

## Cyfrowe projektowanie i cyfrowa fabrykacja

### Digital designing and digital fabrication

Krystyna Januszkiewicz  
WA Politechnika Poznańska

Słowa kluczowe: architektura, projektowanie cyfrowe, cyfrowa fabrykacja

**Keywords:** architecture, digital designing, digital fabrication

#### Streszczenie

Projektowanie (CAD) i wytwarzanie (CAM) zintegrowały praktykę wznoszenia budowli z ich projektowaniem. Coraz silniejszy historyczny związek między architekturą a środkami produkcji staje się wyzwaniem dla nowych cyfrowych procesów projektowania, wytwarzania i budowania. Mając do dyspozycji techniki i technologie cyfrowe, przemysł budowlany stawia sobie coraz to nowe wyzwania. Wiodące na rynku budowlanym to niemieckie firmy Covertex, Seele, Finneforest Merk, które realizują dziś projekty architektów o światowej renomie. Fabrykacja cyfrowa i wędrówka danych od architekta do wytwórcy wynika z praktycznego podejścia, a nie z wyidealizowanych celów. Realizacja złożonych geometrycznie budowli i systemów budowlanych o różnych komponentach jest już realną propozycją. Istotne jest zatem rozpatrzenie relacji między niecyfrowymi umiejętnościami i narzędziami a cyfrową techniką i technologią. Prace badawcze prowadzone przez przedsiębiorstwa budowlane sugerują, że transfer i integracja z CAM w zakresie konstrukcji budowlanych wymaga nowego podejścia do produkcji przez rozumienie tradycyjnych środków i umiejętności. Możliwość masowej produkcji zróżnicowanych komponentów budowlanych, z taką samą łatwością jak standaryzowane części, prowokuje do wprowadzenia pojęcia umasowienia różnicowania produkcji (*mass-customization*) w projektowaniu architektury i wytwarzaniu.

#### Abstract

Designing (CAD) and manufacturing (CAM) integrated the practice of erecting buildings with their designing. Increasingly strong historical relationship between architecture and the means of production is becoming a challenge for the new digital design, manufacturing and construction processes. With digital technologies and techniques at its disposal, the construction industry has new challenges. The leading companies on the construction market are German companies, such as Covertex, Seele, Finneforest Merk, who now implement designs of internationally renowned architects. Digital fabrication and migration of data from the architect to the manufacturer is due to a practical approach rather than the idealized goals. Implementation of geometrically complex structures and building systems with different components is a viable proposition. It is important, therefore, to consider the relationship between non-digital skills and tools and digital techniques as well as technology. Research carried out by construction companies suggest that the transfer and integration with CAM in the design of buildings requires a new approach to the production through the understanding of traditional means and skills. The possibility of mass production of various building components, with the same ease as standardized parts, provokes to introduce the concept of mass-customization in the design of architecture and production.

Postęp w technologii wspomagającej projektowanie (CAD) i wytwarzanie (CAM) zintegrował praktykę wznoszenia budowli z ich projektowaniem. Nastąpił bezpośredni związek między zamysłem twórczym a tym co można realnie wybudować. Procesy informatyczne nie tylko generują dziś projekty, ale także realizują je przez cyfrowe „pliki do wytwarzania” sformatowane odpowiednio do wymogów technologii produkcji CNC. Spójne systemy (CAD/CAM/CAE) pozwalają na takie opracowanie dokumentacji projektu, które zapewnia pożądaną, pod względem kształtu i rozmiaru, obróbkę materiałową jego elementów, a niekiedy też montaż *in situ*. Architekci, rysując złożone, krzywoliniowe formy, zostają od razu wciągnięci w proces ich wytwarzania. Ciągłe zakrzywione powierzchnie, które cechują dziś architekturę, poruszają problem jak uporać się z konsekwencjami przestrzennymi i tektonicznymi tak złożonych geometrycznie form. Uwiarygodnieniem tej złożoności przestrzennej jest rozwiązanie problemów materiałowych i konstrukcyjnych.

Pierwszym obiektem zaprojektowanym i wykonanym za pomocą narzędzi cyfrowych była *Ryba* Gehry'ego ustawiona w 1992 przy *Vila Olimpica* w Barcelonie. Do jej realizacji potrzebowano takich narzędzi cyfrowych, które sporządziłyby pliki do fabrykacji. Posłużono się wtedy programem CATIA Dassault Systems (*Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application*). We Francji, za jego

pomocą, projektowano i wytwarzano samoloty oraz ich trójwymiarowe modele potrzebne do analiz konstrukcyjnych i do ich wytwarzania. Użycie tego programu do celów architektonicznych było zapowiedzią rewolucji cyfrowej w architekturze.

Po spektakularnych realizacjach Franka Gehry'ego takich jak: Muzeum Guggenheima w Bilbao (1991-1997) oraz Walt Disney Concert Hall w Los Angeles (1987-2003) zaczęło wzrastać wśród architektów zainteresowanie nowymi technologiami projektowania i fabrykacji. Chcąc dzielić się nowo zdobytymi doświadczeniami zespół Gehry'ego powołał firmę konsultacyjną i doświadczalno-badawczą Gehry Technologies. Firma ta do dziś prowadzi działalność edukacyjną w zakresie stosowania technologii informatycznych w projektowaniu i budowaniu form swobodnych o złożonej geometrii.

Korzystając z doświadczeń Gehry Technologies Peter Cook oraz Colin Fournier & Associates zaprojektowali i zbudowali skomplikowaną geometrycznie formę dla muzeum sztuki Kunsthaus w Grazu (2012-2013). Zaprojektowano ją zupełnie inaczej niż zrobił to Gehry w Bilbao. Chociaż najpierw forma była modelem fizycznym, to jej dokumentacja powstała w programie Rhinoceros 3D tak aby każdy z wykonawców mógł otrzymać 3D pliki cyfrowe do fabrykacji CNC (*Computer Numerical Control*).

