

Nowoczesne metody produkcji betonowych prefabrykatów elewacyjnych i ich wpływ na architekturę – wybrane przykłady

MODERN PRODUCTION METHODS OF PRECAST CONCRETE FACADE ELEMENTS AND ITS INFLUENCE ON AN ARCHITECTURE – SELECTED EXAMPLES

Streszczenie

Niezwykle popularny w czasach starożytnych, szczególnie w Rzymie, pozwalał na tworzenie rewolucyjnych form przestrzennych, jak na przykład kopuła Panteonu. Jednak na wiele kolejnych wieków, beton został odsunięty w cień innych materiałów budowlanych. Wielki powrót nastąpił z początkiem XIX wieku, kiedy to wynaleziony został cement portlandzki, podstawowe spoiwo współczesnej mieszanki. Żelbet, uzyskany w wyniku połączenia betonu ze stalą to tworzywo, dające projektantom olbrzymie możliwości w zakresie kształtowania konstrukcji. Wiek XX przyczynił się do popularyzacji betonu między innymi za sprawą prefabrykacji elementów budowlanych. Seryjne wytwarzanie dużej liczby komponentów o doskonałych parametrach jakościowych, pozwala na ograniczenie kosztów związanych z produkcją, zmniejszenie ilości odpadów, usprawnienie procesu budowlanego oraz uzyskanie niespotykanych dotąd efektów estetycznych, które są niezwykle istotne w przypadku wykańczania fasad budynków. Koniec XX wieku wymusił na architektach przejście z deski kreślarskiej na monitor komputera, a w konsekwencji zmieniona została skala dokładności opracowań projektowych.

Już wkrótce standardem stanie się technologia BIM, pozwalająca na tworzenie parametrycznych modeli budynków w skali dokładności 1:1. Możliwości te zyskają ogromne znaczenie w momencie zastosowania wielkowymiarowych drukarek 3D, które w niedalekiej przyszłości mogą zmienić oblicze budownictwa. Trwające obecnie badania nad technologią wydruku przestrzennych elementów z betonu, dają bardzo obiecujące wyniki i można uznać, że już wkrótce nastąpi kolejna rewolucja w zastosowaniu tego uniwersalnego materiału.

Abstract

Extremely popular in an ancient times, especially in Rome, allowed to create revolutionary spatial forms, such as the dome of the Pantheon. However, for many subsequent centuries, the concrete was replaced by other building materials. At the beginning of the XIX-th century, there was a great come back of concrete because of inventing the Portland cement, the basic binder of contemporary mixtures. Reinforced concrete, obtained as a result of a concrete and steel combination gave the designers almost full freedom in shaping the structure. The XX-th century contributed to the popularization of a concrete due to the prefabrication of building elements. Serial production of a large number of components with excellent quality, allows to reduce the production costs, reduce waste, speed up the construction process and to achieve new aesthetic effects that are extremely important for the facades finishing. The end of the XX-th century forced the architects to move from the drawing board to the computer monitors, and consequently the precision of the design raised.

The BIM technology, that allows to create the parametric models of the buildings in the 1:1 scale, will become a standard soon. These capabilities will have a great importance at the moment of application large-sized 3D printers that in the future will change the face of the building process. Latest research on the technology of 3D printing concrete elements, give very promising results and can be considered that there will be another revolution in the application of this versatile material.

1. Technologie tradycyjne

Decyzja o zastosowaniu prefabrykowanych elementów w obiekcie musi zostać podjęta już w pierwszym stadium projektu. Najlepiej na etapie koncepcji. Tylko w ten sposób mogą zostać użyte w naprawę kreatywny sposób. Technologia ta wymaga bowiem wprowadzenia modułu budowlanego i konsekwentnego jego stosowania, możliwie najmniejszej liczby wyjątków, wyboru konkretnych rozwiązań montażowych, sprawdzenia możliwości w zakresie transportu wielkowymiarowych elementów i zapewnienia ciężkiego sprzętu budowlanego. Następnym etapem decyzji jest również taka kompozycja elementów fasadowych, która wykorzystuje specyfikę komponentów np. poprzez wykorzystanie powstających spoin jako detalu elewacji czy rytmu podziałów.

Prace nad współczesnymi prefabrykatami rozpoczynają się na ekranie monitora. Specjalistyczne oprogramowanie pozwala na wykonanie projektu zbrojenia oraz na dopasowanie kształtu elementów do fasady budynku. Na podstawie opracowanych rysunków, wykonane zostają formy ze stali, drewna lub żywicy poliestrowej zbrojonej włóknem szklanym (GFRP).

