

Archivolta 4(60)2013 4/2013 s. 42-47

## Strukturalna „skóra” form swobodnych

Semi-monocoque i monocoque

Structural “skin” of free forms

*Semi-monocoque and monocoque,*

Krystyna Januskiewicz  
WA Politechnika Poznańska

Słowa kluczowe: architektura, projektowanie cyfrowe, strukturalna „skóra”, formy swobodne, powierzchnie *Semi-monocoque, monocoque*

**Keywords:** architecture, digital design, digital surface, structural “skin”, free-forms, semi-monocoque, monocoque

### Streszczenie

Do urzeczywistnienia projektu cyfrowego potrzebne jest techniczne opanowanie materiału, gdyż nowe rozwiązania geometryczne często otwierają drogę do poszukiwań nowych materiałów i *vice versa*. Wymusza to ustalenie relacji między geometrią form swobodnych a materiałem. Wirtualna powierzchnia swobodna narzuca takie rozwiązania techniczne i materiałowe, które kwestionują dotychczasową logikę myślenia o budynku. Chodzi tu o zasadę łączenia konstrukcji nośnej i „skóry” w jeden tektoniczny element. Taka strukturalna skóra, nie tylko implikuje nowe materiały, ale także geometrię krzywych i fałd, które będą w stanie utrzymać ciągłość „skóry” i wyeliminują system dodatkowych podpór.

Strukturalna „skóra” to zintegrowanie powierzchni i struktury w jedno. Strukturalne „skóry” albo „skorupy” zwane *monocoque* i *semi-monocoque* udoskonalały się wraz z rozwojem przemysłu lotniczego i samochodowego. Na początku XXI w. następuje integracja różnych gałęzi przemysłu i transfer technologii do architektury okazał się nieunikniony. Adaptując takie rozwiązania, architekci ponownie rozwiązują problemy zależności między porządkiem geometrycznym a złożonością strukturalną formy.

Na przykładzie zrealizowanych obiektów przedstawia się różnorakie strategii łączenia struktury i „skóry” w jeden tektoniczny element samonośny.

### Abstract

For the realization of a digital project, technical mastery of the material is needed, as new geometric solutions often pave the way for exploration of new materials and *vice versa*. This forces to determine a relationship between the geometry of free forms and the material. Virtual free surface imposes such technical solutions and materials which question the current logic of thinking about a building. This is about the principle of combining the load bearing structure and the “skin” into one tectonic element. Such a structural skin not only implies new materials, but also the geometry of curves and folds that will be able to maintain the continuity of the “skin” and will eliminate the system of additional supports.

The structural “skin” is the integration of surface and structure into one. The structural “skins” or “shells”, called *monocoque* and *semi-monocoque*, have improve with the development of the aerospace and automotive industries. At the beginning of the twenty-first century, an integration of different branches of industry took place. As a result, transfer of technology to architecture proved to be inevitable. By adopting such solutions, architects are again resolving the problems of the relationship between geometric order and structural complexity of forms.

The executed objects are examples of various strategies of combining the structure and the “skin” into one tectonic self-supporting element.

Nowa architektura, wyłaniająca się z cyfrowej rewolucji technologicznej znajduje ekspresję w krzywoliniowych formach swobodnych o wysokim stopniu złożoności. Wielość podejść i postaw twórczych sugeruje różnorakie intencje projektantów. A to co ich łączy, nie jest li tylko pragnieniem projektowania krzywoliniowych form, lecz chęcią wykorzystywania technologii cyfrowych do integracji zamysłu twórczego z jego realizacją w sposób, który jest bezprecedensowy od czasu średnio-wiecznych mistrzów budowlanych. Architektury nie można już projektować jako formy dla funkcji, formy która na etapie projektu koncepcyjnego zajmuje się tylko „sama sobą”, a dopiero w dalszych fazach projektu rozwiązywane są jej aspekty inżynierskie. Projektowanie z użyciem narzędzi cyfro-

wych wymaga aby forma, konstrukcja i materiał były obecne w projekcie od najwcześniejszych jego etapów – wzajemnie na siebie wpływały i wzajemnie z siebie wynikały.

