

Bioinspiracje w projektowaniu konstrukcji lekkich

Bioinspiration in lightweight structures design work

ADAM RUSZAJ*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.2.9

Bioinspiracja zdobywa coraz szersze uznanie i znajduje zastosowanie w różnych działach techniki, ponieważ umożliwia optymalne rozwiązywanie skomplikowanych problemów. Dotyczy to również technologii maszyn – do najważniejszych zagadnień w tym obszarze należy projektowanie elementów maszyn i procesów wytwarzania oraz kształtowanie właściwości warstwy wierzchniej wyrobów w celu podniesienia ich cech eksploatacyjnych i estetycznych. Rośnie znaczenie zagadnień bioinspirowanego projektowania lekkich konstrukcji z zachowaniem wymaganej sztywności i wytrzymałości. **SŁOWA KLUCZOWE:** bioinspiracja, konstrukcje lekkie, sztywność konstrukcji, wytrzymałość konstrukcji

Bioinspiration approach factor enjoys constantly growing esteem due to its positive practical effects experienced in many different technical areas by revealing practical ways, which provide for optimum solution of difficult problems. This also applies to the machinery engineering. The most crucial problems in this realm are how to design and to supervise the processes of production of the nano, micro and macro details, or to create surface layer structures for enhancement of the operating conditions and good outlook of the products. The bioinspiration influence on the design work requirements for improvement of rigidity and strength of the lightweight structures seem to gain more and more important position.

KEYWORDS: bioinspiration, lightweight structures, strength and rigidity

Bionika jest nauką, która zajmuje się badaniem organizmów żywych (roślin i zwierząt) z punktu widzenia możliwości wykorzystania rozwiązań powstałych w wyniku trwającej kilka miliardów lat ewolucji w konstrukcjach technicznych. O znaczeniu osiągnięć bioniki świadczy rosnąca liczba patentów z tej dziedziny [1,2]. Bionika zajęła istotne miejsce w naukach technicznych – coraz większa grupa naukowców i inżynierów jest przekonana o korzystnym wpływie tej dziedziny na współczesną cywilizację. Bionika oferuje inżynierom nowe możliwości rozwiązywania problemów technicznych oraz przypomina, że *homo sapiens* jest elementem środowiska naturalnego i tylko w nim może się racjonalnie rozwijać [1÷4]. Część naukowców definiuje bionikę jako naśladowanie (kopiowanie) biologicznych funkcji, struktur i mechanizmów w projektowaniu maszyn. Czasem stosowane jest bardziej ogólne nazewnictwo: *biomimetic design* oraz *biologically inspired design* [6].

Charakterystyka konstrukcji lekkich

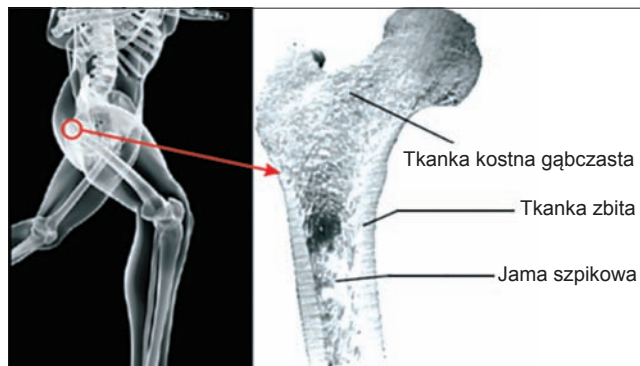
Konstrukcje lekkie [4] mają zminimalizowaną masę, ale pozostałe właściwości użytkowe, np.: funkcjonalność i bezpieczeństwo związane z wytrzymałością, sztywnością i odpornością na zużycie oraz ekologiczność, zachowują na co najmniej niezmiennym poziomie. Tworzenie konstrukcji lekkich jest możliwe dzięki wykorzystaniu metali lekkich (litu, magnezu, berylu, aluminium, tytanu) i ich stopów, specjalnych kompozytów oraz tworzyw sztucznych, a także opracowywaniu nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych.

Konstrukcje lekkie są stosowane m.in. w: aeronautyce, lotnictwie, branży samochodowej i kolejowej. Przykładowo: zredukowano masę silników lotniczych dzięki wykorzystaniu do produkcji łopatek silnika aluminioków tytanu zamiast stopów tytanu i niklu [4]. Ograniczono masę 1-litrowego samochodu Volkswagen XL-1 przez zmniejszenie udziału stali do 25% oraz wprowadzenie 22% metali lekkich i ich stopów; resztę stanowią węglowe kompozyty włókniste (CFRP) i zaawansowane tworzywa sztuczne [4].

