

Biomimetyczne metody otrzymywania materiałów z wykorzystaniem organicznych prekursorów

Dr inż. Krzysztof Kogut, ORCID: 0000-0002-9985-6815, Dr inż. Krzysztof Kasprzyk, ORCID: 0000-0001-8365-6838,

Renata Kłóś, ORCID: 0000-0002-5917-8239

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki, Centrum Badawcze Materiałów Elektrotechnicznych we Wrocławiu

Słowa kluczowe

biomimetyka, muszle, drzewo, materiały ceramiczne, metoda hydrotermalna, piroliza

Keywords

biomimetics, shells of shellfish, wood, ceramic materials, hydrothermal method, pyrolysis

Streszczenie

W pracy przedstawiono metody biomimetyczne otrzymywania materiałów. Przedstawiono dwa przykłady otrzymania materiałów o potencjalnym zastosowaniu w implantologii z wykorzystaniem metod hydrotermalnych oraz pirolizy i infiltracji. Jako prekursorzy zastosowano muszle mięczaków oraz różne gatunki drzew. Wykonano badania dyfraktometryczne oraz analizy mikroskopowe. Stwierdzono, że możliwe jest uzyskanie materiałów ceramicznych o oczekiwanej strukturze metodami biomimetycznymi.

Summary

Biomimetic methods for obtaining materials from organic precursors

This paper presents the biomimetic methods of the obtaining materials. Two examples of the obtaining materials with the use of hydrothermal and pyrolysis and infiltration methods, with possibility to implants application, was showed. As a precursor the shells of shellfish and different type of wood was used. The X-ray and microscopic analysis were carried out. It was found that is possible to obtain the ceramic material with required structure by biomimetic methods.

Wprowadzenie

Natura jest najlepszym źródłem inspiracji, podpowiadającym badaczom ciekawe rozwiązania technologiczne i konstrukcyjne. Jej uważna obserwacja pomogła naukowcom w rozwoju nowego działu nauki – biomimetyki.

Polega ona na odwzorowaniu rozwiązań, które występują w naturze (w świecie roślin i zwierząt): zachowań, struktur, kształtów i procesów.

Doskonałym przykładem są materiały spotykane w różnych miejscach flory i fauny, takie jak: pajęczyna, struktura liścia lotosu czy też skóra rekina. Charakteryzują się one wyjątkowymi właściwościami. W przypadku skóry rekina można powiedzieć o wykorzystaniu właściwości ząbkowanych łusek układających się podczas ruchu w wodzie w sposób umożliwiający energooszczędne przemieszczanie oraz zabezpieczający przed pasożytami i ranami spowodowanymi mechanicznymi otarciami o skały¹. Najnowszy pomysł Akademii Marynarki Wojennej (AMW) to między innymi biomimetyczne roboty podwodne, które wielkością i sposobem poruszania do złudzenia przypominają ryby². Innym bardzo ciekawym przykładem właściwości natury są liście lotosu, które mają superhydrofobową powierzchnię niespotykaną w rozwiązaniach przemysłowych.

Niestety, nawet współczesny postęp technologiczny nie jest w stanie dokładnie odwzorować tych materiałów. Niemniej jednak obserwacja natury może być znakomitym źródłem inspiracji.

Z biomimetyką można się spotkać w różnych dziedzinach życia począwszy od medycyny, inżynierii materiałowej, informatyki aż po kosmetologię.

Przykładowo, w elektrotechnice wykonywane są próby odwzorowania struktury wspomnianych wcześniej liści lotosu na powierzchni izolatorów, dzięki czemu można uzyskać powierzchnię umożliwiającą samooczyszczanie izolatorów poprzez zbieranie zabrudzeń przez staczające się po powierzchni kloszy krople deszczu.

Jednym z obszarów biomimetyki są biomateriały, np. materiały kompozytowe wytworzone przez organizmy żywe, mające korzystne właściwości fizyczne i mechaniczne. Odtworzenie biomateriałów w warunkach laboratoryjnych (opracowanie technologii wytwarzania) wymaga dokładnego poznania ich budowy, składu i struktury zarówno w skali makro jak i mikro.

We współczesnej medycynie pożądane są nowoczesne materiały bioceramiczne. Jednym z przykładów jest ceramika hydroksyapatytowa oparta na fosforanach wapnia. Uważa się ją obecnie za jeden z lepszych materiałów implantacyjnych³⁻⁷. Hydroksyapatyt (HAp) jest głównym nieorganicznym składnikiem ludzkich tkanek twardych, kości, zębów i ścięgien, odpowiedzialnym za mechaniczną wytrzymałość tych organów⁸.

