

Archivolta 3(59)2013 3/2013 s. 44-51

Powierzchnie minimalne i membrany architektoniczne **Minimal surfaces and architectural membranes**

Krystyna Januszkiewicz
WA Politechnika Poznańska

Słowa kluczowe: architektura, projektowanie cyfrowe, powierzchnie minimalne, membrany architektoniczne, membrany organiczne

Keywords: architecture, digital design, minimal surfaces, architectural membranes, organic membranes

Streszczenie

W XXI wieku coraz większą popularność zyskują struktury membranowe. Są one traktowane jako architektoniczna „skóra”, która ma chronić zawartość użytkową, a także reagować na działanie środowiska. Projektowanie struktur membranowych niewątpliwie implikuje zagadnienia dotyczące wyznaczania powierzchni minimalnych oraz samoorganizacji materiałowej. Cyfrowe narzędzia projektowania chociaż ułatwiają w dużej mierze rozwiązywanie wynikających stąd problemów, to jednocześnie skłaniają do namysłu nad ich genezą.

Objasnia się co to są powierzchnie minimalne i przedstawia się, pokrótce, przegląd badań: od eksperymentów z błoną mydlaną Joseph A. F. Plateau (1801–1883) do badań współczesnych Freia Otto, których wyniki dały podstawy do stworzenia cyfrowej bazy danych niezbędnej dziś w projektowaniu struktur napinanych. Modele z błony mydlanej weszły zatem do przestrzeni informatycznej jako symulacje cyfrowe, opisujące geometrie i zachowania struktur membranowych. Są to aproksymacje gładkich zakrzywionych powierzchni na siatce małych trójkątów, kontrolowanych przez siły wewnętrzne i właściwości materiału. Posługiwanie się tymi symulacjami w projektowaniu architektonicznym i inżynierskim umożliwiają cyfrowe narzędzia projektowania skierowane do inżynierów i architektów. Przedstawione zostały przykłady zastosowań tych narzędzi w projektowaniu „skóry” architektonicznej w zrealizowanych obiektach. Skierowano także uwagę na biomembrany oparte na wzorcach biologicznych. Chodzi o badania nad inteligentnymi (*smart*) membranami biologicznymi, które mogą współdziałać ze środowiskiem przez samołączenie struktur biologicznych i polimerów. Zastosowanie takich membran w budownictwie przyczyniłoby się do przeniesienia na wyższy poziom architekturę zrównoważoną w jej relacji ze środowiskiem naturalnym.

Abstract

In the twenty-first century, tensile membrane structures are increasingly gaining popularity. They are treated as architectural “skin”, which is to protect the utility contents, as well as to respond to the environment. Design of membrane structures undoubtedly implies the issues of determining minimum surfaces and the material self-organization. Digital design tools, although they make it much easier to solve the resulting problems, also prompt to reflect upon their origins.

It is explained what the minimal surfaces are, and an overview of the research from the experiments with a soap membrane by Joseph A.F. Plateau (1801-1883) to the contemporary research of Frei Otto is briefly presented, the results of which gave rise to the creation of digital database, which is necessary today in the design of tensile structures. Therefore, models with a soap membrane entered into the computer space as digital simulations, describing the geometry and behaviour of membrane structures. These are approximations of smooth curved surfaces on a grid of small triangles, controlled by internal forces and material properties. These simulations in the architectural and engineering design are made possible to be used by digital design tools addressed to engineers and architects. Examples of applications of these tools in the design of an architectural “skin” in the completed structures were presented. Attention was also drawn to the biofilm, based on biological models. It is about a study of smart biological membranes, which can interact with the environment by self-combining of biological structures and polymers. Using such membranes in construction would contribute to sustainable architecture reaching a higher level in its relationship with the natural environment.

W XXI wieku coraz większą popularność zyskują struktury napinane z zastosowaniem membran architektonicznych. Są one traktowane jako „skóra”, która ma chronić zawartość użytkową, a także reagować na działanie środowiska. Projektowanie struktur membranowych niewątpliwie implikuje zagadnienia dotyczące wyznaczania powierzchni minimalnych oraz samoorganizacji materiałowej.

Cyfrowe narzędzia projektowania chociaż ułatwiają w dużej mierze rozwiązywanie wynikających stąd problemów, to jednocześnie skłaniają do namysłu nad ich genezą.

Co to są powierzchnie minimalne?