Opisanej tendencji do stosowania materiałów lekkich towarzyszy tradycyjny nurt rozwoju technologii i konstrukcji. Przykładowo: uzyskano istotne zmniejszenie masy i wymiarów silnika lotniczego, zastępując tradycyjne składane wirniki (na obwodzie pierścienia mocowane są w tzw. zamkach łopatkami) wirnikami monolitycznymi, tzw. bliskami (łopatki są wykonywane na pierścieniu) [5]. Jednak badania wykazują, że najnowocześniejsze i najbardziej efektywne rozwiązania w zakresie konstrukcji lekkich oferuje natura. Wystarczy przypomnieć, że [1÷5]:

- mikro- i makroorganizmy mogą inspirować tworzenie sztywnych i lekkich struktur z lekkich materiałów (np. pancerzyki okrzemek, chitynowe korpusy owadów, skorupy małży, żółwi czy ślimaków),
- w drzewach – które są wspaniałym przykładem osiągnięć procesu ewolucji w świecie roślin – pomimo rozwidleń gałęzi nie występuje spiętrzanie naprężeń, dzięki odpowiedniej strukturze wewnętrznej gałęzi i liście charakteryzują się dużą smukłością, elastycznością i wytrzymałością,
- trawy, zboża, sitowie czy krzewy bambusowe mają smukłą, elastyczną budowę i specyficzną strukturę wewnętrzną zarówno w skali makro, jak i mikro czy nano; również ich kolanka mogą dostarczać pomysłów na rozwiązanie węzłów konstrukcyjnych, np. kratownic,
- masa szkieletu ptaków czy ssaków stanowi niewielką część całej masy organizmu; np. szkielet gołębia to tylko ok. 8÷9% masy ciała zwierzęcia,
- kości szkieletowe ptaków czy ssaków mają nierównomierne przekrój, a równocześnie ich kształt i struktura wewnętrzna zapewniają równomierny rozkład obciążeń, ponieważ kości szkieletowe muszą spełniać swoje funkcje w zmiennych warunkach przez całe życie organizmu (rys. 1),
- również użytkowanie liści drzew, krzewów, a nawet kwiatów może podpowiadać rozwiązania konstrukcyjne.

Dalej przedstawione zostaną elementy metodyki badań oraz wybrane przykłady konstrukcji bionicznych, w których



Rys. 1. Fragment szkieletu człowieka i przekrój wzdłużny głowy kości udowej [4]

* Prof. dr hab. inż. Adam Ruszaj (ruszaj@mech.pk.edu.pl) – Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Krakowskiej

wykorzystano rozwiązania wypracowane przez naturę w procesie ewolucji w celu zmniejszenia masy oraz zwiększenia sztywności [6÷15].

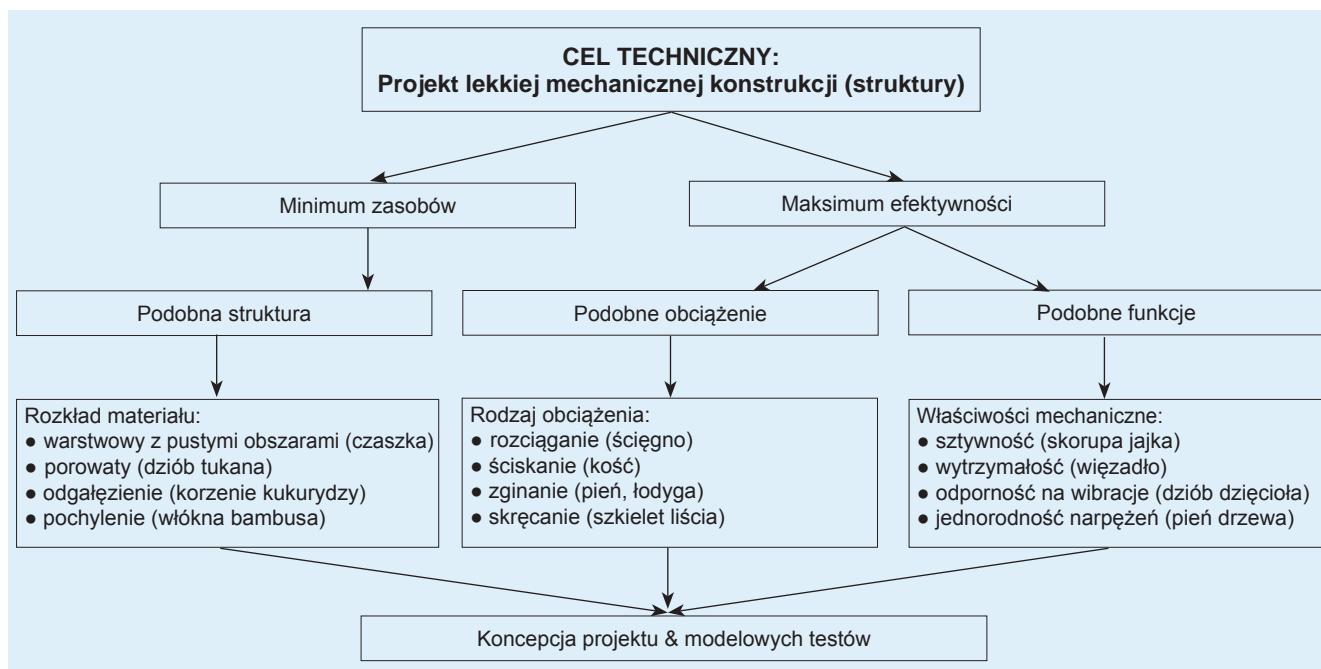
Metodyka inspirowanego bionicznie projektowania