Do urzeczywistnienia projektu potrzebne jest techniczne opanowanie materiału, gdyż nowe rozwiązania geometryczne często otwierają drogę do poszukiwań nowych materiałów i *vice versa*. Wymusza to ustalenie relacji między nową geometrią a nowymi materiałami. Powierzchnia wirtualna narzuca takie rozwiązania techniczne i materiałowe, które kwestionują logikę modernistycznego myślenia o budynku. Chodzi tu o zasadę łączenia konstrukcji nośnej i „skóry” w jeden tektoniczny element. Taka strukturalna skóra, nie tylko implikuje nowe materiały, ale także geometrię krzywych i fałd, które będą w stanie utrzymać ciągłość „skóry” i wyeliminują system dodatkowych podpór. W oczekiwaniu na odpowiednie materiały dla architektury sięga się zatem po metody i materiały stosowane w przemyśle lotniczym, stoczniowym i motoryzacyjnym. Reaktywowane są także struktury membranowe i pneumatyczne (ptarz: AV 3/2013).

### **Prekursorska budowla**

Prekursorską budowlą *monocoqową* jest Statua Wolności w Nowym Jorku, dar rządu francuskiego dla USA w stulecie uchwalenia Deklaracji Niepodległości. Pomnik wykonany został we Francji i przekazany w 1884 ambasadorowi amerykańskiemu w Paryżu, a następnie przetransportowany został przez Atlantycką. Jest to dzieło francuskiego rzeźbiarza Frédéric Auguste'a Bartholdiego (1834-1904). Przedstawia postać kobiecą trzymającą w prawej dłoni pochodnię, a w lewej zaś tablicę, na której umieszczona jest data uzyskania niepodległości przez Stany Zjednoczone.

Postać ta ma wysokość 46,6 m, a jej obwód w talii wynosi 11 m przy wadze 229 ton. Wewnątrz znajdują się trzy ciągi spiralnych schodów. Dwa z nich prowadzą do platformy widokowej na wysokości korony wieńczącej, a trzeci do balkonu wokół pochodni. Wzniesienie tak okazałego pomnika było na owe czasy nie lada wyzwaniem. Chodziło bowiem nie tylko o podział na segmenty do transportu i ich montaż na postumencie o wysokości 47 m, ale także o konstrukcję zapewniającą stabilność posągu oraz uzyskanie możliwie najmniejszego jego ciężaru. Istotne było także otrzymanie ciągłości powierzchni zewnętrznej. Zlecenie na opracowanie inżynierskie otrzymał Gustave Eiffel (1832-1923) znany już konstruktor stalowych mostów łukowych. Zrealizowany w 1877 przez firmę Eiffel & Cie most Maria Pia przez rzekę Douro osiągnął rozpiętość łuku 352 m pobijając ówczesne rekordy. Rozwiązanie przyniosły stalowe taśmy mocowane od wewnątrz, bezpośrednio do rzeźbiarskiej obudowy z miedzi i zintegrowane poprzez system stalowych belek rozporowych z samonośną konstrukcją schodów. Po wykonaniu testów na modelach w mniejszej skali określono układ taśm tak, aby każda taśma, w układzie poziomym i pionowym, znajdowała najlepszą pozycję pod względem przenoszonych obciążeń. Dzięki temu rozwiązanie możliwe było nie tylko precyzyjne zespolenie segmentów posągu ale także współpraca dwóch różnych materiałów, co znacznie obniżyło ciężar rzeźby.