Wyznaczanie powierzchni minimalnych zawsze było problematyczne w architekturze. Fizyczne zasady tworzenia takich powierzchni zostały dobrze udokumentowane dopiero XX wieku. Niewątpliwy wkład w badania nad powierzchniami minimalnymi wniósł Frei Otto (ur.1925), dając podstawy, na których opiera się dziś projektowanie inżynierskie struktur o powierzchniach minimalnych.

Jednakże w XIX w. napięciem powierzchniowym zajmował się przyrodnik Joseph A. F. Plateau (1801–1883). Badał on kształty błon mydlanych rozpinanych na profilach z drutu. Błona przyjmie wtedy taki kształt aby mieć jak najmniejsze pole powierzchni przy zadanych warunkach brzegowych czyli przy danym kształcie ramki z drutu. Dzieje się tak w wyniku istnienia napięcia powierzchniowego i energii powierzchniowej, które są proporcjonalnej do pola powierzchni. Każdy bowiem układ dąży do stanu, w którym energia jest minimalna. Eksperymenty z błoną mydlaną opisał Plateau w rozprawie pt. *Statique Expérimentale et Théorique des Liquides Soumis aux Seules Forces Moléculaires* (Statyczne eksperymenty i teoria cieczy pod działaniem sił molekularnych) wydanej drukiem w 1873. Badania Plateau przyniosły ważne wyniki geometryczne. Podobnie eksperymentował Leonardo da Vinci, o czym pisał James Clerck Maxwell (1831–1879) w *Encyclopedia Britannica*.

Matematycy znaleźli jednak inny sposób opisu powierzchni minimalnych, niezależny od kształtu jej brzegu. Pierre Simon de Laplace (1749–1827) wykazał, że powierzchnią minimalną jest taka powierzchnia, której średnia krzywizna w każdym jej punkcie jest równa zero, jak np. powierzchnia siodłowa. *Nota bene* powierzchnia płaska także ma zerową krzywiznę w każdym punkcie i jest szczególnym przypadkiem powierzchni minimalnej. W 1865 Hermann A. Schwarz (1843–1921) udowodnił matematycznie, że z mniejszych powierzchni minimalnych można złożyć większe powierzchnie, tzw. periodyczne powierzchnie minimalne. Powierzchnia taka jest gładka i nie ma żadnych załamań. W latach 70. minionego stulecia nauka dowiodła, że w mydle i innych detergentach występują periodyczne powierzchnie minimalne. Ich energia powierzchniowa powoduje działanie Czystzące. W przyrodzie takie periodyczne powierzchnie w roztworach wodnych uzyskują lipidy, z których zbudowane są błony komórkowe żywych organizmów. Od ponad dwudziestu lat powierzchnie minimalne są polem intensywnych badań naukowych inżynierii molekularnej, biomimetyki i nauki o materiałach, znajdując praktyczne zastosowanie w nanotechnologii.

Wyznaczanie i natura powierzchni minimalnych zaprzętała uwagę nie tylko przyrodników i matematyków, ale także badaczy poszukujących nowych rozwiązań strukturalnych w architekturze. Wspomnieć tu należy, że w latach 20. XX wieku Buckminster Fuller (1895-1983) poszukując wektorowej geometrii przepływu energii zakładał, że powierzchnie minimalne muszą być napięte, gdyż tylko takie występują w przyrodzie. Wartość owego napięcia zaś musi być zawsze taka sama we wszystkich kierunkach. Czyli musi być zapewniony efektywny i optymalny wysiłek wszystkich wektorów, gdyż tylko w ten sposób można otrzymać najbardziej wydajne energetycznie formy. Fuller uważał, że struktury napinane wznoszone, z własnej woli przez człowieka, są li tylko, interpretacją tych czystych zasad¹. Wielokrotnie w swoich wykładach i publikacjach wyjaśniał, dlaczego istota wytrzymałości strukturalnej tkwi w powierzchni, a nie w tym czy bryła jest pełna, czy pusta.

Rozpatrując powierzchnię łupiny przyjmował, że trójkątna siatka przebiegu linii sił wzajemnie stabilizujących się działa wewnątrz jej warstwy wierzchniej. Perforacja takiej łupiny to otwory pomiędzy liniami tych sił, które zawsze będą trójkątem lub jego wielokrotnością². W tych miejscach bowiem materiał nie pracuje i jest zbędny.

