



www.pl2022.pollub.pl
e-mail: pl2022@pollub.pl



Zintegrowany
Program
Rozwoju
Politechniki
Lubelskiej

Biuro Projektu:
ul. Nadbystrzycka 38H
20 -618 Lublin

WSPÓŁCZESNE TECHNIKI PROTOTYPOWANIA

Workbook

Autor: Jarosław Zubrzycki

Lublin, 2021 rok

PROGRAM WIEDZA EDUKACJA ROZWÓJ



Rzeczpospolita
Polska

Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny





Zintegrowany
Program
Rozwoju
Politechniki
Lubelskiej

Biuro Projektu:
ul. Nadbystrzycka 38H
20 -618 Lublin

Spis treści

1. Wprowadzenie	4
2. Rozwój produktu na współczesnym rynku a technologie Rapid Prototyping	5
2.1. Konkurencyjność produktu na globalnym rynku	5
2.2. Fazy rozwoju i funkcjonowania produktu.....	7
2.3. Planowanie techniczne przedsiębiorstwa	9
2.4. Zastosowanie Rapid Prototyping i Rapid Tooling w rozwoju produktu	10
3. Drogi do powstania prototypu funkcjonalnego.....	12
3.1. Projektowanie modelu CAD 3D	13
3.1.1. Oprogramowanie do wykonywania dokumentacji 3d	13
3.1.2. Metoda Reverse Engineering.....	15
3.2. Format *.stl.....	17
3.2.1. Edycja i naprawa plików *.stl.....	18
3.2.2. Orientacja modelu w systemie.....	21
3.2.3. Dodawanie wsporników do modelu	21
3.2.4. Podział na warstwy	22
3.2.5. Konwersja geometrii warstw i generowanie pliku sterującego maszyną	22
3.3. Wytwarzanie poprzez obróbkę ubytkową	23
3.4. Metody Rapid Prototyping	23
3.4.1. Klasyfikacja metod Rapid Prototyping.....	24
3.4.2. Metoda 3D PRINTING	26
3.4.3. Metoda DLF/DLM	29
3.4.4. Metoda FDM	31
3.4.5. Metoda LOM	33
3.4.6. Technologia MJM.....	35
3.4.7. Technologia MM3DP	36
3.4.8. Technologia PolyJET.....	38
3.4.9. Metoda SGC	41
3.4.10. Technologia SLM.....	42
3.4.11. Technologia SLS	44

PROGRAM WIEDZA EDUKACJA ROZWÓJ



Rzeczpospolita
Polska

Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny



3.4.12.	Stereolitografia.....	45
3.5.	Technologie Rapid Tooling	47
3.5.1.	ZCAST DIRECT METAL CASTING.....	48
3.5.2.	Vacuum Casting	49
3.5.3.	Epoxy Tooling	51
3.5.4.	DIRECT AIM	51
3.5.5.	DMLS	52
3.5.6.	Rapid Tool	52
3.5.7.	Metoda Keltool firmy 3DSYSTEMS	53
3.5.8.	Metoda QUICK CAST firmy 3DSYSTEMS	53
3.5.9.	Metoda EP Firmy MCP-HEK.....	54
3.5.10.	Metoda METAL PART CASTING firmy MCP-HEK	55
3.5.11.	Metoda MCP LOW MELTING POINT ALLOYS	56
4.	Komputerowo wspomagane wykonanie prototypu	58
4.1.	Identyfikacja potrzeb.....	59
4.2.	Ustalenie własności eksploatacyjnych	60
4.3.	Kształtowanie i modelowanie produktu.....	61
4.3.1.	Dokumentacja 3D.....	64
4.3.2.	Złożenie modelu i analiza konstrukcji.....	67
4.3.3.	Dokumentacja konstrukcyjna: rysunki wykonawcze 2D	70
4.3.4.	Edycja i manipulacja plików *.stl.....	70
4.4.	Przygotowanie modelu 3D do druku w technologii RP.....	75
4.5.	Wybór metody i wykonanie prototypu.....	78
4.6.	Analiza wykonania modelu fizycznego korektora w procesie POLYJET	80
5.	Podsumowanie	82



1. Wprowadzenie

Zastosowanie metod Rapid Prototyping (RP) jest powszechne. Technologie te po ponad dwudziestu latach rozwoju stały się nieodzownym elementem procesu konstrukcyjnego, ponieważ pozwoliły skrócić czas opracowywania innowacyjnych rozwiązań.