### **Maszyny latające i dynamiczne auta**

Strukturalne „skóry” albo „skorupy” zwane *monocoque* i *semi-monocoque* udoskonalowały się wraz z rozwojem przemysłu lotniczego i samochodowego. Ich francuska nazwa (*coque* – muszla) przyjęła się w latach 30. XX w., gdy przemysł lotniczy uruchomił szerszą produkcję nowych, wytrzymałych i lekkich kadłubów. Chodzi o udoskonaloną metodę konstrukcyjną zapoczątkowaną w latach 1909-1912 w produkcji jednoosobowych samolotów sportowych *Deperdussin Monocoque*. Zainspirowany wówczas przelotem kanału La Manche przez Louisa Blériota, francuski przedsiębiorca Armand Deperdussin założył firmę *Aéroplanes Deperdussin*, której pierwsze hangary stanęły w 1909. W tym samym roku poznał znakomitego inżyniera Louisa Béchereau, któremu powierzył stanowisko dyrektora technicznego swojej firmy. Béchereau był odpowiedzialny za konstrukcję wszystkich maszyn powstałych w tej wytwórni. Jednoosobowy samolot *Deperdussin Monocoque* był średniopłatem z pojedynczymi skrzydłami krytymi płótnem. W budowie samolotów zastosowano skorupowy kadłub, stąd też nazwa *monocoque*. Modelując żebra kadłuba na drewnianej formie uzyskiwano lekką, mocną i aerodynamiczną konstrukcję. Samolot był tani i prosty. W tym samym roku zaczęła się jego produkcja seryjna. W 1911 zmieniono nazwę firmy na *Société Pour Avions Deperdussin* (SPAD). W końcu roku został zbudowany dwumiejscowy samolot, który otrzymał oznaczenie Deperdussin B. Mógł on rozwijać prędkość nawet do 160 km/h. Samoloty te były używane w początkowym okresie I wojny światowej jako samoloty rozpoznawcze.

Strukturalna „skóra” to zintegrowanie powierzchni i struktury w jedno. Początkowo strukturę *monocoque* stanowiły wręgi z drewna, profilowane odpowiednio do kształtu kadłuba, które pokrywano tkaniną, arkuszami sklejk, blachy, budując rodzaj skorupy. W 1916 francuska firma lotnicza LFG rozpoczęła tą metodą produkcję samolotów *Roland C.II*, wykonując z drewna klejonego elementy strukturalne i powierzchnię kadłuba, dzięki czemu samolot okazał się bardziej wytrzymały niż zakładano. Stopniowo drewno zastępowano komponentami z metali lekkich, jak duraluminium.

Taką metodę zastosował Buckminster Fuller i zaprojektował w 1928 pierwszy w historii motoryzacji samochód o konstrukcji *monocoque* i o opływowym kształcie, który nazwał *Dymaxion Car*. Nazwę *Dymaxion* utworzył Fuller od słów *dynamic* i *maximum efficiency*, których znaczenie to dynamika i maksimum wydajności<sup>1</sup>. Był to rewolucyjny, wówczas samochód, którego kształt wynikał ze studiów w tunelu aerodynamicznym. Tego rodzaju badania nie były wtedy tak oczywiste jak dzisiaj<sup>2</sup>. Prototyp *Dymaxion Car* wykonano w 1933 w fabryce Bridgeport. W produkcji seryjnej auto miało być wykonane ze stopów metali lekkich i plastiku. Ten trójkołowy pojazd mieścił 11 pasażerów i kierowcę. Zastosowano tylny napęd, dzięki czemu auto rozwijało prędkość do 190 km/h, zużywając przy tym 1 litr benzyny na 12 km (8,3 l/100 km). Promień skrętu mieścił się w długości pojazdu. Auto było wtedy niezwykle ekonomiczne i lekkie. W 1934 wyprodukowano tylko krótką serię tego modelu. Właścicielem *Dymaxion Car No. 3* był Leopold Stokowski, który przekazał auto Muzeum Automobili w Rino (Nevada). W 1943 Fuller na zamówienie przemysłowca Henry Kaisera przygotował nową wersję *Dymaxion Car* już o trzech silnikach nowej generacji, chłodzonych przez pęd powietrza. Model ten także nie był produkowany w seriach komercyjnych<sup>3</sup>. Do dziś samochód ten stanowi źródło inspiracji dla projektantów.

*Monocoque* rozpowszechniły się także w przemyśle motoryzacyjnym, gdy w 1934 *Citroën* zaprezentował swój pierwszy seryjny samochód o samonośnym nadwoziu (*7CV Traction Avant*). W latach 80. XX w. zespół McLaren rozpoczął budowę *monocoque* z włókien węglowych – kompozytowego materiału dwa razy wytrzymalszego od stali i pięciokrotnie lżejszego.

