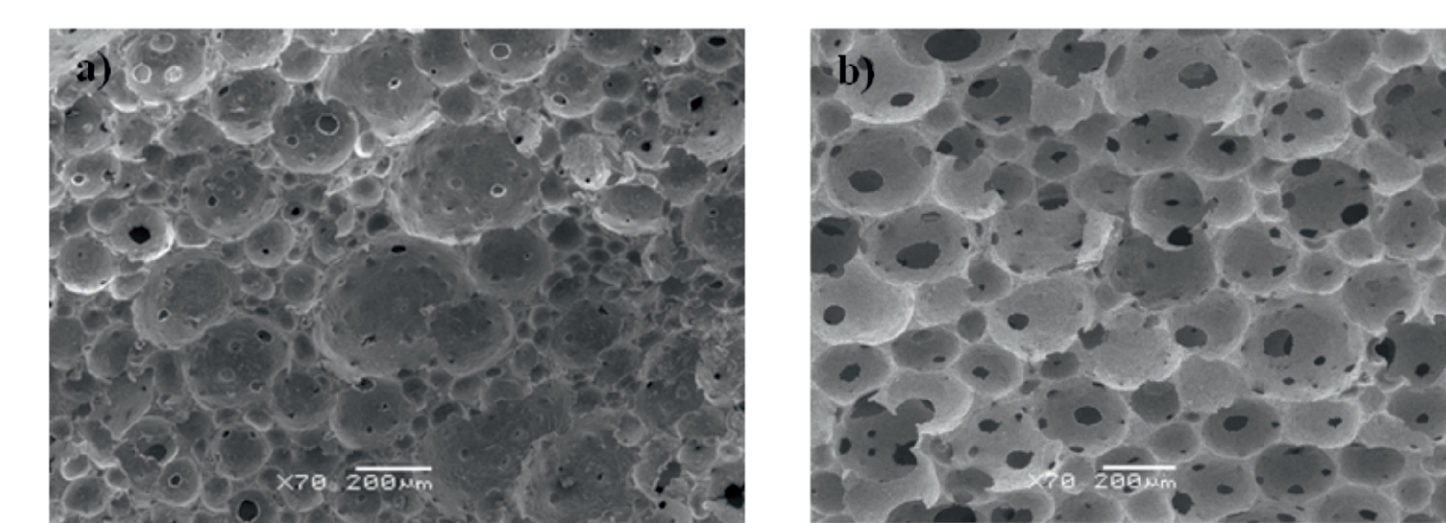
Przykładowe pianki korundowe przeznaczone do nasączenia ciekłymi polimerami pokazano na rys.3.



Rys. 3. Porowate kształtki korundowe wytworzone metodą żelowania spienionej zawiesiny przy użyciu agarozu jako środka żelującego

Fig. 3. Porous alumina bodies manufactured by gelcasting of foams method with the use of agarose as a gelling agent

Na rys. 4 pokazano obrazy SEM przełomów pianek korundowych o porowatości w zakresie 66-88% wytworzonych metodą żelowania spienionej zawiesiny. Porowate kształtki charakteryzują występowanie sferycznych makroporów, zwanych także komórkami piany, połączonych okienkami, które tworzą system wzajemnych połączeń między komórkami pianki, co sprawia, że porowatość próbki jest otwarta.



