

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 matrycy do infiltracji metalami i polimerami.

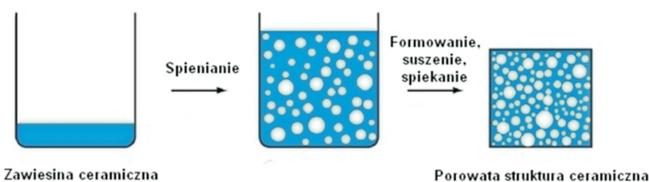
Design of alumina bodies having foam structure as a preforms for metal and polymer infiltration

Izolacja cieplna i akustyczna powinna charakteryzować się jak najniższą wartością współczynnika przewodzenia ciepła, tłumić dźwięki w określonych zakresach częstotliwości, być odporną na oddziaływanie ognia, czy wilgoci. Ponadto, powinna mieć dobre właściwości mechaniczne, pracować w dużym zakresie temperatur oraz oznaczać się względnie niską ceną. Obecnie stosowane izolacje akustyczne i termiczne można podzielić na trzy rodzaje: organiczne materiały porowate, nieorganiczne materiały porowate oraz metalowe materiały porowate. Powszechnie wykorzystywane piankowe wyroby poliuretanowe mogą być stosowane w zakresie temperatury od -150 do +150, krótkotrwale do 250°C. Z kolei wełna szklana, chętniej używana w technice izolacyjnej, m.in. z uwagi na niskie koszty produkcji oraz łatwość montażu, jest niebezpieczna dla zdrowia i ma tendencję do chłonięcia wody oraz zbijania się, przez co traci swoje cenne właściwości izolacyjne. Ze względu na toksyczny proces produkcji włókien szklanych, a także toksyczność samych włókien, w najbliższej przyszłości także materiały włókniste będą musiały zostać zastąpione materiałami piankowymi, np. z tradycyjnego SiO₂ lub z węglików o budowie nanolaminatu Ti₂AlC. Ponadto, porowata struktura pianki ceramicznej o małej gęstości, wykonana z Al₂O₃ dodatkowo infiltrowana polimerem o małej lepkości lub kompozytu typu „sandwich” na osnowie pianki ceramicznej z dwiema warstwami polimeru, daje możliwość wytworzenia materiałów lekkich, z możliwością ukierunkowania tego typu kompozytów pod kątem określonych zastosowań, m.in. w przemyśle lotniczym jako bariery akustyczne.

Thermal and acoustic insulations should be characterized by low coefficient of thermal conductivity, resistance of the fire or moisture. In addition, it should have good mechanical properties, absorb the sound in accurate frequency area, work in a wide temperature range and characterized by quite low costs. In these days, some acoustic and thermal insulations can be found as organic porous materials, inorganic porous materials and metal porous materials. The polyurethane foams, commonly used, can work in the temperature range from -150 to +150, sometimes to 250°C. In turn, glass wool, often used in insulation technology, including the low production costs and ease installation, it is dangerous to health and tends to absorb water and clump together, so in consequence lost their valuable insulating qualities. Due to the toxic process of manufacture the glass fiber and the toxicity of the fibers, in the near future it will be necessary to include the fibrous materials and replace by foam materials, such as SiO₂ or Ti₂AlC. Furthermore, the ceramic porous structure characterized by low density such as Al₂O₃ can be infiltrated by polymer with low viscosity or can be produced "sandwich" composites with ceramic matrix and polymer alloys, so it is possible to produce lightweight materials, with the possibility of targeting these types of composite materials for specific applications, such as in the aerospace industry as acoustic barriers.