Aby odnosić sukcesy w inspirowanym naturą rozwoju, konieczne jest przyjęcie poprawnego pod względem metodycznym podejścia [8]. Trwają np. prace nad oprogramowaniem wspomagającym proces tworzenia bionicznych projektów elementów maszyn i urządzeń. Przykładem tego jest aplikacja do projektowania ram, korpusów maszyn, kadłubów, wręg samolotów itp. Uwzględnia ona zarówno klasyczne, jak i bioniczne podejście. To ostatnie opiera się na obserwacji i analizie budowy drzew. Oprogramowanie umożliwia zaprojektowanie bionicznego elementu z uwzględnieniem kryterium minimalnej masy dla założonych charakterystyk mechanicznych wyrobu (sztywności, odkształceń, drgań itp.) oraz porównanie z klasycznie zaprojektowanym elementem i nadaje się zwłaszcza do tworzenia kratownic.

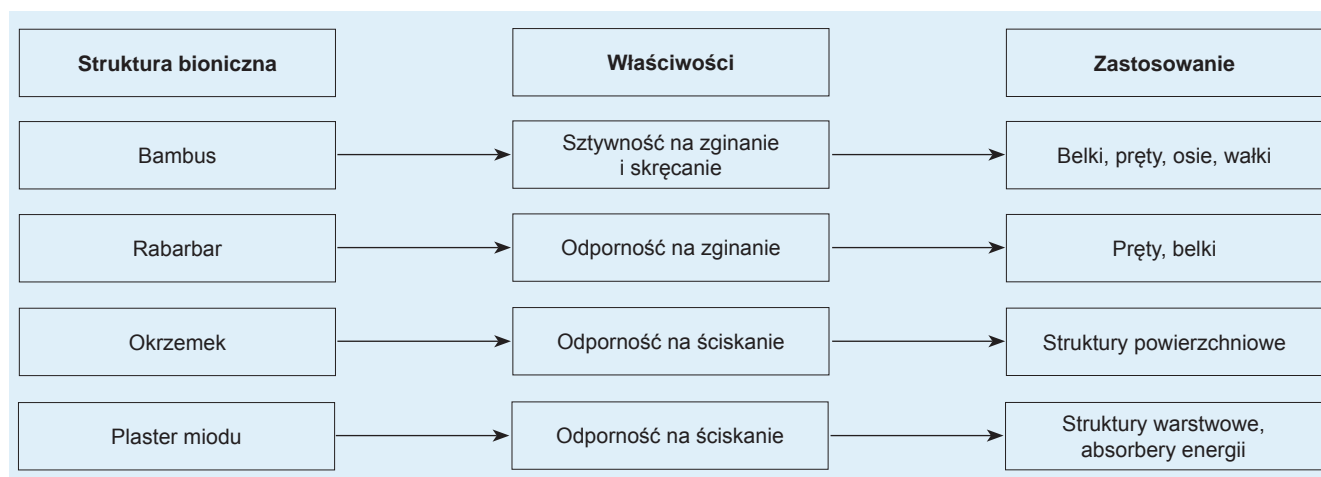
Projektanci lekkich i sztywnych konstrukcji naśladują budowę roślin (np. sitowia, bambusa, kukurydzy, rabarbaru, gałęzi i liści drzew czy kwiatów) oraz zwierząt (szkieletów, kości, dziobów dzięcioła czy tukana, okrzemek, skorupiaków itp.) [9].

Można wyróżnić następujące etapy projektowania bionicznego [6÷10] (rys. 2 i 3):

1. Sformułowanie celu technicznego.
2. Analiza struktur biologicznych (teoria podobieństwa, metody oparte na logice rozmytej) w celu wyboru i wstępnej oceny praktycznej przydatności modelu biologicznego.
3. Modelowanie matematyczne wybranych struktur modelu biologicznego służące określeniu charakterystyk obiektu technicznego wytworzonego w oparciu o model bioniczny (sztywności, wytrzymałości, rozkładu odkształceń i naprężeń, charakterystyk dynamicznych – drgań). Przydatna jest tu metoda elementów skończonych (*finite elements method* – FEM).
4. Zaprojektowanie modelu do badań doświadczalnych na podstawie wyników modelowania matematycznego. Wytwarza się go tradycyjnymi metodami: NC i CNC, odlewa; coraz częściej stosuje się też metody przyrostowe. Modele dużych elementów wykonuje się w odpowiedniej skali (np. 1:4 czy 1:6).
5. Ocena zmniejszenia masy, zwiększenia sztywności, wytrzymałości, wielkości odkształceń, charakterystyk dynamicznych (drgań) na podstawie wszechstronnych badań modelu i uogólnienia uzyskanych wyników na rzeczywisty obiekt.



