

Centrum Kultury w Guangzhou w Chinach

Gungzhou Cultural Centre in China

Zaha Hadid Architects, Opera House, Guangzhou, China

Krystyna Januszkiewicz

WA Politechnika Poznańska

Słowa kluczone: architektura, użyteczność publiczna, projektowanie cyfrowe, konstrukcje, aukustyka

Keywords: architecture, public using, digital design, structural engeeniring, acoustics

Streszczenie

W lutym 2011 otwarto formalnie w Huazghou w Chinach zaprojektowany przez Zaha Hadidi Architects Dom Opery dla 1800 widzów. Projekt był inpirowany kompozycją *suiseki* dwóch bliźniaczych kamieni rzecznych wydobytych z rzeki Perłowej, a także zjawiskami erozji, geologią i topografią. Dzięki temu forma znakomicie wpisuje się w krajobraz i jest zrozumiała dla społeczności lokalnej w realacji architektura natura. Przedstawia się nowy rodzaj konstrukcji budowlanych stworzony specjalnie dla tego obiektu, a zarazem rozwiązujący w swoim głównym zamysle problem realizacji form swobodnych o złożonej geometrii. Objaśnia się w jaki sposób użyto cyfrowych narzędzi projektowania, a także w jakich zakresach były one pomocne w rozwiązywaniu problemów inżynierskich włączając w to zagadnienia dotyczące akustyki. Porusza się także zadnienia dotyczące materiału i wykonawstwa opartego na technologiach cyfrowych CNC.

Abstract

The 1800 seat Guangzhou Opera House designed by Zaha Hadid Architects was formally opened in February 2011. The design evolved from the concepts of a natural landscape and the fascinating interplay between architecture and nature, engaging with the principles of erosion, geology and topography. It is located at the heart of Guangzhou's cultural centre, a lasting, state-of-the-art monument to the new millennium, overlooking the Pearl River. Its contoured profile, unique twin-boulder design and approach promenade enhances urban function, provides access to the riverside and dock areas and creates a new dialogue with the emerging town. A brand new type of a structure, spatial folded plate triangular lattice structure, has been applied in the design of Guangzhou Opera House. This kind of a structure is unique and hasn't been used in any of the completed buildings around the world. The design of the interior of the Odeon and multipurpose performance hall was completed with input from Marshall Day Acoustics (MDA). They have the task of verifying acoustic performance of this new flowing geometry. Two music rehearsal rooms and one for ballet were developed as part of the project. The architectural idiom involved hard surfaces in a smooth and flowing configuration. The imposition of "acoustic panels" was not an option; the wall surfaces were created with respect for the idiom and the requirements for sufficient acoustic absorption and diffusion.

Istotnym wydarzeniem architektonicznym minionego roku było oddanie do użytku kompleksu obiektów dla widowisk scenicznych w Guangzhou. Projekt tego zespołu został wyłoniony w drodze konkursu międzynarodowego w 2002, w którym Zaha Hadid pokonała Rema Koolhaasa i Coop Himmelb(l)au. Jest to Dom Opery Guangzhou oraz wielofunkcyjna sala widowiskowa, które oferują 70 tys. m² powierzchni dla różnego rodzaju występów i widowisk teatralnych. Jest to trzeci co do wielkości obiekt w Chinach, zaraz po Wielkim Teatrze Narodowym Pekinu oraz Wielkim Teatrze Szanghaju. Na budowę zużyto 10 tys. ton stali oraz 5,1 tys. tafli szkła, a także 75 tys. płyt z granitu. Znalazły się tutaj sale widowiskowe, jedna zapewnia miejsca dla 1,8 tys., a druga 400 widzów. Dla tych budowli inżynierowie z Szanghaju opracowali zupełnie nowy rodzaj konstrukcji, który nie był jeszcze stosowany w żadnej budowlu na świecie. Po raz pierwszy także rozwiązany został problem akustyki w nieregularnym geometrycznie, swobodnie uformowanym wnętrzu teatru operowego.

Guangzhou to jedno z siedmiu starożytnych miast Chin, położone w delcie Rzeki Perłowej w południowej części kraju oddalone 120 km od Hongkongu. Jest stolicą prowincji Guangdong często odwiedzaną przez turystów. W 1711 Brytyjska Kompania Wschodnioindyjska założyła placówkę handlową w Guangzhou, nazywanym wówczas Kanton. Dzięki temu miasto stanowiło jeden z głównych ośrodków handlu z państwami zachodnimi. Obecnie jest prężnie rozwijającym się ośrodkiem przemysłu elektronicznego oraz naukowym posiadającym liczne wyższe uczelnie. W ostatnich dwóch dekadach obszar delty Rzeki Perłowej z Guangzhou stał się wiodącym regionem Chin pod względem rozwoju

ekonomicznego. Liczące dziś niemal 13 mln mieszkańców miasto (trzecie co do wielkości w Chinach Południowych) aspiruje, by stać się jednym z większych azjatyckich centrów kultury.

Opracowany w końcu lat 90. ubiegłego wieku program rozwoju przewiduje powstanie licznych obiektów użyteczności publicznej, jak muzea, biblioteki i archiwa oraz kina, teatry, sale koncertowe, galerie sztuki, centra rozrywki, a także powiększenie zielonych terenów rekreacyjnych o nowe parki czy nadrzeczne bulwary. Realizacja tego programu pochłonie miliardy USD w nadziei dorównania wiodącym w tej części świata metropoliom takim jak Szanghaj czy Hongkong.