Hydroksyapatyt można pozyskiwać z materiałów naturalnych, takich jak koralowce czy kości zwierzęce. Aragonit, który w trakcie procesu hydrotermalnego przekształca się w hydroksyapatyt całkowicie zachowując przy tym charakterystyczną mikrostrukturę porów odpowiadającą strukturze kości człowieka można uznać za biomimetyczny⁹.

Jedną z najważniejszych zalet tworzyw na bazie fosforanu wapnia, a zwłaszcza tworzyw hydroksyapatytowych, jest ich bardzo dobra tolerancja w środowisku tkankowym, najwyższa wśród

znanych obecnie materiałów implantacyjnych. Wynika ona ze ścisłego chemicznego i krystalicznego podobieństwa tego materiału do substancji nieorganicznej kości i zębów. Jak wiadomo kości, zębina oraz szkliwo zębów zbudowane są z substancji nieorganicznej (fosforany wapniowe), substancji organicznej oraz wody^{10, 11}.

Bioceramiczne tworzywa hydroksyapatytowe zaliczane są do grupy materiałów nietoksycznych i biologicznie aktywnych. Należy zauważyć, że wykazują dużą odporność na korozję w środowisku tkanek i płynów ustrojowych, co minimalizuje prawie całkowite zużycie materiałów bioceramicznych podczas długotrwałego użytkowania¹².

Normalną reakcją organizmu na ciało obce, a takim jest przecież implant, jest usiłowanie jego zniszczenia poprzez resorpcję. Proces ten polega na biologicznym i chemicznym rozpuszczeniu implantu z udziałem osteoklastów, które są zdolne resorbować zarówno kość, jak i materiał implantacyjny. Liczne badania potwierdziły, że tworzywo hydroksyapatytowe wykazuje znacznie mniejszą skłonność do resorpcji i biodegradacji niż inne tworzywa implantacyjne^{10, 13}.

Naturalny hydroksyapatyt występuje w przyrodzie w postaci minerałów, a także jest nieorganicznym składnikiem kości i zębów, w których stanowi rusztowanie zapewniające odpowiednie właściwości mechaniczne^{14, 15}. Dotychczas wytwarzany syntetyczny hydroksyapatyt, z uwagi na dobrą biogodność, ale nie najlepsze własności mechaniczne, stosowano w medycynie jako warstwę wierzchnią tytanowych implantów. Nowy materiał uzyskany przez modyfikację struktury muszli nie ma tej wady i będzie mógł być stosowany samodzielnie. Dodatkowo, dzięki porowatej budowie muszli, komórki i naczynia krwionośne będą mogły przerastać przez implant i całkowicie połączyć go z oryginalnymi kośćmi. Nowy materiał powstały na bazie organicznych prekursorów powinien mieć zarówno porowatą strukturę, jak i skład fazowy podobny do kości.

Kolejnym przykładem bionaśladownictwa w kontekście otrzymywania materiałów o potencjale w zastosowaniach implantacyjnych jest wykorzystanie struktury drzew i ich kanalików przelotowych^{16, 17}. W ramach wstępnych prac stwierdzono, że możliwe jest uzyskanie materiałów ceramicznych o strukturze kanalikowej z wykorzystaniem organicznych prekursorów. Otrzymany materiał biomimetyczny może mieć właściwości umożliwiające potencjalne zastosowanie w implantologii medycznej^{17, 18}.

Materiały i metody

Do uzyskania kompozytu hydroksyapatytowego można wykorzystywać materiały naturalne, np. muszle. W jednym z przykładów zastosowań biomimetyki jako inspiracji do wytwarzania materiałów są muszle z gatunku *Sercoptera populi*, pozyskane z Morza Bałtyckiego (fot. 1).

W celu uzyskania kompozytu hydroksyapatytowego z prekursorów naturalnych wykorzystano metodę hydrotermalną¹⁹⁻²². Próbki wcześniej oczyszczono mechanicznie i przepłukano w wodzie destylowanej oraz wysuszono (30 min) w suszarce laboratoryjnej w temperaturze 50°C, a następnie usunięto elementy organiczne, rozpuszczając je w kwasie octowym (80% CHEMPUR). Poprzez dodanie kwasu ortofosforowego (75% cz. d. a. CHEMPUR) w stosunku 1 Ca do 1,67 P uzyskano oczekiwany materiał. Proces hydrotermalny przeprowadzono w sterylizatorze parowym typu ASVE/46W w temperaturze 121°C, przy ciśnieniu 0,1 MPa przez 1,5 h.