Technologia RP jest metodą addytywnego budowania elementów. Oznacza to, że przedmioty budowane są punkt po punkcie, warstwa po warstwie, aż do powstania całego modelu. Pierwszy raz ten sposób budowania modelu zastosowano w latach 80-tych XX w.. Wtedy to promień lasera utwardzał kolejne warstwy żywicy. Metoda ta nazwana została Stereolitografią. Od tamtego czasu opracowano kilkanaście metod wytwarzania addytywnego modeli z użyciem różnych materiałów. Od polimerów przez ceramikę do metali. Z tego powodu technologie RP znalazły zastosowanie w takich dziedzinach przemysłu jak: medycyna, sprzęt AGD, sprzęt RTV, przemysł samochodowy, lotniczy i komputerowy.

Technologie RP zdobyły swą pozycję ze względu na dużą oszczędność środków finansowych i czasu podczas opracowywania produktu. Wykonując prototypy w tych technologiach inżynier ma bezpośredni kontakt z tworzonym produktem na każdym etapie projektowania, co pozwala na uniknięcie wielu błędów konstrukcji.

Technologia RP ewoluowała z metody Rapid Tooling (RT), które stały się ich uzupełnieniem. Metody RT korzystając z modeli wykonanych w technologiach RP umożliwiają produkcję krótkich serii elementów.

W obydwu technologiach wykorzystywane są techniki komputerowe CAD, CAE. Mają one na celu wesprzeć działania projektantów i skrócić jeszcze bardziej czas opracowywania nowych konstrukcji. Technika komputerową wspomagającą prace inżynierów jest wirtualne prototypowanie. Proces wirtualnego prototypowania składa się z szeregu etapów komputerowej weryfikacji rozwiązania technicznego.

Metodą związaną ściśle z technikami RP i RT jest Reverse Engineering (RE), Technika inżynierii odwrotnej pozwala na digitalizowanie (zamianę na dane cyfrowe), powierzchni brył o bardzo skomplikowanych kształtach. Najpierw budowany jest model z materiałów łatwo formowalnych a następnie

PROGRAM WIEDZA EDUKACJA ROZWÓJ



Rzeczpospolita
Polska

Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny





skanowany. Do tego procesu używane są różnego rodzaju narzędzia skanujące (np. skanery 3D).

2. Rozwój produktu na współczesnym rynku a technologie Rapid Prototyping

2.1. Konkurencyjność produktu na globalnym rynku

Na globalnym rynku przedsiębiorstwa działają według określonych reguł. Celem każdego przedsiębiorstwa na rynku jest posiadanie jak największej ilości produktów, na które jest aktualnie popyt. W dalszej kolejności jest jakość produktów oraz elastyczność dostosowania się do potrzeb rynku, zwłaszcza pojawienia się produktu na rynku, organizacja procesów wytwórczych. „Zjawisko globalizacji gospodarki sprzyja także równowadze poziomu popytu i podaży wytwarzanych produktów rynkowych, stwarzając tym samym coraz ostrzejsze warunki konkurencji”. Determinuje to wprowadzanie jeszcze krótszych cykli rozwoju produktów i procesów ich produkcji w celu zmniejszenia kosztów. Skrócenie tych czasów jest możliwe poprzez: minimalizację stanów zapasów, sprawną logistykę, oraz przez stosowanie w produkcji efektywnych i innowacyjnych koncepcji realizacyjnych w rodzaju *Lean Production*, *Just in Time*, *TQM*, *Virtual Factory* itp. [3].