Dziś coraz silniejszy historyczny związek między architekturą a jej środkami produkcji staje się wyzwaniem dla nowych cyfrowych procesów projektowania, wytwarzania i budowania.

### **Skanowanie trójwymiarowe, modele i prototypy**

Techniki trójwymiarowego skanowania stosowano najpierw do wyłapywania warunków terenowych lub budowlanych, a także do skanowania już istniejących obiektów. Skanery laserowe z urządzeniami pomiarowymi zastępują dziś na placu budowy tradycyjny sprzęt mierniczy, a także wykorzystywane są w pracach montażowych skomplikowanych i złożonych obiektów.

Używanie skanerów w procesie projektowym jest przydatne wtedy gdy chce się sporządzić dokumentację projektu do cyfrowej fabrykacji CAD/CAM, a projekt koncepcyjny powstaje w przestrzeni rzeczywistej w wyniku pracy na modelu. Są bowiem architekci, dla których geometryczno-matematyczny zapis formy jest procedurą czysto konceptualną, pozbawioną aspektów materializacji i interakcji przestrzennej. Uważają oni, że modelowanie w przestrzeni fizycznej jest działaniem bardziej wszechstronnym niż praca z komputerem, zwłaszcza gdy chodzi o badanie złożoności przestrzennej. Na przykład Frank Gehry woli pracować koncepcyjnie na modelu fizycznym niż manipulować powierzchniami na ekranie monitora.

W takim przypadku technologie cyfrowe nie służą jako medium w tworzeniu koncepcji, ale jako translator w procesie pobierania geometrii z modelu fizycznego, w celu jej przetworzenia na użytek różnorodnych urządzeń do fabrykacji CNC. Jest to możliwe dzięki metodzie MES, która jest już powszechnie stosowanym narzędziem obliczeń inżynierskich. Do wprowadzenia tej metody do technik komputerowych przyczynił się John H. Argyris (1913–2004), który w latach 1943–1991 pracował dla przemysłu aeronautycznego Wielkiej Brytanii.

Geometrię cyfrową modelu fizycznego sporządza się za pomocą technik trójwymiarowego skanowania w procesie tzw. „odwrotnej inżynierii”. Przez skanowanie generowany jest kształt modelu fizycznego dzięki punktom, które tworzą rodzaj chmury. Następnie punkty te są interpretowane przez program tak, aby powstało możliwie wierne odtworzenie geometrii modelu fizycznego. Zazwyczaj do tworzenia tej geometrii służą profile NURBS. Tak otrzymane powierzchnie można analizować, w celu usunięcia odchyłań wobec skanowanego modelu. Proces przekładu ze strefy fizycznej do cyfrowej jest odwrotnością tego, co wykonują standardowe narzędzia CAM. Metoda ta jest pomocna nie tylko w sporządzaniu cyfrowego modelu geometrycznego – odpowiednika modelu fizycznego. Otrzymane dane można dalej przetwarzać i sporządzać odpowiednie formaty potrzebne do dalszych studiów i zmian. Można wykonywać modele fizyczne, aby dokonywać kolejnych działań twórczych.

Projekt cyfrowy często ze względu na swoją złożoność wymaga weryfikacji w przestrzeni rzeczywistej. Integracja narzędzi CAD/CAM pozwala na szybkie wykonywanie modeli na każdym etapie projektu. Chociaż stereolitografia była już znana od dawna w przemyśle, lecz dopiero, gdy powstał *3D System Valencia*, technologia ta stała się dostępna i od tej pory powstają liczne jej odmiany. Dziś szybkie modelowanie w trzech wymiarach zapewnia pakiet RP (*Rapid Prototyping*). Obejmuje grupę

technik do szybkiego wykonania modelu fizycznego, które są zintegrowane z programami CAD/CAM/CAE.

### **Wytwarzanie cyfrowe CNC**

Od wieków architekt był postrzegany, nie tylko jako mistrz efektów przestrzennych, ale także jako budowniczy znający techniki budowlane, rozwiązujący problemy konstrukcyjne i materiałowe. Powstało nawet przekonanie, że jeżeli czegoś nie można narysować, to także nie będzie można tego ani zbudować, ani wykonać i *vice versa*<sup>1</sup>. Technika i technologia, nie tylko w budownictwie, zostały dostosowane do pracy na podstawie rysunków ortogonalnych. Ten dwustronny związek między reprezentacją a środkami produkcji trwa do dziś.

W dobie technologii cyfrowych powstały cyfrowe środki produkcji i dostępne są sterowane komputerem urządzenia do wytwarzania. Chcąc wykorzystywać w pełni możliwości tych urządzeń, architekt zostaje wciągnięty w bezpośrednie procesy fabrykacji swojego projektu – tworzy informacje, które są przekładane przez producentów na język maszyn i urządzeń CNC, na przykład nieregularne panele szklane na elewacji Nationale-Nederlanden w Pradze (1996) projektu Gehry'ego. Były one przycinane przez urządzenia, które pobierały informacje geometryczne bezpośrednio z modelu cyfrowego architekta.

