

# O kształtowaniu konstrukcji budowlanych z wykorzystaniem wzorców ze świata przyrody

Shaping construction structures by using patterns taken from nature

mgr inż. arch. Aleksandra Torberntsson (ORCID: 0000-0003-3689-8978), Szkoła Doktorska nr 5, prof. dr hab. inż. Hanna Michalak (ORCID: 0000-0001-5914-4859), Wydział Architektury, Politechnika Warszawska

DOI 10.5604/01.3001.0053.6974

**Streszczenie:** Procesy zachodzące w świecie przyrody od dawna skupiają uwagę i fascynują badaczy z zakresu m.in. nauk inżynierjno-technicznych. W projektowaniu architektonicznym czerpanie inspiracji z natury uzyskało nazwę procesu architektonicznego i bionicznego. Rozwój bioniki architektoniczno-budowlanej następuje w dwóch kierunkach, tj. badania praw i zasad panujących w świecie przyrody oraz wykorzystania wniosków z tych badań w projektowaniu. Bionika stała się jednym z trendów architektonicznych w światowej praktyce projektowej w okresie ostatnich czterdziestu lat, a także stała się nowoczesnym stylem architektonicznym, którego celem jest wdrażanie innowacyjnych zasad kształtowania formy architektonicznej, konstrukcji i technologii wykonania obiektów budowlanych inspirowanych wzorcami z natury.

**Słowa kluczowe:** bionika, styl bioniczny, struktura bioniczna, architektura organiczna, synteza natury, technologia.

**Abstract:** There are the processes that are taking place in the world of nature. It has continually fascinated researchers in the fields of engineering and technical science for a long time. In architectural design, taking an inspiration from nature for drawing has been called an architectural and bionic process. The development of bionics architecture and construction takes place in two directions, i.e. the study of the law and principles prevailing in the world of nature and the use of conclusions from these studies in design. Bionic has become one of the architectural trends in the world design practice over the last forty years and also has become a modern architectural style, the purpose of which is to implement innovative principles of shaping the architectural form, structure and technology of building objects inspired by patterns of nature.

**Keywords:** bionics, bionic style, bionic structure, organic architecture, synthesis of nature, technology.

## 1. Wprowadzenie

Z ewolucją i rozwojem człowieka oraz dzieł przez niego tworzonych od zawsze był związany postęp w działalności architektoniczno-budowlanej. Już w okresie starożytności Demokryt (filozof z Tracji) i Witruwiusz (architekt rzymski) zauważyli, że pierwotne schronienia ludzi były podobne, pod względem konstrukcji oraz formy, do budowli wykonanych przez zwierzęta, takie jak bobry, ptaki czy owady. Naśladownictwo natury następowało w sposób zamierzony bądź intuicyjny. Wiąże się to z tym, że formy „stworzone” przez przyrodę są doskonale przystosowane do otaczających je warunków i obciążeń (w tym przede wszystkim środowiskowych) dzięki wielu erom ewolucji [10].

Po raz pierwszy termin bionika został użyty przez amerykańskiego lekarza Jacka Steele’a. Nowe określenie powstało przez połączenie ze sobą słów biologia i elektronika (ang. *biology + electronics = bionics*). Inne często używane określenie opisujące naśladownictwo świata przyrody, to biomimikra oraz biomimetyka mające swoje źródła w języku greckim (*bios* – życie, *mimesis* – naśladowanie, imitacja) [19].

Obiekty będące przedstawicielami architektury bionicznej powinny spełniać m.in. kryteria, które w sposób jednoznaczny

podkreślają cechy charakterystyczne struktur występujących w przyrodzie, takie jak wyrafinowane kształty, lekkość konstrukcji i formy, przestrzenność formy, krzywoliniowość konturów, „płynność powierzchni” itp. [2, 10]

## 2. Historia rozwoju

Człowieka od wieków inspirował otaczający świat i próbował odzwierciedlić swoje obserwacje w projektach rzeźbiarskich i artystycznych. Pierwsze formy bioniczne zaobserwowano w Starożytnym Egipcie, gdzie wykonywano kolumny odzwierciedlające wizualnie i pod względem budowy (konstrukcyjnym), dzieła świata przyrody, w tym m.in. kolumny żłobkowe – przypominające wiązki trzciny, kolumny w kształcie kwiatu lotosu, palm, papirusów czy stożkowe o zwieńczeniu podobnym do korony drzewa [8].

