

AKADEMIA SZTUK PIĘKNYCH
im. Wł. Strzemińskiego w Łodzi

Rozprawa doktorska

Bizuteria ażurowa tworzona w oparciu
o projektowanie parametryczne oraz techniki generatywne

Autor
Marcin Nowak

Promotor
Prof. dr hab. Andrzej Boss

Spis treści

Wstęp	1
Część 1 – Podstawy teoretyczne	4
Definicja pojęć	4
Punkt / Linia.....	6
Ażur.....	13
Design	15
Parametric design.....	20
Zarys historyczny.....	20
Grasshopper	37
Parametricism /Parametryzm	42
Projektowanie parametryczne, a techniki generatywne.....	47
Projektowanie parametryczne w różnych dziedzinach designu.....	52
Technologia druku 3D	69
Część 2 – Kolekcja Biżuterii.....	78
Fluidium.....	83
Fusion.....	121
Vertex.....	133
Podsumowanie	153
Bibliografia	159
Spis ilustracji.....	165

Wstęp

Biżuteria od początku stanowiła istotny element kultury, sztuki i życia codziennego naszej cywilizacji. Tradycyjne techniki jubilerskie, przekazywane z pokolenia na pokolenie, wciąż cieszą się ogromnym uznaniem. Jubilerstwo od zawsze było związane z precyzją, kunsztem i artystycznym wyczuciem, które wymagały lat praktyki i doświadczenia. Współczesny świat projektowania i produkcji biżuterii doświadcza jednak dynamicznych zmian, napędzanych przez rozwój technologii, takich jak projektowanie parametryczne, techniki generatywne czy technologia druku 3D. Dla współczesnych artystów i designerów, postęp ten, otwiera nowe perspektywy w podejściu do kreowania i wdrażania swoich idei. Artyści mogą dzięki tym technologiom eksperymentować z nowymi formami wyrazu, tworząc dzieła, które są zarówno estetycznie unikalne, jak i funkcjonalnie innowacyjne. Projektowanie parametryczne i techniki generatywne pozwalają na automatyzację wielu aspektów procesu projektowego, co z kolei umożliwia twórcom skupienie się na bardziej kreatywnych i strategicznych elementach swojej pracy. Dzięki drukowi 3D, designerzy mogą tworzyć obiekty o skomplikowanych geometriach, które byłyby niemożliwe do wykonania tradycyjnymi metodami. Technologie to narzędzie, które może przyczynić się do ułatwienia i przyspieszenia pracy artystów i designerów. Dzięki nim proces twórczy może stać się bardziej efektywny, precyzyjny i elastyczny.

Celem mojej pracy jest zbadanie i przedstawienie możliwości kreacyjnych, jakie dają nowoczesne metody wykorzystujące proces projektowania parametrycznego i technik generatywnych w połączeniu z narzędziami do ich produkcji, takimi jak druk 3D czy laser. Chcę sprawdzić jak współczesne technologie mogą nie tylko ułatwić proces projektowania i tworzenia finalnego produktu, ale także wprowadzić nowe, innowacyjne rozwiązania, które wcześniej były nieosiągalne. Poprzez połączenie innowacyjnych metod projektowania z nowoczesnymi maszynami, praca ta stara się odpowiedzieć na pytania dotyczące możliwości i ograniczeń w procesie tworzenia biżuterii. Chcę również sprawdzić, czy dzięki temu podejściu do tworzenia biżuterii, może być ona kierowana również do firm, które na co dzień nie zajmują się jej produkcją. W ten sposób, moja praca ma na celu nie tylko wprowadzenie innowacji w dziedzinie biżuterii, ale także zainspirowanie innych branż do eksplorowania nowych technologii w swoich procesach rozwojowych i produkcyjnych. Moim celem jest pokazanie, że gotowe narzędzia,

takie jak projektowanie parametryczne oraz technologie druku 3D i cięcia laserowego, mogą być wykorzystywane przez różne przedsiębiorstwa, wzbogacając ich ofertę i otwierając nowe możliwości biznesowe, niezależnie od ich głównej działalności. Jako nauczyciel akademicki specjalizujący się w projektowaniu 3D, stoję przed wyzwaniem i jednocześnie szansą wdrożenia tych nowoczesnych metod do programu nauczania. Czy taki proces projektowania można skutecznie wprowadzić do akademickich pracowni projektowych? Czy studenci, którzy dotychczas pracowali w tradycyjnych programach 3D, są gotowi na nowe narzędzia, które mogą zmienić ich podejście do procesu projektowania? Chcę zbadać, jak takie nowoczesne podejście do projektowania może nie tylko wzbogacić program nauczania, ale także przygotować studentów do przyszłości, w której innowacja i kreatywność będą kluczowymi czynnikami sukcesu. Chciałbym również, poprzez moje kolekcję, zainspirować przyszłych projektantów i twórców biżuterii do eksperymentowania z nowymi narzędziami i technikami, aby tworzyć dzieła jeszcze bardziej unikalne i oryginalne.

Praca została podzielona na dwie główne części. Każda z nich omawia różne aspekty tematu, zaczynając od teoretycznych podstaw, przez szczegółowe analizy technik i narzędzi, aż po finalne realizacje w postaci autorskich kolekcji biżuterii.

Część pierwsza pracy zawiera omówienie podstawowych zagadnień z obszaru sztuk plastycznych, takich jak punkt i linia, które są kluczowe w kontekście zaprojektowanej przeze mnie kolekcji. Omówię znaczenie tych pojęć, poczynawszy od początku, kiedy to nasi przodkowie za pomocą linii zaczęli przedstawiać ludzi i zwierzęta na ścianach jaskiń. W pierwszej części pracy przeanalizuję, jak ważny jest punkt, który stanowi podstawę dla tworzenia linii, będąc preludium w procesie mojego projektowania. Następnie rozważę rolę konturu w sztuce, który definiuje granice i kształt przedstawionych obiektów, wpływając na ich czytelność i percepcję. Przedstawię jak linie zbudowane z punktów mogą przybierać różne formy - od wyraźnych i precyzyjnych, po miękkie i płynne, zależnie od intencji artysty. W moich pracach biżuteryjnych linia jest dominującym motywem, co znajduje odzwierciedlenie w tworzonych przez mnie projektach. Zaczynają się one od punktu i rozwijają w skomplikowane, harmonijne struktury. Następnie przeanalizuję historię ażuru w kontekście biżuterii, omawiając podstawowe techniki ich tworzenia, które nadają biżuterii lekkości i finezji. Poruszę również zagadnienie związane z designem skupiając się na znaczeniu formy i estetyki, która w kontekście biżuterii jest kluczowa.

Przybliżę również zagadnienie *parametric design*, wyjaśniając, jak wykorzystanie algorytmów i parametrów pozwala na generowanie różnorodnych wariantów projektu, co daje nieskończone możliwości eksploracji form i struktur. Przeanalizuję historię oraz ewolucję tej techniki, sięgając do jej początków. Następnie omówię bardziej szczegółowo jedno z narzędzi do projektowania parametrycznego o nazwie *Grasshopper*, które jest szeroko stosowane w projektowaniu parametrycznym i na którym pracowałem podczas tworzenia swojej kolekcji. Wyjaśnię, jak *Grasshopper* umożliwia użytkownikom tworzenie algorytmicznych modeli, nie związanych ze światem pisania skryptów, za pomocą wizualnego języka programowania. Poruszę również zagadnienie związane z moim tematem, czyli nowym stylem w architekturze o nazwie *Parametricism / Parametryzm*, która została stworzona przez Patrika Schumachera. Rozwinę dokładniej pojęcie projektowania parametrycznego i technik generatywnych, porównując je, wskazując ich podobieństwa i różnice. Postaram się omówić na konkretnych przykładach jak ten innowacyjny sposób projektowania zyskuje na popularności w różnych sektorach życia. Pokażę jego zastosowanie nie tylko w architekturze, ale też w designie przemysłowym i produktowym obejmującym tworzenie ergonomicznych mebli, nowoczesnych lamp, czy innych innowacyjnych produktów życia codziennego. Przybliżę również technologię druku 3D, która każdego dnia rewolucjonizuje różne dziedziny życia, w tym przemysł, medycynę, architekturę i sztukę. Nakreślę jej historię, od pierwszych drukarek dostępnych dla szerokiej publiczności po zaawansowane drukarki używane w przemyśle. Wspomnę również o różnych technikach druku 3D, takich jak *FDM*, *SLA*, *SLS* i *DLP*.

Część druga mojej pracy dotyczy już konkretnie stworzonych przeze mnie trzech kolekcji z użyciem projektowania parametrycznego i technik generatywnych. Pokażę w nich, jak użyłem tych metod do stworzenia skomplikowanych struktur ażurowych i form organicznych, które byłyby trudne lub wręcz niemożliwe do osiągnięcia tradycyjnymi technikami. Opisuję proces tworzenia kilku projektów, podkreślając, jak parametry i algorytmy pozwoliły na uzyskanie unikalnych efektów estetycznych i funkcjonalnych. Każdą kolekcję - *Fluidium*, *Fusion* oraz *Vertex* – opiszę szczegółowo pod kątem koncepcji, procesu projektowego oraz technologii użytych do jej realizacji.

Część 1 – Podstawy teoretyczne

Definicja pojęć

Aby zapewnić klarowność i precyzję omawianych zagadnień, na wstępie mojej pracy „*Biżuteria ażurowa tworzona w oparciu o projektowania parametryczne oraz techniki generatywne*”, zdefiniuję kluczowe terminy zawarte w jej temacie.

Ażur

Ażur (z języka francuskiego *ajour* - dziurka)¹ to technika dekoracyjna, polegająca na tworzeniu ozdobnych, finezyjnych otworów w różnych materiałach, takich jak np. metal, drewno, kamień, papier czy tkanina. W efekcie powstaje lekka i ozdobna struktura, która nadaje przedmiotowi elegancki wygląd. Otwory te mają zróżnicowane kształty i układy, które tworzą kontrast z tłem. Wymagają precyzji i umiejętności manualnych. Wykorzystując odpowiednie materiały i techniki, ażur pozwala uzyskać lekkość formy, co czyni go powszechnie stosowanym w wielu dziedzinach sztuki i rzemiosła. W biżuterii to technika zdobienia polegająca na wycinaniu w materiale (zazwyczaj w metalu) precyzyjnych, ażurowych wzorów, które tworzą delikatne, koronkowe struktury. Dzięki tej metodzie biżuteria zyskuje lekkość, elegancję i finezję. Ażury mogą przybierać różne formy, od prostych geometrycznych kształtów po skomplikowane organiczne motywy roślinne czy zwierzęce.²

Projektowanie parametryczne

Projektowanie parametryczne to podejście do projektowania, w którym twórca definiuje parametry oraz reguły kontrolujące formę, strukturę i właściwości obiektu. Zamiast ręcznie rysować każdy element, projektant tworzy algorytmy, które generują różnorodne warianty

¹<https://pl.wikipedia.org/wiki/A%C5%BCur> [dostęp 25.06.2023].

²Barucki Tadeusz, et al., *Sztuka Świata 17. Słownik terminologiczny sztuk pięknych A-K*, Wyd. Arkady, Warszawa, 2013, s. 49-50.

projektu w zależności od zmiennych parametrów. Dzięki temu możliwe jest szybkie eksplorowanie wielu wersji projektu, łatwe dostosowanie formy do specyficznych wymagań oraz optymalizacja strukturalna i estetyczna obiektu. Używa się specjalnego oprogramowania do tworzenia modeli trójwymiarowych, gdzie zmienne parametryczne są powiązane z innymi elementami modelu. Zmieniając jedną wartość parametru, można wpłynąć na inne aspekty modelu, co umożliwia szybkie testowanie różnych scenariuszy projektowych i automatyzację procesu projektowego. Dzięki temu projektant może eksperymentować z różnymi ustawieniami parametrów, uzyskując różne efekty w swoich pracach, a także automatyzować niektóre aspekty procesu twórczego. Projektowanie parametryczne umożliwia tworzenie skomplikowanych i innowacyjnych form, które są trudne do uzyskania przy użyciu tradycyjnych metod projektowania biżuterii.³

Techniki generatywne

Techniki generatywne to metoda projektowania, w której komputerowe algorytmy są wykorzystywane do automatycznego generowania różnorodnych form i struktur na podstawie ustalonych reguł, parametrów i ograniczeń. Proces ten polega na wielokrotnym dodawaniu, odejmowaniu elementów lub dzieleniu ich na mniejsze pod-elementy. Projektant definiuje zestaw zasad, a algorytm iteracyjnie tworzy liczne warianty, poszukując najbardziej optymalnych rozwiązań. Dzięki temu możliwe jest szybkie i efektywne badanie wielu opcji projektowych, co prowadzi do innowacyjnych i zróżnicowanych rezultatów, które mogą być trudne do osiągnięcia przy tradycyjnych metodach projektowania. Techniki generatywne umożliwiają tworzenie złożonych i niestandardowych form, które byłyby trudne do uzyskania przy użyciu tradycyjnych metod.⁴

³Woodbury R., *Elements of Parametric Design*, Routledge 2010, s. 11-32.

⁴<https://www.muratorplus.pl/biznes/firmy-i-ludzie/projektowanie-generatywne-w-architekturze-aa-S26g-3SWJ-ffXv.html> [dostęp 17.07.2023].

Punkt / Linia

Już w prehistorii nasi przodkowie tworzyli sztukę, starając się opowiedzieć o otaczającym ich świecie, w sposób jak najbardziej prosty i zrozumiały dla ich współplemieńców. Na ścianach jaskiń tworzyli rysunki konturowe, przedstawiając ludzi czy zwierzęta. Dzięki naszemu umysłowi wizualizujemy sobie i kojarzymy osoby, przedmioty z ich sylwetką. Kontur w sztuce jest jednym z kluczowych elementów, które mają znaczący wpływ na wyrazistość i percepcję dzieła. Kontur to linia, która określa granice i kształt przedstawionych obiektów lub form, wyznaczając ich zewnętrzny obrys.



Il. 1. 1 Rysunki znajdujące się w grocie w Lascaux, Francja. Źródło: <https://www.techpedia.pl/index.php?str=tp&no=30206>

Dostrzegalnym motywem przewodnim mojej kolekcji biżuterii jest właśnie linia, element o głębokim znaczeniu w sztukach plastycznych. Aby pełniej zrozumieć rolę linii w moich pracach biżuteryjnych, warto zacząć od "punktu", będącego preludium, od którego zaczynam proces projektowania i konstruowania kolejnych elementów, wykorzystując go następnie do budowania linii.

*"Geometryczna linia jest niewidoczna. Jest śladem poruszającego się punktu, skutkiem jego przesuwania się. Powstaje z ruchu przez zniszczenie bezwładności punktu, absolutnego stanu jego spoczynku, a tym samym przez przeskoczenie ze statyki w dynamikę."*⁵

Bez wątplenia, linia wywodzi się z punktu, który stanowi jej podstawę. Punkt jest fundamentalnym elementem, z którego rozwija się cała różnorodność form i kształtów. To z punktu, jako podstawowego elementu przestrzeni, zaczynają się pierwsze wyrażenia artystyczne, które prowadzą do bardziej skomplikowanych form, zyskując specyficzny charakter i znaczenie. Wielkie dzieła sztuki, które budzą podziw i emocje, często zaczynają się od punktu, który prowadzi do poszukiwania harmonii, estetyki i głębi artystycznego przekazu⁶.

W geometrii, punkt jest fundamentalnym pojęciem, które nie posiada długości, szerokości ani głębokości. Jest to pojęcie abstrakcyjne, bezwymiarowe, statyczne. Wassily Kandinsky pisze, że *"jako twór geometryczny punkt jest niewidoczny"*⁷. Jest również podstawowym określeniem rzeczywistej formy wskazując na jej określoną pozycję w przestrzeni. *"W rzeźbie i architekturze punkt jest rezultatem przecinania się wielu płaszczyzn — jest on wierzchołkiem kąta przestrzennego, a więc i zarodkiem, z którego te płaszczyzny powstają. Dają się one z niego wyprowadzić i do niego sprowadzić. W budowlach gotyckich punkty były szczególnie silnie akcentowane przez ostre zakończenia, niejednokrotnie podkreślone rzeźbiarsko; podobnie w architekturze chińskiej wygięte [ku górze] linie, przecinając się, akcentują punkt."*⁸.

W matematyce, punkt jest traktowany jako najprostszy element, stanowiący podstawę dla tworzenia linii, płaszczyzn i innych brył geometrycznych. Pierwszą próbę wyjaśnienia pojęcia punktu podjął Euklides mówiąc *"Punkt to jest to, co nie składa się z części (czego nie można rozłożyć na części)"*⁹. W innych dziedzinach - muzyce, literaturze i sztukach wizualnych - pojęcie punktu ma także ważne znaczenie. W muzyce, punkt może być metaforą dla nutowego dźwięku, który jest punktem wyjścia do tworzenia melodii i harmonii. W literaturze punkt jest używany jako element składowy, symbolizujący przecinki, kropki, czy inne znaki interpunkcyjne,

⁵Kandyński Wasył, *Punkt i linia a płaszczyzna*, Wyd. Oficyna, Łódź, 2019, s. 59.

⁶*Ibidem*, s.35-37.

⁷*Ibidem*, s.38.

⁸*Ibidem*, s. 55.

⁹[https://pl.wikipedia.org/wiki/Punkt_\(geometria\)](https://pl.wikipedia.org/wiki/Punkt_(geometria)) [dostęp 12.07.2023].

które kształtują strukturę tekstu i nadają mu rytm i ton. W szerszym kontekście, pojęcie punktu ma także zastosowanie w filozofii i naukach społecznych, gdzie może symbolizować początek, indywidualność, jedność czy punkt widzenia. W sztuce *"punkt jest rezultatem pierwszego zetknięcia się narzędzia z materiałem"*¹⁰. Może on stanowić nie tylko element kompozycji, ale być także punktem, początkiem do tworzenia abstrakcyjnych form, czy punktem który skupia uwagę widza. Artystyczne wykorzystanie punktu jako elementu wizualnego może mieć różnorodne znaczenie, od symbolicznego i emocjonalnego po czysto estetyczne. Ruchomy punkt, jako inspiracja, zagościł w malarstwie, stając się integralnym elementem wielu kierunków, takich jak *pointylizm*¹¹ czy *dripping*¹². Fenomen tej koncepcji został również uchwycony w kompozycji malarki francuskiej Soni Delaunay, będącej częścią kierunku plastycznego zwanego *orfizmem*¹³. Punkt w moich pracach to także preludium, początek, od którego zaczynam proces projektowania i konstruowania kolejnych elementów, wykorzystując go do budowania linii. Jest podstawą w tworzeniu moich obiektów 3D. Poprzez wyznaczenie punktów tworzone są linie, a zmiana położenia punktu w przestrzeni powoduje zmianę linii, co wpływa na całą formę obiektu. Dzięki odpowiedniemu umiejscowieniu punktu w przestrzeni 3D, kształtuję swoje formy, poruszając nimi, zmieniam strukturę całego obiektu.

*"Punkt - spoczynek. Linia - ruchliwe wewnętrznie napięcie, z ruchu powstające. Oba elementy - krzyżowanie się i zestawienia tworzące własny „język”, niedający się zastąpić słowami."*¹⁴

W 1923 roku w Weimarze Wassily Kandinsky publikuje swoje dzieło *"Punkt i linia a płaszczyzna"*, analizując podstawowe zagadnienia zawarte w tytule. Książka podejmuje refleksje dotyczące głównie malarstwa i grafiki, ale zwraca również uwagę na konotacje w innych dziedzinach, takich jak architektura czy technika. Kandinsky wyróżnił geometryczną linię, która jest niewidzialnym bytem, jako pochodną elementu punktu w ruchu. Linię można rozpatrywać jako ślad poruszającego się punktu, który sygnalizuje wizualne przejście

¹⁰Kandyński Wasyl, *Punkt i linia a płaszczyzna*, Wyd. Oficyna, Łódź, 2019, s. 55.

¹¹Pointylizm powstał w latach 80. XIX wieku jako jeden z odłamów impresjonizmu. Był reakcją na ograniczenia techniczne i estetyczne stosowane przez impresjonistów w ich poszukiwaniach artystycznych. Początkowo nazywany też "dywizjonizmem", pointylizm został ukształtowany głównie przez francuskich malarzy George'a Seurata i Paula Signaca.

¹²Dripping jest jednym z kluczowych prądów w sztuce abstrakcyjnej, który wyłonił się w latach 40. i 50. XX wieku. Jego twórcą i głównym reprezentantem był amerykański artysta Jackson Pollock.

¹³Orfizm, znany również jako syntetyzm kolorowy, był prądem artystycznym, który rozkwitł w początkach XX wieku.

¹⁴Kandyński Wasyl, *op.cit.*, s. 38.

od statycznego do dynamicznego. Charakterystyczną właściwością linii jest jej zdolność do wywołania wrażenia ruchu. Nasze oczy podążają za linią, zatrzymując się na punkcie. Parafrazując, linie, niezależnie od ich rodzaju, symbolizują przejście od statyczności do dynamiki, powstają bowiem poprzez wprowadzenie punktu w ruch za pomocą działających na niego sił. Charakter linii jest efektem ilości i kombinacji tych sił. Kiedy punkt zostaje wprowadzony w ruch i linia zostaje stworzona, otrzymujemy zarówno napięcie, jak i kierunek, stanowiące dwie składowe ruchu. Od ilości, wielkości, jak i kierunków sił działających na punkt zależy charakter powstałej linii, co w przypadku moich prac wpływa znacząco na ich odbiór. W teorii Kandinsky'ego waga linii również ma znaczenie, który nazywa ją *"przyciskiem"*. To akcentowanie liniowe może być stopniowe lub spontaniczne, wzrastające lub malejące w sile. Wykorzystanie akcentu pozwala linii osiągnąć odpowiedni kształt w danej chwili. Jest to również bardzo istotne w kontekście mojej kolekcji *Fluidium*, gdzie poprzez zastosowanie różnej grubości linii w odpowiednich miejscach, dynamizuję powstałą formę - *"każdy rodzaj linii wymaga zastosowania właściwych zewnętrznych sposobów, umożliwiających ukształtowanie pożądanej formy, a to na zasadzie ogólnej ekonomii środków: maksymalny efekt z minimalnym wysiłkiem."*¹⁵. Zgadzam się również ze stwierdzeniem Sylwii Ośnieckiej, że *"[...] formy, w których uwidocznione są zmagania z siłami fizyki z natury swej są bardziej dynamiczne, a co za tym idzie, cechują się również mocniejszym wyrazem ekspresyjnym. Układy i formy o bardziej zagmatwanym i niejasnym charakterze również odznaczają się większym bogactwem ekspresji niż układy przejrzyste i proste w budowie. Podobnie sytuacja ma się w przypadku linii krzywych i łamanych w opozycji do prostych — szczególnie poziomych i pionowych."*¹⁶

Jak zauważa Zygmunt Szparkowski, linie można scharakteryzować również w ciągu przeciwstawień. *"W tym sensie linia o nieskończonej długości może być przeciwstawiona linii ograniczonej dwoma punktami, czyli odcinkiem; krzywa –prostą; linia cienka – linią grubą; linia pionowa – linią poziomą; linia poprzeczna – linią podłużną; linia wyrównana – linią pochyloną; linia prosta – linią łamaną; linia równoległa – linią prostopadłą; linia falista – linią wyrównaną; linia zygzakowata – linią wyrównaną; linia spiralna – linią prostą. Chociaż linia ma jeden wymiar, to ma pewien stopień grubości, aby mogła być widoczna. Jest odbierana jako linia, bo jej długość*

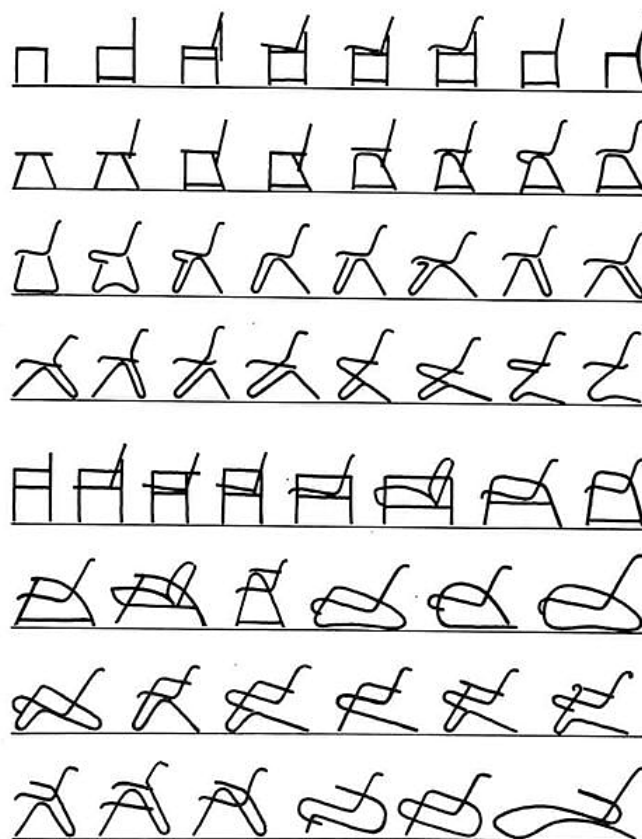
¹⁵Kandyński Wasył, *Punkt i linia a płaszczyzna*, Wyd. Oficyna, Łódź, 2019, s. 122.

¹⁶Ośniecka Sylwia, *Nie tylko technika – ekspresja konstrukcji jako estetyczny walor dzieła architektonicznego*, „AMOR FATI Antropologiczne czasopismo filozoficzne”, Wydawnictwo Leimak, Marzec 1 (5)/2016, s. 56.

*dominuje nad jej szerokością. Linia może być napięta lub wiotka, śmiała lub nieprzekonywająca, wdzięczna lub szorstka. Jest postrzegana przez długość/grubość, skalę, kontur lub stopień kontynuacji. Emocje, które są odbierane przez psychikę człowieka, może najlepiej odzwierciedlają refleksy linearne na wodzie. Widoczne są tam zwykle wszystkie rodzaje linii."*¹⁷. Podkreśla on również wagę linii w kształtowaniu konstrukcji wzrokowej poprzez np. łączenie, szeregowanie, otaczanie lub dzielenie elementów wizualnych, określanie krawędzi konturu, artykułowanie powierzchni, zespalanie, czy otaczanie innych elementów wizualnych.¹⁸ Znakomitym przykładem użycia tych wszystkich rodzajów linii w projektowaniu wzorniczym są kontury sylwetki krzeseł stworzonych przez Ericha Dieckmana, które idealnie odwzorowują ich kształt. Opisał on za pomocą bardzo prostej kreski formę, nie komplikując i nie wprowadzając dwuznaczności w odbiorze projektu.

¹⁷Szparkowski Zygmunt, *Podstawy inspiracji architektury, Ruchomy punkt, linia, spirala*, Oficyna Wydawnicza Wyższej Szkoły Ekologii i Zarządzania w Warszawie, Warszawa, 2012, s. 43.

¹⁸*Ibidem*, s. 47.



Il. 1. 2 Szkice różnych projektów krzeseł, Erich Dieckman, 1930-31. Źródło:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dieckmann_erich_sitzmoebel-entwicklung_1931.png

Analizując swoje kolekcje pod względem użytych linii w kontekście dzieła Szparkowskiego, mogę stwierdzić, że występują u mnie: linie o skończonej długości, czyli odcinki - linia ograniczona dwoma punktami (kolekcja *Fusion*); linie zapętlone (kolekcja *Fluidium* i *Vertex*), linie harmoniczne¹⁹ dopełniające się i tworzące zgraną całość (kolekcja *Fusion*). Cytując Szparkowskiego „...prosta harmonia występuje wówczas, gdy zdarzenie jest wsparte, zaakcentowane lub naśladowane przez inne zdarzenie”.²⁰

¹⁹Słowo harmonia pochodzi o greckiej bogini i jest uosobieniem porządku i symetrii.

²⁰ Szparkowski Zygmunt, *Podstawy inspiracji architektury, Ruchomy punkt, linia, spirala*, Oficyna Wydawnicza Wyższej Szkoły Ekologii i Zarządzania w Warszawie, Warszawa, 2012, s. 48.

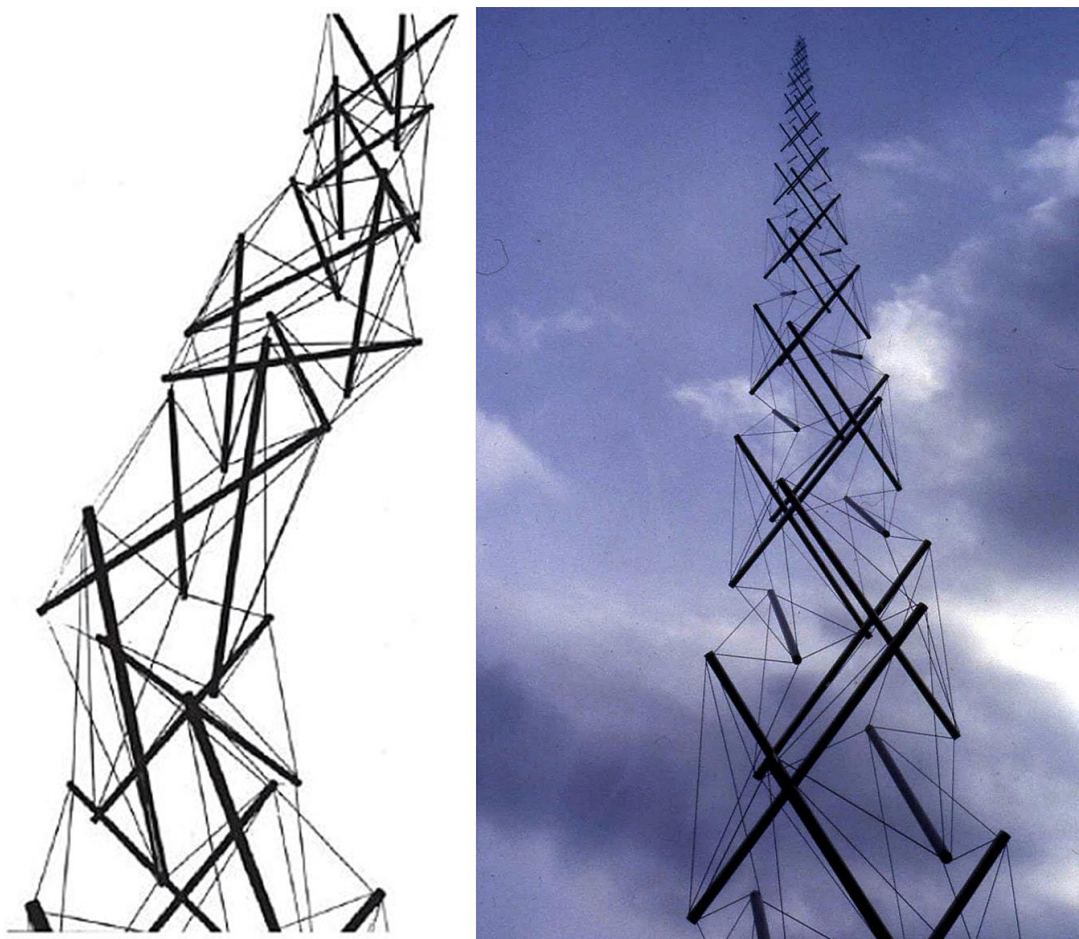


Il. 1. 3 Dom Handlowy Renoma we Wrocławiu, projekt Maćków Pracownia Projektowa, 2009.

Źródło: http://www.archiconnect.pl/archiconnect_wnetrza_publiczne/184/blask_ikony_modernizmu_dom_handlowy_renoma_we_wroclawiu,101551.html

W swoich pracach zastosowałem również linię określoną przez Szparkowskiego jako "podróż dla oka". Charakteryzuje się ona tym, iż odzwierciedla ruch wzroku patrzącego, który podąża wzdłuż obserwowanej linii. W "podróży oka" można jeszcze wyodrębnić jedno zjawisko związane z percepcją dynamiki i poczuciem stabilności konstrukcji: *"gdy linia staje się serią wektorów, pociągając za sobą oko."*²¹

²¹Szparkowski Zygmunt, *Podstawy inspiracji architektury, Ruchomy punkt, linia, spirala*, Oficyna Wydawnicza Wyższej Szkoły Ekologii i Zarządzania w Warszawie, Warszawa, 2012, s. 82.



Il. 1. 4 Kenneth Snelson, Struktura, Needle Tower. Źródła: Zygmunt Szparkowski, *Podstawy inspiracji architektury, Ruchomy punkt, linia, spirala*, Oficyna Wydawnicza Wyższej Szkoły Ekologii i Zarządzania w Warszawie, Warszawa, 2012, s. 84 oraz <http://mathtourist>.

Odpowiedni dobór sił działających na punkty, które po połączeniu ze sobą tworzą linię, a następnie dodanie już w trzecim wymiarze określonych współrzędnych osi XYZ (wprowadzenie ich w przestrzeń) czy wartości takich jak odpowiednia grubość linii, dają możliwość (szczególnie przy użyciu projektowania parametrycznego) poszukiwania odpowiedniej konstrukcji liniowej.

Ażur

Ażur to jedna z rozpowszechnionych technik tworzenia i dekorowania wyrobów jubilerskich. Brak tła, transparentność, w tworzonych wzorach budujących określone formy, definiuje nam przedmioty jako ażurowe. Takie przestrzenne formy od zawsze mnie intrygowały, szczególnie poprzez niesamowitą precyzję tworzenia ukazującą kunszt twórcy. Dzięki

odpowiedniemu ukształtowaniu tych linii, zapanowaniu nad ich formą oraz dodaniu im trzeciego wymiaru, chcę zaprojektować przestrzenne obiekty o delikatnym charakterze.

Już w starożytności tworzone wyroby ażurowe. Filigran ma swoje korzenie w Mezopotamii i Egipcie. Z Azji był eksportowany do Europy. Dzięki archeologii mogliśmy znaleźć dowody w starożytnych relikwach Mezopotamii, że filigran był używany w biżuterii 3000 lat p.n.e. W Midwat (prowincja Mardin, Mezopotamia) istniała nawet specjalna forma filigranu, w której używano srebrnych i złotych drutów. Technika ta została nazwana „*telkari*” i do dziś jest używana przez lokalnych rzemieślników²². Słowo *filigran* pochodzi o łacińskiego słowa *filum* - nić i słowa *grana* - ziarno, odzwierciedlając najistotniejsze cechy przedmiotów dekoracyjnych wykonanych w tej technice: ażurowej siatki ułożonej z cienkich drucików (stąd w dawnej polszczyźnie technikę tę nazywano *robotą drutową*), ozdobionych dodatkowo małymi metalowymi kuleczkami - ziarnami wzbogacającymi wzór. Od XII w. w filigranie zaczyna już przeważać typowy linearny wzór drutowy, a granulacja ma drugorzędne znaczenie. W wieku XIII pojawiają się nowe odmiany filigranu, gdzie granulacja zaczyna już całkowicie zanikać, a pojawia się filigran reliefowy, wieloplanowy (wielopłaszczyznowy) i ażurowy. Filigran ażurowy jest odmianą, w której wzór składa się z drutów zlutowanych ze sobą, bez tła tworząc tak jakby koronkę. W odmianie tej wyróżnia się filigran płaski, płaski wypełniony emalią, przestrzenny (inaczej nazywany rzeźbiarski - odmiana, w której techniką filigranu wykonuje się przestrzenne, trójwymiarowe przedmioty uformowane z filigranu ażurowego) oraz wieloplanowy (inaczej wielowarstwowy - odmiana, w której wzór zbudowany jest z dwóch lub wielu planów przylutowanych jeden na drugim)²³. Obecnie filigran pozostaje popularny w Indiach i Azji. W przeszłości był powszechny we Włoszech, Francji i Portugalii, od 1660 roku do końca XIX wieku stał się bardzo popularny we francuskiej modzie. Filigran jest nie tylko nadal wspaniałą i znaną techniką jubilerską we współczesnym wzornictwie, ale od czasów starożytnych był również kluczowym elementem dzieł sztuki wytwarzanych przez jubilerów, co widać w arcydziełach stworzonych przez Etrusków i Greków .

²²<https://secretsfromportugal.com/filigree-portuguese-culture/> [dostęp 25.06.2023].

²³Florow A.W., *Artystyczna obróbka metali*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe , Warszawa, 1989, s. 227-236.



Il. 1. 5 Ażur wykorzystany w biżuterii, filigran wielowarstwowy. Źródło: <https://secretsfromportugal.com/filigree-portuguese-culture/>

Design

„...Design (wzornictwo), słowo które używa się, by określić w sposób globalny produkcję użytecznych przedmiotów tworzonych przez człowieka. Termin „design” (wzornictwo) wywodzi się ze specjalistycznego słownictwa, które obowiązywało po zakończeniu II wojny światowej”.²⁴

W dzisiejszych czasach można zaobserwować niekończącą się dyskusję nad zagadnieniem samej istoty, definicji designu. Międzynarodowe Stowarzyszenie Projektantów ICSID zrezygnowało z próby sformułowania oficjalnej jego definicji w 1971 roku.²⁵ Ewoluuje ono tak jak pojęcie samej sztuki, które nadal nie jest określone, ciągle zmienia swoje granice i każda kolejna próba zdefiniowania tego zagadnienia z czasem staje się niewłaściwa. Tak jak i sztuka, design stał się

²⁴Guidot Raymond, *Design 1940-1990 wzornictwo i projektowanie*, Wydawnictwo Arkady, 1998, s. 11.

²⁵<https://wdo.org/about/definition/industrial-design-definition-history/> [dostęp 21.05.2023].

zjawiskiem kompleksowym i wielowymiarowym. Istnieją różne podejścia do definiowania tego zagadnienia, które uwzględniają różne aspekty i konteksty.

Angielskie słowo „*design*” ma swoje korzenie we włoskim terminie *disegno*, które pozwoliło po raz pierwszy w historii połączyć ze sobą, jednym pojęciem, architekturę, malarstwo i rzeźbę. To właśnie w okresie Renesansu (w czasach, gdy jeszcze nie istniało pojęcie *sztuk pięknych*) pojawiło się określenie *sztuk artystycznych*, *arti del disegno* - przekonanie, że mają one wspólną podstawę w *disegno*. Warto jednak pamiętać, że termin ten, wprowadzony przez Cenniniego, nie ograniczał się jedynie do rysunku, ale obejmował także projekt i zamiar (analogicznie do współczesnego języka włoskiego). Jak podkreśla Władysław Tatarkiewicz w książce Cenniniego „*Nauka o sztuce*”, *disegno* oznaczał „*obie te rzeczy naraz, mianowicie ten rysunek, tę formę, ten zarys przedmiotu, który ma źródło nie w przedmiocie, lecz w podmiocie, w artyście, w jego projekcie, zamiarze, pomyśle, koncepcji*”²⁶. L.A. Alberti również łączy ze sobą te dwa pojęcia, pisząc: „*Budynek, jak każde ciało, składa się z rysunku [disegno] i materii: rysunek jest wytworem umysłu, a materia natury ... nazwiemy więc rysunek projektem [preordinatione] powziętym przez umysł, składającym się z linii i kątów, kierowanym przez rozum i talent*”²⁷. Niektórzy badacze historii designu uważają, że słowo to wywodzi się od francuskiego słowa *désigner*, które kiedyś oznaczało zarówno *pokazywać, wskazywać*, jak i zarazem *rysować* (jednak sam ten termin stał się modny dopiero w latach sześćdziesiątych, dzięki zapożyczeniu tego słowa z języka angielskiego). Pojęcie to ma jednak różne znaczenie w tych dwóch językach. W języku francuskim „*dotyczy pewnego stanu umysłu, pewnego sposobu podejścia do „koncepcji” nowego przedmiotu [...]. Anglosasi posługują się nim, by określić zarówno wytwory rzemiosła, jak i seryjne produkty przemysłowe: przyrządy, maszyny, pojazdy, meble, narzędzia, sprzęty, ubrania, a także tkaniny, tapety, książki, plakaty [...]* Aby bliżej określić dziedzinę, której dotyczy to słowo, Anglosasi dodają do niego przymiotnik i mówią wówczas o *product design, graphic design, shelter design etc.*”²⁸. Janusz Krupiński zauważa, że w znaczeniu słowa *design* (zgodnie z definicją Webster's New World Dictionary), użyte jako sformułowanie „*uporządkowanie części, kryształów, barw itp...*” bliskie jest znaczeniu estetycznemu pojęciu formy (w znaczeniu jakie

²⁶Tatarkiewicz Władysław, *Historia Estetyki*, t. III, Wrocław-Kraków, 1967, s. 42.

²⁷*Ibidem*, s. 112.

²⁸Guidot Raymond, *Design 1940-1990 wzornictwo i projektowanie*, Wydawnictwo Arkady, 1998, s. 11.

nadaje się temu pojęciu w estetyce)²⁹. Nadmieniam, że w języku potocznym słowo *forma* rozumiane jest jako kształt. Nie dziwił się również, że Herbert Read, jako teoretyk sztuki, pisał, iż "*przez formę dzieła sztuki rozumiem po prostu kształt*"³⁰. Z tego względu, niektórzy estetycy anglojęzyczni używają pojęcia *design* ze względu na jego szersze znaczenie. Clive Bell zwracał uwagę, że *design* to pełna forma „nie ograniczona do kształtu czy stosunku kształtów”, a Monroe Beardsley w książce "*Aesthetics: Problems in the Philosophy of Criticism*" przez *design* rozumie „zespolony zbiór linii, kształtów i barw”³¹.

Design [Fr *dessein* < It *disegno* < *designare* < L *designare*] 1. a plan, scheme, project 2. purpose; intention; aim.. 6. a plan or sketch to work from; pattern [a design for a house] 7. the art of making designs or patterns 8. the arrangement of parts, details, form, color, etc so as to produce a complete and artistic unit, artistic or skillful invention [the design of a rag] 9. a finished artistic work or decoration

Design 1. plan, szkic, projekt 2. cel, intencja, zamiar... 6. plan lub szkic do wykonania; wzór 7. sztuka wykonywania projektów lub wzorów 8. uporządkowanie części, detali, kształtów, barw, itp. mające służyć uzyskaniu pełnej, artystycznej jedności, dzieło pełne artyzmu lub kunsztu/umiejętności 9. wykończone dzieło artystyczne lub dekoracja

Źródło: Webster's New World Dictionary

Istnieją definicje mówiące, że wszystko, co ma wygląd, ma też *design*. Termin ten powstał na potrzeby produkcji przemysłowej rodzącej się pod koniec XIX w. Rewolucja industrialna i masowy odbiorca wymusiły wypracowanie kompromisu między atelier artysty i fabryką. Projektantom końca XIX i pierwszej połowy XX wieku przyświecało słynne motto „*Form follows function*”³², sformułowane przez amerykańskiego architekta Louisa Sullivana³³. Idea

²⁹Krupiński Janusz, *Wzornictwo/Design studium idei*, Akademia Sztuk Pięknych w Krakowie, Kraków, 1998, s. 20.

³⁰Read Herbert, *Art and Industry. The Principles of Industrial Design*, MB, New York, 1961, s. 15: “By the form of work of art we mean simply its shape”, s. 20.

³¹Beardsley Monroe, *Aesthetics; Problems in the Philosophy of Criticism*, Harcourt, Brace and Comp., New York, 1958, s. 267, 298.

³²Pełny cytat brzmi: "Form ever follows function." (czyli "Forma zawsze podąża za funkcją.").

³³Sullivan Louis, *The Tall Office Building Artistically Considered*, "Lippincott's Magazine", March, 1896.

tego stwierdzenia zakłada, że w procesie projektowania, priorytetem powinna być funkcjonalność i praktyczność danego przedmiotu, budynku lub rozwiązania. Oznacza to, że forma czy wygląd powinny wynikać bezpośrednio z przeznaczenia i celu, jakie dany przedmiot ma spełniać. Innymi słowy, wygląd powinien być konsekwencją funkcji, a nie odwrotnie. W praktyce oznacza to, że projektanci powinni rozważyć, jakie są główne wymagania i zadania, jakie musi spełniać dany produkt czy projekt. Dopiero potem powinni skoncentrować się na stworzeniu odpowiedniej formy, która najlepiej spełni te wymagania. Dla przykładu, w projektowaniu mebli, najważniejsze jest, aby mebel był wygodny i praktyczny w użytkowaniu, a jego estetyka powinna wynikać z tych funkcjonalnych aspektów. Nie oznacza to jednak, że estetyka jest całkowicie zaniechywana, ale podkreśla, że piękno powinno wynikać z użyteczności i zastosowania, a nie być na siłę narzucone kosztem funkcjonalności. Szkoła Bauhausu również wywarła znaczący wpływ w kształtowaniu się *designu*, kładąc nacisk na nowoczesność, racjonalizm, funkcjonalizm i poszukiwaniu nowatorskich rozwiązań. Jak pisze Barbara Osińska: nowe pokolenie artystów, przede wszystkim projektantów oraz architektów, „*miało opierając się na nowoczesnych zdobyczach techniki, stworzyć nowe, humanistyczne środowisko dla człowieka cywilizacji miejskiej; środowisko liczące się zarówno z jego potrzebami materialnymi, jak i duchowymi*”³⁴. W latach 60. i 70. XX wieku, poprzez pojawienie się ruchu postmodernistycznego, nastąpiła negacja założenia modernizmu i funkcjonalizmu (szczególnie odwołując się do produkcji masowej). Projektanci postmodernistyczni skupiali się na odzyskaniu elementów tradycyjnych, ornamentów i różnorodności form, które niekoniecznie miały ścisły związek z funkcją danego przedmiotu. Był to swoisty powrót do różnorodności stylistycznej i artystycznego wyrazu.

Dla mnie, szczególnie jako projektanta biżuterii, wymiar estetyczny, forma, pełni najważniejszą rolę w procesie projektowania. Jej użyteczność jest dla mnie na początku zdefiniowana. Jako aksjomat przyjmuje jej użyteczność ze względu np. na miejsce jej noszenia, czy w przypadku pierścionka na odpowiedni rozmiar palca. Biżuteria stworzona jest również z myślą o podkreśleniu piękna ciała i wyrażeniu indywidualności noszącego. Niezależnie od tego, czy tworzona biżuteria jest delikatna i subtelna, czy wyrazista i odważna, jej funkcja nie sprowadza się jednak tylko do ozdoby. Jest to także wyraz naszego stylu i osobistego przekazu lub świadectwo naszych emocji czy przekonań.

³⁴Osińska Barbara, *Sztuka i czas od klasycyzmu do współczesności*, Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne Spółka Akcyjna 2005, s. 195.

W moich kreacjach, *design* jest zawsze estetyczny w najbardziej pierwotnym znaczeniu tego słowa: *związany ze zmysłami, związany ze spostrzeżeniem zmysłowym* (co, w starożytnej grece *aisthetikos*; znaczy również: *„zdolny odczuwać, wrażliwy*). Dlatego jest on związany z formą w estetycznym znaczeniu, czymś co posiada spostrzeżeniowy i subiektywny charakter. Wpływają na to doznania percepcyjne (dotyku czy wzroku), a aspekt subiektywny polega na indywidualnym odczuciu i zależny jest od indywidualnej perspektywy osoby, która podziwia czy nosi moją biżuterię. Zgadzam się ze stwierdzeniem Janusza Krupińskiego, że *„...w samym wyglądzie może być zawarty sens istnienia przedmiotu. Ujmując rzecz szerzej: forma sama może posiadać wartość i rację istnienia. Forma wynika z funkcji? W to twierdzenie wpisany jest mit przeznaczenia [...] Samym formom jako takim właściwa jest pewna energia, ekspresja, symbolika, aura, magia, estetyka – „same coś mówią”. Jakości te z kolei mogą być zgodne z naturą obiektu posiadającego taką formę, albo z nią sprzeczne”*.³⁵ Bruno Munari zauważa również: *„Skoro więc design nie jest ani stylem, ani sztuką stosowaną, to czym jest? Jest mianowicie projektowaniem — tak obiektywnym, jak to tylko możliwe — tego wszystkiego, co kształtuje otoczenie, w którym żyje dziś człowiek. Otoczenie to zaś składa się ze wszystkich obiektów wytwarzanych przez przemysł, od kieliszka po dom i miasto. Mówimy tu o projektowaniu wolnym od stylowych przesądów i od pragnienia bycia sztuką, o projektowaniu stanowiącym próbę nadawania każdej rzeczy jej własnej logicznej struktury, jej logicznej materii, a przez to i logicznej formy”*.³⁶

Andrzej Pawłowski przeciwstawia wzornictwo przemysłowe (industrial design) z wzornictwem plastycznym (określanym jako projektowaniem wyglądu). Podkreśla, że to pierwsze występuje wszędzie tam, gdzie przedmiot pełni funkcję użytkową. To drugie jest *dopuszczalne* tylko wtedy, gdy przedmiot pełni funkcje *dekoracyjne, estetyczne* (ale ze względu na pełnione funkcje w tym przypadku *cechy plastyczne miałyby być cechami dominującymi*)³⁷. Ja reprezentuję inny pogląd. Powyższy podział wydaje mi się błędny, gdyż przedmiot praktyczny (jak np. otwieracz do wina) może być użytkowy, a zrazem estetyczny. Zaprojektowany przedmiot pomimo tego, że jego główną bezwarunkową funkcją w tym przypadku jest użyteczność, nie wyklucza możliwości posiadania dominujących cech estetycznych, które rzucają się nie pierwszy plan. Forma i estetyka produktu mają kluczowe znaczenie dla wrażenia, jakie wywołuje on u potencjalnych klientów,

³⁵Krupiński Janusz, *Kulturowa dominacja designu*, „Wiadomości ASP/82”, Akademia Sztuk Pięknych w Krakowie, Kraków, 2018, s. 46.

³⁶Munari Bruno, *Dizajn i sztuka*, Wydawnictwo d2d.pl., Kraków, 2014, s. 33.

³⁷Pawłowski Andrzej, *Inicjacje. O sztuce, projektowaniu i kształceniu projektantów*, IWP, Warszawa, 1987. s. 45.

będąc podstawowym elementem, który wpływa pozytywnie na rozwój marek w dzisiejszych czasach.

*"Aktualnie zwraca się uwagę już nie na piękno przedmiotu, lecz na spójność formy, a zarazem uwzględnia się jego funkcję „dekoracyjną”, uznając ją za składnik psychologiczny. Dzieje się tak, ponieważ piękno jako takie może definiować to, co nazywamy stylem, i nadawać określony styl dowolnemu przedmiotowi po prostu dlatego, że stanowi on nowość”.*³⁸

Parametric design

Zarys historyczny

Otwierając swój przewód doktorski w 2013 roku, projektowanie parametryczne i techniki generatywne były dosyć nowym tematem, który głównie cieszył się zainteresowaniem wśród architektów. Architektura zawsze była inspiracją dla wielu moich działań twórczych w obszarze biżuterii.

Zanim jednak projektowanie parametryczne pojawiło się w architekturze, było już dobrze zakorzenione w przemyśle samochodowym, okrętowym i lotniczym. Jednym z powodów jego wdrażania była optymalizacja pracy jak i kosztów projektowania. W dzisiejszych czasach, tego typu innowacyjna technologia staje się coraz tańsza i daje możliwości kreowania skomplikowanych geometrycznych brył, jak i organicznych konstrukcji, co skutkuje powstawaniem, kiedyś niemożliwych do zrealizowania przestrzennych form. Pozwala ona na coraz szybsze i łatwiejsze rozwiązywanie problemów projektowych. Projektowanie parametryczne to również ostatnio coraz modniejsze słowo, które cieszy się wielkim zainteresowaniem, w biurach projektowych czy na uczelniach wyższych, gdzie pojawiają się oddzielne pracownie kształcące młodych architektów czy *designerów*.

³⁸Munari Bruno, *Dizajn i sztuka*, Wydawnictwo d2d.pl, Kraków, 2014, s. 29.

Istnieją różne wersje pochodzenia słowa *parametryczny* i związanej z nią technologią. W czasopiśmie *Punkt*³⁹ opublikowany został artykuł napisany przez Daniela Davis, który próbuje przybliżyć historię tego terminu. Uważa on, że nazwa *parametryczny* wywodzi się z matematyki - najwcześniej napotkany przez niego przykład użycia tego terminu do opisu modeli trójwymiarowych pojawił się w artykule Jamesa Dany z 1837 r. pt. *"O rysunku kształtów kryształów"*, gdzie wielokrotnie użyte zostały zwroty *parametry* czy *zmiennie*. Resa Assasi w swojej rozprawie na temat historii parametrycznego designu⁴⁰ powołuje się dodatkowo na dwa źródła, gdzie również to pojęcie zostało użyte - *"Geometrical Analysis and Geometry of Curve Lines"* napisana przez John Leslie w 1821⁴¹, oraz *"On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether"* napisaną przez Samuel Earnshaw w 1839 roku⁴². Podobnie Krystyna Januszkiewicz w swojej pracy opisuje parametr jako wartość obecną w równaniach i wyrażeniach matematycznych, która może być stała lub zmienna, w zależności od konkretnego przypadku. Na przykład temperatura może być parametrem, gdy jest stałą wartością w izotermicznej przemianie gazu, ale może być zmienna w innych rodzajach przemian.⁴³ Marcos Novak uważa, że zastępowanie stałych zmiennymi przy użyciu parametrów może prowadzić do generowania atrakcyjnych koncepcji architektonicznych. Poprzez zamianę stałych na zmiennie, można opisywać relacje między obiektami za pomocą równań matematycznych, które definiują asocjatywność geometrii⁴⁴ - to znaczy element geometrii, który powoduje wzajemne powiązanie obiektów ze sobą. Każda zmiana wartości parametru powoduje graficzną modyfikację. W świecie współczesnym nadal toczy się jednak dyskusja, kiedy projektanci zaczęli używać to słowo przy tworzeniu projektów.

³⁹www.punktmag.com, wyd. 13 [dostęp 22.05.2024].

⁴⁰https://www.academia.edu/41325381/Parametric_Design_A_Historical_and_Theoretical_Overview [dostęp 20.04.2024].

⁴¹Leslie J., *Geometrical Analysis and Geometry of Curve Lines*, Edinburgh: W. & C.Tait, 1821.

⁴²Earnshaw S., *On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether*, "Transactions of the Cambridge Philosophical Society 7", 1839. s. 97-112.

⁴³Januszkiewicz Krystyna, *Projektowanie parametryczne oraz parametryczne narzędzia cyfrowe w projektowaniu architektonicznym*, „ARCHITECTURAE et ARTIBUS” - 3/2016, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury 2016, s. 50.

⁴⁴Novak M., *Transarchitectures and Hypersurfaces*, (w:) di Cristina Giuseppe (red.), *Architecture and Science*, Wiley-Academy Edition, London, 1998, s. 153-157.

"Przed powstaniem pierwszych komputerów architekci posługiwali się prostymi narzędziami manualnymi, jak prawdziwi rzemieślnicy"⁴⁵.