Ze względu na niską cenę i łatwość obróbki, najczęściej stosuje się formy drewniane. Ich żywotność wynosi około 30 cykli. Przy większej liczbie, trudno zapewnić perfekcyjną dokładność odlewanego produktu. Stalowe formy dają możliwość wytwarzania nawet kilkuset elementów, ale ich cena jest co najmniej 3 razy wyższa, przez co okazują się nieopłacalne. Aby zwrócił się koszt wykonania, należałoby zrealizować minimum 90 odlewów.* Niezwykle rzadko udaje się, w jednym projekcie na fasadzie, zastosować tak dużą liczbę jednakowych paneli.

Im więcej identycznych elementów zostało przewidzianych przez projektanta tym niższa będzie cena jednostkowa czyli niższy koszt całej fasady. Z punktu widzenia architekta, stosowanie niewielkiej liczby typów elementów, może wprowadzać pewne ograniczenia w zakresie kształtowania formy budynku, jak i kompozycji samych elewacji. Ciekawym kompromisem są szalunki, które można w pewnym zakresie modyfikować, produkując panele skoordynowane modularnie ze sobą, mające jednak różne wymiary (np. długość czy szerokość) lub ukształtowanie zewnętrznej powierzchni.

Mieszanka betonowa, wybrana często w drodze wielu eksperymentów z doborem kruszywa lub odcieniem pigmentu, musi dokładnie wypełnić całą formę oraz przestrzenie między stalową siatką zbrojącą, jeśli ta występuje i powinna pozostać w niej aż do uzyskania wytrzymałości rzędu 40-70 N/mm²**.

Najczęściej stosuje się obecnie dwa podstawowe rodzaje produkcji elewacyjnych prefabrykatów betonowych.

- *Semi-dry cast (dry cast)****, to metoda znana już w czasach Starożytnego Rzymu. Polegała ona na wyrabianiu mieszanki wapienia, piaskowca i innych kruszyw z dodatkiem tylko takiej ilości wody, aby uzyskać lekko wilgotną substancję, która była następnie ubijana w drewnianych formach i pozostawiana do momentu stwardnienia. Wytwarzane w ten sposób komponenty służyły najczęściej do uzupełniania ubytków w konstrukcjach kamiennych lub jako niewielkie elementy konstrukcyjne, np. nadproża. Momentem

* Dawson S., *Cast In Concrete. A guide to the design of precast concrete and reconstructed stone*, The Architectural Cladding Association 2003 r., s. 9

** *ibidem*, s. 11

*** W zależności od źródła metoda ta nazywana jest *dry cast* (Bennett D., *The art of Precast Concrete*, Birkhäuser, Bazylea 2005 r., s. 8) lub *semi-dry cast* (<http://www.ukcsa.co.uk/technical/semi-dry-wet-cast-FRCS.php>, data dostępu: 19.04.2014 r.). Za każdym razem dotyczy formowania prefabrykatu z mieszanki półsuchej. Bardziej poprawna wydaje się więc nazwa *semi-dry cast*.

przełomowym dla tej technologii okazało się odkrycie cementu portlandzkiego. Dzięki jego właściwościom estetycznym, powszechnie zaczęto stosować omawiane wyroby jako imitację kamienia naturalnego. W momencie wynalezienia żelbetu, liczba zastosowań tych prefabrykatów jeszcze wzrosła.

Metoda *dry cast* jest stosowana do dnia dzisiejszego, poza drobnymi udoskonaleniami, w niezmienionej formie.

Obecnie w skład mieszanki wchodzi cement, pigment (2–6% masy cementu) i kruszywo wybranego kamienia o frakcji 3–6 mm. Takie składniki zapewniają powstanie produktu doskonale naśladującego naturalny surowiec. Zazwyczaj dalsza obróbka nie jest konieczna, istnieje jednak możliwość wykańczania np. poprzez trawienie kwasem, piaskowanie czy młotkowanie.

Podstawową zaletą tej metody jest prostota i efektywność, a co za tym idzie niskie koszty produkcji. Półsucha mieszanka może być wyjęta z szalunku niedługo po jego wypełnieniu. Daje to możliwość wielokrotnego wykorzystania jednej matrycy w ciągu dnia. Do wad zaliczyć trzeba niezbyt dużą precyzję wykonania takich komponentów. Dzieje się tak dlatego, że mieszanka betonowa nie jest w stanie dokładnie odwzorować faktury powierzchni szalunku. Ze względu na porowatą strukturę i nierówną powierzchnię produktu, często nazywany jest sztucznym kamieniem.