### Transfer do architektury

Wysokie wymagania przemysłu lotniczego, samochodowego i okrętowego wymusiły udoskonalenia narzędzi cyfrowych w zakresie modelowania, szybkiej wizualizacji i manipulacji plikami graficznymi oraz sprawne uaktualnianie zmian. Przemysł motoryzacyjny wprowadził wiele usprawnień w modelowaniu prototypów i produkcji masowej. Osiągnięto, przy dużej złożoności produktu, optymalną dokładność pasowania oraz szybkość kompletacji. Techniki te okazały się inspirujące dla architektów, zwłaszcza te procesy, które koordynują i łączą ze sobą projektowanie, konstruowanie i wykonawstwo.

W przeszłości architekci często korzystali z doświadczeń, technik i technologii wypracowanych w innych domenach projektowania, budowania i konstruowania.

Statki, podobnie jak budynki, są obiektami o znacznej złożoności. Jeśli chodzi o rozmiar i użytkowanie są wystarczająco podobne by dać podstawy do porównań i transferu technologii. Na przykład, Andrea Palladio, projektując dach Bazyliki na Piazza dei Signori w Vicenzie (1617) jako odwrócony kadłub łodzi, korzystał z ekspertyz budowniczych okrętów. Przystępując do jego budowy, sprowadził z Wenecji doświadczonych szkutników. Przez stulecia podpatrywano rozwiązania okrętowe, by stosować je w architekturze.

W XX w. niektóre z tych zasad zaczęto stosować w przemyśle samochodowym i lotniczym, a zaufanie do budowniczych statków przetrwało do dziś. Dom, który byłby zbudowany jak samolot, z lekkich substytutów kamienia, cegły i drewna stał się jednym z postulatów, jakie przedstawił Antonio Sant’Elia (1888–1916) w wizjonerskim projekcie *Citta Nuova* (1914).

Le Corbusier, projektując *Maisons Citrohan* (1919–1922), uważał, że domy muszą być wykonywane przez maszyny w fabryce i składane tak jak Ford składa samochody na taśmach. Projektując dom tak jak automobil, odchodzi się od architektury akademickiej<sup>4</sup>. W *Vers une Architecture* (1923)

---

<sup>1</sup> W 1927 B. Fuller założył w Nowym Jorku 4-D Company po to, żeby projektować artefakty i prowadzić prace badawcze nad nową wizją życia na Ziemi. Tu powstały projekty określane wspólnym mianem *Dymaxion World*, a opisane później w książce *Critical Path* (1981).

<sup>2</sup> Pierwsze laboratorium aerodynamiczne zbudował G. Eiffel (1832–1923) w połowie XIX w.

<sup>3</sup> Por. M. Pawley, *Buckminster Fuller, Designing for Mobility*, New York 1990, s. 68.

<sup>4</sup> Por. R. Braham, *Rewolucja w architekturze*, Wyd. Art. i Film., Warszawa, 1979, s. 271–272.

Le Corbusier odnosi się bezpośrednio do statków, samolotów i samochodów, wskazując na ich zalety, które powinny cechować dom człowieka epoki maszynowej produkcji seryjnej. Architekci zaś powinni budować swoje domy w fabrykach samolotów i samochodów takimi samymi metodami konstrukcyjnymi, z takim samym lekkim szkieletem, usztywnieniami metalowymi i podporami rurowymi. Wypowiedziane wtedy słowa Le Corbusiera są dziś znamienne: „Domy z lekkich tworzyw, elastyczne i stabilne jak karoseria auta lub kadłub samolotu, są w zamierzeniu pomysłowe – oferują wygody, których mądry człowiek mógłby sobie tylko życzyć. Aby mieszkać w takim domu trzeba mieć umysł mędrca, ożywiony przez L’Esprit Nouveau. Nadejdzie pokolenie, które będzie wiedziało jak mieszkać w Maisons Voisine”<sup>5</sup>.

Le Corbusier nigdy swojej wizji nie zrealizował. Fuller zaś skorzystał z okazji, gdy po II wojnie światowej przystosowywano przemysł lotniczy do produkcji jednostek mieszkalnych. W 1944 zgłosił projekt *Witchita House*, który był rozwinięciem koncepcji schronienia *Dymaxion House* (1927)<sup>6</sup>. Był to pierwszy w historii architektury dom zaprojektowany i zbudowany w technologii, w jakiej wytwarzano samoloty.