Ku mojemu zaskoczeniu, jeden z takich przykładów napotkałem, podczas wizyty w Sagrada Família w Barcelonie, w twórczości Antoniego Gaudiego. W jego projektach również można doszukać się nawiązań czy metodologii myślenia i działania powiązanych z projektowaniem parametrycznym, m.in. w projekcie kościoła Colonia Güell. Do poszukiwania formy oraz do zaprojektowania złożonych form strukturalnych użył on tak zwanej krzywej łańcuchowej zgodnie z prawem Hooke'a:⁴⁶ „... krzywa płaska, której kształt przyjmuje doskonale nierozciągliwa i nieskończenie wiotka lina o niezerowej, jednostajnie rozłożonej masie”⁴⁷. Tłumacząc to, lina samodzielnie znajduje kształt równowagi. Kształt linii obciążonej własnym ciężarem zależy od różnych parametrów, takich jak właściwości materiału (na przykład gęsty splątany sznur lub sztywny łańcuch z przegubowymi przęsłami), długość liny oraz jej rozpiętość podczas zawieszenia. Inne czynniki to rozmieszczenie i wielkość sił skupionych w konkretnych punktach. W takiej konstrukcji, gdzie abstrakcyjne czynniki są wykluczone, nie można pominąć podstawowego parametru - działania grawitacji. Gaudi w swoich strukturach użył tak zwanych *systemów analogowych* (linek), które były obciążone woreczkami ze śrutem. W taki sposób zarysował on projektowaną konstrukcję. Następnie robił zdjęcie i odwracał je do góry nogami, aby później naszkicować na nim docelowy projekt budowli. Dzięki zastosowaniu tej innowacyjnej metody, opartej na dynamice ruchu i grawitacji, Gaudí wynalazł własne języki architektury i osiągnął swój największy architektoniczny cel – udoskonalił i wyszedł poza styl gotycki. Z uwagi na fakt, że Antoni Gaudi tworzył projekty w trakcie postępu prac, można wyróżnić dwa rodzaje makiet. Pierwsze z nich służyły do badania konstrukcji i pozwalały na znalezienie początkowej formy (il. 1.6 oraz il. 1.7). Drugi rodzaj to makiety szczegółowe, skupiające się na detalach projektu modelu Colonia Güell (il. 1.8). Dzięki takiemu działaniu Gaudi zamiast manualnie obliczać wyniki z parametrycznego wzoru krzywej łańcuchowej, mógł automatycznie, dzięki oddziaływaniu grawitacji na sznurki, wyznaczać kształt tych krzywych. Niestety, konstrukcja

⁴⁵Burly J., Burly M., *Prototyping for architects*, Thames & Hudson, Londyn, 2016, s. 23.

⁴⁶„...prawo mechaniki określające zależność odkształcenia od naprężenia. Głosi ono, że odkształcenie ciała pod wpływem działającej na nie siły jest proporcjonalne do tej siły”, źródło https://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo_Hooke%E2%80%99a [dostęp 22.04.2024].

⁴⁷https://pl.wikipedia.org/wiki/Krzywa_%C5%82a%C5%84cuchowa [dostęp 22.04.2024].

nigdy nie została w pełni ukończona. Klientowi, hrabiemu Eusebi de Güell, zabrakło pieniędzy, więc ukończono tylko kryptę tego kościoła.



Il. 1. 6 Model zaprojektowanego przez Antoniego Gaudí kościoła w Colonia Güell. Źródło: Wystawa w Sagrada Familia muzeum. Zbiory własne.



Il. 1. 7 Reprodukacja modelu zaprojektowanego przez Antoniego Gaudí kościół Colonia Güell. Źródło: Wystawa w Sagrada Familia muzeum. Zbiory własne.



Il. 1. 8 Projekt kościoła Colonia Güell. Źródło: <http://www.fabb.cc/publication/digitalread-analogwrite>

Metoda analogicznych obliczeń została rozwinięta przez Frei Otta⁴⁸, wykorzystał on minimalne powierzchnie wywodzące się z błon mydlanych oraz minimalne ścieżki uzyskiwane przy użyciu wełny zanurzonej w cieczy. Otto opisuje projektowanie za pomocą tych modeli jako *poszukiwanie kształtu*, co podkreśla eksploracyjny charakter modelowania parametrycznego. Z takim podejściem do projektowania i *poszukiwaniu kształtu*, bryły czy struktury odnalazłem podczas pracy nad projektami z mojej kolekcji.

⁴⁸Frei Otto, Rasch Bodo, *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. Stuttgart: Axel Menges, 1996.



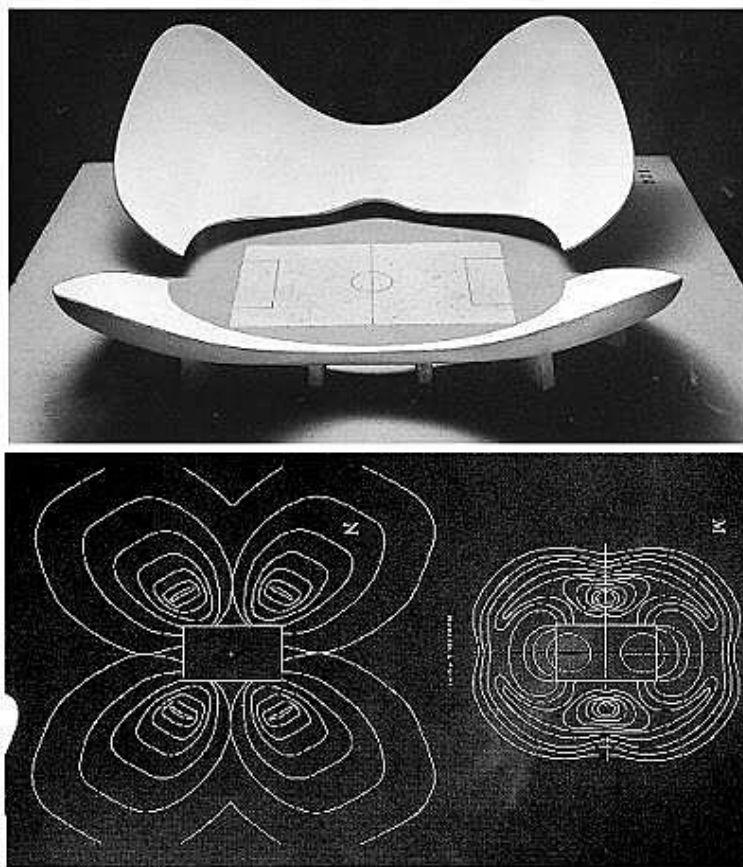
Il. 1. 9 Frei Otto, Stadion Olimpijski w Monachium. Źródło: <https://sztuka-architektury.pl/article/7953/frei-otto-nagroda-pritzkera-2015>

David Gerber w swojej pracy doktorskiej "*Parametric Practice*" przypisuje pierwsze użycie terminu *parametryczny* Maurice'owi Ruitrowi w artykule z 1988 roku zatytułowanym "*Parametric Design*"⁴⁹. Natomiast tezę Davida Gerbera podważają Federico Bucci i Marco Mulazzani - badacze twórczości włoskiego architekta Luigi Morettiego⁵⁰. Zainteresowania Morettiego często obejmowały kwestię *architektury parametrycznej*, którą interpretował jako eksplorację systemów architektonicznych z perspektywy celu, jakim jest forma, która może być uzyskana poprzez „określenie relacji pomiędzy wymiarami uzależnionymi od różnych

⁴⁹Ruiter Maurice, *Advances in Computer Graphics III*. Berlin: Springer-Verlag, 1998.

⁵⁰Bucci Federico, Mulazzani Marco, Moretti Luigi, *Works and Writings*. New York: Princeton Architectural Press 2000, s. 21.

parametrów”⁵¹. Przeprowadził on, w latach 1940 i 1942, serię badań pod tytułem „*Architettura Parametrica*” na temat relacji między projektem architektonicznym, a równaniami parametrycznymi. Te pierwsze badania pozbawione były możliwości wykorzystania komputera i jego zalet. Dopiero wraz z rozwojem technologii, jako ilustrację swoich koncepcji, Moretti stworzył projekt stadionu sportowego za pomocą komputera *IBM 610*, który demonstruje, w jaki sposób forma takiego obiektu może być wynikiem uwzględnienia dwunastu różnych parametrów, takich jak np. krzywizna, kąt patrzenia oraz ekonomiczność kosztów związanych z konstrukcją żelbetową. W trakcie trwania *XII Triennale Mediolańskiego* w roku 1960, podczas autorskiej wystawy *Parametric Architecture*, zaprezentowano projekt tego stadionu.⁵²



Il. 1. 10 Na wystawie *Architektury Parametrycznej*, która odbyła się w ramach *XII Triennale Mediolańskiego* w 1960 roku, zaprezentowano makietę stadionu *N* zaprojektowanego na podstawie dwunastoelementowego modelu parametrycznego autorstwa Luigiego Morettiego. Źródło: https://www.researchgate.net/figure/The-plans-for-the-stadium-model-by-Luigi-Moretti-9_fig2_365062544Il. 2.10

⁵¹Moretti Luigi, *Ricerca Matematica in Architettura e Urbanistica*, “Moebius IV” no. 1, 1971, s. 30-53.

⁵²Bucci Federico, Mulazzani Marco, Moretti Luigi, *Works and Writings*. New York: Princeton Architectural Press, 2000, s. 114.

Pięć lat później, Moretti zaprojektował kompleks budynków *Watergate* (1962-1971). Obecnie dla wielu osób spoza świata architektury i sztuki, ten budynek utożsamiany jest bardziej z aferą podsłuchową, niż z zastosowaniem innowacyjnych obliczeń inspirowanych koncepcją Morettiego.

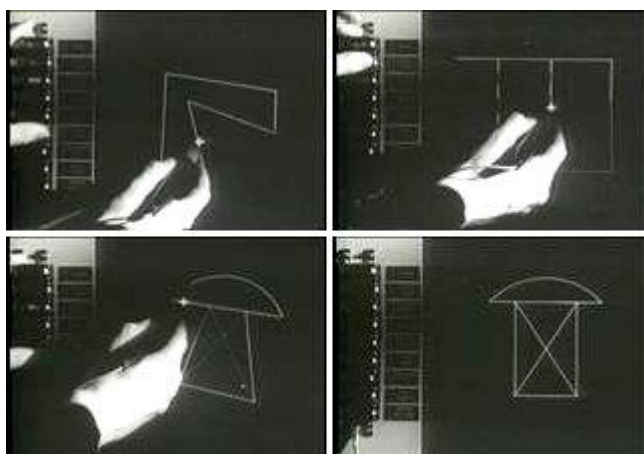


Il. 1. 11 *Watergate complex*. Źródło: <https://www.archdaily.com/889831/the-architecture-of-washington-dcs-watergate-complex-inside-americas-most-infamous-address>



Il. 1. 12 *Watergate Complex - widok z balkonu*. Źródło: <https://www.archdaily.com/889831/the-architecture-of-washington-dcs-watergate-complex-inside-americas-most-infamous-address>

Ważnym aspektem w rozwoju projektowania parametrycznego, było zaprezentowanie przez Ivana Sutherlanda urządzenia *SketchPad*, do którego wykorzystał potencjał obliczeniowy komputera TX-2. Tak powstał pierwszy interaktywny program komputerowy do projektowania, dzięki któremu za pomocą cienkopisu projektanci mogli rysować linie i łuki, które następnie były powiązane za pomocą tego, co Sutherland nazywał *atomic constraints*⁵³ (ograniczeniami atomowymi)⁵⁴. W swoich publikacjach nigdy nie użył słowa *parametryczny*, natomiast *atomic constraints* posiada wszystkie podstawowe właściwości równania parametrycznego - każde ograniczenie ma zestaw wyników wyrażonych jako wyraźna funkcja szeregu niezależnych parametrów, czyli każda zmiana parametrów modelu wpływała na określanie fundamentalnych zależności między elementami modelu. Architekci mieli możliwość dostosowywania parametrów we wzorach matematycznych, a program automatycznie przeliczał i aktualizował geometrię. W tamtym czasie trudno było przewidzieć, jak ogromny wpływ wynalazek Sutherlanda będzie miał na praktykę projektową w kolejnych dekadach.



Il. 1. 13 Pierwsze rysunki na urządzeniu SketchPad. Źródło: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sketchpad>

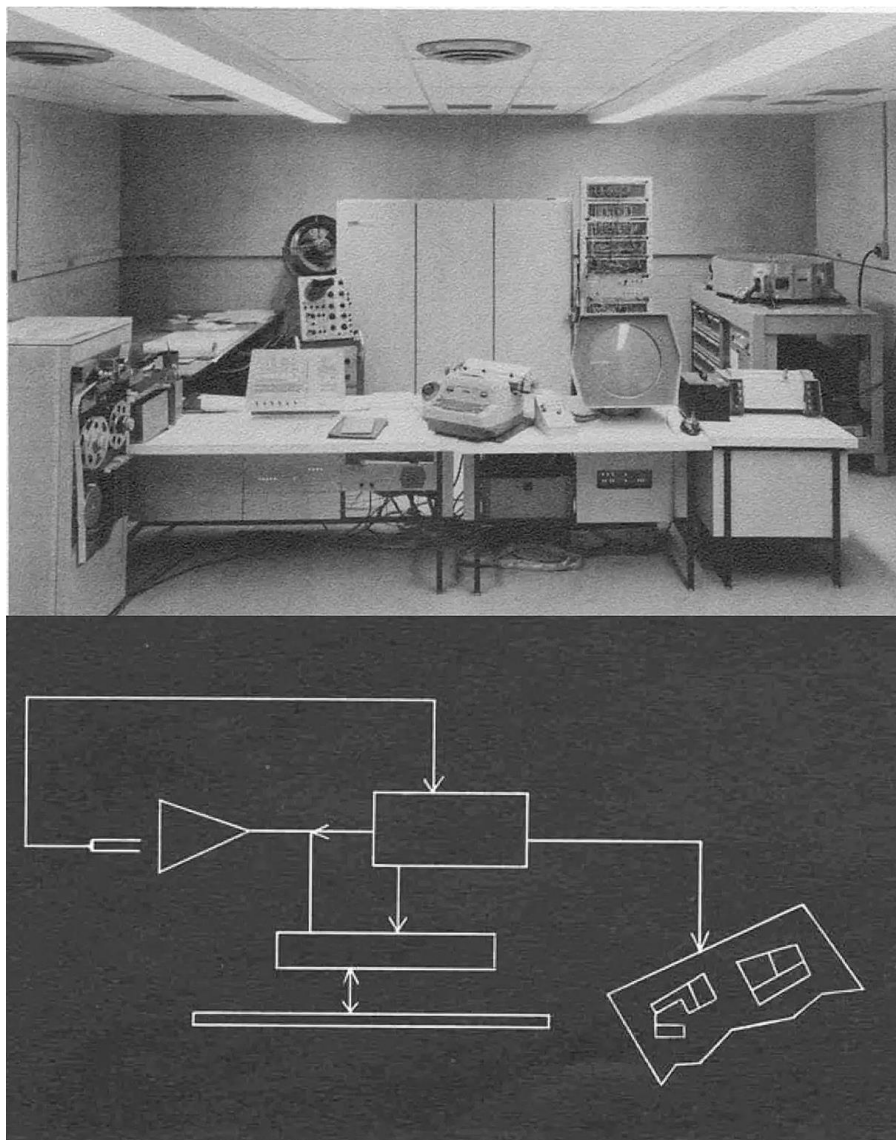
Ze względu na wysokie koszty komputerów, na początku istnienia projektowania wspomagane komputerowo (*CAD - Computer Aided Design*)⁵⁵, technologia nie była ogólnie dostępna, nie była popularną w praktyce architektonicznej. Wczesne systemy komercyjne, takie jak *Electronic Drafting Machine* firmy Itek, kiedy zostały wprowadzone na rynek w 1962 roku, kosztowały

⁵³Sutherland Ivan, *SketchPad: A Man-Machine Graphical Communication System*, PhD dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 1963.

⁵⁴Tłumaczenie własne.

⁵⁵https://pl.wikipedia.org/wiki/Projektowanie_wspomagane_komputerowo [dostęp 17.06.2023].

równowartość 3,5 miliona dolarów za jedno stanowisko⁵⁶ (il. 1. 14). Był to koszt możliwy do udźwignięcia tylko przez wybrane firmy z branży motoryzacyjnej i lotniczej.



Il. 1. 14 Komputer Itak i powstały za jego pomocą rysunek. Źródło: Daniel Davis, <https://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric>

Dopiero w 1982 roku, dzięki pojawieniu się dwóch modeli komputerów PC (*Personal Computer*) *Commodore 64*⁵⁷ oraz *ZX Spectrum*, sytuacja zmieniła się ze względu na diametralnie niższą cenę urządzeń. W tym samym roku pojawił się program *AutoCAD*. Od tamtego momentu projektanci

⁵⁶<https://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/> [dostęp 17.06.2023].

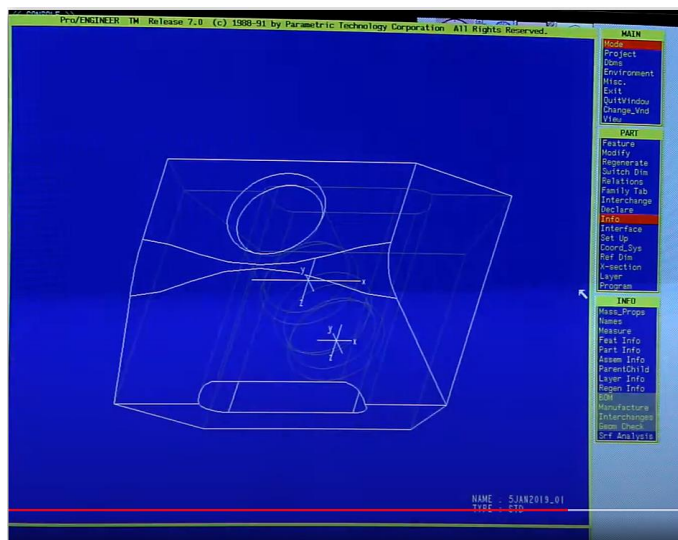
⁵⁷Najlepiej sprzedający się komputer wszech czasów, z łączną sprzedażą wynoszącą 17 milionów egzemplarzy, https://pl.wikipedia.org/wiki/Komputer_osobisty [dostęp 20.06.2023].

mieli możliwość rysowania dwuwymiarowych obiektów na ekranie za pomocą klawiatury i myszki. Jednak funkcjonalność projektowania parametrycznego z interfejsem graficznym została dodana do programu dopiero w wersji *AutoCAD 2010*⁵⁸, czyli 43 lata od pojawienia się programu *SketchPad*, co zostało okrzyknięte przez firmę *otwarcie nowych możliwości*. Natomiast od samego początku *AutoCAD* zapewniał projektantom narzędzia do tworzenia skryptów parametrycznych w ramach pakietu *scripting interface*. Trudność w korzystaniu z tego mechanizmu polegała na wymaganej znajomości z zakresu podstawowych pojęć związanych z programowaniem, takich jak zmienne, pętle, instrukcje warunkowe itp., czyli podstaw informatyki. Stanowiło to wielki problem dla niektórych projektantów, którzy nie mieli wystarczającej wiedzy technicznej w zakresie programowania.

Natomiast to, co oferował *AutoCad* w 2010 nie było wcale nowością. Pierwszym komercyjnym i popularnym oprogramowaniem do inżynierii parametrycznej był *Pro/ENGINEER* wydany w 1988 roku przez *Parametric Technology Corporation*. Firma ta była założona w 1985 r. przez matematyka Samuela Geisberga. Podobnie jak w programie *SketchPad*, użytkownicy *Pro/ENGINEER* mieli możliwość łączenia ze sobą elementów, tym razem trójwymiarowych zamiast dwuwymiarowych, korzystając z równań parametrycznych. To oznaczało przechodzenie do projektowania w trzecim wymiarze, gdzie syntetyczna przestrzeń stawała się rzeczywistością wirtualną i medium projektowym. Dzięki powiązaniom geometrycznym, zmiany wprowadzane na jednym z rysunków 3D automatycznie przenoszą się na pozostałe, które tworzone są przez różnych użytkowników. Program ten nie tylko ułatwiał dostosowanie się do zmieniających się wymagań klientów, ale także stymulował kreatywność i innowacyjność projektantów, minimalizując koszty.⁵⁹ Do dnia dzisiejszego jest szeroko stosowanym i popularnym narzędziem do tworzenia grafiki 3D.

⁵⁸<https://mundogeo.com/en/2009/02/09/autodesk-takes-3d-design-and-documentation-to-next-level-with-autocad-2010/> [dostęp 20.06.2023].

⁵⁹<https://novedge.com/blogs/design-news/design-software-history-evolution-of-cad-from-sketchpad-to-pro-engineer-and-beyond> [dostęp 25.06.2023].



Il. 1. 15 Zdjęcie pokazujące model przestrzenny stworzony w programie Pro/ENGINEER z 1988 roku. Źródło: https://www.youtube.com/embed/tY_Gy-EElc0

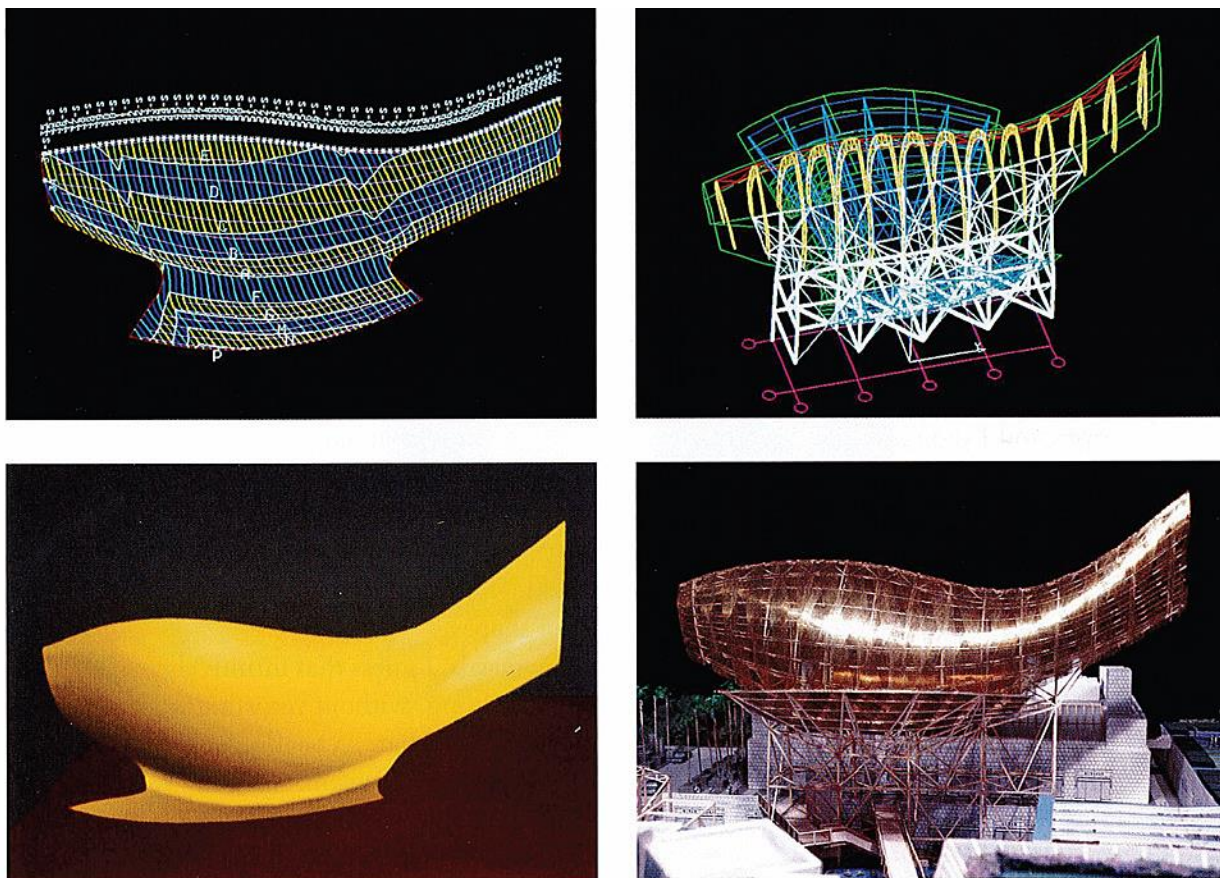
Największe zmiany przyniosły lata dziewięćdziesiąte, które były okresem dynamicznego rozwoju kultury komputerowej, co wiązało się z szybkim wzrostem mocy obliczeniowej komputerów oraz rozwinięciem grafiki 3D. Powstało wiele programów i systemów, które były modyfikowane i dostosowywane do potrzeb określonej gałęzi przemysłu.

Jednym z przykładów takiej modyfikacji jest biuro projektowe *Gehry Partners*, które poprzez ograniczenia finansowe i harmonogramowe projektów skłoniły Jamesa M. Glympha, partnera w firmie, do poszukiwania programu komputerowego, który ułatwiłby proces projektowania i budowy. Doprowadziło to do zatrudnienia Ricka Smitha eksperta od programu *CATIA* (*Computer Aided Three-dimensional Interactive Application*)⁶⁰. Został on od razu wciągnięty do pracy nad wyzwaniem związanym z projektem i realizacją ikonicznego obiektu w Barcelonie *Golden Fish*, który miał powstać na nabrzeżu na potrzeby Igrzysk Olimpijskich w 1992 roku. Ciekawostką jest to, że cały proces od projektu, poprzez testy i wytworzenie, przetransportowanie, jak i zbudowanie na wyznaczonym miejscu, zajęło rekordowy czas siedmiu miesięcy⁶¹. Ta rzeźba ryby była również kamieniem milowym w historii firmy *Frank O. Gehry & Associates*, inaugurując

⁶⁰<https://pl.wikipedia.org/wiki/CATIA> [dostęp 25.06.2023].

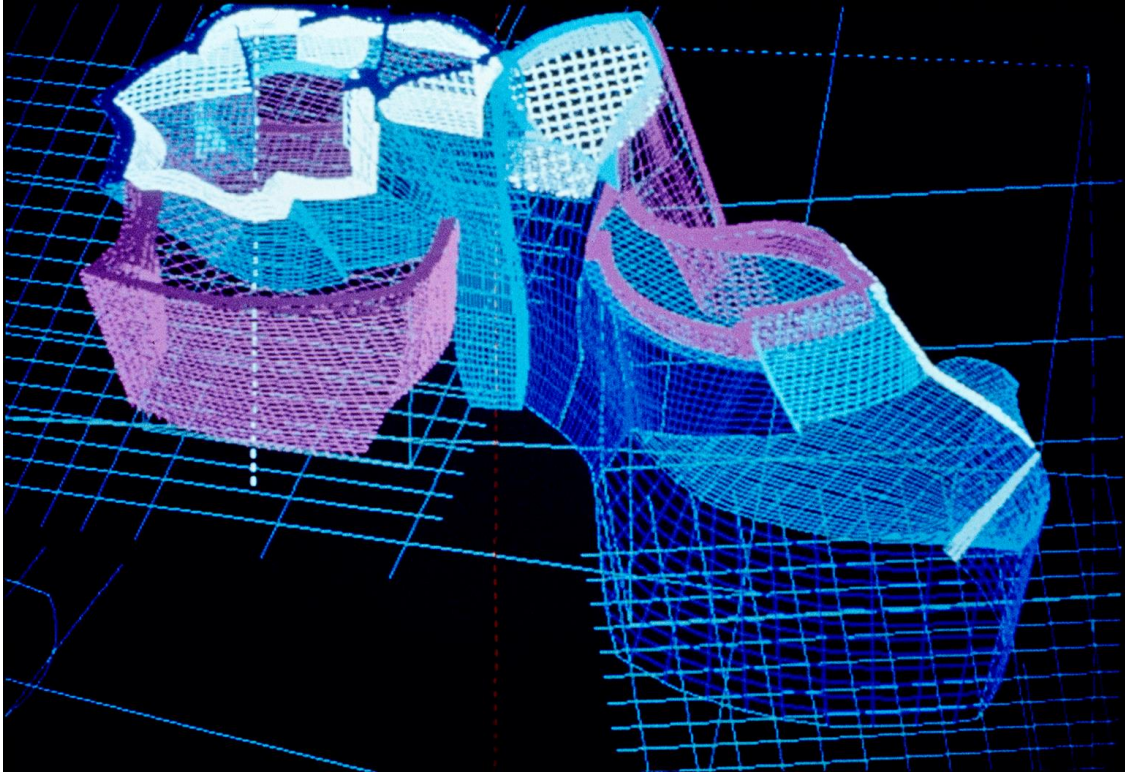
⁶¹<https://www.permasteelgroup.com/project-detail?project=1980> [dostęp 18.06.2023].

tą realizację stosowanie przez firmę procesu projektowania i produkcji wspomaganego komputerowo.



Il. 1. 16 Rzeźba *Golden Fish*. Projekt Frank Gehry wymodelowany przez Ricka Smitha za pomocą programu CATIA, 1992.
Źródło: <https://www.designboom.com/design/dassault-systemes-xgenerative-design-tool-09-17-2020/>

Frank Gehry i Rick Smith współpracowali również przy tworzeniu *Muzeum Guggenheima* w Bilbao, które zostało otwarte dla publiczności w 1997 roku. Tutaj także wykorzystano technologię komputerową. Jego wyjątkowa architektura stała się ikoną i symbolem miasta Bilbao. Budynek składa się z organicznych kształtów, które są pokryte zewnętrzną skorupą z tytanowej blachodachówki, zwanej *luskami*. To futurystyczne i innowacyjne podejście do architektury przyczyniło się do międzynarodowej sławy muzeum, które zostało uznane za najważniejsze dzieło architektury powstałe od 1980 roku i okrzyknięte *momentem przełomowym w kulturze architektonicznej*.



Il. 1. 17 Projekt Guggenheim Muzeum wykonany przez Ricka Smitha w programie CATIA. Źródło: <https://achievement.org/achiever/frank-gehry/>



Il. 1. 18 Guggenheim Muzeum w Bilbao, projekt Frank Gehry. Źródło: <https://www.guggenheim-bilbao.eus/en/the-building>

Prace tego charakteru stanowią istotny obszar działań powiązanego przedsiębiorstwa *Gehry Technology*, które jest blisko związane z firmą *Gehry Partners*. *Gehry Technology* zostało założone w 2001 roku i w 2004 roku wprowadziło na rynek oprogramowanie do modelowania parametrycznego pod nazwą *Digital Project*.

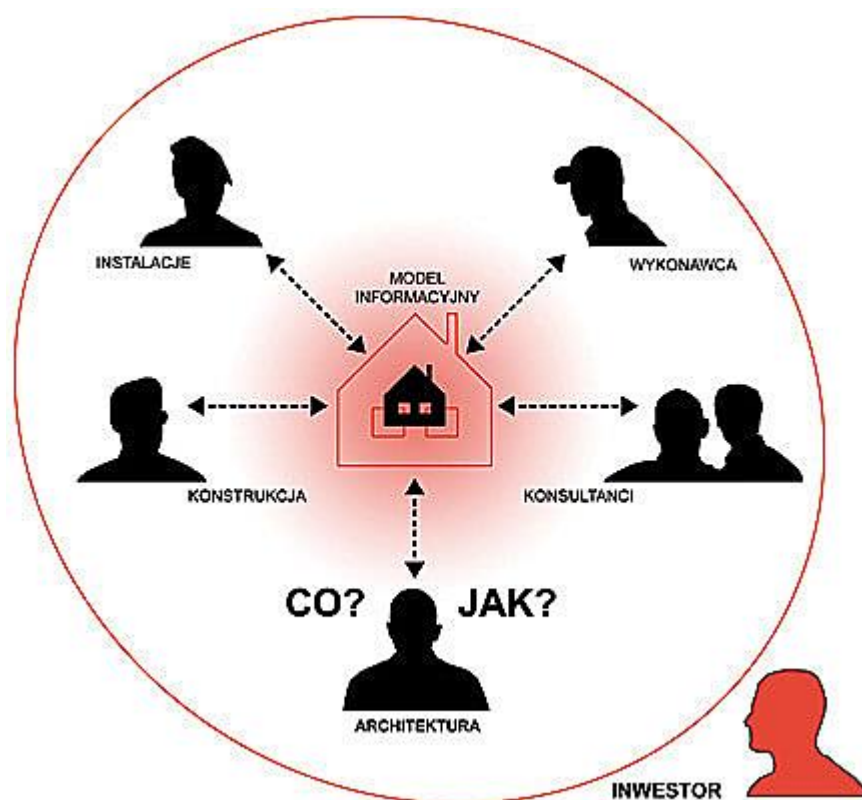
W międzyczasie powstaje wiele innych programów wspomagających prace na komputerze, zastępując stoły kreślarskie w biurach architektonicznych, takich jak np. *ArchiCAD* czy stworzony przez twórców *Parametric Technology (pro/ENGINEER)* program *Revit*. Zmiana jaka nastąpiła w programie *Revit* to wprowadzenie terminu *BIM (Building Information Modeling)*⁶², który odnosi się do procesu tworzenia i zarządzania cyfrowym modelem informacyjnym budynku lub infrastruktury. Modelowanie informacji o budynku (*BIM*) jest odzwierciedleniem szeroko przyjętej w wielu gałęziach przemysłu – na przykład samochodowym, lotniczym, stoczniowym – koncepcji modelowania informacji o produkcie (*Product Information Modeling*), zaadaptowanej do potrzeb budownictwa⁶³. Model *BIM* zawiera nie tylko geometrię obiektu, ale również szeroki zakres danych o powstającym budynku. Stanowi to dla inwestorów niezwykle skuteczne narzędzie do kontroli procesu projektowego i nadzoru nad projektantami. Możliwość wcześniejszego wykrywania konfliktów pomaga ograniczyć kosztowne błędy, a wczesna analiza nietypowych rozwiązań eliminuje nieprzyjemne niespodzianki i nie wpływa negatywnie na termin realizacji. Zapewnia to także ciągłą weryfikację inwestycji od etapu projektu aż do zakończenia budowy.

Główną różnicą pomiędzy technologią *BIM*, a projektowaniem parametrycznym jest jego zakres. *BIM* obejmuje cały cykl życia projektu, począwszy od koncepcji i projektowania, aż po budowę, eksploatację i demontaż. Model *BIM* jest wykorzystywany jako centralne źródło informacji dla wszystkich zaangażowanych stron w projekcie (takich jak architekci, inżynierowie, wykonawcy i właściciele budynków). Wszyscy uczestnicy mają dostęp do jednego centralnego modelu informacji o budynku, co ułatwia koordynację i eliminuje błędy. Projektowanie parametryczne skupia się głównie na etapie projektowania i eksplorowaniu różnych możliwości projektowych w oparciu o zdefiniowane parametry. Nie obejmuje ono szerokiego zakresu informacji o budynku lub infrastrukturze, takich jak koszty czy harmonogramy. Oczywiście

⁶²Więcej na ten temat na: https://pl.wikipedia.org/wiki/Building_Information_Modeling lub <http://www.informatykawbudownictwie.pl/aktualnosci/bim-geneza-i-praktyka/> [dostęp 10.06.2023].

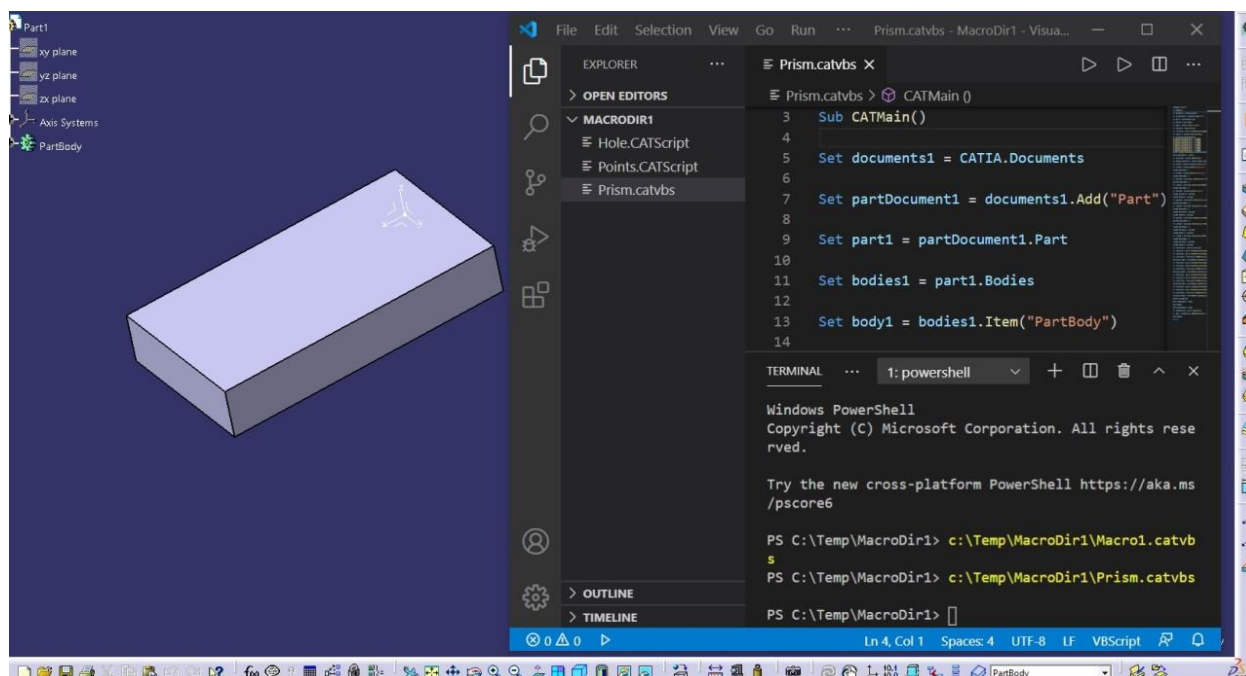
⁶³See R., *Building Information Models and Model Views*, "Journal of Building Information Modeling", Fall 2007, NIBS, Washington D.C., s. 20-25.

oba podejścia mogą być używane jednocześnie lub niezależnie od siebie, aby poprawić efektywność i jakość procesu projektowania.



Il. 1. 19 Organizacja zespołu pracującego przy wykorzystaniu Building Information Modeling (BIM), rys. Piotr Bujak. Źródło: <http://www.informatykawbudownictwie.pl/aktualnosci/bim-geneza-i-praktyka/>

Sprawne modelowanie parametryczne często wymaga korzystania z interfejsów skryptowych, które są często dostarczane w niektórych pakietach oprogramowania. Skryptowanie jest sposobem komunikacji z komputerem, mówiąc mu, co ma zrobić. Jednak komputer będzie w stanie zrozumieć przekaz tylko wtedy, gdy będzie to wyrażone w języku zrozumiałym dla tego urządzenia.



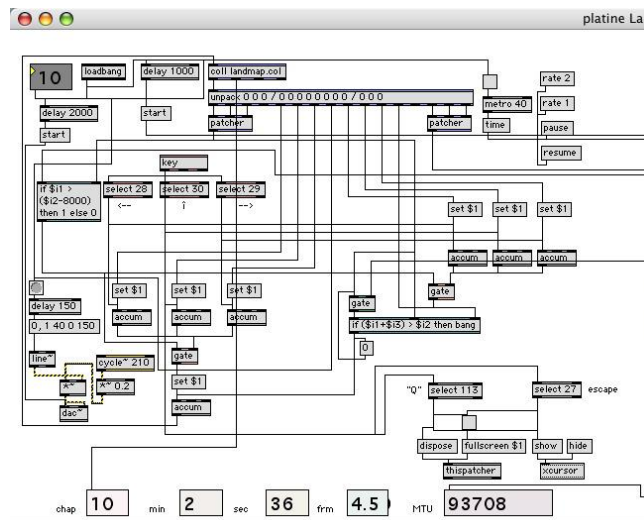
Il. 1. 20 Przykład prostego skryptu w programie CATIA. Źródło: <https://www.linkedin.com/pulse/which-editor-catia-scripts-fernando-petre>

Momentem przełomowym w moim odczuciu był rok 1990, kiedy to powstały dwa *interfejsy wizualne*: MAX/MSP. Ze względu na możliwość programowania efektów artystycznych jeden zdobył popularność wśród muzyków, a drugi wśród artystów wizualnych. W tego typu projektowaniu nie trzeba posiadać już podstaw informatyki, jak w systemach takich jak *Python*⁶⁴, *JavaScript*⁶⁵, *Ruby*⁶⁶ itp. Interfejs wizualny opiera się na konfiguracji graficznych elementów interfejsu, bez konieczności bezpośredniego pisania kodu. Niewątpliwie, jest to bardziej intuicyjne i prostsze w obsłudze, szczególnie dla artystów, bez doświadczenia programistycznego.

⁶⁴<https://vavatech.pl/technologie/jezyki-programowania/Python> [dostęp 20.06.2024].

⁶⁵<https://www.ovhcloud.com/pl/learn/what-is-javascript/> [dostęp 20.06.2024].

⁶⁶<https://vavatech.pl/technologie/jezyki-programowania/ruby> [dostęp 20.06.2024].



Il. 1. 21 Zdjęcie przedstawiające stary interfejs MAX/MSP. Źródło [https://www.wikiwand.com/en/Max_\(software\)](https://www.wikiwand.com/en/Max_(software))

Grasshopper

Jako projektant biżuterii w swojej codziennej pracy korzystam z programu, którego bazą jest *Rhinoceros* (Robert McNeel & Associates)⁶⁷, dlatego z mojej perspektywy istotnym momentem historycznym było zatrudnienie przez firmę programisty Davida Ruttena. Dzięki jego pracy w 2007 roku udostępniono do testów produkt o nazwie *Explicit History*, którego twórca wkrótce zmienił nazwę na *Grasshopper* (potocznie określany jako *GH* przez użytkowników tego programu). Jest to program, który dał mi możliwości projektowe do stworzenia moich kolekcji.



Il. 1. 22 Zdjęcie przedstawiające pierwszą wersję Explicit History w programie Rhinoceros. Źródło: <https://wiki.mcneel.com/labs/explicithistory/expressionlanguage>

⁶⁷https://en.wikipedia.org/wiki/Rhinoceros_3D lub <https://rhinoceros.com.pl/informacje-o-produkcie/20/program-do-projektowania-3d-rhino> lub <https://www.rhino3d.com/> [dostęp 13.06.2023].

Od początku powstania *GH* był parametryczną nakładką do programu *Rhinoceros* (w skrócie *Rhino* albo *Rhino3D*). Dopiero od wersji *Rhino* 6⁶⁸ jest on jego integralną częścią, która po uruchomieniu otwiera się w niezależnym oknie. Wcześniej należało pobrać go z zewnętrznej witryny i przeprowadzić odpowiednią instalację, co spotykało się często z wieloma problemami wśród użytkowników. Należało na przykład dopasować odpowiednią wersję *Grasshoppera* do konkretnej wersji *Rhinocerosa*.



Il. 1. 23 Zdjęcie aktualnej wersji wtyczki na której powstały prace w mojej rozprawie doktorskiej. Źródło: zrzut ekranu z programu.

Na rynku jest niewiele książek związanych z nauką tego programu. Jedną z nich jest książka w prof. Davida Bachamana⁶⁹, w której wprowadza on nowego użytkownika w świat projektowania parametrycznego, pokazując podstawowe narzędzia do pracy z interfejsem wizualnym. Książka zawiera informacje dotyczące podstawowych koncepcji, interfejsu użytkownika, tworzenia algorytmów, pracy z parametrami i danymi geometrycznymi, jak również wiele przykładów i ćwiczeń. Gdy zaczynałem pracę w programie wiele lat temu, nie było skąd pozyskiwać szerszej, bardziej zaawansowanej wiedzy. Możliwe to było jedynie poprzez specjalistyczne kursy w tej tematyce, których w Polsce było bardzo mało. Warto zauważyć, że większość materiałów edukacyjnych dotyczących *Grasshoppera* w dzisiejszych czasach jest dostępna online, szczególnie na platformie *YouTube*, gdzie codziennie dodawane są nowe poradniki z zakresu projektowania parametrycznego. Istnieje również wiele kursów internetowych, samouczków wideo i społeczności na forach, które oferują bogate źródło informacji i nauki. Przykłady takich zasobów online to *Grasshopper3D.com*, gdzie można znaleźć oficjalną dokumentację, forum dyskusyjne i wiele poradników. Ponadto, platformy edukacyjne, takie jak *Udemy*

⁶⁸<https://www.rhino3d.com/6/new/grasshopper/> [dostęp 15.05.2024].

⁶⁹Bachman David, "Grasshopper: Visual Scripting for Rhinoceros 3D (Volume 1)", First Edition, Industrial Press, Inc., 2017.

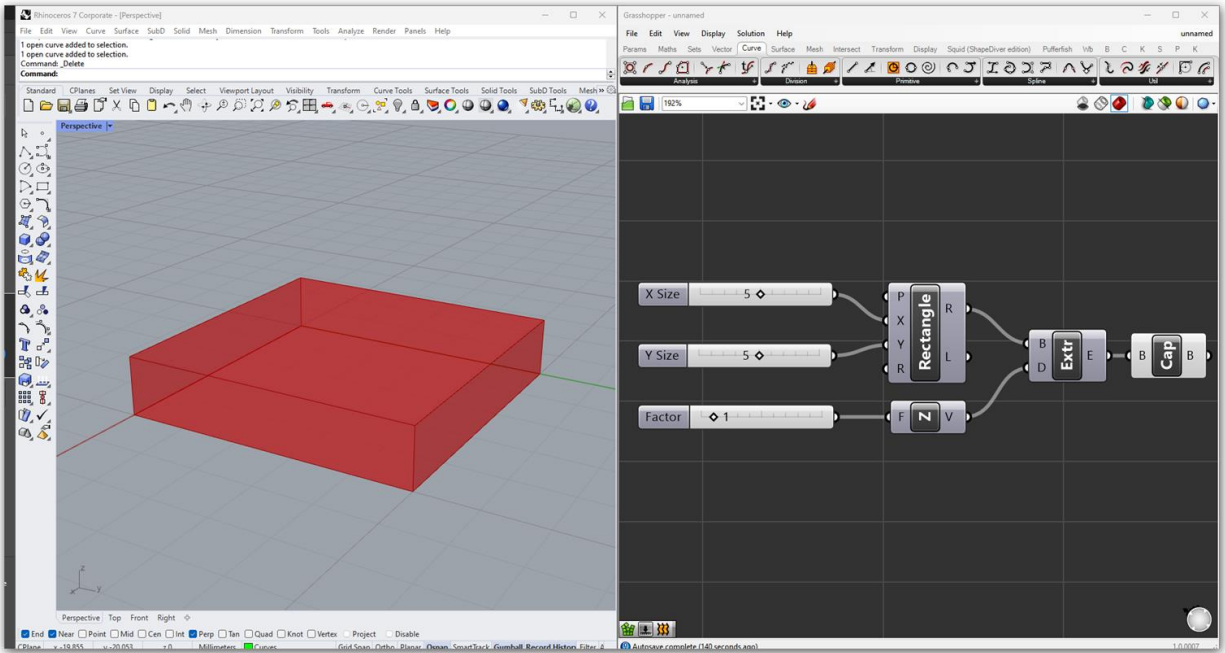
czy Coursera, oferują wiele kursów online związanych z *Grasshopperem*, które są dostępne dla wszystkich zainteresowanych nauką tego narzędzia. Istnieją również oficjalne, darmowe wydania online podręcznika wprowadzającego w tą tematykę, takie jak np. "*The Grasshopper Primer*"⁷⁰. Osoby zainteresowane mają możliwość eksploracji bardziej specjalistycznych funkcji oraz rozbudowywania możliwości programu za pomocą wtyczek, które dodają takie możliwości, jak symulacje oparte na fizyce (szczególnie znana wtyczka *Kangaroo* stworzone przez Daniela Pikera⁷¹), rozszerzają zdolność do pracy z siatkami, dostarczają narzędzi do projektowania w specjalistycznych dziedzinach (zwłaszcza architektury i jubilerstwa) oraz umożliwiają interakcję z innymi urządzeniami, takimi jak *Arduino* czy *Kinect* firmy *Microsoft*. Użytkownicy z doświadczeniem w programowaniu mogą nadal tworzyć własne komponenty *Grasshoppera*, korzystając z języków takich jak *Visual Basic*⁷², *C#*⁷³ i *Python*. Dla osób takich jak ja, które codziennie pracują w programie *Rhinoceros*, wiele funkcji, komponentów czy poleceń w *Grasshopperze* jest takich samych jak w *Rhino*, a zatem łatwych do zrozumienia. Jednak sposób pracy znacznie się różni. Największym wyzwaniem jest nauczenie się organizacji danych (obiekty geometryczne, operacje modelowania i dane liczbowe) w postaci list i drzew danych. Dlatego nauka sposobu korzystania z tych narzędzi, a co za tym idzie zmiana sposobu myślenia, wymaga dużo czasu i wysiłku. Praca na tej nakładce odbywa się poprzez tworzenie wizualnych skryptów, które opisują procesy projektowania i manipulacji geometrią. *GH* posiada intuicyjny interfejs, który umożliwia użytkownikom łączenie różnych komponentów w graficzny sposób, tworząc w ten sposób logiczne sekwencje działań. Prostym przykładem jest definicja z ilustracji poniżej, która mówi o tym, że został stworzony prostokąt z krzywych o wymiarach 5x5 mm. Następnie został on wyciągnięty w osi Z na wysokość 1 mm, a następnie zamknięty tak, aby powstała pełna, spójna bryła 3D.

⁷⁰<http://grasshopperprimer.com/> [dostęp 28.06.2023].

⁷¹<https://www.food4rhino.com/en/app/kangaroo-physics> [dostęp 28.06.2023].

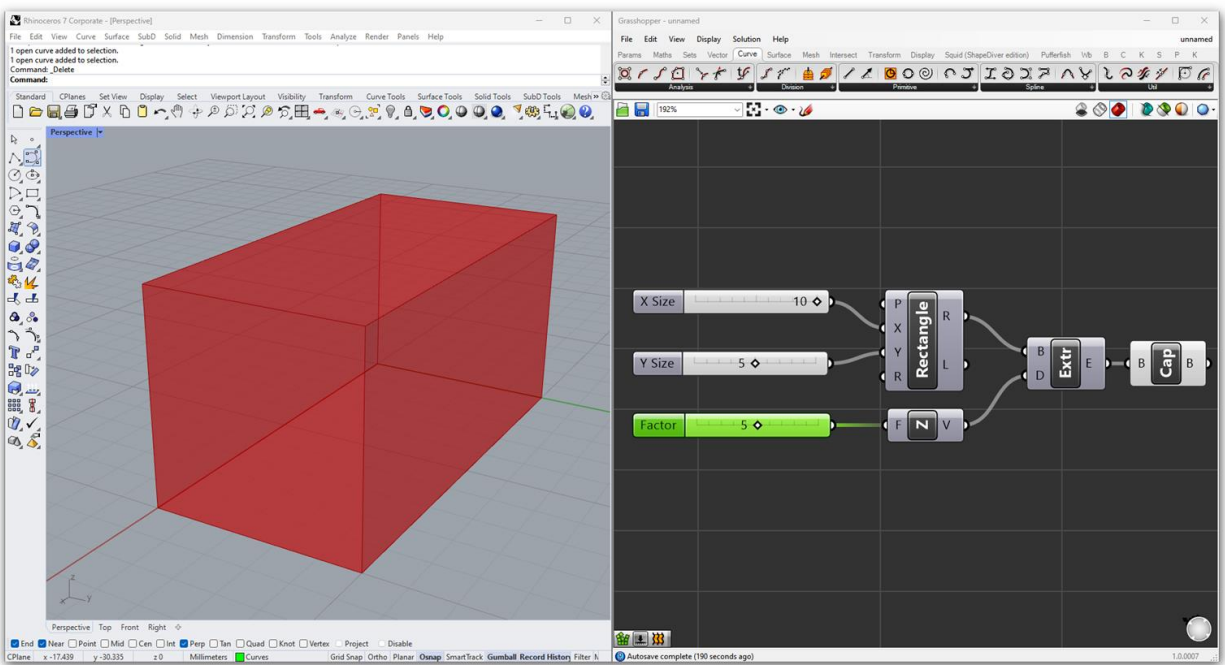
⁷²<https://eventis.pl/artykul/wszystko-co-warto-wiedziec-o-vba-visual-basic-for-applications-id8> [dostęp 28.06.2023].

⁷³<https://blog.strefakursow.pl/jezyk-c-czym-jest-i-gdzie-sie-go-uzywa/> [dostęp 28.06.2023].



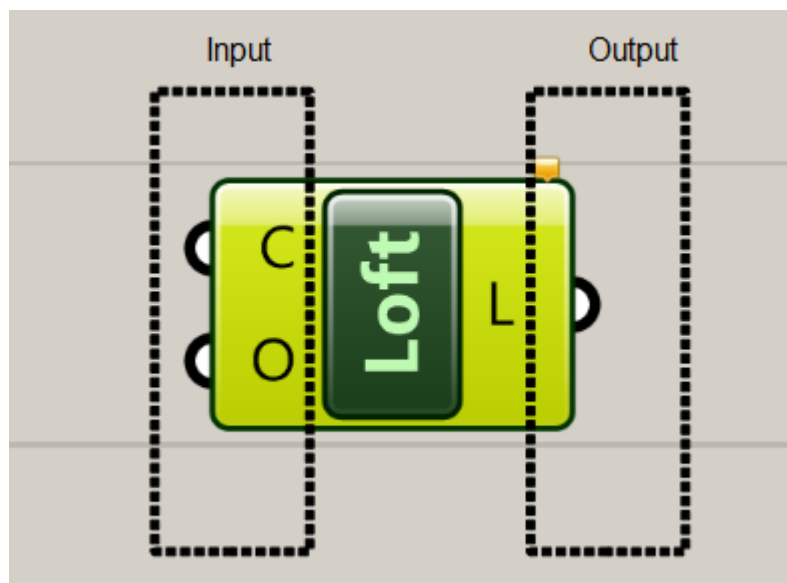
Il. 1. 24 Prosta definicja v1 w programie Rhinoceros z nakładką Grasshopper. Źródło: własny zrzut ekranu komputera.

Gdy zmienimy parametry na suwakach z lewej strony (parametr X z 5 na 10), oraz *Factor* (w tym przypadku wysokość) z 1 na 5, to otrzymamy automatycznie bryłę o innych proporcjach.



Il. 1. 25 Prosta definicja v2 w programie Rhinoceros z nakładką Grasshopper. Źródło: własny zrzut ekranu komputera.

Można powiedzieć, że użytkownik buduje swoje modele poprzez przeciąganie i upuszczanie wirtualnych elementów, nazywanych komponentami, na płótno projektowe. Te komponenty reprezentują różnorodne funkcje, takie jak tworzenie kształtów, transformacje geometrii, operacje matematyczne, analizy danych czy suwaki numeryczne. Po umieszczeniu komponentów na płótnie, użytkownik łączy je ze sobą za pomocą wirtualnych przewodów, które reprezentują przepływ danych i informacji pomiędzy komponentami. Praca w *Grasshopperze* daje użytkownikom możliwość eksplorowania różnych wariantów projektowych, modyfikowania parametrów w czasie rzeczywistym i łatwej iteracji. Wizualny charakter *Grasshoppera* sprawia, że jest on dostępny nawet dla osób bez głębokiej wiedzy z zakresu programowania, co otwiera nowe możliwości dla projektantów i twórców.