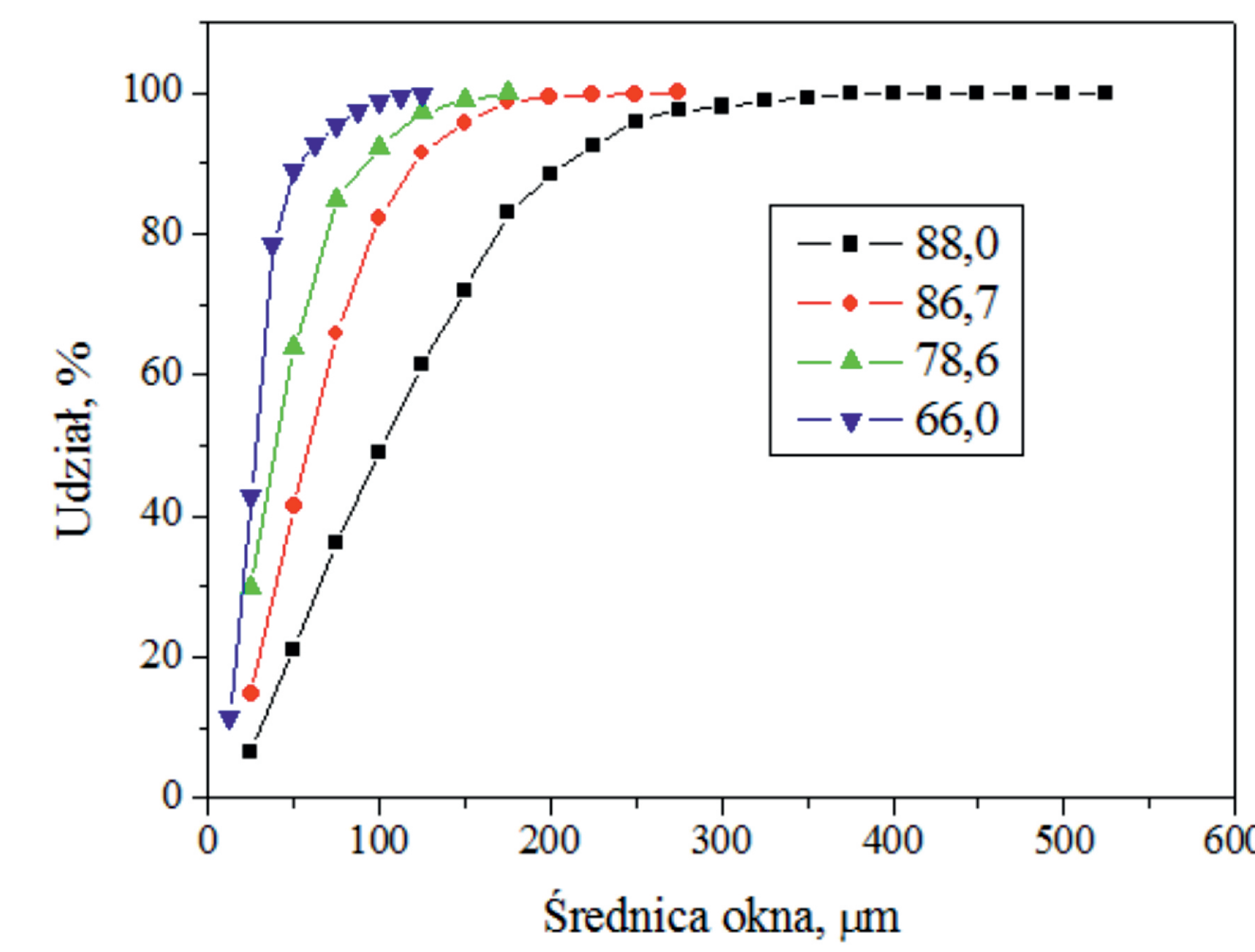
Rys. 4. Obrazy SEM ceramiki korundowej o porowatości w zakresie 66-88% wytworzonej metodą żelowania spienionej zawiesiny przeznaczonej do nasączenia ciekłym polimerem a) 66,0%, b) 78,6%, c) 86,7 %, d) 88,0%.

Przed procesem nasączenia pianki ciekłym polimerem, przeprowadzono jej charakterystykę geometryczną – określono rozmiar komórek i okien, a także mechaniczną – określono wytrzymałość na ściskanie i na zginanie (tabela 1).

Tabela 1. Fizyczne i mechaniczne parametry ceramiki porowatej przeznaczonej do nasączenia ciekłymi polimerami