W Starożytnej Persji projektowano unikalne kolumny, które cechowały się żłobkowaniem lub rowkowaniem, podwójnymi wolutami, dwugłowymi kapitelami (rys. 1). Najczęściej stosowanym motywem zwierzęcym były sylwetki byków, lwów bądź koni. Sala Stu Kolumn w mieście Persepolis, założonym przez Dariusza I w 518 roku p.n.e., słynie z kolumn zwieńczonych wyrzeźbionymi, podwójnymi sylwetkami koni i byków [5].



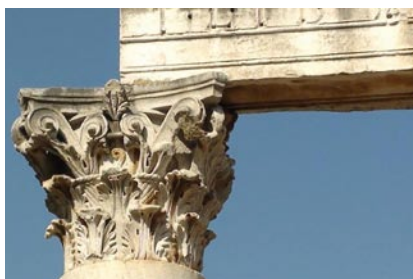
Fot. Pixabay

**Rys. 1.** Kapitel w kształcie dwóch koni, Persepolis, Iran



Fot. Hanna Michalak

**Rys. 2.** Kapitele jońskie



Fot. Hanna Michalak

**Rys. 3.** Kapitel koryncki

W budowlach wznoszonych przez Starożytnych Greków można zauważyć elementy nawiązujące formą do świata przyrody. Obiekty, takie jak Świątynia Artemidy w Efezie czy Apteros, zostały zbudowane w porządku jońskim (rys. 2). Kapitele kolumn w tym porządku ukształtowały się w VI w. p.n.e. i charakteryzują się wolutami w kształcie baranich rogów. Z kolei w Świątynia Zeusa Olimpijskiego w Atenach został zastosowany porządek koryncki opracowany na przełomie V i IV w. p.n.e. przez architekta Kallimacha (rys. 3). Cechuje go kapitel w kształcie kosza uformowanego z dwóch rzędów liści akantu [15].

W odniesieniu do analogii strukturalnych należy nadmienić, że architektura gotycka była źródłem nowych rozwiązań architektonicznych, których efektem są monumentalne, smukłe zdające się przeczyć prawom fizyki formy. Często stosowanymi wówczas elementami konstrukcyjnymi były sklepienia wachlarzowe, przypominające kształtem muszle lub liście palmowe [18].

Leonardo da Vinci (1452–1519), włoski artysta renesansowy, był wybitnym obserwatorem przyrody. Jego ciekawość w połączeniu z umiejętnością łączenia sztuki i nauki (co odzwierciedla współczesną definicję bioniki) pomogła mu opracować pionierskie dzieła z zakresu budownictwa, a nawet mechaniki. Jedną z jego wielu fascynacji był lot ptaków i analiza sił utrzymujących go w powietrzu. Te obserwacje były podstawą opracowania projektu maszyny latającej. Z kolei forma skorupy żółwia stanowiła inspirację do ukształtowania maszyny bojowej przypominającej czołg [13].



Fot. Hanna Michalak

**Rys. 4.** Katedra Santa Maria del Fiore – kopuła Filippo Brunelleschi, Florencja, Włochy

Bazylika Santa Maria del Fiore we Florencji zwieńczona unikatową kopułą opartą na planie ośmiokąta foremego o rozpiętości 45,4 m została zaprojektowana przez włoskiego architekta Filippa Brunelleschiego w 1418 roku (rys. 4). Budowa kopuły trwała 16 lat (1420–1436), a podstawę jej ukształtowania stanowiła obserwacja budowy kurzego jaja. Architekt zauważył, że jajko – dzięki jego formie – pomimo pozornie kruchego „budulca” charakteryzuje duża wytrzymałość. Konstrukcja składa się z dwóch połączonych ze sobą murowanych z cegły kopuł (zewewnętrznej i wewnętrznej) opartych na 24 żebrach. Dodatkową inspiracją ze świata przyrody jest ułożenie cegieł w formie jodełki, dzięki czemu było możliwe wymurowanie powierzchni nachylonych w stosunku do poziomu pod dużym kątem [6, 9, 10].