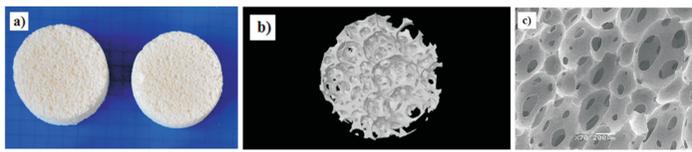
Wytwarzanie pianek ceramicznych z Al₂O₃, SiO₂ i Ti₂AlC metodą żelowania spienionej zawiesiny

Pianki ceramiczne Al₂O₃, SiO₂ i Ti₂AlC wytworzono metodą żelowania spienionej zawiesiny (rys. 1). Bezpośrednie spienianie pozwala na wytworzenie kształtek ceramicznych charakteryzujących się niemal wyłącznie porowatością otwartą. Polega na dodaniu do upłyniętej zawiesiny ceramicznej środka pianotwórczego, następnie mechanicznym spienieniu i natychmiastowym utwardzeniu struktury piany w formie poprzez wytworzenie hydrożelu w wyniku reakcji polimeryzacji monomerów rozpuszczonych w zawieszynie ceramicznej. Surową, porowatą kształtkę ceramiczną poddaje się procesom suszenia, a następnie wypalania spoiwa organicznego oraz spiekania w określonej temperaturze.



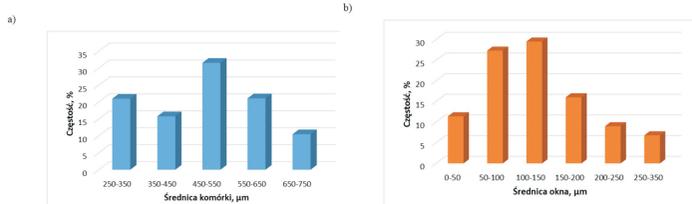
Rys. 1. Schemat procesu wytwarzania pianek ceramicznych metodą żelowania spienionej zawiesiny.
Fig. 1. Scheme of the alumina foam manufacture process, known as gel-casting method.

Ceramiczne materiały piankowe otrzymane metodą gel-casting charakteryzują się występowaniem sferycznych makroporów, zwanych także komórkami, połączonych ze sobą za pomocą okienek, które tworzą system wzajemnych połączeń pomiędzy komórkami piany. Z technologicznego punktu widzenia wytwarzanie pianek o porowatości wyłącznie otwartej jest bardzo istotne, ponieważ oznacza, że materiał zawierający pory otwarte jest przepuszczalny dla cieczy i gazów i stwarza dobre warunki hydrodynamiczne. Na rys. 2 przedstawiono zdjęcia pianek wykonanych z Al₂O₃ o porowatości całkowitej 92% wykonane cyfrowym aparatem fotograficznym (rys. 2a), przy użyciu mikrotomografii komputerowej (rys. 2b) oraz skaningowym mikroskopie elektronowym (rys. 2c).



Rys. 2. Pianki korundowe o porowatości całkowitej 92% wykonane metodą żelowania spienionej zawiesiny (a), obraz pianki korundowej z mikrotomografu (b), SEM pianki korundowej (c).
Fig. 2. The alumina foam samples with total porosity of 92% made by gelcasting of foams method (a), microtomography of alumina foam (b), SEM image of the alumina foam (c).

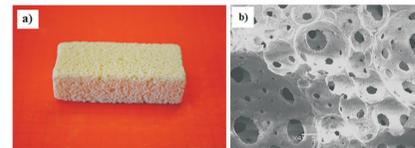
Jednymi z najistotniejszych parametrów, charakteryzujących tworzywo porowate są średnice porów i okienek, a także rozkład ich wartości, które określają gazo- i cieczoprzepuszczalność, opory przepływu, zdolność filtrującą, a także wytrzymałość mechaniczną tworzywa porowatego. Metodą analizy obrazu wyznaczono średnice zastępcze komórek i okienek pianki korundowej Al₂O₃ o porowatości całkowitej 92% (rys. 3).



Rys. 3. Rozkład rozmiarów średnic komórek (a) i średnic okienek (b) w piance Al₂O₃ o porowatości całkowitej 92%.
Fig. 3. Cell size distribution (a) and window size distribution (b) for Al₂O₃ foam with total porosity of 92%.