Il. 1. 26 Komponent w programie *Grasshopper* pokazujący w jaki sposób wprowadza się dane wejściowe uzyskując po przetworzeniu odpowiedniej komendy dane wyjściowe. Źródło: <https://www.studiorola.com/wp-content/uploads/2016/08/grass2.png>

Po zakończeniu tworzenia skryptu w *Grasshopperze*, użytkownik może wygenerować wynikowy model geometryczny, który może być używany dalej w procesie projektowania, produkcji lub analizy. Nakładka ta pozwala na efektywną automatyzację powtarzalnych zadań, precyzyjne sterowanie parametrami projektu i integrację z innymi narzędziami i wtyczkami.

Parametricism / Parametryzm

Warto zwrócić uwagę na jeszcze jeden aspekt związany z projektowaniem parametrycznym i jego konsekwencjami. W 2008 r. podczas Biennale Architektury w Wenecji, został wprowadzony przez architekta Patrika Schumachera (*Zaha Hadid Architects*) termin *Parametricism*, a następnie w 2009 roku utrwalony na piśmie w artykule "*Parametricism: A New Global Style for Architecture and Urban Design*"⁷⁴. Termin ten zdobył szerokie i ugruntowane miejsce w dyskursie architektonicznym. *Parametricism*⁷⁵, czyli *parametryzm*, poprzez swoją końcówkę „*yzm*”, budzi kontrowersje. Jak mówi Helen Castel termin *parametryzm* to rozrost koncepcji projektowania parametrycznego: proces projektowy, który wykorzystuje zmienne parametry lub algorytmy do generowania geometrii lub obiektów. Podczas gdy projektowanie parametryczne jest kwestią metodyki i nie posiada wewnętrznej estetyki, dodanie kluczowego "*yzmu*" sprawia, że *parametryzm* nabiera charakteru ruchu stylistycznego i społecznego. *Parametryzm* jest bezkompromisowy i nie przeprasza za swoje aspiracje, by być na pierwszym planie. Zamiast dążyć do uwzględnienia wielu jednoczesnych tendencji lub trendów, pewnie dąży do bycia jedynym uniwersalnym, globalnym stylem, w sposób przypominający modernizm. Podobnie jak ruch modernistyczny, czerpie on swą energię i impulsywność z postępu technologicznego. Jak opisuje Patrik Schumacher *parametryzm* jest odpowiedzią architektury na współczesną, obliczeniowo rozwiniętą cywilizację i jest jedynym stylem architektonicznym, który może w pełni wykorzystać rewolucję obliczeniową, która teraz napędza wszystkie dziedziny społeczeństwa⁷⁶. W przeciwieństwie do innych architektów, którzy są niepewni, aż do unikania mówienia o formalnych cechach swojej architektury, Schumacher jasno popiera *parametryzm* jako styl⁷⁷. Dzięki jego długotrwałej pracy, wpływ *parametryzmu* jako istotnej siły w architekturze znacząco wzrósł, a jego dokonania jako głównego protagonisty odegrały kluczową rolę w rozwoju tego nurtu. Styl ten jest często kojarzony z nowoczesną, złożoną i futurystyczną estetyką, charakteryzującą się organicznymi kształtami, płynnymi liniami i nieregularnymi wzorami.

⁷⁴Schumacher Patrik, *Parametricism as Style - Parametricist Manifesto*, presented and discussed at the Dark Side Club, 11th Architecture Biennale, Venice, 2008: <http://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20as%20Style.htm> [dostęp 01.07.2023]; Schumacher Patrik, *Parametricism: A New Global Style for Architecture and Urban Design*, "Digital Cities", July 1 August (no 4), 2009, s. 14-23.

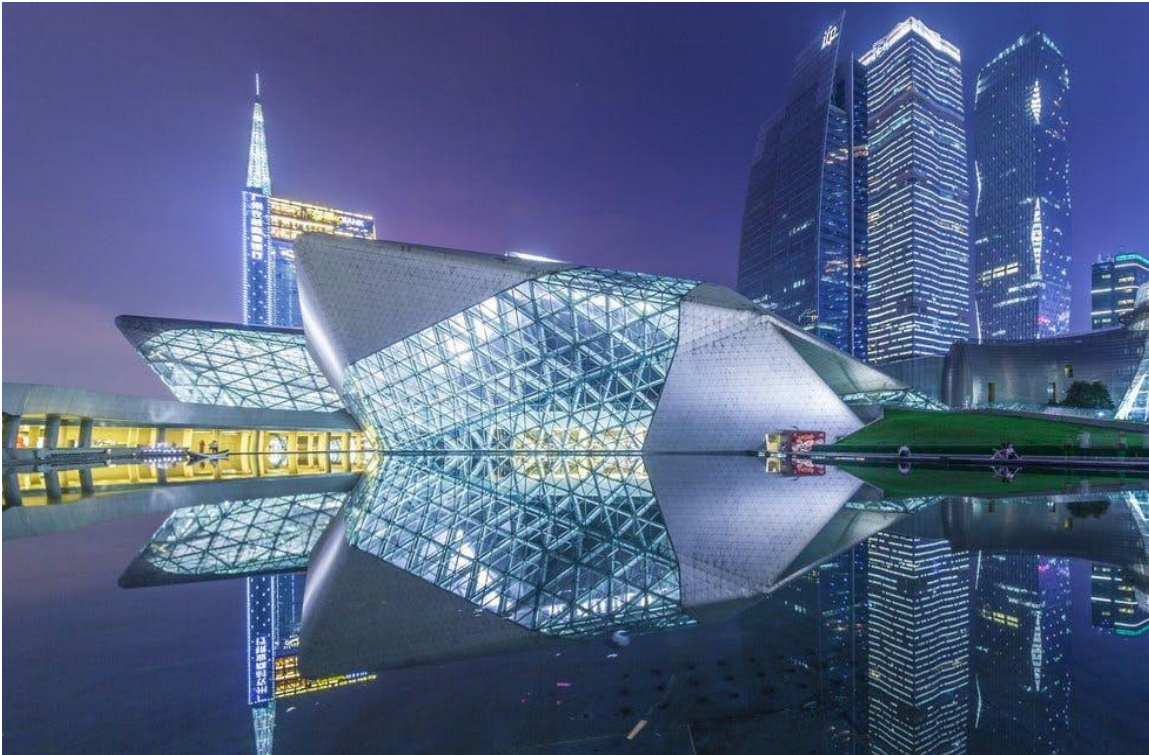
⁷⁵<https://en.wikipedia.org/wiki/Parametricism> [dostęp 18.03.2024].

⁷⁶Schumacher Patrik, *The Autopoiesis of Architecture*, "Vol II: A New Agenda for Architecture", John Wiley & Sons (Chichester), 2012, s. 617.

⁷⁷Castle Helen, Schumacher Patrik, *Parametricism 2.0 - Rethinking Architecture's Agenda for the 21st Century AD*, Academy Press, 2016 s. 5-12.

Jednak jest on bardziej niż tylko estetyką - to kompleksowe podejście projektowe, które angażuje technologię i algorytmy, aby generować innowacyjne rozwiązania architektoniczne.

Poniżej kilka przykładów charakteryzujących styl jaki reprezentuje główny projektant w *Zaha Hadid Architects* tworząc niezapomniane i ikoniczne budynki naszych czasów.



Il. 1. 27 Guangzhou Opera House w Chinach, Zaha Hadid Architects, 2010. Źródło: <https://archello.com/project/guangzhou-opera-house>



Il. 1. 28 Wnętrze Guangzhou Opera House w Chinach, Zaha Hadid Architects, 2010. Źródło: <https://archello.com/project/guangzhou-opera-house>



Il. 1. 29 Hotel Morfeusz w Makao, Zaha Hadid Architects, 2018. Źródło: <https://www.archdaily.com/896433/morpheus-hotel-zaha-hadid-architects>



Il. 1. 30 Wnętrze hotelu Morfeusz w Makao, Zaha Hadid Architects, 2018. Źródło: <https://www.zaha-hadid.com/architecture/city-of-dreams-hotel-tower-cotai-macau/>



Il. 1. 31 London Aquatics Centre wybudowane na Igrzyskach Olimpijskich w Londynie, Zaha Hadids Architects, 2011. Źródło <https://www.zaha-hadid.com/architecture/london-aquatics-centre0/>



Il. 1. 32 Heydar Aliyev Centre. Centrum kultury w Azerbejdżanie, Zaha hadid Architects. Źródło <https://www.zaha-hadid.com/architecture/heydar-aliyev-centre/>

Schumacher nie obawiał się zająć stanowiska, wychodząc przed szereg i stanowczo wyrażać swoje przekonania, co prowokowało debatę i zmuszało architektów o różnych podejściach do ponownego zdefiniowania swoich własnych stanowisk. Ponadto *parametricism* zainspirował całe pokolenie studentów i początkujących architektów do zdobycia umiejętności i eksplorowania zaawansowanych technik projektowania komputerowego. W rezultacie, styl ten tworzy ciekawe, inspirujące budowle, zwiększając zainteresowanie oraz zrozumienie architektury i projektowania w społeczeństwie.

Projektowanie parametryczne, a techniki generatywne

Słowo *parametryczny* pochodzi od angielskiego słowa *parametric*. Wedle słownika *Oxford Dictionary of English* oznacza "odnoszący się do zależności między parametrami" jak i "oparty na parametrach lub zmiennych parametrach"⁷⁸, co można interpretować jako parametr wejściowy, który ogranicza projekt. Podstawowa idea polega na tym, że zmiana jednego z ograniczeń projektowych lub warunków prowadzi do natychmiastowej zmiany tworzonego modelu. Projektowanie parametryczne to proces oparty na myśleniu algorytmicznym, który umożliwia wyrażanie parametrów i reguł, które razem definiują, kodują i wyjaśniają związek między zamysłem projektowym a odpowiedzią projektową⁷⁹. Chilijski zespół *Chido Studio* twierdzi, że projektowanie parametryczne to: "Abstrakcja idei lub koncepcji związanych z procesami geometrycznymi i matematycznymi, które pozwalają nam swobodniej manipulować precyzją naszych projektów, aby osiągnąć optymalny wynik."⁸⁰

Ogólnie rzecz biorąc, w projektowaniu parametrycznym forma jest kształtowana przez wartości parametrów i równania, które są używane do opisu zależności między formami. W rezultacie można ustalić wzajemne zależności między formami, a ich zachowanie podczas transformacji można zdefiniować matematycznie i geometrycznie. Aby zrozumieć projektowanie parametryczne, trzeba znać następujące elementy: dane i parametry, koncepcje programowania oraz składnię, takie jak struktury danych, funkcje, warunki i pętle, a także oprogramowanie i narzędzia, które można użyć do rozpoczęcia pracy. Innymi słowy, korzystamy z matematyki i geometrii, aby opisać, jak różne elementy projektu zmieniają się i wpływają na siebie nawzajem. Dzięki temu możemy bardziej precyzyjnie kontrolować wygląd i zachowanie projektowanych obiektów. Zgadzam się z opinią Pani Krystyny Januszkiewicz, że "...napisanie skryptu, który opisuje związek między krzywymi oraz opracowanie zasad, zajmuje mniej czasu

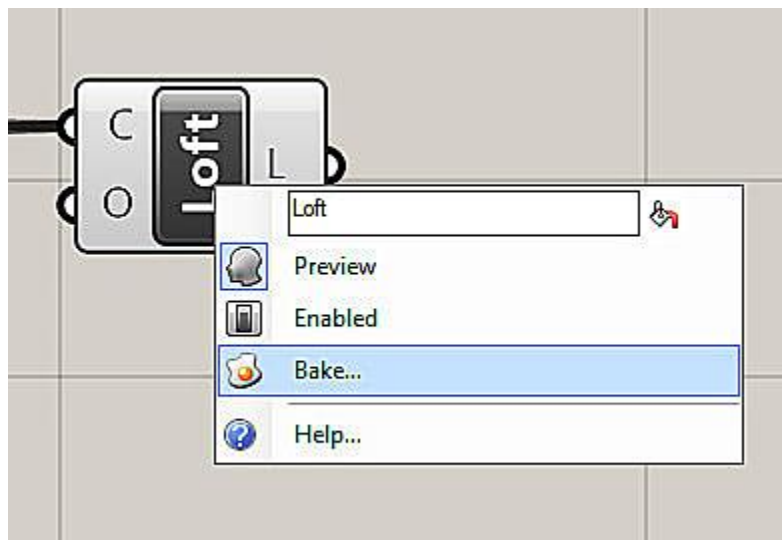
⁷⁸Oxford University Press, *Oxford Dictionary of English*, Oxford: Oxford University Press, 2010.

⁷⁹Woodbury Robert, *Elements of Parametric Design*, Routledge 2010, s. 11-32.

⁸⁰de la Para, L. and Camiro, D. (2011). DISEÑO PARAMÉTRICO implementación y aplicaciones. 1st ed. [ebook] Santiago, Chile: Chido Studio. s. 3 dostępny na: https://issuu.com/chidostudiodiseno/docs/ch_dp [dostęp 15.06.2023].

niż narysowanie trójwymiarowej fasady, posługując się myszką i komputerem. Mając skrypt, można bowiem w ciągu kilku minut generować nowe trójwymiarowe opcje tej fasady przez modyfikacje krzywych lub zasad. Wystarczyło opisać parametrycznie tylko jeden element przyjętego systemu strukturalnego, a program opisał wszystkie elementy, nawet 3 800 szklanych tafli, choć żadna z nich nie jest powtarzalna⁸¹.

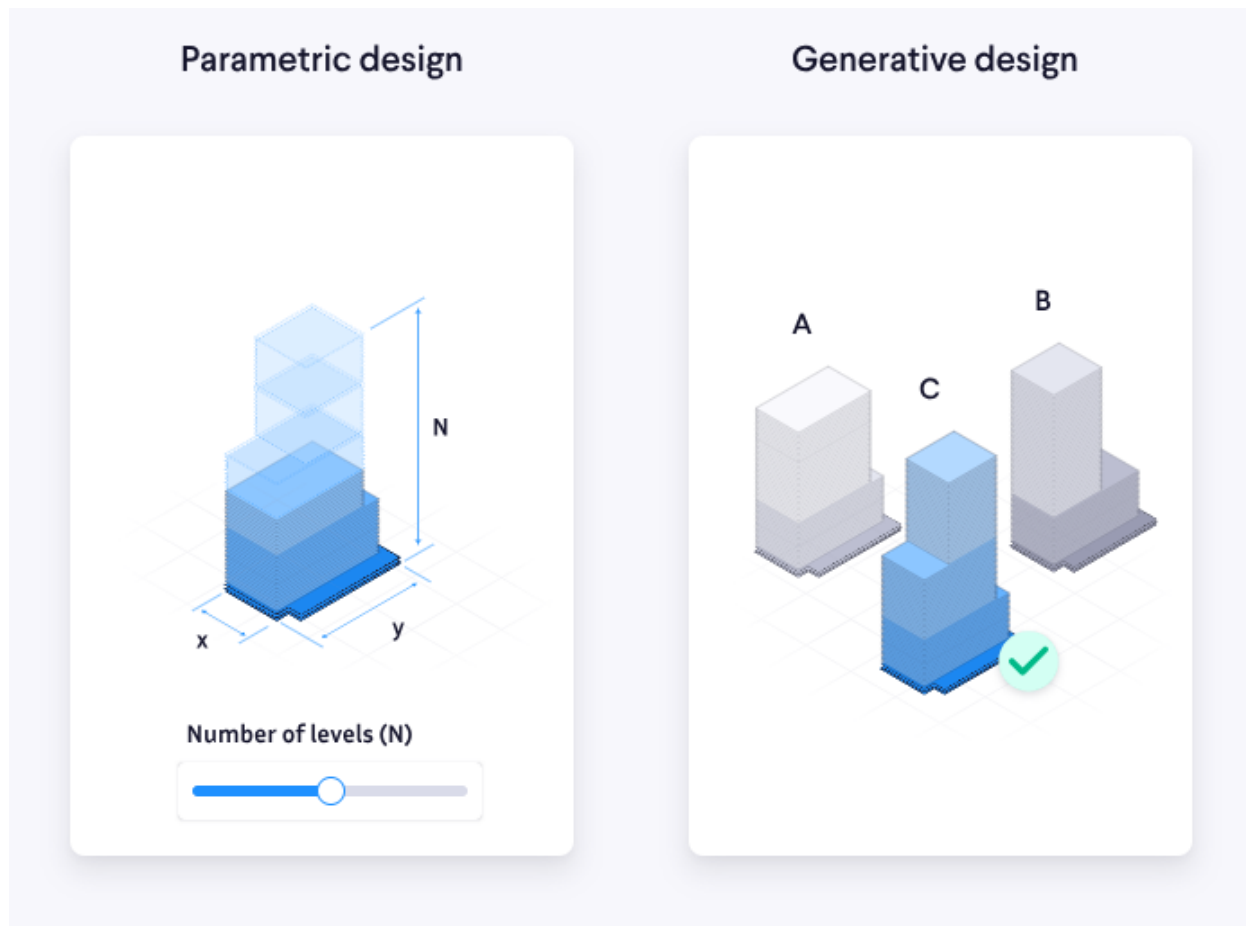
Projektowanie tym sposobem można porównać do arkusza Excela, w którym wprowadza się formułę, która odwołuje się do konkretnej komórki. Jeśli zmienimy wartość w komórce, formuła automatycznie dostosuje wynik do nowej wartości.



Il. 1. 33 Przycisk "bake" (z ang. piec/gotować) w programie Grasshopper służący do generowania końcowej bryły. Źródło: <https://www.studiorola.com/wp-content/uploads/2016/08/grasshopper5.jpg>

Dobry model parametryczny to taki, który odzwierciedla wszystkie istotne aspekty projektu i umożliwia ich łatwą modyfikację w zależności od zmieniających się warunków, danych lub potrzeb. Pozwala na szybkie i dokładne dostosowanie projektu do nowych informacji, obserwacji lub wymagań (np. dotyczących materiału, wymiarów, kształtu itp.), które mogą pojawić się w trakcie jego realizacji. Jest więc nie tylko narzędziem do tworzenia projektu, ale także do jego optymalizacji i poprawy.

⁸¹Januszkiewicz Krystyna, *Projektowanie parametryczne oraz parametryczne narzędzia cyfrowe w projektowaniu architektonicznym*, „ARCHITECTURAE et ARTIBUS”, 3/2016, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury 2016, s. 48.



Il. 1. 34 Obrazowa różnica pomiędzy projektowaniem parametrycznym, a technikami generatywnymi. Źródło: https://cms.viktor.ai/uploads/blog_long_read_Traditional_vs_Parametric_afdef98562.svg

Definicję technik generatywnych (z ang. *generative design*) bardzo dobrze zdefiniował Rafał Seemann z pracowni *PLus8.pl* w wywiadzie dla *Muratorplus.pl*: *"W wielkim skrócie projektowanie generatywne, to takie, w którym proces projektowy rozpoczyna się od stworzenia pewnego systemu, a ten z kolei buduje nam projektowany przedmiot. To proces projektowy, który poprzez algorytm, skrypt, czyli zasady opracowane przez projektanta, łączy dane – parametry w ustalonych przez nas wartościach – w spójny i w pełni kontrolowany produkt, który najczęściej ma nieskończoną liczbę akceptowalnych wersji. Projektant bezpośrednio ingeruje w tym przypadku*

w formy wygenerowane przez program. Najprostszym przykładem generatywnego projektowania są wszystkie formy natury."⁸²

Pojęcie *generative design* kojarzy się wszystkim w architekturze z budynkami czy budowlami o skomplikowanym układzie przestrzennym. Faktycznie, część z nich została zaprojektowana właśnie w ten sposób. Należy jednak podkreślić, że cała masa obiektów lub ich fragmentów, które wyglądają absolutnie tradycyjnie została zaprojektowana także tą metodą. Paradoksalnie w standardowych obiektach te rozwiązania mają jeszcze większe zastosowanie. Chodzi przede wszystkim o pełną kontrolę wszystkich projektowanych elementów i ich wzajemnych zależności. Na początku projektant musi określić ograniczenia i cele. Musi również dostarczyć określone oceny dla wyników. Kiedy oprogramowanie pokazuje pierwsze wyniki, sprawdza je przy pomocy ocen. Jeśli rozwiązanie jest słabe, zostaje odrzucone. Następnie tworzone są nowe wyniki, skupiając się na najlepszych cechach. Rafał Seemann w dalszej części wywiadu podaje przykład: *"Nie ma żadnego problemu, abym wyznaczył swojemu modelowi zadanie: „wstawić okna we wszystkich pomieszczeniach od północy w wielkości 1:8 tego pomieszczenia, na wysokości 90 cm”. Choćby było milion pomieszczeń, dostanę zaraz wynik z uwagami, że w niektórych pomieszczeniach nie da się tego zadania wykonać. Muszę wówczas uszczegółowić zależność"*⁸³. To najprostszy przykład projektowania generatywnego. W tym środowisku jakiegokolwiek błędy są momentalnie weryfikowane. Projektowanie generatywne to technika optymalizacji projektowej. Często nazywane procesem współprojektowania - projektant wprowadza parametry i ograniczenia, podczas gdy system używa algorytmów do przeprowadzenia procesu optymalizacji w poszukiwaniu najlepszego rozwiązania.

Jednym z ciekawych zastosowań technologii generatywnej w projektowaniu produktów jest kask rowerowy *Voronoi*⁸⁴. Kask ten charakteryzuje się oryginalną siatką na swojej powierzchni. Siatka ta zapewnia optymalną amortyzację uderzeń, a także redukuje wagę kasku poprzez oszczędne wykorzystanie materiału. Pod elastyczną siatką znajduje się warstwa z włókna węglowego, która dodatkowo wzmacnia konstrukcję kasku.

⁸²<https://www.muratorplus.pl/biznes/firmy-i-ludzie/projektowanie-generatywne-w-architekturze-aa-S26g-3SWJ-ffXv.html> [dostęp 17.07.2023]

⁸³Ibidem

⁸⁴https://pl.wikipedia.org/wiki/Diagram_Woronoja [dostęp 14.08.2023].



Il. 1. 35 Kask ze strukturą Voronoi zaprojektowany przez Zhecheng Xu i Yuefeng Zhou, 2020. Źródło: <https://competition.adesignaward.com/design-image.php?y=2019&design=88697>

Projektowanie parametryczne wykorzystuje parametry i ograniczenia do rozwiązania problemu projektowego, podczas gdy projektowanie generatywne stosuje algorytmy do tych samych parametrów w celu wygenerowania setek lub tysięcy możliwych wariantów projektowych do przeglądu i wyboru. Nie jest to oparte na zmiennych parametrach, ale raczej na zastosowaniu określonych zasad, które przekształcają lub generują elementy projektu na podstawie określonych reguł. W skrócie, w przeciwieństwie do projektowania parametrycznego, w projektowaniu generatywnym możemy wybrać preferowany projekt spośród zestawu projektów, które spełniają wszystkie wymagania, zamiast ręcznie zmieniać parametry i sprawdzać wynik. To podejście pozwala projektantom przetestować tysiące opcji. Zgadzam się z Anna Stefańską, w np. kontekście architektury, że po *"...zastosowaniu powyższych technik architektura zyskuje na spontaniczności, a architekt zdobywa narzędzia do łatwego formowania obiektów. Taki sposób upodabnia projektanta do malarza czy rzeźbiarza, ale jednak odznacza się zdolnością do zachowania powtarzalności, czy możliwości przeprowadzania symulacji konstrukcyjnych, materiałowych."*⁸⁵.

⁸⁵Stefańska Anna, *Zeszyty Naukowe Uczelni Vistula*, 2017/57(6) „Architektura”, Politechnika Warszawska, s. 85.

Projektowanie parametryczne w różnych dziedzinach designu

„Odwróciła się ustalona przez wieki sekwencja: zamiast rysować rzuty definiujące wyobrażoną bryłę, tworzymy obiekty trójwymiarowe, które możemy przedstawić w dowolnej płaskiej projekcji. Algorytmiczna rzeczywistość niechętnie sięga do instrumentów ścisłego, w sensie matematycznym definiowania. (...) Dzięki wynalazkowi Pierra Beziera i parametryzacji opisu złożonych kształtów, modelujemy w sposób bardziej naturalny. Nie szukamy uogólnionej definicji, lecz przekształcamy, aż do osiągnięcia stanu, który zadowala zmysły”⁸⁶.

Projektowanie parametryczne znalazło zastosowanie w wielu dziedzinach, takich jak architektura, design przemysłowy, projektowanie produktów, urbanistyka i inżynieria. Dzięki swojej elastyczności i możliwości tworzenia złożonych, niestandardowych rozwiązań, projektowanie stało się popularnym narzędziem dla twórców poszukujących innowacyjnych i eksperymentalnych podejść do projektowania.

Przykładów zastosowania projektowania parametrycznego w architekturze jest bardzo dużo, tak jak pisałem wcześniej, jest to jeden z obszarów, w którym ten sposób projektowania jest szczególnie popularny i szeroko wykorzystywany. Skupię się więc tylko na kilku wybranych przykładach z tej dziedziny.

Pierwszym projektem, który uznaje się za zaprojektowany za pomocą projektowania parametrycznego, jest *Międzynarodowy Terminal Waterloo* w Londynie. Jest to czterotorowa stacja kolejowa z falistym dachem ze szkła i stali, zaprojektowana w 1994 roku przez biuro architektoniczne *Grimshaw*⁸⁷. *Grimshaw* przedstawił projekt w ramach konkursu ogłoszonego przez *British Railways Board*. Celem architektów było zaprojektowanie rozbudowy istniejącej stacji, która mogłaby obsługiwać pociągi *Eurostar* do Paryża i Brukseli. Projektowanie parametryczne pozwoliło na stworzenie dachu o złożonej geometrii, który dostosowywał się do różnych warunków na terenie stacji, takich jak krzywizna torów, wysokość peronów

⁸⁶Słyk Jan, *Źródła architektury informacyjnej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2012, s. 95.

⁸⁷<https://grimshaw.global/projects/rail-and-mass-transit/international-terminal-waterloo/> [dostęp 12.05.2023].

i wymagania oświetlenia naturalnego. Dach składa się z ponad 400 modułów o różnych kształtach i rozmiarach, które zostały zaprojektowane za pomocą komputerowego modelu matematycznego. Dzięki temu dach jest nie tylko funkcjonalny, ale także estetyczny i symboliczny, ponieważ nawiązuje do ruchu i dynamiki podróży kolejowej.



Il. 1. 36 Stacja Waterloo, projekt Nickolas Grimshaw, Londyn, Wielka Brytania, 1994. Źródło:
<https://grimshaw.global/projects/rail-and-mass-transit/international-terminal-waterloo/>

Kolejnym przykładem jest budynek *Swiss Re (30 St Mary Axe)* w Londynie, autorstwa biura *Foster+Partners*. Bez wątpienia jeden z najbardziej rozpoznawalnych budynków świata, szósty co do wysokości wieżowiec w Wielkiej Brytanii, który stał się symbolem nowoczesnej architektury miasta. Budynek wyróżnia się swoim charakterystycznym, niekonwencjonalnym kształtem w formie elipsy⁸⁸ o wyraźnie zwężającym się kształcie ku górze, pokryty trójkątymi,

⁸⁸Odnosi się do jego formy, potocznie nazywany jest *The Gherkin*, czyli „korniszon”.

szklanymi panelami. Układ ich został wygenerowany dzięki projektowaniu parametrycznemu. Formę tego budynku zaprojektowano w taki sposób, aby ograniczał negatywne działanie wiatru w przestrzeni pobliskich ulic oraz zapewniał optymalne wykorzystanie przestrzeni w mieście, jednocześnie minimalizując cień rzucany na sąsiednie budynki.⁸⁹



Il. 1. 37 Budynek Swiss Re, Foster+Partners, 2004. Źródło: <https://architectu.pl/artykuly/30-St-Mary-Axe>

Inny przykładem, już na gruncie polskim, jest centrum handlowe *Złote Tarasy*, które zaprojektowała pracownia *The Jerde Partnership*. Jeden z najbardziej wyrazistych i jednocześnie najbardziej zaawansowanych elementów konstrukcyjnych budynku to unikalny szklany dach. *Złote Tarasy* czerpią inspirację z historycznych warszawskich parków,

⁸⁹<https://architectu.pl/artykuly/30-St-Mary-Axe> [dostęp 26.07.2023].

które przetrwały zniszczenia II Wojny Światowej. Projektując kompleks, postanowiono, że będzie on stanowił kontynuację tych parków, rozciągając się przez całe miasto, a charakterystycznym elementem będzie falujący szklany dach. Ten unikalny dach zainspirowany jest koronami starych drzew, które również miały falujący kształt. Głównym celem tego projektu było stworzenie atmosfery przebywania na świeżym powietrzu, a jednocześnie zapewniającą ochronę przed chłodem, deszczem i śniegiem. Ciekawostką jest to, że dzięki symulacjom z wykorzystaniem projektowania parametrycznego, opracowano taką formę dachu, aby woda (zimną zalegający śnieg) spadająca po nim nie zatrzymywała się w żadnym miejscu (nie ma kątów ujemnych).⁹⁰



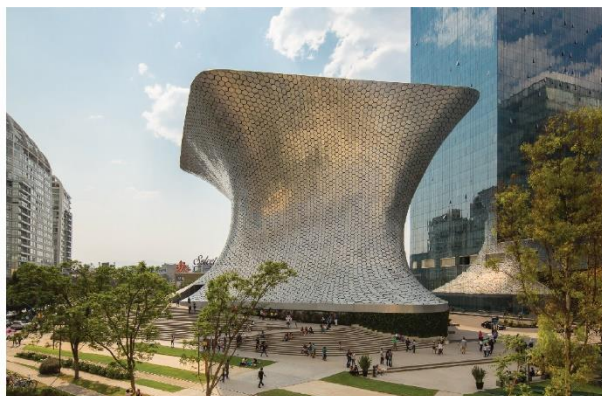
Il. 1. 38 Centrum handlowe Złote Tarasy, The Jerde Partnership, 2007. Źródło <https://www.jerde.com/projects/8093/zlote-tarasy>

Budynki stworzone przy udziale projektowania parametrycznego to nie tylko szklane dachy, ale również fantazyjne futurystyczne formy.

⁹⁰ https://architektura.info/architektura/polska_i_swiat/zlote_tarasy [dostęp 26.07.2023].



1.



2.



3.



4.

Il. 1. 39 1.) Galaxy SOHO Mall, Zaha Hadid Architects, Pekin, 2012

Źródło: <https://aadzign.com/what-is-parametric-design-in-architecture/>

2.) Muzeum Soumaya, Fernando Romero, Arup, Frank Gehry, Meksyk, 2011.

Źródło: <https://www.modernindenver.com/2017/06/museo-soumaya-fr-ee-mexico-city-1994/>

3.) Beijing National Stadium, Herzog and Meuron, Pekin, 2008.

Źródło: <http://www.w-a.pl/aktualnosci.php?artykul=1136>

4.) Beijing National Aquatics Center, PTW Architects, CSCEC, CCDI, Arup, Pekin, 2008.

Źródło https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beijing_National_Aquatics_Centre_2016_October.jpg

Z innej już dziedziny ciekawym pomysłem na użycie projektowania parametrycznego są maski 3D stworzone przez MHOX (Filippo Nassetti & Alessandro Zomparelli). Maski zostały wyprodukowane przez CRP Technology za pomocą przemysłowego druku 3D i materiału kompozytowego Windform LX 2.0, wzmocnionego włóknem szklanym (obecnie zastąpionego przez wersję 3.0). Te przedmioty są przykładem generatywnych, spersonalizowanych masek o bardzo skomplikowanych geometriach. Po wydruku są gotowe do noszenia, nie narażonych na uszkodzenia czy deformacje, dzięki właściwościom mechanicznym materiału Windform. Są one wynikiem zaawansowanego procesu projektowania i drukowania 3D, który wykorzystuje algorytmy i dane biometryczne użytkownika. Każda maska jest unikalna i dopasowana do kształtu

twarzy, zapewniając komfort i estetykę. Oprócz funkcji jaką maski miały pełnić, czyli stworzenie sztucznych implantów zastępujących ludzkie ciało (protezy), w dobie Covid-19 twórcy skupili się również stworzeniu protez oddechowych.



carapace masks . audiam 2019



superabundance



ENEA . walking stick



carapace masks . audiam



carapace masks . vidiam



collagene masks



generative orthoses



carapace VR mask



regenerative 0.1

Il. 1. 40 Maski 3D, MHOX design. Źródło: <http://mhoxdesign.com/>

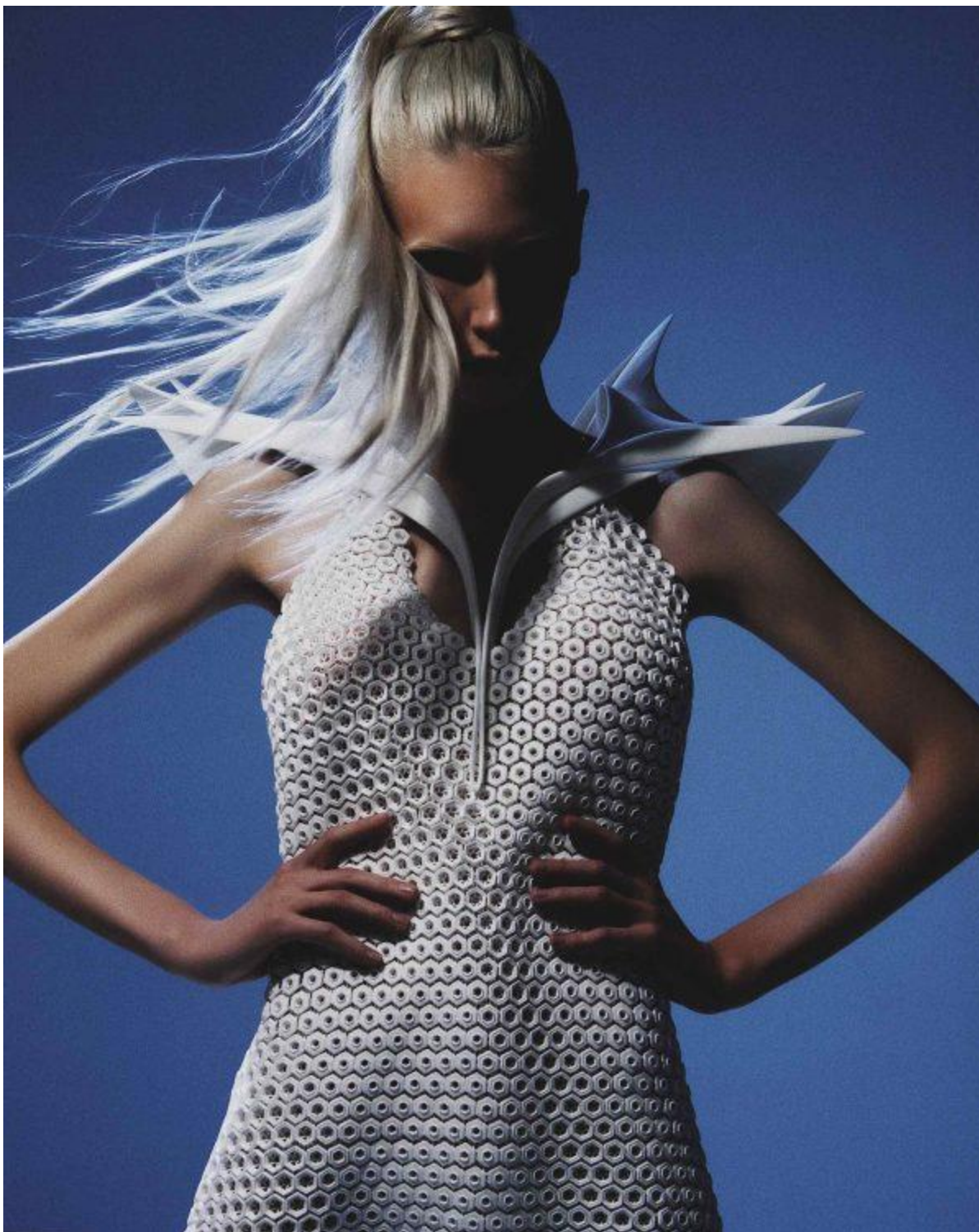
Zastosowanie parametryczności znajdziemy również w projektowaniu ubioru. Jednym z pierwszych przykładów w historii jaki znalazłem jest sukienka zaprojektowana dla Dity Von Teese przez Francis Bitonti przy współpracy z Michaeliem Schmidt'em. Sukienka w pełni była ruchoma i całkowicie wydrukowana na drukarce 3D. W kolejnych latach Bitonti stworzył również inny projekt sukienki nazwany *The Verlan*.



Il. 1. 41 Dita Von Teese w sukience projektu Francis Bitonti i Michael Schmidt, 2013. Źródło: https://www.muzivcesku.cz/adidas-prichazi-3d-tistenymi-botami-konec-ramovek-obuvniku/dita-von-teese_ping/

Wielu innych projektantów podjęło próby kreowania sukienek i ubrań w podobny sposób. Oleg Soroko i Minstev Kirill stworzyli sukienkę o nazwie *Dragonfly* w całości wydrukowaną w technologii 3D. Sukienka składa się z dwóch części, z których górna jest zbudowana z jednolitej geometrii, a dolna zaprojektowana jako kolczuga. Tym śladem poszli również projektanci tacy jak Anouk Wipprecht, Jun Kamei, Maria Alejandra Mora-Sanchez, Matija Cop, Jesica Rosenkrantz czy Neri Oxman.⁹¹

⁹¹<https://parametric-architecture.com/generative-design-and-3d-printing-in-fashion/> [dostęp 20.07.2023].



Il. 1. 42 Sukienka Dragolly, Oleg Soroko i Minstev Kirill. Źródło: <https://parametric-architecture.com/generative-design-and-3d-printing-in-fashion/>

W projektowaniu obuwia Earl Stewart tworząc projekt XYZ shoe project wykorzystuje dokładne „skanowanie 3D tworząc spersonalizowaną parę butów. Stewart podczas etapu projektowania

współpracował z podiatrą, aby zrozumieć i poprawić biomechaniczną wydajność dla noszącego, poprawiając oraz oferując maksymalny komfort, stabilność i równowagę stopy. Każda para butów jest starannie dostosowana do indywidualnej stopy poprzez wykorzystanie skanów 3D danej osoby, aby zapewnić idealne dopasowanie. Po stworzeniu odpowiedniego wzoru za pomocą zaawansowanych technik generatywnych, buty są wydrukowane na wielomateriałowej drukarce 3D, która przekształca skany w spójny obiekt wykonany z różnorodnych materiałów, zapewniających optymalną elastyczność i wsparcie”⁹².



Il. 1. 43 Buty zaprojektowane przez Earl Stewart. Źródło: <https://www.designboom.com/design/3d-printed-xyz-shoes-by-earl-stewart/>

Innym przykładem z tej dziedziny jest projekt obuwia holenderskiej marki *United Nude*, stworzony przez już wcześniej wspomnianego Francis Bitonti, w którym obcasy są formowane za pomocą technik generatywnych. *"Nie chodzi tu o tworzenie czegoś, co można dostosować. Chciałem myśleć o produkcji jako o algorytmie."*⁹³ Obcas wykonany jest z plastiku powleczonego cienką warstwą metalu.

⁹²<https://www.designboom.com/design/3d-printed-xyz-shoes-by-earl-stewart/> [dostęp 20.07.2023].

⁹³<https://www.dezeen.com/2015/09/08/francis-bitonti-3d-printed-gold-plated-mutatio-shoes-united-nude-3d-systems/> [dostęp 30.07.2023].



Il. 1. 44 Buty, Francis Bitonti dla United Nude. Źródło: <https://www.dezeen.com/tag/francis-bitonti/>

Bitonti nie poprzestał oczywiście na ubiorze i obuwiu, rozwijając swój pomysł, przy współpracy z firmą *3D Systems* i tworząc kolekcję biżuterii.



Il. 1. 45 Pierścionek, Francis Bitonti. Źródło: <https://www.facebook.com/francisbitontistudio>

Również firma *Nervous System*, która działa na styku nauki, sztuki i technologii, łączy generatywne symulacje komputerowe z cyfrową produkcją, aby tworzyć biżuterię, puzzle i sztukę inspirowaną naturalnymi formami i procesami. Jak sami piszą o sobie: „*Jesteśmy zafascynowani naturalnymi procesami, które tworzą złożone formy za pomocą prostych zasad i lokalnych interakcji. Nasze projekty skupiają się na adaptacji logiki tych procesów do narzędzi obliczeniowych; robimy to, tłumacząc naukowe teorie i modele formacji wzorców w algorytmy do projektowania. Abstrahujemy zjawiska naturalne w zbiór zasad, które określają dyskretne instrukcje do wykonania przez komputer. Systemy projektowania, które kodujemy, są generatywne; nie mają ustalonego wyniku. Zamiast postrzegać je jako zwykłe narzędzia, uważamy je za nasze medium. Te systemy są cyfrowymi materiałami o wrodzonych właściwościach i zachowaniach*”.⁹⁴



Il. 1. 46 Biżuteria z kolekcji *Nervous System*. Źródło: <https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/>

⁹⁴ <https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/> [dostęp 27.06.2023].

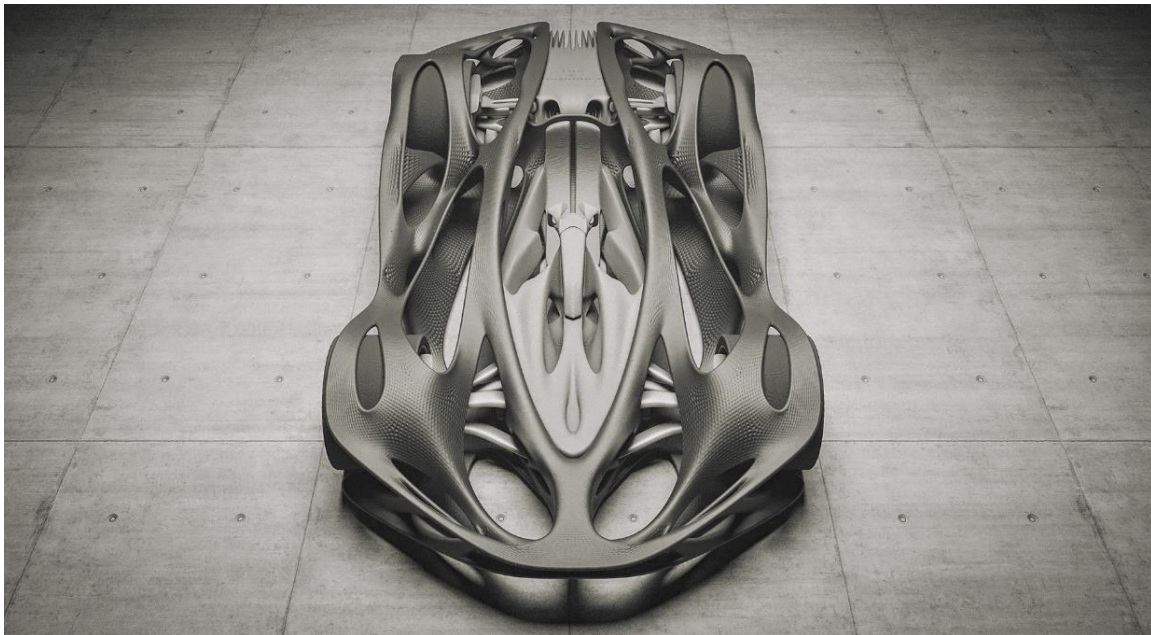
Ciekawym przykładem wykorzystania projektowania parametrycznego jest instalacja artystyczna *Parametric Space* powstała przy współpracy Zaha Hadidi Kollison Cavi. Została stworzona przestrzeń o nietypowych lejkowatych kształtach zawieszonych przy suficie. Powierzchnia ta po wykryciu ruchu człowieka zaczynała stopniowo opadać i rozciągać (to co wydawało się zwykłym płaskim sufitem okazało się być elastyczną membraną). Całość dopełniona grą światła zapewniała dynamiczne wrażenie i była ciekawym efektem powitalny dla odwiedzających wystawę. Dzięki współpracy zespołu projektowego, instalacja łączyła zaawansowaną technologię (system był obsługiwany przez parę skanerów ruchu, które w sposób ciągły zbierały informacje o przestrzeni i przekazywały je z powrotem do mechanizmów i źródeł światła ukrytych pod membraną) i nowatorskie podejście do architektury, eksplorując granice możliwości parametrycznego projektowania przestrzeni interaktywnej.⁹⁵



Il. 1. 47 Instalacja *Parametric Space*, Zaha Hadid, Kollison Cavi, 2013. Źródło: <https://www.dezeen.com/2013/07/03/parametric-space-by-zaha-hadid-architects/>

⁹⁵Działanie tej instalacji można zobaczyć na platformie YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=9zpMza7cfjI&t=18s> [dostęp 30.07.2023].

Projektant Ayoub Ahmad stworzył koncepcję samochodu o nazwie *HV-001*, definiując zestaw warunków i pozwalając algorytmom 3D stworzyć organicznie wyglądającą formę, spełniającą wszystkie zadane warunki (A. wytrzymałość, B. minimalna ilość materiału/masa oraz C. aerodynamika) w celu ograniczenia oporu powietrza i zwiększenia efektywności. Projekt wygląda prawie jak szkielet co nie jest zbiegiem okoliczności, ponieważ naturalna ewolucja również działa w ten sam sposób - projektuje szkielety na podstawie określonego zestawu warunków. Ludzie mają silne pięty i kości ogonowe do stania i siedzenia, ptaki mają lekkie szkielety do latania, a kozy mają mocne czaszki ze względu na dostosowanie do ich naturalnego zachowania, czyli obijania się głowami. Sama konstrukcja samochodu staje się jego nadwoziem i egzoszkieletem, który jest tak organiczny i ciekawy, że szkoda by było go zabudować karoserią. Samochód jest niestety jeszcze w fazie koncepcyjnej⁹⁶.



Il. 1. 48 Koncept samochodu HV-001, Ayoub Ahmad. Źródło: <https://ayoubahmad.com/>

Wykorzystanie modelowania parametrycznego przez Jimmy'ego Jiana i Jacka Liua w ceramice zaowocowało stworzeniem obiektów łączących naturalny urok glazurowanej ceramiki z ostro zarysowanymi krawędziami wynikającymi z procesu projektowania parametrycznego. Stworzona jako seria naczyń, ceramika parametryczna Jian'a i Liua to połączenie tradycji z nowoczesnością.

⁹⁶<https://www.designboom.com/design/3d-architect-ayoub-ahmad-created-his-car-design-hv-001-using-algorithms-03-15-2022/> [dostęp 30.07.2023].

Odlewane elementy ceramiczne mają pięknie ostre tekstury, których nigdy nie dałoby się wygenerować przy użyciu koła garncarskiego. Te tekstury są jednak nieco złagodzone przez grubą powłokę szkliv, które sprawiają, że każdy element jest żywy. Wcześniej wspomniane już przez mnie studio projektowe *Nervous System* również eksplorowało możliwości łączenia technik generatywnych z ceramiką.



Il. 1. 49 Naczynia ceramiczne, Jimmy Jian & Jack Liu. Źródło: <https://jimmyjian.com/Parametric-Ceramics>

John Mauriello, projektant stojący za kolekcją *Coral Lighting*, stworzył lampy, które jak sam mówi są jego „...sposobem oddania hołdu pięknu oceanu. Jako doświadczony surfer, doświadczyłem potęgi i urody oceanu, ciesząc się każdą falą jako unikalnym momentem w czasie. Jedną z wielu magicznych struktur żyjących w naszych wspaniałych oceanach jest koralowiec. Z różnorodnymi kolorami, kształtami i rozmiarami, koral to cały ekosystem pełen bujnego życia. Moje oświetlenie ma za zadanie celebrować to życie”⁹⁷. To co widzi się w powstałych projektach to moment zatrzymany w czasie. Lampy (*Timor*, *Sargasso* i *Celebes*) posiadają zróżnicowaną estetykę i są efektem skomplikowanych algorytmów generatywnych, które symulują naturalny

⁹⁷<https://www.studioello.com/coral> [dostęp 30.072023].

wzrost koralowca.⁹⁸ Powstałe formy wydrukowane są w białym, subtelnym materiale (przypominającym ceramikę). Posiadają wbudowane diody LED, które świecą przez nieregularne przekroje lampy, tworząc jaśniejsze i ciemniejsze obszary w zależności od formy.



Il. 1. 50 Lampa Saragossa, John Mauriello. Źródło: <https://www.studioello.com/coral>

Marc Fornes jest artystą, który w ciągu ostatnich dziesięciu lat zaprojektował i zbudował wiele cienkowarstwowych pawilonów i instalacji. Jego dzieła łączą architekturę ze sztuką, a każdy publiczny projekt ma na celu dostarczenie niezwykłych doświadczeń odwiedzającym oraz wzbogacenie wizualnego charakteru i życia społecznego miejsca, w którym się znajdują. Niektóre z tych obiektów znalazło swoje miejsce w kolekcjach instytucji i galerii, takich jak *Centre Pompidou* w Paryżu (gdzie *Y/STRUC/SURF* stanowi stałą ekspozycję), a także *FRAC Centre w Orleanie* we Francji oraz *Storefront for Art and Architecture* w Nowym Jorku. Marc Fornes swoje prace wystawiał również w *Guggenheim*, *GGG Art Basel Miami*, *Art Paris*, a także sprzedawał je na aukcjach w *Phillips De Pury*.

W 2023 roku podczas *Milan Design Week 2023*, *Louis Vuitton* zaprezentował *Pawilon Nomad*, formę przypominającą koralowce. „Została ona wykonana z ultracienkiej struktury,

⁹⁸ Animacja przedstawiająca wzrost koralowca techniką generatywną dostępna jest na platformie YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=hI-SduFR7xc> [dostęp 30.07.2023].

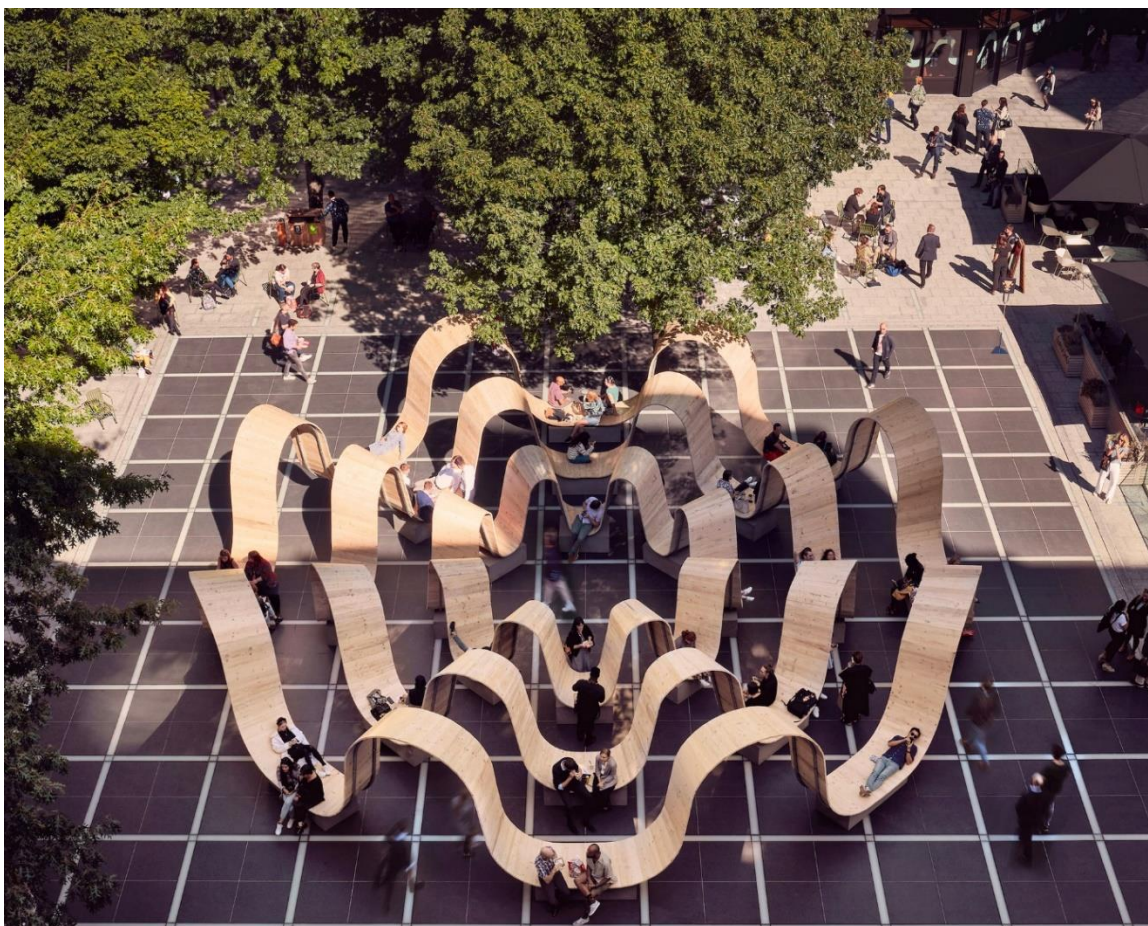
przypominającej żywy organizm. Ta przestrzeń została skonstruowana z ponad 1600 indywidualnych elementów wykonanych z anodowanego aluminium”⁹⁹.