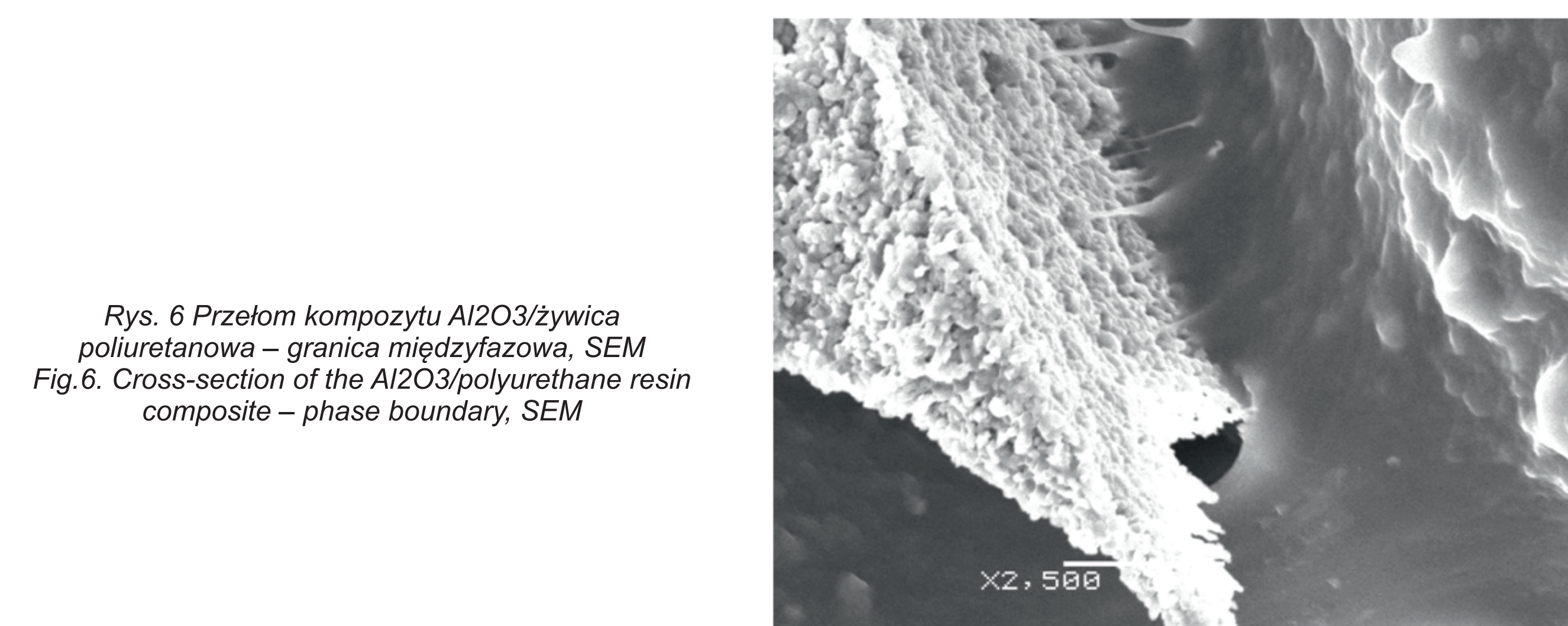
| Gęstość pozorna (g/cm ³) | Porowatość całkowita (%) | Wytrzymałość na zginanie (MPa) | Wytrzymałość na ściskanie (MPa) | Średni rozmiar komórki (µm) | Średni rozmiar okna (µm) |
|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 1,346 | 66,0 | 37,75 ± 3,54 | 91,62 ± 6,12 | 108 | 11 |
| 0,847 | 78,6 | 12,80 ± 1,14 | 29,21 ± 3,29 | 172 | 39 |
| 0,527 | 86,7 | 5,50 ± 0,53 | 8,18 ± 0,81 | 312 | 81 |
| 0,475 | 88,0 | 3,68 ± 0,49 | 5,23 ± 0,96 | 380 | 105 |

Na podstawie analizy obrazu określono rozmiar połączeń między makroporami (rys. 5).



Rys. 5. Rozkład średnic połączeń między porami w piance Al₂O₃ o porowatości w zakresie 66-88% uzyskany metodą analizy obrazu

