



## **PRZYDATNOŚĆ KONSUMENCKICH DRUKAREK 3D W TECHNOLOGII FDM DO TWORZENIA MODELI ARCHITEKTONICZNYCH<sup>1</sup>**

### **SUITABILITY OF CONSUMER 3D FDM PRINTERS AS A TOOL TO CREATE ARCHITECTURAL MODELS**

**Jacek Konopacki**  
mgr inż.

Politechnika Krakowska  
Wydział Architektury  
Pracownia Podstaw Kulturowych Architektury Krajobrazu

#### **STRESZCZENIE**

Nie można przecenić wielkich korzyści jakie daje modelowanie w pracy projektowej architekta. Jest to równocześnie niezwykle skuteczna forma prezentowania projektów nieprofesjonalistom. Trudnością ograniczającą zastosowanie modeli była dotychczas pracochłonność i koszt wykonania. Szybki postęp technik cyfrowych może stać się przełomem również w tej dziedzinie – przyczynić się do popularyzacji tego sposobu obrazowania projektów. Profesjonalne drukarki przestrzenne, potencjalnie nadające się do zastosowania w architekturze są jednak nadal bardzo kosztowne. Istnieje jednak możliwość zastosowania do tego celu znacznie popularniejszych i tańszych drukarek nieprofesjonalnych - konsumenckich. Artykuł opisuje specyfikę technologii FDM, wykorzystywaną w konsumenckich drukarkach 3D. Przedstawia schemat działań poprzedzający wydruk modelu przestrzennego. Prezentuje wnioski płynące z doświadczeń przeprowadzonych przez autora; typowe problemy i ograniczenia sprzętowe oraz technologiczne, szczególnie istotne przy korzystaniu z drukarki przestrzennej jako narzędzia architekta.

Słowa kluczowe: druk 3D, CNC, FDM, procedury druku, trójwymiarowe drukarki.

#### **ABSTRACT**

The paper describes the specificity of FDM technology, used in consumer 3D printers. Presents diagram of the 3D printing process, explaining the steps to be undertaken to obtain a 3D printout of model. Presents conclusions of experiments conducted by author of paper. Points out common problems and limitations of hardware and technology, which are particularly important when 3D printer is considered as a tool of an Architect.

Keywords: 3d print, CNC, FDM, 3d print guide, 3d printers comparison.

<sup>1</sup>Badania finansowane przez Narodowe Centrum Nauki, w ramach indywidualnego projektu badawczo naukowego NCN 2011/01/N/HS2/02295 pt: Zastosowanie cyfrowych modeli przestrzennych w ochronie i kształtowaniu Krajobrazu

Tempo zmian w zakresie metod projektowania architektonicznego, a także obrazowania i prezentowania projektów związane z rozwojem technik cyfrowych jest ogromne. Rysunek komputerowy praktycznie wyparł już dawne ręczne metody sporządzenia dokumentacji projektowej. Różnego typu wizualizację statyczne i filmowe pozwalają bardzo skutecznie sprawdzać efekty projektowania w ujęciach trójwymiarowych co wybitnie ułatwia komunikację profesjonalistów z nieprofesjonalistami. Kolejny etap to popularyzacja modeli przestrzennych wykonywanych przy pomocy drukarek 3D. Ewolucja cyfrowych narzędzi to wielkie usprawnienie pracy architekta, a także ma wpływ na stylistykę współczesnej architektury.

Artykuły na portalach branżowych i w czasopismach architektonicznych coraz częściej opisują biura wielkich architektów naszych czasów, zwracając uwagę na wykorzystywane przez nich urządzenia drukujące w trzech wymiarach. Jesteśmy na przykład informowani iż pracownia Foster+Partners posiada dział Specialist Modelling Group. Dział ten zajmuje się przygotowaniem makiet, które drukowane są w liczbie kilkunastu sztuk tygodniowo na wydajnych urządzeniach Zcorp<sup>2</sup>. Piet Meijs<sup>3</sup>, senior 3D Expert, w biurze Rietveld Architects, szeroko omawia benefity płynące z korzystania technologii druku 3D promując przy tym produkty firmy Objet. Z kolei Oxman drukuje struktury, które mogą stać się argumentem za zrewidowaniem zasad zrównoważonego budownictwa<sup>4</sup>. Podczas konkursów coraz częściej pojawiają się wydrukowane modele. Studenci wydziałów architektury renomowanych uczelni, od kilku lat podczas zajęć wykorzystują rozwiązania technologiczne oferowane przez czołowych producentów profesjonalnych drukarek 3D. Muzea eksponują wierne rekonstrukcje architektoniczne wydrukowane w trzech wymiarach. Rewolucja technologiczna w metodach projektowania architektonicznego i prezentowania projektów staje się faktem, a drukarka przestrzenna nabiera coraz większego znaczenia jako narzędzie architekta. Obecnie profesjonalne urządzenia tego rodzaju, mające potencjalne zastosowanie w pracy architekta, są niezmiernie kosztowne, zarówno przy zakupie jak i w eksploatacji, przez co jedynie nieliczni są w stanie z nich korzystać.

Alternatywą dla rozwiązań profesjonalnych wydaje się być przeżywający rozkwit rynek niedrogich drukarek konsumenckich. Można przypuszczać, iż nastał czas kiedy to każda z pracowni będzie mogła pozwolić sobie na zakup stosunkowo taniej i wydajnej, nieprofesjonalnej drukarki 3D. Przystępna cena zachęca potencjalnych nabywców, foldery i witryny internetowe producentów wabią możliwościami urządzeń i jakością wydruku niezmiernie skomplikowanych struktur. Zdjęcia wydruków zdają się przedstawiać modele niewiele odbiegające jakością od tych pochodzących z kilkudziesięciokrotnie droższych maszyn profesjonalnych.

Czy tak jest faktycznie, czy nie jest to po prostu marketingowa manipulacja? Czy tanie urządzenia oparte w przewadze o otwarte oprogramowanie i wolne od patentów rozwiązania techniczne, są w stanie zastąpić profesjonalne drukarki 3D? Czy, niezależnie od klasy urządzenia, uzyskanie wydruku przestrzennego jest czymś nieskomplikowanym, jak przedstawiają to producenci? Artykuł opisuje schemat przygotowania do druku 3D wirtualnego modelu przestrzennego. Przedstawia wyniki własnych doświadczeń<sup>5</sup> nad drukiem 3D w technologii FDM na urządzeniu Ultimaker, które jest powszechnie uznanym za najbardziej korzystne w zakupie i eksploatacji w przedziale cenowym do 10 tys euro netto.

Modelowanie makiet, najczęściej wspomagane obecnie przez wycinarki laserowe 2D, wydają się być metodą nieco przestarzałą w czasach kiedy swoją pozycję umacniają konkurencyjne, znacznie wydajniejsze technologie pozwalające efektywnie wizualizować

<sup>2</sup> Rałowicz R. DRUKARKI 3D Zaczarowany ołówek dla architektów, "świat architektury" 1 (08) / 2011, s.95-96, ISSN: 2081-6413 W.A. sp. z o.o., Lab MeCo Media Communications GmbH Wiedeń, Austria 2011r.