O budowie gmachu Opery myślano w Guangzhou już na początku 1993, kiedy gubernator Lin Shusen wywalczył przeznaczenie ogromnego Placu Haixinsha na ce-le kultury i komercji. Plac ten, przylegając z jednej strony do rzeki, zamyka ważniejszą oś urbanistyczną miasta. Od tamtego czasu powstało tu Muzeum Prowincji Guangdong oraz Miejskie Archiwa. Dla Domu Opery przeznaczono teren znajdujący się naprzeciwko tego muzeum, otwarty na Rzekę Perłową i Bulwar Zhujiang.

Rozpisany w 1999 na progu Nowego Millenium dwuetapowy konkurs międzynarodowy na Dom Opery przyciągnął nie tylko lokalnych architektów, ale także renomowane nazwiska i biura projektowe z różnych części świata. W czerwcu 2002 po rozstrzygnięciu I etapu konkursu do walki stanęły prace wykonane przez następujące zespoły: OMA Reem Koolhaas (laureat Nagrody Pritzкера 2000), Coop Himmelb (l) au oraz Zaha Hadid Architects. Zespół Reema Koolhaasa przedstawił propozycję przestrzenną złożoną z prostych brył nawiązującą bezpośrednio do prostokątnej zabudowy miasta zdominowanej przez budynki wysokie. Coop Himmelb (l) au zaś przedstawił formę, która niczym pomięta i rozdarta torebka z celulozoidu o programowej zawartości porzucona na placu reprezentować by miała operę chińską, której tradycja sięga III wieku naszej ery. Natomiast zespół Zaha Hadid Architects posłużył się zrozumiałą dla lokalnych jurorów metaforą form i wygrał drugi etap konkursu, którego wyniki ogłoszono w grudniu tego samego roku. W październiku 2004 zwycięski zespół przedstawił rysunki wykonawcze, a w styczniu 2005 rozpoczęto budowę.

Źródła inspiracji

Istota projektu stworzonego przez zespół Zaha Hadid Architects tkwi w nakładaniu się na siebie dwóch oddziaływań, a to architektonicznego i kulturowego.

Inspiracją były tu kamienie, zwykle otoczaki, takie jakie zazwyczaj występują w górskich rzekach czy strumieniach, a których układanie należy do dziedzictwa kulturowego Chin. Rzeka Perłowa, najdłuższa rzeka Chin Południowych, po przepłynięciu ponad 2 tys. kilometrów, wyrzuca u swego ujścia miriady różnej wielkości kamyków, które dają świadectwo o budowie geologicznej gór, przez które przepływa. Nie mają już one ostrych krawędzi, a różnią się między sobą wielkością, kształtem, kolorem, wzorem i chropowatością powierzchni. Niekiedy zalegają one w przybrzeżnym mulu, a gdy się je podniesie, zauważyć można ich wklęsłe, wygniecione ślady.

Zainteresowanie kamieniami to jedna z najstarszych chińskich tradycji. Od najdawniejszych czasów zbierano je i selekcionowano, dobierano tak, aby ich kompozycje mogły przypominać naturalne pejzaże czy mityczne góry. Układano je na płaskich powierzchniach i dostrzegano w nich harmonię wszech-wszechświata. Różnie je nazywano, lecz dopiero w XIX w. rozpowszechniła się nazwa *suseki*, czyli „wodne kamienie“ (chiński: *sui* – woda, *seki* – kamień), którą określano jedynie kompozycje z otoczków.

Kamień zgodnie z chińską filozofią *Jin-Jang* symbolizował pierwiastek męski, jeden z dwóch uzupełniających się składników kosmosu – jako element twardy, suchy, szorstki, ciężki był przeciwieństwem wody – jasnej, lekkiej, chłodnej, miękkiej i pełnej energii (pierwiastek żeński). Ponadto kamienie o naturalnym kształcie były, zgodnie z przekonaniem *shinto*, siedzibą bóstw kami. Pod wpływem buddyzmu zaczęto w sztuce *suseki* kłaść nacisk na prostotę, subtelność i bezpretensjonalność.

Zaprojektowany przez zespół Zaha Hadid kompleks dla widowisk scenicznych w Guangzhou jest zatem jak kompozycja *suseki*. Czynią ją dwa „wodne kamienie” tyle co wydobyte z Rzeki Perłowej i ułożone z pietyzmem w pobliżu nabrzeżnego bulwaru. Wszystko jest tak, jak nakazuje tego tradycja, za wyjątkiem skal. A ponadto kamienie Zaha Hadid wydrążyła woda, tworząc przestrzenie wewnętrzne dogodne dla różnego rodzaju widowisk. Z architektonicznego punktu widzenia chodziło o to, aby dobrać odpowiedni kształt i wielkość „kamieni”, najlepszy dla żądanej funkcji. A także, co ważne, wyrazić związek z krajobrazem: uczynić tak, aby projekt znajdował uzasadnienie przez swój kontekst. „Nie myśleliśmy zbyt o metaforze – mówi Zaha Hadid – lecz bardziej poszukiwaliśmy

analogii – analogii krajobrazowej, gdzie cechy krajobrazu naturalnego wyrażane są przez architekturę samą w sobie. Takim przykładem są miękkie przejścia między poszczególnymi terytoriami i strefami, a także przejścia między poziomami”.

Przedstawienie tak poetyckiej idei było możliwe tylko dzięki cyfrowym narzędziom projektowania. Posłużono się kilkoma różnymi programami. Do uzyskania nieskazitelnego kształtu formy przydatny okazał się program Rhino. Przestrzenie wewnętrzne zaś, złożone i płynne powierzchnie w audytorium, były formowane przy pomocy programu *Maya*.