Zarówno dla muszli, jak i otrzymanego materiału hydroksyapatytowego, wykonano badania dyfraktometryczne składu

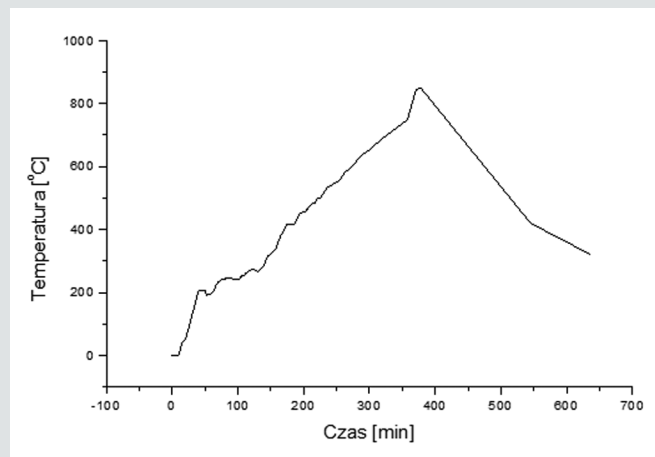
fazowego (XRD). Analizę wykonano na dyfraktometrze proszkowym DRON+2 metodą rejestracji krokowej promieniowaniem Co filtrowanym Fe.

Następnie wykonano badania struktury muszli przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM – TESCAN VEGA 2SBH).

W przypadku biomimetycznych materiałów o strukturze kanalikowej, jako prekursory stosowane były gatunki drzew mające kanały przelotowe, takie jak akacja, grab, sumak octowiec i inne (rys. 3). W celu usunięcia elementów organicznych, próbki



Fot. 1. Muszle z gatunku sercówka pospolita



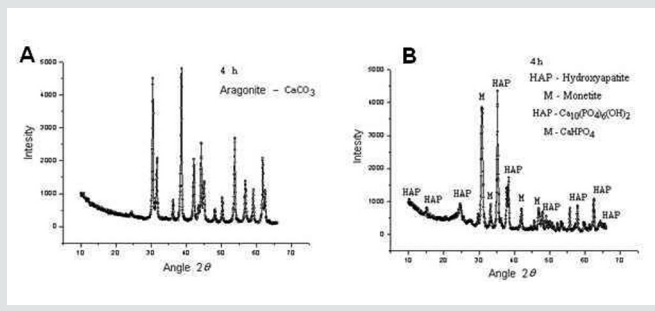
Rys. 2. Krzywa pirolizy w piecu rurowym w atmosferze azotu



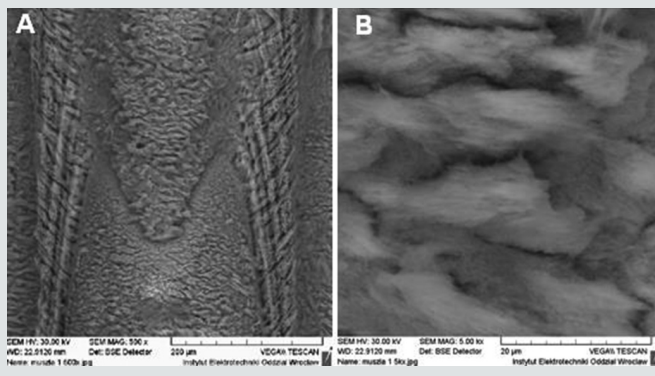
Rys. 3. Przykładowe próbki drewna przed procesem pirolizy



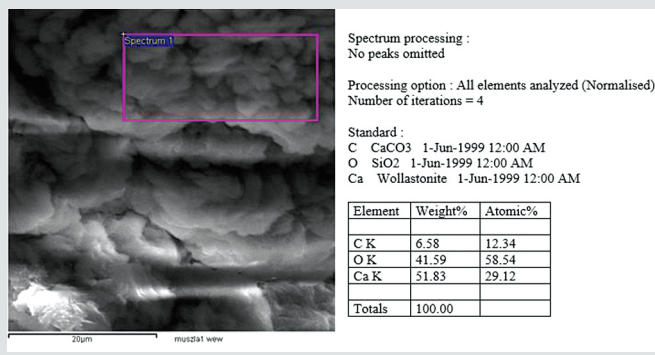
Rys. 4. Przykładowe próbki drewna po procesie pirolizy