<sup>3</sup> 3D Printer a Game Changer for Architecture Design | Rietveld&Objet, źródło - dostęp 22.12.2012r. <<http://youtu.be/cOaqRkLP4II>>

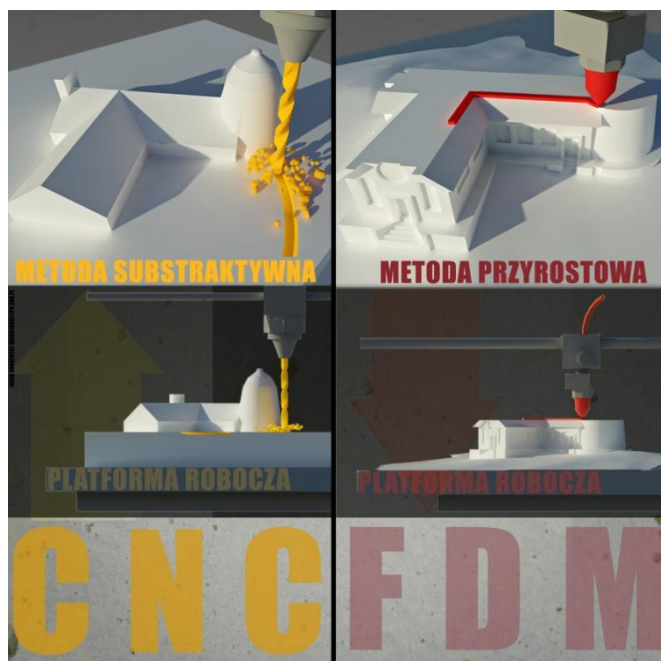
<sup>4</sup> Quirk, Vanessa. "How 3D Printing Will Change Our World (Part II)" 19 Jul 2012. [ArchDaily](http://www.archdaily.com/255156). dostęp 11.12.2012r. <<http://www.archdaily.com/255156>>

<sup>5</sup> Autor artykułu posiada drukarkę 3D Ultimaker.

koncepcje projektowe. Wbrew pozorom, drukowanie w trzech wymiarach nie jest technologią XXI wieku. Początków obrabiarek CNC drążących modele w bloku materiału przy pomocy frezów należy upatrywać w latach 60<sup>6</sup> tych, kiedy to pierwsze tego typu rozwiązania zastosowano w przemyśle lotniczym. Jednakże dopiero w ostatnim dziesięcioleciu jesteśmy świadkami ich popularyzacji. Przyczyn tego szybkiego postępu należy upatrywać w pojawieniu się na rynku przystępnego cenowo sprzętu opartego o nie chronione patentami rozwiązania techniczne<sup>7</sup>. Substraktywna metoda zautomatyzowanego modelowania, realizowana przez stosunkowo popularne 3 osiowe obrabiarki CNC nie jest jednak w pełni odpowiednia dla architektów. Sprawdza się jedynie przy mało skomplikowanych modelach ukształtowania terenu.

Ryc. 1. Porównanie technologii substraktywnej CNC i adytywnej FDM. Sposób powstawania modelu przestrzennego, dostrzegalne różnice w detalu wynikające z użytej technologii. Źródło: il. J. Konopacki

Fig. 1. Comparison of technologies: subtractive CNC and additive FDM. Process of formation of 3D model, visible differences in the detail resulting from technology being used. Source: Fig. J. Konopacki



Swego rodzaju przeciwieństwem do substraktywnej technologii tworzenia modeli jest bardziej zaawansowana i odpowiednia do zastosowań architektonicznych metoda druku przyrostowego. Jej początkiem była opatentowana w 1986 r. technologia fii<sup>8</sup>. Polega ona na tworzeniu modelu poprzez naświetlanie płynnego fotopolimeru. Światło zmienia strukturę materiału tak, że staje się on tworzywem twardym. Warstwa po warstwie platforma robocza wynurza niejako z cieczy obiekt. Technologia na przestrzeni lat doczekała się wielu modyfikacji, powstało kilka innych konkurencyjnych kosztowo i jako-

<sup>6</sup>Pionierskie urządzenie w technologii substraktywnej zostało skonstruowane w Laboratoriach MIT w 1952, pierwszą komercyjną maszynę tego typu wyprodukował Servomechanisms Lab w 1953 rok. Na bazie rozwiązań MIT powstawały m.in. pierwsze pisakowe plotery graficzne, obecne wycinarki laserowe czy plazmowe.

<sup>7</sup>Instytucja promująca i tworząca rozwiązania technologiczne dystrybuowane na licencji GNU National Institute of Standards and Technology, projekty otwartych urządzeń CNC są wspierane programistycznie przez społeczność <<http://www.linuxcnc.org/>>

<sup>8</sup>Ojcem stereolitografii jest Chuck Hull, współzałożyciel firmy 3D systems, jest on autorem patentu; U.S. Patent 4,575,330, "Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography" wydany 11 marca, 1986r.

źródło - dostęp 11.12.2012. <<http://patent.ipexl.com/US/4575330.html>>

ściowo metod w tym interesująca metoda Phantom Geometry<sup>9</sup> pozwalająca na modyfikacje obiektu w fazie druku. Pierwotne SLA (stereolitografia) ze względu na obstrzenia patentowe jest niezmiernie kosztowną technologią, równocześnie oferuje niezrównaną jakość i prędkość wydruków przestrzennych. Niemniej koszt zakupu urządzenia rzędu 50-250tys.euro oraz materiały eksploatacyjne w cenie około 400euro za litr są zaporowe szczególnie dla pracowni architektonicznych. Podobnie kształtują się ceny pochodnych technologii addytywnych proponowanych przez producentów profesjonalnych drukarek 3D. Najdroższymi spośród nich są drukarki pełno kolorowe - działające na zasadzie spoinowania specjalnego proszku rodzajem kolorowego lepiscza (podobnie do głowicy drukarek atramentowych). Nieco tańsze są monochromatyczne urządzenia proszkowe. Szerzej o wykorzystaniu profesjonalnych drukarek 3D na cele architektoniczne pisze m.in. Steinhilp i Kias<sup>10</sup>, wskazując na podstawie szeregu doświadczeń ich wady i zalety.

Czy jednak na obecnym etapie rozwoju niedrogie urządzenia konsumenckie<sup>11</sup> wykorzystujące tanią technologię FDM są w stanie zrewolucjonizować rynek makiet architektonicznych i wprowadzić nową jakość w dziedzinie komunikowania się architektów z inwestorami i użytkownikami?

## DRUKOWANIE W TRZECIM WYMIARZE

Poniżej przedstawiono, kroki dotyczące przygotowania wirtualnego modelu do wydruku na drukarce przestrzennej. Procedura ta ma charakter uniwersalny - odnosi się zarówno do druku na urządzeniach tanich jak i tych najdroższych. Niewielkie różnice dostrzegalne są jedynie w kwestii przygotowywania struktur pomocniczych, które częściowo zależne są od danej technologii. Niektórzy producenci oferują urządzenia wykonujące suporty (inaczej struktury pomocnicze) z materiałów rozpuszczalnych specyficznych roztworach chemicznych co znacznie skraca fazę obróbki końcowej wydruku i wpływa pozytywnie na jego jakość. Jednakże tylko jedna drukarka, Mojo 3D korzystająca z tego udogodnienia znalazła się w badanej grupie 10 urządzeń nieprofesjonalnych.

### Przygotowanie do druku

Jak dowodzą doświadczenia, wirtualny model zbudowany w programie typu CAD nie nadaje się bezpośrednio do druku. Jedną z przyczyn jest sam format zapisu pliku, niemniej nie stanowi on tak dużego problemu jak sam sposób modelowania. Plik stosunkowo łatwo można wyeksportować np. z AutoCAD lub 3ds Max zapisując go jako STL zdalny do druku 3d. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, iż bryła podczas eksportu może ulec uszkodzeniom, które wymagają późniejszej naprawy.