Konstrukcja nośna przekrycia

Zarówno bryła budynku Opery, jak i bryła wielofunkcyjnej sali widowiskowej to kubatura w kurbaturze. Audytorium i wieża sceniczna to żelbetowe pudełka ze wspornikowymi tarasami wysuniętymi w kierunku audytorium i foyer. Wszystko to przekryte jest wielowarstwową strukturą o granitowej powierzchni podpartą tylko w kilku punktach. Zastosowano tu całkowicie nowy rodzaj konstrukcji nośnej, który został nazwany rozkładaną płaską strukturalną siatką przestrzenną. Ten typ konstrukcji nie był jeszcze stosowany w żadnej budowlu na świecie. Jest to nowe rozwiązanie, które choć podobne do jednowarstwowych powłok stalowych, to posiada całkowicie różne zachowania strukturalne.

Wymodelowane w programie Rhino powierzchnie brył budynku Opery i wielofunkcyjnej sali widowiskowej podzielono tak, aby otrzymać trójkątne i czworokątne płaskie powierzchnie. Dla tych powierzchni, zgodnie z trójkątną tesselacją, opracowano strukturę złożoną ze stalowych belek tworzących przestrzenne fasety. Otrzymywane w ten sposób fasety siatkowe są łączone z sobą pod wymaganym kątem wynikającym z ukształtowania wymodelowanych powierzchni.

Struktura przekrycia budynku Opery składa się z 64 trójkątnych i czworokątnych faset, które zintegrowano w przestrzeni tak, że otrzymano 104 krawędzie. Te zaś zbiegają się z sobą (pod innym kątem każda) w 41 punktach. Kąty między dwoma fasetami zmieniają się od 79° do 177,5°. Tak zwane „belki główne” to belki biegnące wzdłuż linii krawędziowych (kolor czerwony). Belki te będąc jednocześnie belkami obwodowymi każdej fasety zostały podzielone: dłuższe na osiem, a krótsze na cztery lub dwie części. Łącząc te punkty podziału za pomocą tzw. „belek pośrednich”, uformowano trójkątną siatkę, której średnia długość nie przekracza sześciu metrów. Kąty między belkami pośrednimi są zmienne od 45° do 60°, a w niektórych przypadkach zawierają się w przedziale 15°–30°.

Przekroje belek głównych i pośrednich formujących kratowe fasety, czyli grubość faset, przyjęto różne w zależności od strefy ich występowania. Zróżnicowanie to ma na celu wyeliminowanie lokalnych odkształceń czy deformacji całości przekrycia. I tak w strefie frontowej grubość fasety wynosi 1000 mm, a w pozostałych strefach 800 mm. Dla belek pośrednich przyjęto przekroje odpowiednio 300 x 1000 mm oraz 300 x 800 mm. Podstawowa szerokość przekroju głównej belki została przyjęta jako 400 mm, natomiast jej wysokość zmienia się od 0,8 m do 1,4 m w zależności od kąta między fasetami. Wszystkie elementy tej struktury są o przekroju skrzynkowym i wykonano je ze stali spawanej Q345GJB. Powierzchnia całkowita struktury przekrycia budynku Opery wynosi 23 180 m², podczas gdy jego projektowana długość i szerokość mierzona na planie horyzontalnym wynosi 136 m i 129 m. Struktura opada bowiem ku dołowi na 43 m od najwyższego punktu elewacji. Osadzona została ona na fundamentach z betonu sprężonego za pośrednictwem stalowego pierścienia o wysokości 400 mm, który wyposażono w 56 podpór antysejsmicznych. Ze względów architektonicznych podpory podtrzymujące to przekrycie skoncentrowano po-nad i na zapleczu sceny. Z tego też powodu największa faseta siatkowa osiąga rozpiętość 51 m. Dzięki temu uwolnione zostały od podpór przestrzenie wewnętrzne, zwłaszcza ogromnego foyer widowni teatru operowego przeznaczonego dla 1800 widzów.

Ten sam rodzaj przekrycia zastosowano dla sąsiedniej budowli mieszczącej wielofunkcyjną salę widowiskową. Jest to obiekt mniejszy, z widownią przeznaczoną dla 400 widzów. Wymodelowaną w przestrzeni cyfrowej powierzchnię podzielono na 37 trójkątnych i czworokątnych faset, które zintegrowano w przestrzeni tak, że otrzymano 54 krawędzie. Krawędzie te zbiegają się z sobą, każda pod innym kątem, w 18 punktach. Kąty między dwoma fasetami zmieniają się tu od 43,9° do 174,1°. Powierzchnia całkowita przekrycia wynosi 9440 m², podczas gdy projektowana długość i szerokość w planie horyzontalnym to 87,6 m i 62 m. System strukturalny i układ jego elementów jest niemal taki sam jak w przekryciu budynku Opery, z wyjątkiem tego, że główne belki dzielone są odpowiednio na sześć i trzy części. Całość, tak samo jak w budynku Opery, oparta została na stalowym pierścieniu o wys. 400 mm zaopatrzonym w 46 podpór antysejsmicznych i osadzona na fundamencie ze sprężonego

na mokro betonu. Przekroje belek głównych i pośrednich formujących kratowe fasety przekrycia, ze względu na deformacje, są różne. Dla belek pośrednich przyjęto stały przekrój 250 x 250 mm. Dla belek głównych zaś podstawowa szerokość wynosi 400 mm. Natomiast ich wysokość zmienia się od 0,76 m do 1,5 m zgodnie z kątem między fasetami. Wszystkie belki są skrzynkowe ze stali spawanej Q345GJB.

Sztywność przyjętego dla obu budowli systemu strukturalnego przekrycia zależy od tego, jak pracuje rama ze sztywnym mocowaniem belek kratujących oraz od współpracy wszystkich faset tworzących przekrycie.