- *Wet cast*, to nowsze rozwiązanie. Możliwości, jakie daje stosowanie w procesie budowy ciężkiego sprzętu w postaci żurawi czy dźwigów oraz konieczność budowy w niezwykle szybkim tempie, spowodowały że ekonomicznym rozwiązaniem okazały się również wielkogabarytowe prefabrykowane elementy betonowe. W tym przypadku mieszanka betonowa musi mieć konsystencję płynną, która zapewnia dokładne wypełnienie formy, bez ryzyka rozdzielania się składników oraz dokładne powiązanie z niezbędnym już w tym przypadku zbrojeniem. Duża zawartość wody wymusza konieczność pozostawienia produktu w szalunku przez co najmniej 16 godzin. Taki okres czasu daje pewność, że przy wyjmowaniu, nie dojdzie do uszkodzenia. Następnym krokiem jest czyszczenie elementu ze środków zapobiegających łączeniu się betonu z szalunkiem oraz pozostawienie niemal gotowego już prefabrykatu, aby dojrzał, przed przystąpieniem do wykańczania płaszczyzny licującej. Produkty metody *wet cast* są zdecydowanie bardziej wytrzymałe, dokładne i mniej nasiąkliwe niż te wykonane z mieszanki półsuchej.

Z ekonomicznego punktu widzenia, forma powinna być wykorzystana co najmniej 30 razy, aby system zaczął się zwracać, dlatego przy projektowaniu należy kłaść nacisk na jak najmniejszą liczbę typów powtarzalnych elementów. W przypadku matryc strukturalnych, tworzonych na bazie elastycznych tworzyw sztucznych, producenci zapewniają że możliwe jest wykonanie nawet 100 odlewów, przy użyciu stali – kilkuset.

Wielkość elementu uzależniona jest od licznych czynników. Przede wszystkim wynika ona z opłacalności – drobne komponenty charakteryzują się małą wagą, więc mogą być przygotowywane do transportu czy montowane ręcznie. Nie powodują też utrudnień przy samym transporcie. W przypadku wielkogabarytowych prefabrykatów, niezbędny jest już ciężki sprzęt. Równie istotną rolę (o ile nie najważniejszą) odgrywa strona wizualna projektowanego budynku – wymiary mogą być uzależnione i wynikać z przyjętego przez architekta modułu, nie koniecznie konstrukcyjnego. Za górną granicę powierzchni komponentu, producenci podają 40 m² w postaci kwadratu lub prostokąta.

* Wójcik J., Osowski S., *Matryce do betonu architektonicznego, Budownictwo, Technologie, Architektura*, nr 27, 2004 r., s. 14

2. Mechanizacja i automatyzacja procesów produkcyjnych

Zastępowanie prac, wykonywanych dotychczas ręcznie, pracą maszyn nazywa się mechanizacją. W miarę możliwości, we wszystkich czynnościach wymagających dużego wysiłku, człowiek próbował wyręczać się stworzonymi do tego celu maszynami. Urządzenia sterowane są przez odpowiednio wykwalifikowanych operatorów. Obecnie zdecydowana większość procesów roboczych w budownictwie jest zmechanizowana.

O mechanizacji automatycznej lub automatyzacji, mówimy w momencie, gdy działalność człowieka ogranicza się jedynie do uruchomienia sprzętu, a wszystkie pozostałe czynności zostają realizowane zgodnie z programem sterującym.

Automatyzacja w procesie produkcyjnym prefabrykatów betonowych występuje na każdym z etapów – w momencie projektowania z użyciem specjalistycznego sprzętu i oprogramowania, na etapie przygotowania formy, wstawiania zbrojenia, doboru składników mieszanki czy odlewania elementów, wibrowania, wyjęcia z szalunku, czyszczenia produktu, kontroli jakości, transportu i montażu.

Do podstawowych zalet automatyzacji zaliczyć należy ograniczenie nakładu pracy projektantów i wykonawców oraz prostą i szybką adaptację parametrów produktu. Przy niewielkim nakładzie finansowym i czasowym, wprowadzając nowe dane do systemu, można rozpocząć produkcję nowej serii komponentów.

3. Projektowanie wspomagane komputerowo CAD

Tradycyjny proces produkcyjny wymaga indywidualnego projektowania elementów, a następnie wykonania odpowiednich form dla każdego z nich. Nowoczesne, w pełni zautomatyzowane wytwórnie posługują się maszynami integrującymi te etapy. Specjalistyczne systemy pozwalają na cyfrowe projektowanie komponentów w trzech wymiarach z dokładnością skali 1:1 oraz na bezpośrednie ich wytwarzanie na podstawie przesłanych danych. Taki system produkcji nazywany jest CIM (Computer Integrated Manufacturing) lub CAD/CAM (Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing).^{**}

Decyzja o stosowaniu prefabrykowanych elementów budowlanych musi zostać podjęta już na etapie koncepcji architektonicznej. Wówczas można przeprowadzić wstępne badania dotyczące opłacalności wybranego rozwiązania. Wyniki takich szacunków mogą mieć wpływ na dalszy proces projektowy. Wszelkie decyzje powinny być uzgadniane ze specjalistami firmy zajmującej się wykonawstwem. Dobra koordynacja branż jest tu sprawą kluczową.