Rys. 5. Skład fazowy próbki muszli wyjściowej przetrzymanej w kwasie octowym (A) oraz otrzymanego materiału kompozytowego (HAP + monetyt) (B)



Rys. 6. Obraz SEM próbki wyjściowej – muszli w powiększeniach (A) – 500x oraz (B) – 5000x



Rys. 7. Analiza elementarna próbki muszli przetrzymanej w kwasie octowym w czasie 4 h

drewna poddano procesowi pirolizy. Przeprowadzono go w piecu rurowym w atmosferze azotu (rys. 4). Wykorzystano piec elektryczny Elterma typu TS-RSR-2 o komorze z rury ze stali żaroodpornej o średnicy 100/75, umożliwiającej pracę w temperaturze do 1150°C, otoczonej silitowymi elementami grzejnymi. Odpowiednio dobrana krzywa wypału (rys. 2) pozwoliła uzyskać materiał o poszukiwanych właściwościach.

Następnie materiał modyfikowano impregnatem ceramicznym (TEOS-em – tetraethyl orthosilicate, 98% – Sigma Aldrich) poprzez zanurzenie i infiltrację w próżni przy ciśnieniu 10 hPa w czasie 5 min. Kolejnym etapem była hydrolizacja w roztworze amoniakalnym i poddanie go obróbce termicznej (suszenie w suszarce laboratoryjnej w temperaturze 70°C przez 2 h i 110°C przez 4 h).

Uzyskany materiał wyjściowy ma strukturę kanalikową, która jest cenną właściwością umożliwiającą wykorzystanie go jako implantu. Możliwy jest przerost tkanek przez kanały materiału. Reasumując, strukturę drzew można przekonwertować w strukturę materiału ceramicznego.

Rezultaty

Określenie właściwości prekursorów oraz otrzymanego kompozytu hydroksyapatytowego wykonano poprzez badania X-ray oraz SEM. W celu poznania udziału najważniejszych minerałów w badanych muszlach wykonano ich analizę fazową (rys. 5).

Na podstawie badania X-ray stwierdzono, że próbka muszli wyjściowej przetrzymanej w kwasie octowym przez określony okres czasu zawiera fazy krystaliczne charakterystyczne dla aragonitu. W przypadku próbki otrzymanego materiału uzyskano zgodność zmierzonego dyfraktogramu z widmem dyfrakcyjnym hydroksyapatytu oraz monetytu. Powstanie kompozytu wymaga dalszej, bardziej szczegółowej analizy.

Próbki muszli poddano analizie mikroskopowej. Obrazy próbek w powiększeniach 500x i 5000x przedstawiono na rys. 6.

Na rys. 9 przedstawiono skaningowy przykładowy obraz tworzywa hydroksyapatytowego.

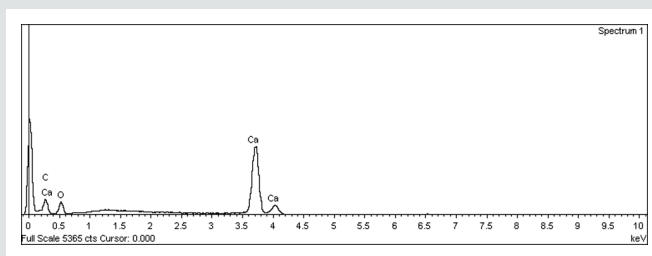
Analiza jakościowa wykonana za pomocą przystawki EDS mikroskopu SEM wyjściowej próbki muszli przetrzymywanej w kwasie octowym pokazuje obecność węglanów wapnia. Tym samym potwierdzono, że głównym składnikiem muszli jest aragonit.

Tworzywo hydroksyapatytowe zbudowane jest z ziaren o wymiarach ok. 1 μm tworzących mikroporowatą strukturę. Na podstawie obserwacji można zakładać, że materiał ma rozbudowaną powierzchnię wewnętrzną.