Powierzchnia siodłowa okazała się inspirująca dla Felisa Candeli (1910-1997), który w drugiej połowie XX wieku eksperymentował z symetrycznymi łupinami wykonywanymi z betonu zbrojonego. Pierwsza taka struktura powstała w 1958 aby pomieścić parkową restaurację *Los Manantiales* w Xochimilco w Mexico City. Ostatnie zaś tego rodzaju formy zaprojektowane zostały przez Candelę w 1997 i zrealizowane w 2002 w Walencji w parku *L'Oceanografic*, który przylega bezpośrednio do

¹Por. B. Fuller, E. J. Applewhite, *Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking*, New York 1975, 700.03.

² Por. B. Fuller, *Tensegrity*, Portfolio and Art News Annual, No. 4, 1961, 22.

zespołu obiektów należących do Centrum Nauki i Sztuki projektu Santiago Calatravy powstałego w latach 1995-1997³.

Dwukrzywiznowe hiperboliczno-paraboliczne przekrycia łupinowe o swobodnych krawędziach wykonywano w XX wieku opierając się na mało precyzyjnych obliczeniach ręcznych, na logice geometrii i inżynierskim doświadczeniu. Pełną analizę obliczeniową naprężeń w przekryciach łupinowych udało się przeprowadzić dopiero przy użyciu metody Elementów Skończonych (MES) za pomocą narzędzi cyfrowych zawartych w programie SAP2000.

W tym samym czasie, gdy Felix Candela wznosił się ze strukturami łupinowymi z betonu, istotne dla architektury badania nad powierzchniami minimalnymi prowadzone były przez wspomnianego już konstruktora Freia Otto w *Institut für Leichte Flächentragwerke* w Stuttgarcie. Frei posługiwał się modelami fizycznymi w badaniach powierzchni napinanych. Budował prostokątne drewniane stelaże aby rozpinąć membrany wykonywane z różnych materiałów. Urządzenia te dawały możliwość regulacji naciągu oraz pozwalały na mapowanie geometrii i zachowań membran zmieniających się w zależności od przyłożonej siły. Wyniki tych badań dały podstawy do stworzenia pierwszej komputerowej bazy danych dla procedur *form-finding* niezbędnych do określania kształtów i zachowań membran architektonicznych. Frei Otto był, bez wątpienia, prekursorem technik projektowych, które wykorzystują samoorganizację systemów materiałowych pod wpływem sił zewnętrznych.

W latach 70. XX wieku, wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej komputerów i rozwojem narzędzi cyfrowych rozpoczęła się rewolucja w wyznaczaniu powierzchni minimalnych. Modelowania fizyczne zostały wyparte przez narzędzia konceptualne, które zastępują nawet najwyższe standardy modeli wykonywanych ręcznie.

Od błony mydlanej do struktury tkaniny

Modelowanie komputerowe przynosi istotne korzyści. Daje swobodę kreatywnemu projektowaniu i rozwiązywaniu problemów inżynierskich, tak na poziomie struktur budowlanych, jak i struktur molekularnych. Z taką samą precyzją powstają modele w technice *rapid prototyping*, jak i zrealizowane są budowle, których wykonawcy używają robotów CNC.

Modele z błony mydlanej weszły do przestrzeni informatycznej jako symulacje cyfrowe, opisujące geometrie i zachowania struktur membranowych. Są to aproksymacje gładkich zakrzywionych powierzchni na siatce małych trójkątów, kontrolowanych przez siły wewnętrzne i właściwości materiału. W środowisku wirtualnym można symulować zachowania błon w połączeniu z innymi obiektami fizycznymi (belki, kable, fundamenty), w których występują strukturalne skutki działania grawitacji, siły wiatru, obciążenia śniegiem i warunkami hydrostatycznymi oraz nakładanie się innych sił. Błone mydlaną zastępuje prosty model obliczeniowy, który generuje powierzchnię o naprężeniach takich samych we wszystkich kierunkach. Rządzi się on własnymi prawami dyktowanymi przez właściwości fizyczne medium modelowania. Model jednorodnej błony mydlanej daje formy „czyste” strukturalnie, które rzadko satysfakcjonują architektów i spełniają oczekiwania twórcze artystów.