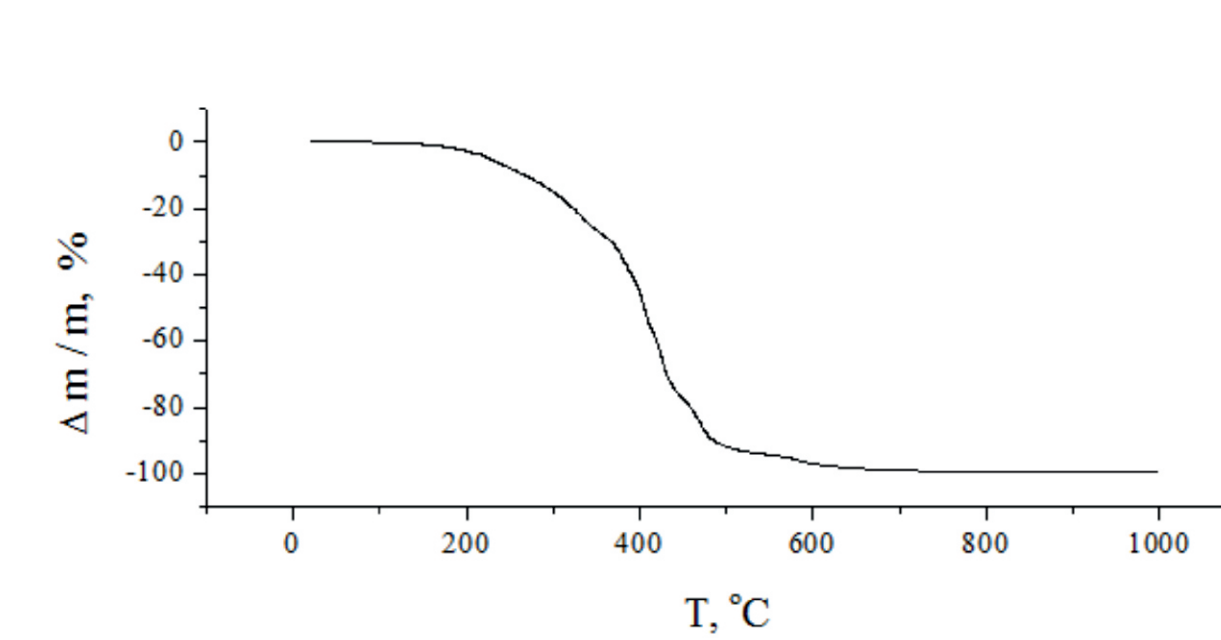
Fig. 5. Interconnected pore size distribution of the alumina foams within the porosity range 66-88% measured by image analysis.



Rys. 6. Przełom kompozytu Al₂O₃/żywica poliuretanowa – granica międzyfazowa, SEM

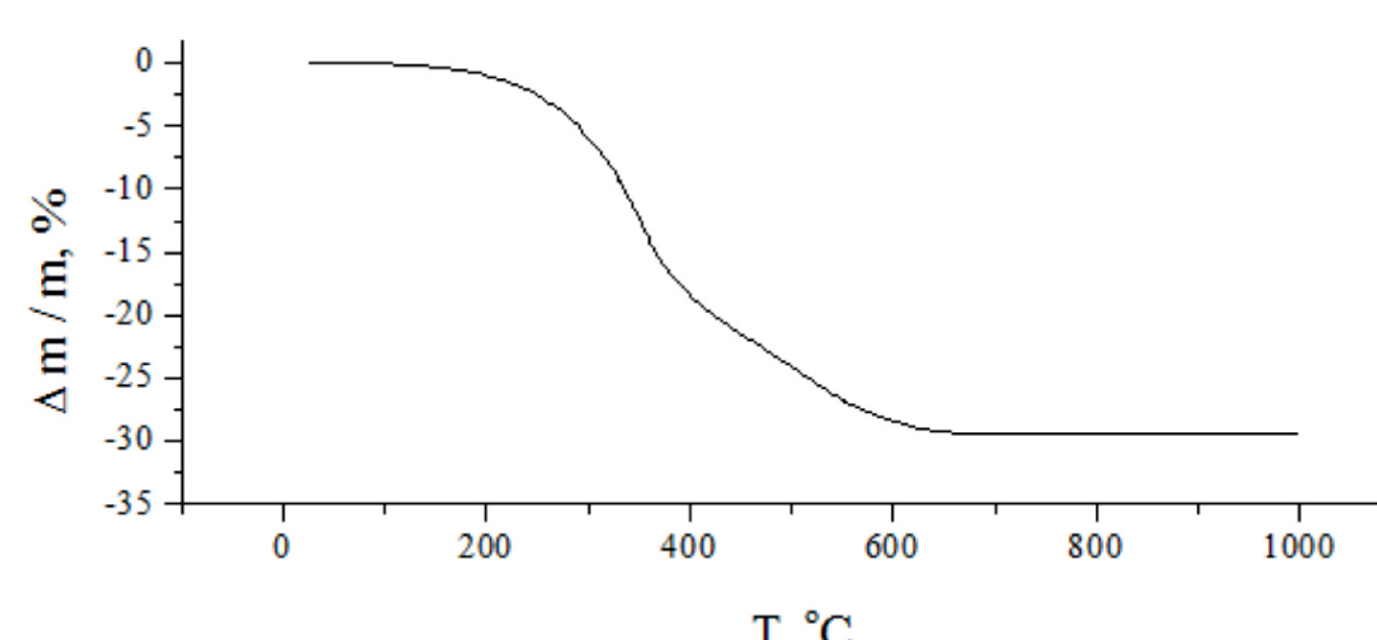
Fig.6. Cross-section of the Al₂O₃/polyurethane resin composite – phase boundary, SEM