Kataloński architekt Antoni Gaudí urodzony w 1852 roku stworzył całkowicie indywidualny i charakterystyczny styl określany mianem secesji. Jego projekty nawiązują do świata przyrody na wielu poziomach, tj. ornamentów, formy, ustrojów konstrukcyjnych (rys. 5). Gaudí projektował struktury bioniczne, mając świadomość, że z form występujących w przyrodzie można czerpać znacznie więcej niż tylko projektować detale i dekoracje. Uważał, że naturalne struktury są nie tylko estetyczne, ale także zoptymalizowane pod wieloma względami, w tym konstrukcji, wykorzystania materiału czy formy [14].

W historii architektury występuje również wiele obiektów architektury ludowej charakterystycznych dla danego regionu, jak minarety afrykańskie o kształcie zbliżonym do kopca termitów czy chaty słowiańskie kryte strzechą, których forma przypomina gniazda tkaczy itp [18].

### 3. Współczesne projekty i realizacje obiektów inspirowanych naturą

Współczesne budynki bioniczne czerpią inspirację ze świata przyrody i wykorzystują je w projektowaniu



Fot. Hanna Michalak

**Rys. 5.** Sagrada Familia, Antoni Gaudi, Barcelona, Hiszpania

na dwa sposoby, tj. bezpośrednie kopiowanie praw natury bądź kształtów czy struktur obiektów. Pierwsza metoda polega na odtworzeniu przede wszystkim sposobu funkcjonowania elementów budynku, tj. wentylacja obiektu z wykorzystaniem analogii do budowy stworzeń morskich czy zapewnienie odpowiedniego mikroklimatu we wnętrzu – ochrony przed promieniowaniem słonecznym z wykorzystaniem analogii działania ludzkiego oka.

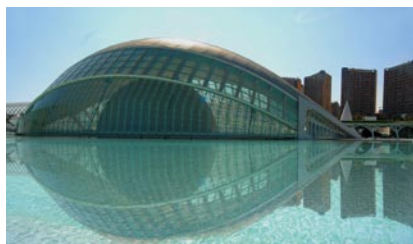
Pierwszym przykładem architektury bionicznej, w której zastosowano analogię do praw natury, jest Lotus Temple, zaprojektowana przez architekta Fariborza Sahba. Świątynia została wybudowana w 1986 roku w Delhi (Indie) o ciekawym kształcie bryły wzorowanym na budowie kwiatu lotosu unoszącego się na wodzie (rys. 6). Budynek składa się z 27 wolno stojących „płatków” pokrytych marmurem, ułożonych w grupy po trzy płatki, tworząc dziewięciobok foremny. Do budynku prowadzą mostki nad basenami, które pełnią funkcję estetyczną i stanowią element instalacji wentylacyjnej budynku. Zewnętrzna warstwa marmurowych paneli zwana „liśćmi wejściowymi” tworzy dziewięć wejść ułożonych koncentrycznie wokół głównej sali modlitwowej. Ostatnia, najwyższa warstwa płatków otwiera się lekko na zewnątrz, tworząc przestrzeń ze szklanym stropem, dzięki któremu pomieszczenie jest doświetlone naturalnym światłem [11].