Potwierdza to instalacja *Marsyas* (2002) w Tate Modern w Londynie, wykonana przez artystkę Anisha Kapoora. Jest to forma o dużej rozpiętości i niejednorodnej krzywiznie, która wymagała opracowania podczas procesu koncepcyjnego wielu technik potrzebnych do zdefiniowania czynności i działań inżynierskich⁴.

Specjaliści z AGU (*AdvancedGeometryUnit*)⁵ wygenerowali najpierw nieliniową „błone mydlaną”, która posłużyła jako model do kontroli naprężeń w napinanej tkaninie i kierunków przebiegu jej wątków. Chodziło o to, żeby złączony materiał zachował integralność strukturalną. Ponadto wprowadzono eksperymentalnie kombinację ciśnienia hydrostatycznego i nieliniowych naprężeń powierzchni. Uzyskano obszary synklastyczne i antyklastyczne, nadające formie biomorficzny wygląd.

Chcąc mieć większą kontrolę nad membranami, zespół AGU sięgnął po istniejące od wieków metody krawców stosowane podczas sporządzania wykrojów do szycia ubrań. Najpierw powstają wykroje, które dopasowuje się na manekinie; odwrotnie niż w procesie projektowania i wytwarzania

³ Więcej patrz: K. Januszkiewicz, *Santiago Calatrava, Centrum Nauki i Sztuki w Walencji*, Archivolta 3/2000, 8-11.

⁴ Patrz: Ch. Walker, *Engineering Design: Working with Advanced Geometries*, AD, Vol. 74, 3/ 2004, 68-70.

⁵ Advanced Geometry Unit to zespół w biurze konstrukcyjnym Arup w Londynie, powołany przez Cecilia Balmonda w 2002.

struktur membranowych. Takie podejście jest już możliwe, gdyż opracowano nowy algorytm o nazwie *nip and tuck*, który dołączony jest do standardowego programu *form-finder*. Pozwala on modyfikować lokalne naprężenia i jak iteracyjny „krawiec” dopasowuje elementy membranowe do zaprojektowanej formy. Wyznacza minimalne i maksymalne naprężenia powierzchni. Po raz pierwszy algorytm ten użył Balmond, realizując *Serpentine Pavilion 2006* projektu Koolhaasa zwany *Cosmic Egg*⁶.

Włókna w strukturze konwencjonalnych tkanin są na tyle małe, że można je traktować jako ciągłe. Można podzielić powierzchnie, na modelach 3D, tak aby wycinać płaskie wykroje, które zszywa się lub zgrzewa. Gdy przyjrzeć się materiałowi w większej skali, to dojrzeć można siatkę utworzoną przez włókna. Układ włókien jest pomocny podczas łączenia wykrojów, gdy istotne jest zachowanie ciągłości strukturalnej. Trzeba zatem wiedzieć jak rozłożyć siatkę czy system strukturalny lub dowolny wzór na zadanej powierzchni, aby uzyskać pożądaną ciągłość. Rozwiązuje to proces nazwany mapowaniem powierzchni i jest analogiczny do procesu teksturowania w grafice 3D, jakkolwiek podczas mapowania tekstury w układ współrzędnych wprowadza się parametryzację. Jest ona niezależna od geometrii siatki wielokątów, przez którą powierzchnia jest reprezentowana.

Membrana jako architektoniczna skóra

Prymat powierzchni wyznaczającej objętość dla zawartości użytkowej w projektowaniu architektonicznym wymusza ustalenie relacji między jej geometrią a materiałem z jakiego może być wykonana. Nie wszystkie bowiem materiały posiadają odpowiedni *performance* aby z nich zbudować, powierzchnie powstające w syntetycznych przestrzeniach cyfrowych. Ponadto imperatyw zrównoważonego rozwoju nakazuje stosowanie nieinwazyjnych materiałów, współdziałających ze środowiskiem. Takim materiałem budowlanym są właśnie membrany, a coraz szerszy ich asortyment na rynku budowlanym zachęca projektantów do wyboru tego materiału do kształtowania tak zwanej „skóry” architektonicznej. „Skóra” ta ma już nie tylko osłaniać zawartość użytkową, ale także reagować na wpływ środowiska. Wpływ ten mogą symulować niektóre narzędzia cyfrowe i analityczne.