Strategie wytwarzania dwuwymiarowego polegają na wycinaniu płaskich komponentów dla powierzchni złożonych geometrycznie. Ich kształt jest wynikiem konturowania, triangulacji czy poligonalnej tessellacji etc. Która z tych strategii zostanie podjęta, zależy od definicji tektoniki obiektu: co jest strukturą, a co skórą, albo jaka jest kombinacja tych dwóch składowych. Oprócz danych opisujących detal, to 3D model geometryczny jest podstawą do spełnienia warunków dokumentacji. Pozwala nie tylko wykonywać modele fizyczne w każdej skali, by je testować, ale także jest podstawą do wytwarzania komponentów i ich montażu *in situ*. Modele cyfrowe pomocne są także podczas wyboru producenta i wykonawcy w wąskim jeszcze sektorze podejmującym się realizacji form swobodnych. Często architekt, współpracując ze specjalistami, obmyśla nowe metody produkcji, aby zrealizować formę, którą zaprojektował.

Eksperymentalnej produkcji szklanej „bańki” podjął się Bernhard Franken, gdy w 1998 zaprojektował pawilon dla ekspozycji samochodów BMW we Frankfurcie. Izomorficzna forma tego obiektu wymagała wyjątkowo precyzyjnego konturowania aby wykonać stalowy szkielet wypełniony panelami ze szkła akrylowego. Skorzystano wtedy z urządzeń CNC – najpierw frezarek do wykonania wzorników do termoformowania oraz maszyn tnących panele akrylowe z godnie z ich rozwinęciem geometrycznym 3D. Błachę pokrywającą *Experience Music Project* (1996–2000) w Seattle cięto elektronicznie (ponad 21 tys. formatów, o innych wymiarach każdy) w Texas City ze względu na brak takich możliwości w rejonie miejsca realizacji projektu<sup>2</sup>. Biuro Ieoh M. Pei już w pierwszym stadium powstawania projektu rozbudowy Niemieckiego Muzeum Historycznego (1997–2004) w Berlinie nawiązało w 1998 kontakt z Tambest Oy w Finlandii, specjalizującym się w produkcji szkła dla budownictwa. Chodziło o wykonanie wielkoformatowych tafli szkła o dwukrzywiznowej powierzchni<sup>3</sup>.

Cyfrowe procesy produkcji uświadamiają, że realizacja budowli jest zależna od funkcji obliczeniowych programów wspomagających projektowanie. Faktem jest, że złożoną geometrię precyzyjnie opisują krzywe i płaszczyzny NURBS, które są możliwe do obliczenia, a zatem ich fabrykacja jest osiągalna przez środki produkcji oparte na procesach wytwarzania kontrolowanych numerycznie (CNC).

Wraz z rozwojem robotyki i automatyki weszły nowe technologie plazmowego wycinania dwuwymiarowego i stanowią dziś konkurencje dla laserowego czy gazowego. Sterowanie maszyną odbywa się za pomocą kontrolera EDGE II CNC. Plotery frezujące mogą wykonywać skomplikowane kształty niemożliwe do uzyskania na tradycyjnych frezarkach. Stosuje się także serwonapędy cyfrowe

---

<sup>1</sup> Por. William J. Michell, *Roll Over Euclid: How Frank Gehry Designs and Builds*, w: Fiona Ragheb (red.), *Frank Ghery, Architect*, Guggenheim Museum publications, New York, 2001, 352–363.

<sup>2</sup> Patrz: Krystyna Januszkiewicz, *Frank O. Gehry, Experience Music Project EMP. Projekcja przeżywania Muzyki w Seattle*, Archivolta, 1/2001, 8–19.

<sup>3</sup> Patrz: Krystyna Januszkiewicz, *Rozbudowa Niemieckiego Muzeum Historycznego w Berlinie*, Archivolta, 1/2004, 8–17.

dla kilku wrzecion, aby wykonywać jednoczesną obróbkę kilku elementów. System sterowania CNC, oparty na technologii analizy dynamicznej wektorów, komunikuje się z komputerem osobistym (PC) za pomocą portu USB, co zapewnia szybką wymianę danych i pozwala na pełną wizualizację pracy maszyny na ekranie komputera. Frezarki wieloosiowe z system sterowania 3D i wymiennymi narzędziami mogą wykonywać różnego rodzaju detale architektoniczne.

Frezarki CNC są najstarszym narzędziem technologii cyfrowej. Pierwsze ich zastosowanie w wytwarzaniu modeli architektonicznych miało miejsce w Wielkiej Brytanii w latach 70. XX w., potem duże firmy architektoniczne takie, jak Skidmore, Owings i Merrill (SOM) w Chicago używały frezarek CNC i laserowych narzędzi do wytwarzania modeli architektonicznych i modeli do studiów montażu elementów konstrukcyjnych. Automatyczne frezarki CNC były już używane w końcu lat 80. XX w. do obróbki komponentów konstrukcyjnych takich, jak kamienne słupy dla kościoła Sagrada Familia w Barcelonie czy bloki ścienne dla nowojorskiej katedry Saint John the Devine<sup>4</sup>. Na początku lat 90. XX w. Frank Gehry użył urządzeń CNC do obróbki kamieniarki w *Walt Disney Concert Hall* w Los Angeles, zanim obiekt ten został przebudowany. Było to pierwsze w architekturze pełne wykorzystanie technologii CAD/CAM w obróbce kamieniarki. Kamienne panele o dwukrzywiznowej geometrii wykonano we Włoszech i dostarczono do Los Angeles, gdzie były pozycjonowane i mocowane na stalowych ramach. Takiej samej techniki fabrykacji użyto do wykonania kamiennej okładziny w Bilbao. Narzędzia CNC znajdują także zastosowanie w obróbce form do wylewania elementów betonowych o dwukrzywiznowej geometrii. Skorzystał z tego po raz pierwszy Frank Gehry podczas budowy zespołu biur w Düsseldorfie w 2000.