Globalizacja gospodarki rynkowej wywiera zasadniczy wpływ na rozwój innowacyjnych technologii. Które to generują dużą część zysków w obecnym stanie gospodarki. A co za tym idzie wpływa na techniczny poziom przedsiębiorstw, czyli na używane w nim maszyny i urządzenia produkcyjne oraz na sposoby pracy zatrudnianej kadry inżynierskiej. Toteż, innowacyjność technologii produkcyjnych i innowacyjność technik pracy stała się najważniejszym czynnikiem rozwoju przedsiębiorstw produkcyjnych na globalnym rynku.

Cykl życia wyrobów przemysłu elektromaszynowego, głównie samochodów, ocenia się na pięć do siedmiu lat, artykułów gospodarstwa domowego - na pięć lat, elektroniki domowej - na trzy do pięciu lat, a komputerów - nawet na dwa lata. W ten sposób, poprzez dużą podaż nowoczesnych i innowacyjnych, a zarazem coraz to tańszych produktów, rozwija się spiralę podaży i popytu, co z kolei dalej skraca cykl życia produktu. Rozwijane są technologie maszyn produkcyjnych oraz narzędzi i metod wspomagających

PROGRAM WIEDZA EDUKACJA ROZWÓJ



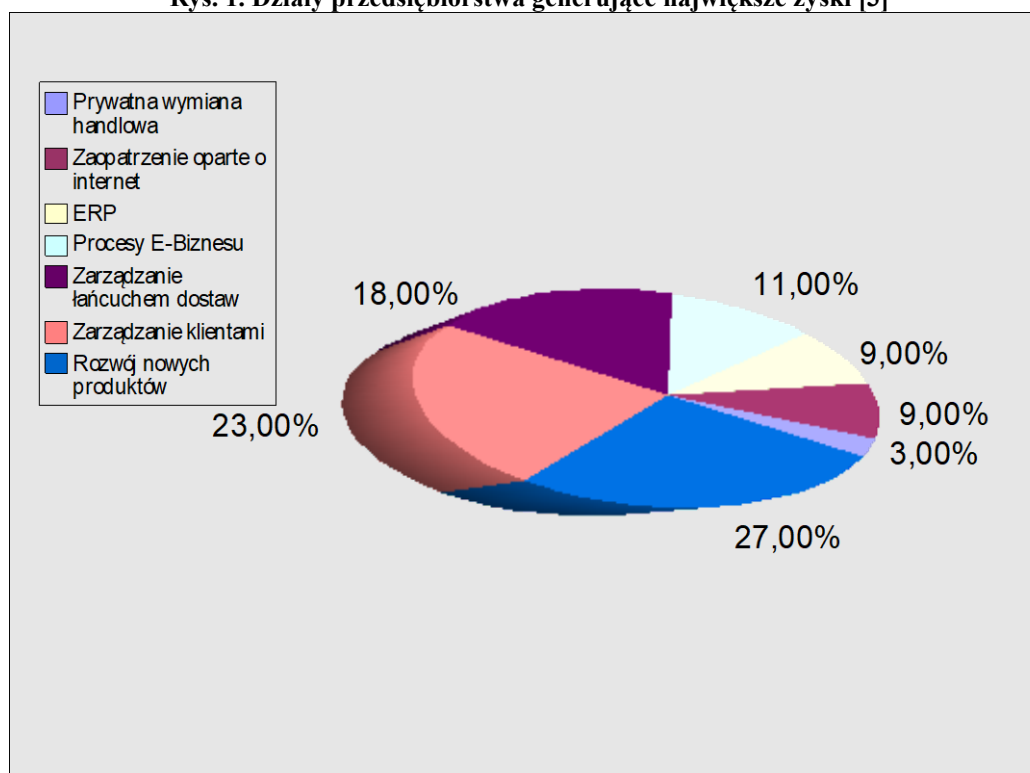
Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny



prace inżynierskie takie jak projektowanie i wdrażanie do produkcji [4]. Na przestrzeni czasu innowacyjne strategie produkcji i organizacji przynoszą więcej niż 68% efektywnej dostępności do rynku [3].