Rys. 2. Schemat opracowania koncepcji projektu (modelu) bionicznego dla założonego celu technicznego w oparciu o takie kryteria, jak: podobna struktura, podobne obciążenie, podobne funkcje [9]



Rys. 3. Zestawienie właściwości i zastosowania niektórych struktur bionicznych [10]

6. Ocena stopnia realizacji celu technicznego. Jeżeli jest ona pozytywna, to zostaje wykonany prototyp funkcjonalny; jeżeli cel nie został osiągnięty, wówczas można powtórzyć działania (skorygować) od słabego punktu (1÷5).

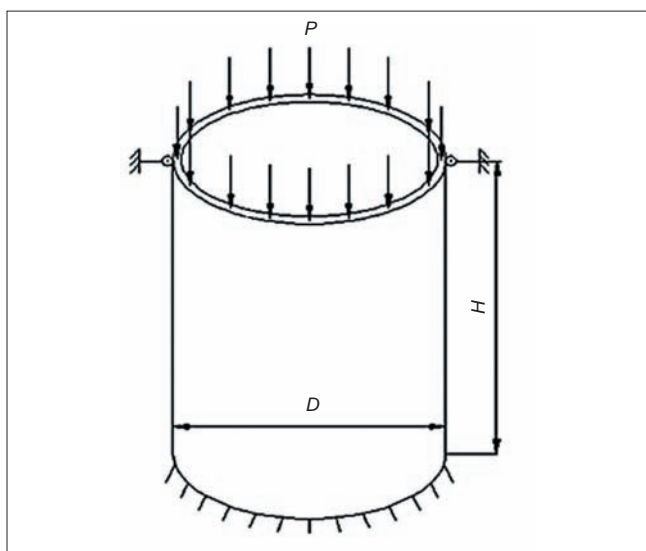
Należy podkreślić, że w całym cyklu badań niezwykle ważnym narzędziem jest intuicja.

Przykłady konstrukcji bionicznych

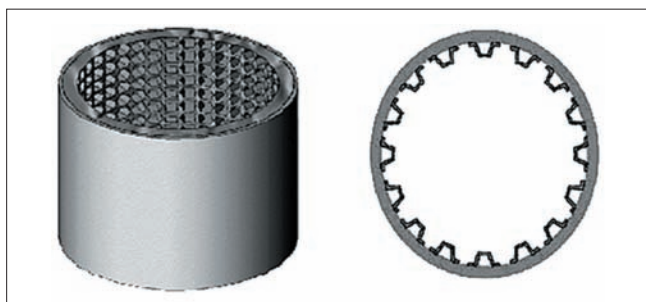
We wszystkich prezentowanych przykładach konstruktorzy dążyli do wzmocnienia odporności na obciążenia, ale w taki sposób, by zachować lub zwiększyć sztywność (zmniejszyć odkształcenia), a jednocześnie zredukować masę.

Cylinder cienkościenny (rys. 4, 5, 8)

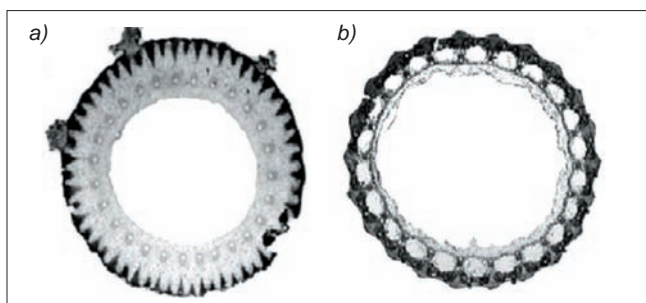
Celem projektu bionicznego było podniesienie odporności (wytrzymałości) na obciążenie bez zmiany wymiarów gabarytowych. W analizie struktur biologicznych uwzględniono brazylijski koński ogon, holenderskie sitowie oraz bambus (rys. 6, 7 i 9).



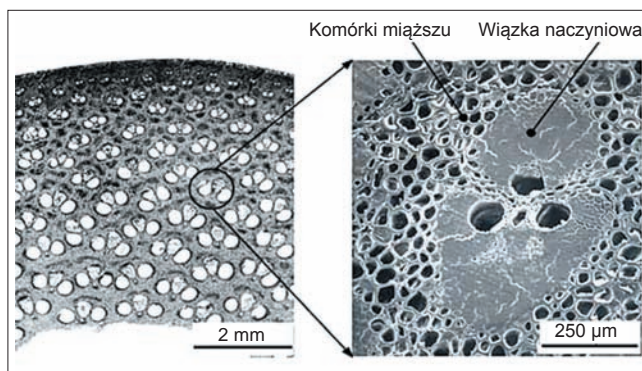
Rys. 4. Cienkościenny cylinder o średnicy D i wysokości H poddany obciążeniu osiowemu P [11]