Kompleks „Miasto Sztuki i Nauki” zaprojektowany przez Santiago Calatravę w Walencji w Hiszpanii, składa się z wielu różnych struktur, w tym L’Hemisfèric, Museu de les Ciències Príncipe Felipe, L’Umbracle, L’Oceanogràfic, Palau de les Arts Reina Sofia, Montolivet Bridge, Assut de l’Or Bridge, L’Àgora. Budowa rozpoczęła się w 1996 roku. Pierwszy obiekt L’Hemisfèric został ukończony w 1998 roku, a ostatni – Valencia Towers w 2005 roku [20]. Koncepcja urbanistyczna kompleksu jest oparta na zaakcentowanej osi podłużnej, wokół której są zlokalizowane bioniczne, „zatopione” w wodzie struktury z „białego” betonu, stali i szkła. L’Hemisfèric będący centralnym elementem tego założenia ma formę nawiązywać do kształtu ludzkiego oka (rys. 7). Dzięki zaprojektowaniu budynku

**Rys. 6.** Lotus Temple, Fariborz Sahba, Delhi, Indie



**Rys. 7.** Miasto Sztuki i Nauki, Santiago Calatrava, Walencja, Hiszpania – L’Hemisfèric



otoczonego przez wodę, a dodatkowo przeszklonego dna basenu – uzyskano zamierzony efekt, tj. odbicie wraz z budynkiem tworzą kształt oka. Kolejną analogią jest stworzenie aluminiowych żaluzji (powiek), które otwierają się i zamykają, aby ograniczyć nadmierne nasłonecznienie. Innym budynkiem tego kompleksu, którego forma nawiązuje do wzorów świata przyrody jest Museu de les Ciències Príncipe Felipe (rys. 8). Jego kształt przypomina szkielet wieloryba. Szkielet jest głównym elementem konstrukcyjnym składający się z wielu powtarzalnych modułów (kości), wykonanych z „białego” betonu. W celu wyeksponowania ażurowości i lekkości formy obiektu zostały zastosowane przeszklone ściany kurtynowe oparte na podkonstrukcji stalowej. L’Umbracle to promenada (w górnej części) połączona z parkingiem usytuowanym w dolnej części [20]. Pasaż zbudowany z 55 stalowych łuków o wysokości 18 m tworzy strukturę podobną do parasola rozpiętego nad ogrodem. Poniżej w poziomie parkingu projektant posłużył się konstrukcją nawiązującą do kształtu



**Rys. 8.** Miasto Sztuki i Nauki, Santiago Calatrava, Walencja, Hiszpania – Museu de les Ciències Príncipe Felipe

drzew. Restauracja L’Oceanogràfic – to budynek zaprojektowany przez Felixa Candela, również znajdujący się w obrębie „Miasta Sztuki i Nauki”, a w szczególności w centralnej części największego w Europie kompleksu morskiego. Budynek restauracji formą przypomina lilię wodną. Jego dach został zaprojektowany w formie ośmiu promieniście ułożonych płatków z powłoki cienkościennej. Każdy z płatków ma formę paraboloidy hiperbolicznej. Dzięki połączeniu struktury cienkościennej oraz odpowiedniego kształtu bryły budynek pomimo dużej rozpiętości wynoszącej 47 m nie wymaga zastosowania dodatkowych wewnętrznych podpór. Obiekt ma osiem podpór usytuowanych na obwodzie [21].

Innym projektem Santiago Calatravy jest wieżowiec Turning Torso zlokalizowany w Malmö w Szwecji (wybudowany w 2005 roku) przypominający formą skręcony męski tors. Budynek jest uznawany za pierwszy o „skręconej” bryle wieżowiec na świecie (rys. 9). Ma 59 pięter, a jego wysokość wynosi 190 m. Projektant wyabstrahował formę ludzkiego ruchu i przedstawił jako stos dziewięciu pięciokondygnacyjnych graniastosłupów pięciokątnych obrócony wokół centralnego rdzenia – przeznaczonych na komunikację pionową. Płyty stropowe są podparte na stalowych, pochylonych w stosunku do pionu słupach, które przenoszą obciążenia w obrębie jednego segmentu. W narożniku budynku zaprojektowano jedną kolumnę betonową, która przenosi obciążenia na całej wysokości (nie jest podzielona na sekcje).