Mając wstępnie opracowaną bryłę i układ konstrukcyjny budynku w formie cyfrowej, można przystąpić do rozrysu siatki podziałów, jaka będzie występowała na elewacji. Jest to niezwykle ważny etap, ze względu na silne oddziaływanie powstających spoin na ostateczny charakter fasady. Należy więc zwrócić uwagę na kształt elementów, ich orientację i rozmiar. Równocześnie można podjąć decyzje związane z kolorem, tektoniką i fakturą paneli.

W kolejnej fazie projektowania uszczegóławiane są rysunki techniczne w celu realizacji form i zbrojenia oraz doboru odpowiedniej mieszanki betonowej.

* Martinek W., Pieniążek J., *Technologia budownictwa, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1995 r., s. 29*

** *Warszawski A., Industrialized and Automated Building Systems, E&FN SPON, Londyn 1999 r., s. 319*

Planowanie produkcji to ostatni etap projektowania. Sprawdzana jest wydolność całego systemu, uzgadniane terminy wytwarzania i dostaw kolejnych partii, ewentualny okres przechowania jak i koszty z tym związane.*

4. Wytwarzanie wspomagane komputerowo CAM

W zależności od stosowanego systemu, zautomatyzowany proces realizacyjny może obejmować niemal wszystkie etapy wytwarzania prefabrykatów. Wydajność takiej produkcji w stosunku do manualnej okazuje się być ponad 3,5 raza większa.** Pierwszym z nich jest wykonanie form w postaci ram ze stalowych profili i rozmieszczenie ich na paletach przy użyciu CNC (komputerowego sterowania urządzeniami numerycznymi). Następnie przygotowywane jest zbrojenie. Maszyna pobiera odpowiedniej długości stalowe pręty, przycina je w razie potrzeby, wygina i układa zgodnie z projektem. Gotowa siatka jest przenoszona do formy.

Kolejny etap to sporządzenie mieszanki z dobranych przez technologów i architektów składników. Po zalaniu matryc, zostają one poddane wibracjom, aby beton dokładnie wypełnił przestrzeń między zbrojeniem. W celu przyspieszenia twardnienia, komponenty poddawane są działaniu wysokiej temperatury, nawet na kilka godzin. Po osiągnięciu odpowiedniej wytrzymałości, wyciągane są z komory w takiej kolejności jak były do niej wkładane, aby czas ogrzewania był dla wszystkich jednakowy. Wyjęcie z formy następuje również przy użyciu zautomatyzowanego sprzętu, najczęściej tego samego, który służył do tworzenia szalunku.***

Pomimo wielu zalet, opisana technologia jest ograniczona do produkcji dwuwymiarowych paneli. Jednak ich struktura może być złożona. Często wprowadza się warstwy termoizolacji, elementy wyposażenia, instalacji czy wykończenia budynku. Takie działanie wiąże się bezpośrednio ze znaczącym obniżeniem kosztów inwestycji.

Ostatnim etapem wytwarzania betonowych prefabrykatów elewacyjnych w zakładzie jest wykańczanie ich powierzchni. Istnieje możliwość np. piaskowania, malowania, trawienia kwasem, szcztokowania czy polerowania. Czynności te mogą zostać wykonane automatycznie bądź przez wykwalifikowanych rzemieślników.

Maksymalne wymiary prefabrykatów wytwarzanych przy użyciu zautomatyzowanych urządzeń CNC zależą w głównej mierze od późniejszego transportu. Zazwyczaj nie przekraczają jednak 15 m długości.

Technologia jest wciąż rozwijana. Duże szanse na zwiększenie możliwości w zakresie kształtowania formy komponentów dają, coraz popularniejsze, betony ze zbrojeniem rozproszonym, tzw. włóknobetony. Dodawane do mieszanki włókna szklane w znacznym stopniu ograniczają liczbę spękań skurczowych, występujących głównie w elementach nawierzchni betonowych i tynkach. Możliwe jest uzyskiwanie elementów o dużej powierzchni przy grubości od kilku do kilkunastu milimetrów.