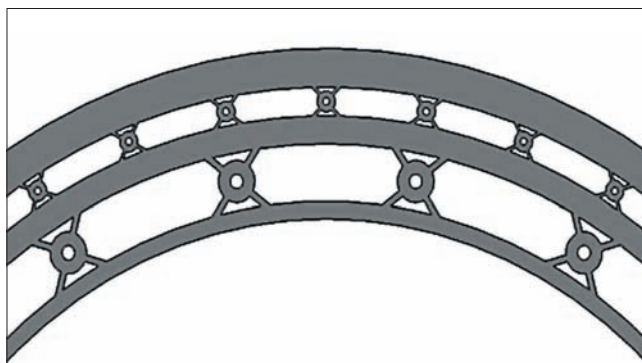
Rys. 5. Rzeczywisty cylinder zaprojektowany tradycyjnie (widok i przekrój poprzeczny)



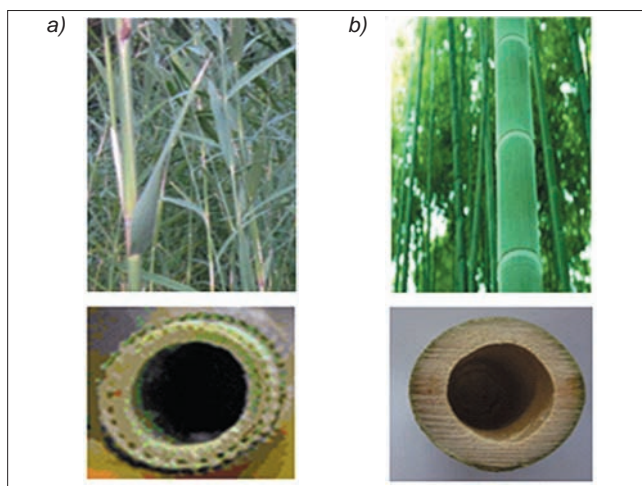
Rys. 6. Przekroje pędów roślin: a) brazylijskiego końskiego ogona, b) holenderskiego sitowia [11]



Rys. 7. Przekroje poprzeczne bambusa w różnej skali [11]



Rys. 8. Przekrój poprzeczny bionicznego cylindra cienkościennego o budowie wzorowanej na strukturach z rys. 6 i 7; takie rozwiązanie zapewnia wzrost odporności cylindra na obciążenie o 124% [11]



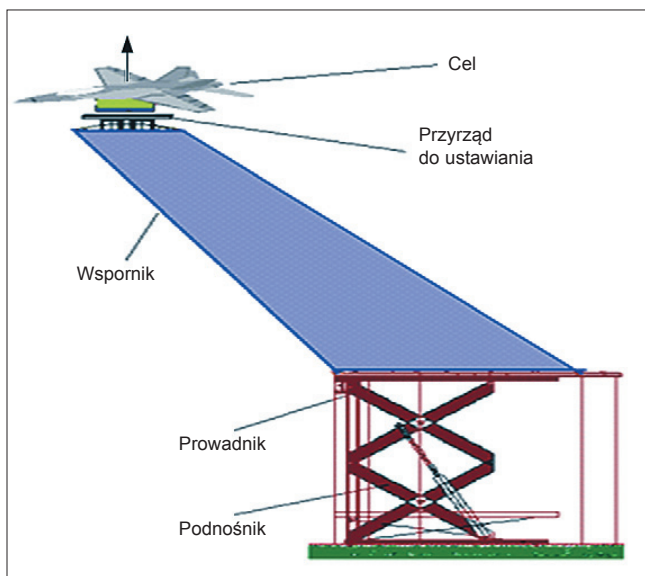
Rys. 9. Struktura przekroju poprzecznego oraz widok charakterystycznych kolanek usztywniających rośliny: a) sitowie, b) bambus; struktura sitowia zawiera trzy warstwy pomiędzy zewnętrznym i wewnętrznym pierścieniem [12]

Bioniczny projekt wspornika radaru (rys. 10)

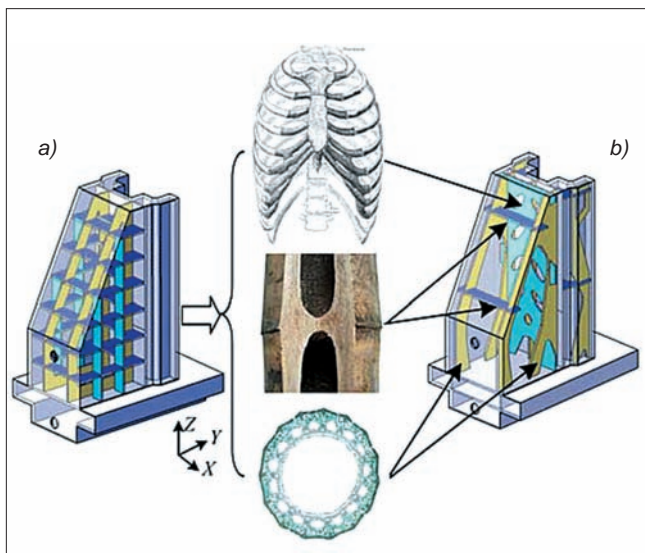
We wstępnej analizie struktur biologicznych uwzględniono sitowie, sorgo, zboże i bambus. Wszystkie te rośliny miały pusty rdzeń, charakterystyczną budowę kolanek oraz warstwową strukturę przekroju (rys. 9). Podczas projektowania wspornika w największym stopniu wzorowano się na budowie sitowia i bambusa.

