

# Biomimetyzm i nanotechnologia – materiały i rozwiązania inspirowane naturą

## *Biomimetism and nanotechnology – materials and methods inspired by nature*

AGNIESZKA DĄBROWSKA

***Biomimetyka to wyodrębnienie dobrych projektów z Natury. (...) stanowi drogę od biologii do inżynierii.***

**Julian Vincent**

Fascynująca zdolność żywych organizmów do tworzenia złożonych struktur była od lat przedmiotem wielu badań i dociekań naukowych [1<sup>1</sup>]. Wraz z rosnącymi możliwościami technicznymi jesteśmy w stanie coraz lepiej naśladować naturę. Biomimetyka (rys. 1), rozumiana jako interdyscyplinarna nauka czerpiąca inspiracje z natury przy projektowaniu i wytwarzaniu nowych materiałów, idzie jednak jeszcze o krok dalej. Założeniem tej dziedziny jest nie tylko próba wiernego odtworzenia struktur biologicznych, ale także zrozumienie, opisanie i wykorzystanie naturalnych procesów i optymalnych rozwiązań. Projektowanie biomimetyczne stanowi przełom w sposobie myślenia o materiałach, gdyż z założenia tworzy się je dla konkretnego elementu docelowego z uwzględnieniem jego pożądaných cech. Przy założeniu, że to struktura wpływa na właściwości materiału, mogą być one dopasowane do danych funkcji gotowego obiektu.

### STRESZCZENIE

Artykuł przedstawia podstawowe założenia, koncepcje i metody biomimetyki, która w połączeniu z nanotechnologią stanowi przełom w inżynierii materiałowej. Na podstawie licznych przykładów scharakteryzowane zostały główne cechy materiałów biomimetycznych, metody syntezy oraz kierunki rozwoju tej interdyscyplinarnej dziedziny.

**Słowa kluczowe:** biomimetyzm, nanotechnologia, nowe materiały

### ABSTRACT

The aim of this article is to give a general overview of the interdisciplinary science name biomimetics which together with the nanotechnology makes a breakthrough in material engineering. This short introduction presents: the main characteristics of natural materials illustrated by the most famous examples, methods of sythesis and future perspectives.

**Keywords:** biomimeticism, nanotechnology, new materials



**Rys. 1.** Termin biomimetyka ma kilka znaczeń. Jedno z nich dotyczy zdolności żywych organizmów do maskowania swojej obecności przez upodobniania się do otoczenia. W kontekście tego artykułu chodzi o interdyscyplinarną naukę czerpiącą inspirację z natury przy projektowaniu i wytwarzaniu nowych materiałów (w tym imitujących otoczenie i dostępne w nim rozwiązania, co zawiera w sobie m.in. pierwotne znaczenie słowa); od lewej: biomimetyzm żmii i kraba, hydrofobowa powierzchnia liścia, zdumiewająca przyczepność łap do podłoża

<sup>1</sup> Jest to jedno z wielu wznowień, zaś pierwsza edycja książki została wydana w 1917 r.

Konieczna jest jedynie precyzyjna kontrola składu na poziomie molekularnym. Na tym etapie niezbędna okazuje się nanotechnologia. Również w zakresie czerpania inspiracji projektowych z natury Leonardo da Vinci okazał się pionierem, tworząc m.in. maszyny latające (ornitopter, 1487 r.) wzorowane na obserwacji skrzydeł ptaków i lotu nietoperzy. Czy dla współczesnych konstruktorów i inżynierów materiałowych natura może być inspiracją? Zobaczmy to na wybranych przykładach [2, 3].