Fot. Pixabay

**Rys. 9.** *Turning Torso, Santiago Calatrava, Malme, Szwecja*



Fot. Pixabay

**Rys. 10.** *Fragment Turning Torso, Santiago Calatrava, Malme, Szwecja – widoczna pionowa kratownica*

Dodatkowym elementem konstrukcyjnym jest zewnętrzna kratownica – przypominająca kręgosłup (rys. 10) współpracująca w przenoszeniu obciążeń z betonowym rdzeniem [4, 22]. 30 St Mary Axe, bardziej znany jako „Korniszon” (rys. 11), został zaprojektowany przez słynnego architekta Normana Fostera. Wieżowiec zrealizowany w 2004 r. jest zlokalizowany w Londynie. Ma 41 pięter i wysokość wynoszącą 180 m. Nazwa „Korniszon” wynika z rozpoznawalnego, zakrzywionego kształtu przypominającego ogórek. Bryła budynku nieznacznie rozszerza się na zewnątrz wraz z wysokością, a następnie ulega zwężeniu. Taki kształt pod względem funkcjonalnym zapewnia większą powierzchnię publiczną u podstawy budynku i jednocześnie pod względem konstrukcyjnym – jest korzystny z uwagi na przenoszenie oddziaływania od wiatru. Pomimo „obłego” kształtu budynku zastosowano płaskie przeszklenie elewacji z wyłączeniem „soczewki” na szczycie kopuły panoramicznej. Inspiracją do projektu wieżowca zaczerpnięto z gąbki, tzw. Koszyczka Wenery. Dzięki swojej budowie tzn. kratkowemu egzoszkieletowi z krzemionki i cylindrycznemu kształtowi ma on zapewnioną odpowiednią sztywność i możliwość przenoszenia sił od silnych prądów występujących na dużych głębokościach. Strukturalna integralność gąbki zapewnia siatka krzemionkowych drzazg, które mogą zginać się w punktach przecięcia, aby absorbować naprężenia. Ten krzemionkowy szkielet tworzy wydrążony „kosz” gąbki, przez który woda morska jest filtrowana na składniki odżywcze. Woda przepływa przez kratkę i jest kierowana w górę przez wici. Korniszon naśladuje kształt i strukturę sieciową gąbki, tzn. szkielet budynku został tak zaprojektowany, aby system wentylacji wieżowca odzwierciedlał proces filtracji pożywienia gąbki. Powietrze dostarczane do budynku w poziomie parteru jest kierowane do pomieszczeń biurowych wzdłuż spiralnej ramy. Dzięki temu systemowi w budynku zmniejszono zużycie energii potrzebnej na instalację klimatyzacji o 50% w stosunku do standardowych jej rozwiązań. Dodatkowo każda płyta stropowa jest obrócona o 5 stopni względem



Fot. Hanna Michalak

**Rys. 11.** *Budynek Swiss Re, Norman Foster, Londyn, Wielka Brytania*

poprzedniej, co oprócz poprawy swobodnego przepływu powietrza wewnątrz wieżowca zapewnia lepsze doświetlenie miejsc pracy. Zakrzywiony kształt fasady ma charakter aerodynamiczny i w konsekwencji skutkuje ograniczeniem wpływu obciążenia wiatru na budynek [3, 12].

Stadion Narodowy w Pekinie, znany również Ptasie Gniazdo (rys. 12), został zaprojektowany przez biuro projektowe Herzog & de Meuron jako jeden z obiektów letnich igrzysk olimpijskich i paraolimpijskich w 2008 roku. Stadion składa się z dwóch niezależnych systemów konstrukcyjnych betonowych trybun oraz stalowo-membranowej konstrukcji dachu. Dach jest oparty na 24 głównych dźwigarach oraz drugorzędowych słupach i zastrzałach pełniących funkcję usztywniającą. Przestrzeń między trybunami i elewacją zewnętrzną wypełniają przezroczyste „poduszki” ETFE, co także stanowi analogię do ptasiego gniazda (patyki i gałązki – stanowią odpowiednik elemen-



Fot. Pixabay

**Rys. 12.** *Stadion Narodowy, Herzog & de Meuron, Pekin, Chiny*

tu konstrukcyjnego, a mech bądź inny materiał – wypełnienie o charakterze izolacyjnym). Podane rozwiązanie materiałowo-konstrukcyjne stadionu zapewnia zarówno ochronę użytkowników przed niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi, jak również odpowiednią izolacyjność akustyczną, termiczną oraz umożliwia doświetlenie murawy światłem naturalnym [16]. Kolejne przykłady dotyczą budynków, które naśladują świat przyrody w sposób dosłowny, nawiązując jedynie do kształtu danego elementu w przyrodzie.