Główne przedsiębiorstwa na świecie w sektorze budowlanym potwierdzają współczesne przekonanie, że procesy wytwarzania (CAM) odgrywają niezwykle istotną rolę w potencjalnym odejściu od masowej produkcji i standaryzacji ku koncepcji i produkcji zróżnicowanych elementów i systemów budowlanych. Firmy, które już w latach 80. XX w. zaczęły się specjalizować w wytwarzaniu cyfrowym, należą dziś do czołówki przedsiębiorstw przygotowanych do realizacji tak postawionych zadań. Na przykład holenderskie przedsiębiorstwo Design & Build Octatube Space Structures BV z Delft, założone w 1983, już od ponad 10 lat eksploruje innowacyjne środki produkcji cyfrowej, aby przez swoje inżynierskie podejście umożliwić i wspierać realizacje zaawansowanych projektów.

Taką innowacyjną realizacją był pawilon Harlemermer Floriade, nazywany Hydra Pier, w Hoofddorp (2000–2002) projektu Asymptote Architects. Jego forma była inspirowana skrzydłami Boeinga 747 i Airbusa Super 8080 i oczekiwano, że zostanie wykonana w podobny sposób<sup>5</sup>. Mając daną tylko jedną oś symetrii, inżynierowie na podstawie wytwarzania cyfrowego i formowania eksplozywnego opracowali nowy proces produkcji asortymentu 3-D paneli z aluminium – każda z paneli ma inne wymiary, krzywiznę i grubość. Eksplozywne formowanie nie jest metodą nową. W latach 50. XX w. metoda ta była stosowana w przemyśle zbrojeniowym do wytwarzania komponentów, takich jak kopułowe zakończenia pocisków i raket balistycznych. Eksplozywne procesy formowania zachodzą w odpowiednich warunkach pod powierzchnią wody. Formowanie to, ze względu na koszty, stosuje się głównie w przemyśle lotniczym i kosmicznym<sup>6</sup>.

Dzięki integracji z zawansowaną technologią CAM Octatube, we współpracy z duńskim Exploform, zaadoptowano tę metodę do budownictwa, obniżając koszty produkcji paneli okładzinowych. Dane numeryczne, potrzebne do osiągnięcia geometrii każdego panelu aluminiowego, były pobierane bezpośrednio z 3D modelu. Osiągnięto nadzwyczajną precyzję geometryczną i złożoną tesselację, tak jak w oryginalnym modelu. Jest ona widoczna w układzie paneli. Panele te łączono na drewnianym „kopycie”, tak aby zapewnić wodoszczelność powierzchni obiektu.

Innym przykładem poszukiwań sposobu realizacji gładkiej dwukrzywiznowej struktury jest dach w *Centrum Yitzhaka Rabina* w Tel Avivie (2002–2005). Moshe Safdie zaprojektował pięć odrębnych dwukrzywiznowych powierzchni dachowych biblioteką i foyer. Najpierw były pomyślane jako struktura stalowa o betonowej powierzchni, co stanowiło poważne wyzwanie konstrukcyjne.

---

<sup>4</sup> Por. William J. Michell, M. MacCullough, *Prototyping*, w: *Digital Design Media*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1995, 417–440.

<sup>5</sup> Por. Asymptote, *Harlemermer Pawilon*, Bis Publisher, Amsterdam, 2003, 16.

<sup>6</sup> Szerszy opis metody eksplozywnego formowania opracowanego przez Octatube Space Structures BV patrz: Achim Menges, *Manufacturing Diversity*, AD, Vol. 76, No. 2, 2006, 72.

Inżynierowie z Octatube opracowali koncepcje samonośnych łupin z poliestru wzmocnionego włóknem szklanym. Przypominają one wyglądem naprężoną skórę. Warstwy zewnętrzne dostosowano do warunków klimatycznych i pożarowych. Łupiny powstawały w formach przygotowanych przez frezarki CNC zgodnie z ich 3D modelem cyfrowym. Wykonano je tak, aby zniknęły różnice między warstwą wierzchnią a substratem. Struktura tych łupin niewiele różni się od deski surfingowej<sup>7</sup>. 3D model cyfrowy zintegrował metody pracy podczas realizacji projektu – ułatwił wszystkie zadania inżynierskie, a pliki tzw. *file-to-factory* umożliwiły produkcję. Dostarczyły także istotnych danych, aby w ekonomiczny sposób przygotować transport łupin do Izraela i opracować sposób ich montażu w miejscu przeznaczenia.

Przykłady te pokazują jak zintegrowane podejście do komputerowego wspomaganie projektowania i wytwarzania umożliwia produkcję i konstrukcję powierzchni budowlanych o złożonej geometrii. Ponadto produkcja cyfrowa otwiera nowe możliwości wytwarzania systemów budowlanych złożonych z kilku tysięcy różniących się geometrycznie elementów z różnych materiałów, jak na przykład w EMP w Seattle czy w *Allianz Arena* w Monachium (2002–2005).