Podstawowym problemem jest jednak bryła sama w sobie, przygotowana przez projektanta najczęściej z myślą o wizualizacji komputerowej i budowana typowo do tego celu. Bezpośrednie zaadaptowanie jej na potrzeby druku 3D najczęściej jest niemożliwe. Podstawowymi wadami modeli tego typu są ich niedokładności, w tym szczególnie nieszczelności oraz nakładające się na siebie bryły, które nie stanowią całości - jednego obiektu. Tak zbudowany model wirtualny jest interpretowany przez oprogramowanie przygotowujące do druku jako niezdatny do wydrukowania, lub przygotowany w taki sposób, iż w miejscach przenikania się brył powstają pustki. Podobnie ma się sytuacja w przypadku płaszczyzn tworzących obiekt, które w modelu wykonanym w celu wizualizacji kompute-

<sup>9</sup>Rosenfield K. "SCI-Arc's Gehry Prize awarded to 'Phantom Geometry'" 22 Oct 2012r. [ArchDaily](http://www.archdaily.com/284752). dostęp 11.12.2012. <<http://www.archdaily.com/284752>>

<sup>10</sup>Steinhilp W. M., Kias U. Comparison of 3-D Printing Techniques Usable in Digital Landscape Architecture w Peer Reviewed Proceedings of Digital Landscape Architecture 2010 at Anhalt University of Applied Sciences, Berlin, Herbert Wichmann Verlag 2010

<sup>11</sup> Na końcu artykułu przedstawiono w formie grafiki alternatywę rozwiązań profesjonalnych, w postaci zestawienia popularnych konsumenckich drukarek przyrostowych w cenie do 10 tyś. euro netto. (zestawienie przygotowano w grudniu 2012r.)

rowej nie muszą być odpowiednio orientowane. W wypadku wydruku płaszczyzny o negatywnej orientacji w większości programów zostaną zinterpretowane jako pustki i obiekt wydrukuje się z dziurami. Podczas doświadczeń, testując powierzone modele architektoniczne i krajobrazowe, autor spotykał się z sytuacją kiedy np. na 300 tys. Płaszczyzn składających się na model, ponad połowa miała negatywną orientację. Często okazywało się również, iż losowe obracanie płaszczyzn następowało podczas importu pliku stworzonego np. w ArchiCAD do 3ds Max oraz kolejno podczas eksportu pliku do formatu STL. Naprawienie takiego modelu poprzez manualne wskazywanie pojedynczych płaszczyzn, które program ma obrócić, jest wręcz niewykonalne. Przede wszystkim jest nieporównywalnie bardziej pracochłonne niż zbudowanie od nowa wirtualnego modelu z myślą o jego druku w 3D. Producenci oprogramowania drukarek 3D proponują rozwiązania mające na celu zautomatyzowanie procesu naprawy i sprawdzania modeli pod kątem druku. Uznawane za jedne z najlepszych w branży oferowane są przez Netfabb, także jako bezpłatna usługa przetwarzania w chmurze (wersja pozbawiona pełnej funkcjonalności w odniesieniu do jej komercyjnego odpowiednika). Algorytmy te niestety sprawdzają się najlepiej przy mało skomplikowanych strukturach, do których obiekty architektoniczne z reguły nie należą.

#### **Dzielenie modelu.**

Powierzchnia robocza drukarki 3D, zwykle nie przekracza rozmiaru arkusza A3, co również dotyczy najdroższych urządzeń profesjonalnych. Ograniczenia te wynikają z technologii i dokładności spasowania komponentów. Przypadłość ta obliuguje do podzielenia modelu na części celem jego wydruku. Bardziej zaawansowane programy urządzeń profesjonalnych pozwalają na intuicyjny podział modelu z wyznaczeniem pewnego marginesu - części wspólnej, która zostanie wydrukowana na każdym z fragmentów składających się na całość. Funkcja ta ułatwia znacznie w obróbkę podczas łączenia wydrukowanych części w całość. Jak dowodzą doświadczenia autora, proces dzielenia modelu wymaga sporych mocy obliczeniowych i jest czasochłonny. Niejednokrotnie trwa do kilku godzin, a w przypadku skomplikowanych modeli stworzonych z myślą o innym zastosowaniu niż druk 3D często staje się niewykonalny. W takiej sytuacji podejmowano próby dzielenia modelu w programie 3ds Max po wcześniejszym scaleniu go w jedną bryłę. Proces ten w przypadku wysoce skomplikowanych modeli nie zawsze kończył się sukcesem.

#### **Struktury pomocnicze.**

Specyfika druku adytywnego wymaga stosowania struktur pomocniczych w tych modelach, które posiadają elementy jednostronne nadwieszane, typu balkony, okapy itp. Podpory, czyli suporty konieczne są również w przypadku poziomych elementów płaskich, takich jak stropy, czy nadproża, w przypadku Ultimakera o rozpiętości większej niż 7mm. Producenci programów przeznaczonych do przygotowywania wydruków proponują różnego typu algorytmy automatyzujące budowę suportów. W wyniku szeregu wykonanych doświadczeń stwierdzono, iż bardziej efektywną metodą jest manualne skonstruowanie suportów w fazie modelowania obiektu. Wykonanie tego typu struktur należy jednak poprzedzić zdobyciem pełnej wiedzy, na temat zasad pracy drukarki, oraz zachowań materiału podczas wydruku. Struktury pomocnicze generowane automatycznie, wielokrotnie są zbyt masywne i w wielu miejscach nie koniecznie potrzebne. Proces budowy fizycznego modelu 3D w technologii FDM jest zależny czasowo od skomplikowania bryły i ilości użytego materiału. Umiejętne rozmieszczenie suportów pozwala na znaczną redukcję zużycia materiału oraz przyspieszenie druku. Nie bez znaczenia dla obróbki końcowej wydruku jest również sposób styku suportów z modelem oraz ich ilość.

#### **Ustawianie parametrów wydruku:**

Krok ten jest najbardziej wymagającym od operatora drukarki. Ilość kombinacji ustawień programowych jest duża. Należy je za każdym razem stosownie dopasować do konkretnego modelu, biorąc pod uwagę jego formę, układ na platformie oraz parametry granicz-

ne urządzenia. Uzyskanie zadowalających efektów końcowych wymaga dużej wprawy i doświadczenia, istotnym jest również umiejętne dostosowanie parametrów pracy urządzenia do wykorzystywanego materiału, z którego będzie budowany model. Materiał może się inaczej zachowywać nawet gdy pochodzi od tego samego producenta, niezależnie od tego każdy kolor tworzywa zachowuje się nieco inaczej dając inne efekty końcowe. Przygotowując model do wirtualnego pocięcia na przekroje poziome interpretowane przez drukarkę jako kolejne warstwy nakładania materiału, należy ustalić liczne parametry druku. Podstawowe ustawienia obejmują zdefiniowanie parametrów dot.: grubości ścianek, sposobu formowania wypełnień, procentowego ustawienia nakładania się wypełnienia na ścianki, metody budowania płaszczyzn poziomych, temperatury głowicy drukującej, długości i czasu reakcji materiału w podajniku, prędkości wydruku, która jest zależna od struktury modelu i jego skomplikowania oraz wielkości detalu. Ustawienia te mają podstawowy wpływ na jakość uzyskanego wydruku. Jak dowodzą doświadczenia autora, wypracowany zestaw ustawień dających zadowalające wydruki, w przeważającej większości przypadków sprawdził się wyłącznie na wydruku modelu na, którym został opracowany.

### **Końcowa obróbka wydruku**

Nie wielu spośród producentów wspomina o konieczności dokonania końcowej manualnej obróbki wydruków celem doprowadzenia ich do zadowalającej jakości. Każda z technologii, nie wyłączając najprecyzyjniejszej stereolitografii, wymaga stosownego wykończenia wydruku. Począwszy od różnych mniej lub bardziej czasochłonnych metod usuwania struktur pomocniczych przez wygładzanie mechaniczne bądź chemiczne, czy na końcu utralanie w odpowiednich roztworach. W przypadku druku FDM, proces ten sprowadza się do mechanicznego usuwania struktur pomocniczych, oraz odcinania i opiłowywania niedoskonałości w postaci nadmiaru materiału, który najczęściej odkłada się na elementach, pomiędzy którymi zaprojektowano pustkę. Konieczne do usunięcia dodatki tworzą swego rodzaju pajęczynę, która niejednokrotnie jest trudna do usunięcia. Szczególnie dotyczy to mało dostępnych przestrzeni, co zmusza do żmudnej obróbki miniaturowymi narzędziami.