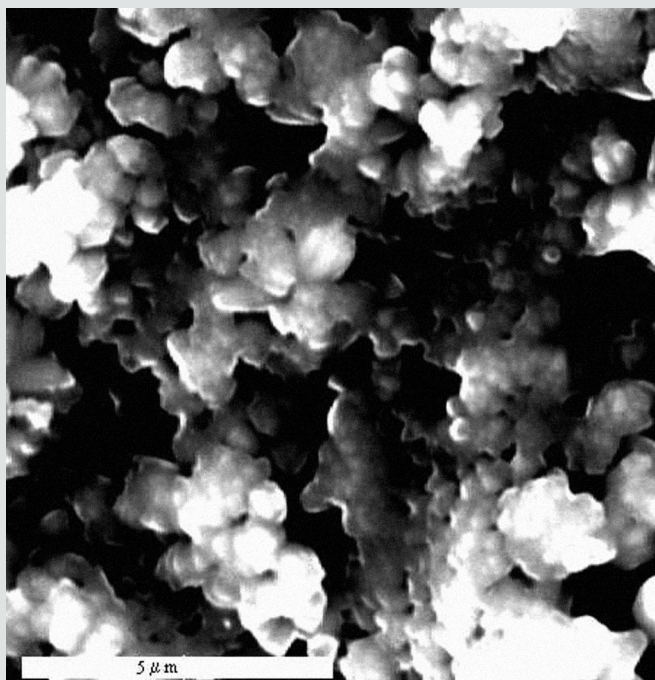
W przypadku wykorzystania metody biomimetycznej do projektowania materiałów ceramicznych o strukturze kanalikowej, zastosowano proces pirolizy i infiltracji różnych gatunków drzew. Prekursory węglowe otrzymane w wyniku pirolizy drewna infiltrowano TEOS-em.

Na rysunkach po lewej pokazano strukturę kanalikową drzew oraz próbkę materiałów po infiltracji.

Do infiltracji stosowany był TEOS. Podobne prace wykonał Ota²⁴, który wyprodukował biomorficzną ceramikę poprzez infiltrację TEOSem (tetraethyl orthosilicate) lub TTIP (titanium tetra-isopropoxide). Proces pirolizy głównych biopolimerowych składników drewna (ligniny i celulozy) można podzielić na kilka etapów. Podczas pirolizy przy niskich temperaturach (do ok. 260°C) następuje proces uwalniania wody i eliminacji małych molekuł CO i CO₂. Kolejny proces to karbonizacja, która zachodzi w temperaturze powyżej 600°C. W jej trakcie dochodzi do zerwania łańcuchów węglowych w strukturze biopolimeru i tworzenie się struktury. Po zetknięciu z ciekłym Si następuje zwilżenie i dochodzi do infiltracji.



Rys. 8. Analiza składu wraz z analizą jakościową i ilościową próbki muszli przetrzymanej w kwasie octowym w czasie 4 h



Rys. 9. Obraz SEM próbki przykładowego tworzywa hydroksyapatytowego²³

Z przeprowadzonych analiz mikroskopowych wynika, że struktury biologiczne, takie jak różnego rodzaju drewno, wykazują często ukierunkowanie budowy porów. Uzyskane materiały powstały na zasadzie konwersji struktury drzew w strukturę materiału ceramicznego.

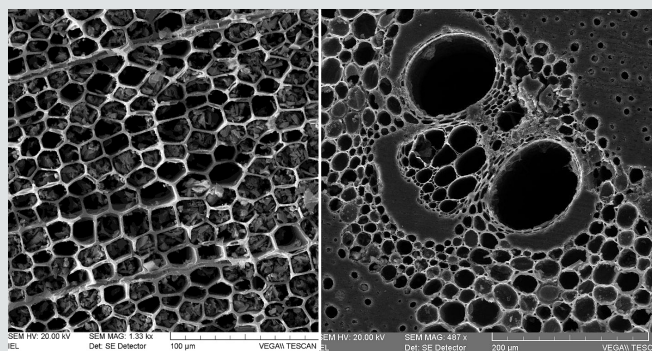
Podsumowanie

Metody biomimetyczne coraz częściej znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach techniki i stanowią znakomitą inspirację do projektowania, wytwarzania i optymalizowania nowoczesnych materiałów. Struktury biologiczne mają unikalne własności wynikające z budowy kształtującej się w procesie ewolucji.