Projekt bioniczny korpusu obrabiarki

Celem technicznym była redukcja masy i zwiększenie sztywności dotychczas stosowanych struktur. W projekcie uwzględniono budowę kości ssaków, bambusa (szczególnie



Rys. 10. Wspornik radaru został zaprojektowany z wykorzystaniem jako modelu struktury sitowia i bambusa (rys. 9). Wytrzymałość bionicznego wspornika w stosunku do tradycyjnego wzrosła o 52,9%, sztywność – o 43,6%, natomiast masa zmniejszyła się o 43% [12]



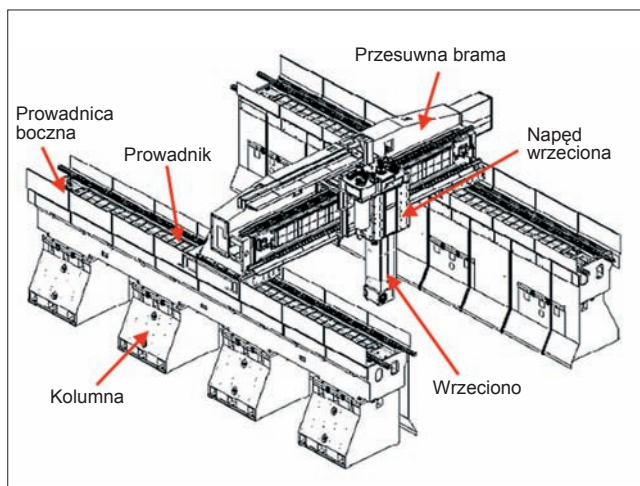
Rys. 11. Od dotychczas stosowanej struktury kolumny (a) przez analizę struktur kości ssaków i roślin (bambus, łodygi roślin) oraz dzioba dzięcioła do struktury bionicznej kolumny (b). W projekcie bionicznym zmniejszono odkształcenia o ~45,9%, a masę o 6,13% przy równoczesnym wzroście sztywności o 21,1% [13]

kolanek – węzłów), łodyg roślin (warstwowość), dzioba dzięcioła (porowatość – tłumienie drgań). Konstrukcję bioniczną przedstawiono na rys. 11.

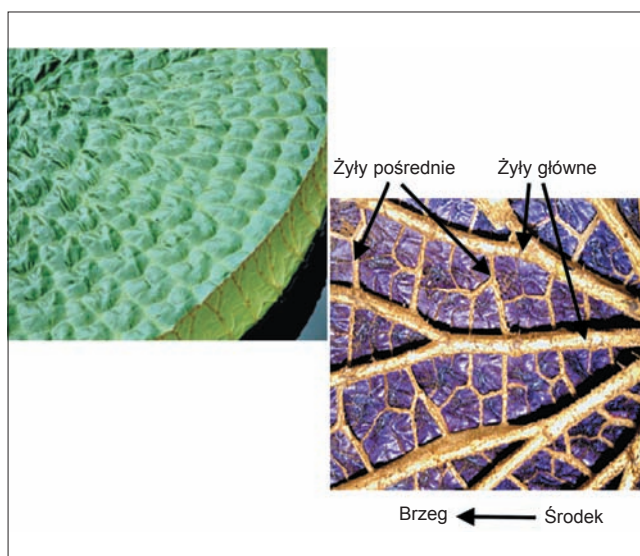
Projekt bioniczny przesuwnej bramy centrum obróbkowego

W projekcie bionicznym przesuwnej bramy (rys. 12) centrum obróbkowego Lin MC600 wykorzystano analizę liści roślin (np. uzebrowania liścia lilii wodnej *Gloeopermum*) oraz pędu kaktusa (rys. 13 i 14). Głównym celem technicznym projektu było zwiększenie sztywności (zmniejszenie odkształceń) oraz redukcja masy przesuwnej bramy.