## Natura jako źródło inspiracji dla inżynierii materiałowej

Mimo znaczących osiągnięć inżynierii materiałowej wiele z materiałów spotykanych w przyrodzie zadziwia swoimi właściwościami [4]. Prawdziwie niedoścignionym ideałem dla inżynierii materiałowej jest łąpa gekona. Silna adhezja do podłoża (50 – 300  $\mu\text{N}$  [5]) wynika z obecności gęsto upakowanych (5000 na 1  $\text{mm}^2$ ) rzędów keratynowych włosków (każdy o długości 30 – 130  $\mu\text{m}$  i średnicy równej 200 – 500 nm, ok. 0,1 ludzkiego włosa) z nanowypustkami w postaci pędzelków. Taką strukturę syntetycznie odtwarza się na różne sposoby, m.in. stosując ciekłe polimery i membrany lub wzorce z dziurami wykonanymi ostrzem igły mikroskopu sił atomowych (AFM, ang. Atomic Force Microscopy). Innym „cudem techniki” okazuje się być nić pajęczna o wyjątkowej wytrzymałości mechanicznej, którą osiąga za sprawą swojej budowy z dwóch związków: wytrzymałej fibroiny i plastycznej serycyny. Dzięki temu cały złożony materiał zawiera dopełniające się sztywne obszary parakrystaliczne oraz elastyczne amorficzne. Jest to jeden z wielu przykładów kompozytów, które dominują w przyrodzie ze względu na synergię korzystnych właściwości części składowych. Materiały złożone często składają się ze związków mineralnych i fazy organicznej, a ich skład i sposoby syntezy zostały udoskonalone w czasie tysięcy lat ewolucji. Natomiast inżynieria materiałów organiczno-nieorganicznych dopiero zaczyna osiągać pierwsze znaczące rezultaty. W przypadku muszli małży *Abalone sp.* osnowa ceramiczna z napełniaczem  $\text{CaCO}_3$  (kalcyt i aragonit) zwiększa odporność na kruche pękanie. Często spotyka się także konstrukcje wielofazowe (typu *sandwich*). Mogą to być na przykład tarcze rogowe skorupy żółwia osadzone na płytkach kostnych. Krab *Limulus polyphemus* ma skorupę złożoną z wielu warstw: chitynowo-proteinyńskich włókien oraz piany o otwartych porach. W przypadku dziobu tukana tego typu budowa pozwoliła na znaczną redukcję masy dzioba: do 5% całego ptaka przy długości powyżej 30% [6]. Oprócz heksagonalnych płytek keratyny otaczających pustą i wypełnioną porami przestrzeń występują nanocząstki melaniny (w czarnym, twardym czubku). Ciekawe, iż struktura materiału może mieć wpływ nie tylko na jego wytrzymałość i masę, ale także kolor. Tzw. barwa strukturalna decyduje m.in. o zwracającym uwagę upierzeniu pawy (za sprawą nanocząstek melaniny rozpraszających światło), opalizacji pancerzy żuków, błękitcie skrzydeł motyli *Morpho sp.* (struktura płytek i mikrodziurek w skrzydłach wpływa na załamania i odbicia światła) oraz odpowiada za lśniące muszle perłopławów. Diatomity (okrzemki) też

mają barwy strukturalne, a poza tym fascynującą strukturę z krzemionki biogenicznej, której mechanizm powstawania do tej pory nie został w pełni opisany. Mogą zostać użyte jako nośniki leków, czujniki, wzorce kształtu (ang. *templates*) w syntezie. Złożona z ich pancerzyków ziemia okrzemkowa od dawna wykorzystywana jest w przemyśle i pozwala zachować nanopory cenne do wykorzystania w urządzeniach NEMS i MEMS<sup>2</sup> [7]. Specyficzna, chropowata struktura powierzchni decyduje również o superhydrofobowości niektórych materiałów, a tym samym ich odporności na zabrudzenia<sup>3</sup> [8] i przemoczenie. Tzw. efekt liścia lotosu jest już szeroko wykorzystywany w produktach komercyjnych, m.in. farbach i specjalistycznej odzieży wysokogórskiej<sup>4</sup>. Naturalną strukturę odtwarza się np. przy użyciu plazmy niskotemperaturowej [9]. Pionierem prac z zakresu bioniki i jej nauczania w Polsce jest prof. Andrzej Samek z AGH [10].

Biomimetyczne inspiracje nie dotyczą jedynie materiałów, lecz także procesów. Obserwacje owadów społecznych wykorzystywane są nawet w socjologii i teorii zarządzania [11]. Podstawy działania echolokacji i zmysłów wykorzystywane są przy konstruowaniu czujników oraz w medycynie przy opracowywaniu protez i implantów<sup>5</sup>. Buduje się także automatyczne bezałogowe urządzenia latające MAVs (ang. *Micro Air Vehicles*), które wzorowane są bezpośrednio na owadach (takich jak ćma *Entomopter sp.* [12]).