Il. 1. 51 Pawilo Nomad, Marc Fornes, 2023. Źródło: <https://parametric-architecture.com/louis-vuitton-hosts-marc-fornes-theverymanys-pavilion-nomad-during-milan-design-week-2023/>

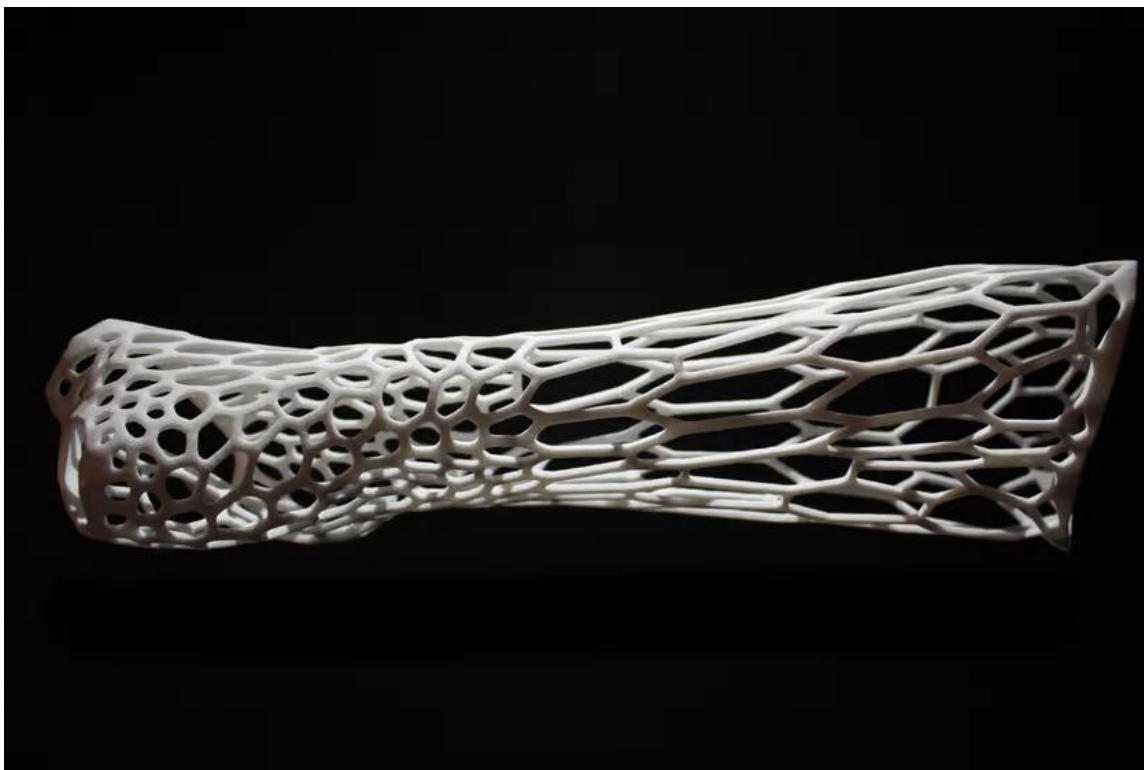
Please Be Seated (tłum. „Proszę Siadać”) to projekt instalacji-rzeźby społecznościowej autorstwa studia *Paul Cocksedge* oraz *Arup*, wykonany przez *White & White*, zaprezentowany podczas *London Design Festival 2019*. Celem tej instalacji nie jest jedynie aspekt estetyczny. Ma ona na celu podniesienie świadomości dotyczącej ponownego wykorzystania odpadów budowlanych poprzez wykorzystanie odzyskanych drewnianych desek i galwanizowanych stalowych słupów rusztowań. Miała być wcieleniem pulsującej energii miejskiego życia, idealnie dostosowanym do tempa współczesnych ludzi, a zarazem wywołującym przyjemne uczucia poprzez znajome, oswojone i przyjazne kształty. Jej falująca forma pozbawiona ostrych kątów, wykonana z ciepłego drewna doskonale spełnia te zamierzenia.

⁹⁹<https://parametric-architecture.com/louis-vuitton-hosts-marc-fornes-theverymanys-pavilion-nomad-during-milan-design-week-2023/> [dostęp 30.07.2023].



Il. 1. 52 „Please Be Seated” , Paul Cockshedge, 2019. Źródło: <https://www.journal-du-design.fr/design/installation-please-be-seated-pour-london-design-festival-2019-par-paul-cockshedge-121323/>

Innowacyjnym przykładem z dziedziny medycyny może być zastosowanie technik generatywnych w przypadku różnorodnych złamań. Tradycyjne gipsowe opatrunki, stosowane w leczeniu kontuzji, często sprawiają pacjentom duży dyskomfort, wywołują podrażnienia i swędzenie skóry. Jednak Jake Evill opracował opatrunek o nazwie *Cortex*, który jest w całości wydrukowany przy użyciu drukarki 3D i dostosowany do anatomicznych kształtów pacjenta. Koncepcja zakłada, że pacjenci poddani zostaną rentgenowskim badaniom złamania, a następnie zastosowany zostanie skaner 3D do precyzyjnego odwzorowania urazu. Komputer obliczy optymalny wygenerowany wzór i strukturę opatrunku, gdzie gęstszy materiał zostanie skoncentrowany na obszarze złamanej kości, zapewniając mu wsparcie i ochronę. Taka innowacyjna technologia może diametralnie zmienić standardy leczenia złamań, poprawiając komfort pacjentów i przyspieszając proces gojenia.



Il. 1. 53 Cortex, Jake Evil, 2013. Źródło: <https://newatlas.com/cortex-concept-3d-printed-casts/28123/>

Technologia druku 3D

Technologia druku 3D (ang. *3D Printing* – *3DP*) wyznacza nowy etap w ewolucji procesów produkcyjnych, zmieniając sposób, w jaki przedmioty są projektowane, tworzone i wykorzystywane. Jest to zjawisko, które rewolucjonizuje różne dziedziny życia, od przemysłu, przez medycynę, po architekturę i sztukę.

Druk 3D polega na tworzeniu obiektów, warstwa po warstwie, na podstawie modelu cyfrowego. Proces ten różni się znacząco od tradycyjnych metod produkcji, takich jak (frezowanie), odlewania czy formowania, które opierają się na usuwaniu, dodawaniu lub odlewaniu materiału. 3PD pozwala na tworzenie złożonych i precyzyjnych struktur, które byłyby trudne, a czasem niemożliwe, do osiągnięcia przy użyciu tradycyjnych technik. Konieczność obniżania kosztów wytwarzania i dostosowywania do indywidualnych oczekiwań klientów, skłaniają przedsiębiorstwa do nieustannego poszukiwania lepszych rozwiązań projektowych i wdrażania

nowych produktów, aby sprostać wymaganiom odbiorców. Szybkie wprowadzanie na rynek nowych wyrobów lub ich ulepszonych wersji stało się efektem "łatwości" projektowania i wdrażania innowacyjnych rozwiązań w różnych dziedzinach. Dzięki drukowi 3D możliwe jest także szybkie prototypowanie, co umożliwia testowanie różnych koncepcji i pomysłów przed wprowadzeniem do masowej produkcji.

W przemyśle druk 3D może być wykorzystywany do produkcji prototypów, narzędzi, części zamiennych oraz elementów skomplikowanych struktur. W medycynie pozwala na tworzenie spersonalizowanych implantów, protez czy modeli anatomicznych do celów edukacyjnych¹⁰⁰. Architekci korzystają z tej technologii do tworzenia precyzyjnych modeli budynków, czy elementów konstrukcyjnych, a jubilerzy do sprawdzenia poprawności formy, proporcji czy odpowiedniego dopasowania gniazd pod kamienie (szczególnie przy niestandardowych szlifach). Szybkie prototypowanie¹⁰¹ (z języka angielskiego *rapid prototyping* - *RP*) to proces tworzenia fizycznych obiektów trójwymiarowych warstwa po warstwie bezpośrednio z modeli komputerowych stworzonych za pomocą oprogramowania *CAD* (*Computer Aided Design* czyli *Komputerowe Wspomaganie Projektowania*), które pozwala na tworzenie wirtualnych obrazów¹⁰². Proces ten jest nazywany także kształtowaniem przyrostowym lub *metodami addytywnymi* (*additive manufacturing*, w skrócie *AM*). Choć najczęściej używa się nazwy *szybkie prototypowanie*, nie oddaje ona w pełni istoty tej technologii, która nie ogranicza się jedynie do tworzenia prototypów. Zastosowanie szybkiego prototypowania obejmuje także tworzenie narzędzi (*rapid tooling* - *RT*) oraz gotowych produktów (*rapid manufacturing* - *RM*). Szybkie prototypowanie jest stosunkowo nową technologią i jako taka cały czas podlega ciągłemu rozwojowi¹⁰³. Przed pojawieniem się *RP*, stosowano głównie metody tradycyjne, czyli proces obróbki skrawania (frezowanie, toczenie, szlifowanie, wiercenie)¹⁰⁴, który polegał na zdejmowaniu z elementu wyjściowego kolejnych warstw obrabianego materiału, co jest znane

¹⁰⁰<https://botland.com.pl/blog/ciekawe-zastosowania-druku-3d-do-czego-mozna-wykorzystac-drukarke-3d/> [dostęp 01.08.2023].

¹⁰¹Termin szybkie prototypowanie używa się już coraz rzadziej, ponieważ kiedyś odnosił się głównie do prototypowania w wielkich firmach przemysłowych, dziś druk 3D jest coraz tańszy i popularniejszy i trafia do szerszego grona.

¹⁰²Wraz z *CAD* często używane jest pojęcie *CAM* (*Computer Aided Manufacturing* czyli komputerowe wspomaganie wytwarzania), które jest uzupełnieniem całego procesu *Rapid Prototyping*, czyli od projektu po prototyp.

¹⁰³Miecieli Miroslaw, *Techniki szybkiego prototypowania – rapid prototyping*, 2010, Przegląd mechaniczny, Wydawnictwo SIGMA-NOT s. 39; <https://silo.tips/download/techniki-szybkiego-prototypowania-rapid-prototyping> [dostęp 01.08.2023].

¹⁰⁴Feld Mieczysław, *Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn*, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 2009.

jako proces ubytkowy. Metody szybkiego prototypowania to już coraz bardziej powszechna metoda pracy współczesnego projektanta, która zmienia tradycyjne podejście do tworzenia modeli przestrzennych. Dzięki temu procesowi maszyna przekształca dowolny wirtualny kształt 3D w rzeczywisty obiekt, podobnie jak drukowanie 2D przekształca wirtualne piksele w kropki atramentu na arkuszu. Proces ten wymaga, aby obiekt do wydrukowania został "pocięty" na cienkie warstwy. Zwykle odbywa się to za pomocą dedykowanego do danej drukarki 3D oprogramowania (nie tylko dokonuje podziału elementu na kolejne warstwy, ale także generuje konieczne podpory i dostosowuje odpowiednie parametry druku 3D). Bardzo często techniki addytywnego wytwarzania pracują właśnie za pomocą warstwowych *plastrów* (z języka angielskiego *slice*), dzięki czemu ostateczny kształt wynika z połączenia kolejnych już 2D warstw materiału o grubości zależnej od zaplanowanej rozdzielczości druku. Ten sposób tworzenia umożliwia opracowywanie niemal dowolnych geometrii 3D, ponieważ eliminuje ograniczenia związane z narzędziami skrawającymi, uchwytami, czy problemami z zamocowaniem przedmiotu w obrabiarkach.

Szybkie prototypowanie to dynamicznie rozwijająca się metoda, która sukcesywnie znajduje zastosowanie w różnorodnych dziedzinach, poszerzając spektrum możliwości w projektowaniu oraz procesach produkcyjnych¹⁰⁵. Dąży się do osiągnięcia najwyższej jakości wydruków, co umożliwia tworzenie elementów o zaawansowanych detalach, małych otworach oraz niezwykle gładkich powierzchniach. Spełnienie tych zróżnicowanych wymagań wymaga nieustannego udoskonalania technologii drukowania 3D.

Może wydawać się nieprawdopodobne, ale w teorii technologia druku 3D ma 80 lat, a w praktyce lat 40. Mimo to, dla wielu ludzi nadal jest czymś bardzo nowoczesnym i nieznanym, rodem z filmów science-fiction. Szaleństwo na punkcie drukarek 3D, zaczęło się około 2010 roku, kiedy firmy takie jak *MakerBot* wprowadziły na rynek maszyny przystępne cenowo. Jednak ci, którzy zajmują się produkcją, wiedzą, że sam proces - nanoszenie materiału na podłoże w celu zbudowania obiektu na podstawie cyfrowego projektu 3D - ma znacznie dłuższą historię. W 1945 roku w proroczej powieści science-fiction autorstwa Murraya Leinster'a pt. "*Things Pass By*",

¹⁰⁵Pham D.T., Gault R.S. *A comparison of rapid prototyping technologies*, "International Journal of Machine Tools and Manufacture", wydanie 38, 1998, s. 1257–1287.

opublikowanej w „*Fantastic Story Magazine*”¹⁰⁶, autor opisuje proces podawania "magnetronicznych tworzyw sztucznych - tego, z czego obecnie robią się domy i statki - do tego ruchomego ramienia. Tworzy ono rysunki w powietrzu na podstawie skanowanych rysunków za pomocą fotokomórek. Jednak tworzywo wychodzi z końca ramienia rysującego i twardnieje w miarę wychodzenia."¹⁰⁷ To, co w czasach Leinster'a było science-fiction, wkrótce stało się rzeczywistością. Historia produkcji trójwymiarowych obiektów poprzez warstwowe nanoszenie materiałów ma swoje korzenie już w latach 70., kiedy to Francuz Pierre A. L. Ciraud opisał metodę budowanie form 3D o dowolnej geometrii za pomocą utwardzania materiału w proszku poprzez źródło energii. Informacja ta została opublikowana 5 lipca 1973r. stając się fundamentem technologii zwanej jako *SLS* (*selective laser sintering* – selektywne spiekanie laserowe). Pod koniec 1979 roku Amerykanin Ross F. Housholder złożył wniosek patentowy na trzy metody warstwowego formowania przy użyciu piasku, nazywając tą metodę *molding proces*. W styczniu 1981 roku patent został opublikowany, jednak z powodu braku wystarczających środków finansowych, nigdy nie został przetestowany ani skomercjalizowany.¹⁰⁸ Natomiast tego samego roku przyznano również patent związany z drukiem 3D japońskiemu wynalazcy Hideo Kodamie¹⁰⁹. Kodama wynalazł urządzenie, które używało światła UV do utwardzania fotoreaktywnych polimerów¹¹⁰. Podobnie jak inne wczesne formy druku addytywnego, technologia miała na celu tworzenie modeli i prototypów. Zaledwie trzy lata później, w 1984 roku, grupa francuskich wynalazców pod przewodnictwem Alaina Le Mehaute złożyła pierwsze wnioski patentowe dotyczące metody druku 3D, zbliżonej do dzisiejszej technologii *stereolitografii*, która podobna była do wynalazku Kodamy (wykorzystanie światła UV do utwardzania fotopolimerów). Niespodziewanie ich wniosek patentowy został porzucony przez inwestora *General Electric* (obecnie *Alcatel-Alsthom*) dlatego, że firma nie przewidziała żadnych znaczących perspektyw biznesowych związanych z tą ideą¹¹¹. Brak tej perspektywy był

¹⁰⁶Romański Jacek, *Drukując idee, drukując przedmioty – ontologiczna analiza dzieł sztuki stworzonych z wykorzystaniem technologii wydruku 3D*, „3D. Implikacje. Cyfra i bryła”, red. Aleksandrowicz Monika, Kaczmarek Małgorzata, ASP we Wrocławiu, Wrocław, 2023, s. 38.

¹⁰⁷<https://www.3dfarm.net/history-of-3d-printing> [dostęp 01.08.2023].

¹⁰⁸<https://centrumdruku3d.pl/historia-druku-3d/> [dostęp 01.08.2023].

¹⁰⁹<https://www.cadcrowd.com/blog/a-brief-history-of-3d-printing/> [dostęp 01.08.2023].

¹¹⁰Kodama Hideo, *A scheme for three-dimensional display by automatic fabrication of threedimensional model*, "IEICE Transactions on Electronics", 1981, s. 237-241, zob. Kodama Hideo, *Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer*, "Review of Scientific Instruments", 1981, s. 10.

¹¹¹<https://www.cadcrowd.com/blog/a-brief-history-of-3d-printing/> [dostęp 01.08.2023].

niefortunny dla Le Mehaute'a i jego kolegów, ale przyniósł korzyść Chuckowi Hullowi, który obecnie jest powszechnie uznawany za ojca druku 3D. Hull złożył wniosek opisujący proces wydruku przestrzennego i już w 1986 opatentował go pod nazwą *stereolitografia* (SLA – z języka angielskiego *stereolithography*). Jest on również twórcą formatu pliku *STL*, który jest uniwersalnym rozszerzeniem kompatybilnym z każdym programem 3D, z drukarkami 3D oraz frezarkami. Rozwój formatu pliku *STL* umożliwił druk addytywny – takim jak jest dzisiaj.¹¹² W 1986 roku, Hull założył firmę *3D Systems Corporation* - firmę, która wprowadziła na rynek pierwszą komercyjną drukarkę *3D SLA-1*. W 1987 roku Carl R. Deckard¹¹³, pracujący na Uniwersytecie Tekszańskim w Austin, opracował technologię selektywnego spiekania laserowego (*SLS* – z języka angielskiego *Selective Laser Sintering*), która polega na użyciu intensywnej (zazwyczaj pulsującej) wiązki laserowej do łączenia cząsteczek proszku wzdłuż przekrojów o pożądanym kształtach. Proszek może być zrobiony z tworzywa sztucznego, metalu, ceramiki lub szkła i jest zwykle ogrzewany w podłożu tuż poniżej temperatury spiekania. Podobna technologia została opatentowana przez R. F. Housholdera w 1979 roku, ale nie znalazła zastosowania komercyjnego.

¹¹²Pîrjan Alexandru, Petroşanu Dana-Mihaela, *The impact of 3D printing technology on the society and economy*, "Journal of Information Systems & Operations Management", 2013, 7(2), s. 360-370.

¹¹³<https://ultimaker.com/learn/the-complete-history-of-3d-printing/> [dostęp 01.08.2023].



Il. 1. 54 Pierwsza drukarka 3D SLA-01, Chuck Hull, 1983. Źródło: <https://3dprint.com/72171/first-3d-printer-chuck-hull/>

W latach 1989-1990 S. Scott Crump wynalazł i opatentował najbardziej rozpoznawaną technikę druku 3D (szczególnie popularną wśród hobbystów i laboratoriów o niskim budżecie), czyli budowanie formy metodą osadzania stopionego materiału (*FDM* – z języka angielskiego *Fused Deposition Modeling*). *FDM* wykorzystuje rozpuszczalne filamenty termoplastyczne, które są stopniowo nanoszone na podstawę warstwa po warstwie, aby utworzyć trójwymiarowy obiekt. Podczas druku, głowica drukująca rozpuszcza filament, a następnie aplikuje go na powierzchnię budowy (tworzonej formy). Po utworzeniu jednej warstwy, platforma budowy jest obniżana, a proces powtarza się, aż cały obiekt zostanie wydrukowany. Pierwsze maszyny zostały skomercjalizowane przez firmę Scotta Crumpa - *Stratasys* - w 1992 roku, a patent wygasł w 2009 roku.¹¹⁴ W 1993 roku na *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* zastosowano metodę polegającą na łączeniu proszku warstwami za pomocą głowicy drukującej podobnej do tej stosowanej w drukarkach atramentowych. Stąd też nazywano ją *inkjet printing*. W tym samym roku firma *Sanders Prototype, Inc.*, obecnie *Solidscape*, zaprezentowała inną technikę: *dot-on-dot*. Polegała ona na nanoszeniu polimerów z użyciem rozpuszczalnych podpór,

¹¹⁴<https://centrumdruku3d.pl/czy-patenty-zabija-druk-3d/> [dostęp 01.08.2023].

co umożliwiało uzyskiwanie modeli o bardzo wysokiej dokładności. W 1995 roku niemiecki *Instytut Fraunhofer ILT* opracował proces selektywnego topienia laserowego (*SLM - Selective Laser Melting*). To rozwiązanie umożliwia tworzenie precyzyjnych i wytrzymałych wydruków z użyciem różnych stopów metalowych. Polega ono na stopniowym topieniu proszku metalowego za pomocą skoncentrowanej wiązki laserowej. Podobną, ale nie tak doskonałą techniką jest wcześniej wspomniane *selektywne spiekanie laserowe (SLS)*, w której proszek metalowy nie jest całkowicie stopiony, dlatego nie tworzy tak zwartej i jednolitej struktury jak wydruki z *SLM*.

W 2006 roku branża technologii przyrostowych osiągnęła kolejny kamień milowy. Wtedy to Adrian Bowyer zaprezentował pierwszą drukarkę desktopową, która była w stanie zreplikować z plastiku swoją pierwszą część konstrukcyjną wykonaną na komercyjnej drukarce 3D (*projekt RepRap*¹¹⁵). Projekt *RepRap* zyskał uznanie i zainteresowanie wśród wielu użytkowników internetu. Jego twórcy udostępnili w sieci wszystkie niezbędne informacje i instrukcje, aby każdy mógł zbudować własną drukarkę. W rezultacie, w ciągu kilku miesięcy liczba działających drukarek *RepRap* wzrosła z kilku do ponad stu na całym świecie. Był to znaczący krok w rozwoju technologii druku 3D i społeczności *Do It Yourself (DIY - „zrób to sam”)*. W 2009 roku firma *Makerbot* rozpoczęła sprzedaż pierwszej na świecie drukarki 3D do samodzielnego składania, co przyczyniło się do rozpowszechnienia tej technologii w wielu domach¹¹⁶. Od 2013, w miarę jak technologia druku 3D rozwinięła się na tyle, aby koszty produkcji spadały, drukarki 3D stały się bardziej dostępne, trafiając do dużej grupy użytkowników.

Druk 3D to technologia, która pozwala tworzyć przedmioty z cyfrowych modeli. W 2014 roku NASA zrobiła historyczny krok i wysłała drukarkę 3D na pokład *Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS)*. Tam astronauci mogli wydrukować narzędzia i części, których potrzebowali. To było niesamowite osiągnięcie, które pokazało możliwości druku 3D w kosmosie i otworzyło nowe perspektywy dla eksploracji kosmicznej¹¹⁷. W 2017 r. firmy takie jak *Apis Cor* oraz *WinSun* przedstawiły w swojej ofercie drukarki 3D przyczyniające się do rozwoju architektury, poprzez szybsze i tańsze wykonywanie konstrukcji betonowych. Do 2018 r. powstało

¹¹⁵<https://pl.wikipedia.org/wiki/RepRap> [dostęp 01.08.2023].

¹¹⁶Siemiński Przemysław, Budzik Grzegorz, *Techniki przyrostowe. Druk 3D. Drukarki 3D*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa, 2015, s. 69-78

¹¹⁷<https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/> [dostęp 01.08.2023].

w tej technologii wiele mostów, domów, a nawet drapaczy chmur¹¹⁸. Najczęściej stosowaną techniką druku 3D (46% w 2018 roku)¹¹⁹ jest technologia *FDM*. Choć ta technologia została wynaleziona po dwóch innych popularnych technologiach, tj. *stereolitografii (SLA)* i selektywnym spieku laserowym (*SLS*), *FDM* jest zazwyczaj najtańszą z tych trzech technik, co daje jej dużą przewagę, przyczyniając się do popularności tego procesu na rynku masowym. Dzięki technologii *DLP (Digital Light Processing)*, bez problemu można znaleźć drukarki dobrej jakości za około 300 USD, tworzące modele z dokładnością do 35 mikronów. Technologia ta działa na podobnej zasadzie jak *stereolitografia*, ale zamiast lasera wykorzystuje się projektor UV (w przypadku tanich odpowiedników tych drukarek stosuje się wyświetlacze LCD) do utwardzania fotopolimeru warstwa po warstwie, co powoduje, że materiał utwardza się, tworząc kolejne warstwy i kształtując obiekt. Istnieją oczywiście jeszcze technologie, o których nie wspomniałem wcześniej, które ze względu na swoją cenę wykorzystywane są w przemyśle. Przykładem może być technologia *PolyJet/MJP* (ang. *Multi Jet Printing* - cienkie warstwy materiału zazwyczaj plastiku lub żywicy, są nanoszone na podstawę przy użyciu głowicy drukującej, która jest wyposażona w wiele mikroskopijnych dysz; następnie materiał jest utwardzany za pomocą UV lub innej metody utwardzania); *CJP* (ang. *Color Jet Printing* – dzięki tej technologii można uzyskiwać wielokolorową formę 3D; materiałem budulcowym jest proszek gipsowy, na który nanosi się barwniki i lepiszcze sklejające ten materiał); *MJF* (ang. *Multi Jet Fusion* - spiekanie proszku poliamidowego za pomocą środków chemicznych oraz światła UV).

Co przyniesie przyszłość drukowi 3D? Możemy na ten temat spekulować. Wysoce prawdopodobnym jest, że przyjęcie drukarek 3D przez konsumentów będzie nadal przyspieszać. Rozwój tej technologii przyczyni się również do zdecentralizowania produkcji jako całości: zapobiegając problemom w łańcuchu dostaw, zmniejszając koszty transportu i wysyłki oraz drastycznie skracając czas i pieniądze wydawane na nabywanie towarów. Materiały używane w druku 3D będą również nadal się rozszerzać i ewoluować. Na przykład, coraz większe wykorzystanie drukowania metalu już teraz otwiera nowe zastosowania i możliwości, które wcześniej uważano za niemożliwe do osiągnięcia w inny sposób niż tradycyjne metody produkcji. Rynek globalnego druku 3D pod względem przychodów, analizując trendy w branży

¹¹⁸Budziak Grzegorz, Woźniak Joanna, Przeszlowski Łukasz, *Druk 3D jako element przemysłu przyszłości*, „Analiza rynku i tendencje rozwoju”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2022, s. 12.

¹¹⁹ <https://www.3dfarm.net/history-of-3d-printing> [dostęp 11.08.2023].

przemysłowej, został oszacowany na 15 miliardów dolarów w 2023 roku i przewidywane jest, że osiągnie wartość 34,5 miliarda dolarów w 2029 roku, co oznacza roczne średnie tempo wzrostu (CAGR) na poziomie 18,1% (okres od 2023 do 2028 roku)¹²⁰.

¹²⁰https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/3d-printing-market-1276.html?gclid=CjwKCAjw_aemBhBLEiwAT98FMumieXpF11U2UxlWEAT-5QmVJEM39ZaVgXlTgji24V9ejiXLIBFp8BoCi1gQAvD_BwE [dostęp 05.08.2023].

Część 2 – Kolekcja Biżuterii

Tematem mojej pracy jest *“Biżuteria ażurowa tworzona w oparciu o projektowanie parametryczne oraz techniki generatywne”*. Już od pierwszych lat studiów w Katedrze Biżuterii, obecnie Instytucie Biżuterii, w Akademii Sztuk Pięknych im. Władysława Strzemińskiego w Łodzi interesowałem się budowaniem form przestrzennych. Jednak ze względu na ograniczenia technologiczne nie byłem w stanie tworzyć brył, ani konstrukcji, które mnie fascynowały. Zawsze starałem się jak najbardziej przestrzennie budować obiekty, dlatego narzędzie do projektowania w trzecim wymiarze było tym czego potrzebowałem. Dopiero na trzecim roku studiów, w 2007 roku, ukończyłem pierwszy kurs projektowania biżuterii w 3D. Podczas kursu zdobyłem widzę z zakresu projektowania biżuterii przy użyciu wiodącego na świecie programu Matrix firmy Gemvision. W 2010 roku, dzięki wykorzystaniu projektowania 3D, mogłem stworzyć swoją pierwszą kolekcję biżuterii, korzystając wyłącznie z systemu CAD/CAM służącemu projektowaniu i prototypowaniu. („...CAD lub Komputerowe Wspomaganie Projektowania - tworzy obrazy. CAM lub Komputerowe Wspomaganie Produkcji - zmienia obrazy w rzeczywiste obiekty”¹²¹). Tytuł mojej pracy magisterskiej brzmiał *"Pamięć absolutna, absolutne piękno - kolekcja pamięci Flash"*. Już wtedy testowałem potencjał i granice technologii 3D, która była aktualnie dostępna. Jednak technologia druku i projektowania 3D z roku na rok diametralnie się zmieniała, dając nowe możliwości w tworzeniu coraz bardziej skomplikowanych form. Jako projektant biżuterii, który na co dzień zajmuję się projektowaniem biżuterii 3D, zainteresowałem się tematem parametryczności już ponad 10 lat temu. Na początku było to oczywiście zetknięcie się z niesamowicie futurystycznymi, skomplikowanymi projektami architektonicznymi, które różnią się pod względem skali w odniesieniu do obiektów biżuteryjnych. Poprzez fascynację *parametryzmem* zdecydowałem się zbadać możliwości zastosowania projektowania parametrycznego i technik generatywnych w kontekście właśnie projektowania i wytwarzania biżuterii.

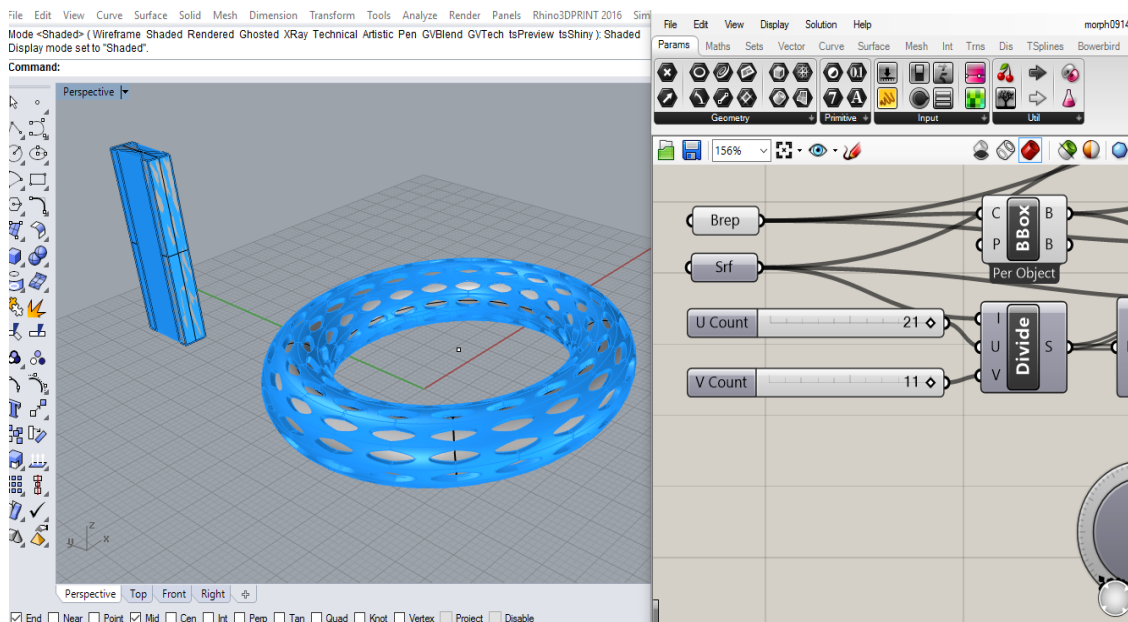
W 2014 roku, jako już pracownik Katedry Biżuterii, miałem przyjemność wdrożyć się w tę tematykę dzięki możliwości przeprowadzenia badań naukowych służącym rozwojowi młodych naukowców ze środków MNISW. Przed przystąpieniem do realizacji badania musiałem

¹²¹<https://www.polskijubiler.pl/artykul/497/matrix-w-bizuterii.html?cookies=rodo> dostęp [dostęp 07.08.2023].

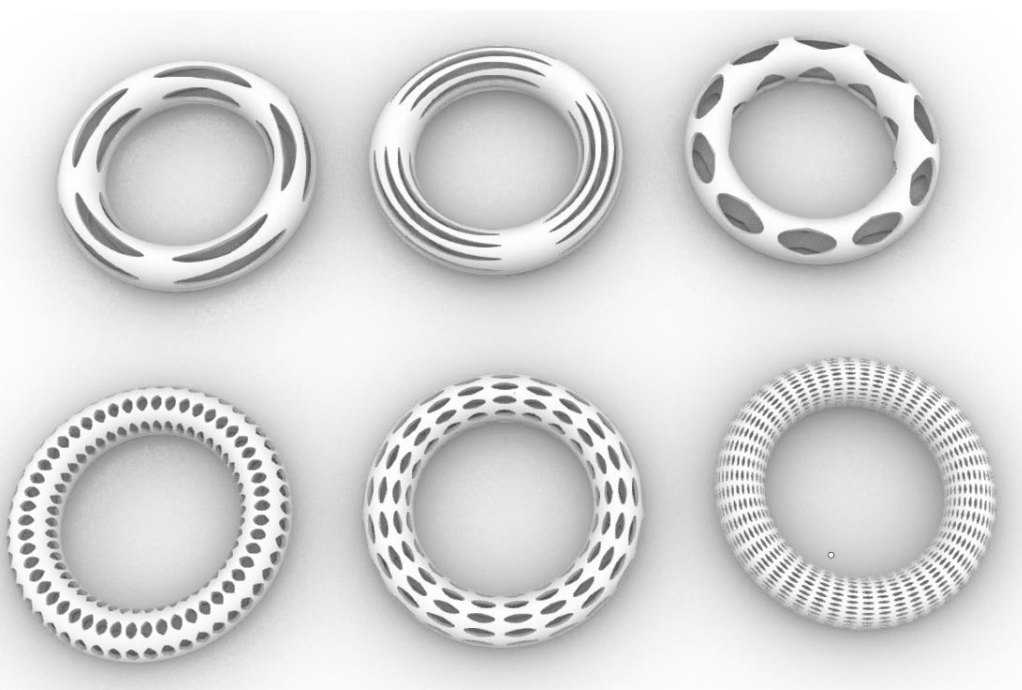
nauczyć się projektowania w programie *Grasshopper*. Wybrałem właśnie ten program ze względu na to, że jest on częścią programu *Rhinoceros*¹²² (potocznie zwanym „Rhino”), który jest moim codziennym narzędziem pracy. Jest on również darmową nakładką, która z tego względu cieszy się dużą popularnością w świecie projektantów. Pierwsze zetknięcie się z programem było ogromnym zaskoczeniem, ponieważ wymagał zupełnie innego podejścia do projektowania. Pomimo posługiwania się wieloma programami do tworzenia obiektów 3D, *GH* jest czymś całkowicie odmiennym. Sposób w jaki powstają obiekty można bardziej porównać do programowania, czyli czegoś całkowicie odmiennego niż świat działań artystycznych. Na początku próbowałem samodzielnie zgłębić tę wiedzę, jednak informacje na ten temat były wtedy praktycznie niedostępne. W miarę możliwości znalazłem kilka artykułów na ten temat na obcojęzycznych stronach internetowych, jednak były one bardzo techniczne i trudne do zrozumienia. Dlatego postanowiłem wybrać się na szkolenie w firmie *Lemondim*¹²³ w Warszawie by poznać podstawy projektowania parametrycznego. Ze względu na niewystarczającą ilość chętnych, szkolenie odbyło się dopiero w czerwcu 2015 roku. Wtedy udało się zebrać grupę zainteresowanych osób, które uczestniczyły w szkoleniu na poziomie zarówno podstawowym, jak i zaawansowanym. Na szkoleniu zapoznałem się między innymi z takimi zagadnieniami jak ogólne działania i rodzaje komponentów w *Grasshopper*, a w szczególności identyfikowania danych przepływających między komponentami i wydobywania konkretnych elementów z całej listy danych. Nauczyłem się pracować na dużej ilości danych w komponentach, w szczególności z uwzględnieniem różnic pomiędzy listami danych generowanych jako *series* lub *range* oraz przemapowywania wartości na przykładzie kołowania obiektów ze względu na ich pole powierzchni. Poznałem również w praktyce zagadnienie *morphingu*, czyli transformacji/deformacji geometrii według określonych reguł. W praktyce polegało to na „oblepieniu” różnych powierzchni powtarzalną, wcześniej zdefiniowaną strukturą, co pozwalało uzyskać różnorodne formy ażurowe.

¹²² <https://www.rhino3d.com/> [dostęp 05.08.2023].

¹²³ <https://lemondim.com/grasshopper/> [dostęp 05.08.2023].



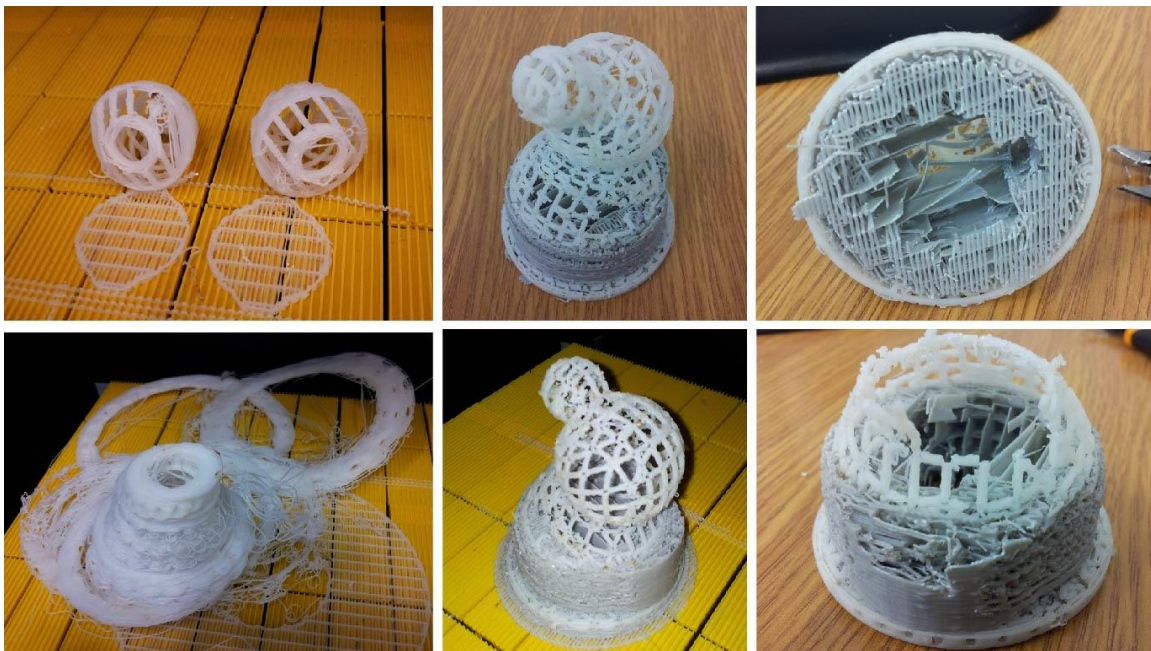
Il 2. 1 Budownie prostego ażuru z wykorzystaniem morphingu. Źródło: opracowanie własne.



Il 2. 2 Wynikowe formy po zmianie parametrów morfowania. Źródło: opracowanie własne.

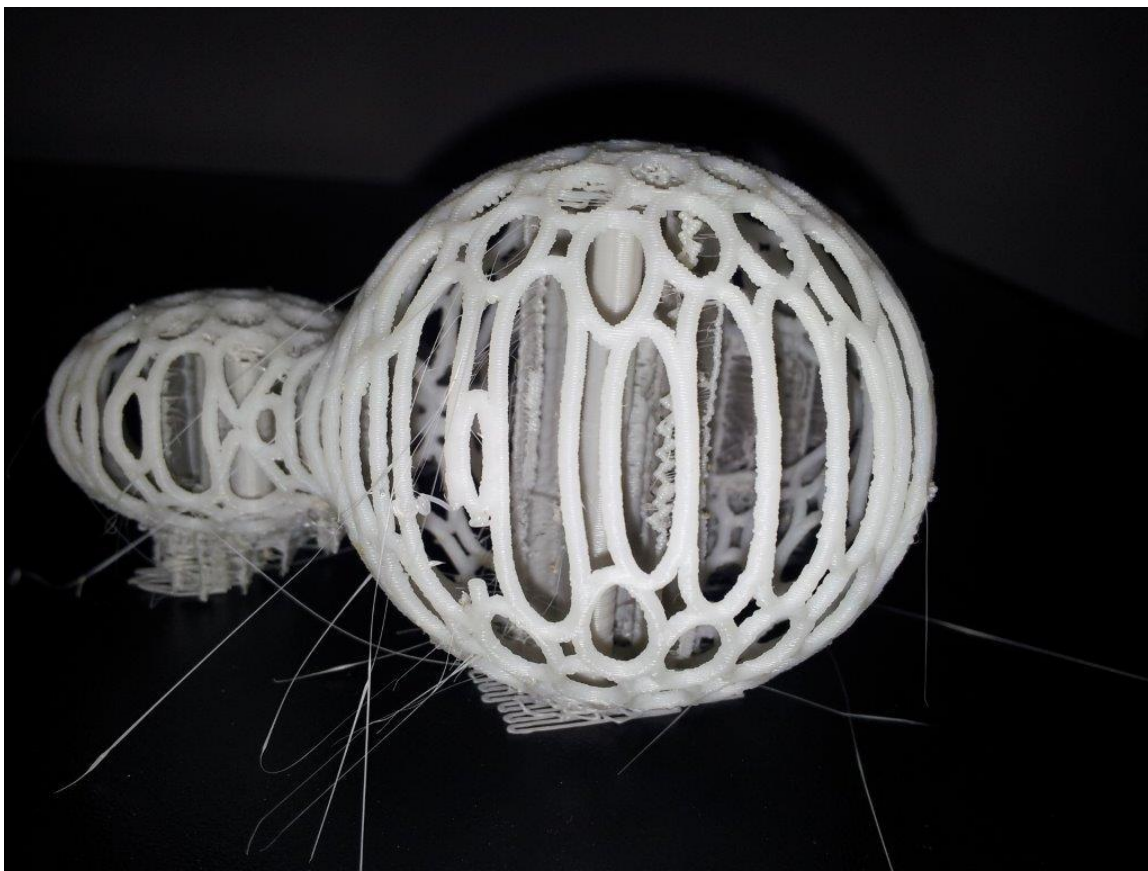
Całe szkolenie trwało zaledwie dwa dni, ale już dzięki niemu mogłem zacząć tworzyć pierwsze formy na bazie prostego skryptu do morfowania powierzchni. Na początku powstały bardzo proste

obiekty, skupiając się nie tyle na ich formie, co na próbie nadania im lekkości poprzez zastosowanie ażurowości w programie *Grasshopper*. Podczas swoich pierwszych prób z realizacją zaprojektowanych obiektów wykorzystałem drukarkę Inspire S200, która tworzyła modele 3D w technologii FDM w materiale ABS¹²⁴. Wówczas była to jedyna technologia do której miałem dostęp i mogłem przetestować możliwości wytworzenia zaprojektowanych brył. Niestety technologia ta zupełnie nie sprawdziła się w tworzeniu ażurowych form, które ze względu na swoją niejednorodną strukturę, wymagały użycia podpór. Usuwanie podpór, po zakończeniu druku, uszkadzało delikatne elementy czyniąc je nieestetycznymi. Również ze względu na małą dokładność, technologia ta, nie pozwalała tworzyć precyzyjnych detali, generując „szorstką” powierzchnię z widocznymi liniami ścieżki druku. Dlatego zdecydowałem się zrezygnować z tej technologii i poszukać innego rozwiązania, które umożliwi mi lepszą realizację moich projektów.

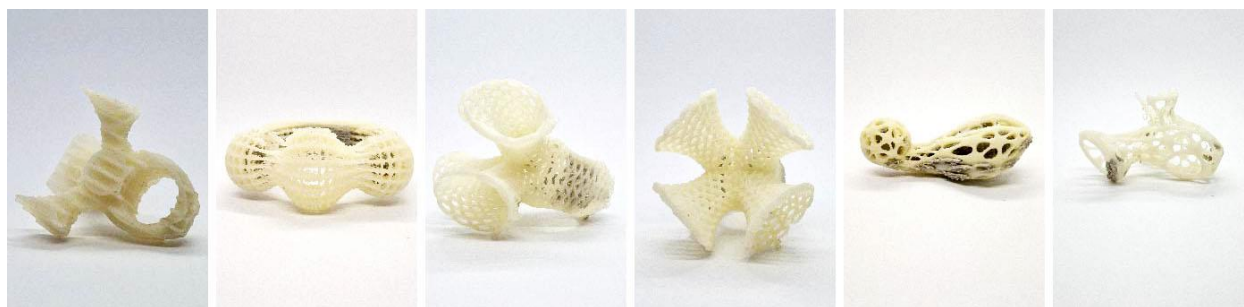


Il 2. 3 Zdjęcia wadliwych realizacja w technologii FDM. Źródło: opracowanie własne

¹²⁴ https://botland.com.pl/blog/filamenty-abs-przyklady-zastosowan-i-charakterystyka/?cd=19651600289&ad=148844894107&kd=&gad_source=1&gclid=CjwKCAjw1emzBhB8EiwAHwZZxaSQ_gVUxGhyA1K67PI57jCw9j_BT6PVEb2hXdjHrpo1b5QCa1xb-BoCIEQQAvD_BwE [dostęp 31.08.2023].



Il 2. 4 Nieestetyczny model zrealizowany w technologii FDM. Źródło: opracowanie własne.



Il 2. 5 Zdjęcia innych modeli z testowej definicji. Źródło: opracowanie własne.

Po pierwszych nieudanych próbach zacząłem się zastanawiać czy koncepcja projektowania parametrycznego, a dokładniej wdrożenie jej w życie za pomocą technologii 3D, jest możliwa. Na szczęście technologia druku 3D rozwija się, otwierając dla projektantów nowe możliwości. Każdego roku pojawiają się innowacje, które zwiększają precyzję i szybkość druku, pozwalając na tworzenie bardziej skomplikowanych i delikatnych ażurowych struktur. Nowe materiały

do druku 3D, takie jak zaawansowane polimery, metale i kompozyty, poszerzają zakres zastosowań tej technologii.

Postanowiłem zatem nie zaprzestawać moich badań i kontynuowałem zgłębianie wiedzy z zakresu projektowania parametrycznego. Po zgromadzenia bardzo obszernego materiału, postanowiłem stworzyć trzy kolekcje, które różnią się od siebie użytą *definicją*¹²⁵ czy technologią produkcji, jak i użytymi w niej materiałami. Ich cechą wspólną jest natomiast ażurowość bryły, jak i motyw linii obecny w powstałych kolekcjach. Linie, potraktowane na różne sposoby, nadają powstałej biżuterii lekkości i wyjątkowego charakteru, podkreślając ich ażurową strukturę, która jest kluczowym elementem moich projektów. Każda z tych kolekcji jest skierowana do różnych firm, o różnym profilu działalności, które mogą wykorzystać projektowanie parametryczne w swojej ofercie. Dzięki posiadanym maszynom i technologiom, firmy mogą wykorzystać stworzone przeze mnie projekty, tworząc unikalną biżuterię. Projektowanie parametryczne otwiera przed nimi nowe możliwości, umożliwiając produkcję skomplikowanych i spersonalizowanych wyrobów biżuteryjnych, dopasowanych do indywidualnych potrzeb klientów.

Fluidium

Pierwszą stworzoną przeze mnie kolekcję biżuterii parametrycznej nazwałem *Fluidium*. Estetyka tej kolekcji opiera się na miękkich, płynnych liniach, tworzących harmonijne i dynamiczne kształty. Nazwa *Fluidium*¹²⁶ doskonale oddaje charakter tych projektów, które wydają się niemalże poruszać i przepływać w przestrzeni.

Była to moja pierwsza kolekcja więc zajęła mi najwięcej czasu. To na niej poznawałem i zgłębiałem zagadnienia związane z projektowaniem parametrycznym oraz pracą w samym programie *Grasshopper*. W trakcie jej tworzenia miałem okazję dokładnie zrozumieć, jak poszczególne elementy projektowania parametrycznego wpływają na ostateczny kształt

¹²⁵W programie Grasshopper, definicje (lub "definitions") to zbiór komponentów, połączeń i danych, które tworzą parametryczny model. Definicje są podstawowymi jednostkami pracy w Grasshopperze, pozwalającymi na tworzenie złożonych algorytmów, które generują i modyfikują geometrię w Rhinoceros.

¹²⁶Nazwę zaczerpnąłem od angielskiego słowa „fluid”, oznaczającego coś płynnego.

biżuterii. Dzięki tej kolekcji mogłem eksperymentować z różnymi technikami i narzędziami, co pozwoliło mi na odkrywanie nowych możliwości projektowych dopasowując je do odpowiedniej technologii wytworzenia powstałych prac. Na przykładzie *Fluidium* chcę najdokładniej pokazać, jak każda zmiana lub dodanie dodatkowego komponentu w programie *Grasshopper* wpływa na formę projektu, podkreślając elastyczność i potencjał projektowania parametrycznego w tworzeniu unikalnej biżuterii. Dlatego też jest ona opisana najdokładniej z pośród trzech kolekcji. Podczas pracy nad kolekcją, jako jeszcze osoba dopiero wdrażająca się w tę tematykę, napotkałem liczne problemy związane z programem *Grasshopper*, który jest zupełnie innym narzędziem niż tradycyjne programy do projektowania biżuterii 3D, takie jak np. *Rhinoceros*. Wiele razy zatrzymywałem się na określonym etapie i poświęcałem dni, aby rozwiązać techniczne trudności związane z pisaniem definicji w interfejsie *GH*. Na szczęście mogłem skorzystać z pomocy i wiedzy społeczności zrzeszonej na oficjalnym forum poświęconym tematyce *Rhino* i *GH McNeel Forum*¹²⁷. Dzięki wsparciu, które tam uzyskałem, mogłem pokonać te przeszkody i kontynuować tworzenie swojej kolekcji.

Projektowanie obiektów z kolekcji polegało najpierw na stworzeniu kilku punktów, a następnie łączeniu ich w określony sposób, tworząc linie lub zestawy linii. Na początku pracowałem z pojedynczymi liniami, a dodając kolejne punkty, tworzyłem coraz bardziej interesujące połączenia. Dzięki temu mogłem nadać projektom unikalny i estetyczny wygląd, zachowując jednocześnie pełną ergonomię i komfort noszenia.

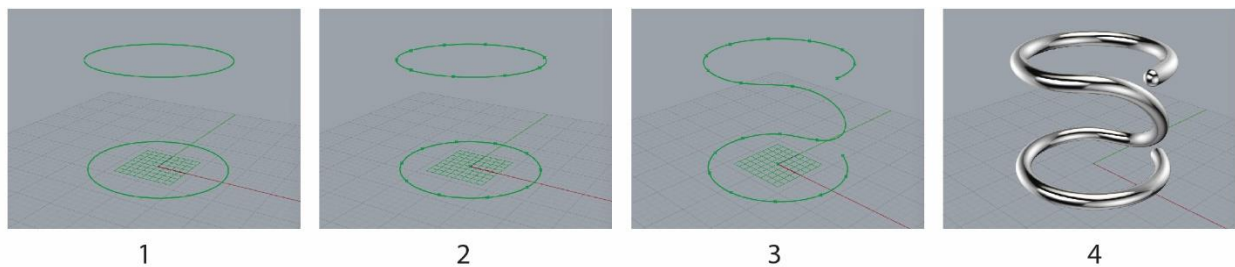
Na przykładzie wybranych modeli z kolekcji omówię zasadę tworzenia obiektów biżuteryjnych zaprojektowanych dzięki temu programowi. Chcę pokazać, jak mimo matematycznych działań można wygenerować formy, które nie przypominają syntetycznych, kanciastych obiektów, z jakimi zazwyczaj, dla osób niezwiązanych z tym tematem, kojarzy się komputerowe modelowanie.

Pierwszy obiekt jaki stworzyłem składa się z jednej płynnej linii. Mogłem oczywiście na samym już początku stworzyć okrąg - koło, które też jest najprostsza figurą, ale uznałem, że korzystając właśnie z tego typu projektowania powstałe bryły mogą być bardziej przemyślane i mniej typowe.

¹²⁷ <https://discourse.mcneel.com/> [dostęp 05.06.2024].

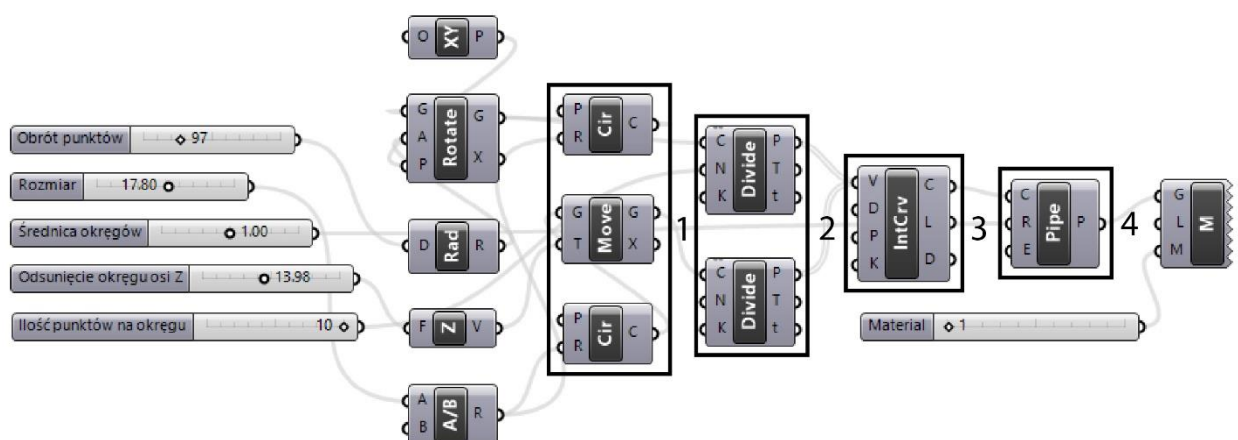
Ilustracja poniżej ukazuje proces powstawania pierwszego modelu oraz zasady tworzenia brył, obejmujące następujące działania:

1. Stworzenie dwóch okręgów, określające rozmiar palca.
2. Stworzenie 10 punktów na każdym okręgu.
3. Połączenie punktów w linię - krzywą, w odpowiedni sposób, tworząc bardziej organiczną formę.
4. Nadanie sparametryzowanej grubości krzywej, tworząc bryłę F1.



Il 2. 6 Zrzut z ekranu programu przedstawiająca sposób powstania najprostszej formy z kolekcji Fluidium. Źródło: opracowanie własne.

Definicja jaka powstała do stworzenia tego obiektu jest najprostszą, ale jest też punktem wyjścia do rozbudowy jej w dalszym etapie projektowania.



Il 2. 7 Pierwsza podstawowa definicja kolekcji Fluidium. 1.) Stworzenie dwóch okręgów.
2.) Stworzenie 10 punktów na każdym okręgu. 3.) Połączenie punktów w linię.
4.) Nadanie krzywej grubości.
Źródło: opracowanie własne.

Powstawanie kolejnych modeli, czyli transformacja *definicji*, polegała na dodawaniu i zmianie kolejnych *parametrów*¹²⁸ jak i *komponentów*¹²⁹, przez co projekty ewaluowały, tworząc coraz bardziej skomplikowane konstrukcje.

Poniżej opiszę w skrócie na przykładzie obiektów od F2 do F13, jakie działania były robione w procesie zmiany bryły (dokładnie nie będę opisywał wszystkich zmian parametrów, takich jak ilość linii, czy zmiany proporcji, a skupię się na głównych zmianach rozbudowujących definicję):

F2. Dodanie obicia obiektu w osi centralnej (dodanie komponentu Polar Array).

F3. Połączenie większej ilości punktów szeregowo. Każdy punkt z jednej krzywej łączy się ze swoim odpowiednikiem z drugiej krzywej (komponent Interpolate).

F4. Obrót punktów jednego okręgu o kąt 80 stopni (dodanie komponentu Rotate), przez co powstałe połączenie punktów powstają ukośnie.

F5. Dodanie środkowego okręgu z punktami o większej średnicy – powstają dzięki temu łuki wypukłe, a nie linie proste. Każda z linii środkowych przechodzi już przez trzy punkty.

F6. Dodanie środkowego okręgu z punktami o mniejszej średnicy – powstają dzięki temu łuki wklęsłe, a nie linie proste.

F7. Dodanie odbicia lustrzanego (komponent Mirror).

F8. Zmiana parametrów średnicy środkowego okręgu oraz proporcji grubości linii.

F9. Zmiana parametrów: średnicy okręgów bocznych, ilości punktów na krzywych, komponentu Rotate, komponentu Mirror.

¹²⁸ Ustawienia kontrolujące wartości i cechy wejściowe w definicji. Parametry mogą być sterowane za pomocą sliderów, liczb, list wyboru i innych interaktywnych elementów.