Jednym z pierwszych takich zastosowań membran architektonicznych jest *Saltwater Pavilion* w Neetje Jans (1997) projektu interdyscyplinarnej pracowni ONL. Forma tego obiektu powstała w wyniku cyfrowych procesów ewolucyjnych, którym poddano bryły platońskie, takie jak: sześciątka, kulę, walec i stożek. Uznano je za podstawowe elementy architektury. Wprowadzono także dane dotyczące środowiska i mikroklimatów wnętrza. Algorytm genetyczny wygenerował wiele propozycji, z których wybrano jedną spełniającą zadane kryteria. Był to ośmiościan nieforemny o elipsoidalnych krawędziach, którego powierzchnię zrealizuje dwuwarstwowa membrana. Wyobrażano sobie, że będzie to rodzaj torby porzuconej nad brzegiem morza. Użyto kompozytowy materiał membranowy. Podwieszona wewnątrz folia poliwęglanowa, z warstwą powietrza bez kompresji, pozwoliła stworzyć sugestywne, immersyjne środowisko interaktywne⁷.

Wyznaczanie naprężeń antyklastycznych w materiałach napinanych wciąż sprawia trudności. Nadal wiele form złożonych wyznacza się za pomocą modeli fizycznych. W latach 90. XX wieku David Geiger Engineers opracowali interaktywne techniki pozwalające projektantom przypisywać pożądane warunki naprężeniowe membranom i odciągom. Natomiast Birdair Inc., z powodzeniem, stosowali macierzowe analizy algorytmiczne *form-finding* dla struktur napinanych. Geometrię równowagi określa się tu w interaktywnych analizach strukturalnych.

Obecnie często stosowaną metodą *form-finding* jest dynamiczna relaksacja z kinetycznym chłodzeniem zawarta w specjalistycznych programach inżynierskich. Za pomocą tych narzędzi Franken i ABB Architekten zaprojektowali pawilon BMW *Dynaform* (2001) we Frankfurcie. Wraz z inżynierami Bollinger+Grohmann wykonali pionierską pracę z zakresu konstrukcji membranowych. Forma pawilonu, o geometrii nieeuklidesowej, wygenerowana została w polu sił wirtualnych symulujących wpływy środowiska. Zakładano, że tak otrzymana forma będzie możliwa do realizacji jako powierzchnia o strukturze *semi-monocoque*. Jednak analizy MES wykazały małą efektywność strukturalną obiektu o tak zbudowanej powierzchni.

⁶Więcej o rozwiązaniach strukturalnych w *Serpentine Pavilion 2006* patrz: M. Self, D. Bosia, *Woven Surface and Form*, AD, Vol. 76, No. 6/2006, 84–89.

⁷Por. K. Osterhuis, *Saltwater Pavilion | Neeltje Jans*, <http://www.oosterhuis.nl/quickstart/index.php?id=116> (z dnia 15.12.2007).

Formy o dwukrzywiźniej geometrii są zazwyczaj wydajne pod względem przenoszenia obciążeń i pozwalają na użycie lekkich materiałów, lecz są trudne do zbudowania. W tym przypadku, co wynikało z analiz inżynierskich, tylko membrana elastyczna mogła spełniać oczekiwane wymagania i pozwalała zachować wygenerowany kształt geometryczny. Aby naciągnąć tę elastyczną „skórę” niczym pończochę, należało zaprojektować odpowiedni szkielet. Szkieletem tym jest system odpowiednio ukształtowanych ram, które w pożądanym sposób formują membranę. Dzięki temu po raz pierwszy w historii struktur membranowych udało się naciągnąć membranę wzdłuż formy⁸.

Zanim dojdzie do realizacji struktury membranowej, projektant musi precyzyjnie określić położenie wszystkich elementów, kontrolować geometrycznie maksymalną liczbę punktów potrzebnych do opisanego systemu, który będzie konstruowany. Sugeruje to, że trzeba połączyć proces projektowania z kontrolą zachowań systemów materiałowych. Taką próbę podjęli Michael Hensel i Achim Menges, integrując w logikę formy i materiału w projektowaniu struktur membranowych. W takich strukturach punktowe siły naprężające korelowane są przez materiał i formę w dążeniu do osiągnięcia stanu równowagi oporu materiału z siłami zewnętrznymi. Pomocna jest wtedy metoda dynamicznej relaksacji. Wymaga ona wprowadzenia siatki cyfrowej, która rozstrzyga stan równowagi, opierając się na obliczeniach iteracyjnych opartych na specyfice elastyczności i zdolności układania się materiału membrany. Chodzi o właściwości izotropowe folii i tkanin w kombinacji z wyznaczaniem punktów granicznych i odpowiadających im sił⁹. Metoda ta jest przydatna w projektowaniu złożonych struktur. Już łatwo dostępny program *Form Finder* umożliwia określanie kształtów wykrojów membran z materiałów elastycznych i nieelastycznych.