Analiza termogravimetryczna (TG) wykazała, że zarówno żywica poliuretanowa (rys.7) jak i kompozyt Al₂O₃/żywica poliuretanowa (rys. 8) są stabilne do temperatury około 190°C. Powyżej 190°C zaczyna się stopniowy rozkład termiczny żywicy poliuretanowej. W temperaturze około 800°C żywica poliuretanowa jest całkowicie wypalona.



Rys. 7. Krzywa TG żywicy poliuretanowej w atmosferze powietrza

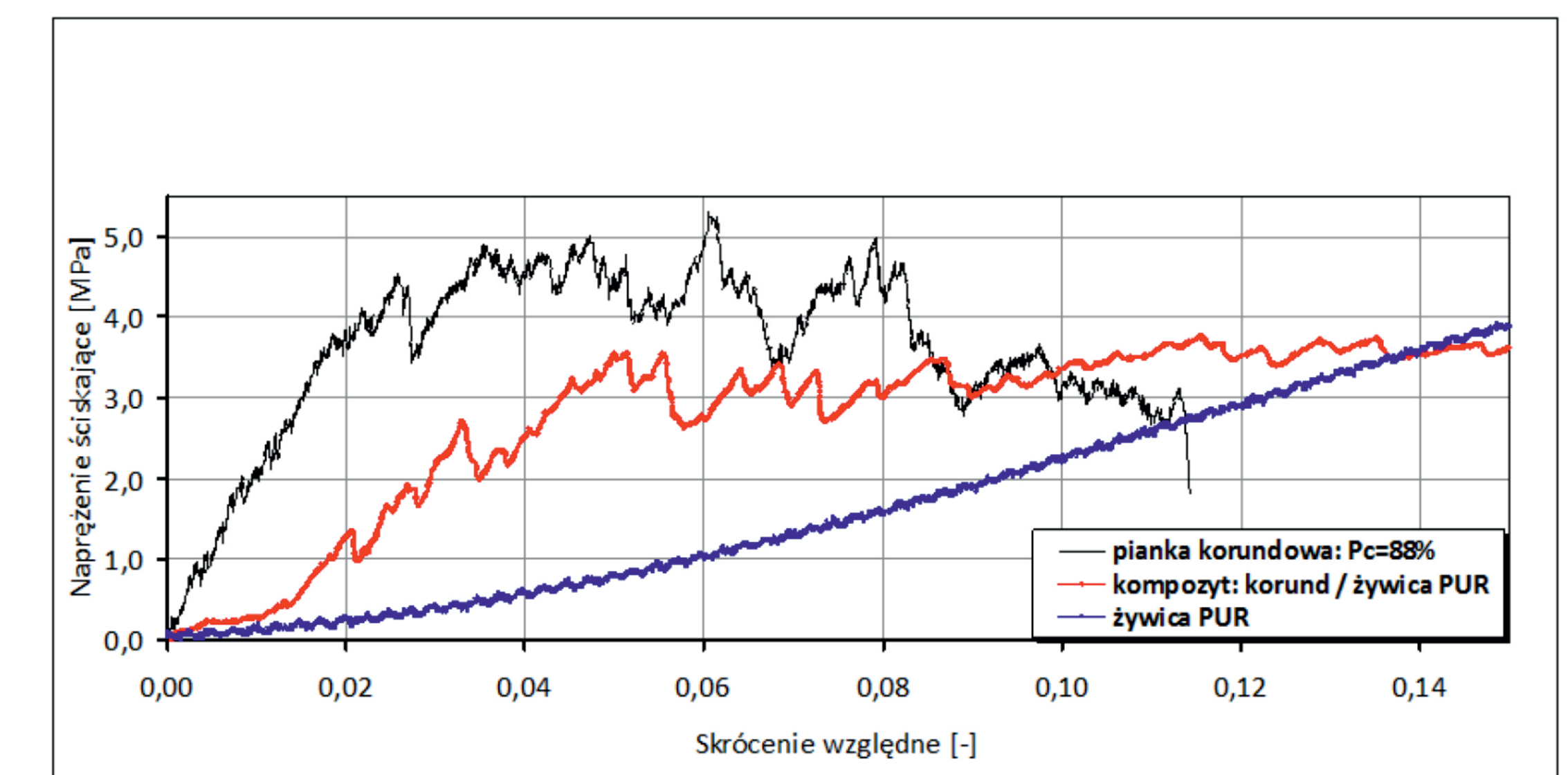
Fig. 7. TG curve of polyurethane resin in air.