* *Ibidem*, s. 322

** Hauschild M., Karzel R., *Detail Practice. Digital Processes. Planning, Design, Production.*, Birkhäuser, Bazylea 2011 r., s. 50

*** *Warszawski A., op. cit.*, s. 326

5. Betonowe wydruki 3D

Przestrzenne wydruki, nad którymi badania prowadzone są od około 30 lat, w ostatnim czasie zyskały ogromną popularność i rozgłos. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest dostępność niedrogich urządzeń, przy użyciu których można stworzyć przestrzenne obiekty, o niewielkich wymiarach, lecz dowolnej formie, z tworzywa sztucznego. Przeniesienie wydruków przestrzennych do budownictwa daje zupełnie nowe możliwości. Tworzenie elementów z betonu, na podstawie trójwymiarowych modeli, w znacznym stopniu usprawnia zarówno proces projektowy, jak i realizacyjny. Najważniejszą zaletą takiego rozwiązania jest pełna swoboda twórcza w zakresie kształtowania formy architektonicznej.

Przykładem systemu, który może w niedalekiej przyszłości służyć do wznoszenia budynków, jest D-Shape, opracowany przez Enrico Diniego. Metoda polega na nakładaniu na siebie 5-10 mm warstw cząsteczek piaskowca, spojonych nieorganicznym środkiem wiążącym. Urządzenie ma postać struktury z aluminiowych kratownic, pomiędzy którymi powstaje realizowany komponent lub nawet cały budynek. Do obsługi głowicy wykorzystuje się wspomniane już systemy CAD/CAM. Całość sprawia wrażenie ciężkiej i mało mobilnej instalacji, jednak jak zapewniają twórcy jest ona lekka, łatwa w montażu i transporcie. Urządzenie zajmuje powierzchnię 7,5x7,5 m. Obszar roboczy wynosi 6x6 m.*

Proces realizacyjny zaczyna się w momencie zaimportowania projektu cyfrowego do systemu. Sprawdzony model 3D jest „drukowany” warstwa po warstwie bez żadnych przestojów, od najniższych partii po samą górę, tworząc jednocześnie ściany zewnętrzne, wewnętrzne, słupy, schody. Okres wiązania stosowanego tworzywa wynosi 24 godziny. Jego parametry wytrzymałościowe są na tyle duże, że przy podanych gabarytach budynku nie ma potrzeby stosowania zbrojenia. Od strony estetycznej przypomina naturalny marmur. Pod względem składu chemicznego jest w 100% przyjazny środowisku.** Wszelkie odpady i pozostałości z produkcji mogą być użyte ponownie.

Przyjmuje się, że realizacja obiektu (lub fragmentu obiektu) przy użyciu technologii D-Shape przebiega ok. 4 razy szybciej niż przy zastosowaniu metod tradycyjnych. Ponadto czas potrzebny na ten proces można określić z dużą precyzją i zdecydowanie wcześniej, co ułatwia planowanie budowy.

Nie ma potrzeby wcześniejszego przygotowywania form, zbrojenia czy szalunku. Jednak dokładność waha się w granicach 5–10 mm,** co w przypadku tradycyjnych metod budowlanych może nie wzbudzać większych zastrzeżeń, ale już w porównaniu ze współczesnymi sposobami prefabrykacji wypada niekorzystnie. Według zapewnień twórców rozwiązania, koszty budowy przy użyciu ich technologii nie będą wcale wysokie. Mimo iż stosowane spoiwo jest znacznie droższe od cementu portlandzkiego to sam proces wykonania wychodzi o około 30–50% taniej niż przy metodach tradycyjnych.

Obecnie prowadzone są próby wykonania pierwszego budynku wykorzystującego system D-Shape. Duński architekt Janjaap Ruijssenaars, we współpracy z Enrico Dinim realizują dom w kształcie wstęgi, który w 50% będzie składał się z elementów drukowanych.***

Równocześnie w Los Angeles, na Uniwersytecie Południowej Kalifornii, trwają prace prowadzone przez Behrokh Khoshnevisa, nad podobną technologią zwaną Contour Cra-

* Hauschild M., Karzel R., *op. cit.*, s. 52

** <http://www.d-shape.com/tecnologia.htm> (data dostępu: 25.04.2014 r.)

*** *Ibidem*, (data dostępu: 25.04.2014 r.)

**** Sullivan C.C., Sullivan A., *Robots, drones and printed buildings. The promise of automated construction.* [w:] *Building Design + Construction*, 02 2014 r., s. 26

fting (CC), która jako tworzywa miałyby stosować między innymi beton. CC pomyślany został jako proces tworzenia wielkogabarytowych elementów i całych budynków przy użyciu materiału w postaci gęstej masy układanej warstwa po warstwie, przy zachowaniu doskonale gładkich powierzchni zewnętrznych. Największymi zaletami tego rozwiązania są: skrócenie czasu budowy, możliwość integracji z innymi branżami poprzez wprowadzenie elementów instalacyjnych lub dodatkowego zbrojenia.