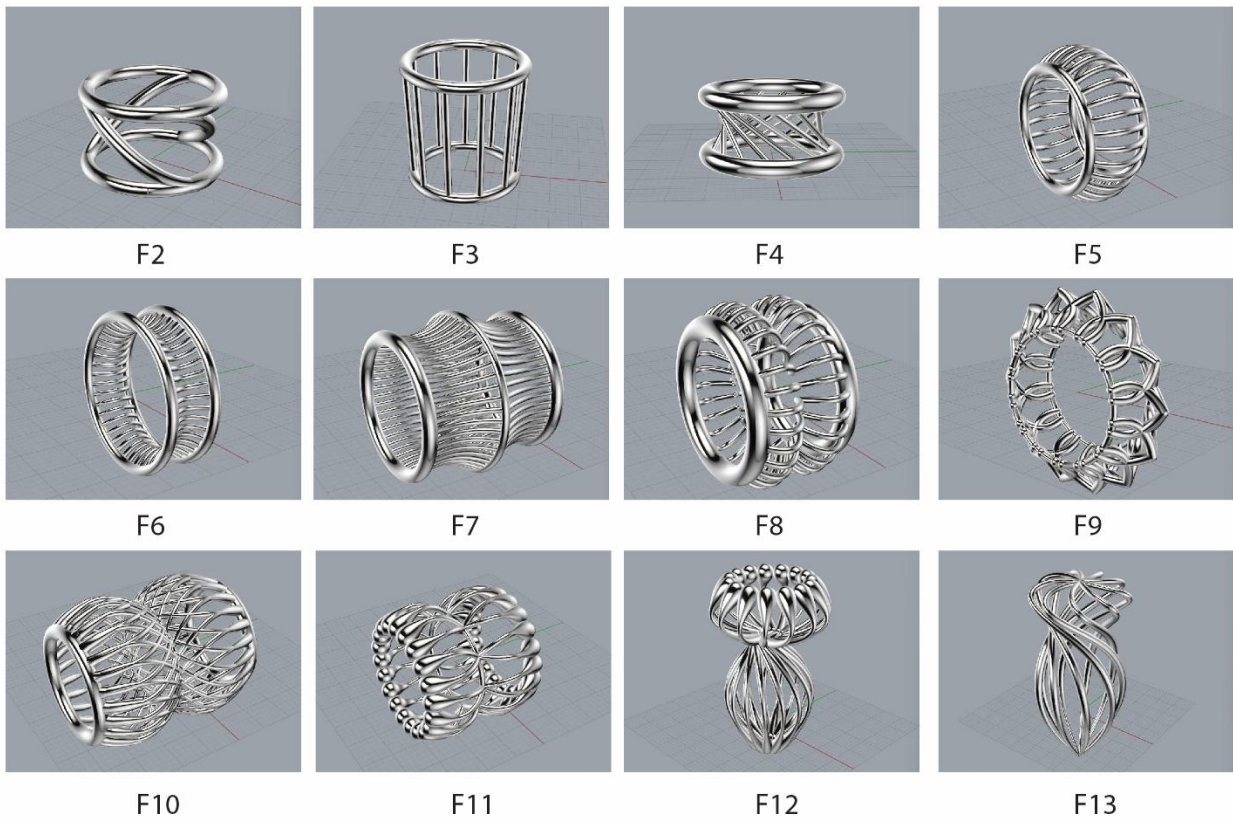
¹²⁹ To podstawowe bloki budulcowe w Grasshopperze, które wykonują różne operacje, takie jak generowanie geometrii, modyfikowanie istniejącej geometrii, obliczenia matematyczne, operacje logiczne i wiele innych.

F10. Zmiana parametrów oraz dodanie komponentu Pipe Variable powodujący tworzenie dodatkowo linii o zmiennej średnicy.

F11. Zmiana ogólnych parametrów wyolbrzymiając komponent Pipe Variable.

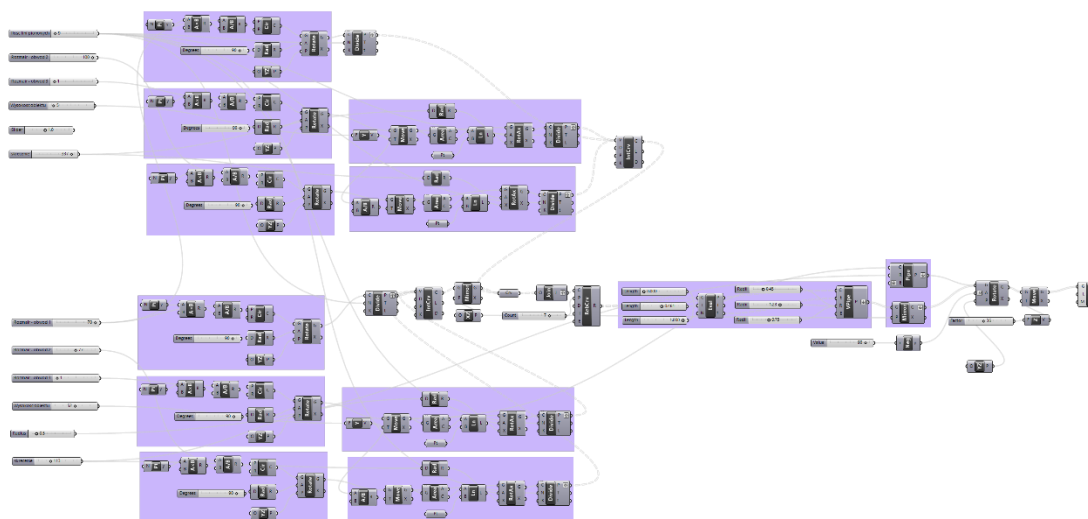
F12. Deformacja dolnej części obiektu poprzez zmianę parametrów.

F13. Zmiana parametrów do uzyskania czystej formy wyjściowej do projektowania kolejnych elementów.



Il 2. 8 Miniatury ukazujące przebudowę bryły podczas zmiany parametrów oraz dodawania komponentów. Źródło: opracowanie własne.

Po dokonaniu wyżej opisanych modyfikacji cała *definicja* rozrasta się, tworząc większą ilość parametrów i komponentów dla potencjalnych zmian.



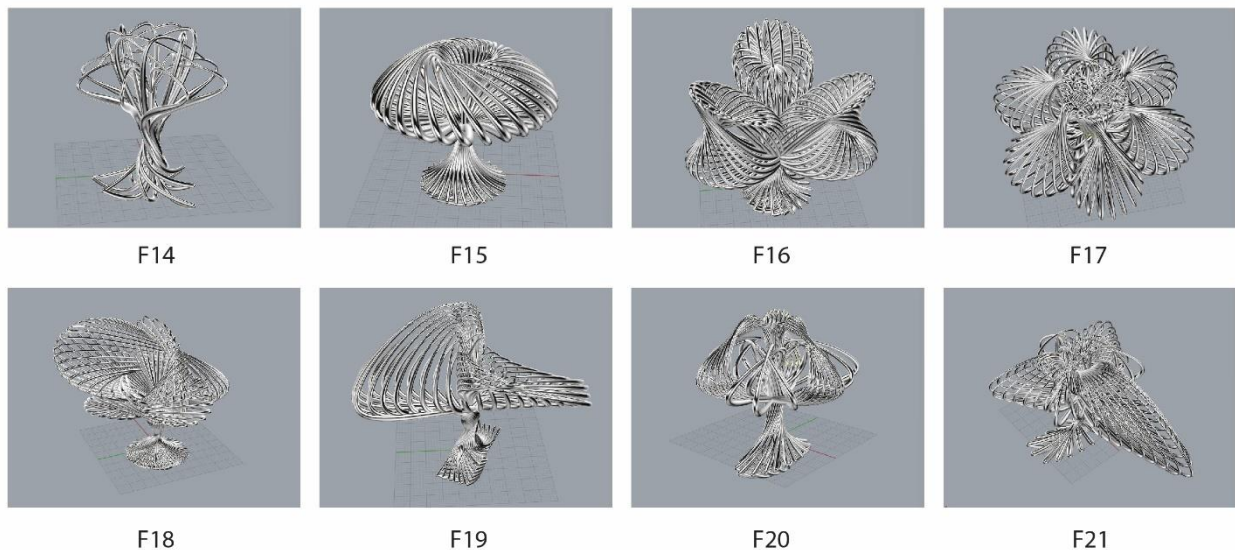
Il 2. 9 Ilustracja ukazująca rozbudowę definicji po wykonaniu wszystkich przekształceń do modelu F13. Źródło: opracowanie własne.

Mając już za sobą przeprowadzone testy działania projektowania parametrycznego na prostych przykładach, skupiłem się przy tworzeniu kolejnych obiektów na rozbudowie bryły. Chciałem ukazać potencjał projektowania parametrycznego przy generowaniu ażurowych form. Wszystkie powstałe prace od tego momentu posiadają już zmienną grubość linii co dynamizuje całą bryłę, ale również w momentach ich kumulacji pozwala na stworzenie delikatnej i lekkiej formy.

W pierwszym etapie stworzyłem głównie pierścionki, na których mogłem kontynuować dalsze transformacje wcześniej powstałych brył, ukazując tym samym ich parametryczną zmienność. Tak powstały pierścionki od F14 do F21, które są dosyć nietypowe, ponieważ zaprzeczają *definicji* pierścionka jako „*obrączki noszonej na palcu...*”¹³⁰. Brakuje w nich właśnie tej obrączki. Jednak są to pierścionki, które zakłada się pomiędzy palce. Mogą one również stanowić małą formę rzeźbiarską jako wolno stojąca konstrukcja. Pomimo swojego „innego” kształtu są w pełni funkcjonalne. Kontynuując transformację pierścionka F13 zacząłem przekształcać go w taki sposób, aby bez problemu mógł być zakładany pomiędzy dwa palce. Jednak przy małej ilości linii wyglądał on dla mnie niezadowalająco, tak jakby był niedokończony. Dlatego

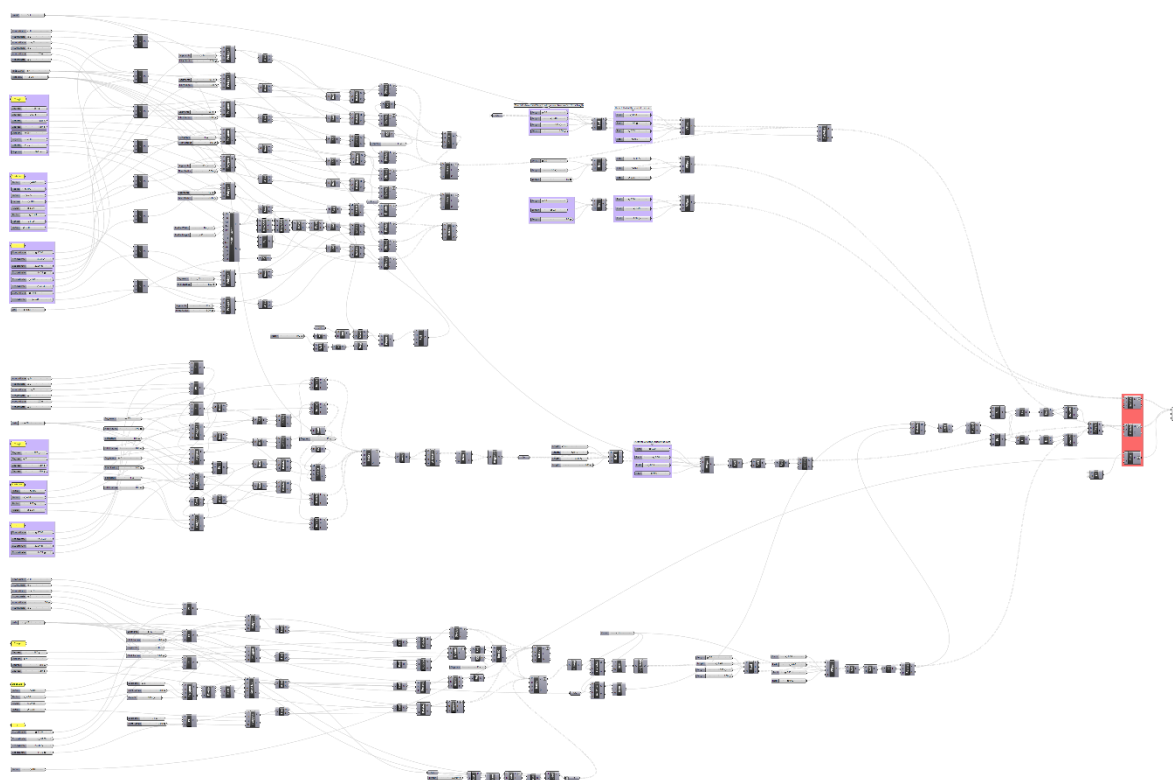
¹³⁰ <https://sjp.pwn.pl/slowniki/pier%C5%9Bcionek> [dostęp 23.05.2024].

poprzez zwielokrotnienie ilości linii i powiększeniu górnej części pierścionka powstał projekt F15, który patrząc z boku przypomina formę grzyba. Dalsze zmiany polegały na deformacji, głównie górnej części pierścionka, poprzez zmianę głównych parametrów, takich jak ilości linii, zmianę kolejności łączenia punktów, zmianę proporcji oraz dodanie dodatkowego komponentu Polar Array (czyli odbicie obiektów wkoło). Dzięki temu zabiegowi zacząłem coraz bardziej odchodzić od kształtu koła, zacząłem tworzenie swojej *definicji* – modele F16 oraz F17. Kolejną próbą projektową jaką podjąłem było zmienienie całkowicie górnego kształtu, poprzez zmianę profilu. Tak powstał dosyć dynamiczny obiekt F18. W następnych próbach, oprócz dalszej deformacji góry, zająłem się również dolną częścią, aby kolekcja nie stała się zbyt monotonna. Chciałem również doprowadzić ją do bardziej komfortowego użytkowania, szczególnie przy bardziej rozbudowanych konstrukcjach. W projektach F19, F20 oraz F21 widoczna jest zmiana kształtu dolnego elementu oraz dalsze transformacje. Na przykładzie tych projektów zauważalne jest już jak projektowanie parametryczne pozwala na znaczną elastyczność w kształtowaniu form, umożliwiając tworzenie nietypowych, a jednocześnie funkcjonalnych projektów.



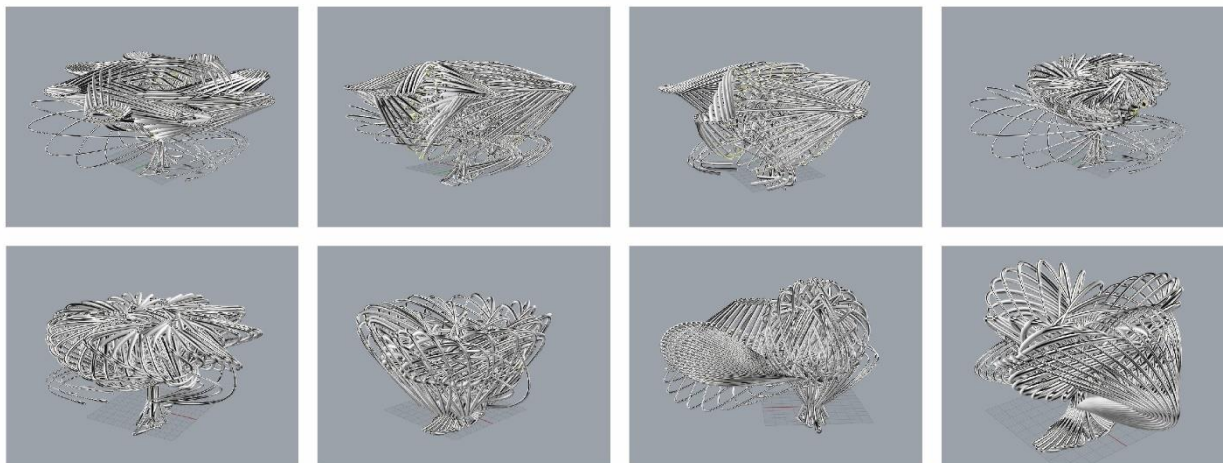
Il 2. 10 Miniatury modeli F14-F21. Źródło: opracowanie własne.

Wraz z coraz bardziej skomplikowanym kształtowaniem bryły, *definicja* również się rozbudowuje. Na przykładzie modelu F21 ilość parametrów do zmian bryły wynosi osiemdziesiąt.



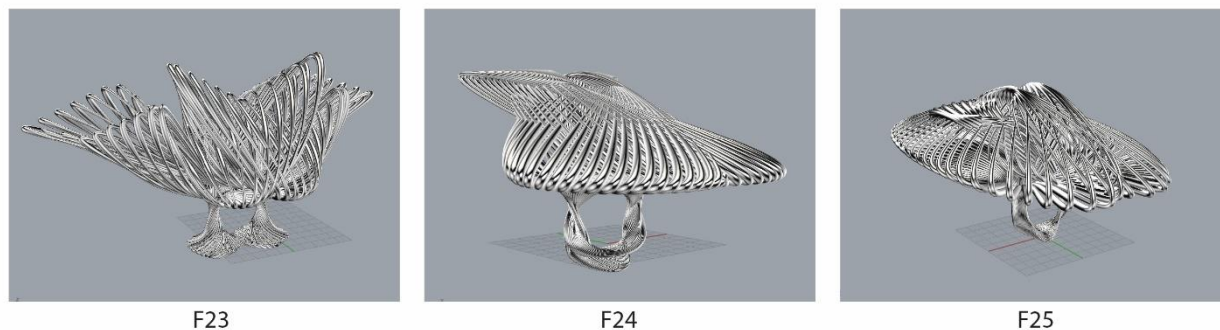
Il 2. 11 Zrzut z ekranu programu Grasshopper pokazujące definicję do modelu F21. Źródło: opracowanie własne.

Zależało mi na tym, aby stworzyć biżuterię jak najmniej opartą na podstawowych kształtach, czy figurach geometrycznych, czyniąc ją jak najbardziej organiczną. Dlatego kolejny model F22 potraktowałem jako pewnego rodzaju eksperyment, poprzez przypadkową zmianę parametrów, które zrobiłem bez głębszego zamysłu. Powstały różne wariacje, które ze względu na swoją przypadkową formę oraz mniejszą funkcjonalność, zostały przeze mnie odrzucone. Na tej bazie udało mi się, poprzez świadomą modyfikację parametrów, wystylizować tę dynamiczną formę. Ilustracja poniżej ukazuje przykładowe chaotyczne formy jakie powstały oraz finalny ostatni obiekt po pewnych korektach parametrów.



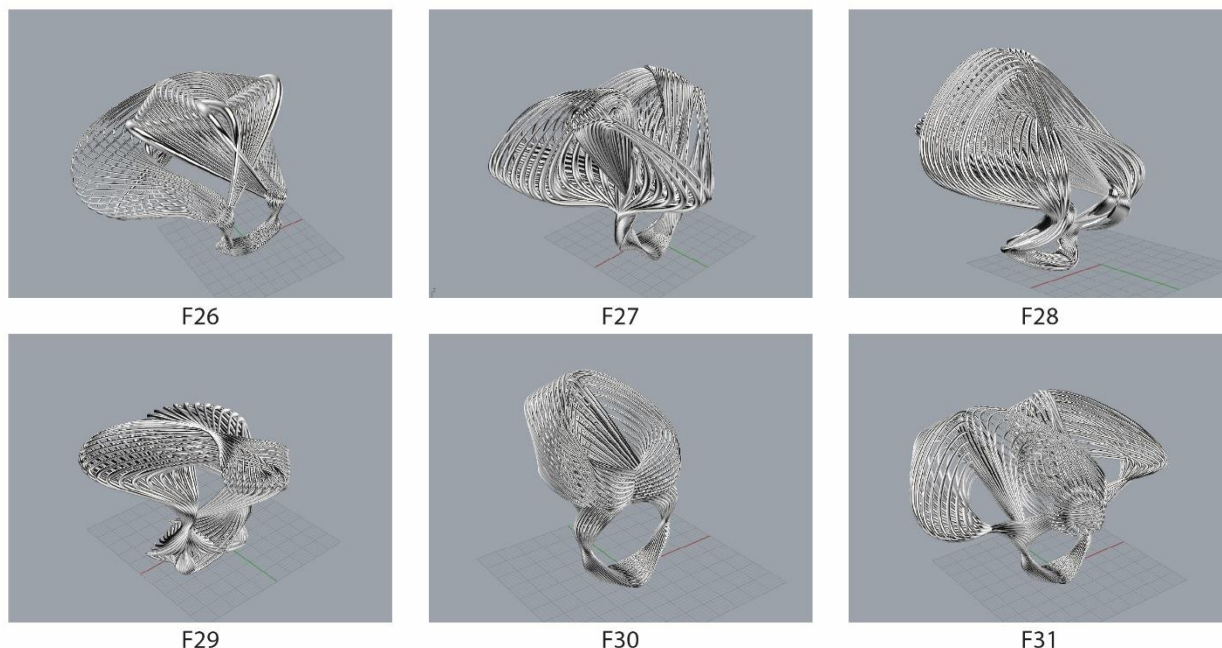
Il 2. 12 Przykładowa zmiana parametrów generująca chaotyczne formy. Ostatni obiekt to F22. Źródło: opracowanie własne.

W kolejnym etapie, chcąc sprawdzić możliwości tego sposobu projektowania, postanowiłem stworzyć większe bryły, niemalże zakrywające całą dłoń. Ze względu na większą ich skalę musiałem przeprojektować dół pierścionków, aby ze względu na swoją wagę, dobrze trzymały się i układały na dłoni. Tak powstały obiekty F23, F24 oraz F25, różniące się właśnie tą dolną częścią oraz ogólnym zarysem ażurowej bryły. Wszystkie powstałe prace da się założyć na palec już w sposób tradycyjny. Są dużo bardziej rozbudowane i okazałe.



Il 2. 13 Obiekty o większych gabarytach F22, F24, F25 z przebudowanymi elementami dolnej części. Źródło: opracowanie własne.

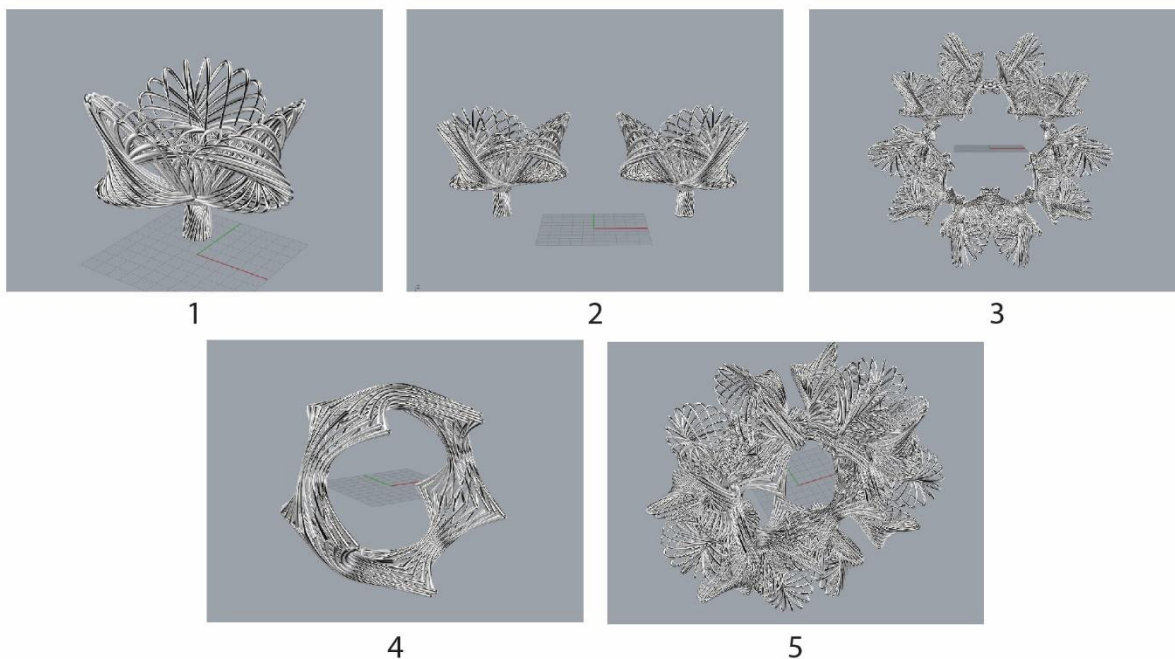
Rozwinięciem tej idei były kolejno modele F26, F27, F28, F29, F30 oraz F31. Nadal charakteryzujące się organiczną, ażurową formą, ale ich skala jest dopasowana do dłoni.



Il 2. 14 Modele F26, F27, F28, F29, F30 oraz F31 z kolekcji Fluidium. Źródło: opracowanie własne.

Zaprezentowane na przykładzie pierścionków możliwości projektowania parametrycznego można oczywiście z powodzeniem przenieść na biżuterię noszoną na innych częściach ciała. Dlatego dla przykładu stworzyłem dodatkowo cztery bransoletki oraz naszyjnik, ukazując tym samym szersze możliwości tworzenia biżuterii za pomocą projektowania parametrycznego.

Pierwszą bransoletką jaką stworzyłem był model F32. Projektując ją postanowiłem powrócić do jednego z pierwszych wzorów, a dokładnie do F16, starając się poprzez proste zabiegi, nie przebudowując całej *definicji* od początku, uzyskać interesującą ażurową bryłę. Ilustracja poniżej pokazuje proces transformacji. Na początku wydobylem główny górny element modelu F16 zmieniając jedynie delikatnie jego proporcję poprzez manipulacje parametrami – rys. 1. Następnie odsunąłem go od środka układu współrzędnych na odległość połowy średnicy bransoletki (w tym wypadku przyjąłem średnicę 55 mm, aby bransoletka swobodnie dała się założyć na rękę). Potem za pomocą odbicia lustrzanego powieliłem ten obiekt - komponent Mirror – rys. 2. Kolejnym krokiem było dodanie pięciokrotnej multiplikacji obiektu – rys 3. Aby uspołnić powstały projekt pod względem konstrukcji i wytrzymałości, stworzyłem płynne linie, dzięki czemu ergonomia zakładania bransoletki się poprawiła – rys 4. Po połączeniu obu form z rys. 3 i rys. 4 powstała bransoletka F32, wynikająca bezpośrednio z modelu F16.



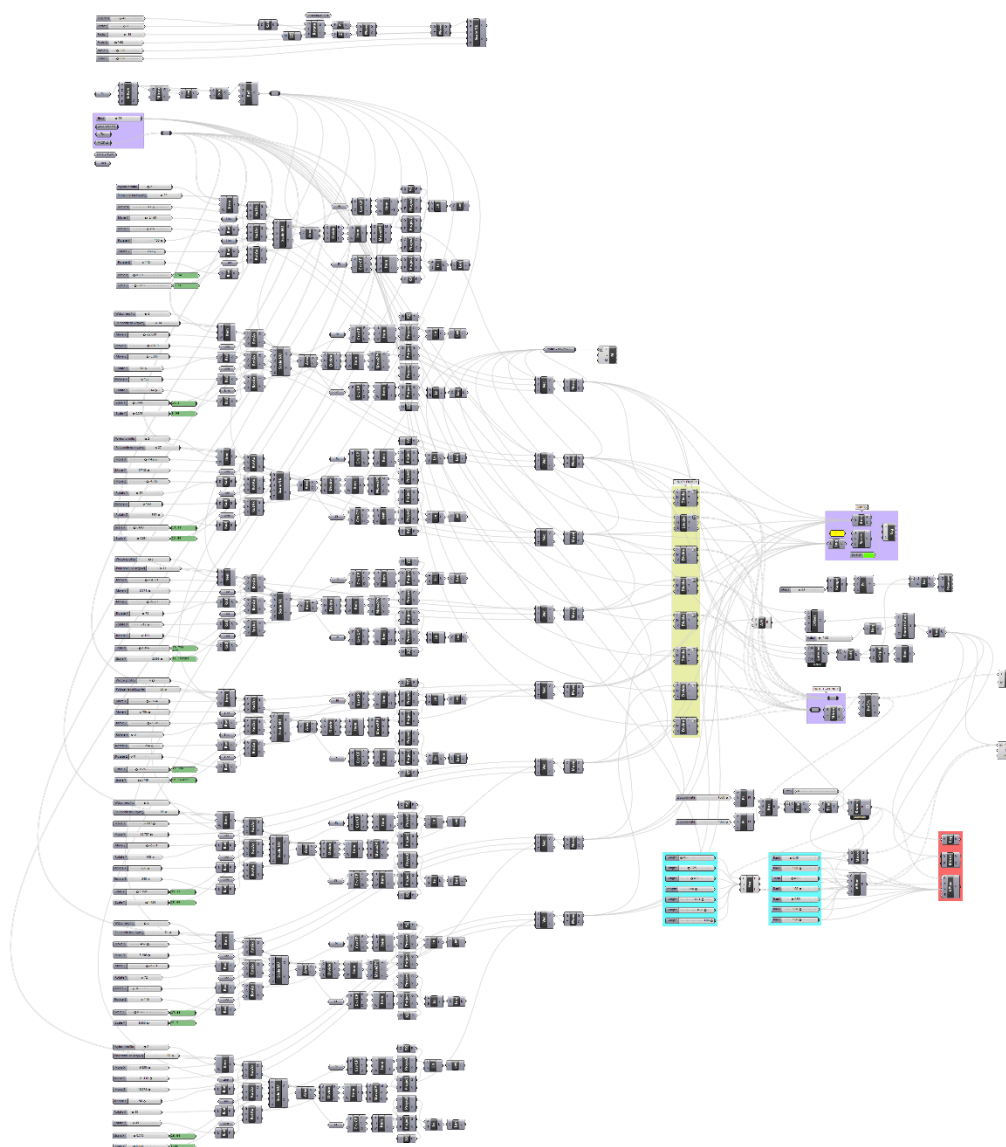
Il 2. 15 Proces powstawania bransoletki F32. Źródło: opracowanie własne.

Pozostałe trzy bransoletki oraz naszyjnik nawiązują również do form pierścionków wcześniej zaprojektowanych, dzięki czemu można je ze sobą zestawić tworząc komplety. Dla przykładu ilustracja poniżej przedstawia zestawienie modelu pierścionka F30, bransoletki F35 oraz naszyjnika F36. Wybrałem akurat te przykłady ponieważ są one formami, które poprzez przeprowadzone transformacje, mogą spokojnie zaistnieć na rynku komercyjnym biżuterii.



Il 2. 16 Zestawienie ze sobą modeli F30, F35 oraz F36. Źródło: opracowanie własne.

Poniżej przedstawiam zrzut z ekranu, pokazujący jak wygląda *definicja* na bazie modelu F36. Jest ona już mocno rozbudowana i możliwości wygenerowania kolejnych, innych wariantów naszyjnika jest wręcz nieograniczona.



Il 2. 17 Końcowa definicja tworząca naszyjnik F36. Źródło: opracowanie własne.

Całość kolekcji składa się z trzydziestu jeden pierścionków, czterech bransolet oraz naszyjnika. Potencjał tworzenia parametrycznego daje ogromną liczbę możliwości. Oczywiście przy posiadaniu już ostatecznej *definicji* ta „zabawa” zmiennością parametrów trwała często przy jednym obiekcie nawet dwie godziny.

Jednym z problemów, jaki pojawiał się przy generowaniu brył, są wymagane duże moce obliczeniowe komputera. Przy bardziej skomplikowanych elementach każda zmiana jednego parametru trwała parę minut (ilość parametrów do zmian dochodziła nawet do stu). Dlatego, aby uzyskać poprawną i estetyczną bryłę potrzeba jest cierpliwości oraz wyczucie przestrzenne obiektu. Błędnie zdefiniowane parametry generowały obiekty, które albo były niemożliwe do stworzenia, albo były całkowicie nieużytkowe, co przy próbie wprowadzenia biżuterii do sprzedaży skutkowałoby „niepowodzeniem” kolekcji.

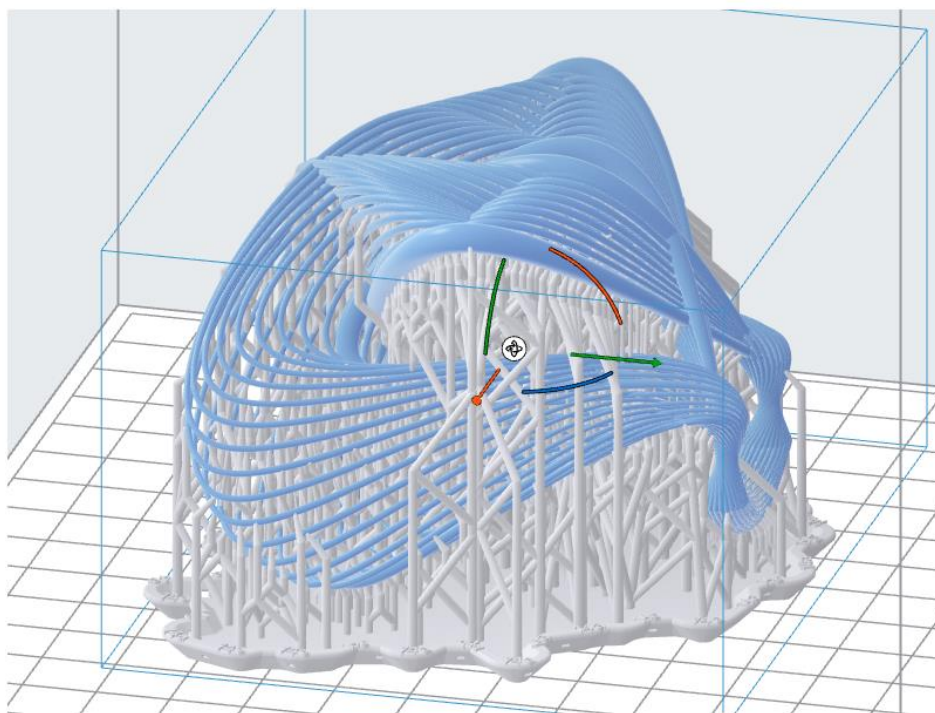
Tak jak wspomniałem we wcześniejszym rozdziale dotyczącym technologii druku 3D, jest wiele możliwości druku 3D, ale jedynie SLS daje możliwość tworzenia zaprojektowanych obiektów bez tak zwanych *supportów*¹³¹ - czyli podpór. Oczywiście rozpoczynając testy możliwości produkcji mojej kolekcji, rozważałem użycie jeszcze technologii *DLP (Digital Light Processing)*, z którą mam doświadczenie i którą regularnie wykorzystuję podczas codziennej pracy. Polega ona na wykorzystaniu wysokiej rozdzielczości projektora UV do utwardzania cienkich warstw żywicy fotopolimerowej. Światło UV z projektora jest rzucane na całą warstwę jednocześnie, co umożliwia szybszy proces drukowania niż tradycyjne metody, w których używa się punktowej wiązki lasera. Po utwardzeniu jednej warstwy platforma podnosi się o grubość tej warstwy (dochodzącej nawet do 0,025 mm), co pozwala na drukowanie obiektów o wysokiej dokładności i szczegółowości. Technologia *DLP* jest ceniona ze względu na szybkość drukowania i wysoką jakość wydruków, co czyni ją popularną szczególnie w prototypowaniu i produkcji małoseryjnej. Na początku, przy prostych modelach, produkcja w technologii *DLP* nie napotykała większych trudności. Jednak z przeprowadzonych przeze mnie testów wynika, że możliwe do zrealizowania są jedynie modele od F1 do F15. Zastosowanie polimeru, który nadawał się do odlewania metodą traconego wosku, pozwoliło mi na wykonanie dodatkowo modelu F15 w srebrze. Ze względu na ażurową i delikatną linię, przy pierwszych dwóch próbach, nie odlały się najcieńsze odcinki linii. Dopiero trzecia próba, poprzez dodanie dużej ilości kanałów dolewowych, zakończyła się sukcesem.

¹³¹ Więcej o supportach można dowiedzieć się tutaj: <https://3d.edu.pl/podpory-w-druku-3d-wszystko-co-musisz-wiedziec/> [dostęp 10.06.2024].



Il 2. 18 1.) Jeden z nieudanych odlewów. 2.) Dodanie większej ilości kanałów dolewowych do głównej formy. 3.) Surowy odlew wraz z kanałami 4.) Odlew po odcięciu kanałów. Źródło: opracowanie własne.

Jednak przy już bardziej skomplikowanych obiektach obligatoryjne *supporty* technologii *DLP*, które są potrzebne w procesie tworzenia, byłyby niemożliwe do usunięcia, ponieważ musiałyby one pojawiać się również wewnątrz modelu. Próby odcięcia ich w tych miejscach skutkowałyby uszkodzeniem ażurowej konstrukcji.



Il 2. 19 Zrzut ekranu pierścionka F26 z programu do generowania supportów do drukarki Formlabs w technologii DLP. Kolor niebieski to drukowany model, natomiast kolor szary to wygenerowane supporty. Źródło: opracowanie własne.

W związku z tym kolekcja *Fluidium* może być wykonana w firmach posiadających w swoim asortymencie drukarki 3D w technologii *SLS* (*Selective Laser Sintering*). Technologia ta polega

na selektywnym spiekaniu proszków materiałowych za pomocą wiązki lasera o dużej mocy. Proces rozpoczyna się od rozprowadzenia cienkiej warstwy proszku na powierzchni za pomocą wałka. Następnie laser spieka określony kształt na tej warstwie proszku, tworząc część modelu. Po zakończeniu spiekania jednej warstwy, urządzenie nakłada kolejną warstwę proszku, która również jest spiekana laserem zgodnie z zaprojektowanym kształtem. Proces ten jest powtarzany aż do ukończenia całego modelu. Technologia *SLS* rozwiązuje problem *supportów*, gdyż podczas generowania modelu 3D nie są one wymagane. Wydrukowany obiekt zawieszony jest w proszku, który po wydruku zostaje usunięty - wypiąskowany. Zaletą tej technologii jest również to, że nieuformowany proszek, który nie został spieczony, może być ponownie użyty w kolejnych cyklach druku, co przekłada się na niskie koszty produkcji.

Wdrażając swoją kolekcję nawiązałem współpracę z Polską firmą *Sinterit*, produkującą drukarki 3D właśnie w tej technologii. Założyciele firmy już w 2015 roku wprowadzili na rynek swój pierwszy model o nazwie Lisa. Miał on odmienić rynek *SLS*, bo drukarka była wielokrotnie tańsza od konkurencji skupiającej się na drukarkach przemysłowych. Na bazie wzajemnej współpracy udało nam się wdrożyć wszystkie trzydzieści sześć modeli. Na początku, w fazie testów, wydrukowany został model w trzech różnych materiałach *PA12 Smooth*¹³², *PA12 Industrial*¹³³ oraz *FLEXA Perfomance*¹³⁴. Ciekawym materiałem jest *FLEXA Perfomance*, który jest elastyczny, przez co odporny na zgniatanie. Największą jego wadą jest niestety niska dokładność druku oraz to, że w przypadku cienkich linii ulegają one załamaniu – nie trzymają wcześniej zdefiniowanego kształtu. Dlatego na samym już początku został on przeze mnie odrzucony. Z dwóch pozostałych materiałów powstała cała kolekcja. Każdy z nich ma różne właściwości i ze względu na skomplikowaną ażurową oraz delikatną geometrię zostały one indywidualnie dopasowane do konkretnych modeli. „*PA12 Smooth* jest wytwarzany chemicznie, natomiast *PA12 Industrial* jest rozdrabniany kriogenicznie. Te różnice wpływają na kształt, wielkość i różnorodność ziaren, co z kolei oddziałuje na okno przetwórcze materiału, gładkość powierzchni oraz wytrzymałość. Ponadto, oba materiały mają różne dodatki, takie jak plastyfikatory, które różnią się składem. Te różnice sprawiają, że *PA12 Industrial* jest bardziej sztywny,

¹³²<https://sinterit.com/pl/proszki/pa12-smooth/> [dostęp 10.06.2024]

¹³³<https://sinterit.com/pl/proszki/pa12-industrial/> [dostęp 10.06.2024].

¹³⁴<https://sinterit.com/pl/proszki/flexa-performance/> [dostęp 10.06.2024].

ale jednocześnie kruchszy, ma większą odporność na rozciąganie, ale mniejszą na zginanie. Charakteryzuje się lepszą stabilnością geometryczną, lecz gorszym porowatym wykończeniem powierzchni. Dzięki szerszemu oknu przetwórczemu można go drukować znacznie szybciej, ale zwiększa to ryzyko pojawiania się pewnych defektów, takich jak mikro zapadnięcia materiału”¹³⁵. W kolorystyce oba materiały są dokładnie takie same.

Podczas produkcji na samym początku pojawiały się problemy, ponieważ do tak delikatnych form była potrzeba indywidualnego skonfigurowania mocy lasera. W początkowej fazie modele nie wychodziły w całości. Powstawały elementy niedodrukowane oraz mikro zapadnięcia, które nie spełniały moich wymagań jakościowych.



Il 2. 20 Wadliwe druki oraz charakterystyczne mikro zapadnięcia wyglądające jak dziury w modelu. Źródło: opracowanie własne.

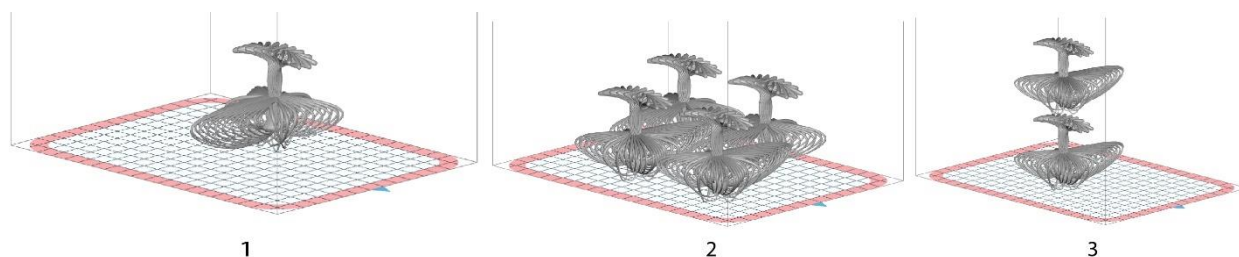
¹³⁵Informacje na temat materiałów PA12 Smooth oraz PA12 Industrial otrzymane od firmy Sinterit.



Il 2. 21 Jeden z pierwszych testowych modeli wydrukowanych przez firmę Sinterit. Źródło: opracowanie własne.

Kolejny problem jaki się pojawiał związany był z samą grubością linii. W niektórych modelach poprzez ich geometrię oraz ich grubości nie dało się skalibrować lasera tak, aby model wyszedł w całości. Najczęściej przy bardzo delikatnych i rozłożystych liniach ulegał on połamaniu w procesie piaskowania. Dlatego zachodziła potrzeba przebudowy modelu. Gdyby nie projektowanie parametryczne to wprowadzenie korekty grubości w tradycyjny sposób, linia po linii, zajęłoby bardzo wiele czasu. Natomiast ze względu na to, że obiekty były w pełni sparametryzowane, wprowadzanie zmian nie było pracochłonne. Dzięki temu można było szybko reagować na zaistniałe problemy produkcyjne drukując kolejne modele, by znaleźć odpowiedni dla danego modelu kompromis. Po przeprowadzeniu wielu testów udało się w pełni wyprodukować całą kolekcję na drukarce *Lisa Pro* oraz *Lisa X*, które głównie różniły się polem pracy. Miałem możliwość wydrukowania modeli o wielkości nieprzekraczającej

13 cm x 18 cm x 33 cm. W zależności od produkowanych obiektów i sposobu ich ułożenia czasu druku były różne. Ze względu na to, że ta technologia daje możliwość wydruku w pełni załadowanej komory, czas jednego druku przekraczał ponad trzydzieści godzin. Natomiast przy mniejszych modelach możliwe było drukowanie wielu na raz. Jedynie duże bransoletki, czy naszyjnik był drukowany samodzielnie.



Il 2. 22 Zrzuty z ekranu przedstawiające ułożenie modeli oraz ich wpływa na czas druku. Źródło: opracowanie własne.

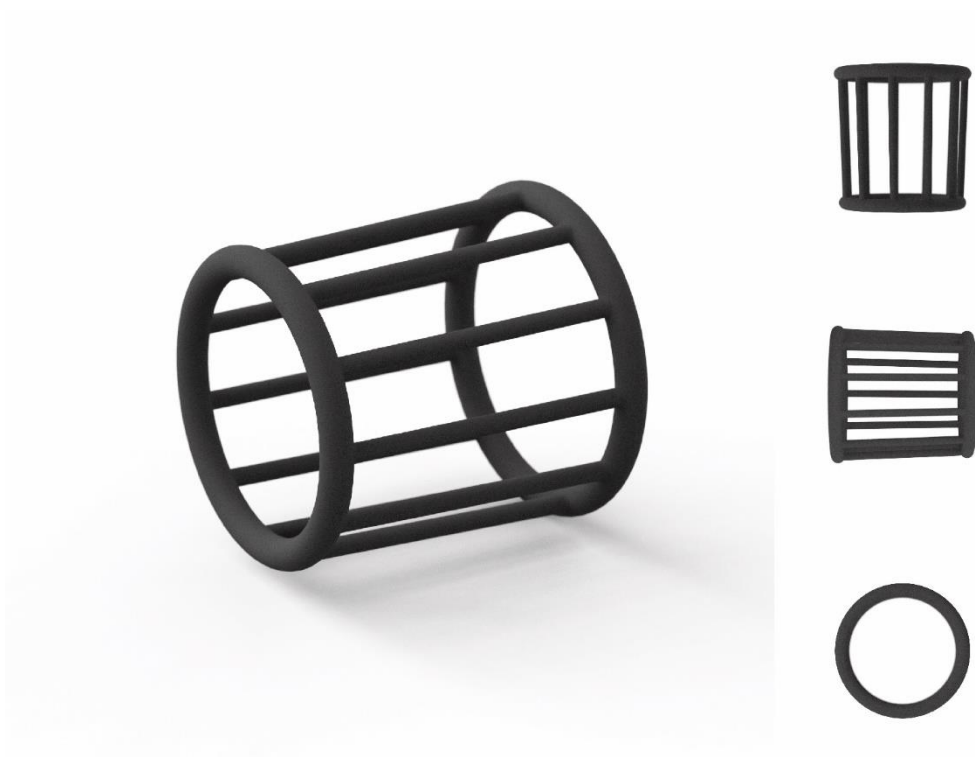
Firmy, takie jak *Sinterit*, posiadające technologię *SLS* mogą znacząco wzbogacić swoją ofertę, korzystając w ten sposób zaprojektowanych *definicji* biżuterii parametrycznej, stworzonych w programie *Grasshopper*. Dzięki temu mogą one produkować biżuterię charakteryzującą się ażurowymi i unikalnymi kształtami oraz odpowiadać na ciągle panujący trend personalizacji, tworząc produkty idealnie dopasowane do potrzeb i preferencji klientów. Produkcja biżuterii w technologii *SLS* z wykorzystaniem projektowania parametrycznego, która może jeszcze nie jest wyjątkowo trwała (ze względu na używane materiały), daje możliwość nieustannej zmiany wzorów. Dzięki tej technologii można co chwilę wydrukować nowy, unikalny model na konkretną okazję, a w razie uszkodzenia łatwo można stworzyć kolejną jego wersję.



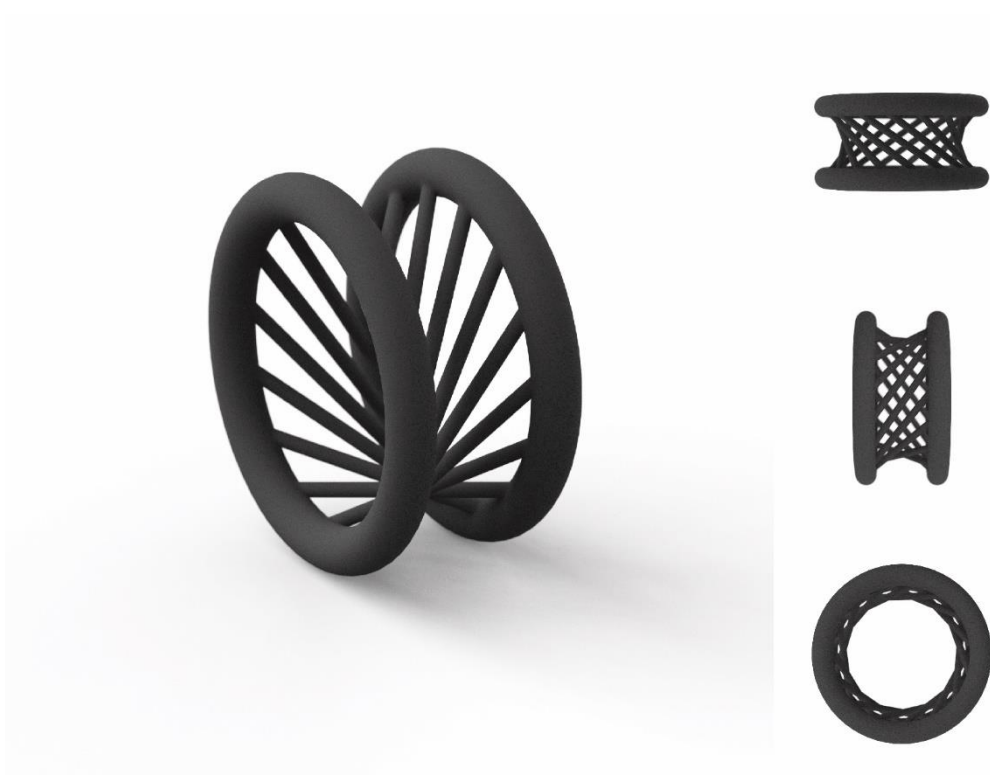
Il 2. 23 Pierścionek F1 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 24 Pierścionek F2 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 25 Pierścionek F3 – wydruk 3D w technologii SLS.



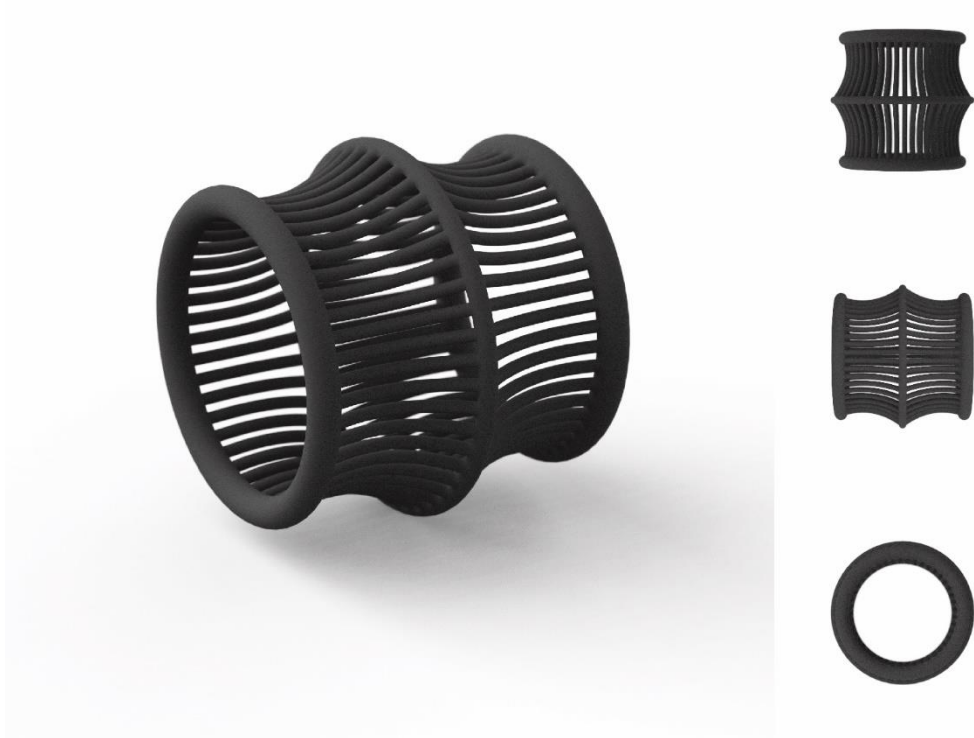
Il 2. 26 Pierścionek F4 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 27 Pierścionek F5 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 28 Pierścionek F6 – wydruk 3D w technologii SLS.



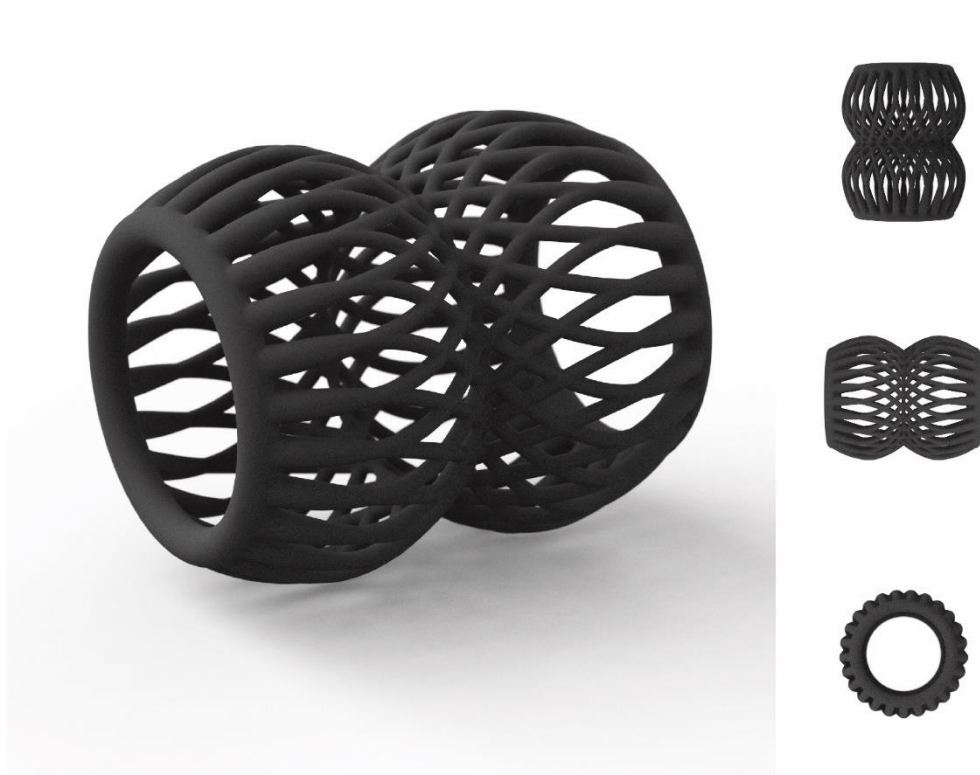
Il 2. 29 Pierścionek F7 – wydruk 3D w technologii SLS.