### **TYPOWE PROBLEMY ZWIĄZANE Z DRUKIEM W TECHNOLOGII FDM**

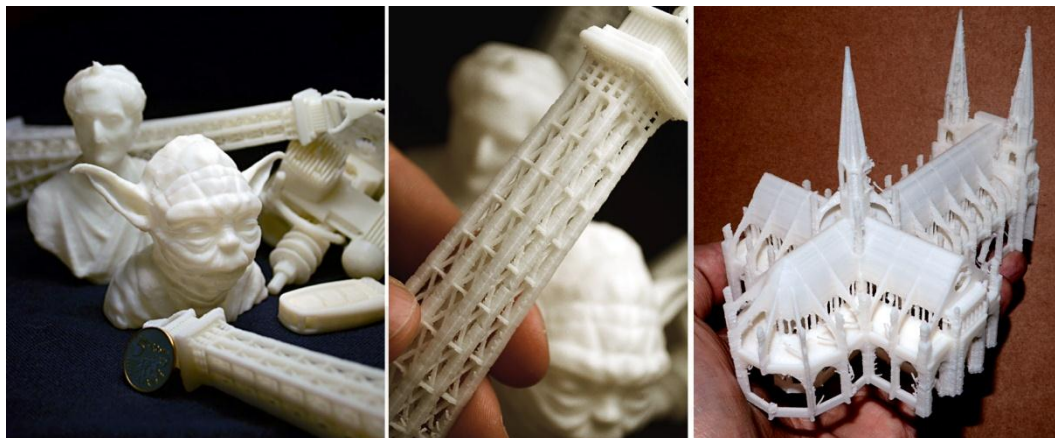
#### – „Mosty”

Problem pojawia się podczas drukowania elementów przewieszonych. Ze względu na specyfikę technologii - druk uplastycznionym termicznie materiałem, budowanie struktur typu most jest bardzo utrudnione. Wymaga doświadczenia i odpowiednio dobranego strumienia powietrza schładzającego materiał tuż po wydostaniu się z głowicy drukującej. Najdłuższe możliwe przewieszenia - prostolinijne w wypadku Ultimakera wynoszą zaledwie 2 do 3 cm. Tak więc w przypadku dłuższych przewieszzeń należy zaprojektować odpowiednie struktury pomocnicze, które zostaną usunięte podczas końcowej obróbki wydruku. Alternatywnie, jeżeli to możliwe, należy spróbować tak podzielić model i rozmieścić na platformie by, to co jest poziome ustawić pionowo.

#### – Detal

Podawana przez producentów dokładność/rozdzielczość jest zwykle czysto teoretyczna i wynika z wyliczeń dokładności mechanizmu sterującego ruchem głowicy i platformy roboczej. Jak wykazały doświadczenia autora wielkość najmniejszego detalu, który zostanie wydrukowany zależy od wielu czynników. Niewielkie elementy o małej wysokości - do 0,3 mm występujące na ścianach drukowane są zwykle dokładnie. Natomiast precyzja budowania struktur pionowych, oraz poziomych nadwieszonych typu kratownica przestrzenna jest odmienna. Najmniejszy uzyskany doświadczalnie przekrój w wypadku Ultimakera wyniósł 0,8mm. Próby poczynione przez autora badań dowodzą iż, odwzorowanie detalu i efekt końcowy wydruku zależy w głównej mierze od samego modelu jak i

sposobu przygotowania go w programie tnącym. Kluczowym jest dobór parametrów roboczych urządzenia, oraz ścieżka, po której porusza się głowica drukująca.



Ryc. 2. Przykładowe wydruki uzyskane na drukarce Ultimaker w ramach doświadczeń autora artykułu. Zależność; skali, skomplikowania modelu i sposobu poruszania się głowicy drukującej i ich wpływ na jakość wydruku. Źródło: il. J. Konopacki

Fig. 2. Example printouts of Ultimaker, obtained by experiments conducted by author of the article. The relationship, scale, complexity of the model, path of print head and their impact on printout quality. Source: il. J. Konopacki

#### – Powtarzalność

Istotnym problemem drukarek FDM typu Ultimaker jest powtarzalność, która dotyczy reprodukcji kolejnych egzemplarzy tego samego obiektu. Uzyskane w toku doświadczeń wydruki wielokrotnie nie były identyczne pomimo, iż urządzenie pracowało na tych samych ustawieniach i materiale. Problem powtarzalności świadczy o niedoskonałości głowic drukujących oraz metod podawania materiału.

#### – Podwijanie

Specyfika tworzywa, z którego powstają makiety, prowadzi do zniekształceń modelu (próby przeprowadzane na tworzywie PLA). Pierwszym z czynników jest niewielkie zmieszanie się objętości materiału związane z procesem ostygania. Powoduje to podwijanie się narożników obiektów, które w fazie początkowej druku przylegały do płaszczyzny platformy roboczej. Im większa płaszczyzna tym mocniejsze podwijanie. Podczas druku z tworzywa ABS zjawisko to jest jeszcze bardziej uciążliwe. Kolejnym problemem wynikającym ze specyfiki materiału PLA jest jego higroskopijność. Nieodpowiednio przechowywany materiał roboczy, podczas podgrzewania w głowicy drukującej ma tendencję do formowania w swej strukturze pęcherzyków powietrza, które negatywnie wpływają na jakość wydruku.

#### – Uszkodzenia delikatnych struktur poprzez głowicę drukującą

Częstym przypadkiem są uszkodzenia modelu powstałe w fazie drukowania, w wyniku zahaczenia przez głowicę drukującą o delikatne struktury pionowe. Przyczyna takich defektów tkwi w braku dostatecznej precyzji nanoszenia materiału w stosunku do dokładności w jakiej porusza się platforma robocza.