Rys. 8. Krzywa TG kompozytu Al₂O₃/żywica poliuretanowa (85% obj. żywicy) w atmosferze powietrza

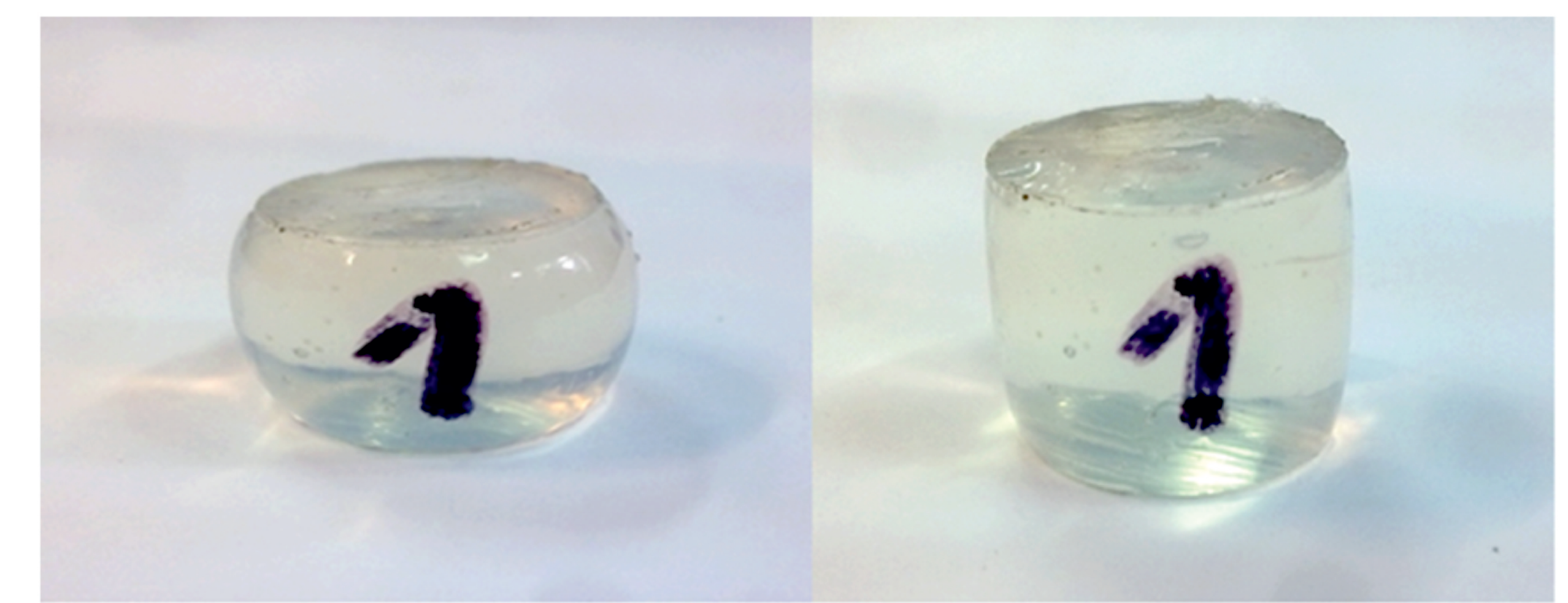
Fig. 8. TG curve of Al₂O₃/polyurethane resin composite (85 vol.% of resin) in air.

Na rys. 9 pokazano wykres zależności naprężenie ściskające – skrócenie względne dla kompozytu pianka korundowa/żywica poliuretanowa. Dla porównania na rys. 9 naniesiono dane dla materiału kruchego - pianka korundowa oraz dla elastomeru - żywica poliuretanowa. Pierwszym etapem ściskania jest zakres sprężysty. Następnie następuje przeniesienie obciążenia przez elastomer, który ulega znacznemu wybożeniu (rys. 10). Stąd zakres odkształcenia dla kompozytu jest większy niż dla pianki ceramicznej, ale kosztem niewielkiego obniżenia wytrzymałości na ściskanie. Niewielkie obniżenie wytrzymałości na ściskanie kompozytu spowodowane jest działaniem naprężeń rozciągających w kierunku prostopadłym do osi ściskania pod wpływem wybożenia komponentu elastomerowego (rys.10). Wytrzymałość na rozciąganie dla materiałów ceramicznych jest znacznie mniejsza niż wytrzymałość na ściskanie.