W 2003 międzynarodowa firma Covertex, specjalizująca się w inżynierii membran i ich produkcji, podjęła się realizacji *Allianz Areny*, projektu Herzog & Meuron. Firma zrealizowała pneumatyczne przekrycie (26 000m<sup>2</sup>) oraz pneumatyczną fasadę (38 000m<sup>2</sup>) złożoną z 2816 pojedynczych dwuwarstwowych poduszek powietrznych, z których każda wymagała określenia parametrów do wycinania zaprojektowanego wzoru. Każda poduszka powstała z transparentnego etylenotetrafluoretylenu (ETFE) i była pojedynczo mocowana do stalowej struktury nośnej, napełniana powietrzem i wyposażona w rurki odwadniające, aby uniknąć gromadzenia się wody na wypadek uszkodzenia. Oznaczało to skoordynowanie otworów w membranie każdej poduszki, a także koordynację względem geometrii ułożenia na fasadzie budowli. Dodatkową trudnością było to, że długość przekątnej poduszek wynosi 16 m, co wymuszało łączenie materiału membranowego. Dzięki zaawansowanej technice CAD/CAM i technologii *form-finding* inżynierowie z Covertex opracowali proces produkcji. 3D model architektów, który definiował jedynie kształt (przez krzywe NURBS), służył jako podstawa do obliczeń inżynierskich. Wykonany na zamówienie program ułatwił odszukanie wszystkich współrzędnych istotnych punktów na tym modelu i zapisanie ich na arkuszach obliczeniowych. Zaprogramowano również, już rutynowo, zrównoważony układ ram nośnych i określono wspólne punkty mocowania każdej poduszki. Punkty te umożliwiły określenie w cyfrowym procesie *form-finding* stanu maksymalnego napełnienia każdej poduszki powietrzem. Następnie wygenerowano wzór do wycinania membran, mając na uwadze istotne informacje, takie jak pozycja linii cięcia, łączenie materiału i stopień nachylenia oraz lokację otworów dla instalacji odwodnienia. Taka baza danych umożliwiła kontrolę wycinania i oznaczania elementów oraz kontrolę łączenia materiału ETFE podczas produkcji każdej poduszki. Przez zintegrowanie systemów CAD/CAM przeprowadzono wszystkie te procesy i zadania inżynierskie.

W konstruowaniu struktur pneumatycznych i membranowych niezwykle ważną rolę odgrywają narzędzia cyfrowe. Stanowią one podstawę w rozpoznawaniu zachowań materiałowych i wyznaczaniu powierzchni minimalnych. Niemiecka firma Skyspan, specjalizująca się w membranach naprężanych mechanicznie, kontroluje cyfrowo ułożenie włókien materiału membranowego już w trakcie jego produkcji. Na przykład gdy ustalony został cyfrowy zapis geometrii membran przekrycia *Commerzbank Areny* we Frankfurcie (2005), wówczas przed wycinaniem przewidywanego kształtu uzupełniono go o informacje o anizotropii nowego materiału.

Mając do dyspozycji techniki i technologie cyfrowe, przemysł budowlany stawia sobie coraz to nowe wyzwania. Niemiecka firma Seele zajmująca się konstrukcją i inżynierią fasad ze szkła i stali w 2000 r. postanowiła opracować techniki i technologie, które sprawią, że fasady uzyskają elastyczność właściwą membranom. Sukces tego przedsięwzięcia uzależniono od takiego zintegrowania projektowania CAD/CAM, które na poziomie molekularnym pozwoli opracować odpowiednio elastyczne komponenty. Konieczna zatem jest pełna integracja projektowania cyfrowego z cyfrową metodą *form-finding* w generowaniu wzoru do wycinania, a także integracja komputerowych procesów analitycznych z cyfrowym cięciem i łączeniem materiału. Jednak wytwarzanie i konstrukcja budowlanej „skóry” ze sztywnych materiałów, takich jak metal i szkło, wymaga dużo szerszego zakresu cyfrowych procesów formowania i wytwarzania niż w przypadku zwykłych membran.

---

<sup>7</sup> Więcej patrz: op. cit., 72–73.

Inżynierowie z Seele wykorzystują różne procesy CAD/CAM do wytwarzania i montażu swojego produktu. Ułatwienia, jakie daje CAM w połączeniu z aplikacjami CAD, umożliwiają stworzenie zbioru danych inżynierskich i wytwórczych, które pozwalają wznosić bardzo skomplikowane budowle, jak Seattle *Public Library* (1999–2004) projektu Rema Koolhassa. Podczas realizacji tego obiektu Seele odpowiadała za produkcję i instalację 11 900 m<sup>2</sup> ścian elewacyjnych, złożonych z 6500 paneli szklanych i 30 000 anodowanych profili aluminiowych. Podstawowy 3-D model fasady dostarczył danych do wytwarzania wszystkich prefabrykowanych elementów, łącznie z oznakowaniem do montażu, listą zawartości opakowań i do rozplanowania transportu<sup>8</sup>.

Coraz częściej w przemyśle budowlanym używa się tych samych urządzeń, które stosuje się w przemyśle samochodowym. Dzięki robotyce przemysłowej następuje szybka robotyzacja procesów produkcyjnych i wprowadzane są coraz doskonalsze roboty i manipulatory przemysłowe. Są to wielozadaniowe maszyny do automatycznej manipulacji z możliwością wykonania programowalnych ruchów względem kilku osi.

Niemiecka firma Finneforest Merk, specjalizując się w konstrukcjach budowlanych z drewna, używa w produkcji wieloosiowe roboty przemysłowe o wymiennych głowicach i programach. Mogą one wykonywać zróżnicowane zadania wytwórcze – od spawania arkuszy metalu do cięcia i wszywania umocnień kompozytowych. Ponadto takie roboty mogą automatycznie identyfikować pozycje i rodzaj obrabianego materiału, wykonywać sekwencje poszczególnych etapów wytwarzania przez automatyczną zmianę głowic, a później sprawdzać dokładność zgodnie z przyjętą tolerancją. Tak wyposażone zakłady wytwarzają zarówno pojedyncze złożone elementy budowlane, jak i kompleksowe konstrukcje o większej liczbie różnych komponentów. Są to często elementy budowlane o trójplaszczynowych krzywiznach, wykonywane z drewna klejonego, tak jak dla *rellercoastera* w Soltau w Niemczech.