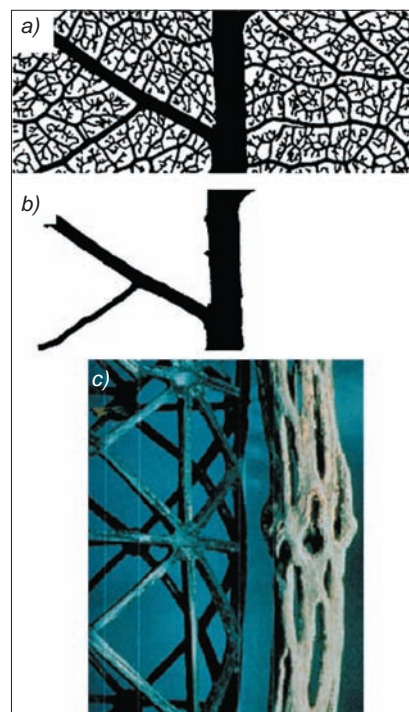
Na podstawie analizy sieci użytkowań (rys. 13 i 14) przeprowadzono procedurę projektowania konstrukcji bionicznej (modelowanie matematyczne → budowa modelu materialnego → badania tego modelu → uogólnienie wyników badań i obliczeń na obiekt rzeczywisty – rys. 2 i 3) i opracowano projekt bioniczny bramy (rys. 15b).



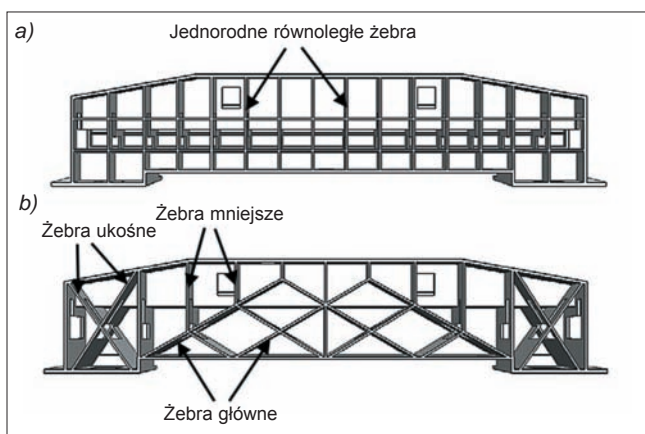
Rys. 12. Schemat obrabiarki z przesuwającą bramą (portalem), np. frezarka bramowa z przesuwającą bramą i nieruchomym stołem (Lin MC600) [14]



Rys. 13. Liść lilii olbrzymiej (po lewej) oraz struktura jego użytkowania (po prawej) [14]



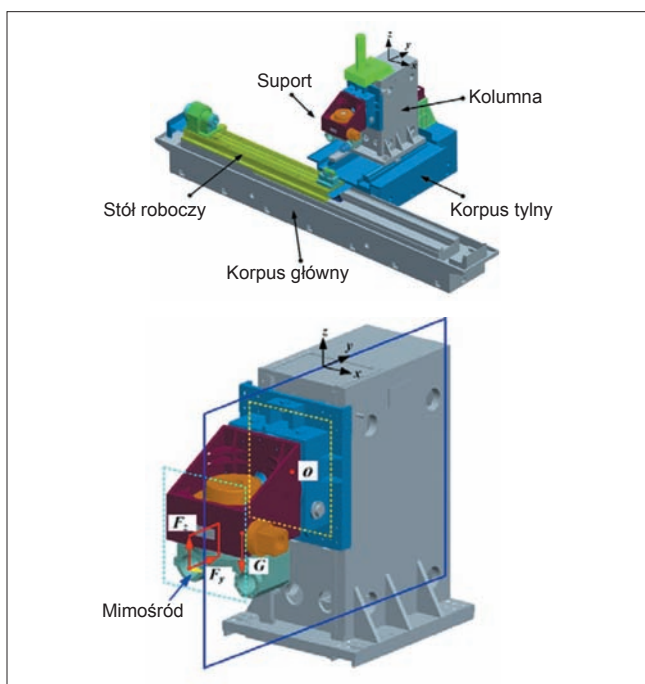
Rys. 14. Sieć użytkowania liścia *Gloeopermum* (a, b) oraz pędu kaktusa meksykańskiego (c) [14]



Rys. 15. Konstrukcja bramy centrum obróbkowego: a) tradycyjna, b) bioniczna. Bioniczna konstrukcja charakteryzuje się mniejszymi odkształceniami (~16,22%), mniejszą masą (~3,31%) oraz większą sztywnością (~17,33%) w stosunku do bramy zaprojektowanej w tradycyjny sposób. Równocześnie poprawie uległy charakterystyki dynamiczne (odporność na drgania) bramy [14]

Projekt bioniczny kolumny ultraprecyzyjnej szlifierki (rys. 16)

Celem technicznym projektu było zwiększenie sztywności, zmniejszenie masy i odkształceń. Jako model biologiczny wykorzystano strukturę użytkownika liści, ponieważ występowało podobieństwo pomiędzy nim a rzeczywistą kolumną w zakresie: struktury (sieć użytkownika), obciążenia (zginanie i skręcanie) i funkcji (wysoka sztywność). W ten sposób udało się w wyrobie rzeczywistym zmniejszyć masę kolumny o 1,31% i odkształcenie o 23,6%.