Rys. 9. Naprężenie ściskające – skrócenie względne dla kompozytu korund/żywica poliuretanowa oraz dla pianki korundowej i żywicy poliuretanowej

Fig. 9. Compression stress – strain for the alumina/polyurethane resin composite, alumina foam and polyurethane resin.



Rys. 10. Próba z żywicy poliuretanowej poddanej obciążeniu ściskającemu: (a) – bezpośrednio po usunięciu obciążenia ściskającego, (b) – po 5 min. od usunięcia obciążenia ściskającego.

Fig. 10. Polyurethane resin sample after compression strength test: (a) – immediately after removing compression load, (b) – 5 minutes after removing compression load.

Wnioski Conclusions

1. Stwierdzono bardzo dobrą zgodność modułów Younga pianek korundowych pomiędzy wartościami doświadczalnymi wyznaczonymi ultradźwiękowo oraz metodą wzbudzenia impulsów a symulacją numeryczną z zastosowaniem metody elementów skończonych.
2. Wytworzone pianki korundowe przeznaczone do nasycania polimerami charakteryzowały się porowatością w zakresie 66-88%, średnią średnicą komórek od 108 do 308 µm i średnią średnicą okien od 11 do 105 µm. Wytrzymałość na ściskanie wynosiła od 5,3 do 91,6 MPa, a wytrzymałość na zginanie zawarta była w zakresie 3,7 – 37,7 MPa. Duże, jak na materiały wysokoporowate, wartości parametrów mechanicznych wynikają z dobrze zagęszczonego szkieletu ceramicznego wytworzonego przez spienianie zawiesin korundowych z rozpuszczoną agarozą.
3. Opracowano technologię wytwarzania kompozytów ceramiczno-polimerowych: korund-żywica poliuretanowa poprzez infiltrację dyspersyjnej żywicy poliuretanowej do pianki ceramicznej.
4. Kompozyt Al₂O₃/żywica poliuretanowa w próbie ściskania wykazywały właściwości typowe dla połączenia materiału kruchego z elastomerem.

Conclusions:

1. The simulated values of the elastic modulus of alumina gelcast foams showed very good agreement with the real experimental tests by impulse excitation of vibration and ultrasound.
2. The ceramic foams designed for polymer infiltration were characterized by porosity in the range 66-88%, average cell diameter of 108-308 µm, average window diameter of 11-105 µm. In the porosity range 66-88% the compressive and flexural strengths were found to be 5,2-91,6 MPa and 3,7-37,7 MPa, respectively. High mechanical strengths of these porous materials are due to dense ceramic skeleton. The ceramic skeleton was manufactured by foaming of alumina suspensions containing agarose.
3. The fabrication process of ceramic-polymer composites (Al₂O₃/polyurethane resin) was development via infiltration of dispersed polyurethane resin into alumina foams.
4. The composites Al₂O₃/polyurethane resin in compression test showed typical behavior for ceramic-elastomer joints.

Przykłady zastosowania w lotnictwie Examples of application in aviation

Możliwość 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 tioków

Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

Referaty

1. M. Potoczek, R.E. Śliwa: „Porous ceramics for metal-ceramic and polymer-ceramic interpenetrating composites” 8-th International Conference “Supply on the Wings”, November 5-7, 2013, Frankfurt, Germany.

Publikacje

M. Potoczek „Kształtowanie mikrostruktury piankowych materiałów korundowych” Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2012

Prace hab., dr, mgr.

Prace magisterskie

- Joanna Ligoda „Właściwości fizyczne i mechaniczne kompozytów na osnowie ceramiki porowatej” Wydział Chemiczny, Politechnika Rzeszowska: opiekun dr inż. Marek Potoczek. Termin obrony pracy mgr: koniec czerwca 2013.

Praca Habilitacyjna

Tytuł: „Design of the microstructure of alumina foams”

Autor: M. Potoczek

Złożenie wniosku i dokumentacji o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa do Centralnej Komisji do Spraw Stopni i Tytułów w dniu 16.05.2013.