Poważnym wyzwaniem dla firmy Finneforest Merk była realizacja *Serpentine Pavilion* 2005 projektu Alvaro Siza i Eduardo Souto de Moura. Ze względu na innowacyjność rozwiązań przestrzennych projekt był konsultowany przez biuro inżynierskie Arup. Pawilon tworzą zakrzywione ściany i dwukrzywiznowe przekrycie o rozpiętości 17 m. Projektanci wyobrażali sobie, że przedstawiona na modelu cyfrowym powierzchnia zostanie zmaterializowana w drewnie w postaci siatki skręcającej i wyginanej w przeciwległych kierunkach. Unikatowa geometria elementów tej struktury była określona cyfrowo przez inżynierów Arup Advanced Geometry Group i mapowana w formacie, który mógł bezpośrednio komunikować się z inżynierskimi aplikacjami systemu CAD/CAM. Technologie robotyki przemysłowej pozwoliły wykonać w ciągu dwóch tygodni 427 elementów z drewna, potrzebnych do zbudowania pawilonu. Ich montaż także wymagał ścisłego protokołu kolejności i łączenia poszczególnych sekwencji<sup>9</sup>.

Wydaje się, że ważne jest, by zrozumieć, iż cyfrowa produkcja jest strategicznym aspektem projektu, a nie tylko ułatwieniem w jego powstaniu, zwłaszcza że CAM jest szybko rozprzestrzeniającą się technologią. Produkcja cyfrowa i wędrowka danych cyfrowych od architekta do wytwórcy wynika z praktycznego podejścia, a niewyidealizowanych celów. Realizacja złożonych geometrycznie budowli i systemów budowlanych o różnych komponentach jest już propozycją do wykonania. Istotne jest zatem rozpatrzenie relacji między niecyfrowymi umiejętnościami i narzędziami a cyfrową techniką i technologią. Prace badawcze prowadzone przez główne przedsiębiorstwa budowlane sugerują, że transfer i integracja z CAM w zakresie konstrukcji budowlanych wymaga nowego podejścia do produkcji przez rozumienie tradycyjnych środków i umiejętności. Technologia CAD/CAM jest mechanizmem, który powoduje, że istniejący potencjał wiedzy i metod zaczyna być w pełni realizowany zarówno w skali mikro, jak i makro. Przedstawione tu projekty i procesy dowodzą, że integracja niecyfrowych i cyfrowych technik oraz technologii wytwarzania ma duży potencjał w nowych środkach produkcji cyfrowej. Jest to moment syntezy i synergii, w którym następuje zmiana myślenia w dążeniu do redefinicji procesów budowania jako takich.

### **Cyfrowy montaż *in situ***

Kiedy już komponenty zostaną wyprodukowane przez narzędzia CNC, ich montaż na placu budowy może także wspomagać technologią cyfrową. Trójwymiarowe modele cyfrowe można wykorzystywać

<sup>8</sup> Op. cit., 74.

<sup>9</sup> Patrz: Cecil Balmond, Alvaro Siza, Eduardo Souto De Moura: *Serpentine Gallery Pavilion 2005*, Trolley, 2006.

do precyzyjnego pozycjonowania każdego komponentu i umocowania go we właściwym miejscu. W tradycyjnym procesie budowniczy brał wymiary i współrzędne z rysunków na papierze i posługiwał się taśmą mierniczą oraz innymi prostymi urządzeniami do ustalenia położenia komponentów na miejscu budowy. Teraz czyni się to, opierając się na technologiach cyfrowych. Elektroniczne urządzenia miernicze i lasery pozycjonujące precyzyjnie rozmieszczają komponenty. Stosowane są na budowach w wielu krajach. Na przykład podczas budowy Guggenheim Museum w Bilbao nie używano taśm mierniczych. Podczas wytwarzania każdy element opatrzony został paskiem kodowym z informacją o swojej pozycji w danej sekcji montażowej i pozycji elementów bezpośredniego sąsiedztwa. Dane te pobrano z modelu geometrycznego sporządzonego w programie CATIA. Laserowe urządzenia pomiarowe, powiązane z tym programem, umożliwiają precyzyjne umiejscowienie każdego elementu w pozycji, jaką określa model obliczeniowy<sup>10</sup>. Podobnie budowano EMP w Seattle. Taki sposób montażu był od dawna stosowany w przemyśle lotniczym, a w budownictwie jest innowacyjny.

Dane geometryczne z 3D modeli cyfrowych mogą być automatycznie użyte do wykonywania różnych zadań na placu budowy. W Japonii powstało wiele różnorodnych robotów do przenoszenia i mocowania komponentów w miejscu wskazanym w projekcie. Roboty te unoszą ciężkie belki stalowe (Shimizu Mighty Jack), a także żelbetowe elementy konstrukcyjne. Inne wytwarzają na placu budowy elementy wylewane na mokro (*Obayashi-Gumi Reinforcing Bar Arranging Robot Concrete Placer*, *Takenaka Self-Climbing Inspection Machine*), inne zaś wykorzystano do zakładania izolacji i malowania (Shimizu Insulation Spray Robot, Takenaka Self-Climbing Inspection Machine, Taisei Pillar Coating Robot).