#### – Druk w jednym kolorze.

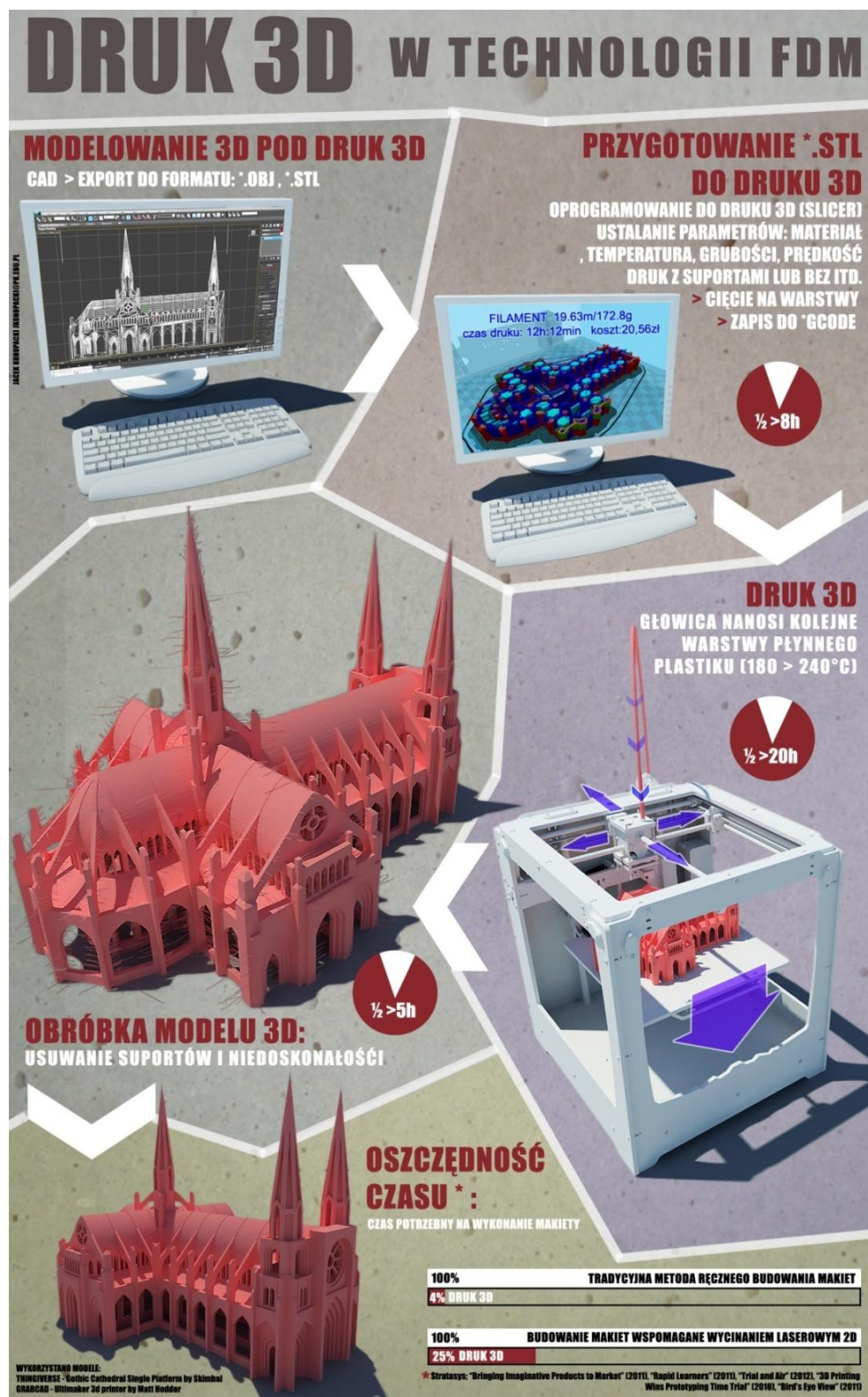
Na obecnym etapie rozwoju technologii FDM (listopad 2012r.) nie zostały wprowadzone na rynek systemy umożliwiające bezproblemowy druk w kilku kolorach materiału równocześnie.

POWIERZCHNIA ROBOCZA X Y Z w mm	MODEL PRODUCENT	DOKŁADNOŚĆ ROZDIELCZOŚĆ DRUKU	K O S Z T WYDRUKU 1cm3	T JAKOŚĆ WYDRUKÓW	CENA SPRZĘTU
	<b>MENDEL</b> OPEN SOURCE	średnica dyszy: 0.5 mm najmniejszy detal: 2 mm dokładność w osi XY: 0.1 mm wysokość warstwy Z: 0.3 mm TECHNOLOGIA: FDM MATERIAŁ WYDRUKÓW: ABS, PLA Szybkość druku: do 15cm <sup>3</sup> /h	ABS 0,62 zł PLA 1,04 zł	B. DOBRA DOBRA DOSTATECZNA MIERNA	400 eur
	<b>Solidoodle 3D Printer</b> Solidoodle www.solidoodle.com	średnica dyszy: 0.35 mm najmniejszy detal: 2 mm dokładność w osi XY: 0.11 mm wysokość warstwy w osi Z: 0.1-0.3mm TECHNOLOGIA: FDM MATERIAŁ WYDRUKÓW: ABS, PLA Szybkość druku: niska, h.d. producenta	ABS 0,62 zł PLA 1,04 zł	B. DOBRA DOBRA DOSTATECZNA MIERNA	610 eur
	<b>CUBE</b> 3dsystems www.3dsystems.com	średnica dyszy: h.d. najmniejszy detal: h.d. dokładność w osi XY: h.d. wysokość warstwy w osi Z: 0.25 mm TECHNOLOGIA: FDM MATERIAŁ WYDRUKÓW: ABS, TYLKO KASETA PRODUCENTA DROKARKI Szybkość druku: niska, h.d. producenta	ABS 4,70 zł	B. DOBRA DOBRA DOSTATECZNA MIERNA	990 eur
	<b>UP! Plus</b> PP3DP www.pp3dp.com	średnica dyszy: h.d. najmniejszy detal: h.d. dokładność w osi XY: h.d. wysokość warstwy w osi Z: 0.15-0.4mm TECHNOLOGIA: FDM MATERIAŁ WYDRUKÓW: ABS, PLA Szybkość druku: niska, h.d. producenta	ABS 0,62 zł PLA 1,04 zł	B. DOBRA DOBRA DOSTATECZNA MIERNA	1150 eur
	<b>Replicator™ 2</b> MakerBot Industries www.markerbot.com	średnica dyszy: 0.4 mm najmniejszy detal: h.d. dokładność w osi XY: 0.11 mm wysokość warstwy w osi Z: 0.1-0.3mm TECHNOLOGIA: FDM MATERIAŁ WYDRUKÓW: PLA Szybkość druku: h.d. producenta	PLA 1,04 zł	B. DOBRA DOBRA DOSTATECZNA MIERNA	1680 eur
	<b>Ultimaker</b> Ultimaking Ltd. www.ultimaker.com	średnica dyszy: 0.4 mm najmniejszy detal: 0.5 mm dokładność w osi XY: 0.075 mm wysokość warstwy w osi Z: 0.05-0.3mm TECHNOLOGIA: FDM MATERIAŁ WYDRUKÓW: ABS matliwe, PLA Szybkość druku: do 60cm <sup>3</sup> /h	ABS 0,62 zł PLA 1,04 zł	B. DOBRA DOBRA DOSTATECZNA MIERNA	1699 eur
	<b>The Form 1</b> Formlabs www.formlabs.com	średnica dyszy: h.d. najmniejszy detal: 0.3 mm dokładność w osi XY: h.d. wysokość warstwy w osi Z: 0.1 TECHNOLOGIA: SLA MATERIAŁ WYDRUKÓW: FOTOPOLIMER PRODUCENTA DROKARKI Szybkość druku: 1.5 cm <sup>3</sup> /h w osi Z	FOTOPOLIMER 0.5 zł	B. DOBRA DOBRA DOSTATECZNA MIERNA	2520 eur
	<b>3DTouch™ 3D Printer (Single Head)</b> Bits from Bytes www.bitsfrombytes.com	średnica dyszy: h.d. najmniejszy detal: h.d. dokładność w osi XY: 0.1 mm wysokość warstwy w osi Z: 0.125 mm TECHNOLOGIA: FDM MATERIAŁ WYDRUKÓW: ABS, PLA Szybkość druku: do 15 mm <sup>3</sup> /sek	ABS 0,62 zł PLA 1,04 zł	B. DOBRA DOBRA DOSTATECZNA MIERNA	2590 eur
	<b>Mojo 3D</b> Stratasy www.mojo3dprinting.com	średnica dyszy: h.d. najmniejszy detal: h.d. dokładność w osi XY: h.d. wysokość warstwy w osi Z: 0.178 mm TECHNOLOGIA: FDM MATERIAŁ WYDRUKÓW: ABS, TYLKO KASETA PRODUCENTA DROKARKI MATERIAŁ WYDRUKÓW: ABS, RZOPUSZCZALNY W SPECJALNYM ROZTWORZE - TYLKO MATERIAŁ PRODUCENTA DROKARKI Szybkość druku: h.d. producenta	ABS MODEL 0,95 zł ABS SUPORT 0,95 zł	B. DOBRA DOBRA DOSTATECZNA MIERNA	7560 eur
	<b>ProJet™ 1000</b> 3dsystems www.3dsystems.com	średnica dyszy: h.d. najmniejszy detal: 0.254 mm dokładność w osi XY: 1024 x 768 DPI wysokość warstwy w osi Z: 0.1-0.15mm TECHNOLOGIA: SLA MATERIAŁ WYDRUKÓW: FOTOPOLIMER TYLKO KASETA PRODUCENTA Szybkość druku: 127 cm <sup>3</sup> /h	FOTOPOLIMER 8,4 zł	B. DOBRA DOBRA DOSTATECZNA MIERNA	8320 eur