Najtrudniejszym zadaniem inżynierskim w realizacji struktury przekrycia było zaprojektowanie i wykonanie połączeń pomiędzy elementami strukturalnymi. Niektóre węzły wymagały powiązania z sobą kilku elementów, które trafiały tam z różnych kierunków i każdy pod innym kątem. W najtrudniejszych sytuacjach posłużono się metodą tradycyjną. Dla 59 połączeń, które występują w fasadzie, wykonano najpierw potrzebne połączenia z drewna, a następnie na ich podstawie powstały formy piaskowe, do których wylewano stal. Węzły te zespalają siatkowe fasety i pracują jak powierzchnie sztywne.

Analizy strukturalne i symulacje zachowań

Zrealizowana przez Zaha Hadid Architects w Guangzhou kompozycja dwóch „kamieni rzecznych” to kompozycja złożona z dwóch form swobodnych. Przez formy swobodne zwykło się w inżynierii rozumieć takie formy, które są trudne do opisanego przy pomocy konwencjonalnych metod analogowych i geometrii euklidesowej. Z formą swobodną borykali się wielcy twórcy XX w. jak Antonio Gaudí (1852–1926), Eero Saarinen (1910–1961) czy Eduardo Torroja (1899–1961). Wznosili oni takie budowle według makiety i w oparciu tylko o przybliżone obliczenia analityczne. Można by tu przypomnieć, że rysunki dla terminalu TWA na Lotnisku FK w Nowym Jorku zastępował model fizyczny wykonany w skali 1:35.

Dziś modele fizyczne zastępują modele cyfrowe, a narzędzia projektowania pozwalają na pełną kontrolę geometryczną nad dowolnie skomplikowanym kształtem. Coraz większa moc obliczeniowa komputerów zaś pozwoliła na rozwój metody elementów skończonych (MES), która jest konieczna do rozpatrywania nieliniowych zagadnień i obliczeń inżynierskich. Dzięki udoskonaleniom w technikach przetwarzania graficznych danych wejściowych i technikom wizualizacji mogą być dziś przeprowadzane różnorakie jakościowe oceny koncepcji projektowych. Przez nakładanie na siebie (superpozycje) różnych analitycznych ocen, propozycje projektowe mogą być porównywane, aby wybierać stosunkowo proste rozwiązania, dające optymalne wyniki.

W projektowaniu przekrycia budowli w Guangzhou posłużono się programem Sap2000 Computers and Structures, Inc. (CSI). Jest to zintegrowany program do analiz strukturalnych oraz projektowania i modelowania konstrukcji budowlanych, który wykorzystuje metodę elementów skończonych (MES) dla obiektów 3D. Można dodać, że program ETABS zintegrowany z Sap2000 był pomocny w tworzeniu matematycznych modeli dla wieżowca Burj Khalifa w Dubaju, obecnie najwyższego budynku na świecie (829,84 m), projektu Skidmore, Owings&Merrill (SOM), a oddanego do użytku w 2010.

Praca z symulacjami bowiem wymaga opracowywania logicznego matematycznie opisu działania systemu lub procesu, który odpowiada określonym parametrom zachowań fizycznych. W nauce „model” oznacza więcej niż zapis geometryczny obiektu. Model symulacyjny jest wyabstrahowaniem procesu, co można rozumieć jako obraz procesu w trakcie jego przebiegu – czyli gdy złożony problem jest właśnie modelowany. Symulacje są niezbędne w projektowaniu złożonych systemów strukturalnych i materiałowych. Analizom podlegają również zachowania strukturalne, jakie będą występować wraz z upływem czasu. Przy pomocy Sap2000 dla obiektów w Guangzhou wykonano potrzebne analizy strukturalne w tym analizy statyczne, analizy modalne, wykonano także symulacje sejsmiczne, temperaturowe, pracy konstrukcji pod obciążeniem wiatrowym etc. Natomiast do koniecznych analiz węzłów pomocny okazał się program Ansys.

Struktura nośna przekrycia została zaprojektowana z uwzględnieniem następujących obciążeń:
– obciążenia wertykalne; materiałem wykończeniowym od zewnątrz są trójkątne płyty granitowe, które pokrywają niemal całą powierzchnię przekrycia, z wyjątkiem stosunkowo niewielkich stref przeszklonych; system odprowadzenia wody wykonany ze stopu aluminium, magnezu i manganu

także znajduje się po zewnętrznej stronie projektowanej struktury; przyjęto całkowite obciążenie w strefach z okładziną granitową 3,4 kN/m², a w strefach przeszklonych 1,7 kN/m²,
– obciążenia wiatrowe; rozpatrywane w interwale 100 lat, gdyż tak została przyjęta trwałość projektowanych budowli; w takim odniesieniu przyjęto ciśnienie wiatru w_0 jako 0,6 kN/m², a dla konfiguracji terenu Stopień B; współczynniki obciążenia wiatrowego wynikające z ukształtowania powierzchni bryły, ze względu na jej nietypowy kształt, zostały ustalone w testach w tunelu aerodynamicznym; współczynnik łopotania przyjęto jako 2,0, obciążenie przy maksymalnym ssaniu wiatru osiągnęło 4,2kN/m², przy maksymalnym ciśnieniu 2,4kN/m²,
– obciążenia sejsmiczne; brano pod uwagę również interwał czasowy 100 lat, kierując się przewidywaniami i danymi w aktualnych raportach; przyjęto prawdopodobieństwo akcji sejsmicznych rzędu 63%, a horyzontalny współczynnik wpływu 0,124 przy przesunięciu gruntu w czasie 0,23 s,
– efekt temperaturowy; wpływ temperatury na zachowania struktury złożony i trudniej go precyzyjnie ocenić niż wpływ innych czynników środowiskowych; mając potrzebne dane przyjęto różnicę temperatur rzędu 25°C.