Te nowe technologie po części wykorzystano podczas wznoszenia skomplikowanej konstrukcji w projekcie Daniela Libeskinda rozbudowy *Royal Ontario Museum* w Toronto (2002–2007). Model cyfrowy pozwala także na regulacje i poprawki w ramach tolerancji systemu elewacyjnego. Określa się je w cyfrowym procesie skanowania, który zapisuje zadane grupy punktów pomiarowych i następnie porównuje z cyfrowym modelem fasady już na etapie montażu, aby dokonywać bieżących korekt. Być może, że w niedalekiej przyszłości architektki będą bezpośrednio transmitować informacje projektowe do maszyn budowlanych, które będą automatycznie wykonywać montaż i prace wykończeniowe. Opracowywany w Japonii od początku lat 90. XX w. system integrujący SMART (*Shimizu Manufacturing system by Advanced Robotics Technology*) jest obecnie pierwszym na świecie systemem stosowanym na szeroką skalę podczas wznoszenia budynków. Oparte na nowej technologii CIC (*Computer Integrated Construction*) maszyny budowlane typu SMART pozycjonują i łączą stalowe belki konstrukcyjne, instalują żelbetowe panele stropowe, ściany zewnętrzne i wewnętrzne. System ten dowodzi, że możliwa jest pełna automatyczna identyfikacja, transport i instalacja komponentów budowlanych dzięki skomputeryzowanym systemom zarządzania informacją pobieraną z projektu. Za pomocą tego systemu wznosi się, nie tylko w Japonii, niektóre budynki biurowe i obiekty mostowe. Eksperymenty te są zwiastunem nieuchronnej rewolucji cyfrowej w przemyśle budowlanym.

### **Modyfikacja i standaryzacja**

W ostatnich dwóch dekadach numerycznie kontrolowany proces produkcji umożliwia wytwarzanie niestandardowych komponentów bezpośrednio z danych cyfrowych, zawartych w projekcie architektonicznym. Komputer kontroluje wytwarzanie, tak jak w produkcji samolotów, samochodów czy okrętów. Zintegrowanie narzędzi CAD/CAM sprawia, że w dyskursie o architekturze porusza się problemy umasowienia indywidualnych zamówień i nowej logiki lokalnych zróżnicowań w seryjnie wytwarzanych elementach i systemach budowlanych. Ograniczenia geometryczne w XX w. zostały po części uprawnione przez fordowskie wzorce produkcji przemysłowej. Objęły one budownictwo przez logikę standaryzacji, prefabrykacji i montażu *in situ*. Racjonalność wytwarzania dyktowała przedkładanie prostoty ponad złożoność, promując monotonne układy komponentów uzyskiwanych dzięki małym kosztom produkcji masowej.

Obecnie nie ma już konieczności, by nadal utrzymywało się takie usztywnienie produkcji. Urządzenia kontrolowane cyfrowo mogą wytwarzać unikatowe komponenty o złożonym kształcie,

---

<sup>10</sup> Por. Annette LeCuyer, *Building Bilbao*, *Architectural Review*, December 1997, 43–45.



których koszty zaczynają osiągać kompromis między wydajnością a ekonomiką produkcji. *Nota bene* koszt pracy frezarki CNC, wytwarzającej 1000 unikatowych przedmiotów, jest taki sam jak podczas wytwarzania 1000 takich samych. Automatyzacja produkcji zatem sprzyja zróżnicowaniu, podczas gdy tradycyjna technika produkcji – standaryzacji.

Możliwość masowej produkcji zróżnicowanych komponentów budowlanych, z taką samą łatwością jak standaryzowane części, prowokuje do wprowadzenia pojęcia umasowienia różnicowania produkcji (*mass-customization*) w projektowaniu architektury i wytwarzaniu. Pojęcie to, opisując wzorzec gospodarki postfordyzmu XXI w. zostało zdefiniowane przez Josepha Pine jako masowa produkcja indywidualnie zamawianych towarów i usług, aby w ten sposób oferować wzrost różnorodności i indywidualnych zamówień bez wzrostu kosztów produkcji<sup>11</sup>. Takie zmiany technologiczne przewidywał już w 1970 Alvin Toffler i opisał je w książce *Szok przyszłości*. Na podstawie procesów zachodzących w różnym tempie, w różnych gałęziach przemysłu i w różnych krajach zapowiadał koniec epoki standaryzacji. Postrzegał USA jako kraj przewodni w tych procesach. Przewidywał, że przemysł budowlany w Europie dogoni inne gałęzie przemysłu, kiedy wejdzie w fazę zaawansowanej techniki wspomaganej komputerowo<sup>12</sup>. Dalej przebieg tych procesów śledził Stanley M. Davis i opisał w książce *Future Perfect*<sup>13</sup>.

W latach 90. XX w. niemal każdy segment gospodarki, a produkcja przemysłowa w szczególności, został dotknięty przez umasowienie modyfikacji mającej na względzie zamówienia klientów. Na przykład *Levi* w niektórych sklepach firmowych oferował modyfikację dżinsów, biorąc miarę klienta za pomocą skanera. *Nike* i *Puma* zaś pozwalają swoim klientom tworzyć kompozycje kolorystyczne obuwia oraz dobierać ich kształt. Natomiast *Motorola Paging Products Group* pozwala kupującym projektować *pagery* przez wybór żądanej częstotliwości, tonu, koloru, oprogramowania, *clipów* i innych komponentów (możliwie 29 tys. kombinacji), a sprzedaje w tej samej cenie jak poprzednio, gdy towar podawano z półki. W Japonii *Panasonic* sprzedaje rowery dostosowane do rozmiaru i budowy klienta, w żądanym kolorze (11 tys. możliwych opcji i kombinacji), wytwarzane w masowej produkcji na miarę.