Ryc. 3. Zestawienie popularnych konsumenckich drukarek 3D w cenie do 10 tys euro netto. Parametry użytkowe. źródło: il. J. Konopacki

Fig. 3. List of common consumer 3D printers, price up to 10,000 euro net. Source: il. J. Konopacki





Ryc. 4. Schemat procedury druku 3D. źródło: il. J. Konopacki

Fig. 4. Infographics - 3D printing Source: il. J. Konopacki

## PODSUMOWANIE

Makiety architektoniczne są jednym z najdoskonalszych środków przekazu myśli projektowej. Stosowane do tej pory w niewielu przypadkach ze względu a kosztochłonność, w erze drukarek trójwymiarowych przestają być luksusowym dodatkiem dokumentacji rysunkowej. Korzyści jakie daje technologia druku 3D są wielkie. Najważniejsze z nich to m.in.: możliwość prezentowania alternatyw różnych wersji projektowych na modelu fizycznym<sup>12</sup>, wykorzystanie precyzyjnych makiet roboczych czy wielokrotne powielenie modelu dla każdego z uczestników konsultacji czy zespołu projektowego. Należy również zwrócić uwagę na możliwość przesłania drogą elektroniczną pliku zawierającego dane druku, scenariusz taki zakłada możliwość uzyskania w ciągu kilku godzin dokładnej fizycznej kopii obiektu w dowolnym zakątku świata. Drukarki 3D w rękach architektów otwierają nowe, do tej pory będące w sferze sci-fi możliwości interakcji z klientem. Niestety jakość skomplikowanych modeli architektonicznych drukowanych w małej skali, urządzeniami konsumenckimi, w kwocie zakupu do 10 tys. euro netto nie jest wystarczająca. Proste struktury lub umiejętnie podzielone do druku bardziej skomplikowane modele dają efekty w miarę zadowalające lecz przygotowanie ich wymaga dużego doświadczenia i cierpliwości. Tym, którzy nie mają profesjonalnych urządzeń, ani dostatecznej umiejętności korzystania z drukarek konsumenckich, swoje usługi oferują profesjonalne drukarnie - prototypownie. Na razie koszt makiet przez nie wykonanych jest wysoki, ale zapewne w raz z rozwojem technologii drukowania 3D, wydruki takie staną się konkurencyjne w stosunku dla modeli wykonywanych ręcznie, zwłaszcza, że czas wykonania modelu 3D jest bez porównania krótszy. Konkludując, pozostaje nam śledzić poczynania konstruktorów maszyn i czekać - rewolucja dopiero się rozpoczęła. Prawdopodobnie w najbliższej perspektywie czasowej drukarki 3D będą zdolne spełnić oczekiwania architektów co do jakości i czasu potrzebnego na wydruk, równocześnie będąc przystępnymi w kosztach eksploatacji jak i obsługi ze strony oprogramowania.

## SUITABILITY OF CONSUMER 3D FDM PRINTERS AS A TOOL TO CREATE ARCHITECTURAL MODELS

One cannot overestimate the great benefits of modeling in the design work of an architect. This is also an extremely effective form of presenting the designs to non-professionals. The main difficulty, limiting the use of models was labour intensity and cost of performance. Rapid progress of digital technologies can also be a breakthrough in this field - which can help to popularize this method of imaging designs. Professional digital printers, designed specifically for architects are still very expensive. However, for this purpose, one can use a much more common and less expensive non-professional consumer printers. This paper describes the specificity of FDM technology, used in consumer 3D printers. It shows an outline of activities preceding the printing of spatial models. It presents conclusions learned from the experience, common problems and limitations of hardware and technology, especially important when using the 3D printer as a tool for an architect.

The pace of change in the methods of architectural design, as well as imaging and demonstration of designs related to the development of digital technology is enormous. Computer drawing has virtually supplanted the old manual methods of preparation of

---

<sup>12</sup> Przykładem takiego zastosowania może być obecnie opracowywana przy udziale lokalnej społeczności długofalowa polityka przestrzenna miejscowości Louisville (<http://www.visionlouisville.com/>), Źródło - dostęp 22.12.2012r.: <<http://www.3ders.org/articles/20121015-3d-printing-helps-louisville-to-crowd-source-city-planning-of-2040.html>>

design documentation. Various types of static and film visualizations allow to effectively check the effects of design in three-dimensional scenes, which greatly facilitates communication between professionals and non-professionals. The next step is to popularize spatial models using 3D printers. The evolution of digital tools is a great improvement in an architect's work, and has an impact on the style of contemporary architecture.

Articles on industry portals and in magazines more often describe the offices of great architects of our times, paying attention to the use of their devices printing in three dimensions. For example, we are informed that the Foster+Partners architectural office has a Specialist Modeling Group department. This section deals with the preparation of models, which are printed in ten-odd units per week on Zcorp<sup>13</sup> devices. Piet Meijjs<sup>14</sup> a senior 3D Expert in the office of Rietveld Architects, widely discusses the benefits gained from using this 3D printing technology with Objet's products. In turn Oxman prints structures that may be an argument for the revision of the principles of sustainable construction<sup>15</sup>. During competitions, an increasing number of printed models occur. Students of architecture faculties of renowned universities have used the technology solutions offered by leading manufacturers of professional 3D printers for years. Museums expose faithful architectural reconstructions printed in three dimensions. The technological revolution in the methods of architectural design and presentation of designs becomes a reality, and the spatial printer is becoming increasingly important as a tool for an architect. Currently, this kind of professional equipment, designed specifically for architects, is extremely expensive, both in purchase and in further use, therefore only a few are able to use it.

An alternative to professional solutions seems to be a market boom of inexpensive consumer printers. It can be assumed that the time has come when every architectural office will be able to afford to purchase a relatively cheap and effective, non-professional 3D printer. Affordable price encourages potential buyers, promotional flyers and websites of manufacturers attract with equipment capabilities and print quality of extremely complex structures. Printout photos seem to depict models differing little in terms of quality from those of several dozen more expensive professional machines.

Is it really that good, or is it just marketing manipulation? Are cheap devices based predominantly on open source software and free from patent technology, able to replace the professional 3D printer? Or, regardless of the equipment's class, 3D printing is so trivial, as demonstrated by manufacturers? The article describes the scheme of preparation for printing a 3D virtual spatial model. It presents the results of own experiments<sup>16</sup> in 3D printing in FDM technology using the Ultimaker printer, which is widely recognized as the most advantageous to buy and operates within the price range up to NET EUR10000.

Modeling models, most currently supported by the 2D laser cutting machines, seems to be a somewhat outdated method at a time when competitive, much more efficient technologies to effectively visualize design concepts strengthen their positions. Contrary to appearances, three-dimensional printing technology is not the 21st century. The beginnings of CNC machine tools, creating models from a block using cutters can be found in the 1960s<sup>17</sup>, when solution was first used in the aerospace industry. However, only in the last decade have we witnessed their popularity increase. The reasons for this rapid progress should be seen in the emergence of affordable equipment in the market, which

---

<sup>13</sup> Rałowicz R. DRUKARKI 3D Zaczarowany ołówek dla architektów, "świat architektury" 1 (08) / 2011, p.95-96, ISSN: 2081-6413 W.A. sp. z o.o., Lab MeCo Media Communications GmbH Vienna, Austria 2011.