W przypadku domu *Natural Ellipse* w Tokio (1999–2002) Nosaki Endoh i Masahiro Ikeda dysponowali niewielką działką (53 m²) w handlowej dzielnicy Shibuya. Potrzebna była forma, która wpisze się w działkę, a jednocześnie umożliwi realizację programu użytkowego. Był to torus, który wprowadzono w pole sił wirtualnych symulujących siły pochodzące ze środowiska. Rezultatem była taka deformacja torusa, która odpowiadała wymogom programu funkcjonalnego i miejsca lokalizacji. Dom zajmuje zaledwie 31 m² terenu i ma 132 m² powierzchni użytkowej.

Przez konturowanie określono główne komponenty strukturalne jego powierzchni. Wykonano je ze stali, a następnie, po montażu *in situ*, naciągnięto na nie membranę. Stanowi ją wodoodporna polimerowa tkanina FRP (Fiber-Reinforced-Polymer) wzmocniana włóknem szklanym, którą można modelować i łączyć ze stalową strukturą, tak aby powierzchnia nie straciła ciągłości geometrycznej¹⁰.

Podobne podejście przedstawia mobilny Burnham Pavilion (2009) w Nowym Jorku, projektu Zahy Hadid. Kompozytowa membrana rozciągnięto na szkielet z stopu aluminium, tak aby realizować powierzchnię wygenerowaną przez algorytmy ewolucyjne.

Membrany stają się coraz bardziej atrakcyjną alternatywą także w realizacji powierzchni ciągłych o dużych rozmiarach. Francuska firma FERRARI od ponad 10 lat proponuje architektom nowe osiągnięcia technologiczne, które są wynikiem poszukiwań w zakresie kompozytowych membran dla budownictwa. Obecnie, możliwość łączenia polimeru fluorowego (polifluorku winylidenu PVDF) ze środkami utwardzającymi *Fluotopâ T2* otwiera w tej dziedzinie nową epokę. Materiał ten jest odporny na działanie promieni ultrafioletowych i zanieczyszczeń atmosfery. Massimiliano i Doriana Fuksas wybrali właśnie taki materiał na półprzezroczystą skórę sali koncertowej Zénith de Strasbourg (2003–2008). Forma wygenerowana została w przestrzeni topologicznej o otwartym uniwersum przez manipulację topologiczną powierzchnią, polem izomorficznym oraz kinetyką szkieletu. Szkielet wykonano z elementów stalowych i montowano w przyjaznym środowisku procedurze konstrukcyjnej, opracowanej przez biuro Fuksasa¹¹. Powierzchnia jest tu nie tylko opakowaniem, ale także służy jako ekran do projekcji trójwymiarowych obrazów¹². Podobne rozwiązanie przedstawiła niemiecka firma JSK w projekcie stadionu na Euro 2012 we Wrocławiu.

⁸ Por. B. Franken, *Real as data Architecture*, w: Branko Kolarevic (red.), *Architecture in Digital Age. Design and Manufacturing*, New York and London, 2005, 136.

⁹ Por. A. Menges, *Polimorphism*, AD, Vol. 76, No. 2, 2006, 79–80.

¹⁰ Por. H. Aldersey-Williams, *Zoomorphic*, Laurence King Publishing Ltd., London, 2003, 109.

¹¹ Por. L. Salmon, *Le Zénith de Strasbourg de Massimiliano Fuksas*, <http://www.lesechos.fr/luxe/actu/300226013.htm> (z dnia 14.12.2007).

¹² Por. F. Edelmann, *Strasbourg s'offre le plus grand Zénith de France*, http://www.betom.fr/BETOM-ingenierie/articles/zenith_lemonde.pdf (z dnia 05.01. 2008).