Spotykane w przyrodzie optymalne rozwiązania zostały zastosowane również w architekturze i budownictwie [13]. Przęsła boczne wieży Eiffla wzorowane są na budowie kości gąbczastych, centrum sztuki w Singapurze na skórze niedźwiedzia polarnego – elementy ze stopu aluminium zmieniają swoje położenie względem padających promieni słonecznych jak włosy w futrze *Ursus maritimus*. Ciekawym przykładem jest także wieżowiec w Londynie w kształcie cygara. Budynek zaprojektowany przez Normana Fostera ma jeden z najefektywniejszych na świecie układów klimatyzacji i ogrzewania oparty na cyrkulacji powietrza wzorowanej na oddolnym zasysaniu wody przez gąbkę *Euplectella sp.* [14]. W Polsce warto przyjrzeć się projektom szkoły Ryszarda Semki.

Tych kilka arbitralnie wybranych przykładów nie oddaje całej złożoności i różnorodności rozwiązań znajdujących w przyrodzie. Można jednak spróbować znaleźć łączące je cechy charakterystyczne.

## Podstawowe cechy materiałów i rozwiązań spotykanych w przyrodzie

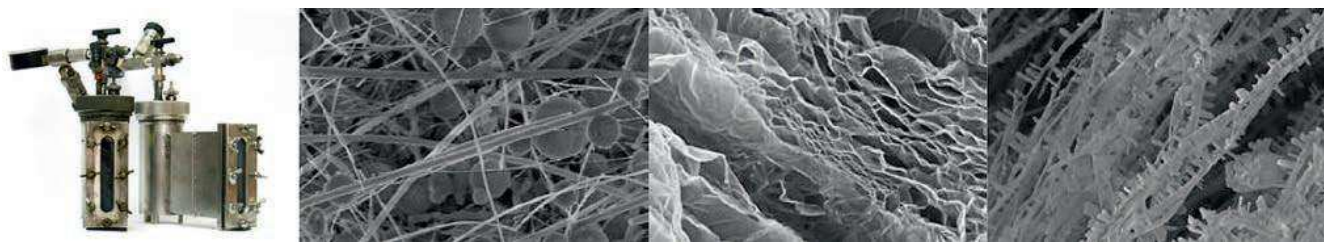
Aby kopiować złożone struktury, warto zastanowić się, co jest wspólne dla wszystkich materiałów spotykanych w naturze. Oto lista głównych cech charakterystycznych wraz z krótkim komentarzem dotyczącym ich wykorzystania w technice:

<sup>2</sup> Akronimy pochodzą od nazw angielskich, odpowiednio *nano* i *micro electro-mechanical systems*.

<sup>3</sup> Dzięki fotokatalizie możliwe jest również stworzenie powierzchni samoczyszczących (z  $\text{TiO}_2$ ).

<sup>4</sup> Na uwagę zasługuje tu polska firma Małachowski®: Pracownia sprzętu alpinistycznego.

<sup>5</sup> Za osiągnięcia w dziedzinie badania węchu L.B. Buch i R. Axel otrzymali w 2004 roku Nagrodę Nobla.



Rys. 2. Synteza spaleniowa (widok reaktorów wysokociśnieniowych) jako jedna z metod *bottom-up* otrzymywania nowych materiałów wraz z przykładowymi nanostrukturami zaobserwowanymi w produktach reakcji: włókna węgla krzemowego i sferyczna krzemionka, „nanogrzebienie”, warstwy grafenopochodne (wyniki badań własnych autorki); skala: długość dolnego boku zdjęć SEM to odpowiednio 6,2 μm, 6,2 μm, 3,1 μm

- wielofunkcyjność – z tych samych podstawowych elementów składowych powstaje kolosalna różnorodność gotowych obiektów;

- budowa hierarchiczna – zmienność w funkcji skali, a tym samym wielofunkcyjność znacznie przewyższająca oczekiwania wynikające z zastosowania tak małej liczby elementów konstrukcyjnych;

- samorozpoznawanie – niewyczerpane źródło inspiracji dla konstruktorów czujników, systemów ochrony i bezpieczeństwa;

- samonaprawa błędów metabolicznych i genetycznych oraz eliminacja uszkodzeń – ta cecha umożliwia łatwą eliminację uszkodzeń;

- samopowielanie: w ten sposób miała zachodzić replikacja słynnych nanorobotów Drexlera; dodajmy jeszcze, że procesy replikacji i odtwarzania zachodzą przy maksymalnej sprawności materiałowej i energetycznej, będącej efektem optymalizacji ewolucyjnej;