Gładka powierzchnia produktu otrzymywana jest dzięki zastosowaniu profili ograniczających przepływ układanej masy w kierunkach pionowym i poziomym. Uzyskanie idealnie równej elewacji możliwe jest jedynie przy wykonaniu dużej liczby bardzo cienkich warstw. Złazszcza w przypadku kształtowania elementów o powierzchniach zakrzywionych. Wiąże się to z wydłużeniem czasu potrzebnego na realizację*. Należy jednak zwrócić uwagę na inne korzyści płynące z zastosowania tego typu urządzeń. Cały proces produkcyjny jest praktycznie bezodpadowy. Zostaje wytworzona taka ilość materiału jaka będzie potrzebna do wykonania danej warstwy. Do minimum ograniczony zostaje również nakład pracy. Produkt jest „drukowany” na podstawie cyfrowego trójwymiarowego modelu. Technologia CC pozwala na wykonanie zbrojonych ścian z betonu, bez użycia kosztownych, praco i czasochłonnych w przygotowaniu szalunków. W pierwszej kolejności realizowane są wówczas ścianki konturowe – w orysie, stężone stalowymi kotwami. Pełnią one rolę szalunku. Następnie przestrzeń między nimi zostaje wypełniona mieszanką betonową.

Opisane technologie wpisują się w strategię zrównoważonego budownictwa, co w znacznym stopniu może się przyczynić do ich popularyzacji. Zmniejszenie zużycia materiału, nakładu energii na wszystkie kolejne fazy budowy, ograniczenie transportu materiałów i narzędzi oraz redukcja odpadów** przekładają się na minimalizację śladu węglowego.

6. Zastosowanie technologii BIM w produkcji betonowych prefabrykatów

Należy przyjąć, że pierwszym systemem typu BIM był Archicad. Powstały w 1987 roku program został opracowany z myślą o komputerach osobistych i można było przy jego pomocy wykonać rysunki dwu i trójwymiarowe. Skrót BIM pochodzi od nazwy Building Information Modeling i oznacza dosłownie modelowanie informacji o budynku. Polega ono na tworzeniu trójwymiarowych obiektów, składających się z elementów, którym można przypisać rzeczywiste parametry. „BIM w globalnej bazie danych dostarcza wszystkich informacji, które są potrzebne w procesie podejmowania decyzji projektowych w okresie planowania, budowy a szczególnie przewidywania wydajności, kosztocłłonności i energocłłonności.”***

Tak jak kilkanaście lat temu, odrębny rysunek architektoniczno-budowlany został całkowicie wyparty przez ten kreślony w programach typu CAD, tak w chwili obecnej można

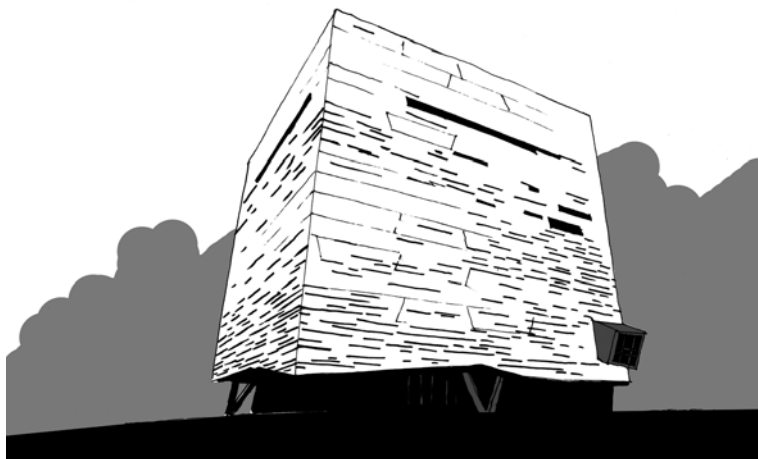
* Khoshnevis B., Hwang D., Yao Ke-Thia, Yeh Z., *Mega-scale fabrication by Contour Crafting, International Journal of Industrial and Systems Engineering, tom 1, nr 3, 2006 r., s. 301*

** Rahimi M., Mahdi Arhami M., Khoshnevis B., *Crafting Technologies, [w:] Times Journal of Construction and Design, 04 2009 r., s. 32*