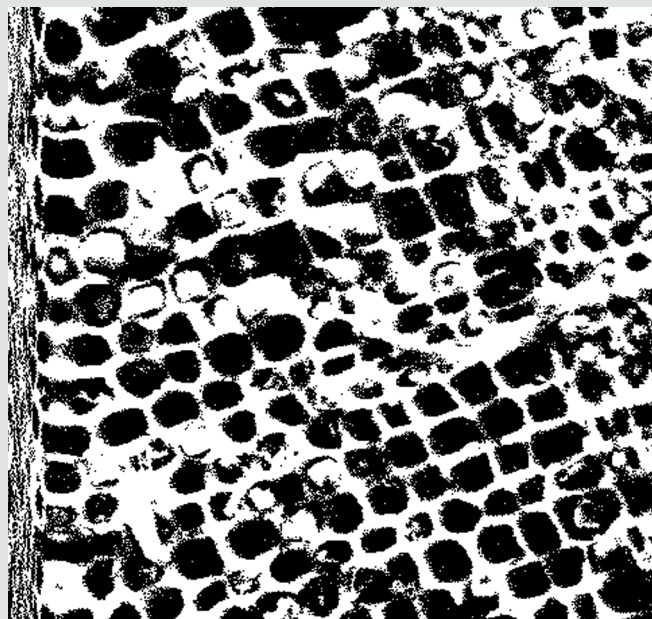
Konwersja struktur biologicznych w syntetyczne materiały ceramiczne wzbudza zainteresowanie i stwarza możliwości ich wykorzystania do otrzymywania specyficznych tworzyw o zadanych właściwościach, których otrzymanie metodami klasycznymi nie jest możliwe lub jest bardzo trudne do uzyskania.

Przedstawione w tekście przykłady pokazują potencjalne możliwości aplikacyjne materiałów ceramicznych powstałych w oparciu o biomimetykę.

Publikowane dane pokazują, że szkielety muszli mięczaków charakteryzują się dużą wytrzymałością przy małych gęstościach, dużą sztywnością oraz elastycznością, szybką bioresorbowalnością oraz przyswajalnością przez organizmy, co może znaleźć zastosowanie w medycynie^{25, 26, 27}.



Rys. 10. Struktura kanalikowa próbek drzew (akacja) – analiza SEM



Rys. 11. Zdjęcie mikroskopowe struktury kompozytu z węgla drzewnego świerkowego nasyconego TEOS-em po wypale, powiększenie 300x

Otrzymany metodą hydrotermalną materiał kompozytowy to głównie hydroksyapatyt oraz monetyt. Hydroksyapatyt to materiał słabo resorbowalny, natomiast monetyt jest materiałem resorbowalnym, a zatem, aby określić zdolność resorpcji kompozytu należy wykonać dodatkowe badania kinetyki narostu kości^{28, 29}. Na podstawie tych badań będzie można określić jego przyszłe stosowanie w medycynie jako materiału implantacyjnego.

W przypadku zastosowania biomimetyki do otrzymywania materiałów ceramicznych z wykorzystaniem organicznych prekursorów na podstawie analiz obrazowych stwierdzono, że możliwe jest uzyskanie struktury kanalikowej. Jako prekursorzy stosowane były drewna mające kanały przelotowe. Po procesie pirolizy materiał zmodyfikowano impregnatem ceramicznym i poddano obróbce termicznej. Uzyskany materiał wyjściowy ma strukturę kanalikową, która jest cenną właściwością umożliwiającą zastosowanie go jako implantu (możliwy jest przerost tkanek przez kanały materiału), materiału na filtry, np. do katalizatorów lub do izolacji akustycznej i cieplnej. Powietrze uwięzione w materiale stanowi naturalną barierę cieplną. Należy jednak pamiętać, że zbyt duże pory lub kanały powodują, że na drodze konwekcji może dochodzić do przekazywania ciepła, co prowadzi do zmniejszenia właściwości izolacyjnych³⁰.

W literaturze można spotkać wiele przykładów zastosowań. Sieber wraz z zespołem wykorzystał właściwości adsorpcyjne węgla drzewnego, wynikające ze znacznej powierzchni wewnętrznej wynoszącej od 200 do 1500 m²/g, do katalizy niektórych reakcji chemicznych, czyli możliwość zastosowania go jako filtr mikro oraz nośnik katalityczny w wysokich temperaturach³¹.