- samoorganizacja atom po atomie – jedna z najpotężniejszych metod syntezy wykorzystywanych współcześnie ze względu na swoją prostotę, małe wymagania energetyczne oraz możliwość tworzenia złożonych struktur hierarchicznych;

- synteza (i eksploatacja) zachodzi najczęściej w warunkach temperatury otoczenia i pod ciśnieniem atmosferycznym – do podstawowych wad materiałów biologicznych należą niska odporność na podwyższoną temperaturę oraz pogarszanie właściwości z czasem (aż do śmierci), istotną zaletą jest uproszczenie metod syntezy ;

- dominująca rola słabych wiązań niekowalencyjnych (wodorowych, sił van der Waalsa) oraz hydrofilowość i oddziaływań jonowych;

- minimalizacja masy przy maksymalnej wytrzymałości i sztywności – cecha pożądana również w przypadku większości syntetycznych materiałów konstrukcyjnych;

- liczebna dominacja materiałów kompozytowych – synergia pozwala poprawić wybrane właściwości materiałowe (np. złożona struktura kości).

Podsumowując, charakterystyczne dla przyrody są złożone struktury często powstające w wyniku zjawisk samoorganizacji. W naturalnych procesach pożądanym efektem może być osiągnięty w stosunkowo prosty sposób dzięki wykorzystaniu hierarchicznej budowy materiałów o kontrolowanym składzie. Wystarczy spojrzeć na znikomą, w zestawieniu z różnorodnością organizmów, liczbę elementów składowych (białka, kwasy nukleinowe, tłuszcze, lipidy, cukry, H<sub>2</sub>O),

by docenić siłę prostoty. Zobaczmy, jak na tym tle wyglądają zaawansowane metody otrzymywania materiałów [15].

## Metody syntezy i kierunki rozwoju

Jak wcześniej wspomniano, biomimetyka nie tylko zmierza do odtwarzania złożonych systemów i struktur, ale dąży do kopiowania procesów ich syntezy i zmiany klasycznego podejścia do otrzymywania materiałów. Początkowo te ostatnie pozyskiwano z natury, następnie nauczono się je przetwarzać, a w dalszej kolejności otrzymywać sztucznie. Wraz z nanotechnologią [16] i inżynierią materiałową pojawiła się możliwość ich projektowania na szczeblu atomowym. W połączeniu ze zrozumieniem zjawiska samoorganizacji daje to możliwość znacznego uproszczenia aktualnie stosowanych zaawansowanych technik przy tworzeniu skomplikowanych struktur hierarchicznych. Obecnie w inżynierii materiałowej stosowane są rozmaite metody syntezy (zarówno z grupy *bottom-up*<sup>6</sup> (rys. 2.), jak i *top-down*<sup>7</sup>) i mimo licznych sukcesów należy przyznać, że większość materiałów biomimetycznych wytwarzana jest w zbyt skomplikowany sposób, na który nie zdecydowałoby się żadne żywe stworzenie<sup>8</sup>. Dużo brakuje nam do sprawności procesów naturalnych, stąd można zaobserwować wiele prac poświęconych zrozumieniu mechanizmów syntezy obserwowanych w przyrodzie.

Przykładem materiału biomimetycznego, ale stworzonego jeszcze zgodnie z tradycyjnym podejściem projektowym jest rzep (wzorowany na roślinach, stworzony przez George'a de Mestral's'a). Na kolejnym szczeblu zaawansowania znajduje się odtwarzanie struktur naturalnych, np. stworzony w laboratorium sztuczny liść lotosu (powierzchnia z submikronowymi wypustkami pokrytymi warstwą wosku) [17] lub łapa gekona [18] albo procesów jak w przypadku zamykania mikropęknięć w materiale ceramicznym na skutek naprężeń wytworzonych wokół wierzchołka pęknięcia (jest to analogiczne zjawisko do gojenia się ran). Można

<sup>6</sup> Charakterystyczne dla przyrody procesy z grupy *bottom-up* zmierzają do stworzenia struktur złożonych z ich elementów składowych; przykładem może być powszechne zjawisko samoorganizacji.

<sup>7</sup> Metody *top-down* zmierzają do miniaturyzacji obiektów makroskopowych z zamiarem wykorzystania unikalnych właściwości tak powstałych nanomateriałów; ich podstawowym ograniczeniem jest wytrzymałość struktur poddawanych fragmentacji oraz brak możliwości zmiany składu atomowego.