Innym godnym uwagi przykładem jest Khan Shatyr Entertainment Center (2008–2009) w Astama. Jest to niesymetryczna konstrukcja napinana z centralnym masztem. Konceptualnie nie jest nowa, a pierwsze udane eksperymenty datują się na koniec XIX wieku, kiedy Władimir Szukow (1853–1939) po raz pierwszy opracował stosowane w praktyce obliczenia (na ścisłanie i rozciąganie) w wielko-przestrzennych strukturach napinanych, powłokach i membranach. Wykorzystał je najpierw podczas budowy pawilonu wystawowego na terenie Targów w Niżnym Nowgorodzie w 1896, przekrywając teren o powierzchni 26 000 m².

Zaprojektowana przez Nigela Younga i Foster&Partners konstrukcja w Astama jest wyjątkowa. Stanowi ją pochylony maszt, na którym na wysokości 150 m zamocowano swobodnie rozłożoną membranę z *Ethylene Tetrafluoroethylene*, która osłania teren o powierzchni 100 tys. m². Znalazły się tam kina, restauracje, kawiarnie i bary, park wodny i inne miejsca do spędzania wolnego czasu. Cyfrowe narzędzia, współpracując z projektantem, pomogły w wyznaczeniu powierzchni i w przeprowadzeniu potrzebnych obliczeń. Istotny problem stanowiła jednak różnica temperatur występująca w miejscu lokalizacji (od –35°C w zimie do +35°C w lecie). Rozwiązaniem była kombinacja kontroli temperatury z systemem wentylacji rozmieszczonych w trójwarstwowej membranie.

Membrany sprawdzają się nie tylko jako materiał budowlany, ale także budzą zainteresowanie przemysłu samochodowego. W 2008 inżynierowie BMW oraz BMW Group Designworks z USA opracowali prototyp samochodu BMW GINA Light Vision, którego konwencjonalna karoseria została zastąpiona przez elastyczną membranę rozciągniętą na aluminiowych elementach konstrukcyjnych auta. Kierowca posługuje się tym systemem za pomocą przycisków umieszczonych we wnętrzu auta. Membrana ta to materiał kompozytowy złożony z włókna węglowego, poliuretanowej likry i osnowy z siatki metalowej, odporny na wysoką temperaturę. Po raz pierwszy materiał ten został wykorzystany w produkcji opuszczanych dachów w BMW Z4 M Roadster i BMW Z4 M Coupé. Taka karoseria znacznie obniżyła ciężar samochodu, a co za tym idzie, zużycie paliwa. Obniżają się koszty produkcji, zużycie surowców i energii. Szybkość produkcji sprawia, że mogą zostać uwzględnione preferencje klienta już na etapie projektowania¹³. Należy oczekiwać, że niebawem systemy membran odkształcalnych znajdą zastosowanie w architekturze.

Membrany biologiczne

Rosnące, zwłaszcza w przemyśle budowlanym, zainteresowanie membranami kieruje uwagę instytutów badawczych ku membranom powstającym w procesach naturalnych. One bowiem są najbardziej wydajne gdyż zapewniają organizmom funkcje biologiczne. W ich budowie i funkcjach poszukuje się wzorców dla membran syntetycznych o szerokim zastosowaniu.

Membrany biologiczne to głównie lipidy i białka, z nich formują się ograniczenia komórek i ich główne struktury. Dwuwarstwowa membrana złożona tylko z lipidu to podstawa wszystkich membran biologicznych. Jest ona także warunkiem początkowym życia komórki.

Lipid jest związkiem organicznym, który nie rozkłada się w żadnym rozpuszczalniku organicznym. To właśnie lipidy wraz z węglowodanami i białkami konstytuują podstawowe materiały budowlane żywych komórek.

Podstawową funkcją membran biologicznych jest zapewnianie integralności komórce, czyli oddzielanie wnętrza od zewnątrz, jak również przeprowadzanie inteligentnej filtracji. Woda i inne substancje, takie jak węgiel i tlen ulegają bowiem dyfuzji przez membranę, jak i większość cząstek koniecznych do funkcjonowania komórkowego. Informacja jest także transmitowana przez membranę; szczególnie przez membrany białkowe (receptory, hormony) czy inne cząstki informacyjne, które transmitują sygnał do wnętrza komórki. Membrany, formując granicę między cytoplazmą a środowiskiem, narażone są na presję z zewnątrz i na patogenne procesy wewnątrz. Kontrola procesów chemicznych w membranach wymaga trzech komponentów:

- 1) sensora który będzie reagował na wystąpienie takiej koncentracji chemicznej, która powinna być kontrolowana,
- 2) kontrolera, który zmieni tę reakcję w sygnał wysyłany do organu wykonawczego,
- 3) organu wykonawczego, który uruchomi mechanizm kontroli.