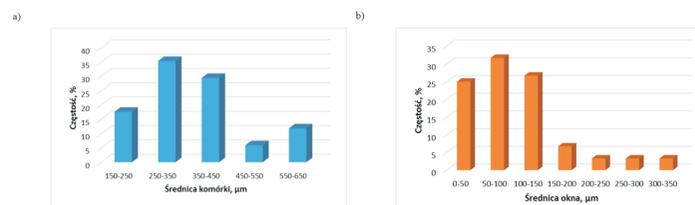
Wyniki badań Results

W badaniach eksperymentalnych wykonano również porowate kształtki ceramiczne z SiO₂. Produkty krzemionkowe wykazują znaczącą odporność na korozję i odporność na wstrząsy cieplne, niski współczynnik rozszerzalności cieplnej, a także dobre właściwości izolacyjne. Te właściwości sprawiają, są doskonałym kandydatem do produkcji materiałów strukturalnych i funkcjonalnych w wielu dziedzinach, w tym szkła, metalu, czy przemysłu lotniczego. Na rys. 4 przedstawiono zdjęcia pianki o porowatości całkowitej 86% wykonanej z SiO₂.



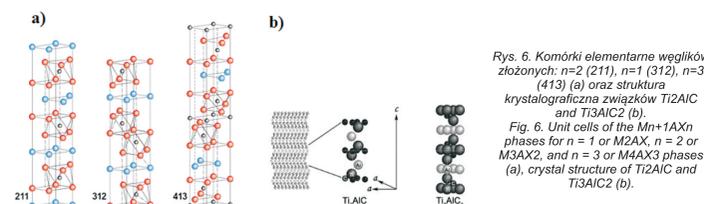
Rys. 4. Pianka z SiO₂ o porowatości całkowitej 86% wykonana metodą żelowania spienionej zawiesiny (a), obraz SEM pianki wykonanej z SiO₂ (b).
Fig. 4. The SiO₂ foam sample with total porosity of 86% made by gelcasting of foams (a), SEM image of the SiO₂ foam (b).

Metodą analizy obrazu wyznaczono również średnice zastępcze komórek i okienek pianki z SiO₂ o porowatości całkowitej 86% (rys. 5).



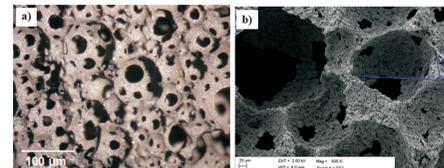
Rys. 5. Rozkład rozmiarów średnic komórek (a) i średnic okienek (b) w piance z SiO₂ o porowatości całkowitej 86%.
Fig. 5. Cell size distribution (a) and window size distribution (b) for SiO₂ foam with total porosity of 86%.

Badania wstępne przeprowadzono również dla węglików o budowie nanolaminatu (ang. MAX phases). Są to układy trójskładnikowe o ogólnym wzorze Mn+1AX_n, gdzie: n=1-3, przy czym M jest to metal przejściowy grupy IIIA i IVA, natomiast X jest atomem węgla lub azotu. Związki te posiadają niezwykle właściwości. Z jednej strony zachowują się jak metale, dotyczy to ich łatwej obrabialności, przewodności cieplnej i elektrycznej. Z drugiej strony pod względem sztywności, odporności na utlenianie i odporności termicznej, zachowują się jak ceramika. Do tej grupy należy m.in. Ti₂AlC. Właściwości pianek wykonanych z tego materiału, z uwagi na ich właściwości samosmarujące. Mogą być bardzo interesujące dla zastosowań przemysłowych, m.in. materiałów o wysokiej wydajności. Do nanolaminatów w układzie Ti-Al-C-N należą potrójne związki typu 211, 312 oraz 413 (rys. 6a), takie jak np. Ti₂AlC, Ti₃AlC₂, i Ti₂AlN (rys. 6b).



Rys. 6. Komórki elementarne węglików złożonych: n=2 (211), n=1 (312), n=3 (413) (a) oraz struktura krystalograficzna związków Ti₂AlC i Ti₃AlC₂ (b).
Fig. 6. Unit cells of the Mn+1AX_n phases for n = 1 or M₂AX, n = 2 or M₃AX₂, and n = 3 or M₄AX₃ phases (a), crystal structure of Ti₂AlC and Ti₃AlC₂ (b).