<sup>8</sup> Także w „niebiologicznych” warunkach m.in. podwyższonej temperatury i ciśnienia oraz obecności silnego promieniowania jonizującego.

<sup>9</sup> Skaningowy mikroskop elektronowy (SEM, akronim od ang. *Scanning Electron Microscopy*)

wykorzystać także naturalne prekursorzy do syntezy innych materiałów lub odtworzenia konkretnych form. Naturalne struktury porowate, które mogą służyć jako „rusztowania”, to m.in. drewno, rafa koralowa, gąbka, kość. Przykładem takiego procesu jest ceramizacja drewna (zwęglenie, poddanie działaniu Si lub SiO<sub>2</sub> i na końcu synteza SiC o strukturze zgodnej z włóknistą budową prekursora).

Z jednej strony czerpiemy pomysły z natury, z drugiej – chcemy ją wspomagać, m.in. tworząc materiały dla medycyny (np. „polskie sztuczne serce” lub sztuczne kości w postaci syntetycznych włókien z hydroksyapatytem z Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub>, kolagenu i wody). Jeszcze lepszą strategią jest pomysłowe wykorzystanie struktur już dostępnych. W ten sposób tworzy się np. nośniki leków uwalnianych przez zmianę pH. Służą do tego cząsteczki lipidów (połączenie trójglicerydów z kwasami tłuszczowymi odpowiednio nienasyconymi u roślin i nasyconymi u zwierząt) i możliwość umieszczenia substancji „w kapsułce” o różnym stopniu hydrofilowości ścian. Do syntezy nowoczesnych materiałów wykorzystuje się także białka, które pełnią zarówno funkcje strukturalne, jak i są elementami funkcjonalnymi (np. enzymy katalizujące reakcje chemiczne, aktywna i miozyna umożliwiające ruch mięśni). Przykładem białka strukturalnego, budującego skórę, tkankę łączną kości, keratynę włosów, jest kolagen tworzący wytrzymałe włókna<sup>10</sup>. Pojedyncza molekula białka może być wzorcem do syntezy (ferrytyny – torusy, struktury porowate, aktywna – mikro-włókna), molekularnym przełącznikiem w układach scalonych (za sprawą kontrolowanego transportu elektronów). Amelogenina jest białkiem inicjującym powstawanie włókien hydroksyapatytu w czasie mineralizacji szkliwa zębego [19].

Niezależnie od źródła inspiracji, synteza zaawansowanych materiałów posługuje się wieloma złożonymi metodami fizykochemicznymi<sup>11</sup> umożliwiającymi zejście do poziomu molekularnego (rys. 2). Pionierem chemii supramolekularnej jest Jean-Marie Lehn [20], którego liczne prace koncentrowały się m.in. nad zrozumieniem zjawiska samoorganizacji. Na wyzwania związane z otrzymywaniem zaawansowanych materiałów odpowiada wywodząca się stąd biomimetyka molekularna, która wykorzystuje biologiczne makromolekuły w procesach syntezy nowych nanomateriałów. Do jej głównych kierunków rozwoju zalicza się badania nad:

1. Wykorzystaniem cząstek DNA jako wzorca do syntezy materiałów zaprojektowanych na poziomie molekularnym (pod względem struktury i właściwości).

W ten sposób powstają m.in. nanodrutki metali (Pt, Ag, Au, Pd), nanocząstki dołączone do spirali DNA, a także wykorzystuje się właściwości samej helisy do konstrukcji zaawansowanych struktur.

2. Użyciem powierzchni protein jako łączników z materiałami syntetycznymi w celu zwiększenia precyzji tworzenia pożądanej struktury.

Dobrym przykładem jest synteza nanocząstek srebra na powierzchni protein wyizolowanych z bakteriofagów lub inspirowane rzęskami i wiciami źródła napędu (ang. *flagella motors*) w urządzeniach MEMS i NEMS. Tworzy się również warstwy biologicznie aktywnych peptydów, do których mogą być dołączone nanorurki (tzw. *dywan molekularny*).

3. Samoorganizacją struktur.

Ta najpotężniejsza z dostępnych w przyrodzie metod syntezy, obecnie wykorzystywana głównie do otrzymywania monowarstw, może wyeliminować konieczność prowadzenia procesów technologicznych w warunkach wysokich ciśnień i temperatur dzięki wykorzystaniu różnic w hydrofilowości molekuł.