Na początku XXI w. następuje integracja różnych gałęzi przemysłu, a architekci, wytwórcy i wykonawcy, oferując swoje usługi, muszą koncentrować się na cyfrowych technologiach projektowania, analizach, wytwarzaniu i montażu. Transfer tych technologii do architektury okazał się nieunikniony. To nowe podejście do projektowania i wytwarzania najlepiej realizują architekci Kolatan and Mac Donald’s w projekcie rozbudowy domu rodziny Raybouldów w Connecticut (2003). Strukturę stanowi armatura z drewna, którą następnie spryskano pianą poliuretanową. Rezultatem jest struktura *monocoque*, która jest samonośna, także bez jej drewnianych komponentów, a które jednak powinny pozostać.

Innym przykładem jest biomorficzna forma w siedzibie *DG Banku* (1996–2001) w Berlinie, projektu Gehry’ego. Pofałdowana, o gładkiej powierzchni forma przypomina, jak chce architekt, końską głowę, być może jednego z rumaków przy rydwanie wieńczącym Bramę Brandenburską. W jej wnętrzu znajduje się sala konferencyjna i audytorium dla zarządu. Arkusze stali nierdzewnej (2 × 4 m) o złożonej dwukrzywiznowej geometrii, jak i inne elementy wycięto i gięto na formach za pomocą narzędzi CNC metodami stosowanymi podczas produkcji jachtów oceanicznych<sup>7</sup>.

Zaznaczyć należy, że system CAD/CAM powstał na potrzeby przemysłu okrętowego, lotniczego i samochodowego. Spektakularnym przykładem jest *Boeing 777* – pierwszy komercyjny liniowiec, którego projekt i dokumentacja zostały w całości wykonane elektronicznie na podstawie projektu sporządzonego w 3D. Pierwszy lot tej maszyny odbył się w lutym 2000.

Adaptując takie rozwiązania, architekci ponownie rozwiązują problemy zależności między porządkiem geometrycznym a złożonością strukturalną formy. *Future Systems* zastosował takie rozwiązanie podczas realizacji opływowej formy NatWest Media Centre (1999) na *Lord’s Cricket Ground* w Londynie. Struktura *semeni-monocoque* wykonana została z aluminium. Chodziło o wodoodporną skórę z łatwego w formowaniu materiału o właściwościach antykorozyjnych. Muszlę uformowano (zgodnie z geometrią projektu) z blach aluminiowych o grubości 6 i 12 mm i montowano wstępnie w jednej z brytyjskich stoczni. Całość podzielono na sekcje o rozpiętości 26,3 m i przetransportowano na miejsce, gdzie połączono i podparto na żelbetowych słupach. Aluminiowe struktury *semeni-monocoque* użyli także Jakob i MacFarlane, projektując w restaurację *Le Georges* w Centrum Pompidou w Paryżu (2000) dla 200 osób. Elementy strukturalne były cięte z blachy aluminiowej o grubości 10 mm przez urządzenia CNC, powłoki zaś wykonano z arkuszy blachy aluminiowej o grubości 4 mm, którą wyginano dwukrzywiznowo tradycyjnymi metodami stosowanymi podczas budowy statków.

Mniej radykalną strategię łączenia struktury i skóry przyjął Gehry i opracowywał podczas realizacji obiektów takich, jak: Muzeum Guggenheima w Bilbao (1992–1997), *Experience Music Project* (EMP) w Seattle (1996–2000) i *Walt Disney Concert Hall* w Los Angeles (1991–2003). EMP w Seattle składa się z sześciu części, które wyglądają jak nieregularne, pofałdowane bulwy będące efektem jakiejś erupcji. Każda z nich jest skorupą *semeni-monocoque* złożoną z kilku warstw. Ich strukturę stanowią jakby klatki z wygiętych ram stalowych. Aby dostarczyć danych urządzeniom

<sup>5</sup> Por. Le Corbusier w: op. cit., s. 272.

<sup>6</sup> Por. M. J. Gorman, *Buckminster Fuller: Designing for Mobility*, Rizzoli, New York, 2005, s. 23.

<sup>7</sup> Patrz: K. Januskiewicz, *Frank O. Gehry, DG Bank. Parizer Platz, Berlin*, Archivolta, 1/2002, s. 16–27.