Jednym z ważnych zagadnień w projektowaniu strukturalnym jest dynamika konstrukcji. Własności dynamiczne konstrukcji mają kluczowe znaczenie dla zapewnienia prawidłowych warunków eksploatacji. Cyfrowe narzędzia projektowania strukturalnego pozwalają dziś precyzyjnie określać potrzebne parametry poprzez analizy modalne. Można precyzyjnie zatem badać zachowania konstrukcji pracującej w przyjętych warunkach obciążeniowych i środowiskowych, określać i lokalizować jej wybożenia czy wykrzywienia elementów składowych. Przez analizy modalne identyfikuje się także częstotliwości rezonansowe, mogące powodować pęknięcia konstrukcji, luzowanie się mocowań czy węzłów. Wyniki tych analiz przyczyniają się do uniknięcia niepożądanych zjawisk dynamicznych poprzez modyfikację konstrukcji, zmianę sztywności lub masy. Dzięki takim analizom można zweryfikować projekt i wprowadzić konieczne modyfikacje. Przeprowadzone analizy modalne dla budynków Opery i wielofunkcyjnej sali widowiskowej wykazały niewielkie przesunięcia masy w kierunkach X i Y oraz mieszczące się w normie wibracje największej fasety ponad foyer budynku Opery.

Deformacje wertykalne struktury przekrycia pod obciążeniem statycznym to deformacje gięte elementów kratujących fasety oraz deformacje spowodowane rotacją faset. Kierunek deformacji na węzłach jest jednak inny niż kierunek, jaki jest na fasetach. Dlatego też nie ma możliwości, aby temu przeciwdziałać przez odwrotne odgięcia konstrukcji. Z uwagi na fakt, że granitowa okładzina jest wyjątkowo ciężka, kontrola deformacji stała się najważniejszym kryterium w projekcie tej struktury. Jak zatem przyjąć w projekcie odpowiednie kryteria, skoro jest to zupełnie nowy rodzaj struktury, dla którego nie sporządzono jeszcze żadnych specyfikacji? W projekcie przyjęto następujące kryteria deformacji: kontrola przesunięć w węzłach (w porównaniu do współrzędnych w oryginalnym projekcie) przy $L/300$, kontrola ugięcia belek przy $l/400$, gdzie L jest rozpiętością konstrukcyjną, a l długością belki (jak pokazuje ilustracja powyżej).

Deformacja przekrycia budynków Opery i wielofunkcyjnej sali widowiskowej podczas pełnego obciążenia użytkowego tych obiektów wynosi odpowiednio 116 mm oraz 93 mm, co stanowi zaledwie 15 i 10 procent wartości przyjętych dla stanów krytycznych. Przeprowadzono także szczegółowe analizy sztywności węzłów i ich podatności na deformacje przy rozpatrywanych rodzajach obciążeń. Badano również zdolność przenoszenia obciążeń przez poszczególne belki kratujące w każdej fasecie. Pozwoliło to przyjąć odpowiednie grubości blach dla przekrojów skrzynkowych belek głównych i pośrednich. I tak w strefie frontowej budynku Opery przyjęto 20 mm dla belek głównych, a 12 mm dla belek pośrednich. W budynku wielofunkcyjnej sali widowiskowej zaś i pozostałych częściach budynku Opery przyjęto grubości odpowiednio 16 mm i 10 mm. Dzięki tym analizom można było dokładnie określić i kontrolować zużycie stali, dokonując poważnych oszczędności.

Unikatowa forma architektoniczna zespołu obiektów w Guangzhou oraz żądanie projektantów dokładnego odtworzenia jej w zrealizowanych obiektach przyczyniły się do opracowania zupełnie nowego rodzaju stalowego systemu strukturalnego złożonego z kratowych faset rozkładalnych na płaszczyźnie. Ten nowy rodzaj struktury może mieć zastosowanie w realizacji powierzchni swobodnych obiektów budowlanych generowanych w przestrzeniach cyfrowych. Swobodna powierzchnia wirtualna wymusza bowiem ustalenie nowych relacji między geometrią a rozwiązaniem technicznym i materiałowym. Strukturalna „skóra” budowli w Guangzhou jest tego znakomitym przykładem. Implikuje

także potrzebę nowych materiałów, które będą w stanie utrzymać ciągłość „skóry” i wyeliminują system dodatkowych podpór.

Problem zachowania ciągłości powierzchni swobodnej

Ukształtowanie przekrycia zarówno budynków Opery, jak i wielofunkcyjnej sali widowiskowej składa się z określonej liczby płaskich faset odpowiednio 64 i 37. Fasety te łącząc się z sobą krawędziami i wierzchołkami, nie zachowują jednorodnej, płynnie zakrzywionej powierzchni przewidzianej w projekcie. Taka powierzchnia bowiem, pokryta płytami z granitu odpowiadałaby założeniom konceptualnym i przyjętej metaforyce kompozycji suiseki złożonej tu z dwóch kamieni rzecznych pozbawionych ostrych krawędzi i eksponowanych na wielopoziomowej platformie.

Ponadto zaprojektowana przez konstruktorów z Szanghaju struktura nośna przekrycia złożonego z kratowych faset wymagała opracowania systemu pozwalającego na montaż dachowych warstw izolacyjnych, ponad którymi dopiero ułożono warstwę wierzchnią złożoną z setek płyt granitowych.

Problemem było także znalezienie sposobu, jak wprowadzać przeszklenia o nieforemnym kształcie, tak aby zapewnić szczelność przekrycia, a jednocześnie płynność jego powierzchni zewnętrznej.