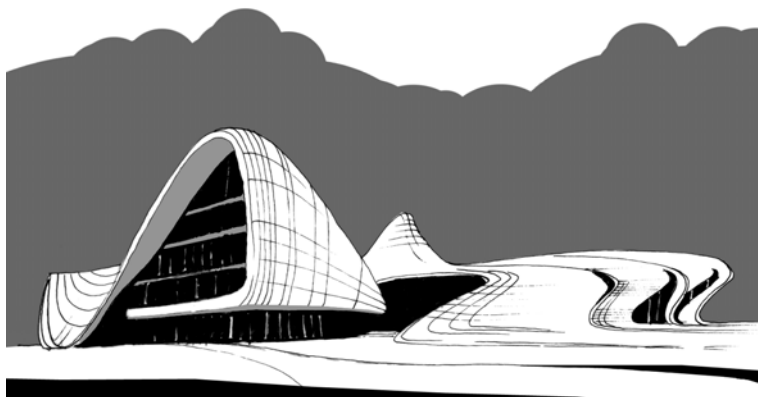
*** Chodor L. (2011): *Kształcenie inżyniera budownictwa oraz architekta w nowej technologii inteligentnych systemów komputerowych BIM – 3D+*, Materiały Ogólnopolskiej Konferencji Dydaktyczno-Naukowej „Kształcenie na kierunku BUDOWNICTWO, Kielce 1-3 czerwca 2011, s. 129

zaobserwować proces przejścia z płaskiego rysunku dwuwymiarowego w technologię BIM. Tworzenie projektu, czyli wszystkich elementów składowych budynku, w trzech wymiarach, w skali dokładności 1:1, łącznie z podaniem informacji dotyczących przykładowo kolorystyki paneli, rodzaju zewnętrznej powierzchni, sposobu montażu, daje możliwość szybkiej kalkulacji kosztów i czasu potrzebnego na realizację. Pozwala również na bezpośrednią produkcję komponentów na podstawie pliku z projektem, bez konieczności powtórnego wprowadzenia danych do urządzeń, minimalizując w ten sposób prawdopodobieństwo wystąpienia błędów. Za sprawą w pełni spójnego modelu, w którym zintegrowane są wszystkie branże, można mieć pewność, że geometria jak i inne parametry, nie tylko estetyczne, wytworzonych elementów, będą w pełni zgodne z wymogiem projektantów.

Doskonałymi przykładami nowoczesnych budynków, wykorzystujących potencjał realizacyjny technologii BIM w połączeniu z prefabrykacją elementów fasadowych, są: Muzeum Natury i Nauki Perot w Dallas (rys. 1) i Centrum Kultury im. Hajdara Alijewa w Baku (rys. 2).



Rys. 1. Muzeum Natury i Nauki Perot w Dallas, proj: Morphosis Architects (rys. P. Mika)



Rys. 2. Centrum Kultury im. Hajdara Alijewa w Baku, proj. Zaha Hadid Architects (rys. P. Mika)

Muzeum zaprojektowane zostało przez pracownię Morphosis. Ma postać betonowego prostopadłościanu, osadzonego w teksańskim krajobrazie, wykreowanym przez architektów z biura Talley Associates.

Jednym z podstawowych założeń realizacyjnych, było osiągnięcie możliwie jak najwyższego standardu budownictwa zrównoważonego, dla obiektów tego typu. Niezwykła precyzja projektu oraz zastosowanie najnowocześniejszych technologii pozwoliło ukończyć obiekt, który w niewielkim stopniu ingeruje w zastane środowisko naturalne.

Sama kubatura prostopadłościennego budynku narzuca skojarzenia z masywnym monolitem. Powierzchnia jego ścian, nieregularnie pomarszczona, pofałdowana, z nielicznymi perforacjami, przypomina naturalne uwarstwienia formacji skalnych. Taki efekt udało się osiągnąć dzięki zastosowaniu 656 prefabrykowanych paneli w rozmiarach dochodzących do 915 cm długości i o grubości przekraczającej nawet 20 cm.* Bardzo głęboka tektonika ich powierzchni oraz duża różnorodność typów, pozwoliły uzyskać na elewacji wyraźne linie trwałego światłocienia.

Prefabrykacja zewnętrznych elementów wykończenia była podyktowana chęcią maksymalnego ograniczenia śladu węglowego jak i względami ekonomicznymi. Dzięki decyzji o wyborze realizacji fasady w tej technologii, udało się stworzyć bardzo trwałą i nie kosztowną w utrzymaniu (również w wymiarze energetycznym) powłokę. Jasny kolor komponentów pozwala na ograniczenie pochłaniania promieniowania słonecznego, kształtując w ten sposób nie tylko klimat wewnątrz obiektu ale również łagodząc efekt miejskiej wyspy ciepła. Przy realizacji fasady wykorzystane zostały lokalne surowce – kruszywo i piasek, dzięki czemu ograniczono do minimum konieczność niezwykle energochłonnego transportu.