Do podstawowych zalet nanolaminatów jako materiałów konstrukcyjnych zaliczyć można: wysoką sztywność (315-360 GPa), dobrą odporność na kruche pęknięcie (6,5-9,5 MPa.m^{0,5}), stosunkowo wysoką energię pęknięcia (~60 J.m⁻³), dobrą wytrzymałość (~650 MPa), stosunkowo niewielką twardość (~3 GPa) oraz dobrą odporność chemiczną i termiczną. Wysoka wartość odporności na kruche pęknięcie w połączeniu z możliwością deformacji plastycznej jest wynikiem działania złożonego mechanizmu pęknięcia, który dodatkowo zależy od mikrostruktury materiału, zwłaszcza od wielkości, kształtu i wzajemnej orientacji ziaren. Morfologię ceramiki węglikowej Ti₂AlC otrzymanej przy użyciu 3% roztworu agarozy po procesie suszenia oraz SEM pianki z Ti₂AlC po spiekaniu przedstawiono na rys. 7.

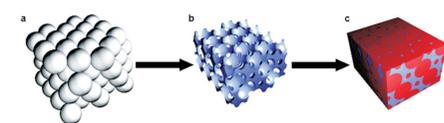


Rys. 7. Morfologia ceramiki węglikowej (Ti₂AlC) otrzymanej przy użyciu 3% roztworu agarozy (po procesie suszenia) (a), SEM pianki z Ti₂AlC po spiekaniu (b).
Fig. 7. Ti₂AlC morphology obtained by using 3% of agarose solution (after drying) (a), SEM image of the Ti₂AlC foam after sintering (b).

Za wielkość komórek piany i okienek na ściankach komórek odpowiedzialne są procesy utarty stabilności piany (ociękanie kapilarne lub grawitacyjne oraz rozrost pęcherzyków piany), które zachodzą od początku jej wytwarzania, aż po utwardzenie przez żelowanie. W materiałach piankowych wytwarzanych metodą żelowania spienionej zawiesiny rozmiar komórek i okienek zależy od wielu czynników, tj. lepkości zawiesiny, stężenia surfaktanta, prędkości obrotowej mieszadła oraz czasu spieniania.

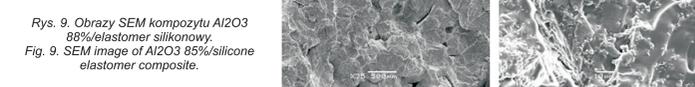
Wytwarzanie i charakterystyka kompozytów pianka korundowa/elastomer silikonowy

Podstawowym warunkiem wytworzenia kompozytów ceramiczno-polymerowych o wzajemnej perkolacji faz był dobór odpowiedniego wypełnienia polimerowego. Przy wyborze polimeru kierowano się przede wszystkim jego małą lepkością (w zakresie 500-1500 mPa·s), warunkującą przenikanie polimeru do pianek ceramicznych bez jej uszkodzenia pod wpływem podciśnienia w procesie infiltracji, a także minimalnym skurczem utwardzania. Kompozyty wytworzone w procesie infiltracji próżniowej (rys. 8) elastomerem silikonowym do pianki korundowej o porowatości całkowitej 88% w komorze próżniowej Nüve EV018.



Rys. 8. Schemat procesu wytwarzania kompozytów ceramiczno-polymerowych o strukturze infiltrowanej: a) polimer, b) pianka ceramiczna, c) kompozyt ceramiczno-polymerowy.
Fig. 8. Scheme of the ceramic foam with polymer solution infiltration: a) polymer, b) ceramic foam, c) ceramic-polymer composite.

Badania morfologii kompozytów przeprowadzono przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego, co pozwoliło na dokładne poznanie mikrostruktury porów wewnątrz pianek korundowych po zapełnieniu ich elastomerem silikonowym i ocenę stopnia przylegania polimeru do ceramicznej osnowy (rys. 9).