Rys. 16. Ultraprecyzyjna szlifierka; projekt bioniczny dotyczył kolumny [15]

Podsumowanie

Szczegółowa analiza porównawcza systemów technicznych (*lean, just in time*, systemy i obiekty inteligentne) oraz systemów biologicznych wskazuje, że również w tym obszarze natura wypracowała racjonalne (wzorcowe) rozwiązania. Wykorzystanie osiągnięć bioniki w projektowaniu konstrukcji sztywnych i lekkich, od których oczekuje się korzystnych charakterystyk przy obciążeniu statycznym i dynamicznym, jest podejściem racjonalnym.

Metodyka projektowania lekkich i sztywnych konstrukcji wymaga pracy zespołowej. Zespół inżynierów może zrealizować znaczną część procesu projektowania, ale w analizie porównawczej obiektów technicznych i bionicznych oraz interpretacji wyników badań musi wziąć udział zespół biologów. Jeżeli rezultaty badań nie potwierdzają osiągnięcia celu technicznego, tylko biolog może wskazać procedurę naprawczą projektu bionicznego.

Nasuwa się pytanie, dlaczego zakres praktycznych zastosowań osiągnięć bioniki rozszerza się stosunkowo powoli. Wynika to wielu powodów. Najpierw należy przeorganizować zespoły konstrukcyjne (lub stworzyć nowe), nauczyć je pracy zespołowej i przeszkolić w zakresie nowej metodologii tworzenia projektów konstrukcji bionicznych, modelowania matematycznego i symulacji komputerowej oraz weryfikacji doświadczalnej wyników obliczeń na modelach, a także transferu uzyskanych wyników na rzeczywiste obiekty. Konstrukcje bioniczne w wielu przypadkach dotyczą dużych gabarytowo obiektów i do badań potrzebne są modele w odpowiedniej skali.

Nie ma wątpliwości, że konstrukcje bioniczne zapewniają zmniejszenie masy, zwiększenie sztywności oraz poprawę charakterystyk statycznych i dynamicznych, ale zaprojektowane struktury są zwykle trudne do wykonania metodami tradycyjnymi, co komplikuje ich zastosowanie w praktyce.

Metodyka projektowania bionicznego jest wciąż rozwijana i doskonała, ale nie ma jeszcze sformalizowanych procedur. Z tego względu w całym cyklu projektowania bionicznego niezwykle ważnym narzędziem badawczym obok wiedzy jest intuicja.

LITERATURA

- Lothar W., Isenmann R., Moehle M.G. "Bionic in patents – semantic-based analysis for the exploitation of bionic principles in patents". *Procedia Engineering*. No. 9 (2011): pp. 620-632.
- Lurie-Luke E. "Product and technology innovation: What can biomimicry inspire". *Biotechnology Advances*. No. 32 (2014): pp. 1494-1505.
- Shu L.H., Ueda K., Chiu I., Cheong H. "Biologically inspired design". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. No. 60 (2011): pp. 673-693.
- Oczko K.E., Kawalec A. „Kształtowanie metali lekkich”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012: s. 573.
- Klocke F., Klink A., Veselovac D., Aspinwall D.K., Soo Sien L., Schmidt M., Schilp J., Levy G., Kruth J.P. "Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electrophysical and photonic processes". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. No. 63 (2014): pp. 703-726.
- Quinn S., Gaughran W. "Bionics – An inspiration for intelligent manufacturing and engineering". *Robotics and Computer – Integrated Manufacturing*. No. 26 (2010): pp. 616-621.
- Mill F., Sherlock A. "Biological analogies in manufacturing". *Computers in Industry*. No. 43 (2000): pp. 153-160.
- Grigorian M. "Biomimicry and theory of structures – Design methodology transfer from trees to moment frames". *Journal of Bionic Engineering*. No. 11 (2014): pp. 638-648.
- Zhao L., Ma J., Wang T., Xing D. "Lightweight design of mechanical structures based on structural bionic methodology". *Journal of Bionic Methodology*. No. 7 Suppl. (2010): pp. S224-S231.
- Emmelmann C., Sande P., Kranz J., Wycisk E. "Laser additive manufacturing and bionics: Redefining lightweight design". *Physics Procedia*. No. 12 (2011): pp. 364-368.
- Ma J., Che W., Zhao L., Zhao D. "Elastic buckling of bionic cylindrical shells based on bamboo". *Journal of Bionic Engineering*. No. 5 (2008): pp. 231-238.
- Jiao H., Zhang Y., Chen W. "The lightweight design of low RSC pylon based on structural bionics". *Journal of Bionic Engineering*. No. 7 (2010): pp. 182-190.
- Zhao L., Chen W., Ma J., Yang Y. "Structural bionic design and experimental verification of a machine tool column". *Journal of Bionic Engineering*. Suppl. (2008): pp. 46-52.
- Zhao L., Ma J., Chen W., Guo H. "Lightweight design and verification of gantry machining center crossbeam based on structural bionics". *Journal of Bionic Engineering*. No. 8 (2011): pp. 201-206.
- Li B., Hong J., Liu Z. "Stiffness design of machine tool structures by a biologically inspired topology optimization method". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. (2014), www.dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.03.005.