Elephant Building zaprojektowany przez architekta Ongarda Satrabhandhuwa i zlokalizowany w dzielnicy biznesowej w Bangkoku w Tajlandii ma bryłę naśladującą sylwetkę słonia (rys. 13). Budynek został ukończony w 1997 roku, składa się z trzech wież o funkcji biurowej połączonych w części górnej „rygłem” będącym kompleksem mieszkalnym. Ma 32 piętra i wysokość 102 m. „Oczy słonia” stanowią dwa okrągłe okna, kły – żółte wspornikowe biura, uszy – wielokondygnacyjne balkony, a ogon – to dwudziestokondygnacyjne wykusze z przydymionego szkła [7].

**Rys. 13.** *Elephant Building, Ongard Satrabhandhuwa, Bangkok, Tajlandia*



Fot. Wikimedia Commons

**Rys. 14.** *Budynek w formie psa, Tirau, Nowa Zelandia*



Fot. Pixabay

Kolejnymi przykładami są budynki o bryłach w kształcie psa, owcy i barana wzniesione w Tirau w Nowej Zelandii [1]. Pierwsze dwa zostały wybudowane w latach 90. XX wieku, a ostatni pawilon oddano do użytkowania w 2016 roku. Elewacje budynków zostały obłożone okładziną z blachy falistej. Ich forma bezpośrednio nawiązuje do realizowanej wewnątrz funkcji i stanowi jej reklamę, tj. odpowiednio Big Dog Information Center (rys. 14), sklep z wełną.

Makau Pawilon na Shanghai World Expo to budynek w kształcie królika zaprojektowany przez chińską firmę Carlos Marreros Architects, pawilon ma dwuwarstwową szklaną membranę, a od zewnątrz są ekrany fluorescencyjne. Balony służą jako głowa i ogon „królika”, które można przesuwac w górę i w dół, aby przyciągnąć odwiedzających. Budynek został zbudowany z materiałów nadających się do recyklingu i składa się z paneli słonecznych i systemów zbierania deszczu. Projekt został zainspirowany króliczymi lampionami popularnymi podczas jesiennego festiwalu na południu Chin w czasach starożytnych [17].

#### 4. Podsumowanie

Budynki ukształtowane według zasad architektury bionicznej zazwyczaj charakteryzuje odpowiednie odzwierciedlenie formy bądź procesów zachodzących w przyrodzie.

Najistotniejszymi wnioskami wynikającymi z obserwacji dzieł świata zwierzęcego i roślinnego Natury, uwzględnianymi w procesie projektowym obiektu bionicznego, są:

- wykorzystanie promieniowania słonecznego przez odpowiednie usytuowanie i zorientowanie budynku w stosunku do stron świata i kąta padania światła słonecznego. W tym zakresie uwzględniane są obserwacje roślinności wykorzystującej promienie słoneczne do procesu fotosyntezy, stąd np. kwiaty kierują się w stronę bardziej nasłonecznioną. Analogiczną rolę w inżynierii budowlanej pełnią panele słoneczne, które

również czerpią energię słoneczną i przetwarzają ją na energię elektryczną wykorzystywaną do zasilania danego obiektu;

- dążenie do projektowania obiektów tzw. zeroenergetycznych, czyli wytwarzających energię z naturalnych źródeł (woda, wiatr, słońce) do zaspokajania w pełni swoich potrzeb energetycznych. Zauważa się, że w naturze żadna energia nie jest produkowana na zapas tylko w ilości niezbędnej do przetrwania;
- dopasowanie formy do funkcji, która w Naturze jest wynikiem wielu er ewolucji.