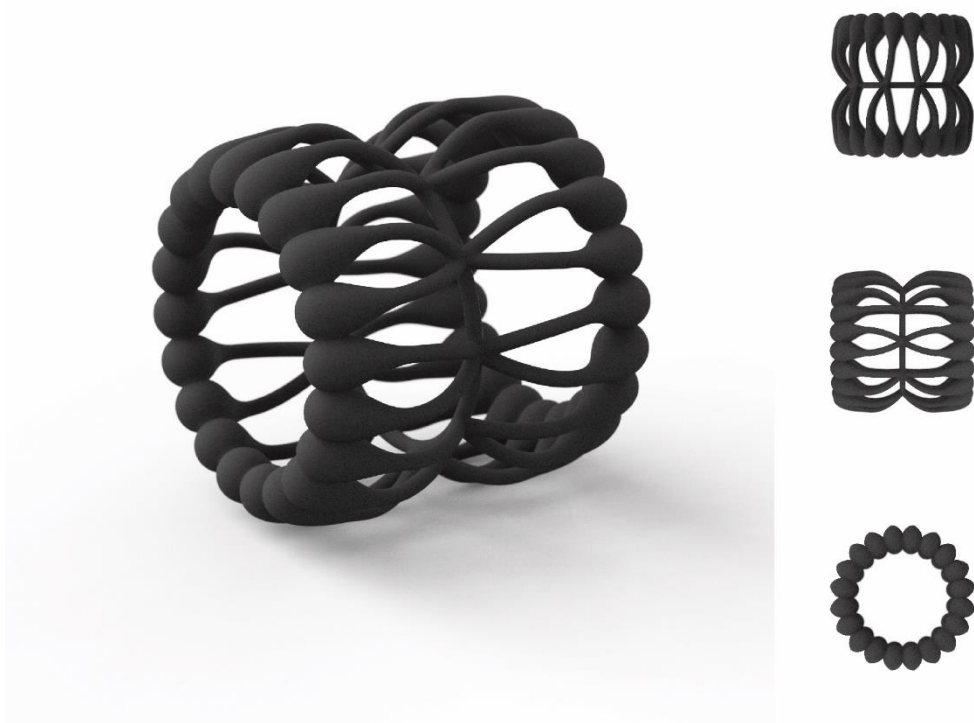
Il 2. 30 Pierścionek F8 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 31 Pierścionek F9 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 32 Pierścionek F10 – wydruk 3D w technologii SLS.



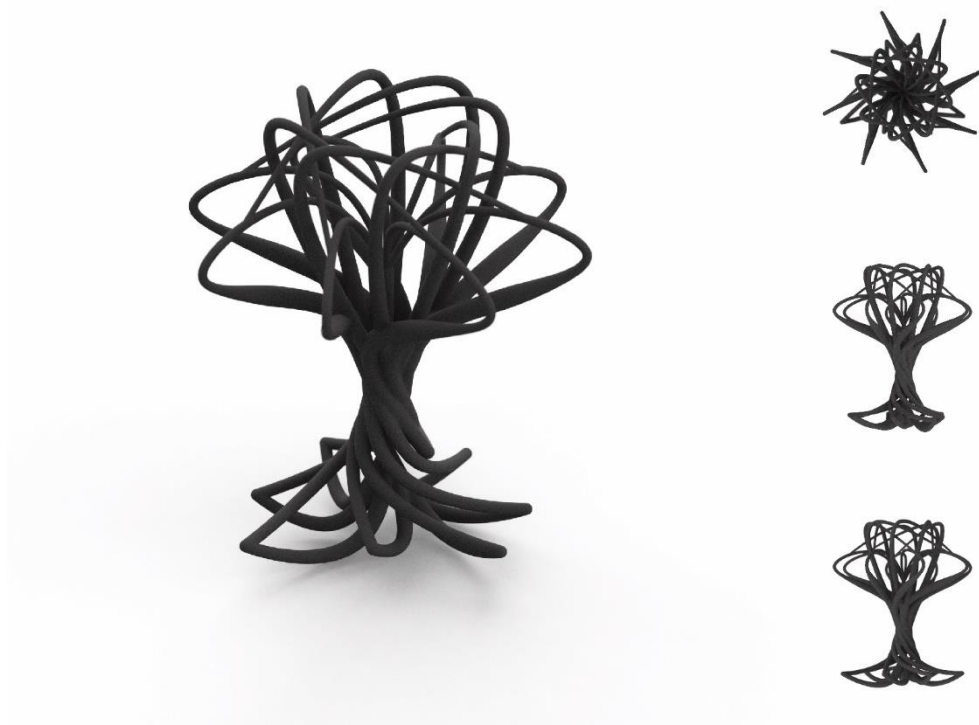
Il 2. 33 Pierścionek F11 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 34 Pierścionek F12 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 35 Pierścionek F13 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 36 Pierścionek F14 – wydruk 3D w technologii SLS.



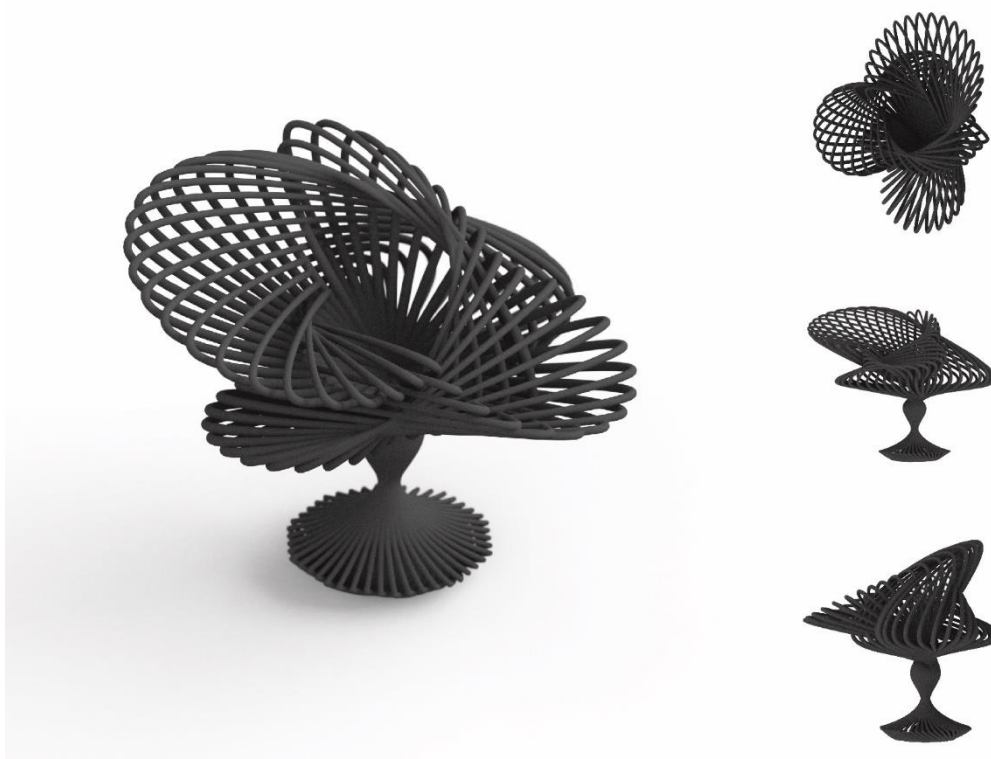
Il 2. 37 Pierścionek F15 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 38 Pierścionek F16 – wydruk 3D w technologii SLS.



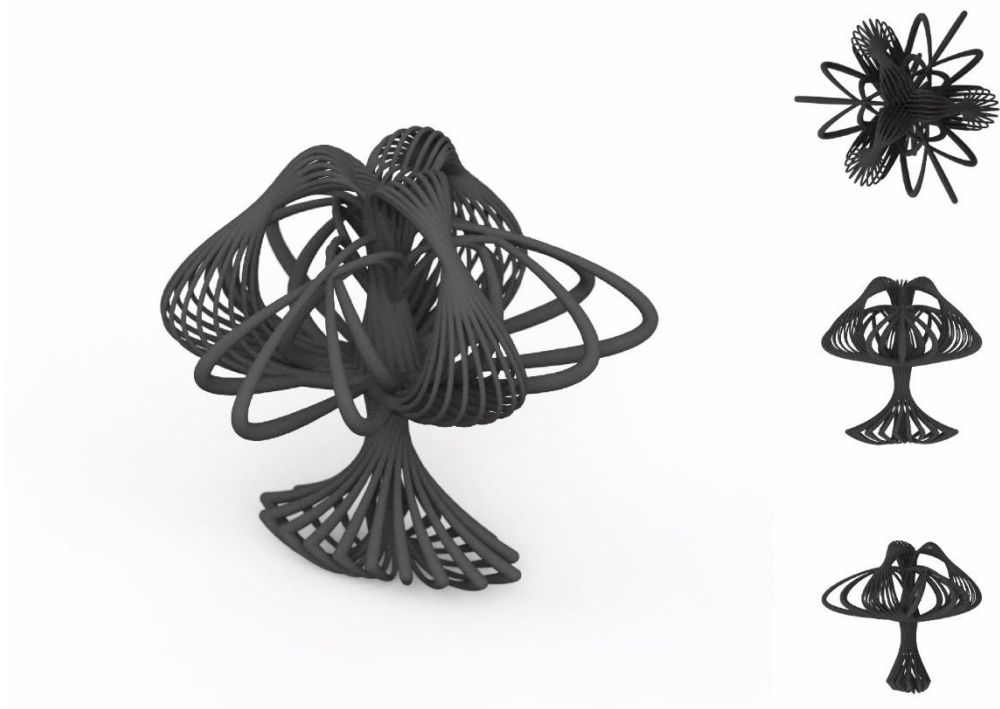
Il 2. 39 Pierścionek F17 – wydruk 3D w technologii SLS.



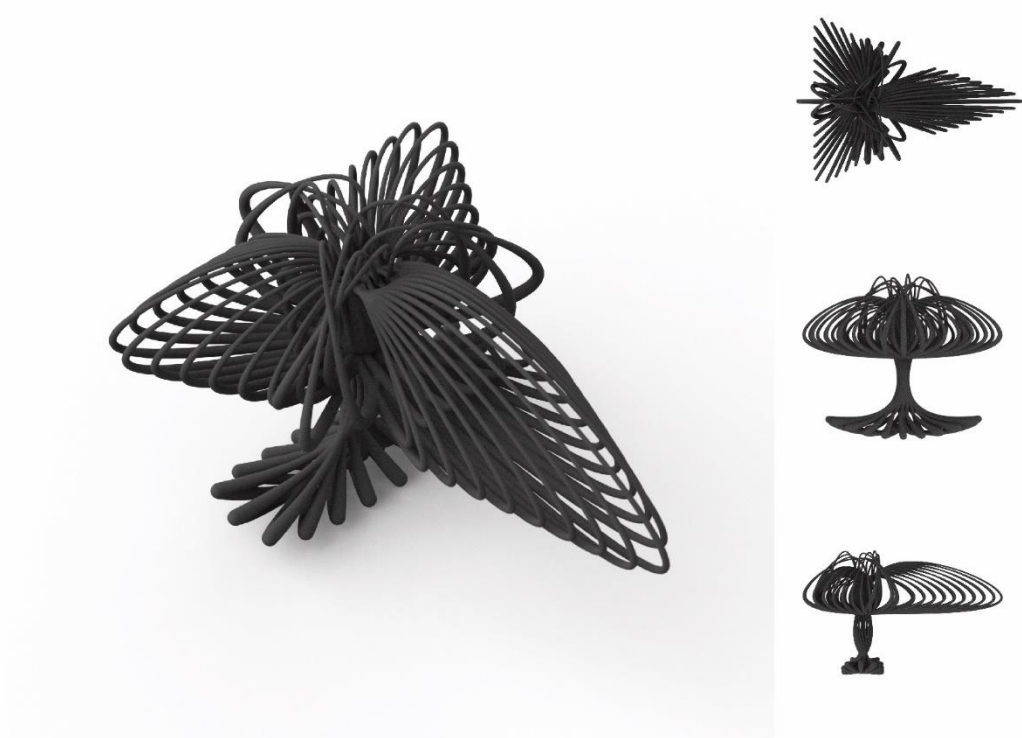
Il 2. 40 Pierścionek F18 – wydruk 3D w technologii SLS.



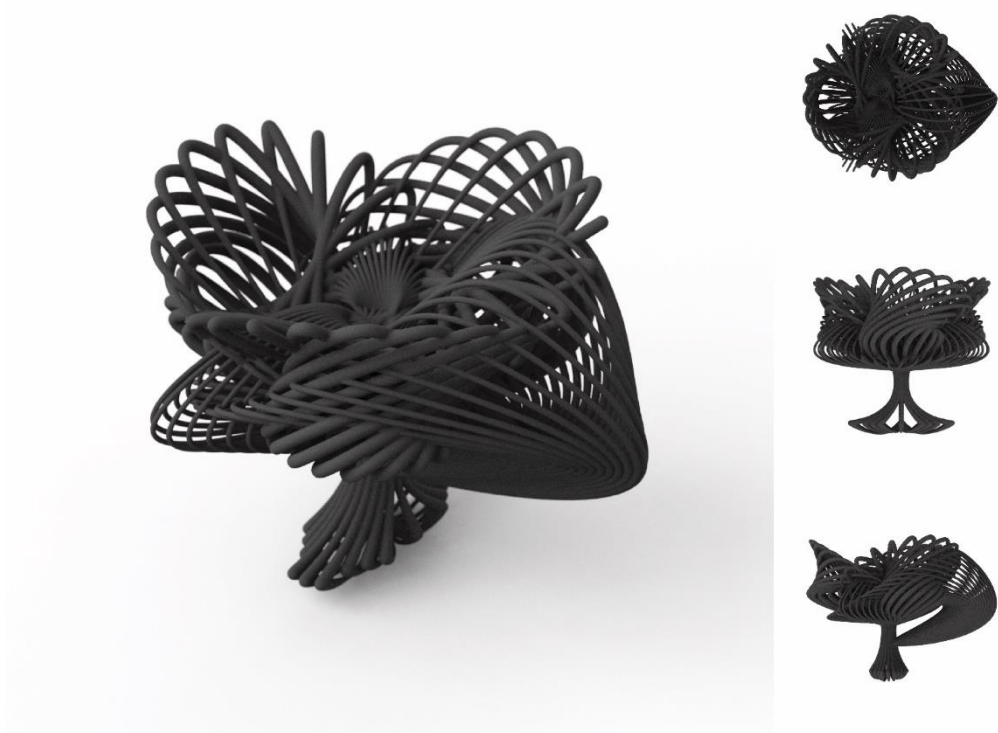
Il 2. 41 Pierścionek F19 – wydruk 3D w technologii SLS.



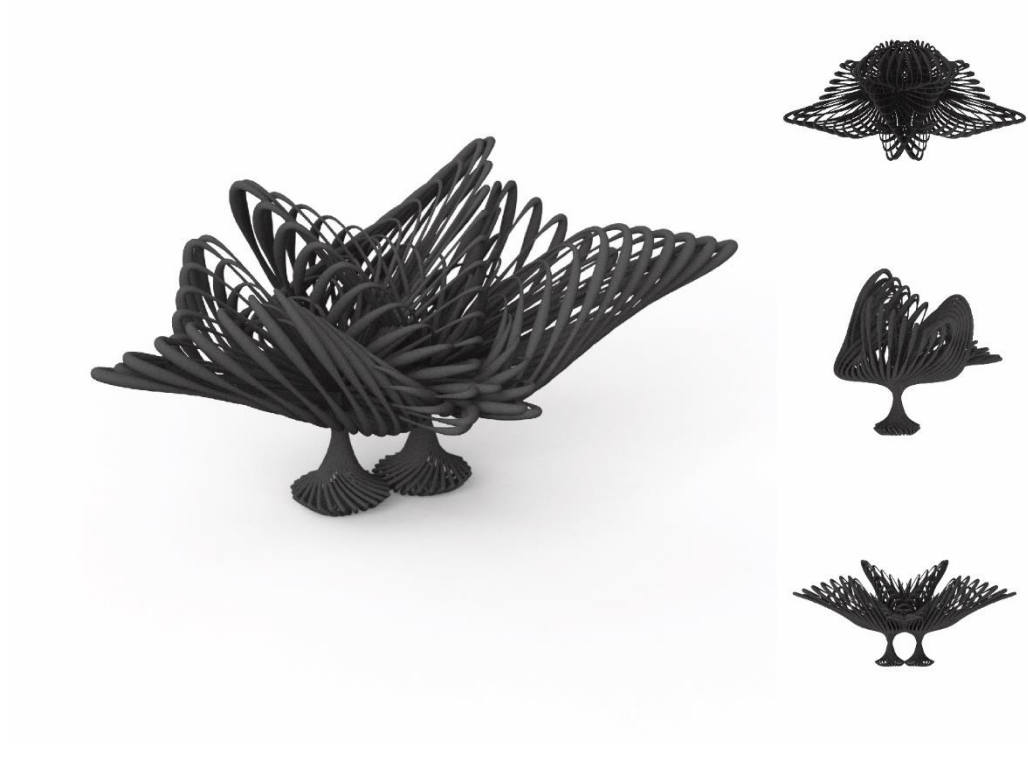
Il 2. 42 Pierścionek F20 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 43 Pierścionek F21 – wydruk 3D w technologii SLS.



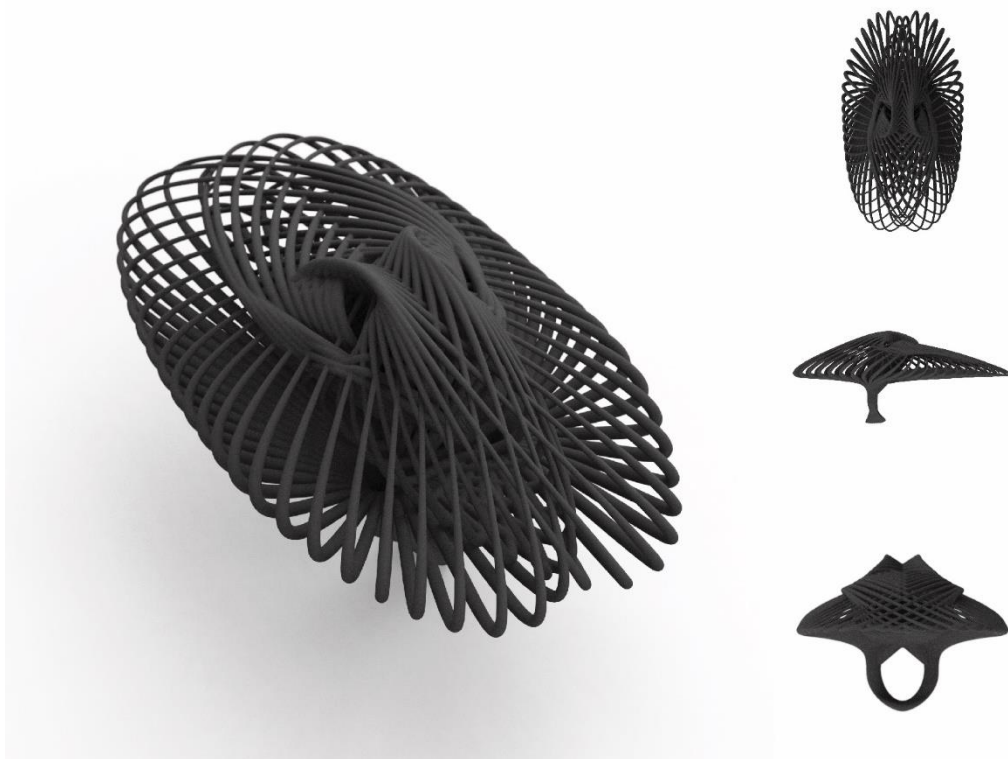
Il 2. 44 Pierścionek F22 – wydruk 3D w technologii SLS.



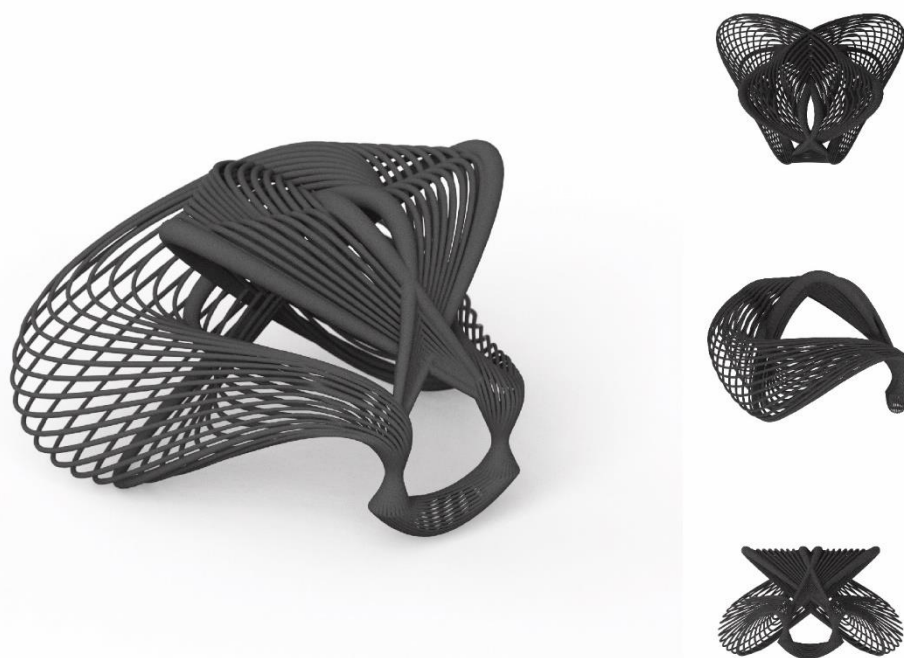
Il 2. 45 Pierścionek F23 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 46 Pierścionek F24 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 47 Pierścionek F25 – wydruk 3D w technologii SLS.



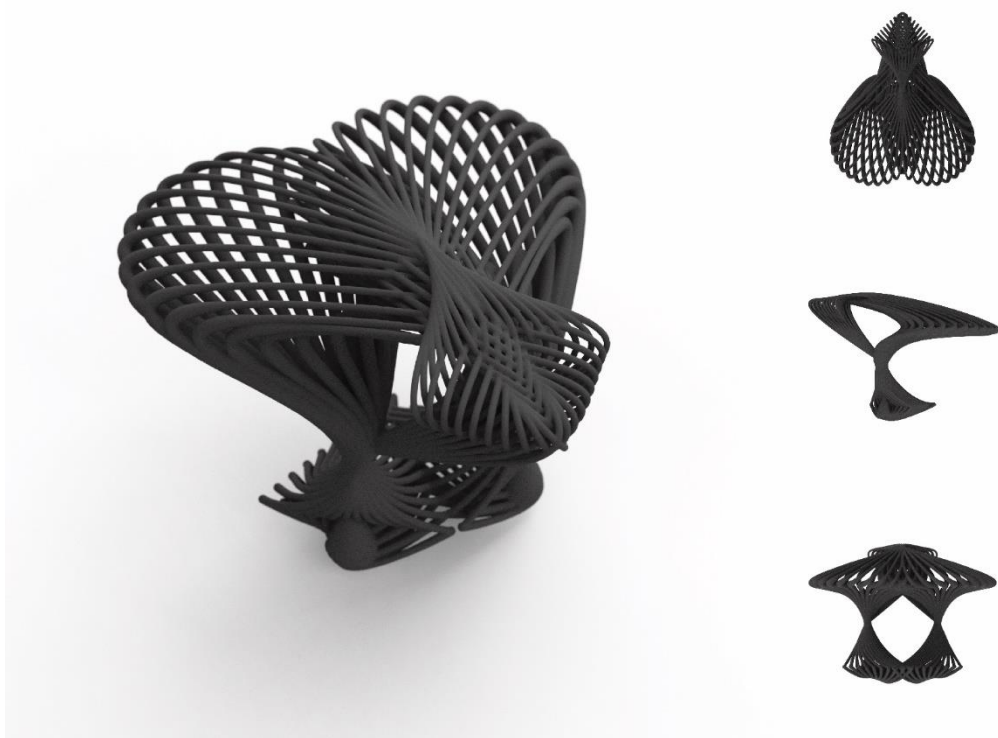
Il 2. 48 Pierścionek F26 – wydruk 3D w technologii SLS.



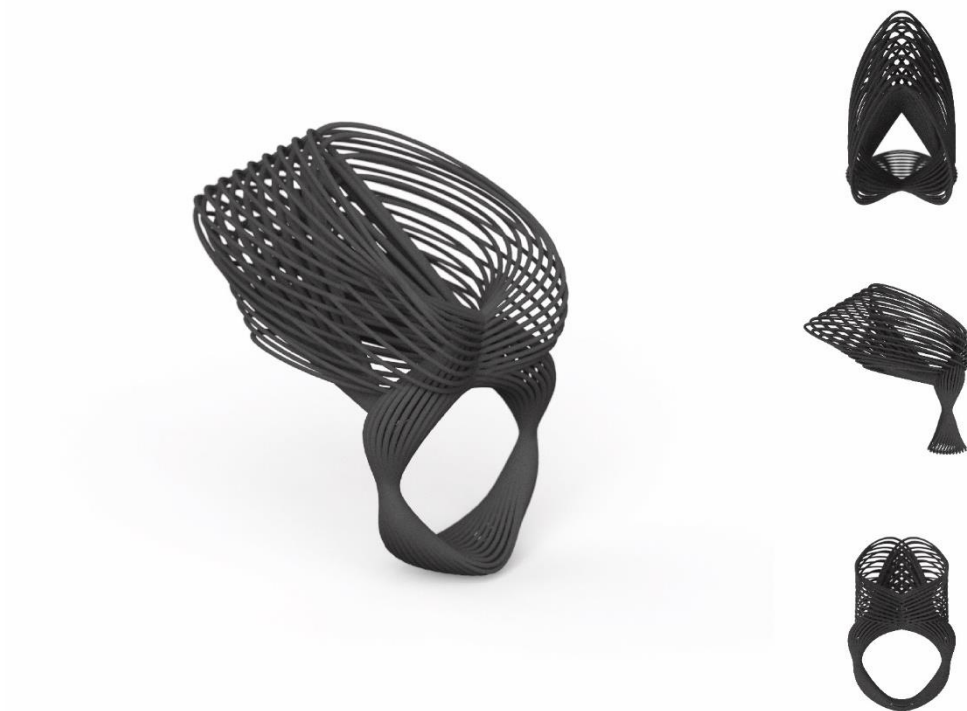
Il 2. 49 Pierścionek F27 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 50 Pierścionek F28 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 51 Pierścionek F29 – wydruk 3D w technologii SLS.



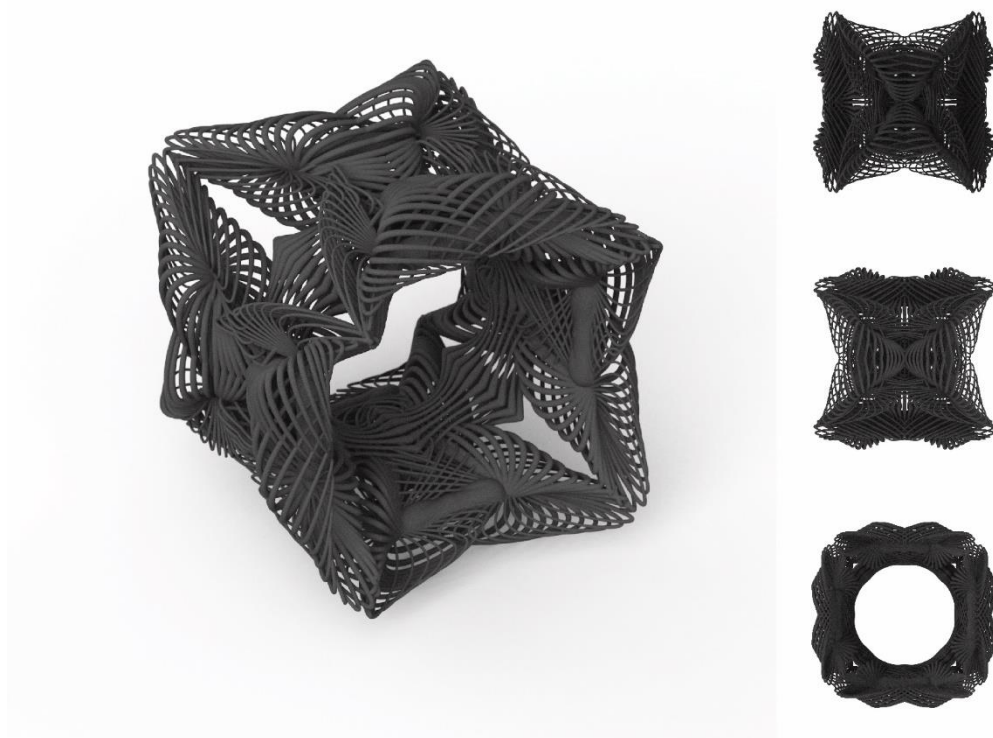
Il 2. 52 Pierścionek F30 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 53 Pierścionek F31 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 54 Bransoletka F32 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 55 Bransoletka F33 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 56 Bransoletka F34 – wydruk 3D w technologii SLS.



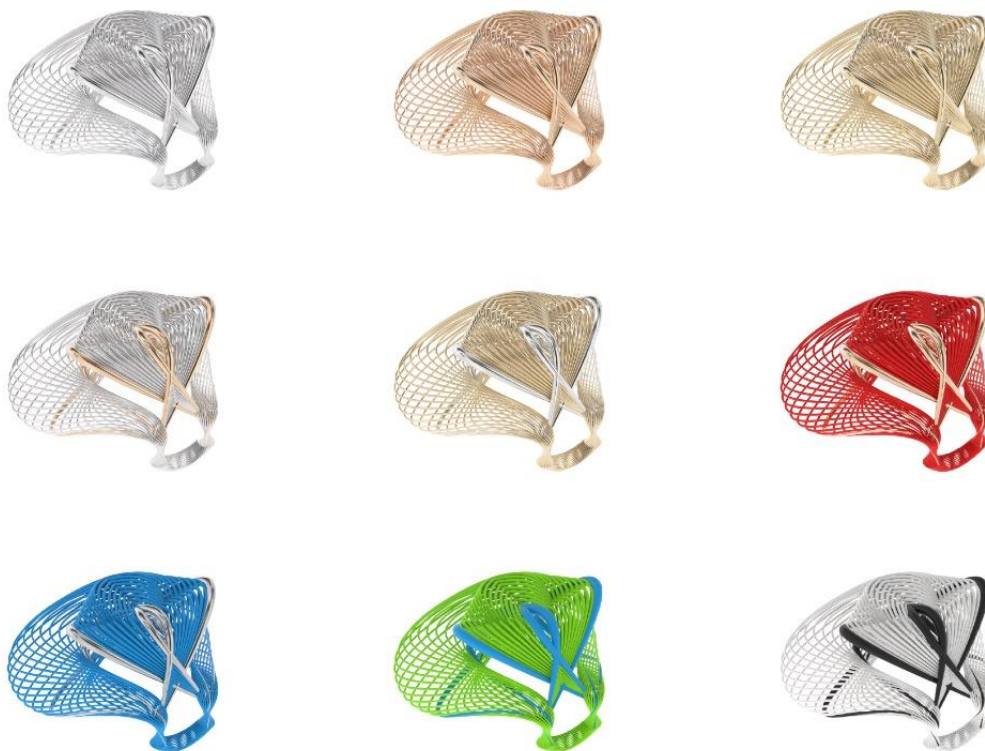
Il 2. 57 Bransoletka F35 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 58 Naszyjnik F36 – wydruk 3D w technologii SLS.



Il 2. 59 Pierścionek F15 – srebro rodowane. Źródło: opracowanie własne.



Il 2. 60 Pierścionek F15 pokazany w różnych połączeniach kolorystycznych. Źródło: opracowanie własne.

Fusion

Tworząc drugą kolekcję, chciałem nieco odejść od tak skomplikowanych obiektów jakie powstały w kolekcji *Fluidium*. Przy zastosowaniu innego rodzaju *definicji* nadal moim głównym motywem działań projektowych jest ażurowość bryły opartej na linii. Nazwa kolekcji *Fusion*¹³⁶, czyli połączenie, pochodzi od sposobu w jaki tworzy się obiekty powstałe w tej kolekcji (dokładniej opiszę to w dalszej części związanej z technologią wytwarzania obiektów). *Fusion* jest zdecydowanie odmienna od pozostałych dwóch kolekcji dlatego, że w procesie ich powstawiania

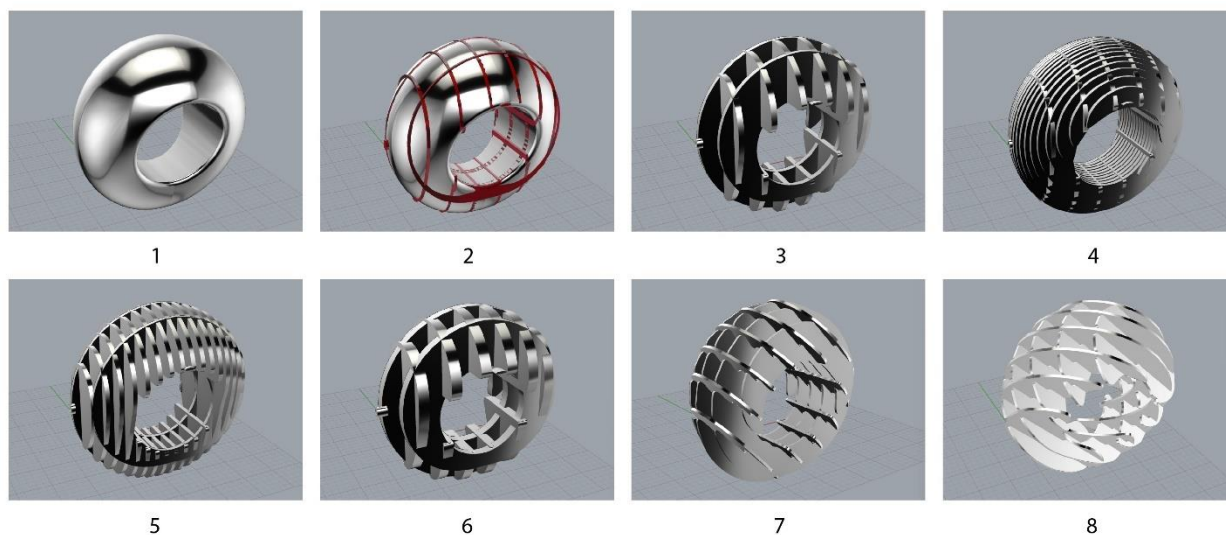
¹³⁶ <https://pl.pons.com/t%C5%82umaczenie/angielski-polski/fusion> tłumaczenie słowa na język polski [dostęp 12.06.2024].

nie wykorzystuje technologii druku 3D, a głównym moim narzędziem pracy w tym przypadku jest laser *Fiber* (inaczej laser włóknowy)¹³⁷.

Zasada projektowania obiektów w tym przypadku polegała najpierw na zaprojektowaniu przeze mnie bazowej bryły w programie *Rhinoceros*, którą następnie importowałem do *Grasshoppera*. Wybrałem taki sposób pracy, ponieważ dzięki niemu mogłem stworzyć szybciej różne bryły bazowe i skupić się na głównym moim zagadnieniu związanym z projektowaniem parametrycznym. Na bazie wcześniej zaprojektowanej formy podstawowej stworzyłem prostą definicję, która dzieliła bryłę w określonych kierunkach, tworząc jej przekroje. Następnie po dodaniu grubości do przekroi powstawał ażurowy obiekt. Kierunki zagęszczenia linii, czy ich grubości, ustalało się za pomocą zmiany parametrów w *definicji*. Na ilustracji poniżej przedstawiona jest zasada działania podstawowej *definicji*:

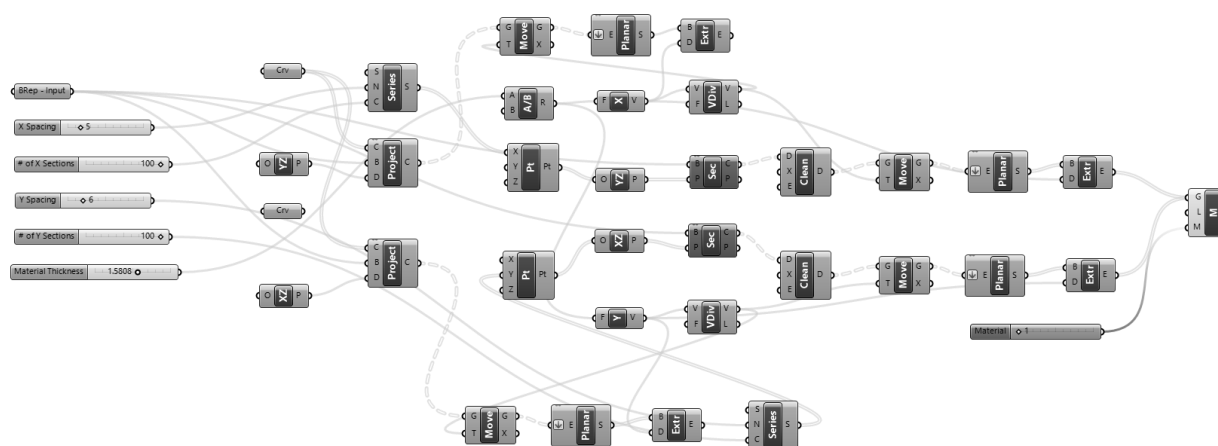
1. Podstawowa bryła stworzona w *Rhinoceros*.
2. Bryła zaimportowana do *Grasshoppera*. Od razu pojawiają się pierwsze podziały.
3. Widok docelowej bryły tworzącą ażurową konstrukcję.
4. Zmiana parametru podziału w osi Y.
5. Zmiana parametru podziałów w osi X.
6. Zmiana parametru grubości płaszczyzn / warstwy.
7. Zmiana kąta linii w osi Y.
8. Zmiana kąta linii w osi X i Y.

¹³⁷ Więcej o działaniu lasera *Fiber*: <https://uni-kat.pl/jak-dziala-laser-fiber/> [dostęp 15.06.2024].



Il 2. 61 Przykłady zmiany parametrów i jej wpływ na bryłę. Źródło: opracowanie własne.

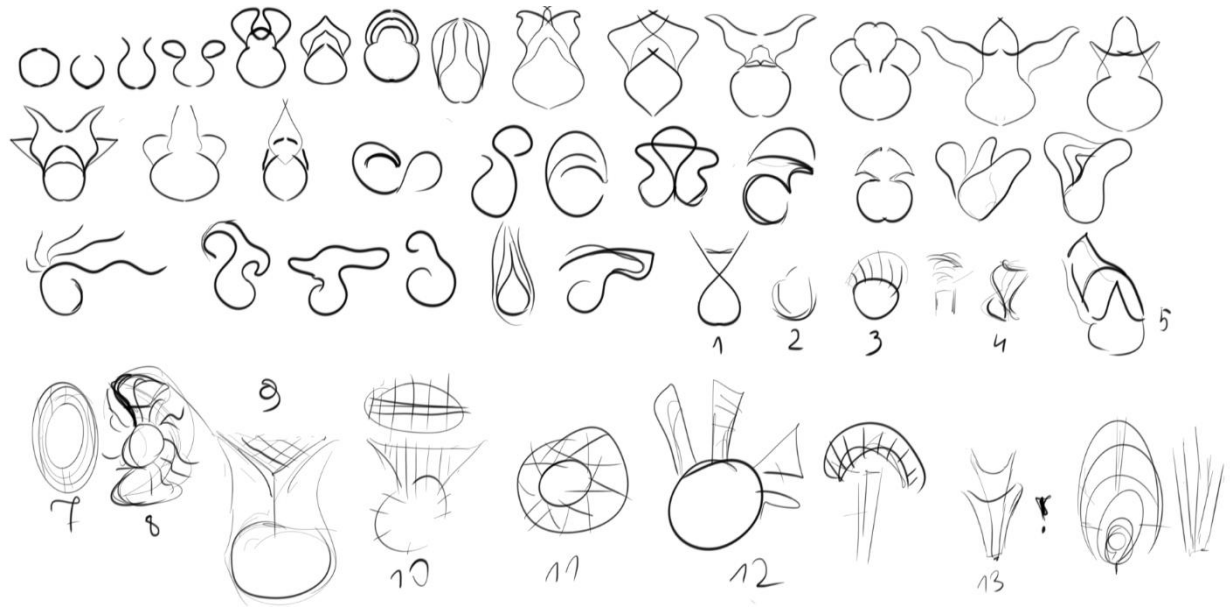
Moja pierwsza *definicja* miała na celu przekształcenie pełnej, bazowej formy w ażurowy obiekt zbudowany z płaszczyzn, których widoczne krawędzie traktuję jako linię. Dzięki przeprowadzeniu wielu prób na różnych bryłach byłem w stanie określić jak tworzyć podstawowe modele, tak aby jak najlepiej sprawdzały się w projektowaniu parametrycznym, nie generując błędów.



Il 2. 62 Pierwsza definicja z kolekcji Fusion. Źródło: opracowanie własne.

Przed przystąpieniem do projektowania mojej docelowej kolekcji rozpocząłem pracę od serii szybkich szkiców liniowych. Starałem się, jak wcześniej wspomniany w mojej pracy w rozdziale poświęconym linii Erich Dieckman, opisać obiekty za pomocą konturu sylwetki. Już na tym etapie

projektowania starałem się myśleć o wyglądzie końcowym biżuterii. Podobnie jak w poprzedniej kolekcji, skupiłem się głównie na pierścionkach. Jednak podczas testów produkcyjnych powstały również bransoletki, które ostatecznie nie weszły do finalnej kolekcji.



Il 2. 63 Wstępne szkice projektowe. Źródło: opracowanie własne.

Kolejnym etapem było wymodelowanie brył bazowych, które po zaimportowaniu do środowiska *Grasshopper* były przekształcane poprzez zmiany parametrów. Każda bryła miała unikalny kształt, co wymagało indywidualnej konfiguracji parametrów. Niektórym bryłom odpowiadały proste podziały w osi pionowej i poziomej, podczas gdy inne wymagały bardziej zaawansowanej parametryzacji, obejmującej kąty oraz zmiany osi środkowej w przypadku podziałów linii radialnych. W niektórych przypadkach niestety krzyżowe lub radialne podziały bryły bazowej nie podkreślały jej geometrii ani nie wydobywały unikalnego kształtu. Złe dobranie tych parametrów powodowało deformację ażurowej konstrukcji, co sprawiało, że ogólny odbiór był nieciekawym i chaotycznym. W takich przypadkach, dzięki przebudowaniu *definicji*, mogłem samodzielnie i precyzyjnie ustawiać linie pod różnymi kątami dla każdej wymagającej tego zabiegu bryły.

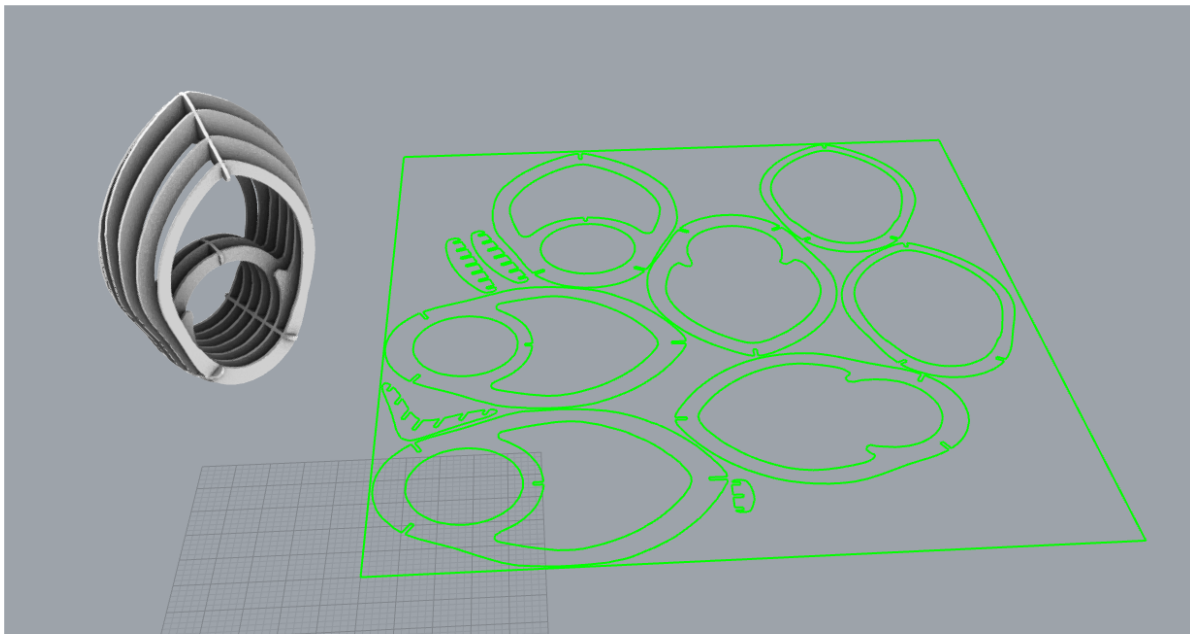


Il 2. 64 Przykładowe bryły bazowe kolekcji Fusion. Źródło: opracowanie własne.

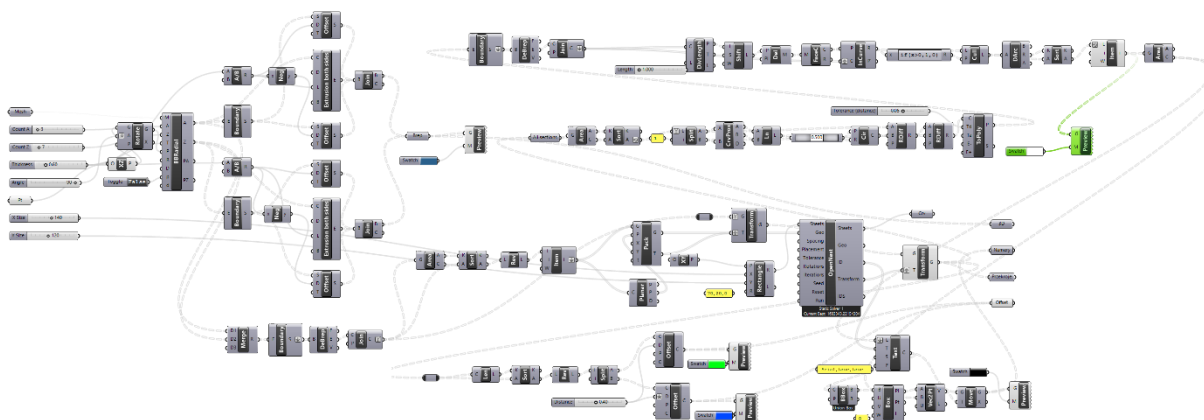
Tak ja wspomniałem na początku realizacja tych projektów możliwa jest dzięki zastosowaniu lasera do cięcia. Dedykowana zatem jest dla firm posiadających w swoim parku maszynowe lasery, które umożliwiają wycinanie na przykład w pleksi, sklejce czy metalu. W moim przypadku są to formy biżuteryjne, natomiast tę samą zasadę można przełożyć na większą skalę przy konstruowaniu rzeźb czy instalacji. Projektując tę kolekcję stworzyłem coś na zasadzie zabawy w łączenie ze sobą elementów, jak przestrzenne puzzle. Taki produkt może być sprzedawany

albo jako już gotowy do noszenia, albo do samodzielnego złożenia. Dzięki temu że obiekty są dzielone na płaskie przekroje, można wycinać każdy z elementów składowych całej konstrukcji osobno. Następnie, dzięki wdrożonemu w projektowanie parametryczne automatycznemu dodawaniu wcięć, w którym elementy łączą się ze sobą, można składać je tworząc przestrzenną ażurową formę. Aby przyspieszyć proces produkcji takich elementów, cała *definicja* została przeze mnie rozbudowana w ten sposób, aby od razu automatycznie generowała płaskie krzywe przekrojów, biorąc pod uwagę zdefiniowaną grubość docelowego materiału oraz pole powierzchni materiału, z którego będą wycinane obiekty. Dodatkowo, w stworzonej *definicji* zawarłem możliwość automatycznego rozmieszczenia obrysów, precyzyjnie określając odległości między każdym z wycinanych elementów. Dodałem również funkcję automatycznej numeracji rozłożonych elementów. Przy bardzo skomplikowanych konstrukcjach, składających się z wielu obrysów, numeracja delikatnie wypalana na materiale przez laser znacznie ułatwia późniejsze składanie odpowiednich części ze sobą. Po rozłożeniu krzywych na płasko można je eksportować do lasera i rozpocząć proces wycinania wszystkich elementów. Dzięki tym zabiegom, które zdefiniowałem przy użyciu projektowania parametrycznego, znacząco przyspiesza się czas produkcji, minimalizuje czas potrzebny na wprowadzanie zmian w projekcie oraz oszczędniej zużywa materiał poprzez precyzyjne wykorzystanie powierzchni. W późniejszym etapie mojej pracy natknąłem się (na wspomnianym wcześniej forum *McNeel*) na nakładkę do *Grasshoppera* o nazwie *Bowerbird*¹³⁸. Nakładka ta dała mi dodatkowe możliwości, które wspomogły mnie przy dalszym etapie produkcji obiektów.

¹³⁸ Bowerbird został stworzony przez Thomasa Oberbichler: <https://www.oberbichler.xyz/Bowerbird/> [dostęp 12.06.2024].



Il 2. 65 Zrzut z ekranu komputera obrazujący zaprojektowany model oraz obrysy rozłożone w określonym polu roboczym.
Źródło: opracowanie własne.



Il 2. 66 Zrzut z ekranu programu Grasshopper pokazujący finalną definicję. Źródło: opracowanie własne.

Ze względu na to, że w Instytucie Biżuterii posiadamy laser do cięcia w pleksi, moje pierwsze próby były wykonane właśnie w tym materiale. Ze względu na ograniczenia związane z jego grubością i właściwościami fizycznymi, na początku stworzyłem większe formy, które były wykonane z pleksi o grubości 2 mm. Po przeprowadzonych wielu testach uznałem, że powstałe prace wykonane z pleksi nie do końca oddają charakter moich założeń projektowych.



Il 2. 67 Testowe modele wykonane z pleksi. Źródło: opracowanie własne.

Postanowiłem nadać moim obiektom delikatniejszy charakter, wykonując je z metalu. Na początku wybrałem stal, która ze względu na swoją wytrzymałość i trwałość wydawała się odpowiednia do tego typu projektów. Po wykonaniu pierwszego testowego modelu została ona jednak przeze mnie odrzucona ze względu na ciężar powstałych prac, co wpływało znacząco na ich komfort noszenia. W kolejnym etapie zdecydowałem się na wykonanie modelu z blachy aluminiowej o grubości 0,5 mm. Modele wykonane z tego materiału cechowały się lekkością, co czyniło je wygodnymi do noszenia. Aluminium jest również odporne na korozję, co sprawia, że biżuteria z tego materiału jest trwała i łatwa w utrzymaniu. Dodatkowym atutem jest jego łatwość obróbki, co znacznie skraca czas cięcia laserowego w porównaniu do stali. Wszystkie

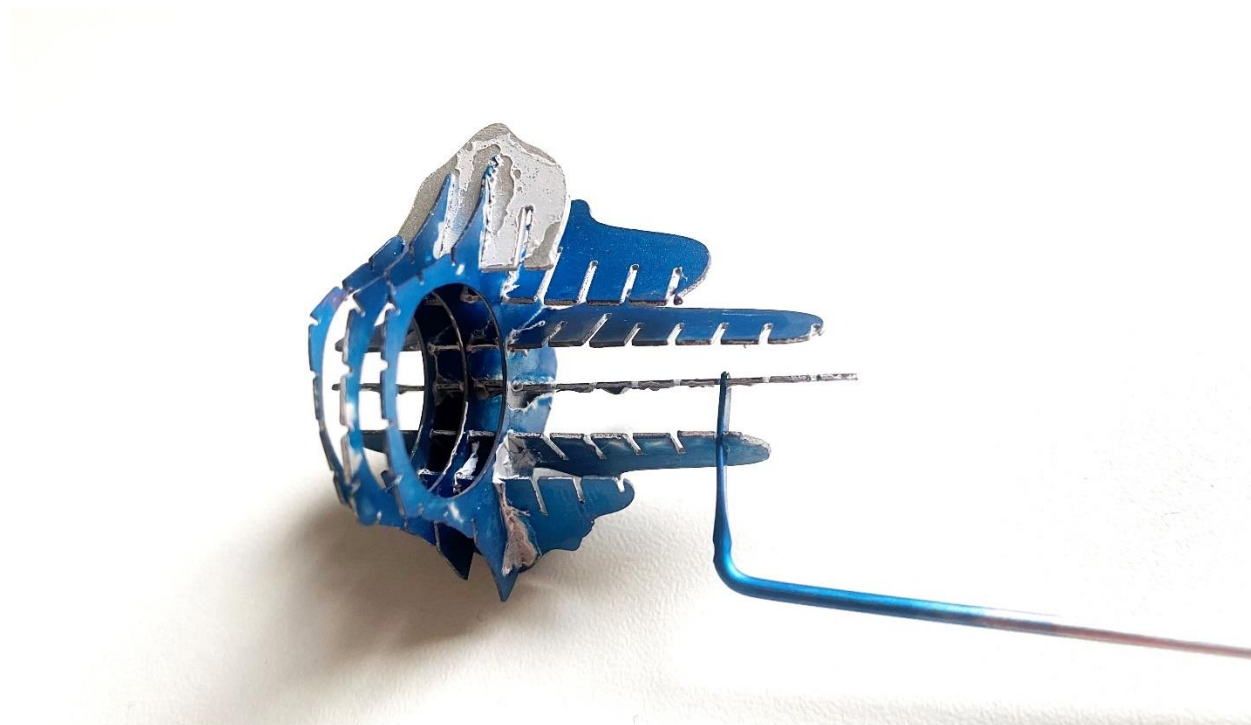
elementy wycinałem w mojej pracowni na laserze o mocy 30W, który jest dedykowany do znakowania biżuterii. Ponieważ laser nie jest przeznaczony stricte do wycinania musiałem znaleźć kompromis w zakresie jego konfiguracji. Musiałem ustalić najlepszą zależność pomiędzy jego mocą, prędkością i częstotliwością wiązki lasera. Po serii prób udało mi się uzyskać optymalny czas cięcia, który generował precyzyjne elementy do dalszej obróbki.



Il 2. 68 Alumiuniowa blacha po testowych cięciach lasera. Źródło: opracowanie własne.

Postanowiłem zmienić naturalny kolor aluminium, który moim zdaniem nie prezentował się atrakcyjnie. Zdecydowałem się na jego anodowanie, starając się uzyskać jednolitą barwę. Niestety, przeprowadzone testy w warunkach domowych nie przyniosły zadowalających wyników.