¹³ Por. BMW media Information, *The BMW GINA Light Visionary Model. Innovative approach and optical expression of creative freedom*,

Systemy w żywych komórkach łączą się tak, aby transmembranowe kanały jonowe mogły być otwarte lub zamknięte w odpowiedzi na wiadomość chemiczną. Mogą być to molekuly protein osadzone w plazmie membran komórek, które akceptują obecność molekuł biologicznych przez otwarcie kanałów, pozwalając na selektywne przejście jonów przez wodoodporną membranę¹⁴.

Naukowcy poszukują membran, które, przez molekuly biologiczne, byłyby zdolne selektywnie rozpoznawać sygnały tak jak membrany naturalne. Zmieniając swoją porowatość, pozwoliłyby innym cząstkom przenikać do środka. Zmiany porowatości można kontrolować na poziomie lokalnym bez centralnego ośrodka kontroli. Takie biomembrany nie są jeszcze dostępne dla przemysłu budowlanego. Produkowane są tylko inteligentne (*smart*) membrany biologiczne, które mogą współdziałać ze środowiskiem przez samołączenie struktur biologicznych i polimerów¹⁵, lecz skala ich zastosowań, to tylko mikrofiltracje i dyfuzje gazów, a badania koncentrują się na czynnikach terapeutycznych. Jednak szybkie tempo badań nad membranami biologicznymi może przenieść interakcję i wymianę między wnętrzem a zewnątrz na zupełnie nowy poziom, dzięki programowalnej inteligentnej filtracji i dystrybucji w skali molekularnej. Takie materiały, w połączeniu z procesami metabolicznymi, mogą przyczynić się do usuwania zanieczyszczeń i poprawy jakości powietrza oraz wody zarówno w środowisku wewnętrznym, jak i zewnętrznym.

BIBLIOGRAFIA

- [1] H. Aldersey-Williams, *Zoomorphic*, Laurence King Publishing Ltd., London, 200
- [2] F. Edelmann, *Strasbourg s'offre le plus grand Zénith de France*, http://www.betom.fr/BETOM-ingenierie/articles/zenith_lemonde.pdf (z dnia 05.01. 2008).
- [3] B. Franken, *Real as data Architecture*, w: Branko Kolarevic (red.), *Architecture in Digital Age. Design and Manufacturing*, New York and London, 2005,
- [4] B. Fuller, E. J. Applewhite, *Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking*, New York 1975
- [5] B. Fuller, *Tensegrity*, Portfolio and Art News Annual, No. 4, 1961.
- Por. Michael Hensel, *(Synthetic) Life Architectures: Ramifications and Potentials of a Literal Biological Paradigm for Architectural Design*, AD, Vol. 76, No. 2, 2006.
- [6] K. Januszkiewicz, *Santiago Calatrava, Centrum Nauki i Sztuki w Walencji*, Archivolta 3/2000, 8-11.
- [7] A. Menges, *Polimorphism*, AD, Vol. 76, No. 2, 2006, 79–80.
- [8] L. Salmon, *Le Zénith de Strasbourg de Massimiliano Fuksas*, <http://www.lesechos.fr/luxe/actu/300226013.htm> (z dnia 14.12.2007).
- [9] K. Osterhuis, *Saltwater Pavilion | Neeltje Jans*, <http://www.oosterhuis.nl/quickstart/index.php?id=116> (z dnia 15.12.2007).
- [10] Ch. Walker, *Engineering Design: Working with Advanced Geometries*, AD, Vol. 74, 3/ 2004, 68–70.
- [11] M. Self, D. Bosia, *Woven Surface and Form*, AD, Vol. 76, No. 6/2006, 84–89.

¹⁴ Por. Michael Hensel, *(Synthetic) Life Architectures: Ramifications and Potentials of a Literal Biological Paradigm for Architectural Design*, AD, Vol. 76, No. 2, 2006, 21.

¹⁵ Zaawansowane prace badawcze co do membran biologicznych prowadzone są, między innymi, przez Biochemical and Biomedical Engineering Research Group na Bath University, patrz: <http://www.bath.ac.uk/chemeng/research/groups/babe.shtml> (z dnia 20.06.2012).