4. Wykorzystaniem bakterii i wirusów jako małych reaktorów.

Być może najkorzystniejszym sposobem syntezy naturalnych materiałów jest wykorzystanie innych organizmów i zachodzących w nich reakcji. Bakterie mogą m.in. syntezować leki. *Streptococcus thermophilus* jest stosowany do otrzymywania nanotorusów ZnO (metoda polega na biofunkcjonalizacji powierzchni i wypaleniu części bakteryjnej). Natomiast wirusy, o wymiarach nanometrowych (20 – 300 nm), same w sobie stanowią doskonałe rusztowanie oraz wzorzec do syntezy struktur. Mogą być wykorzystane do osadzania metali (m.in. Pt, Au, Ag, Cu, Co) i tlenków (np. tlenku żelaza) w warunkach różnego pH i temperatury (np. wirus mozaiki tytoniowej (*Tabacco mosaic*) charakteryzujący się wytrzymałością w szerokim zakresie od 2 do 10 pH oraz odpornością na temperaturę do 60°C). Można w ten sposób otrzymać nanorurki o wymiarach 4 x 18 x 300 nm [21]. Większość nanomateriałów doskonale nadaje się na części składowe nanokompozytów (np. nanowłókna jako napełniacze matrycy polimerowych), a te jako struktury złożone stanowią istotną część zainteresowań biomimetyki.

Wszystko wskazuje na to, że niewątpliwymi materiałami przyszłości będą struktury 2D, czyli materiały typu grafen [22], o jednej warstwie atomowej, ale bez ograniczania się do węgla jako jedynego rodzaju atomów składowych. Takie powierzchnie mogą dodatkowo podlegać różnym modyfikacjom [23] w zależności od przewidywanych zastosowań (elementy konstrukcyjne, napełniacze w osnowach polimerowych, czujniki itp.).

## Uwagi końcowe

Biomimetyka dąży do tego, by zrozumieć procesy zachodzące w przyrodzie i z sukcesem je wykorzystać. Wyzwaniem jest osiągnięcie „siły prostoty” zjawiska samoorganizacji czy wielofunkcyjnych struktur hierarchicznych. Bada się również możliwości natury w zakresie utylizacji odpadów antropogenicznych (np. bakterie akumulujące w sobie cząstki metali stosowane do oczyszczania wody [24]) i dąży do projektowania materiałów, które nie będą akumulowały się w niekontrolowany sposób (jak mikroplastik w środowisku morskim [25]). Takie podejście jest zgodne z założeniami zrównoważonego rozwoju (ang.

<sup>10</sup> Moduł *Younga*: 1 – 1,5 GPa, wytrzymałość na rozciąganie: 70 –150 MPa; pojedyncze cząsteczki o wymiarach ~1,5 nm tworząc potrójnie skręcone spiralne nici, a z nich włókna o średnicy dochodzącej do 1 μm.

<sup>11</sup> Jednym z szybciej rozwijających się kierunków badań są prace nad technikami „*bottom-up*” do syntezy struktur o pożądanych właściwościach wykraczające znacznie poza rozwijanie technik podstawowych typu PCV, CVD, zol-żel.

sustainable development) oraz daje szansę poznania piękna przyrody zamiast wyczerpywania zasobów i przyczyniania się do jej zubożenia.