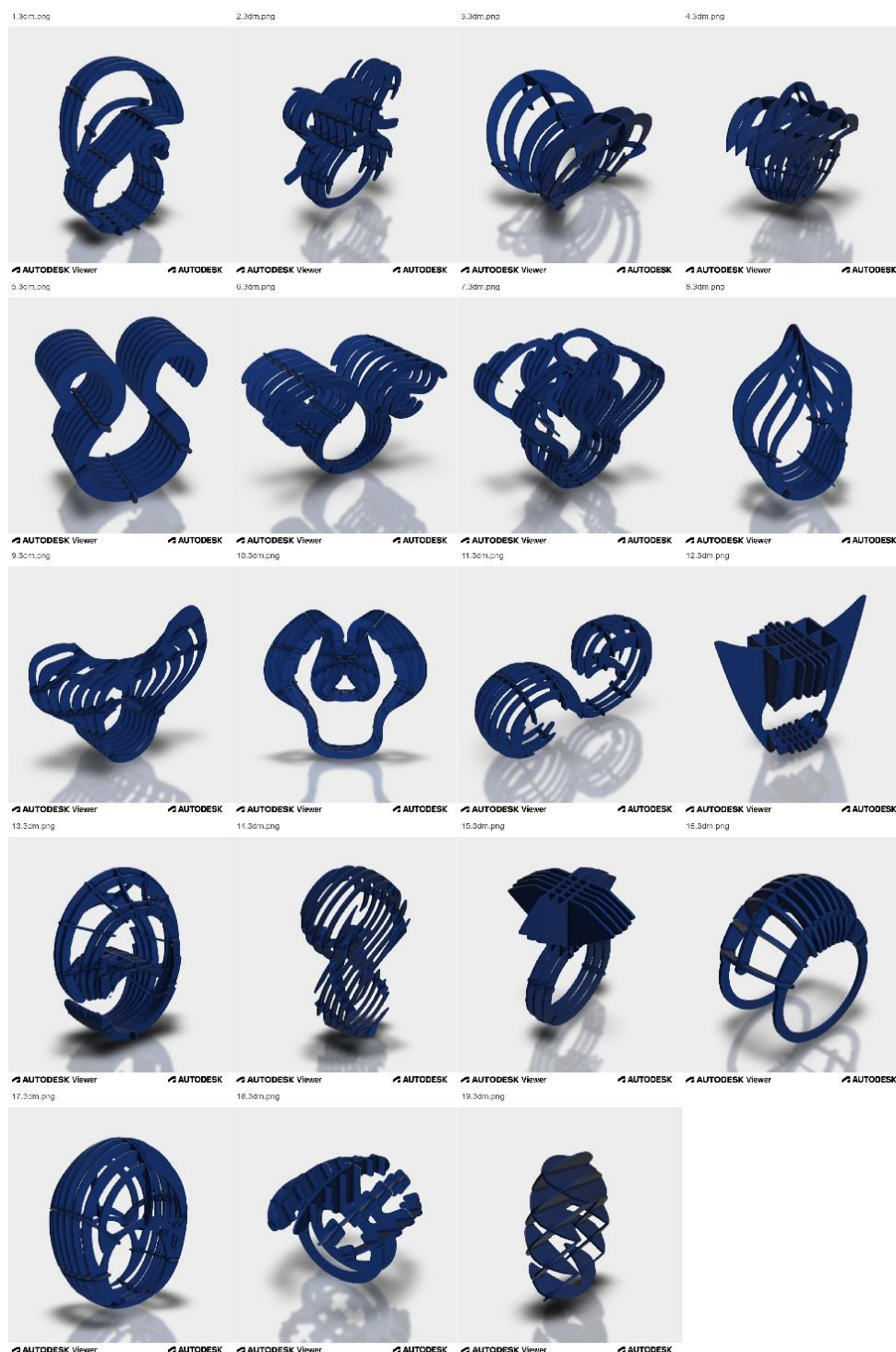
Niektóre modele nie anodowały się w całości z powodu braku kontaktu pomiędzy połączeniami blaszek. Dlatego podjąłem próbę malowania już złożonych modeli aerografem modelarskim, nadając im ciemno niebieską barwę z delikatnie przebijającym się fioletem.



Il 2. 69 Jedna z wielu nieudanych prób anodowania aluminium. Źródło: opracowanie własne.

W kolekcji *Fusion* stworzyłem dwadzieścia pięć projektów charakteryzujących się harmonicznymi rytmemi powierzchni (jak pisałem wcześniej, krawędzie tych powierzchni traktuję jak harmoniczne linie), które dopełniając się tworząc zgraną całość. Każdy z tych modeli charakteryzuje się lekkością i wygodą w noszeniu. Dzięki zastosowaniu projektowania parametrycznego udało się tak dostosować podział bryły bazowej, aby jak najlepiej podkreślał jej charakter. Kolekcja wyróżnia się nowoczesnym, minimalistycznym stylem, z naciskiem na ażurowe i przestrzenne formy. Spośród tych wszystkich projektów ostatecznie zrealizowałem tylko sześć z nich. Powodem tego wyboru była potrzeba skupienia się na tych projektach, które miały największy według mnie potencjał artystyczny i komercyjny. *Definicja* stworzona w programie do projektowania parametrycznego okazała się być bardzo skuteczna w generowaniu ażurowych obiektów, jednakże, w trakcie pracy nad poszczególnymi kolekcjami, zauważyłem, że dwie pozostałe kolekcje posiadają znacznie większy potencjał do dalszego

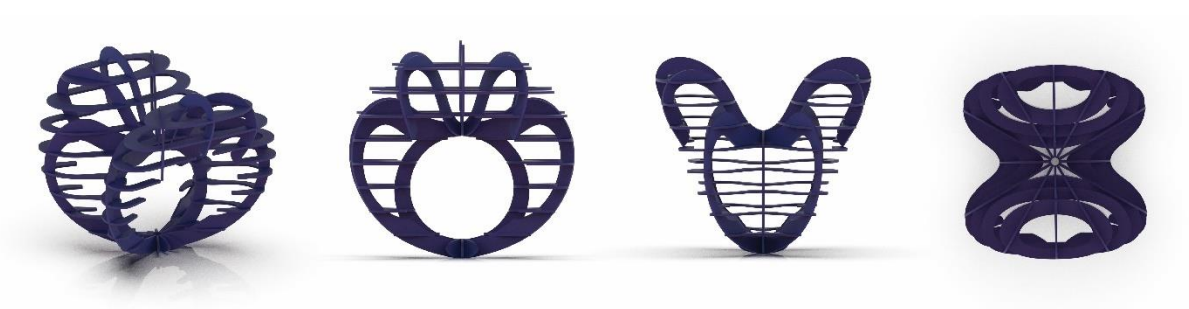
rozwoju. Tych sześć realizacji pokazuje, że biżuteria tego typu jest możliwa do wykonania i spełnia wysokie standardy estetyczne oraz funkcjonalne.



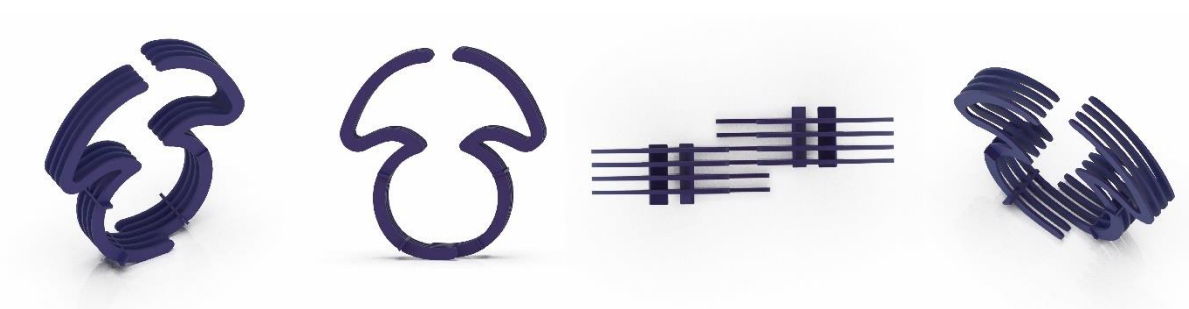
Il 2. 70 Zrzuty ekranu interaktywnych modeli z kolekcji Fusion. Modele umieszczone na platformie Autodesk Viewer. Źródło: opracowanie własne.



Il 2. 71 Model S1 – aluminium.



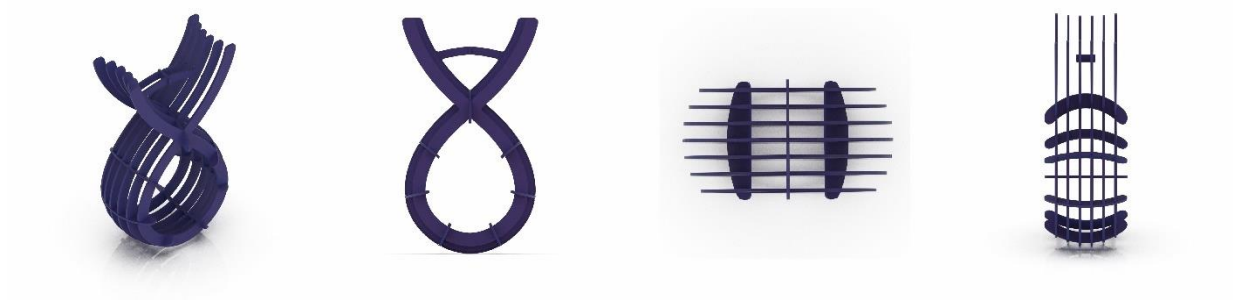
Il 2. 72 Model S2 – aluminium.



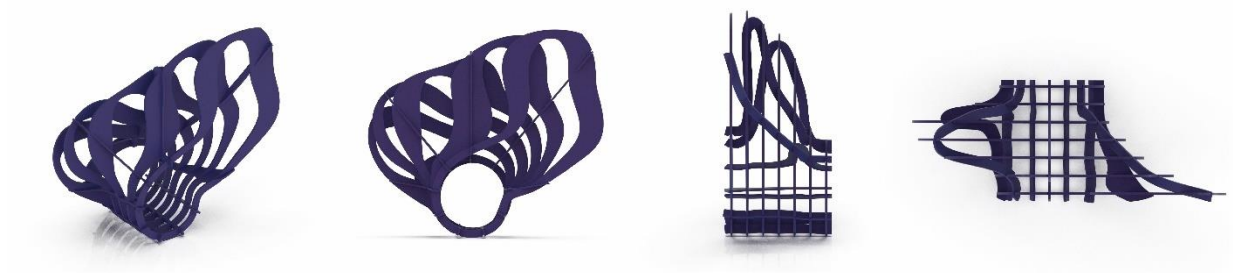
Il 2. 73 Model S3 – aluminium.



Il 2. 74 Model S4 – aluminium.



Il 2. 75 Model S5 – aluminium.



Il 2. 76 Model S6 – aluminium.

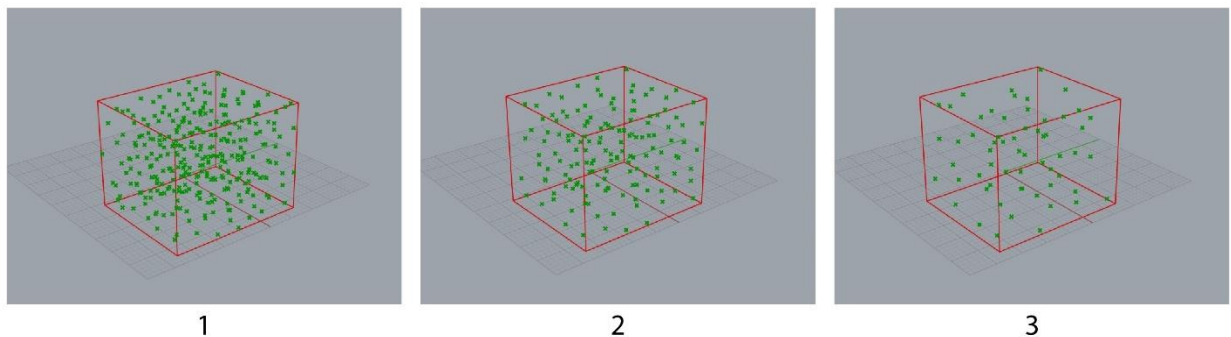
Vertex

Ostatnia z moich kolekcji nosi nazwę *Vertex*¹³⁹. Nazwa ta pochodzi od angielskiego słowa oznaczającego *wierzchołek*, co bezpośrednio odnosi się do kluczowych elementów tej kolekcji – punktów w przestrzeni, które pełnią rolę wierzchołków, powstałych po połączeniu kilku linii. Zasada tworzenia projektów w tej kolekcji, tak jak w kolekcji *Fusion*, polega na zaprojektowaniu bryły bazowej w programie *Rhinoceros*, a następnie zaimportowaniu jej do środowiska *Grasshoppera*. Następnie, w przypadku tej kolekcji, przy użyciu technik generatywnych, następuje tworzenie docelowych obiektów. Wykorzystanie technik generatywnych polega na generowaniu chmury punktów we wcześniej zaprojektowanej bryle – po określeniu przeze mnie ich ilości, są one rozmieszczane wewnątrz bryły w sposób losowy. Następnie, każdy z tych punktów, powstałych wewnątrz bazowej formy, łączy się z kilkoma sąsiednimi punktami, tworząc

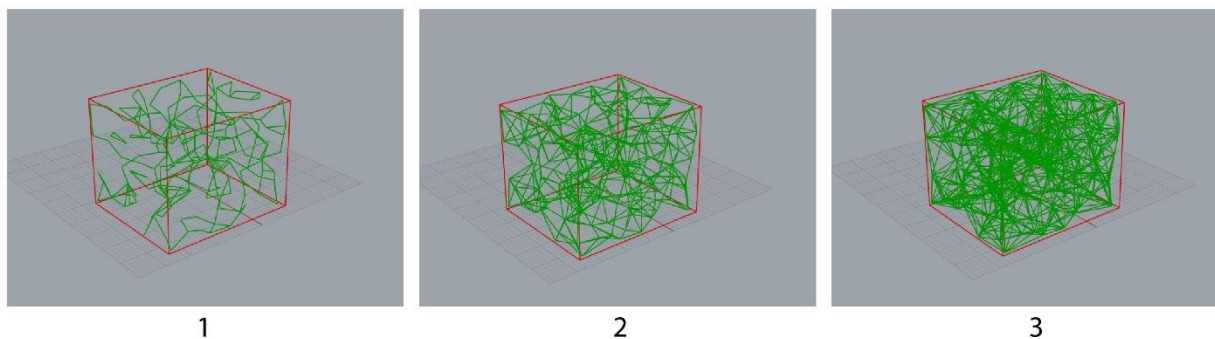
¹³⁹ <https://dictionary.cambridge.org/pl/dictionary/english-polish/vertex> [dostęp 17.06.2024].

linie. W ten sposób każdy punkt staje się wierzchołkiem, tworząc skomplikowane, geometryczne i ażurowe wzory. Chmury punktów tworzone są za pomocą komponentu *Populate 3D* w programie *GH*.

Na samym początku zacząłem testy *definicji* na prostym obiekcie, sprawdzając jego możliwości i dostosowując go do moich założeń projektowych – stworzenia biżuterii ażurowej w oparciu o projektowanie parametryczne i techniki generatywne. Tworzenie chmury punktów w obiekcie takim jak sześcian nie stanowiło problemu. Jednak w przypadku obiektów takich jak obrączka, musiałem wyselekcjonować tylko te punkty, które znajdowały się wewnątrz jej struktury, ignorując punkty w miejscu otworu na palec. Dzięki temu zabiegowi powstała chmura punktów, którą można zagęszczać lub rozrzedzać za pomocą parametrów. Następnie każdy z punktów został połączony linią z sąsiadującymi punktami. Wykorzystując parametryzację tej definicji, można kontrolować, ile sąsiednich punktów ma być połączonych, tworząc większe lub mniejsze zagęszczenia linii.

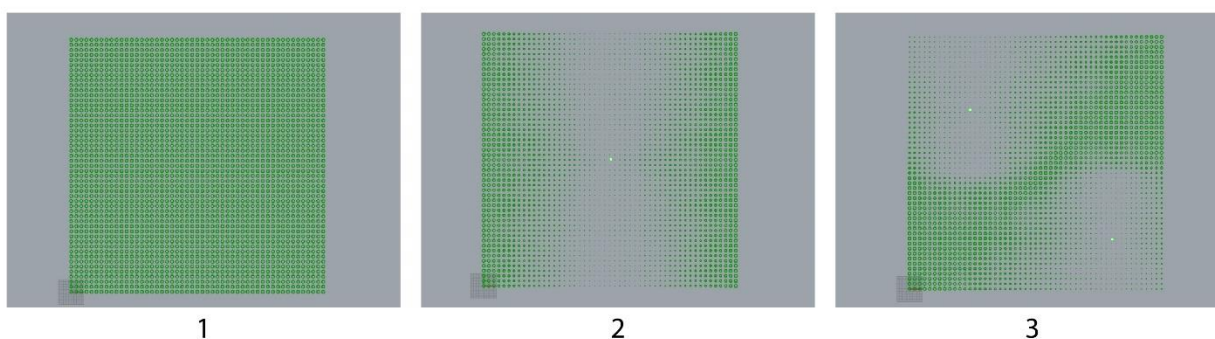


Il 2. 77 Zrzuty ekranu Grasshoppera przedstawiające powstałe chmury punktów o różnym zagęszczeniu w sześcianie. 1.) Parametr zagęszczenia ustawiony na 100. 2.) Parametr zagęszczenia ustawiony na 50. 3.) Parametr zagęszczenia ustawiony na 20. Źródło: opracowanie własne.



Il. 2. 78 Zrzuty ekranu Grasshoppera przedstawiające łączenie punktów za pomocą linii. W każdym z tych przykładów jest taka sama ilość punktów, czyli 50. Zmieniana jest jedynie ilość łączenia się jednego punktu z pozostałymi sąsiadującymi. 1.) Parametr ustawiony na 2. 3.) Parametr ustawiony na 5. 3.) Parametr ustawiony na 10. Źródło: opracowanie własne.

Dodatkowo, aby bardziej zdynamizować ażurową konstrukcję, podjąłem się wdrożenia w nią tak zwanych *attractor*'ów¹⁴⁰. Działanie ich polega na modyfikowaniu parametrów geometrii w zależności od odległości od określonych punktów, linii lub powierzchni, zwanych *attractor*'ami (przyciągaczami). *Attractor*'y są używane do wprowadzenia zmienności i dynamiki w projektach, pozwalając na tworzenie złożonych, różnorodnych wzorów.

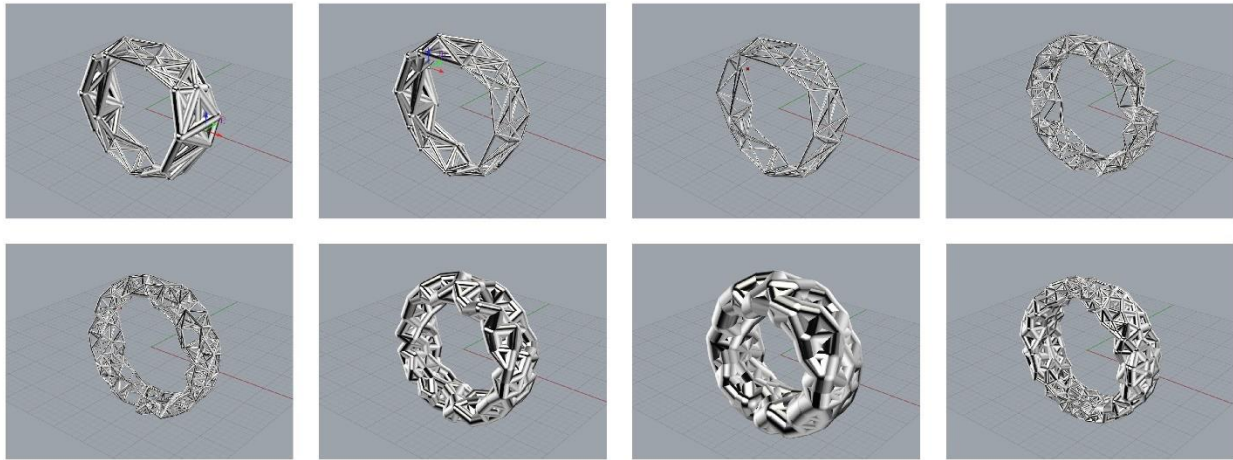


Il. 2. 79 Zasada działania *attractor*'ów. 1.) Powierzchnia punktów bez *attractor*'ów. 2.) Powierzchnia punktów z jednym centralnym punktowym *attractor*'em. 3.) Powierzchnia punktów z dwoma *attractor*'ami. Źródło: opracowanie własne.

W przypadku kolekcji *Vertex attractor*'y zastosowałem po to, aby nie zagęszczać ilości punktów w obiekcie, ale po to, aby wprowadzić zmienność grubości linii. Chciałem nadawać każdej pracy unikalny charakter, dodając dynamizmu tym obiektom. Powstały w ten sposób projekty,

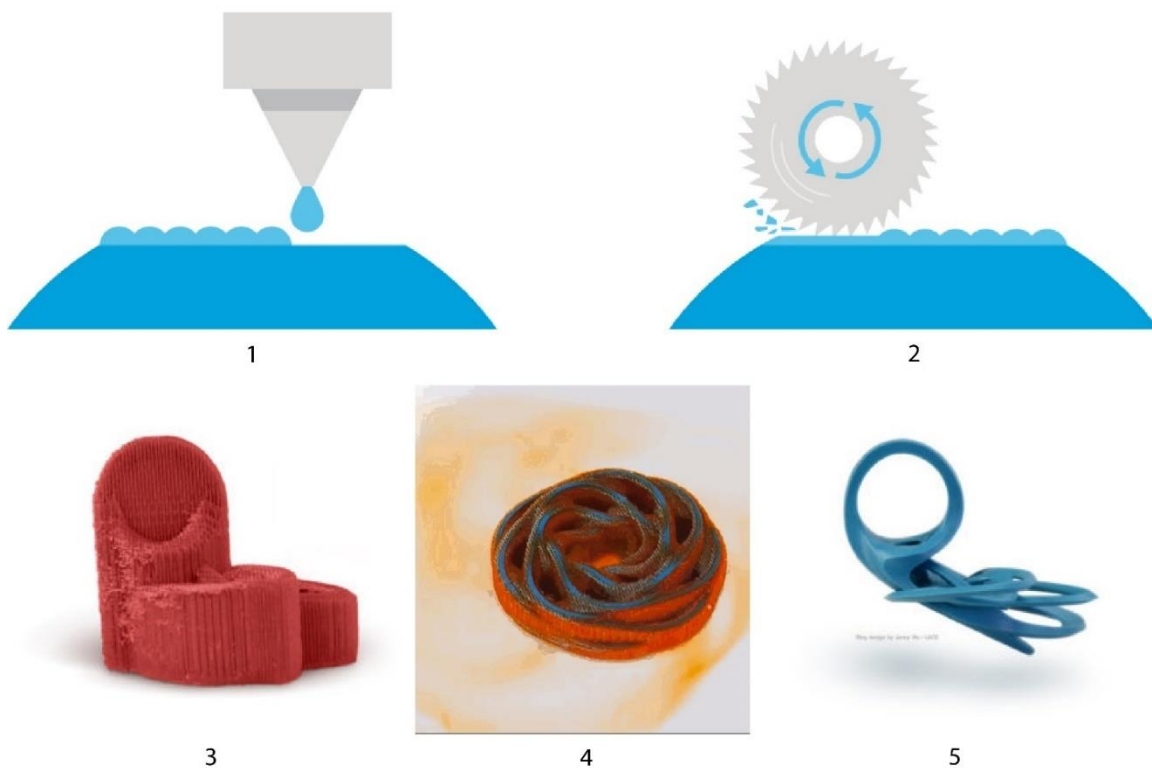
¹⁴⁰ Więcej o zasadzie działania *attractor*'ów można przeczytać tutaj: <https://www.designcoding.net/attractor-basics/> [dostęp 22..06.2024].

w których linie zdają się płynnie zmieniać, reagując na obecność *attractor*’ów. Te subtelne modyfikacje nadały biżuterii bardziej organiczny charakter, podkreślając, szczególnie w miejscach rozrzedzenia struktury, jej ażurową bryłę.



Il. 2. 80 Zrzuty z ekranu ukazujące różne zmiany parametrów na tej samej bryle bazowej. Źródło: opracowanie własne.

Dzięki komponentowi *Populate 3D* (generowanie chmury punktów, które następnie łączę liniami tworząc konstrukcje) stworzenie takich konstrukcji jest znacznie przyspieszone. Wykonanie ręcznie takich struktur z metalu jest praktycznie niemożliwe i mogą one powstać jedynie przy wykorzystaniu projektowania parametrycznego. Wadą stworzonej przeze mnie definicji jest jednak to, że czasem chmura punktów generuje dwa punkty zbyt blisko siebie, przez co powstają linie sąsiadujące ze sobą. Po dodaniu grubości linii nakładają się one na siebie, tworząc błędy, nieatrakcyjne i przypadkowe powierzchnie. Podobnie, gdy punkty są od siebie zbyt oddalone, tworzy się nieestetyczna dziura. W obu tych przypadkach musiałem manualnie naprawiać te błędy w komputerze, dodając lub usuwając linie. Nie byłem w stanie wyeliminować tej wady automatycznie. W niektórych moich projektach, po wygenerowaniu ażurowej konstrukcji, dodawałem już manualnie odpowiednio zaprojektowaną płaszczyznę w celu uatrakcyjnienia ostatecznego produktu poprzez zderzenie ze sobą dwóch różnych kolorów, materiałów czy powierzchni. Płaszczyzny te w odbiorze wizualnym również często mają charakter linii, poprzez np. widoczną tylko krawędź, co dopełnia całość projektu.



Il. 2. 82 Proces druku w technologii dot-on-dot firmy Solidscape. 1.) Nakładanie kropli wosku. 2.) Usuwanie nadmiaru materiału przez frez. 3.) Przykładowy model po wydruku. 4.) Proces usuwania materiału podporowego. 5.) Gotowy model do odlewu.
Źródło: <https://lemondim.com/solidscape/>

Kolejnym ważnym etapem podczas wytwarzania był proces odlewu metodą traconego wosku. Nie mogłem sobie pozwolić na nieudane odlewy. Dlatego już w procesie projektowym, przed wydrukiem, zawarłem kanały dolewowe, co zapewniało, że proces odlewania zakończył się powodzeniem. Ostatnim etapem było już ręczne wykończenie elementów na warsztacie jubilerskim.



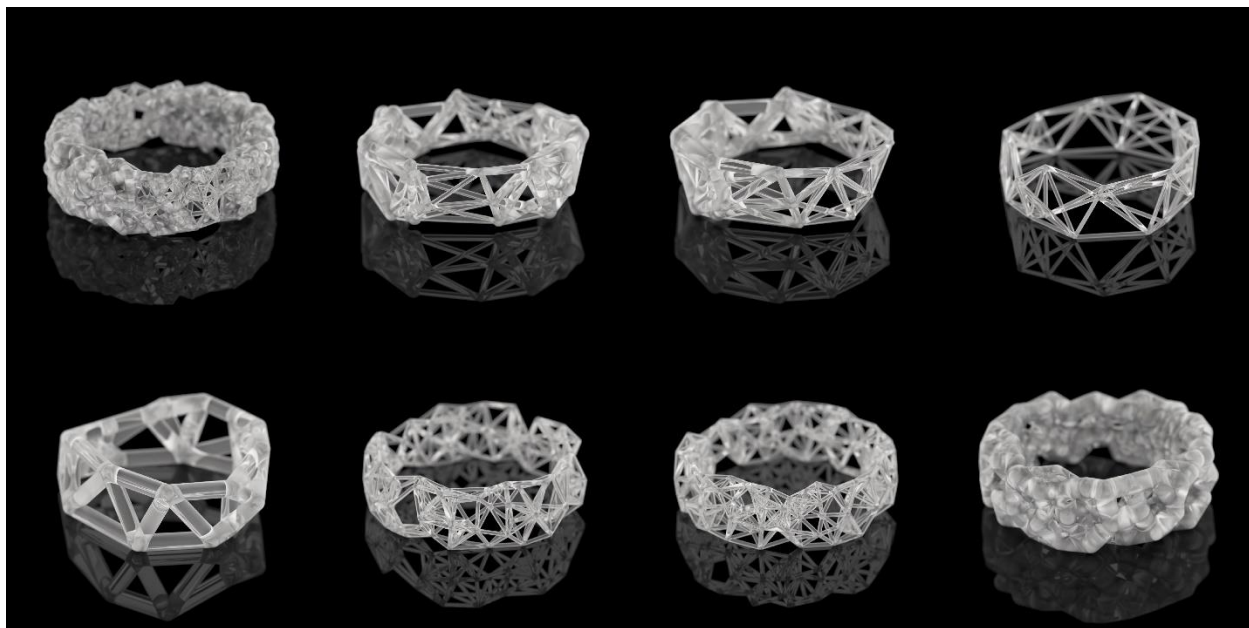
Il. 2. 83 Proces odlewania od projektu po gotowy odlew. 1.) Zaprojektowany model wraz z kanałami dolewowymi. 2.) Wydruku w wosku. 3.) Choinka z odlewami. 4.) Precyzyjne odcinanie odlewów z choinki. 5.) Odcięte odlewy gotowe do dalszej obróbki.
Źródło: opracowanie własne.

Drugą część kolekcji *Vertex* wykonałem w za pomocą drukarki firmy *Formlabs*. Technologia w jakiej powstają modele to stereolitografia (*SLA*). Drukarki *SLA* działają na zasadzie utwardzania ciekłej żywicy za pomocą lasera UV. Proces ten zaczyna się od pojemnika z płynną żywicą fotopolimerową. Laser rysuje wzory na powierzchni żywicy, która twardnieje w odpowiednich miejscach. Warstwa po warstwie, model jest budowany, aż do osiągnięcia finalnej formy. Dzięki tej technologii można tworzyć niezwykle szczegółowe i skomplikowane struktury, co jest szczególnie przydatne przy produkcji biżuterii, gdzie precyzja i wykonanie jest kluczowe. Największą wadą drukarek *SLA* są obligatoryjne podpory, o których już wspomniałem opisując kolekcję *Fluidium*. Na szczęście ta wada nie wpłynęła na wydruki tej kolekcji, ponieważ wystarczyło podłączyć podpory tylko do zewnętrznych części konstrukcji. Sama konstrukcja, dzięki swojej geometrycznej formie składającej się z odcinków linii, nie wymagała wewnętrznych podpór, co nie było możliwe do osiągnięcia w przypadku kolekcji *Fluidium*.



Il. 2. 84 Wydruki z drukarki 3D firmy *Formlabs*. Część z tych modeli została zabarwiona w celu przetestowania różnych kolorów i sprawdzenia ich wizualnego efektu. Źródło: opracowanie własne.

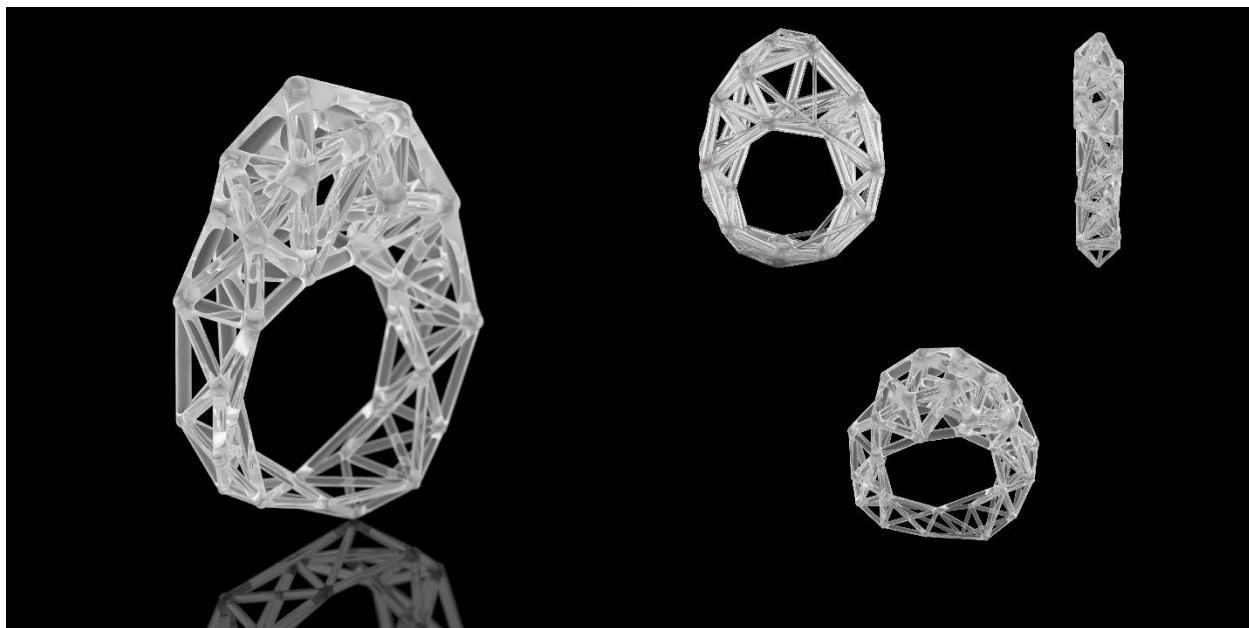
Kolekcja *Vertex* składa się łącznie z trzydziestu trzech obiektów. Są to głównie obrączki, pierścionki i jedna bransoletka. Powstało siedem obiektów wykonanych ze złota próby 14K, sześć wykonanych ze srebra i mosiądzu złożonego, oraz dwadzieścia wykonanych w formie prototypów w polimerze utwardzanym światłem UV. Przy pracach wykonanych z polimerów przeprowadziłem szereg testów pod względem doboru odpowiedniego ich koloru. Ostatecznie, ze względu na ciekawą „grę” światła, postanowiłem elementy ażurowe stworzyć z transparentnej żywicy, a pojawiające się w niektórych przypadkach dodatkowe płaszczyzny, pomalować na szaro z delikatnie metalicznym odcieniem. Kolekcję tę, tak jak w przypadku dwóch poprzednich, można oczywiście rozbudowywać o każdy inny element biżuteryjny. Tworząc ją chciałem skupić się głównie na pokazaniu możliwości, jakie dają techniki generatywne, przy tworzeniu brył o różnych kształtach. Forma pierścionka była odpowiednia do takich testów. *Vertex* jest mi szczególnie bliska spośród wszystkich trzech kolekcji, ponieważ została częściowo wykonana według tradycyjnych technik jubilerskich. Na co dzień, oprócz pracy w Akademii Sztuk Pięknych w Łodzi, prowadzę własną działalność, w której projektuję i wykonuję biżuterię na indywidualne zamówienia klientów. Ta kolekcja idealnie dopełnia profil mojej działalności, ponieważ dzięki projektowaniu parametrycznemu mogę, podczas spotkania z klientem, na żywo konfigurować układ linii w projekcie, umożliwiając klientowi zaakceptowanie finalnego projektu. Skierowana jest ona zatem jako oferta dla firmy jubilerskiej. Może przyciągnąć wielu klientów ze względu na unikalny design, personalizację i szybki czas tworzenia innego wariantu projektu. Klient może współtworzyć finalny projekt biżuterii poprzez zmianę wartości parametrów, generując setki różnych możliwości. Oczywiście, wszystkie wynikowe projekty powstają w oparciu o wcześniej ustalone przeze mnie ramy, co zapewnia spójność i jakość końcowego projektu. Projektując tę kolekcję, miałem na myśli stworzenie produktu, który będzie najbardziej komercyjny i posiadający duży potencjał sprzedażowy na rynku biżuterii. Dzięki połączeniu nowoczesnych technik generatywnego projektowania i tradycyjnego rzemiosła jubilerskiego, kolekcja *Vertex* wyróżnia się innowacyjnością i unikalnym stylem, który z pewnością przyciągnie uwagę klientów.



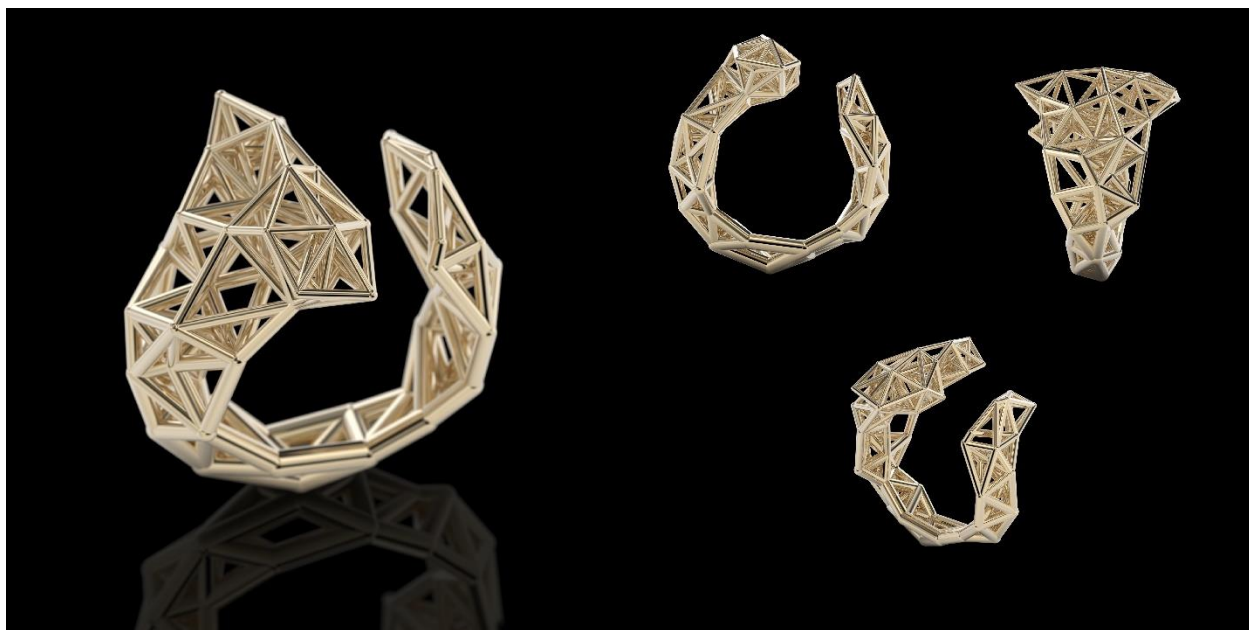
Il. 2. 85 Obrączki V1 – V8 - fotopolimer. Różne wariacje zmiany parametrów.



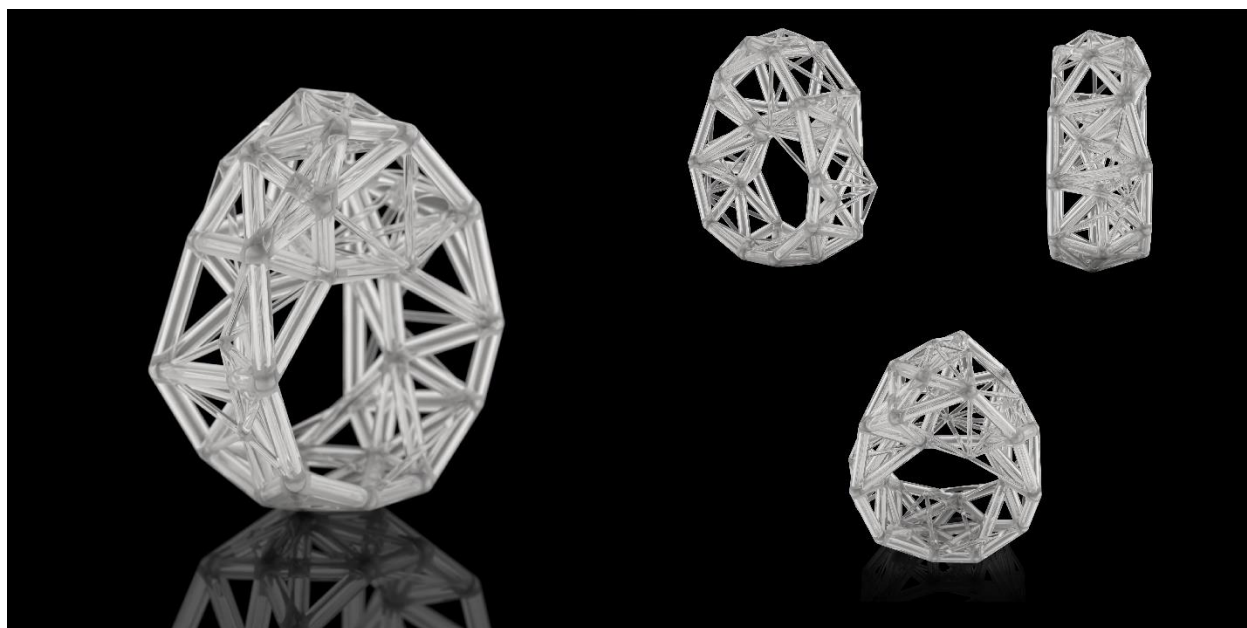
Il. 2. 86 Para obrączek V9 i V10 - złote złoto 14k, białe i czarne diamenty.



Il. 2. 87 Pierścionek V11 – fotopolimer.



Il. 2. 88 Pierścionek V12 - złoto 14K.



Il. 2. 89 Pierścionek V13 – fotopolimer.



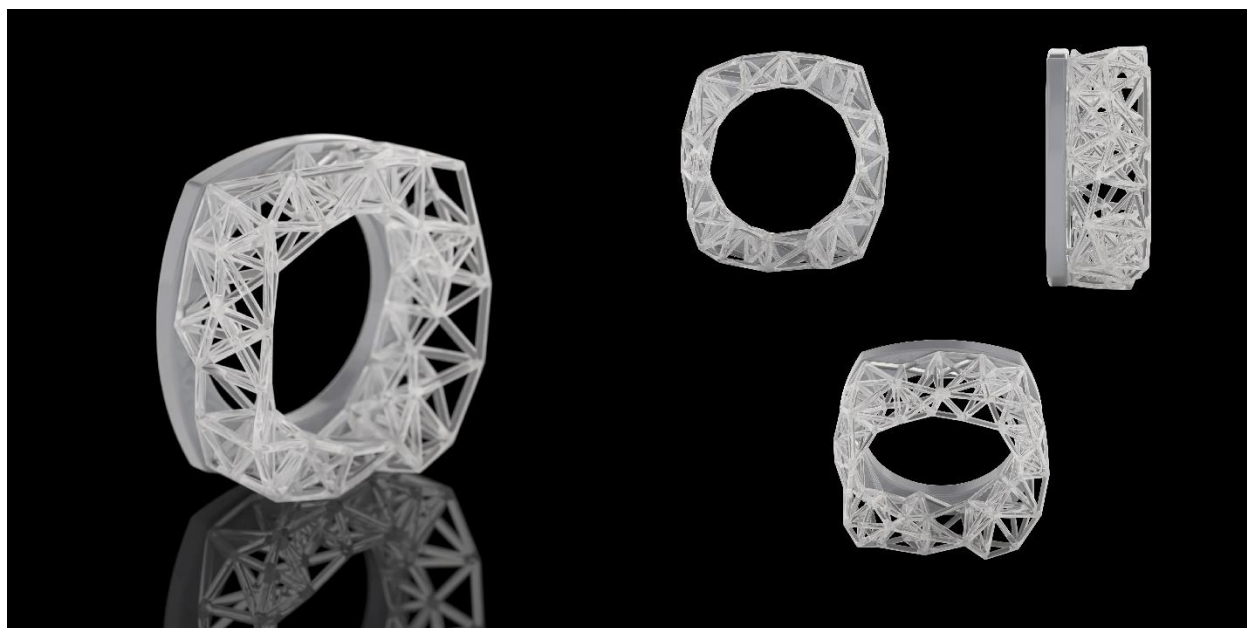
Il. 2. 90 Pierścionek V14 - srebro złocone.



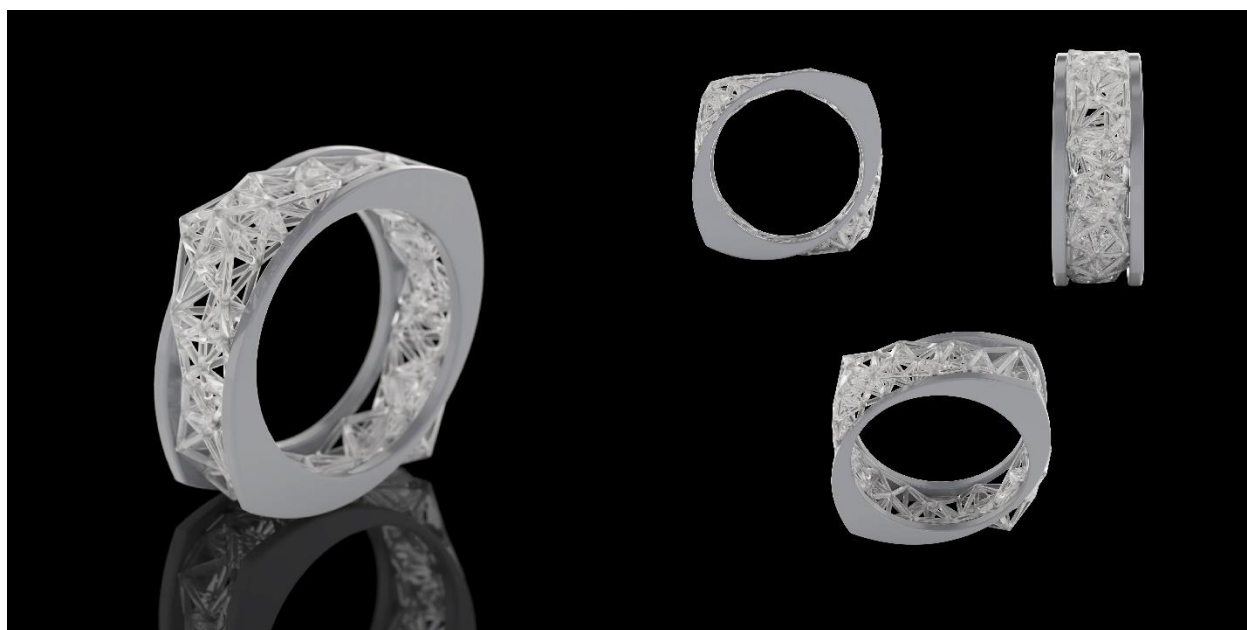
Il. 2. 91 Pierścionek V15 – fotopolimer.



Il. 2. 92 Pierścionek V16 – fotopolimer.



Il. 2. 93 Pierścionek V17 – fotopolimer.



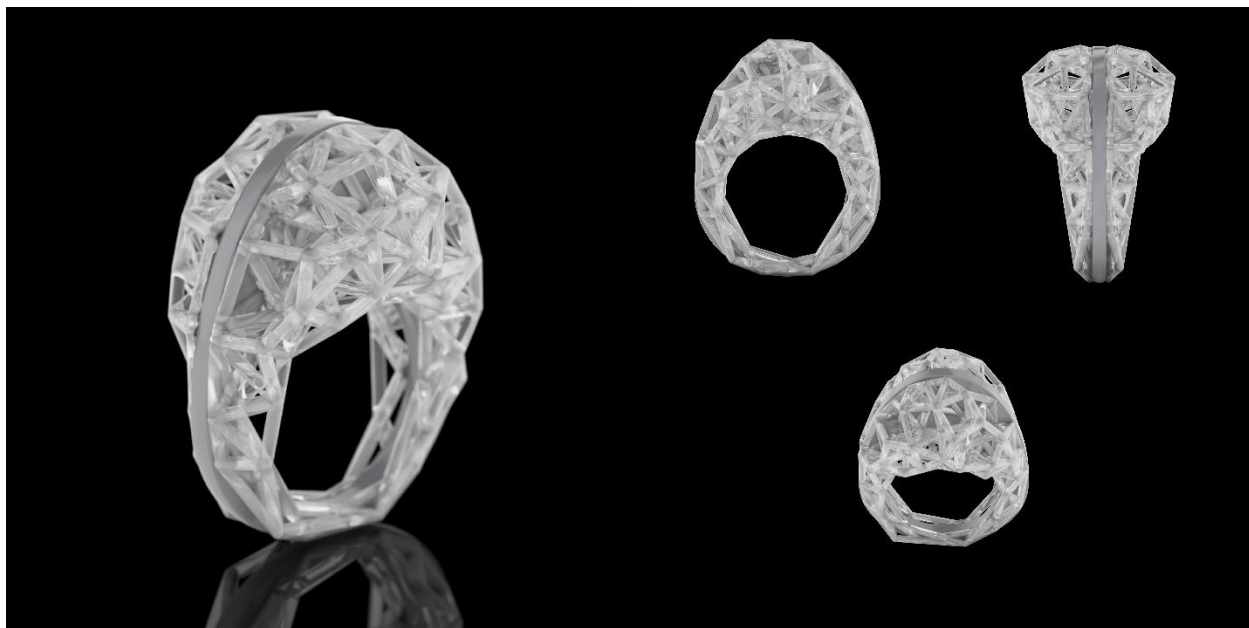
Il. 2. 94 Pierścionek V18 – fotopolimer.



Il. 2. 95 Pierścionek V19 – fotopolimer.



Il. 2. 96 Pierścionek V20 - srebro, miedziany złocony.



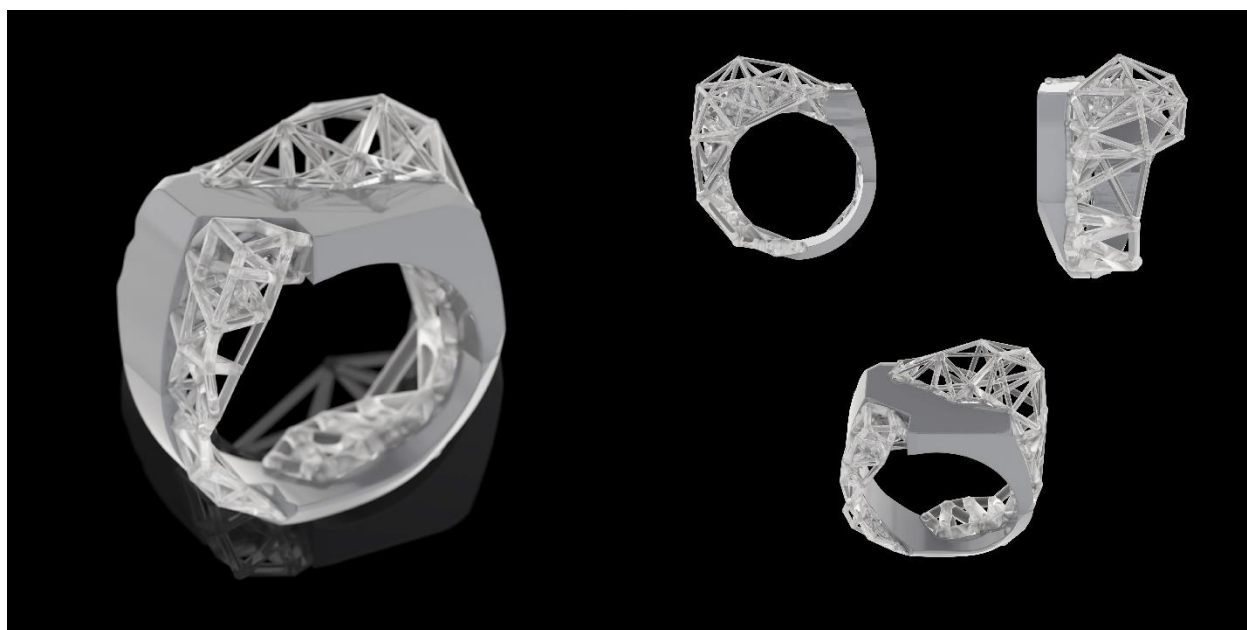
Il. 2. 97 Pierścionek V21 – fotopolimer.



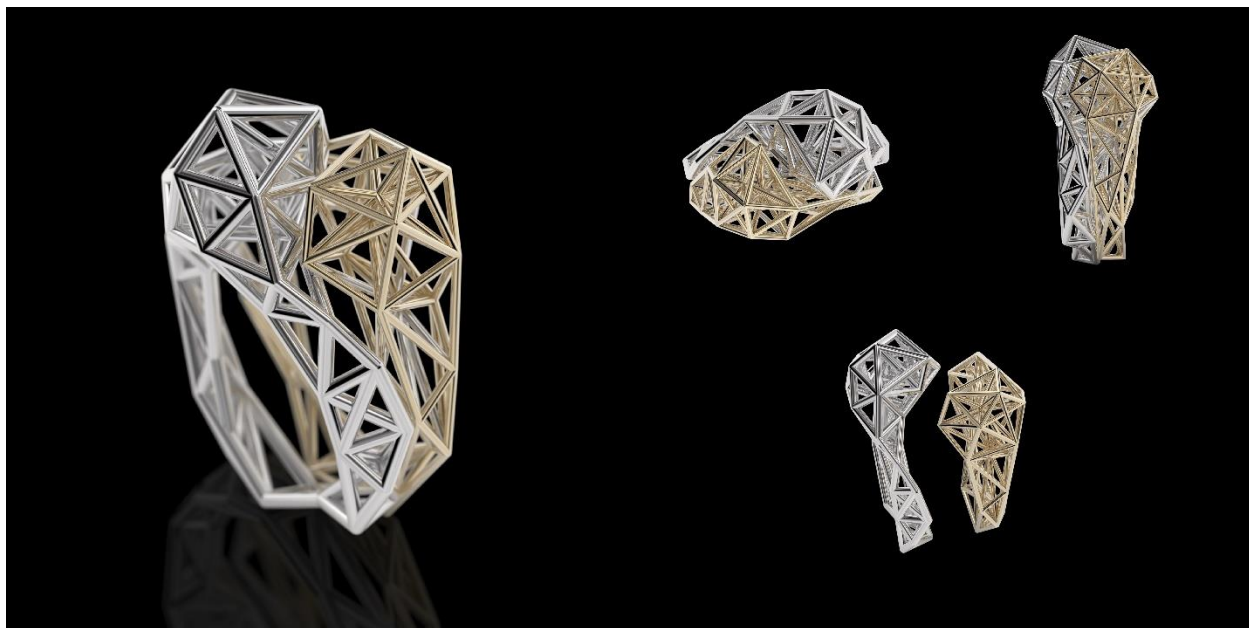
Il. 2. 98 Pierścionek V22 - białe i żółte złoto 14K.



Il. 2. 99 Pierścionek V23 - srebro, mosiądz złocony.



Il. 2. 100 Pierścionek V24 – fotopolimer.



Il. 2. 101 Pierścionki V25 i V26 - białe i żółte złoto 14K.