Aby osiągnąć zamierzone cele, zaprojektowano dużą gęstszą siatkę stalową, którą nałożono, od góry, na fasety konstrukcyjne. Zadaniem tej siatki było również zniwelowanie, niejako wygładzenie miejsc styku krawędzi i wierzchołków faset konstrukcyjnych przekrycia. W tych miejscach wprowadzone więc hiperboliczne i cylindryczne powierzchnie, które pozwoliły utrzymać ciągłość powierzchni swobodnej oraz ciągłość układu granitowych płyt okładzinowych. Otrzymane w ten sposób geometrycznie ciągle powierzchnie swobodne form budynków Opery i wielofunkcyjnej sali widowiskowej podano na modelu cyfrowym trójkątnej tessellacji, aby otrzymać jednorodny wzór i wykrój kamiennych płyt. Użyto 75 tys. trójkątnych elementów granitowych. Model ten w formie *files to factory* posłużył także wytwórcy, który posługując się maszynami CNC (Computer Numerical Control), pociął i przygotował płyty do montażu.

Dzięki współpracy architektów, konstruktorów i wykonawców już na wczesnym etapie projektu realizacyjnego udało się opracować zupełnie nowy system budowlany, który jest jak interaktywna ściana kurtynowa, w której szkło i kamień współpracują z sobą nawzajem, czyniąc unikatowy efekt estetyczny. Intrygujące są zwłaszcza te strefy uformowania, gdzie nieregularne przeszklenia wyginają się, poddając się, jakby z łatwością ukształtowaniu formy. Miejsca wklęsłe i wypukłe elewacji osiągają nawet 18 m. Ten nowy system budowlany rozwiązuje w pewnej mierze podstawowy problem w realizacji form swobodnych, jakim jest powłoka zewnętrzna czy też „skóra” osłaniająca zawartość użytkową. Architekci oczekując na nowe materiały, które będą lekkie i łatwe w formowaniu są zmuszeni do poszukiwań nowych relacji pomiędzy „starymi” materiałami i technikami budowlanymi a nową geometrią.

Forma i treść

Zamysłem projektantów było zaangażowanie krajobrazu naturalnego w fascynującą interakcję pomiędzy architekturą a Naturą. Angażując odwołania do naturalnego procesu, jakim jest erozja, oraz do topografii terenu realizowano koncepcję, która znajduje również uzasadnienie w lokalnej kulturze opartej na poszanowaniu świata Natury i symboliki jego wszechrzeczy.

Projekt zespołu teatru operowego i wielofunkcyjnej sali koncertowej niewątpliwie znajduje swoje umocowanie ideowe i formalne w tradycji suiseki. W Chinach, inaczej niż w Japonii, kamienie suiseki nie muszą być wiernym odbiciem istniejącego krajobrazu. Przez wieki sztucznie tworzone tam różne fantastyczne kształty kamieni, ceniąc sobie walory estetyczne ich kompozycji, takie jak sugestywność, kolorystyka czy równowaga wewnętrzna.

Architektura Zahy Hadid Architects jest taką kompozycją, która jak chcą jej projektanci, jest odbiciem pobliskich wzgórz, przez które przepływa Rzeka Perłowa, przyczyniając się do ich erozji.

Dynamiczne linie wyznaczające wielopoziomową platformę i dojścia rozłamują niejako ten krajobraz, wnikają do wnętrza, określając strefy i terytoria dla potrzebnych funkcji użytkowych. Wycinane są kaniony do cyrkulacji, obszerne westybule i kawiarnie. Są także pęknięcia i rozłamy, przez które światło dzienne wnika głęboko do budowli. Miękkie przejścia pomiędzy całkowicie różnymi elementami na różnych poziomach są kontynuacją analogii do tego krajobrazu. Prowadzą one także do ogromnej groty skalnej – jest nią widownia teatru operowego, której ściany wymodelowano,

stosując odlewy z gipsu (GFRC) wzmocnianego włóknem szklanym. A wszystko zrobiono po to, aby architektoniczny język płynności i braku spoin był kontynuowany.

Geometria a akustyka

Budynek Opery to kubatura w kubaturze – widownia wraz ze sceną, jej zapleczem oraz wieżą to żelbetowe „pudełko” ze wspornikowymi balkonami wokół i ponad widownią, a także holem wejściowym. Oslania je opisana wcześniej, gigantyczna strukturalna „skóra” czy „skorupa” o konstrukcji stalowej. Geometrię widowni ukształtowano przy pomocy narzędzi projektowania programu do animacji Maya. Program ten pozwala na wykonywanie morfowania, czyli projektant może sprawić, że dwukrzywiznowe powierzchnie NURBS będą płynnie przechodziły jedna w drugą, tworząc odpowiednie dla funkcji wnęki i wypukłości. Tak uformowano balkony, łoże widowni czy galerie nad holem wejściowym. Pracując z programem Maya, architekci przygotowali cyfrowe pliki 3D do wytwarzania (files to factory) i przesłali je do wytwórcy. Tam zaś za pomocą frezarek CNC wykonano odpowiednie formy dla odlewów gipsowych (GFRC), których wzmocnienie stanowi włókno szklane. Formy te były łączone z sobą i wypełniane w miejscu przeznaczenia. Dzięki temu otrzymano, tak samo jak w przestrzeni cyfrowej, powierzchnie ciągłe, bez żadnych łączeń. Pomysł tak ukształtowanej widowni Zaha Hadid przedstawiła już wcześniej, biorąc udział w 1994 w konkursie Cardiff Bay Opera House, który wygrała. Jednak projekt ten nie doczekał się realizacji. Model i perspektywy malarskie przedstawiające konfigurację obiektu pokazują nieregularną, graniastą bryłę z odważnym audytorium, podobnie jak obecnie w budynku Opery w Guangzhou. Niemniej widownia Opery Guangzhou jest dużo większa (1800 miejsc) i bardziej złożona pod względem ukształtowania przestrzennego.