Rys. 9. Obrazy SEM kompozytu Al₂O₃ 85%/elastomer silikonowy.
Fig. 9. SEM image of Al₂O₃ 85%/silicone elastomer composite.

Dla wytworzonych kompozytów Al₂O₃ 85%/elastomer silikonowy oraz niezapelnionych pianek korundowych oraz dodatkowo wytworzonych kompozytów warstwowych (elastomer-pianka korundowa-elastomer) zmierzono poziomy hałas za przegrodami (rys. 10a) wykonanymi z

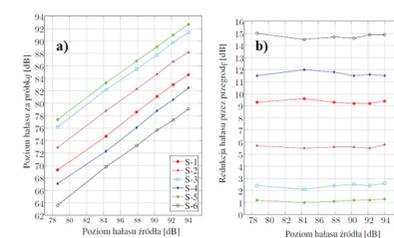
pianek Al₂O₃: S-3 i S-5, elastomerów silikonowych: S-2 i S-4 oraz kompozytu pianka korundowa/elastomer silikonowy o strukturze infiltrowanej: S-6 i kompozytu pianka korundowa/elastomer silikonowy o strukturze infiltrowanej: S-1. Charakterystykę próbek przedstawiono w tabeli 1. Badania wykonano w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN przez dr inż. Tomasza Zielińskiego.

Tabela 1. Charakterystyka pianek korundowych i kompozytów poddanych badaniom akustycznym.
Table 1. Characteristic of the alumina foam and composite samples designed for acoustic tests

Nr próbki	Głębokość [mm]	Masa [g]	Gęstość [g/cm ³]
S-1	14,7	7,6	0,82
S-2	13,7	8,7	1,04
S-3	14,4	4,2	0,45
S-4	7,8	5,9	1,18
S-5	8,9	2,1	0,36
S-6	10,5	8,9	1,28



Pomiary sporządzono dla sześciu poziomów szerokokąsowego hałasu, tj.: 78.6 dB, 84.3 dB, 87.9 dB, 90.3 dB, 92.2 dB oraz 94.0 dB. Dodatkowo na rys. 10b przedstawiono stopień redukcji poziomu hałasu przez przegrodę akustyczną, obliczony jako różnica poziomu hałasu źródłowego i hałasu zmierzonego za przegrodą.



Rys. 10. Poziom redukcji hałasu za przegrodami wykonanymi z pianek Al₂O₃: S-3 i S-5, elastomerów silikonowych: S-2 i S-4 oraz kompozytu pianka korundowa/elastomer silikonowy o strukturze infiltrowanej: S-6 i kompozytu pianka korundowa/elastomer silikonowy o strukturze infiltrowanej: S-1 (a). Stopień redukcji poziomu hałasu przez przegrodę akustyczną, obliczony jako różnica poziomu hałasu źródłowego i hałasu zmierzonego za przegrodą (b).
Fig. 10. The noise level reduction behind of the barriers made from Al₂O₃ foams: S-3 and S-5; silicone elastomers: S-2 and S-4; alumina foam/silicone composites with an infiltrated network structure: S-6 and the alumina foam/silicone layer structure composite: S-1 (a). Degree of the noise reduction by the sound barrier, calculated as difference between noise source and noise measured behind of barrier (b).

Wnioski Conclusions

1. Metodą żelowania spienionej zawiesiny możliwe jest wytworzenie pianek ceramicznych (Al₂O₃, SiO₂, Ti₂AlC) o charakterystycznej mikrostrukturze, prognozowanej porowatości, średnicy zastępczej makroporów oraz średnicy ich wzajemnych połączeń w wyniku kontrolowania procesów fizycznych i chemicznych podczas spieniania i żelowania. 2. Pianki ceramiczne wytworzone z Al₂O₃, SiO₂ oraz Ti₂AlC oraz kompozyty pianka ceramiczna-polymer (lub pianka ceramiczna-metal) o strukturze infiltrowanej stwarzają możliwość otrzymania nowych materiałów o wybranych właściwościach funkcjonalnych przy jednocześnie małej gęstości.