Architektura i przemysł budowlany są predestynowane, aby przyjąć ten nowy wzorzec. Czołowi wykonawcy realizują coraz więcej obiektów o złożonej geometrii. Dzięki temu środowisko zurbanizowane staje się mniej jednorodne, inne niż to, jakie uczyniła standaryzacja i zunifikowane systemy budowlane. Zróżnicowanie form zabudowy można osiągać przez różnorodność elementów i systemów budowlanych. Technologie i metody modyfikacji rozwinięte w przemyśle konsumenckim są stopniowo adaptowane przez przemysł budowlany. Spowoduje to wzrost popytu na domy jednorodzinne projektowane dla indywidualnego klienta, po cenach konkurencyjnych, wedle jego gustów i potrzeb.

W budownictwie są komponenty, które można modyfikować w odpowiedzi na lokalnie różnice w strukturze i otoczeniu budynku. Dzięki cyfrowym procesom produkcji można wprowadzać inną logikę seryjności, która opiera się na lokalnych wariacjach i zróżnicowaniach w seriach. Peter Zellner zwraca uwagę, że można produkować stosunkowo tanio przedmioty spójne matematycznie, lecz różne i wytwarzane seryjnie. Zauważa, że „architektura staje się taka jak sprzęt danego wytwórcy, jest cyfrowym budowaniem w przestrzeni oprogramowania (*software*), zapisem na twardym dysku sprzętu (*hardware*) do jej wyprodukowania”<sup>14</sup>.

Greg Lynn w projekcie *Embryologic Houses* (2000) wprowadza kilka możliwych modyfikacji na zamówienie. Osiąga je przez zmiany parametryczne w nieliniowych procesach dynamicznych generujących formę. Bernard Cache może powiedzieć, że jego panele dekoracyjne i meble już nie są projektowane, tylko obliczane<sup>15</sup>. Jego *Objectiles* to niestandardowe przedmioty, które są obliczane w procedurze programu modelującego i są produkowane przemysłowo przez maszyny CNC. Modyfikacje uzyskuje przez przypadkową zmianę parametrów odpowiedzialnych za wytwarzanie kształtów w tych samych seriach.

---

<sup>11</sup> Por. Joseph B. Pine, *Mass Customization: The New Frontier in Business Competition*, Harvard Business School Press, Boston, 1993, 16.

<sup>12</sup> Por. Alvin Toffler, *Szok przyszłości*, Poznań, 1974, 257.

<sup>13</sup> Patrz: Stanley M. Davis, *Future Perfect*, Basic Books; Updated edition, 1997.

<sup>14</sup> Por. Peter Zellner, *Hybrid Space. New Forms in Digital Architecture*, Rizzoli, New York, 1999, 13.

<sup>15</sup> Patrz: Bernard Cache, *Earth Move. The Furnishing of Territories*, Cambridge, IMT Press, 1995.



Implikacje masowej produkcji niepowtarzalnych komponentów w architekturze i przemyśle budowlanym są rozległe i dotyczą już nie tylko zmiany urządzeń wytwórczych, co szybko następuje, lecz reorganizacji przedsiębiorstw i ich zarządzania. Unikatowość, jak zauważa Catherine Slessor, jest teraz tak ekonomiczna i łatwa do osiągnięcia jak powtarzalność. Stawia wyzwania modernistycznemu pojmowaniu masowej produkcji i standaryzacji. Ukazuje nowy postindustrialny wzorzec oparty na twórczych możliwościach elektroniki, który ma większy potencjał niż oparty na mechanice<sup>16</sup>. W modernistycznej estetyce dom mieszkalny był rozpatrywany jako przedmiot produkcji (np. „maszyna do mieszkania”). Masowa produkcja domów, choć mogła dostarczać najlepsze projekty na szeroki rynek, to nie zaspokajały one elit. Produkcja przemysłowa nie musi już dłużej oznaczać masowej produkcji standardowych powtarzalnych wyrobów. Cyfrowe technologie i metody masowej modyfikacji i wytwarzania na zamówienie dają przyzwolenie architekturze na indywidualizm przez kreację nowych niepowtarzalnych form.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Asymptote, *Harlemmermer Pawilion*, Bis Publisher, Amsterdam, 2003.
- [2] C. Balmond, A. Siza, Eduardo Souto De Moura: *Serpentine Gallery Pavilion 2005*, Trolley, 2006.
- [3] B. Cache, *Earth Move. The Furnishing of Territories*, Cambridge, IMT Press, 1995.
- [4] Stanley M. Davis, *Future Perfect*, Basic Books; Updated edition, 1997.
- [5] K. Januszkiewicz, *Frank O. Gehry, Experience Music Project EMP. Projekcja przeżywania Muzyki w Seattle*, Archivolta, 1/2001, 8–19.
- [6] K. Januszkiewicz, *Rozbudowa Niemieckiego Muzeum Historycznego w Berlinie*, Archivolta, 1/2004, 8–17.
- [7] A. LeCuyer, *Building Bilbao*, Architectural Review, December 1997, 43–45.
- [8] W. J. Michell, M. MacCullough, *Prototyping*, w: *Digital Design Media*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1995.
- [9] W. J. Michell, *Roll Over Euclid: How Frank Gehry Designs and Builds*, w: Fiona Ragheb (red.), *Frank Gehry, Architect*, Guggenheim Museum publications, New York, 2001.
- [10] J. B. Pine, *Mass Customization: The New Frontier in Business Competition*, Harvard Business School Press, Boston, 1993.
- [11] A. Toffler, *Szok przyszłości*, Poznań, 1974.
- [12] P. Zellner, *Hybrid Space. New Forms in Digital Architecture*, Rizzoli, New York, 1999.

---

<sup>16</sup> Por. Catherine Slessor, ‘*Digitalizing Dusseldorf*’ in *Architecture*, September 2000, 118–125.