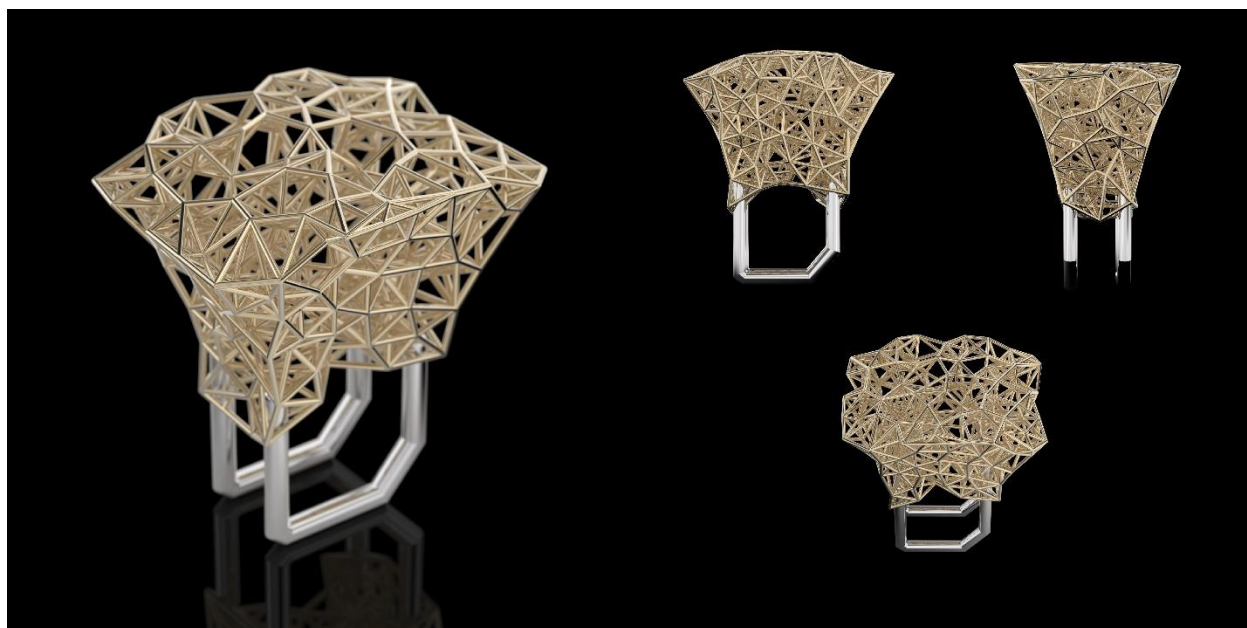
Il. 2. 102 Pierścionek V27 – fotopolimer.



Il. 2. 103 Pierścionek V28 - srebro, mosiądz złocony.



Il. 2. 104 Pierścionek V29 – fotopolimer.



Il. 2. 105 Pierścionek V30 - srebro, mosiądz złożony.



Il. 2. 106 Pierścionek V31 - srebro, mosiądz złożony.



Il. 2. 107 Pierścionek V32 - białe i żółte złoto 14K.



Il. 2. 108 Bransoletka V33 – fotopolimer.

Podsumowanie

Jako projektant biżuterii, kładę największy nacisk na wymiar estetyczny i formę, które są kluczowe w procesie projektowania. Jej funkcjonalność traktuję jako istotny element, uwzględniając takie aspekty jak miejsce noszenia czy odpowiedni rozmiar, np. pierścionka. Tworząc biżuterię, zawsze myślę o jej bryle, dążąc do tego, aby była interesująca. Traktuję ją jak małą formę rzeźbiarską, która nawet gdy nie jest noszona na ciele, pozostaje atrakcyjna i przykuwa wzrok. W moich pracach design nie jest jedynie kwestią estetyki, ale także sposobem na wyrażenie artystycznej wizji, eksperymentowanie z formą i strukturą, a także przekraczaniem tradycyjnych granic ogólnie pojmowanego rzemiosła jubilerskiego.

*„Designer to projektant mający zmysł estetyczny. To właśnie od niego w dużej mierze zależy sukces produkcji przemysłowej, ponieważ forma przedmiotu użytkowego - maszyny do pisania, lornetki, fotela, wentylatora, garnka czy lodówki - przyczynia się do wzrostu sprzedaży, o ile tylko została odpowiednio wystudiowana”.*¹⁴¹

Praca *„Biżuteria ażurowa tworzona w oparciu o projektowanie parametryczne oraz techniki generatywne”* stanowi próbę zbadania możliwości, jakie współczesne technologie projektowania i produkcji wnoszą do świata biżuterii. Projektowanie parametryczne i techniki generatywne, w połączeniu z nowoczesnymi narzędziami takimi jak druk 3D i cięcie laserowe, oferują nowe perspektywy i wyzwania dla twórców. Moja praca koncentrowała się na ukazaniu, jak te innowacyjne metody mogą nie tylko usprawnić procesy twórcze, generując w szybszy sposób wiele rozwiązań, ale również umożliwić realizację projektów o dużej złożoności i precyzji, nieosiągalnej tradycyjnymi technikami. Ukazuję w niej, jak parametryzacja umożliwia precyzyjne kontrolowanie kształtów i struktur, co pozwala na realizację nawet najbardziej skomplikowanych wizji artystycznych. Na przykładzie stworzonych kolekcji, zauważalne jest jak przyspieszają one i ułatwiają produkcję, otwierając nowe możliwości swobody twórczej, pozwalając na tworzenie unikalnych, ażurowych wzorów. Te nowe możliwości pozwalają na skupienie się na bardziej kreatywnych i strategicznych elementach swojej pracy. Druk 3D jest szczególnie przydatny w takim procesie projektowania, ponieważ przed wdrożeniem już finalnego produktu

¹⁴¹Munari Bruno, *Dizajn i sztuka*, Wydawnictwo d2d.pl, Wydanie Pierwsze, Kraków, 2014, s. 28.

do produkcji masowej, można przetestować różne pomysły i warianty. Poprzez dynamiczny rozwój druku 3D, możliwe jest teraz tworzenie kompletnie funkcjonalnych modeli, które są gotowe do użycia jako finalne produkty. Pomimo licznych zalet, technologia druku 3D nie jest pozbawiona wad. Ograniczenia związane z wielkością pola roboczego i materiałami drukarki oraz kosztami są nadal istotnymi czynnikami, które wpływają na wykorzystanie tej technologii przy tworzeniu realizacji.

Po stworzeniu kolekcji z wykorzystaniem projektowania parametrycznego i technik generatywnych, zgromadziłem doświadczenie pozwalające wyciągnąć mi następujące wnioski odnośnie zalet i wad tego procesu w produkcji biżuterii:

Zalety:

- Szybkość i efektywność: Projektowanie parametryczne umożliwia szybszy proces projektowania i produkcji biżuterii, co pozwala na zaspokojenie większej liczby zamówień w krótszym czasie.
- Skalowalność: Ze względu na parametry użyte w *definicjach* umożliwiają one łatwe dostosowywanie wzorów do różnych rozmiarów i kształtów, co ułatwia zaspokojenie potrzeb indywidualnego klienta oraz dostosowania np. do masowej produkcji biżuterii – przykładem może być przebudowanie całego pierścionka biorąc pod uwagę nietypowy rozmiar palca. Projektując jeden element np. pierścionelek, możemy z niego wygenerować bazę do zawieszki i kolczyków - poprzez skalowalność w odpowiednich proporcjach głównego, wcześniej zaprojektowanego elementu.
- Optymalizacja materiałów: Dzięki użyciu specjalnego komponentu, projektowanie parametryczne pozwala na dokładne wyliczenie ilości materiałów jaka będzie wykorzystana w danym projekcie (głównie chodzi tutaj o wyliczenie wagi, co w przypadku użycia np. złota ma duże znaczenie). Pomaga to już w fazie projektowej w wyliczeniu ostatecznej ceny biżuterii.
- Personalizacja: Poprzez szybką zmienność parametrów można tworzyć indywidualne projekty, co może zwiększyć atrakcyjność oferty i satysfakcję klientów. Dodatkowo, automatycznie w modelu można już wdrożyć elementy personalizacji, jak np. grawer.

- Możliwość eksperymentowania: Projektowanie parametryczne daje projektantom możliwość eksperymentowania z różnymi parametrami i wariantami projektów, co może prowadzić do odkrycia nowych i unikalnych wzorów, które mogą wyróżnić się na rynku.
- Precyzja i powtarzalność: Projektowanie parametryczne pozwala na uzyskanie precyzyjnych i powtarzalnych wzorów, co jest szczególnie istotne przy produkcji większych ilości biżuterii. Poprzez zmiany parametrów można idealnie osiągnąć zamierzony efekt.
- Integracja z nowymi technologiami: Projektowanie parametryczne może być łatwo zintegrowane z technologią druku 3D czy laserem, co umożliwia szybkie wytwarzanie prototypów i próbek biżuterii.
- Łatwa modyfikacja i aktualizacja: Zmiany parametrów pozwalają na łatwą modyfikację i aktualizację wzorów, co ułatwia reagowanie na zmieniające się trendy i preferencje klientów.
- Zwiększenie innowacyjności: Wykorzystanie projektowania parametrycznego może przyczynić się do zwiększenia innowacyjności i kreatywności w produkcji biżuterii, co może zainteresować i przyciągać nowych klientów zwiększając konkurencyjność na rynku.

Wady:

- Wymagany wysoki poziom wiedzy i umiejętności: Projektowanie parametryczne wymaga specjalistycznej wiedzy i umiejętności obsługi odpowiednich narzędzi i oprogramowania, co może stanowić wyzwanie dla niektórych projektantów biżuterii niezaznajomionych z tą technologią.
- Koszty wdrożenia: Inwestycja w odpowiednie oprogramowanie oraz szkolenia dla personelu może wiązać się z kosztami początkowymi.
- Brak namacalnego obiektu: Projektowanie parametryczne opiera się na algorytmach komputerowych, co może oznaczać mniejszą kontrolę nad finalnym projektem – wycucie skali i proporcji. Dlatego uważam, że w przypadku pracy w tej technologii, wymagane jest posiadanie drukarki 3D.

- Ograniczenia projektowe: Niektóre gotowe, dostępne na rynku nakładki do programów do projektowania parametrycznego, mogą wprowadzać ograniczenia w projektowaniu, co może utrudnić tworzenie bardziej nietypowych i oryginalnych wzorów.
- Wymagana moc obliczeniowa: Przy bardziej skomplikowanych i złożonych definicjach wymagana jest duża moc obliczeniowa komputera, co wiąże się z większym wydatkiem.

Pomimo nielicznych wad, jak widać powyżej, projektowanie parametryczne ma ogromny potencjał, który warto poznać i wdrożyć w proces projektowy.

Jednym z celów mojej pracy było także zbadanie, czy podejście do tworzenia biżuterii oparte na nowoczesnych technologiach jest możliwe i atrakcyjne dla firm, które na co dzień nie zajmują się jej produkcją. Przeprowadzone próby i przykłady, zastosowane w kolekcjach pokazały, że mogą być skutecznie wykorzystane przez różne przedsiębiorstwa, niezależnie od ich głównej działalności. W ten sposób, moja praca wskazuje na potencjał tych technologii do wzbogacania oferty różnych firm i otwierania nowych możliwości biznesowych.

Dzięki stworzeniu trzech różnych kolekcji biżuterii, *Fluidium*, *Fusion* i *Vertex*, które wykorzystują projektowanie parametryczne oraz techniki generatywne, pokazałem praktyczne zastosowania moich badań. Przez zastosowanie tego procesu projektowania możemy osiągnąć niespotykany dotąd poziom precyzji w projektowaniu biżuterii ażurowej, co pozwala na kreowanie bardziej skomplikowanych i zaawansowanych form, które wcześniej były poza moim zasięgiem. Przeanalizowane w mojej pracy teorie, dotyczące punktu i linii, były dla mnie kluczowe przy tworzeniu kolekcji. Wiedza teoretyczna pozwoliła mi na świadome kształtowanie form, które nie tylko spełniały estetyczne wymogi, ale również były dynamiczne i harmonijne, osiągając tym samym zamierzony cel plastyczny. Moje prace stanowią połączenie teorii z praktyką, gdzie każdy punkt i linia mają swoje miejsce i znaczenie. Linie te tworzą czasem proste, a czasem skomplikowane, ażurowe struktury, które nadają biżuterii lekkości i przestrzenności. Moje prace pokazują, że teoria punktu i linii nie jest tylko abstrakcyjnym konceptem, ale znajduje praktyczne zastosowanie w procesie tworzenia biżuterii.

W ramach mojej rozprawy, tworząc kolekcje, miałem na celu zainspirowanie przyszłych projektantów i twórców do eksperymentowania z nowymi narzędziami i technikami. Moje kolekcje pokazują, że dzięki innowacyjnym metodom projektowania i nowoczesnym technologiom produkcji można tworzyć dzieła jeszcze bardziej unikalne i oryginalne. Dodatkowo ciekawym wykorzystaniem procesu projektowania parametrycznego i technik generatywnych jest wdrożenie projektów poprzez platformę *ShapeDiver*¹⁴² na własną stronę internetową. *ShapeDiver* jest narzędziem online umożliwiającym integrację projektów stworzonych w *Grasshopper* z interfejsem internetowym. Dzięki temu projekty mogą być łatwo przesyłane na platformę, gdzie zostają udostępnione w formie interaktywnych modeli 3D, które można zaimplementować na swojej stronie internetowej. Docelowi klienci mogą modyfikować te modele w czasie rzeczywistym, korzystając z prostych suwaków. Wykorzystanie platformy *Shapediver* w e-commerce pozwala klientom na bezpośrednie angażowanie się w proces projektowania. Na stronie internetowej, klient może personalizować swoje zamówienia, dostosowując kształty, rozmiary, kolory i inne parametry biżuterii, co pozwala na stworzenie unikalnej wersji produktu bez konieczności ręcznego modyfikowania projektu przez projektanta. To znacznie skraca czas realizacji zamówień i zmniejsza koszty produkcji. Ta interaktywność sprawia, że klient czuje się współtwórcą projektu, co zwiększa jego zaangażowanie i satysfakcję z finalnego produktu.

Jako nauczyciel akademicki, który uczy projektowania 3D w tradycyjnych programach, mogę wzbogacić swoje zajęcia o projektowanie parametryczne i techniki generatywne, wprowadzając studentów w proces projektowania, który otwiera przed nimi nowe możliwości twórcze. Włączenie projektowania parametrycznego i technik generatywnych do programu nauczania pozwala studentom na zrozumienie, jak poprzez stworzenie swojej *definicji*, zmiany parametrów mogą wpływać na proces tworzenia, dając im narzędzie do bardziej dynamicznego i elastycznego podejścia do projektowania. Dzięki takim programom jak *Grasshopper*, studenci mogą nauczyć się tworzyć złożone, zmieniające się formy, które reagują na różnorodne parametry wejściowe. To nie tylko rozwinięcie ich umiejętności techniczne, ale także pobudzi kreatywne myślenie, umożliwiając eksperymentowanie z nowymi formami i strukturami. Ponadto, znajomość projektowania parametrycznego przygotowuje studentów do pracy w nowoczesnym środowisku zawodowym, gdzie takie umiejętności są coraz bardziej cenione. Wprowadzenie projektowania

¹⁴² <https://shapediver.com/3d-configurators> [dostęp 17.06.2024]

parametrycznego na zajęciach może również zwiększyć atrakcyjność kierunku biżuterii, przyciągając studentów zainteresowanych nowoczesnymi technologiami i innowacyjnymi metodami pracy. Dodatkowo, poprzez takie zajęcia, studenci będą mieli okazję pracować nad projektami, które mogą być bezpośrednio przeniesione do rzeczywistości dzięki technologiom druku 3D i cięcia laserowego, które posiadamy w Instytucie Biżuterii. Daje im to praktyczne doświadczenie w realizacji własnych pomysłów. Podsumowując, wprowadzenie projektowania parametrycznego w programie nauczania nie tylko wzbogaci warsztat techniczny studentów, ale także otworzy przed nimi nowe perspektywy twórcze i zawodowe, przygotowując ich do pracy w dynamicznie zmieniającym się świecie projektowania i technologii. Ponadto, wdrożenie projektowania parametrycznego do programu nauczania może otworzyć przed studentami nowe ścieżki kariery. Współczesny rynek pracy coraz częściej poszukuje specjalistów, którzy są biegli w nowoczesnych technologiach i metodach projektowania. Umiejętność posługiwania się narzędziami parametrycznymi może znacząco zwiększyć konkurencyjność absolwentów na rynku pracy, umożliwiając im pracę w różnych branżach, od architektury po wzornictwo przemysłowe. Wprowadzenie projektowania parametrycznego do pracowni akademickiej niesie ze sobą ogromny potencjał edukacyjny. Myślę, że jest to nowy kierunek w procesie projektowania, który zasługuje na głębsze zainteresowanie i dalsze zgłębianie.

Niniejsza rozprawa doktorska jest kompleksowym studium łączącym teorię i praktykę nowoczesnego projektowania biżuterii. Analiza technologii druku 3D oraz projektowania parametrycznego pokazuje, że narzędzia te mogą stać się nie tylko wsparciem, ale i kluczowym elementem procesu twórczego, umożliwiając projektantom realizację bardziej złożonych i innowacyjnych koncepcji. Jestem zadowolony z rezultatów mojej pracy, które zaowocowały unikalnymi i innowacyjnymi kolekcjami biżuterii. Wierzę, że dalsze badania i eksperymentowanie z projektowaniem parametrycznym może przynieść jeszcze bardziej ciekawe rezultaty. Mam nadzieję, że niniejsza rozprawa przyczyni się do dalszego rozwoju wiedzy na temat projektowania parametrycznego i technik generatywnych oraz ich zastosowania w biżuterii, inspirując kolejnych projektantów do eksperymentowania z nowymi technologiami i przekraczania granic tradycyjnego rzemiosła.

Bibliografia

1. Bachman D., *Grasshopper: Visual Scripting for Rhinoceros 3D (Volume 1)*, First Edition, Industrial Press, Inc., 2017
2. Barucki T., et al., *Sztuka Świata 17. Słownik terminologiczny sztuk pięknych A-K*, Wyd. Arkady, Warszawa, 2013
3. Beardsley M., *Aesthetics; Problems in the Philosophy of Criticism*, Harcourt, Brace and Comp., Nowy Jork, 1958
4. Bucci F., Mulazzani M., Moretti L., *Works and Writings*, Nowy Jork, Princeton Architectural Press 2000
5. Budziak G., Woźniak J., Przeszlowski Ł., *Druk 3D jako element przemysłu przyszłości, „Analiza rynku i tendencje rozwoju”*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2022
6. Burry J., Burry M., *Prototyping for architects*, Thames & Hudson, Londyn, 2016
7. Castle H., Schumacher P., *Parametricism 2.0 - Rethinking Architecture's Agenda for the 21st Century AD*, Academy Press, 2016
8. Earnshaw S., *On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether*, “Transactions of the Cambridge Philosophical Society 7”, 1839
9. Feld M., *Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn*, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 2009
10. Florow A.W., *Artystyczna obróbka metali*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe , Warszawa, 1989
11. Frei O., Rasch B., *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*, Stuttgart: Axel Menges, 1996
12. Guidot R., *Design 1940-1990 wzornictwo i projektowanie*, Wydawnictwo Arkady, 1998
13. Januszkiewicz K., *Projektowanie parametryczne oraz parametryczne narzędzia cyfrowe w projektowaniu architektonicznym*, „ARCHITECTURAE et ARTIBUS” - 3/2016, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury 2016
14. Kandyński W., *Punkt i linia a płaszczyzna*, Wyd. Oficyna, Łódź, 2019

15. Kodama H., *A scheme for three-dimensional display by automatic fabrication of threedimensional model*, "IEICE Transactions on Electronics", 1981
16. Krupiński J., *Kulturowa dominacja designu*, „Wiadomości ASP/82”, Akademia Sztuk Pięknych w Krakowie, Kraków, 2018
17. Krupiński J., *Wzornictwo/Design studium idei*, Akademia Sztuk Pięknych w Krakowie, Kraków, 1998
18. Leslie J., *Geometrical Analysis and Geometry of Curve Lines*, Edynburg: W. & C.Tait, 1821
19. Miecielica M., *Techniki szybkiego prototypowania – rapid prototyping*, Przegląd mechaniczny, Wydawnictwo SIGMA-NOT, 2010
20. Munari Bruno, *Dizajn i sztuka*, Wydawnictwo d2d.pl., Kraków, 2014
21. Novak M., *Transarchitectures and Hypersurfaces*, (w:) di Cristina Giuseppe (red.), Architecture and Science, Wiley-Academy Edition, Londyn, 1998
22. Osińska B., *Sztuka i czas od klasycyzmu do współczesności*, Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne Spółka Akcyjna 2005
23. Ośniecka S., *Nie tylko technika – ekspresja konstrukcji jako estetyczny walor dzieła architektonicznego*, „AMOR FATI” Antropologiczne czasopismo filozoficzne”, Wydawnictwo Leimak, Marzec 1 (5)/2016
24. Pawłowski A., *Inicjacje. O sztuce, projektowaniu i kształceniu projektantów*, IWP, Warszawa, 1987
25. Pham D.T., Gault R.S. *A comparison of rapid prototyping technologies*, "International Journal of Machine Tools and Manufacture", wydanie 38, 1998
26. Pîrjan A., Petroşanu D., *The impact of 3D printing technology on the society and economy*, "Journal of Information Systems & Operations Management", 2013
27. Read H., *Art and Industry. The Principles of Industrial Design*, MB, Nowy Jork, 1961
28. Romański J., *Drukując idee, drukując przedmioty – ontologiczna analiza dzieł sztuki stworzonych z wykorzystaniem technologii wydruku 3D*, „3D. Implikacje. Cyfra i bryła”, red. Aleksandrowicz Monika, Kaczmarek Małgorzata, ASP we Wrocławiu, Wrocław, 2023
29. Ruiter M., *Advances in Computer Graphics III*. Berlin: Springer-Verlag, 1998

30. Schumacher P., *The Autopoiesis of Architecture, "Vol II: A New Agenda for Architecture"*, John Wiley & Sons (Chichester), 2012
31. See R., *Building Information Models and Model Views*, "Journal of Building Information Modeling", Fall 2007, NIBS, Waszyngton
32. Siemiński P., Budzik G., *Techniki przyrostowe. Druk 3D. Drukarki 3D*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa, 2015
33. Słyk J., *Źródła architektury informacyjnej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2012
34. Stefańska A., *Zeszyty Naukowe Uczelni Vistula, 2017/57(6) „Architektura”*, Politechnika Warszawska, 2017
35. Sullivan L., *The Tall Office Building Artistically Considered*, "Lippincott's Magazine", Marzec, 1896
36. Sutherland I., *SketchPad: A Man-Machine Graphical Communication System*, PhD dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 1963
37. Szparkowski Z., *Podstawy inspiracji architektury, Ruchomy punkt, linia, spirala*, Oficyna Wydawnicza Wyższej Szkoły Ekologii i Zarządzania w Warszawie, Warszawa, 2012
38. Woodbury R., *Elements of Parametric Design*, Routledge, 2010

Strony internetowe

1. <https://pl.wikipedia.org/wiki/A%C5%BCur> [dostęp 25.06.2023].
2. <https://www.muratorplus.pl/biznes/firmy-i-ludzie/projektowanie-generatywne-w-architekturze-aa-S26g-3SWJ-ffXv.html> [dostęp 17.07.2023]
3. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Punkt_\(geometria\)](https://pl.wikipedia.org/wiki/Punkt_(geometria)) [dostęp 12.07.2023].
4. <https://secretsfromportugal.com/filigree-portuguese-culture/> [dostęp 25.06.2023].
5. www.punktmag.com, wyd. 13 [dostęp 22.05.2024].
6. https://www.academia.edu/41325381/Parametric_Design_A_Historical_and_Theoretical_Overview [dostęp 20.04.2024].
7. https://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo_Hooke%E2%80%99a [dostęp 22.04.2024]
8. https://pl.wikipedia.org/wiki/Krzywa_%C5%82a%C5%84cuchowa [dostęp 22.04.2024].

9. https://pl.wikipedia.org/wiki/Projektowanie_wspomagane_komputerowo [dostęp 17.06.2023].
10. <https://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/> [dostęp 17.06.2023].
11. https://pl.wikipedia.org/wiki/Komputer_osobisty [dostęp 20.06.2023].
12. <https://mundogeo.com/en/2009/02/09/autodesk-takes-3d-design-and-documentation-to-next-level-with-autocad-2010/> [dostęp 20.06.2023].
13. <https://novedge.com/blogs/design-news/design-software-history-evolution-of-cad-from-sketchpad-to-pro-engineer-and-beyond> [dostęp 25.06.2023].
14. <https://pl.wikipedia.org/wiki/CATIA> [dostęp 25.06.2023].
15. <https://www.permasteelisagroup.com/project-detail?project=1980> [dostęp 18.06.2023].
16. <http://www.informatykawbudownictwie.pl/aktualnosci/bim-geneza-i-praktyka/> [dostęp 10.06.2023].
17. <https://vavatech.pl/technologie/jezyki-programowania/Python> [dostęp 20.06.2024].
18. <https://www.ovhcloud.com/pl/learn/what-is-javascript/> [dostęp 20.06.2024].
19. <https://vavatech.pl/technologie/jezyki-programowania/ruby> [dostęp 20.06.2024].
20. https://en.wikipedia.org/wiki/Rhinoceros_3D lub <https://rhinoceros.com.pl/informacje-o-produkcji/20/program-do-projektowania-3d-rhino> lub <https://www.rhino3d.com/> [dostęp 13.06.2023].
21. <https://www.rhino3d.com/6/new/grasshopper/> [dostęp 15.05.2024].
22. <http://grasshopperprimer.com/> [dostęp 28.06.2023].
23. <https://www.food4rhino.com/en/app/kangaroo-physics> [dostęp 28.06.2023].
24. <https://eventis.pl/artykul/wszystko-co-warto-wiedziec-o-vba-visual-basic-for-applications-id8> [dostęp 28.06.2023].
25. <https://blog.strefakursow.pl/jezyk-c-czym-jest-i-gdzie-sie-go-uzywa/> [dostęp 28.06.2023].
26. <http://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20as%20Style.htm> [dostęp 01.07.2023r.]
27. <https://en.wikipedia.org/wiki/Parametricism> [dostęp 18.03.2024].
28. https://issuu.com/chidostudiodiseno/docs/ch_dp [dostęp 15.06.2023]
29. <https://www.muratorplus.pl/biznes/firmy-i-ludzie/projektowanie-generatywne-w-architekturze-aa-S26g-3SWJ-ffXv.html> [dostęp 17.07.2023]

30. https://pl.wikipedia.org/wiki/Diagram_Woronoja [dostęp 14.08.2023].
31. <https://grimshaw.global/projects/rail-and-mass-transit/international-terminal-waterloo/> [dostęp 12.05.2023].
32. <https://architectu.pl/artykuly/30-St-Mary-Axe> [dostęp 26.07.2023].
33. https://architektura.info/architektura/polska_i_swiat/zlote_tarasy [dostęp 26.07.2023].
34. <https://parametric-architecture.com/generative-design-and-3d-printing-in-fashion/> [dostęp 20.07.2023].
35. <https://www.designboom.com/design/3d-printed-xyz-shoes-by-earl-stewart/> [dostęp 20.07.2023].
36. <https://www.dezeen.com/2015/09/08/francis-bitonti-3d-printed-gold-plated-mutation-shoes-united-nude-3d-systems/> [dostęp 30.07.2023].
37. <https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/> [dostęp 27.06.2023].
38. <https://www.youtube.com/watch?v=9zpMza7cfjI&t=18s> [dostęp 30.07.2023].
39. <https://www.designboom.com/design/3d-architect-ayoub-ahmad-created-his-car-design-hv-001-using-algorithms-03-15-2022/> [dostęp 30.07.2023].
40. <https://www.studioello.com/coral> [dostęp 30.07.2023].
41. <https://www.youtube.com/watch?v=hI-SduFR7xc> [dostęp 30.07.2023].
42. <https://parametric-architecture.com/louis-vuitton-hosts-marc-fornes-theverymanys-pavilion-nomad-during-milan-design-week-2023/> [dostęp 30.07.2023].
43. <https://botland.com.pl/blog/ciekawe-zastosowania-druku-3d-do-czego-mozna-wykorzystac-drukarke-3d/> [dostęp 01.08.2023].
44. <https://silo.tips/download/techniki-szybkiego-prototypowania-rapid-prototyping> [dostęp 01.08.2023].
45. <https://www.3dfarm.net/history-of-3d-printing> [dostęp 01.08.2023].
46. <https://centrumdruku3d.pl/historia-druku-3d/> [dostęp 01.08.2023].
47. <https://www.cadcrowd.com/blog/a-brief-history-of-3d-printing/> [dostęp 01.08.2023].
48. <https://www.cadcrowd.com/blog/a-brief-history-of-3d-printing/> [dostęp 01.08.2023].
49. <https://ultimaker.com/learn/the-complete-history-of-3d-printing/> [dostęp 01.08.2023].
50. <https://centrumdruku3d.pl/czy-patenty-zabija-druk-3d/> [dostęp 01.08.2023].
51. <https://pl.wikipedia.org/wiki/RepRap> [dostęp 01.08.2023].

52. <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/> [dostęp 01.08.2023].
53. <https://www.3dfarm.net/history-of-3d-printing> [dostęp 11.08.2023].
54. https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/3d-printing-market-1276.html?gclid=CjwKCAjw_aemBhBLEiwAT98FMumieXpF11U2UxIWEAT-5QmVJEM39ZaVgXlTgji24V9ejiXLIBFp8BoCi1gQAvD_BwE [dostęp 05.08.2023].
55. <https://www.polskijubiler.pl/arttykul/497/matrix-w-bizuterii.html?cookies=rodo> [dostęp 07.08.2023].
56. <https://www.rhino3d.com/> [dostęp 05.08.2023].
57. <https://lemondim.com/grasshopper/> [dostęp 05.08.2023].
58. https://botland.com.pl/blog/filamenty-abs-przyklady-zastosowan-i-charakterystyka/?cd=19651600289&ad=148844894107&kd=&gad_source=1&gclid=CjwKCAjw1emzBhB8EiwAHwZZxaSQ_gVUxGhyA1K67Pl57jCw9j_BT6PVEb2hXdjHrpo1b5QCa1xb-BoCIEQQAvD_BwE [dostęp 31.08.2023].
59. <https://discourse.mcneel.com/> [dostęp 05.06.2024].
60. <https://sjp.pwn.pl/slowniki/pier%C5%9Bcione> [dostęp 23.05.2024].
61. <https://3d.edu.pl/podpory-w-druku-3d-wszystko-co-musisz-wiedziec/> [dostęp 10.06.2024r.].
62. <https://sinterit.com/pl/proszki/pa12-smooth/> [dostęp 10.06.2024]
63. <https://sinterit.com/pl/proszki/pa12-industrial/> [dostęp 10.06.2024].
64. <https://sinterit.com/pl/proszki/flexa-performance/> [dostęp 10.06.2024].
65. <https://pl.pons.com/t%C5%82umaczenie/angielski-polski/fusion> [dostęp 12.06.2024 r.].
66. <https://uni-kat.pl/jak-dziala-laser-fiber/> [dostęp 15.06.2024r.].
67. <https://www.oberbichler.xyz/Bowerbird/> [dostęp 12.06.2024r.].
68. <https://dictionary.cambridge.org/pl/dictionary/english-polish/vertex> [dostęp 17.06.2024r.].
69. <https://www.designcoding.net/attractor-basics/> [dostęp 22..06.2024 r.].
70. <https://shapediver.com/3d-configurators> [dostęp 17.06.2024]

Spis ilustracji

1. Il. 1. 1 Rysunki znajdujące się w grocie w Lascaux, Francja. Źródło:
<https://www.techpedia.pl/index.php?str=tp&no=30206>
2. Il. 1. 2 Szkice różnych projektów krzeseł, Erich Dieckman, 1930-31. Źródło:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dieckmann_erich_sitzmoebel-entwicklung_1931.png
3. Il. 1. 3 Dom Handlowy Renoma we Wrocławiu, projekt Maćków Pracownia Projektowa, 2009.
Źródło:http://www.archiconnect.pl/archiconnect_wnetrza_publiczne/184/blask_ikony_modernizmu_dom_handlowy_renoma_we_wroclawiu,101551.html
4. Il. 1. 4 Kenneth Snelson, Struktura, Needle Tower. Źródła: Zygmunt Szparkowski, Podstawy inspiracji architektury, Ruchomy punkt, linia, spirala, Oficyna Wydawnicza Wyższej Szkoły Ekologii i Zarządzania w Warszawie, Warszawa, 2012, s. 84 oraz <http://mathtourist>.
5. Il. 1. 5 Ażur wykorzystany w biżuterii, filigran wielowarstwowy. Źródło:
<https://secretsfromportugal.com/filigree-portuguese-culture/>
6. Il. 1. 6 Model zaprojektowanego przez Antoniego Gaudi kościoła w Colonia Güell.
Źródło: Wystawa w Sagrada Familia muzeum. Zbiory własne.
7. Il. 1. 7 Reprodukacja modelu zaprojektowanego przez Antoniego Gaudi kościół Colonia Güell. Źródło: Wystawa w Sagrada Familia muzeum. Zbiory własne.
8. Il. 1. 8 Projekt kościoła Colonia Güell. Źródło:
<http://www.fabb.cc/publication/digitalread-analogwrite>
9. Il. 1. 9 Frei Otto, Stadion Olimpijski w Monachium. Źródło: <https://sztuka-architektury.pl/article/7953/frei-otto-nagroda-pritzkera-2015>
10. Il. 1. 10 Na wystawie Architektury Parametrycznej, która odbyła się w ramach XII Triennale Mediolańskiego w 1960 roku, zaprezentowano makietę stadionu N zaprojektowanego na podstawie dwunastoelementowego modelu parametrycznego autorstwa Luigiiego Morettiego. Źródło: https://www.researchgate.net/figure/The-plans-for-the-stadium-model-by-Luigi-Moretti-9_fig2_365062544

11. Il. 1. 11 Watergate complex. Źródło: <https://www.archdaily.com/889831/the-architecture-of-washington-dcs-watergate-complex-inside-americas-most-infamous-address>
12. Il. 1. 12 Watergate Complex - widok z balkonu. Źródło: <https://www.archdaily.com/889831/the-architecture-of-washington-dcs-watergate-complex-inside-americas-most-infamous-address>
13. Il. 1. 13 Pierwsze rysunki na urządzeniu SketchPad. Źródło: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sketchpad>
14. Il. 1. 14 Komputer Itak i powstały za jego pomocą rysunek. Źródło: Daniel Davis, <https://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric>
15. Il. 1. 15 Zdjęcie pokazujące model przestrzenny stworzony w programie Pro/ENGINEER z 1988 roku. Źródło: https://www.youtube.com/embed/tY_Gy-EElc0
16. Il. 1. 16 Rzeźba Golden Fish. Projekt Frank Gehry wymodelowany przez Ricka Smitha za pomocą programu CATIA, 1992. Źródło: <https://www.designboom.com/design/dassault-systemes-xgenerative-design-tool-09-17-2020/>
17. Il. 1. 17 Projekt Guggenheim Muzeum wykonany przez Ricka Smitha w programie CATIA. Źródło: <https://achievement.org/achiever/frank-gehry/>
18. Il. 1. 18 Guggenheim Muzeum w Bilbao, projekt Frank Gehry. Źródło: <https://www.guggenheim-bilbao.eus/en/the-building>
19. Il. 1. 19 Organizacja zespołu pracującego przy wykorzystaniu Building Information Modeling (BIM), rys. Piotr Bujak. Źródło: <http://www.informatykawbudownictwie.pl/aktualnosci/bim-geneza-i-praktyka/>
20. Il. 1. 20 Przykład prostego skryptu w programie CATIA. Źródło: <https://www.linkedin.com/pulse/which-editor-catia-scripts-fernando-petre>
21. Il. 1. 21 Zdjęcie przedstawiające stary interfejs MAX/MSP. Źródło [https://www.wikiwand.com/en/Max_\(software\)](https://www.wikiwand.com/en/Max_(software))
22. Il. 1. 22 Zdjęcie przedstawiające pierwszą wersję Explicit History w programie Rhinoceros. Źródło: <https://wiki.mcneel.com/labs/explicithistory/expressionlanguage>
23. Il. 1. 23 Zdjęcie aktualnej wersji wtyczki na której powstały prace w mojej rozprawie doktorskiej. Źródło: zrzut ekranu z programu.

24. Il. 1. 24 Prosta definicja v1 w programie Rhinoceros z nakładką Grasshopper. Źródło: własny zrzut ekranu komputera.
25. Il. 1. 25 Prosta definicja v2 w programie Rhinoceros z nakładką Grasshopper. Źródło: własny zrzut ekranu komputera.
26. Il. 1. 26 Komponent w programie Grasshopper pokazujący w jaki sposób wprowadza się dane wejściowe uzyskując po przetworzeniu odpowiedniej komendy dane wyjściowe. Źródło: <https://www.studiorola.com/wp-content/uploads/2016/08/grass2.png>
27. Il. 1. 27 Guangzhou Opera House w Chinach, Zaha Hadid Architects, 2010. Źródło <https://archello.com/project/guangzhou-opera-house>
28. Il. 1. 28 Wnętrze Guangzhou Opera House w Chinach, Zaha Hadid Architects, 2010. Źródło <https://archello.com/project/guangzhou-opera-house>
29. Il. 1. 29 Hotel Morfeusz w Makao, Zaha Hadid Architects, 2018. Źródło: <https://www.archdaily.com/896433/morpheus-hotel-zaha-hadid-architects>
30. Il. 1. 30 Wnętrze hotelu Morfeusz w Makao, Zaha Hadid Architects, 2018. Źródło: <https://www.zaha-hadid.com/architecture/city-of-dreams-hotel-tower-cotai-macau/>
31. Il. 1. 31 London Aquatics Centre wybudowane na Igrzyskach Olimpijskich w Londynie, Zaha Hadids Architects, 2011. Źródło <https://www.zaha-hadid.com/architecture/london-aquatics-centre0/>
32. Il. 1. 32 Heydar Aliyev Centre. Centrum kultury w Azerbejdżanie, Zaha hadid Architects. Źródło <https://www.zaha-hadid.com/architecture/heydar-aliyev-centre/>
33. Il. 1. 33 Przycisk "bake" (z ang. piec/gotować) w programie Grasshopper służący do generowania końcowej bryły. Źródło: <https://www.studiorola.com/wp-content/uploads/2016/08/grasshopper5.jpg>
34. Il. 1. 34 Obrazowa różnica pomiędzy projektowaniem parametrycznym, a technikami generatywnymi. Źródło: https://cms.viktor.ai/uploads/blog_long_read_Traditional_vs_Parametric_afdef98562.svg
35. Il. 1. 35 Kask ze strukturą Voronoi zaprojektowany przez Zhecheng Xu i Yuefeng Zhou, 2020. Źródło: <https://competition.adesignaward.com/design-image.php?y=2019&design=88697>

36. Il. 1. 36 Stacja Waterloo, projekt Nickolas Grimshaw, Londyn, Wielka Brytania, 1994.
Źródło: <https://grimshaw.global/projects/rail-and-mass-transit/international-terminal-waterloo/>
37. Il. 1. 37 Budynek Swiss Re, Foster+Partners, 2004. Źródło:
<https://architectu.pl/artykuly/30-St-Mary-Axe>
38. Il. 1. 38 Centrum handlowe Złote Tarasy, The Jerde Partnership, 2007. Źródło
<https://www.jerde.com/projects/8093/zlote-tarasy>
39. Il. 1. 39 1.) Galaxy SOHO Mall, Zaha Hadid Architects, Pekin, 2012 Źródło:
<https://aadzign.com/what-is-parametric-design-in-architecture/> 2.) Muzeum Soumaja, Fernanado Romero, Arup, Frank Gehry, Meksyk, 2011. Źródło:
<https://www.modernindenver.com/2017/06/museo-soumaya-fr-ee-mexico-city-1994/> 3.) Beijing National Stadium, Herzog and Meuron, Pekin, 2008. Źródło: <http://www.w-a.pl/aktualnosci.php?artykul=1136> 4.) Beijing National Aquastics Center, PTW Architects, CSCEC, CCDI, Arup, Pekin, 2008. Źródło
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beijing_National_Aquatics_Centre_2016_October.jpg
40. Il. 1. 40 Maski 3D, MHOX design. Źródło: <http://mhoxdesign.com/>
41. Il. 1. 41 Dita Von Teese w sukience projektu Francis Bitonti i Michael Schmidt, 2013.
Źródło: https://www.muzivcesku.cz/adidas-prichazi-3d-tistenymi-botami-konec-ramovek-obuvniku/dita-von-teese_ping/
42. Il. 1. 42 Sukienka Dragolly, Oleg Soroko i Minstev Kirill. Źródło: <https://parametric-architecture.com/generative-design-and-3d-printing-in-fashion/>
43. Il. 1. 43 Buty zaprojektowane przez Earl Stewart. Źródło:
<https://www.designboom.com/design/3d-printed-xyz-shoes-by-earl-stewart/>
44. Il. 1. 44 Buty, Francis Bitonti dla United Nude. Źródło:
<https://www.dezeen.com/tag/francis-bitonti/>
45. Il. 1. 45 Pierścioneł, Francis Bitonti. Źródło:
<https://www.facebook.com/francisbitontistudio>
46. Il. 1. 46 Bizuteria z kolekcji Nervous System. Źródło: <https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/>
47. Il. 1. 47 Instalacja Parametric Space, Zaha Hadid, Kollison Cavi, 2013. Źródło:
<https://www.dezeen.com/2013/07/03/parametric-space-by-zaha-hadid-architects/>

48. Il. 1. 48 Koncept samochodu HV-001, Ayoub Ahmad. Źródło: <https://ayoubahmad.com/>
49. Il. 1. 49 Naczynia ceramiczne, Jimmy Jian & Jack Liu. Źródło: <https://jimmyjian.com/Parametric-Ceramics>
50. Il. 1. 50 Lampa Saragossa, John Mauriello. Źródło: <https://www.studioello.com/coral>
51. Il. 1. 51 Pawilo Nomad, Marc Fornes, 2023. Źródło: <https://parametric-architecture.com/louis-vuitton-hosts-marc-fornes-theverymanys-pavilion-nomad-during-milan-design-week-2023/>
52. Il. 1. 52 „Please Be Seated” , Paul Cockshedge, 2019. Źródło: <https://www.journal-du-design.fr/design/installation-please-be-seated-pour-london-design-festival-2019-par-paul-cockshedge-121323/>
53. Il. 1. 53 Cortex, Jake Evil, 2013. Źródło: <https://newatlas.com/cortex-concept-3d-printed-casts/28123/>
54. Il. 1. 54 Pierwsza drukarka 3D SLA-01, Chuck Hull, 1983. Źródło: <https://3dprint.com/72171/first-3d-printer-chuck-hull/>
55. Il 2. 1 Budownie prostego ażuru z wykorzystaniem morphingu. Źródło: opracowanie własne.
56. Il 2. 2 Wynikowe formy po zmianie parametrów morfowania. Źródło: opracowanie własne.
57. Il 2. 3 Zdjęcia wadliwych realizacja w technologii FDM. Źródło: opracowanie własne
58. Il 2. 4 Nieestetyczny model zrealizowany w technologii FDM. Źródło: opracowanie własne.
59. Il 2. 5 Zdjęcia innych modeli z testowej definicji. Źródło: opracowanie własne.
60. Il 2. 6 Zrzut z ekranu programu przedstawiająca sposób powstania najprostrzej formy z kolekcji Fluidium. Źródło: opracowanie własne.
61. Il 2. 7 Pierwsza podstawowa definicja kolekcji Fluidium. 1.) Stworzenie dwóch okręgów. 2.) Stworzenie 10 punktów na każdym okręgu. 3.) Połączenie punktów w linię. 4.) Nadanie krzywej grubości. Źródło: opracowanie własne.
62. Il 2. 8 Miniatury ukazujące przebudowę bryły podczas zmiany parametrów oraz dodawania komponentów. Źródło: opracowanie własne.
63. Il 2. 9 Ilustracja ukazująca rozbudowę definicji po wykonaniu wszystkich przekształceń do modelu F13. Źródło: opracowanie własne.

64. Il 2. 10 Miniatury modeli F14-F21. Źródło: opracowanie własne.
65. Il 2. 11 Zrzut z ekranu programu Grasshopper pokazujące definicję do modelu F21.
Źródło: opracowanie własne.
66. Il 2. 12 Przykładowa zmiana parametrów generująca chaotyczne formy. Ostatni obiekt to F22. Źródło: opracowanie własne.
67. Il 2. 13 Obiekty o większych gabarytach F22, F24, F25 z przebudowanymi elementami dolnej części. Źródło: opracowanie własne.
68. Il 2. 14 Modele F26, F27, F28, F29, F30 oraz F31 z kolekcji Fluidium. Źródło: opracowanie własne.
69. Il 2. 15 Proces powstawania bransoletki F32. Źródło: opracowanie własne.
70. Il 2. 16 Zestawienie ze sobą modeli F30, F35 oraz F36. Źródło: opracowanie własne.
71. Il 2. 17 Końcowa definicja tworząca naszyjnik F36. Źródło: opracowanie własne.
72. Il 2. 18 1.) Jeden z nieudanych odlewów. 2.) Dodanie większej ilości kanałów dolewowych do głównej formy. 3.) Surowy odlew wraz z kanałami 4.) Odlew po odcięciu kanałów. Źródło: opracowanie własne.
73. Il 2. 19 Zrzut ekranu pierścionka F26 z programu do generowania supportów do drukarki Formlabs w technologii DLP. Kolor niebieski to drukowany model, natomiast kolor szary to wygenerowane supporty. Źródło: opracowanie własne.
74. Il 2. 20 Wadliwe druki oraz charakterystyczne mikro zapadnięcia wyglądające jak dziury w modelu. Źródło: opracowanie własne.
75. Il 2. 21 Jeden z pierwszych testowych modeli wydrukowanych przez firmę Sinterit.
Źródło: opracowanie własne.
76. Il 2. 22 Zrzuty z ekranu przedstawiające ułożenie modeli oraz ich wpływa na czas druku.
Czas druku
77. Il 2. 23 Pierścione F1 – wydruk 3D w technologii SLS.
78. Il 2. 24 Pierścione F2 – wydruk 3D w technologii SLS.
79. Il 2. 25 Pierścione F3 – wydruk 3D w technologii SLS.
80. Il 2. 26 Pierścione F4 – wydruk 3D w technologii SLS.
81. Il 2. 27 Pierścione F5 – wydruk 3D w technologii SLS.
82. Il 2. 28 Pierścione F6 – wydruk 3D w technologii SLS.
83. Il 2. 29 Pierścione F7 – wydruk 3D w technologii SLS.

84. Il 2. 30 Pierścionek F8 – wydruk 3D w technologii SLS.
85. Il 2. 31 Pierścionek F9 – wydruk 3D w technologii SLS.
86. Il 2. 32 Pierścionek F10 – wydruk 3D w technologii SLS.
87. Il 2. 33 Pierścionek F11 – wydruk 3D w technologii SLS.
88. Il 2. 34 Pierścionek F12 – wydruk 3D w technologii SLS.
89. Il 2. 35 Pierścionek F13 – wydruk 3D w technologii SLS.
90. Il 2. 36 Pierścionek F14 – wydruk 3D w technologii SLS.
91. Il 2. 37 Pierścionek F15 – wydruk 3D w technologii SLS.
92. Il 2. 38 Pierścionek F16 – wydruk 3D w technologii SLS.
93. Il 2. 39 Pierścionek F17 – wydruk 3D w technologii SLS.
94. Il 2. 40 Pierścionek F18 – wydruk 3D w technologii SLS.
95. Il 2. 41 Pierścionek F19 – wydruk 3D w technologii SLS.
96. Il 2. 42 Pierścionek F20 – wydruk 3D w technologii SLS.
97. Il 2. 43 Pierścionek F21 – wydruk 3D w technologii SLS.
98. Il 2. 44 Pierścionek F22 – wydruk 3D w technologii SLS.
99. Il 2. 45 Pierścionek F23 – wydruk 3D w technologii SLS.
100. Il 2. 46 Pierścionek F24 – wydruk 3D w technologii SLS.
101. Il 2. 47 Pierścionek F25 – wydruk 3D w technologii SLS.
102. Il 2. 48 Pierścionek F26 – wydruk 3D w technologii SLS.
103. Il 2. 49 Pierścionek F27 – wydruk 3D w technologii SLS.
104. Il 2. 50 Pierścionek F28 – wydruk 3D w technologii SLS.
105. Il 2. 51 Pierścionek F29 – wydruk 3D w technologii SLS.
106. Il 2. 52 Pierścionek F30 – wydruk 3D w technologii SLS.
107. Il 2. 53 Pierścionek F31 – wydruk 3D w technologii SLS.
108. Il 2. 54 Bransoletka F32 – wydruk 3D w technologii SLS.
109. Il 2. 55 Bransoletka F33 – wydruk 3D w technologii SLS.
110. Il 2. 56 Bransoletka F34 – wydruk 3D w technologii SLS.
111. Il 2. 57 Bransoletka F35 – wydruk 3D w technologii SLS.
112. Il 2. 58 Naszyjnik F36 – wydruk 3D w technologii SLS.
113. Il 2. 59 Pierścionek F15 – srebro rodowane. Źródło: opracowanie własne.

114. Il 2. 60 Pierścionek F15 pokazany w różnych połączeniach kolorystycznych. Źródło: opracowanie własne.
115. Il 2. 61 Przykłady zmiany parametrów i jej wpływ na bryłę. Źródło: opracowanie własne.
116. Il 2. 62 Pierwsza definicja z kolekcji Fusion. Źródło: opracowanie własne.
117. Il 2. 63 Wstępne szkice projektowe. Źródło: opracowanie własne.
118. Il 2. 64 Przykładowe bryły bazowe kolekcji Fusion. Źródło: opracowanie własne.
119. Il 2. 65 Zrzut z ekranu komputera obrazujący zaprojektowany model oraz obrysy rozłożone w określonym polu roboczym. Źródło: opracowanie własne.
120. Il 2. 66 Zrzut z ekranu programu Grasshopper pokazująca finalną definicję. Źródło: opracowanie własne.
121. Il 2. 67 Testowe modele wykonane z pleksi. Źródło: opracowanie własne.
122. Il 2. 68 Aluminiowa blacha po testowych cięciach lasera. Źródło: opracowanie własne.
123. Il 2. 69 Jedna z wielu nieudanych prób anodowania aluminium. Źródło: opracowanie własne.
124. Il 2. 70 Zrzuty ekranu interaktywnych modeli z kolekcji Fusion. Modele umieszczone na platformie Autodesk Viewer. Źródło: opracowanie własne.
125. Il 2. 71 Model S1 – aluminium.
126. Il 2. 72 Model S2 – aluminium.
127. Il 2. 73 Model S3 – aluminium.
128. Il 2. 74 Model S4 – aluminium.
129. Il 2. 75 Model S5 – aluminium.
130. Il 2. 76 Model S6 – aluminium.
131. Il 2. 77 Zrzuty ekranu Grasshoppera przedstawiające powstałe chmury punktów o różnym zagęszczeniu w sześciu. 1.) Parametr zagęszczenia ustawiony na 100. 2.) Parametr zagęszczenia ustawiony na 50. 3.) Parametr zagęszczenia ustawiony na 20. Źródło: opracowanie własne.
132. Il 2. 78 Zrzuty ekranu Grasshoppera przedstawiające łącznie punkty za pomocą linii. W każdym z tych przykładów jest taka sama ilość punktów, czyli 50. Zmieniana jest jedynie ilość łączenia się jednego punktu z pozostałymi sąsiadującymi. 1.) Parametr ustawiony na 2. 3.) Parametr ustawiony na 5. 3.) Parametr ustawiony na 10. Źródło: opracowanie własne.

133. Il. 2. 79 Zasada działania attractor'ów. 1.) Powierzchnia punktów bez attractor'ów. 2.) Powierzchnia punktów z jednym centralnym punktowym attractor'em. 3.) Powierzchnia punktów z dwoma attractor'ami. Źródło: opracowanie własne.
134. Il. 2. 80 Zrzuty z ekranu ukazujące różne zmiany parametrów na tej samej bryle bazowej. Źródło: opracowanie własne.
135. Il. 2. 81 Finalna definicja kolekcji Vertex. Źródło: opracowanie własne.
136. Il. 2. 82 Proces druku w technologii dot-on-dot firmy Solidscape. 1.) Nakładanie kropli wosku. 2.) Usuwanie nadmiaru materiału przez frez. 3.) Przykładowy model po wydruku. 4.) Proces usuwania materiału podporowego. 5.) Gotowy model do odlewu. Źródło: <https://lemondim.com/solidscape/>
137. Il. 2. 83 Proces odlewania od projektu po gotowy odlew. 1.) Zaprojektowany model wraz z kanałami dolewowymi. 2.) Wydruku w wosku. 3.) Choinka z odlewami. 4.) Precyzyjne odcinanie odlewów z choinki. 5.) Odcięte odlewy gotowe do dalszej obróbki. Źródło: opracowanie własne.
138. Il. 2. 84 Wydruki z drukarki 3D firmy Formlabs. Część z tych modeli została zabarwiona w celu przetestowania różnych kolorów i sprawdzenia ich wizualnego efektu. Źródło: opracowanie własne.
139. Il. 2. 85 Obrączki V1 - V8 - fotopolimer. Różne wariacje zmiany parametrów.
140. Il. 2. 86 Para obrączek V9 i V10 - żółte złoto 14k, białe i czarne diamenty.
141. Il. 2. 87 Pierścione V11 - fotopolimer.
142. Il. 2. 88 Pierścione V12 - złoto 14K.
143. Il. 2. 89 Pierścione V13 - fotopolimer.
144. Il. 2. 90 Pierścione V14 - srebro złożone.
145. Il. 2. 91 Pierścione V15 - fotopolimer.
146. Il. 2. 92 Pierścione V16 - fotopolimer.
147. Il. 2. 93 Pierścione V17 - fotopolimer.
148. Il. 2. 94 Pierścione V18 - fotopolimer.
149. Il. 2. 95 Pierścione V19 - fotopolimer.
150. Il. 2. 96 Pierścione V20 - srebro, mosiądz złożony.
151. Il. 2. 97 Pierścione V21 - fotopolimer.
152. Il. 2. 98 Pierścione V22 - białe i żółte złoto 14K.

- 153.II. 2. 99 Pierścioneł V23 - srebro, mosiądz złocony.
- 154.II. 2. 100 Pierścioneł V24 - fotopolimer.
- 155.II. 2. 101 Pierścionki V25 i V26 - białe i żółte złoto 14K.
- 156.II. 2. 102 Pierścioneł V27 fotopolimer.
- 157.II. 2. 103 Pierścioneł V28 - srebro, mosiądz złocony.
- 158.II. 2. 104 Pierścioneł V29 - fotopolimer.
- 159.II. 2 105 Pierścioneł V30 - srebro, mosiądz złocony.
- 160.II. 2. 106 Pierścioneł V31 - srebro, mosiądz złocony.
- 161.II. 2. 107 Pierścioneł V32 - białe i żółte złoto 14K.
- 162.II. 2. 108 Bransoletka V33 - fotopolimer.

Załączniki

1. Załącznik 1 - wykaz działań twórczych oraz dorobku artystycznego.
2. Załącznik 2 - wykaz dorobku dydaktycznego oraz działalności organizacyjnej.
3. Załącznik 3 - interaktywne modele z kolekcji *Fusion*.
4. Załącznik 4 – interaktywny model na platformie Shapediver z możliwością konfiguracji online.
5. Film 1 - animacja ukazująca całą kolekcję *Fluidium*.
6. Film 2 - prezentacja wybranych modeli z kolekcji *Fluidium* na dłoni.
7. Film 3 - animacja ukazująca całą kolekcję *Vertex*.