<sup>14</sup> 3D Printer a Game Changer for Architecture Design | Rietveld & Objet, access date 22.12.2012. <<http://youtu.be/cOaqRkLP4II>>

<sup>15</sup> Quirk, Vanessa. "How 3D Printing Will Change Our World (Part II)" 19 Jul 2012. *ArchDaily*. Access date 11.12.2012 <<http://www.archdaily.com/255156>>

<sup>16</sup> The article author has the Ultimaker 3D printer.

<sup>17</sup> A pioneer device in the subtractive technology has been designed in the MIT Laboratories in 1952; the first commercial machine of this type was produced by Servomechanisms Lab in 1953. On the MIT-based solutions, first pen plotters, current laser and plasma cutters were created.

does not use patent-protected technologies<sup>18</sup>. Subtractive methods for automated modeling, carried out by a relatively popular 3-axis CNC machine tools is not fully suitable for architects. It works only with simple terrain models.

Almost opposite to subtractive modeling technology is the more advanced and suitable for architectural applications - incremental printing method. The beginning of this technology has to be sought in the stereolithography<sup>19</sup> which was patented in year 1986. It involves the creation of the model by exposure to liquid photopolymer. The light changes the structure of the material so that it becomes a hard plastic. Layer by layer, a working platform object emerges from a liquid. Technology over the years went through many modifications; several other cost and quality competitive methods emerged, including the interesting Phantom Geometry<sup>20</sup> method, which allows for modification of the object in the print phase. The original SLA (stereo lithography) due to patent restrictions is an extremely expensive technology, while offering unmatched quality and speed of spatial printing. However, the cost of the device consists of EUR50,000-250,000 and supplies for around EUR400 are prohibitive especially for architectural offices. Similarly, prices of derivative additive technologies offered by manufacturers of professional 3D printers. The most expensive among them are full colour printers - operated by grouting a special kind of coloured powder binder (similar to the inkjet printers). Slightly cheaper are monochrome powder devices. More on the use of professional 3D printers for the architectural purposes is published by Steinhilp and Kias<sup>21</sup>, based on a series of experiments, illustrating their advantages and disadvantages.

There are affordable consumer devices<sup>22</sup> using the FDM technology which are able to revolutionize the market for architectural models, and enter a new value in the field of communication between investors, architects and users?

## PRINTING IN THE THIRD DIMENSION

Below are the steps for preparing a virtual model to print on a spatial printer. This procedure is universal - applying to both low-cost and the most expensive printing devices. Small differences are visible only in the preparation of support structures, some of which are dependent on the given technology. Some manufacturers offer devices carrying out support of materials soluble in specific chemical solutions, which reduces the print finishing phase and has a positive effect on its quality. However, only one printer, Mojo 3D, uses this option, and is presented in the study group of 10 non-professional devices.

### Preparation of the model for printing

As research shows, the virtual model built in a CAD program is not suitable for direct printing. One of the reasons is the file format, but this is not a problem so much as the way of modeling is. Files can be easily exported from AutoCAD or *3ds Max* by saving

<sup>18</sup> The body responsible for creating the technology and distributing it under the GNU license is National Institute of Standards and Technology, the <<http://www.linuxcnc.org/>> community in terms of software solutions supports designs of open CNC projects.

<sup>19</sup> The father of stereolithography is Chuck Hull, 3D systems co-founder, the author of the patent, U.S. Patent 4,575,330, "Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereo lithography" published 11th March 1986.

Access date 11.12.2012. <<http://patent.ipexl.com/US/4575330.html>>

<sup>20</sup> Rosenfield K. "SCI-Arc's Gehry Prize awarded to 'Phantom Geometry'" 22 Oct 2012r. *ArchDaily*. Access 11.12.2012. <<http://www.archdaily.com/284752>>

<sup>21</sup> Steinhilp W. M., Kias U. Comparison of 3-D Printing Techniques Usable in Digital Landscape Architecture w Peer Reviewed Proceedings of Digital Landscape Architecture 2010 at Anhalt University of Applied Sciences, Berlin, Herbert WichmannVerlag 2010

<sup>22</sup> At the end of the article, alternative professional solutions in the form of a comparison table of popular incremental consumer printers incremental costing up to NET EURO10,000 were presented (table prepared in December 2012.)

them in a STL format. It should be noted that the export block might be damaged, requiring later repairs.

The main problem, however, is the solid itself, usually built by designer as a basis to compute 3d renderings. Its direct adaptation for the needs of 3D printing is most often impossible. The main disadvantages of this type of model are their inaccuracies, especially their "leakiness" and overlapping solids, which are not an entirety one object. A virtual model built in such a way is interpreted by the printing preparation software as unfit for printing, mostly areas where solids intersect are read as holes. The same is true for the faces forming the object, which in this visualization model does not have to be properly oriented. In the event of a printout of a face with negative orientation, in most applications they will be interpreted, as empty spaces, and objects will be printed with holes. During the experiments, testing assigned architectural and landscape models, the author met with the situation when, for example at 300,000 faces, more than a half had a negative orientation. It also often turned out, that the random rotation of triangles took place when importing a file created in e.g. ArchiCAD to *3ds Max* and in turn during export to the STL format. Fixing such model by manually identifying individual faces, which the program needs to turn, is simply not feasible. First of all, it is not comparatively more time-consuming than the construction of a new virtual model with the aim to print it in 3D. 3D printer software manufacturers offer solutions to automate the process of repair and testing models for print. Recognized as one of the best in the industry are the ones offered by Netfabb, as well as a free service for cloud computing (version without full functionality with respect to its commercial counterpart). Unfortunately, these algorithms are best suited for simple structures, which architectural objects are usually not.

### **Splitting the model**

The working surface of a 3D printer is usually no larger than A3 paper sheet, which also applies to the most expensive professional equipment. These limitations result from the technology and precision of how the components fit. The condition obliges to divide the model into parts in order to print it. More advanced programs for professional equipment allow for intuitive model division with the set of a margin - common part, which is printed on each of the parts making up the whole. This feature greatly facilitates the processing during the connection of the printed parts together. As author's experiments show, the cutting process of the model requires considerable computing power and is time-consuming. It often takes up to several hours, and in case of complex models created for a different use than 3D printing it often becomes impossible. In this case, attempts to split the model in *3ds Max* after merging it into a single block were made. This process, in the case of highly complex models is not always successful.

### **Support structures.**

The additive print specificity requires the use of support structures in these models, which have elements unilaterally overhanging, like balconies, canopies, etc. Supports are also needed in the case of flat horizontal elements, such as ceilings or lintels; in the case of Ultimaker with a span of more than 7mm. Manufacturers of software designed for the print preparation offer various types of algorithms for automating the construction of supports. As a result of performed experiments, it was found that a more effective method is to manually construct supports during object modeling phase. Carrying out such structures must, however, be preceded by gaining complete knowledge about the principles of the operation of the printer, and the behavior of the material during printing. Support structures generated automatically are very often too bulky and in many places are not necessarily required. The physical construction of the 3D model in the FDM technology is time-dependent on the complexity of the solid and amount of material used. Skilful arrangement of supports allows for a significant reduction in material consumption and printing speed. The way of support joints with the model as well its quantity has major significance for finishing printouts which has to be done manually.

### **Setting the printing parameters:**

This step is the most demanding on the printer's operator. The number of combinations of software settings is high. Each time, they have to be adjusted according to a specific model, taking into account the shape, arrangement on the platform and the device's limit parameters. Satisfactory results require high-end skills and experience; it is also important to skillfully adjust the operating parameters of the device to the material from which the model will be built. The material may behave differently, even when derived from the same manufacturer, regardless of that, each color of the material is slightly different and gives different final results. Preparing a model for virtual cut into horizontal sections interpreted by the printer as successive layers of material application, one has to decide on numerous printing parameters. Basic settings include defining the parameters regarding: wall thickness, the method of forming the fill, the percentage of overlapping the fill on the walls, the construction methods of horizontal planes, print head temperature, the length and response time of the material in the tray, print speed, which is dependent on the structure of the model and its complexity and detail size. These settings have a major impact on the quality of the resulting print. As shown by the present author's experiments, the developed set of settings, which gives satisfactory printouts, in most cases proved to be effective only on the model printout on which it has been developed.