Mikrometryczna wielkość kanałów przelotowych drewna pozwala na odwzorowanie tej ciekawej struktury i stworzenie materiałów ceramicznych o szerokim spektrum zastosowań. ■

- 1 Inspiracja projektantów: tajemnice skóry rekinów – Science in School
- 2 Ryby-roboty polską specjalnością | Defence24
- 3 A. Dawidowicz, S. Pielka, D. Paluch, J. Kuryszko, J. Staniszevska-Kuś, L. Solski, *Zastosowanie mikroanalizy pierwiastkowej do oceny osteoindukcji i osteokondukcji dokostnych implantów hydroksyapatytowych*, Polimery w Medycynie 2005, t. 35, nr 1, ss. 1–19.
- 4 B. Jokić, M. Mitrić, V. Radmilović, S. Drmanić, R. Petrović, D. Janačković, *Synthesis and characterization of monetite and hydroxyapatite whiskers obtained by hydrothermal method*, ScienceDirect, Ceramics International vol. 37, 2011, pp. 167–173.
- 5 A. Rapacz-Kmita, A. Łytek, Z. Paszkiewicz, A. Ślósarczyk, *Ocena trwałości chemicznej bioceramiki fosforanowo-wapniowej. Badania in vitro*, „Szkło i Ceramika” 2006, nr 57, ss. 9–13.
- 6 A. Sobczak, Z. Kowalski, *Materiały hydroksyapatytowe stosowane w implantologii*, Czasopismo Techniczne Chemia, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, R. 104, z. 1-Ch 2007, ss. 149–158.
- 7 K. Pajor, Ł. Pajchel, J. Kolmas, *Hydroxyapatite and Fluorapatite in Conservative Dentistry and Oral Implantology, A Review*, Materials 2019, 12 (17), p. 2683.
- 8 A. Ślósarczyk, A. Dziegiel, *Bioceramiczne tworzywo hydroksyapatytowe dla chirurgii*, Inżynieria Materiałowa 1989, nr 1.
- 9 B. Zboromirska-Wnukiewicz, K. Kogut, K. Kasprzyk, J. Wnukiewicz, *Hydroxyapatite implants for dentistry surgery prepared by hydrothermal method with organic precursors*, 10. Česko-Slovensko-Polské, Trilaterální Sympozium Orální a Maxillofaciální Chirurgie, 2. Národní Kongres Společnosti Maxillofaciální Chirurgie, 7–9.11.2013 Velké Karlovice, Conference Materiale, ISBN 978-80-87562-11-6, p. 25.
- 10 Z. Knychalska-Karwan, A. Ślósarczyk, *Hydroksyapatyt w stomatologii*, Krakmedia, Kraków, 1994.
- 11 A. Ślósarczyk, E. Stobierska, *Bioceramika hydroksyapatytowa*, „Szkło i Ceramika” nr 4, 1992, ss. 18–21.
- 12 M. Szczepkowska, M. Łuczuk, *Materiały porowate do zastosowań medycznych*, Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji, Inżynieria Systemów Technicznych, 2014, ss. 231–239.
- 13 M. Klisch, J. Łaskawiec, R. Michalik, *Hydroksyapatytowe powłoki w medycynie – technologia i odporność korozyjna powłok na tworzywach tytanowych*, Inżynieria Materiałowa, nr 2 1999, ss. 75–80.
- 14 S. Mondala, U. Pala, A. Apurba Deyb, *Natural origin hydroxyapatite scaffold as potential bone tissue engineering substitute*, Ceramic International, Vol 42, Issue16, December 2016, pp. 18338–18346.
- 15 N. Vargas-Becerrí, D. A. Sánchez-Téllez, L. Zarazúa-Villalobos, D. M. González-García, M. A. Álvarez-Pérez, et al., *Structure of biomimetic apatite grown on hydroxyapatite (HA)*, Ceramic International, Vol. 46, Issue 18, Part A, 15 December 2020, pp. 28806–28813.
- 16 M. Ansell, Chapter: *Biomimetic composite materials inspired by wood*, Wood Composites 2015, pp. 357–394.
- 17 M. Rafiq, A. Ali, W. Tang, *Transforming wood as next-generation structural and functional materials for a sustainable future*, EcoMat. 2022, 4 (1): e12154. doi:10.1002/eom2.12154.
- 18 C. Chen, S. Bang, Y. Cho, et al., *Research trends in biomimetic medical materials for tissue engineering: 3D bioprinting, surface modification, nano/micro-technology and clinical aspects in tissue engineering of cartilage and bone*, Biomater Res 20, 10 (2016). https://doi.org/10.1186/s40824-016-0057-3.
- 19 M. Andres-Verges, C. Fernandez-Gonzalez, M. Martinem-Gallego, *Hydrothermal synthesis of calcium deficient hydroxyapatites with controlled size and homogeneous morphology*, Journal of European Ceramic Society, 1998, 18, pp. 1245–1250.
- 20 M. Ashok, S. Narayana Kalkura, *Growth and characterization of hydroxyapatite crystals by hydrothermal method*, J Mater Sci: Mater Med 2007, 18, pp. 895–898.