Artykuł recenzowany

## LITERATURA

- [1] Thompson D.W. 1968. *On growth and form*. Cambridge, Cambridge University Press.
- [2] Bar-Cohen Y. 2005. *Biomimetics – Biologically Inspired Technologies*. CRC Press.
- [3] Bar-Cohen Y., 2006. „Biomimetics – using nature to inspire human innovations”. *Bioinspiration and Biomimetics* 1(1):P1.
- [4] Sanchez C., H. Arribart, M.M.G. Gill. 2005. „Biomimeticism and bioinspiration as tools for the design of innovative materials and systems”. *Nature Materials* 4: 277 – 288.
- [5] Autumn K., Y.A. Liang, S.T. Hsieh, W. Zesch, W.P. Chan, T.W. Kenny, R. Fearing, R.J. Full. 2000. „Adhesive force of a single gecko foot-hair”. *Nature* 405: 681 – 684.
- [6] Meyers M.A., Po-Yu Chen, A. Yu-Min Lin, Y. Seki. 2008. „Biological materials: structure and mechanical properties”. *Progress in Materials Science* 53, 1–206.
- [7] Madon M. J. 2002. *Fundamentals of microfabrication. The science of miniaturisation*. CRS Press LLC.
- [8] Barthlott W., C. Neinhuis. 1997. „Purity of the sacred lotus or escape from contamination in biological surfaces”. *Planta* 202: 1–8.
- [9] Tyczkowski J. 2016. „Liść lotosu i inżynieria molekularna”. *Wiedza i Życie* 4.
- [10] Samek A. 2013. *Bionika w kształceniu*. Krw: Wydawnictwo AGH.
- [11] Bonabeau E., M. Dorigo, G. Theraulaz. 2000. „Inspiration for optimization social insect behavior”. *Nature* 39: 406.
- [12] Wootton R.J., R.C., Herbest, P.G. Young, K.E. Evans. 2003. „Approaches to the structural modelling of insect wings”. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London B*, 358: 1577–1587.
- [13] Aldersey-Williams H. 2004. „Towards biomimetic architecture”. *Nature Materials* 3: 277–279.
- [14] Konopka K. 2011. *Wzorce z Natury w technice i inżynierii materiałowej*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [15] Konopka K. 2013. *Biomimetyczne metody wytwarzania materiałów*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [16] Goodsell D.S. 2004. *Bionanotechnology: lessons from nature*. New York: Wiley.
- [17] Nakajima A., A. Fujishima, K. Hashimoto, T. Watanabe. 1999. „Preparation of transparent superhydrophobic boehmite and silicafilms by sublimation of aluminium acetylacetonate”. *Advanced Materials* 11: 1365–1368.
- [18] Sitki M., R.S. Fearing. 2003. „Synthetic gecko foot-hair micro/nano-structures as dry adhesive”. *J. Adhesion Sci. Technology* 17: 1055–1073.
- [19] Snead M. L., D.H. Shu, Y. Lei, S. N. White, Ch.M. Snead, W. Luo, M. L. Paine. 2006. „Protein self-assembly creates a nanoscale device for biomineralization”. *Materials Science and Engineering C*, 26: 1296–1300.
- [20] Lehn J.M. 1993. „Supramolecular Chemistry”. *Nature* 260: 1762–63
- [21] Fan T.-X., S.-K. Chow, D. Zhang. 2009. „Biomorphic mineralization: from biology to materials”. *Progress in Materials Science* 54: 542 – 659.
- [22] Huczko A., A. Dąbrowska, M. Kurcz. 2016. *Grafen. Otrzymywanie. Charakterystyka. Zastosowania*. Warszawa: Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego.
- [23] Ferrari A.C. i in. 2015. „Roadmap for graphene”. *Nature* 7: 1121.
- [24] Klaus-Joerger T., R. Joerger, E. Olsson, C.G. Granqvist. 2001. „Bacteria as workers in the living factory: metal-accumulating bacteria and their potential for materials science”. *Trends in Biotechnology* 19 (1): 15–20.
- [25] Allsopp M., A. Walters, D. Santillo, P. Johnston. 2016. Plastic Debris in the World’s Oceans. Raport Greenpeace dostępny on-line.

dr Agnieszka Dąbrowska

Uniwersytet Warszawski, Wydział Chemii,  
Pracownia Fizykochemii Nanomateriałów,  
ul. Pasteura 1, 02-093 Warszawa,  
e-mail: adabrowska@chem.uw.edu.pl

Przemysłowa wiosna  
w Targach Kielce

**28-30 III 2017**

Zapraszamy na Jubileuszową edycję  
Salonu Technologii Obróbki Metali

**10 LAT  
STOM**

**TOOL**  
obrabiarki, narzędzia

**LASER**  
lasery przemysłowe

**BLECH & CUTTING**  
obróbka blach

**TARGI DAJĄ WIĘCEJ**

Sprawdź na: [www.targidajawiecej.pl](http://www.targidajawiecej.pl) [facebook.com/targidajawiecej](https://www.facebook.com/targidajawiecej)

**Targi Kielce**  
exhibition & congress centre

Równolegle odbędą się:

**Pneumaticon**

pneumatyka, hydraulika,  
napędy i sterowania

**Expo-Surface**  
ochrona powierzchni

**Dni Druku 3D**

**Świętuj z Nami!**

[www.przemyslawawiosna.pl](http://www.przemyslawawiosna.pl)