Ten trend występuje również w architekturze jako dążenie do tej zasady „form follows function”.

Ważnym aspektem kształtowania i projektowania obiektów bionicznych jest znaczący wpływ na rozwój wielu dziedzin nauki, w tym m.in. inżynierii materiałowej.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Alison: Big Dog and Sheep, 2014, (dostęp 20.07.2022), <https://www.atlasobscura.com/places/big-dog-and-sheep>
- [2] Benyus J. M., Biomimicry Innovation Inspired by Nature, Perennial, Nowy Jork, 2002
- [3] Biomimicry Venus' Flower Basket Sea Sponge, 2020, (dostęp 20.07.2022), [https://issuu.com/tkoga/docs/koga\\_tessa\\_des116\\_process\\_manual-final-pretsofia-1/s/10471883](https://issuu.com/tkoga/docs/koga_tessa_des116_process_manual-final-pretsofia-1/s/10471883)
- [4] Leguizamón C., Turning Torso. 2022, (dostęp 20.07.2022), <https://www.cityanatomy.com/articles/turning-torso>
- [5] Craven J., About Persian and Egyptian Types of Columns, 2018, (dostęp 20.07.2022), <https://www.thoughtco.com/persian-and-egyptian-columns-4092509>
- [6] Dean R., The Egg & the Architect., 2021, (dostęp 20.07.2022), <https://medium.com/signifier/the-egg-the-architect-6f8828863e57>.
- [7] Dunnell T., Elephant Building, 2019, (dostęp 20.07.2022), <https://www.atlasobscura.com/places/elephant-building>
- [8] The Columns of Ancient Egypt, (dostęp 20.07.2022), <https://ask-aladdin.com/egypt-travel-tips/columns-of-ancient-egypt/>
- [9] Konstantinovsky M., How Brunelleschi Built the World's Biggest Dome, 2021, (dostęp 20.07.2022), <https://science.howstuffworks.com/engineering/architecture/brunelleschi-dome.htm>
- [10] Lebidew J. S., Architektura i Bionika, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1983
- [11] Naharoy S., The Flowering of a Faith, Bahai News India, 1985
- [12] Nkandu M. I., Alibaba H. Z., Biomimicry as an Alternative Approach to Sustainability, Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, publikacja online, 2018
- [13] Nychka J. A., Po-Yu Chen., Nature as Inspiration in Materials Science and Engineering, JOM, publikacja online, 2012
- [14] Orman B., Art. Nouveau & Gaudi: The Way of Nature, JCCC Honors Journal, publikacja online, 2012
- [15] Ray M., Pfingsten M., Ancient Greek Buildings/What are Dorian, Ionic & Corinthian Styles? 2022, (dostęp 20.07.2022), <https://study.com/learn/lesson/ancient-greek-buildings-columns.html>
- [16] Rogers A., Yoon B., Malek C., Beijing Olympic Stadium 2008 as Biomimicry of a Bird's Nest, Peter Gou-hua Fu School of Architecture, McGill University, 2008
- [17] Sheikh W., The macau pavilion shaped into a rabbit lantern, 2017, (dostęp 20.07.2022), <https://updatedhome.com/amazing-pavilion-shape-rabbit/>
- [18] Sugár V., Leczovics P., Horkai A., Bionics in architecture, YBL Journal of Built Environment, tom 5, 2017
- [19] Szyrkowski J., Bionika, czyli natura w służbie innowacji, 2020, (dostęp 20.07.2022), <https://szyrkowski.eu/bionika-czyli-natura-w-sluzbie-innowacji/>
- [20] Tola A., Vokshi A., Santiago Calatrava, City of Arts and Science: The Similarity of the Element, Materiały Konferencyjne, 2013
- [21] Tomas A., Marti-Montrull P., Optimality of Candela's concrete shells: A study of his posthumous design, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 2010
- [22] Turning Torso, (dostęp 20.07.2022), <https://calatrava.com/projects/turning-torso-malmoe.html>