Conclusions

1. Gel-casting of foams method makes possibility to prepare the ceramic foams (with Al₂O₃, SiO₂ and Ti₂AlC) characteristic microstructure, predicted porosity, mean diameter of the macropores and diameter of their interconnections by controlling physical and chemical processes during the foaming and gelling steps. 2. Ceramic foams made from Al₂O₃, SiO₂ and Ti₂AlC and alumina foam matrix composites are good candidates to obtain a new materials with selected functional characteristics with the low density simultaneously.

Przykłady zastosowania w lotnictwie Examples of application in aviation

Kompozyty na osnowie pianki ceramicznej: osłony akustyczne i balistyczne. -Gęsty Ti₂AlC: elementy grzewcze, dysze, łożyska wysokotemperaturowe, elektrody wysokotemperaturowe, warstwy ochronne na krytyczne części silnika, absorbery drgań mechanicznych, powierzchnie elektrycznych kontaktów ślizgowych. -Porowaty Ti₂AlC: osnowy kompozytów ceramiczno-metalicznych, a także przewodzące prąd elektryczny podłoża katalizatorów.

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

-Ceramic matrix composites: acoustic and ballistic shields. -Dense Ti₂AlC: heating elements, nozzles, bearings, high temperature, high temperature electrode, the protective layers on the critical engine parts, mechanical vibration absorbers, the surfaces sliding electrical contacts -Ti₂AlC foam: matrix of the ceramic-metal composites, as well as electrically conducting substrate of catalytic converters.

Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

Referaty:

- M. Potoczek, R.E. Śliwa: „Thermal insulations made of ceramic foams for aerospace applications”, AIRTEC - 10th International Aerospace Supply Fair, Munich, Germany, November 3-5, 2015.
- M. Potoczek, R.E. Śliwa, A. Chmiel, D. Dyndał: „Nanolaminated ternary carbides preforms for metal-ceramic interpenetrating composites”, AIRTEC - 10th International Aerospace Supply Fair, Munich, Germany, November 3-5, 2015.
- J. Ligoda-Chmiel, R. E. Śliwa, M. Potoczek: „Acoustic absorption of ceramic foam matrix composites”, AIRTEC - 10th International Aerospace Supply Fair, Munich, Germany, November 3-5, 2015.
- J. Ligoda-Chmiel, R. E. Śliwa, M. Potoczek: „Mechanical properties of ceramic foam/epoxy resin composites with an interpenetrating network structure”, ICCE - 23, 23rd Annual International Conference on Composites/Nano Engineering, Chengdu, China, July 12-18, 2015.
- J. Ligoda-Chmiel, R. E. Śliwa, M. Potoczek: „Mechanical and functional properties of the alumina foam/tri-functional epoxy resin composites with an interpenetrating network structure”, ICCST - 10, 10th International Conference on Composite Science and Technology, Lisboa, Portugal, September 2-4, 2015.

Publikacje:

- J. Ligoda, M. Potoczek, R. E. Śliwa: „Mechanical properties of alumina foam/tri-functional epoxy resin composites with an interpenetrating network structure”, Archives of Metallurgy and Materials, nr 4/2015, vol. 60.
- J. Ligoda, M. Potoczek, R. E. Śliwa: „Flammability and acoustic absorption of alumina foam/tri-functional epoxy composites manufactured by the infiltration process”, Elsevier; Composites Part B: Engineering. Artykuł w trakcie recenzji.

Prace mgr, dr, hab.

Prace doktorskie:

- mgr inż. Joanna Ligoda-Chmiel: „Właściwości kompozytów ceramiczno-polymerowych do zastosowań w konstrukcjach lotniczych”. Promotor: dr hab. inż. Marek Potoczek. Praca w trakcie realizacji.

Prace magisterskie:

- inż. Dominik Dyndał: „Nowoczesne metody wytwarzania materiałów porowatych”, Promotor: dr hab. inż. Marek Potoczek
- inż. Katarzyna Rzeszutek: „Pianki ceramiczne stabilizowane nanocząstkami”, Promotor: dr hab. inż. Marek Potoczek