W projektowaniu widowni teatru operowego, już w fazie zamysłu twórczego, projektantom doradzali specjaliści od akustyki z Marshall Day Acoustics (MDA) z Australii. Dzięki tej współpracy architekci mogli przyjąć właściwe parametry w modelowaniu cyfrowym kształtu widowni i zasadniczych powierzchni odbijających dźwięk. Przeprowadzono bowiem cyfrowe symulacje akustyczne, które pozwalają na wstępne wyznaczenie i analizowanie ścieżki odbicia dźwięku. Ważną częścią tej analizy jest odsłuchiwanie muzyki z każdego wybranego miejsca na „wirtualnej” widowni. Jest to auralizacja (termin pokrewny wizualizacji). Proces ten polega na przebywaniu w wyciszonym pokoju z głośnikami i słuchaniu występu z symulowanej przez komputer widowni. W projekcie wirtualnym można wprowadzić różne zmiany – podwyższyć sufit lub wprowadzać głębsze balkony, a efekt tych zmian oceniać „na słuch”. Niemniej jednak otrzymane na wyidealizowanym modelu dane wymagają weryfikacji podczas budowy obiektu. Firma MDA została zatem włączona w proces realizacyjny w połowie 2005. Chodziło bowiem o uzyskanie wysokiej „sprawności” akustycznej całego obiektu. Rozpatrzyć należało zagadnienia przenoszenia wibracji przez grunt przy zewnętrznych obciążeniach dynamicznych, zneutralizowania zewnętrznych i wewnętrznych źródeł hałasu wynikających z użytkowania obiektu. Celem działań akustycznych jest bowiem osiągnięcie tak ukształtowanej przestrzeni, w której, niezakłócone niczym, doznania słuchowe i wzrokowe będą stanowić o jakości przeżyć doświadczanych podczas spektaklu.

Konsultanci MDA dołożyli wszelkich starań, aby uściślić podjęte wcześniej decyzje i zrealizować projekt za pomocą wszelkich dostępnych środków. Istotne było przede wszystkim zweryfikowanie przyjętych w projekcie założeń metrycznych. Wymagało to przeprowadzenia dodatkowych prac studialno-badawczych, gdyż najmniejsze uchybienie metryczne jest później nie do naprawienia innymi środkami. Chodziło o to, aby osiągnąć na widowni operowej wysoki poziom czystości dźwięku, stosując różny czas rewerberacji w zależności od wysokości i natężenia dźwięku oraz rodzaju występu scenicznego. Zaprojektowany dla tej sali system akustyczny uwzględnił także indywidualne występy orkiestry i wtedy scena traktowana jest jak muszla koncertowa. Uwzględniono także sytuacje, kiedy w spektaklu zachodzi konieczność korzystania z urządzeń do wzmocnienia i odtwarzania dźwięków. Projekt wstępny zakładał różnorakie rodzaje absorpcji, lecz założenia te uległy zmianie podczas procesu realizacyjnego. Zazwyczaj głównym elementem absorbującym dźwięki średniej częstotliwości jest widownia. Można także zaprojektować fotele w taki sposób, by miały tę samą charakterystykę absorpcji dźwięku co siedzące w nich osoby.

Rysunki ostatniego etapu konkursu przedstawiały widownię rozwiązaną na planie symetrycznym, zamkniętą ścianami odchylonymi dynamicznie od pionu. Zmieniono układ tej widowni, gdyż taka geometria sali nie jest korzystna (jak owalu lub koła), ponieważ daje nierówne pole dźwięku i skupia dźwięk w tak zwanych „gorących punktach”. Należało zatem powrócić do asymetrycznej kon-

cepcji z pierwszego etapu konkursu, unikając stosowania płaszczyzn równoległych. Płaszczyzny takie nie są zalecane w akustyce, ponieważ dochodzi między nimi do wielokrotnego odbicia dźwięku. Zjawisko to nazywane jest „trzepoczącym echem”. Raz jeszcze zbudowano model 3D widowni, aby znaleźć właściwe ścieżki odbicia dźwięku weryfikujące wyniki wcześniejszych analiz. Najlepsze warunki akustyczne powstawały wtedy, gdy zachowano asymetryczny układ balkonów, a na parterze uczyniono rozłam w widowni tak, że część siedzeń znalazła się na wydzielonym dla nich również asymetrycznym podwyższeniu. Asymetryczny układ przestrzenny widowni pozwolił opracować akustykę w sposób taki, że zaletą stało się swobodne ukształtowanie powierzchni otaczających w kierowaniu wczesnego odbicia dźwięku ku publiczności.

Jednak Specjaliści z MDA posiadali tylko wzory odbicia dźwięku dla analiz, które dotyczyły jedynie płaskich powierzchni. Nie posiadali oni wzorów, które odpowiadałyby płynnej geometrii widowni operowej zaprojektowanej przez Zaha Hadid Architects. Aby uściślić i urealnić wcześniejsze wyniki badań akustycznych, trzeba było przeprowadzić je najpierw na modelu fizycznym, aby posługiwać się nimi w analizach cyfrowych. Przygotowanie modelu w skali 1:25 miało miejsce w South China University of Technology (SCUT). Model składał się z odlewanych segmentów GRG, które mogły być wymieniane podczas testów.

Istotnym problemem było także zapewnienie odpowiedniej dyfuzji ścian we wnętrzu. Dyfuzyjne rozprzestrzenianie dźwięku powodują bowiem powierzchnie o odbijających właściwościach akustycznych. Każda struktura architektoniczna o twardej powierzchni będzie odbijać i przekierowywać dźwięk. Dawniej sale teatralne czy koncertowe bogato zdobiono ornamentami i płaskorzeźbami, stosowano miękkie pluszowe obicia i draperie, dzięki czemu dźwięk był rozpraszaany czy pochłaniany w naturalny sposób. Współcześnie akustycy potrafią sterować dyfuzją, stosując odpowiednie fakturowanie ścian o określonej gęstości i głębokości. Wraz z architektami opracowano odpowiedni wzór faktury powierzchni ścian widowni operowej, aby podkreślał on treści metaforyczne budowli, oddawał nastrój wyrażonej przez wodę jaskini czy wielkiej groty powstałej w wyniku erozji.