Bogate, przetrzesne „uwarstwienie” elewacji, w założeniu T. Maynea miało stworzyć wrażenie fałd zapewniających dynamiczny efekt na powierzchni budynku, który będzie się zmieniał z minuty na minutę w ciągu całego dnia wraz ze zmieniającym się kątem padania promieni słonecznych. Natężenie fałd jest znacznie większe w dolnych partiach budynku. W miarę wznoszenia, powierzchnia wygładza się, wywołując wrażenie zanikania na tle nieba. Aby wykonać takie zlecenie, firma Hillsboro musiała bardzo ściśle współpracować z architektami, inżynierami, zakładem betonowym i generalnym wykonawcą. Niezwykle przydatnym narzędziem przy tej współpracy okazała się technologia BIM. Umożliwiła wykonanie modelu parametrycznego elementów fasady, na podstawie którego bardzo szybko i dokładnie można było zrealizować formy dla paneli, w postaci drewnianych ram oraz drobnych elementów z tworzywa sztucznego, służących do układania na dnie negatywu zewnętrznego lica komponentu**. Ich układ był zmieniany przed każdym zalaniem. Dzięki takiemu zabiegowi, pomimo zastosowania prefabrykacji, uniknięto wrażenia powtarzalności paneli fasadowych i monotonii.

Centrum Kultury im. Hajdara Alijewa w Baku zostało zaprojektowane przez biuro Zahy Hadid. Budowę ukończono w 2012 roku. Obiekt ma postać wielokrzywiznowych fałd nachodzących na siebie, płynnie przechodzących z podziałów w posadzce placu w elewacje i dach. Fasada, w tym przypadku, wykończona została panelami z GFRC (beton zbrojony włóknem szklanym) i GFRP (kompozyt polimerowy wzmacniany włóknem szklanym), w zależności od funkcji, jaki dany jej fragment pełni. Tylko te materiały mogły w pełni oddać miękkie linie budynku, będąc jednocześnie odpornymi na duże zanieczyszczenie powietrza, wynikające z pracy zlokalizowanych w pobliżu rafinerii. Każdy z 15 tysięcy elementów fasady ma inną geometrię, a ich wymiary sięgają nawet

* *Style and Sustainability of Precast Concrete, Architectural Record, 11 2012 r., s. 156*

** *Ibidem, s. 156*

7 m. Wykonane zostały przy użyciu jednorazowych form, zrealizowanych przy użyciu wycinarek CNC i frezarek 3D. Pod okładziną znajduje się stalowa konstrukcja w postaci przestrzennej kratownicy ze skręcanych profili, z których każdy ma inną długość*. Dzięki opracowaniu całości projektu w formie parametrycznego modelu cyfrowego, wszystkie elementy konstrukcji i wykończenia idealnie do siebie pasowały.

7. Podsumowanie

Elewacja jest warstwą budynku, którą człowiek dostrzega w pierwszej kolejności. Dlatego należy przykładać niezwykłą wagę do poziomu jej wykończenia.

Wciąż jeszcze popularne jest wytwarzanie betonowych prefabrykatów przy użyciu półsuchej mieszanki. Produkt uzyskany w ten sposób okazuje się często niewystarczający dla architektów i inwestorów. Na dużą skalę metoda ta jest również energochłonna i kosztowna. Nowoczesne, całkowicie zmechanizowane i zautomatyzowane wytwórnie są w stanie zapewnić dużą liczbę doskonałej jakości produktów bazując na cyfrowym, wielobranżowym projekcie, dostarczonym przez architekta. Taka metoda działania jest szybka i skuteczna. Niestety urządzenia te często są ograniczone do produkcji elementów płaskich. Problemy pojawiają się gdy projekt zakłada realizację elewacji w postaci miękkich, nieregularnych form. W takiej sytuacji pozostaje łączenie metod tradycyjnych z możliwościami oferowanymi przez urządzenia typu CNC.

Będąc obecnie w fazie zaawansowanych badań technologie typu D-Shape czy Contour Crafting, dają nadzieję, że w niedalekiej przyszłości ograniczenia te znikną i każdy kształt będzie jednakowo prosty w realizacji.

Nie ulega wątpliwości, że rola prefabrykacji elementów betonowych w budownictwie będzie rosła. Zarówno ze względu na duże oszczędności energii, na co kładzie się szczególnie nacisk, ale i w wyniku zwiększających się możliwości w zakresie złożoności realizowanych struktur, jak i jakości elementów, które odgrywają decydującą rolę w kształtowaniu estetyki fasad.

* Dispenza K., *Zaha Hadid's Heydar Aliyev Cultural Centre: Turning a Vision into Reality*, <http://buildipedia.com/aec-pros/from-the-job-site/zaha-hadids-heydar-aliyev-cultural-centre-turning-a-vision-into-reality>, (data dostępu: 26.04.2014 r.)