### **The final print processing**

Not many of the manufacturers mentioned the need for manual processing of the final printout in order to bring them to a satisfactory quality. Each of the technologies, including the most precise stereo lithography requires the appropriate final print processing. Depending of used technology and material, printout need to be finish by applying the corresponding solutions. All of them are time-consuming, no matter if it is a mechanical (most common) or chemical processing. In the case of FDM printing, the process comes down to the mechanical removal of support structures, and cutting and filing imperfections in the form of excess material that often builds up on elements, among which emptiness was designed. Additives required to be removed, create a kind of spider web, which often is difficult to remove. It often concerns the hard to reach spaces, which makes the process tedious using miniature tools.

## **COMMON PROBLEMS ASSOCIATED WITH FDM PRINTING TECHNOLOGY**

- "Bridges"

The problem occurs when printing overhanging elements. Due to the nature of technology - printing using thermal plasticized material, building bridge-like structures is very difficult. It requires a lot of experience and a well-chosen air stream cooling the material, right after getting out of the printing head. The longest possible overhangs - straightforward in case of Ultimaker are just 2 to 3 cm. Thus, in the case of longer overhangs, one should design appropriate support structures to be removed during a final print processing. Alternatively, if possible, one should try to divide the model and then distribute it on the platform, in such arrangement to set long unsupported horizontal structures to be build as vertical elements - which are much easier to be printed.

- Level of detail

Accuracy/resolution stated by the manufacturers is usually purely theoretical according to calculations of the accuracy of the print head movement control mechanism-working platform. As the present author's experiments have shown, the size of the smallest detail, which will be printed, depends on many factors. Small parts of a small height - up to 0.3 mm occurring on the walls are usually printed accurately. However, the precision of building vertical structures, as well as horizontal over-

hanging ones, such as a spatial lattice is different. The smallest cross-section experimentally obtained in the case of Ultimaker was 0.8 mm. Attempts made by the present author show that detailed reproduction and final print result depends largely on the model and the method of its preparation in the cutting program. The key is to select the device operating parameters, and the path on which the print head moves.

– Repeatability

An important issue of FDM printers, such as Ultimaker, that affects reproduction of consecutive copies of the same object is recurrence. Experimentally achieved printouts were repeatedly not identical despite the fact that the device worked on the same settings and material. The problem of repeatability indicates the imperfection of the print head and methods of material feeding.

Wrapping

- Specificity of the material from which the models are formed, leads to distortion of the model (experiments performed on the PLA material). The first factor is the little mixing of material volume connected with the cooling process. This causes rolling up of the corners of buildings, which in the initial phase of the printing surface were adjacent to the working platform. The larger the plane the stronger the rolling up. When printing from ABS plastic, this phenomenon is even more onerous. Another problem arising from the specificity of PLA material is its sensitivity to humidity. Improperly stored filament, when heated in the printing head has a tendency to form air bubbles in its structure, which adversely affects print quality.

- Damages to the delicate structures caused by the print head

During the experiments stated a common case was the breaking of delicate vertical structures by the print head. The cause of such damage lies in the lack of sufficient precision of the application of the material in relation to the accuracy in which the working platform moves.

- Printing in one colour.

At the current stage of the FDM technology development (November 2012.) there are no implemented systems that would enable seamless printing of the material in several colours at the same time.

## CONCLUSION

Architectural models are one of the finest types of media for presenting design ideas. Used so far in a few cases because of the cost effectiveness, in the era of three-dimensional printers they are no longer a luxury addition to the drawing documentation. The benefits of 3D printing technology are great. The most important ones include: the ability to present different versions of the design in a physical model<sup>23</sup>, the use of precise working models or multiple replications of the model for each of the consultation members or design team. One should also pay attention to the possibility of sending electronic files containing the print data; this scenario allows the possibility of creating a physical copy of the object just within a few hours anywhere in the world. In the hands of architects, 3D printers open up new possibilities of interaction with the customer, so far being the only a part of science fiction. Unfortunately, the quality of complex architectural models printed on a small scale, using consumer devices (up to NET EUR10,000) is not suffi-

---

<sup>23</sup> Examples of such applications can be a currently developed long-term spatial policy of Louisville town, with the participation of the local community (<http://www.visionlouisville.com/>), access date 22.12.2012: <<http://www.3ders.org/articles/20121015-3d-printing-helps-louisville-to-crowd-source-city-planning-of-2040.html>>

cient<sup>24</sup>. Simple structures or more complex models skillfully divided for printing give quite satisfactory results, but their preparation requires a lot of experience and patience. For those who do not have professional equipment, or sufficient ability to use consumer printers, prototype workshops offer their services. For now, the cost of models made by them is high, but probably in time, with the development of 3D printing technology, these prints will become competitive to manual models, especially since the time of printing a 3D model is incomparably shorter. In conclusion, one still needs to keep track of the machine builders' development and wait - the revolution has only just begun. Probably in the near future, a 3D printer will be able to meet the expectations of architects regarding the quality and printing times, while being affordable both in the cost of operation and maintenance as well on the side of user friendly software.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Rałowicz R. DRUKARKI 3D Zaczarowany ołówek dla architektów, "świat architektury" 1 (08) / 2011, s.95-96, ISSN: 2081-6413 W.A. sp. z o.o, Lab MeCo Media Communications GmbH Wiedeń, Austria 2011r.
- [2] Rosenfield K. "SCI-Arc's Gehry Prize awarded to 'Phantom Geometry'" 22 Oct 2012r. *ArchDaily*. dostęp 11.12.2012. <http://www.archdaily.com/284752>
- [3] Quirk V. "How 3D Printing Will Change Our World (Part II)" 19 Jul 2012. *ArchDaily*. dostęp 11.12.2012r. <http://www.archdaily.com/255156>
- [4] Steinhilp W. M., Kias U. Comparison of 3-D Printing Techniques Usable in Digital Landscape Architecture w Peer Reviewed Proceedings of Digital Landscape Architecture 2010 at Anhalt University of Applied Sciences s.173-181, Berlin, Herbert WichmannVerlag 2010

## O AUTORZE

Mgr inż. Jacek Konopacki jest pracownikiem naukowo dydaktycznym Instytutu Architektury Krajobrazu Wydziału Architektury Politechniki Krakowskiej. Przedmiotem jego zainteresowań są zagadnienia dotyczące kompozycji w krajobrazie, oraz partycypacji społecznej w przedsięwzięciach przestrzennych. Zajmują się również badaniami nad zastosowaniem nowoczesnych technologii informatycznych na potrzeby architektów oraz wpływu ich zastosowania na jakość przestrzeni - krajobrazu (*Badania finansowane w ramach indywidualnego projektu badawczo naukowego: NCN 2011/01/N/HS2/02295 pt: Zastosowanie cyfrowych modeli przestrzennych w ochronie i kształtowaniu krajobrazu*)

## AUTHOR'S NOTE

MSc. Jacek Konopacki, researcher and lecturer at the Institute of Landscape Architecture, Faculty of Architecture, Cracow University of Technology. His main research fields are focused on composition in the landscape, as well social participation in design processes. Currently conducted research project which focuses on application of last IT technologies for the architects and the effect of their use on the quality of the landscape.

---

<sup>24</sup> The Worldwide Guide to Rapid Prototyping, access 22.12.2012. <<http://www.additive3d.com>>