W opracowaniu akustycznym ważne jest również zapewnienie odpowiednich warunków akustycznych sceny. Obniżenie dla orkiestry pozostało tak ukształtowane, aby artyści mogli się ze sobą komunikować i słyszeć siebie nawzajem. Wprowadzono dodatkową ścianę odbijającą dźwięk w zadanym kierunku.

Wielofunkcyjna sala widowiskowa na 400 miejsc nie wymagała tak wielu zabiegów akustycznych, jak widownia teatru operowego. Zastosowano tam standardowe rozwiązania pozwalające na dużą elastyczność i dostosowanie do potrzeb każdego niemal rodzaju widowiska scenicznego. Programem opracowania akustycznego objęte były także dwie sale prób – jedna dla zespołów muzycznych, a druga dla baletu. Idiom architektoniczny wymagał twardych powierzchni utrzymanych w gładkiej i płynnej konfiguracji, bez wyraźnej granicy między ścianami a sufitem. Nie brano pod uwagę użycia standardowych „paneli akustycznych”. Opracowano natomiast nowy rodzaj paneli o pożądanym kształcie oraz współczynniku absorpcji i dyfuzji dźwięku. Zastosowano wygięte panele GRG o podstawowej grubości 1,4 m. Warstwę wierzchnią tych paneli stanowi corian o grubości 25 mm. Panele te są perforowane otworami o średnicy od 91 mm do 5 mm. Śnieżnobiały kolor tych paneli sprawia, że wnętrza te uzyskują niemal metafizyczny charakter.

Podstawowym założeniem w opracowaniu akustyki zespołu widowiskowego w Gaungzhou było opracowanie takich rozwiązań, które będą wykorzystywać uformowanie i powierzchnie wewnętrzne w osiągnięciu zamierzonych celów. Po raz pierwszy w historii architektury rozwiązano problem akustyki w nieregularnym geometrycznie, swobodnie ukształtowanym wnętrzu widowiskowym.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Peter Exton Marshall Day Acoustics, Melbourne, Australia and Harold Marshall Group Consultant, Marshall Day Acoustics, *The Room Acoustic Design of the Guangzhou Opera House*, Proceedings of the Institute of Acoustics Vol. 33. Pt. 2, 2011, s. 117-130 (pdf).
- [2] Peter Noever (red.), Zaha Hadid Architektur/Architecture, Hatje Cantz Verlag, Wiena 2003.
- [3] Huang Tai Yun, *Application of Spatial Folded Plate. Triangular Lattice Structure in Guangzhou Opera House*. Guanzhou Pearl River Foreign Investment, Architectural Design Institut Co Ltd., 2011 (pdf).

Zaha Hadid (ur.1950), laureatka Nagrody Pritzкера w 2004, jest architektem, który świadomie przekracza granice w projektowaniu architektury i urbanistyki. Jej eksperymenty z nową koncepcją intensyfikowania istniejącej tkanki miasta podążają za wizjonerską estetyką, która ogarnia wszystkie pola projektowania – od skali urbanistycznej poprzez projektowanie wnętrz i mebli do produktów detalicznych.

Zaha Hadid urodziła się w Bagdadzie. Najpierw studiowała matematykę na Amerykańskim Uniwersytecie w Bejrucie. Potem wyjechała do Wielkiej Brytanii i w 1972 rozpoczęła studia architektoniczne w Londynie. W 1977 obroniła dyplom, otrzymując wyróżnienie i asystenturę. Rozpoczęła także współpracę z OMA. W 1987 założyła w Londynie własną pracownię.

Najbardziej znane dzieła Zaha Hadid to:

Straż Pożarna Vitra, Land Formation-One, skocznia narciarska Bergisel, Strasbourski Dworzec Trolejbusów, Centrum Rosenthala przy Muzeum Sztuki Współczesnej w Cincinnati, Budynek Centralny BMW w Lipsku, Hotel Puerta America (wnętrza) w Madrycie, rozbudowa Muzeum Ordrupgaard w Kopenhadze oraz Centrum Nauki Phaeno w Wolfsburgu. Zaha Hadid z taką samą pasją angażuje się w praktykę, nauczanie, jak i pracę twórczą.

Zaha Hadid należy do tych postaci w architekturze, które w swojej pracy w równym stopniu łączą intensywną działalność akademicką z praktyką projektową. Od końca lat 70. wykładała gościnnie na uniwersytetach Columbia i Harvard, a także prowadziła zajęcia tzw. Master Classes w różnych szkołach na całym świecie. W 1994 objęła katedrę im. Kenzo Tange w Podyplomowej Szkole Designu na Uniwersytecie Harvarda. W tej chwili Hadid jest profesorem na uniwersytetach w Yale i w Wiedniu.

Nie jest zatem umocowana w komercji, jak Norman Foster. Jej droga życiowa przypomina bardziej dokonania Petera Zumthora – architekta, który w „miękki” sposób łączy dydaktykę z karierą projektową. Ukazuje to jej dorobek twórczy. Niemal wszystkie dzieła to zamówienia publiczne – muzea, galerie sztuki, instalacje, meble, wnętrza. Jest bardziej artystką niż partnerem biznesowym. Hadid projektując, tworzy unikatowe obrazy i rysunki. Są one pokazywane na świecie i stanowią stałą część kolekcji różnych instytucji takich jak MOMA w Nowym Jorku i Niemieckie Muzeum Architektury we Frankfurcie.