CNC (tnącym i modelującym), wykonawca musiał sporządzić model cyfrowy tych ram. W tym celu użył niemieckiego programu inżynierskiego Bocad, który sprawdził się podczas realizacji struktur *semi-monocoque* dla Muzeum Guggenheima w Bilbao. Najpierw klatki zostały obciążone od zewnątrz siatką stalową, na którą metodą ciśnieniową *shotcrete* rozprowadzono płynną mieszankę betonu. W ten sposób powstała skorupa (rodzaj substratu) zintegrowana z ramami stalowymi. Z każdej ramy wyprowadzono dostateczną liczbę wypustów potrzebnych do montażu kolejnych warstw skóry budowli. Do zrationalizowania pofałdowanych powierzchni użyto Gramatyk Kształtu (Shape Gramars), aby podzielić je na prostokątne pola różnej wielkości. Wedle tak otrzymanej geometrii była cięta blacha i składana na panelach. Blachę sprowadzano z Niemiec, kolorowano w Anglii, a przycinano i zestawiano w Kansas City, by zamontować je w Seattle. Fragmenty, gdzie powierzchnia została bardziej pofałdowana, a na nawet pomięta, wymagały dodatkowego podparcia. Wykonano ją z lekkich stopów aluminium, tak aby było możliwe mocowanie wygiętych arkuszy blachy. Na koniec powierzchnia została powleczona powłoką reagującą na światło i odporną na zmiany pogodowe.

Formy realizowane w Bilbao i w Los Angeles były rezultatem twórczej wyobraźni architekta rozwijanej w poprzednich trzech dekadach. EMP zaś projektował Gehry pod wpływem nowych bodźców, jakie dostarczyły mu rzeźby w kamieniu wykonane przez burgundzkiego artystę Clausa Skutera, a zwłaszcza kaptury mnichów na sarkofagu Filipa Śmiałego w Dijon. Aby je odtworzyć w większej skali, Gehry musiał wprowadzić ruch taki, jaki widoczny jest w formach morskich fal i ciałach ryb, albo przeciwstawić elastyczną membranę wodzie wydobywającej się spod powierzchni ziemi”<sup>8</sup>.

Proces, w którym najpierw powstaje powierzchnia, a potem szuka się dla niej struktury, jest praktykowany w przemyśle samochodowym i lotniczym. W architekturze jest nowy i stanowi odejście od modernistycznego prymatu logiki konstrukcji i funkcji. Podejście Gehry’ego do powierzchni jest bliższe tradycyjnemu jej pojmowaniu. Eksperymenty z materiałem i powierzchnią w celu zjednoczenia struktury i skóry są kontrewolucyjne w stosunku do koncepcji *Maisons Citrohan*, w której struktura jest niezależna od skóry. Jest to powrót do koncepcji ściany nośnej, ze swobodą, której Le Corbusier nie był w stanie sobie wyobrazić. Architekci mogliby budować dużo więcej ekscytujących budowli według wzorca Statui Wolności, lecz brak jest doświadczeń i odpowiednich materiałów. Jednak zintegrowanie powierzchni i struktury zapowiada, jak sugeruje Joseph Giovannini, kwantowy przeskok od inżynierskiej elegancji do intelektualnej satysfakcji<sup>9</sup>.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Bnaham, *Rewolucja w architekturze*, Wyd. Art. i Film., Warszawa, 1979
- [2] B. Fuller, *Critical Path*, St. Martin Press, 1981.
- [3] M. J. Gorman, *Buckminster Fuller: Designing for Mobility*, Rizzoli, New York, 2005
- [4] K. Januszkiewicz, *Frank O. Gehry, DG Bank. Parizer Platz, Berlin*, Archivolta, 1/2002, s. 16–27.
- [5] M. Pawley, *Buckminster Fuller, Designing for Mobility*, New York 1990.

---

<sup>8</sup> F. O. Gehry w: K. Januszkiewicz, *Frank O. Gehry, Experience Music Project EMP. Projekcja przeżywania Muzyki w Seattle*, Archivolta, 1/2001, s. 14.

<sup>9</sup> Por. op. cit., s. 128.