- 21 X. Guo, P. Xiao, *Effect of solvents on properties of nanocrystalline hydroxyapatite produced from hydrothermal process*, J. of European Ceramic Society, 2006, 26, pp. 3383–3391.
- 22 H. Ivankovic, E. Tkacec, S. Orlic, *Hydroxyapatite formation from cuttlefish bones: kinetics*, J Mater Sci: Mater Med 2007, 18, pp. 895–898.
- 23 B. Zboromirska-Wnukiewicz, K. Gryzlo, T. Ruziewicz, K. Kogut, *Tworzywa bioceramiczne do zastosowań w medycynie z zastosowaniem srebra koloidalnego i odpowiednich polielektrolitów*, Dokumentacja Techniczna, IEL, Wrocław 2007.
- 24 O. Toshikata, et al., *Porous titania ceramic prepared by mimicking silicified wood*, J. Am. Ceram. Soc. 83, 2000, pp. 1521–1523.
- 25 J. P. Morris, Y. Wang, T. Backeljau, G. Chapelle, *Biomimetic and bio-inspired uses of mollusc shells*, Marine Genomics, Vol. 27, June 2016, pp. 85–90.
- 26 F. Barthelat, J. E. Rim, H. Espinosa, *A Review on the Structure and Mechanical Properties of Mollusk Shells – Perspectives on Synthetic Biomimetic Materials*, DOI 10.1007/978-3-540-85049-6_2.
- 27 K. R. Brom, M. A. Salamon, S. Skreczko, *Właściwości strukturalne muszli mięczaków jako inspiracja inżynierii bionicznej*, Kosmos, Problemy Nauk Biologicznych, t. 64, 2015 nr 2, (307), ss. 365–375.
- 28 F. Tamimi, J. Torres, D. Bassett, J. Barraleta, E. L. Cabarcos, *Resorption of monetite granules in alveolar bone defects in human patients*, Biomaterials, Vol. 31, Issue 10, April 2010, pp. 2762–2769.
- 29 A. Adawy, R. Raquel Diaz, *Probing the Structure, Cytocompatibility, and Antimicrobial Efficacy of Silver, Strontium-, and Zinc-Doped Monetite ACS Applied, Bio Materials 2022 5 (4)*, pp. 1648–1657.
- 30 K. Kogut, K. Kasprzyk, R. Kłoś, *The materials resistant to high temperatures obtained from post-production fibrous waste*, Arch. Metall. Mater. 65 (2020), 2, pp. 845–850.
- 31 H. Sieber, et al., *Biomorphic cellular ceramics*, Advanced engineering materials Vol.2, No. 3, 2000, pp. 105–109.

Dr inż. Krzysztof Kogut

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki



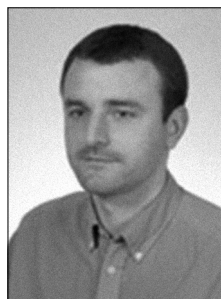
Zdjęcie: archiwum autora

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej. Kierownik Grupy Badawczej Technologii i Wytwarzania Materiałów. Członek Stowarzyszenia Elektryków Polskich, Prezes Koła Nr 1 SEP oraz członek Polskiego Komitetu Normalizacyjnego KT 289 ds. Ceramiki Technicznej oraz KT 76 ds. izolatorów.

krzysztof.kogut@iel.lukasiewicz.gov.pl

Dr inż. Krzysztof Kasprzyk

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki



Zdjęcie: archiwum autora

Absolwent Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej. Autor lub współautor 45 publikacji z dziedziny inżynierii środowiska oraz elektrotechniki, patentu oraz 2 rozdziałów w monografii. Ekspert naukowy Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBR) w ramach programu Demonstrator+, członek/sekretarz koła nr 1 Stowarzyszenia Elektryków Polskich oraz reprezentant Polskiego Komitetu Normalizacyjnego KT 289 ds. Ceramiki Technicznej.

krzysztof.kasprzyk@iel.lukasiewicz.gov.pl