Ogólnie przyjmuje się za innowacyjne takie produkty i procesy, których wiek nie przekracza dwóch lat. Jest to, zatem wymagający i ciągły proces wynalazczy, rozwojowy i wdrożeniowy. W dużych koncernach jest to ciągły rozwój własnych produktów, technologii i procesów produkcyjnych.

Rys. 1. Działy przedsiębiorstwa generujące największe zyski [3]



Według H. Shultza innowacyjne technologie kreują najważniejsze wskaźniki konkurencyjnej produkcji, a mianowicie [3]:

- redukcję kosztów - do 70%,
- poprawę jakości - do 25%,
- wzrost elastyczności produkcji - do 89,5%,
- innowacyjność produktu - do 100%,



- innowacyjność technologii - do 70,6%,
- poszerzenie produktywności i palety produktów - do 64,7%,
- poprawę wpływu zewnętrznych wskaźników gospodarczych - do 44,4%,
- przenikanie na międzynarodowym rynku - do 58,8% [3].

Z kolei, spośród najważniejszych faz wdrażania innowacyjnych procesów, za najważniejsze należy uznać:

- właściwą ocenę pomysłu (innowacyjnej idei) - 14% powodzenia zamierzeń,
- generowanie pomysłów - ok. 28% powodzenia,
- realizacja projektu innowacyjnego - 36% powodzenia oraz
- aplikacja i wdrożenie rynkowe – 34%.

2.2. Fazy rozwoju i funkcjonowania produktu

Cykl życia wyrobów przemysłu elektromaszynowego, głównie samochodów, ocenia się na pięć do siedmiu lat, artykułów gospodarstwa domowego - na pięć lat, elektroniki domowej - na trzy do pięciu lat, a komputerów - nawet na dwa lata. W ten sposób, poprzez dużą podaż nowoczesnych i innowacyjnych, a zarazem coraz to tańszych produktów, rozwija się spiralę podaży i popytu, co z kolei dalej skraca cykl życia produktu [5].

Zagadnienie metodologicznego opisu cyklu życia produktu można sprowadzić do kilku istotnych aspektów:

- projektowania marketingowego, ujmującego najważniejsze cechy przyszłego produktu, które będą podstawą badań marketingowych, definiujących przy współudziale klienta jego cechy funkcjonalne,
- projektowania konstrukcyjnego, obejmującego nadawanie funkcji i postaci konstrukcyjnej nowego wyrobu, ze szczególnym uwzględnieniem kształtowania geometryczno-materiałowego,
- projektowania technologicznego, mającego na celu opis realizowanych procesów technologicznych wraz z parametrami i niezbędnymi procesami pomocniczymi,
- planowania procesów wytwarzania, z uwzględnieniem planowania normatywnego niezbędnych

PROGRAM WIEDZA EDUKACJA ROZWÓJ



zasobów oraz terminów realizacji zleceń i zabezpieczenia infrastruktury produkcyjnej.

Powyższe fazy rozwoju produktu nazywane są w nomenklaturze inżynierskiej (z wyjątkiem projektowania marketingowego) - technicznym przygotowaniem produkcji. Charakteryzują się one tym, że w trakcie inżynierskich działań projektowo-planistycznych przetwarzaniu podlegają modele geometryczne oraz informacje i dane do nich adekwatne. Na tym etapie mamy gotową dokumentację produkcyjną i na jej podstawie należy podjąć decyzję o sposobie wytwarzania: własnymi środkami produkcji, zlecić kooperantom czy stworzyć usługę outsourcingową [3].

Przebieg cyklu życia produktu można przedstawić w następujący sposób:

a) Analiza i przygotowanie marketingowe.

- Identyfikacja bieżących potrzeb rynku.
- Określenie kierunku rozwoju potrzeby.
- Biznesplan, czyli założenia ekonomiczne.
- Założenia konstrukcyjne.

b) Projektowanie obiektu technicznego.

- Określenie parametrów funkcjonalności.
- Pierwsze projekty koncepcyjne- wykonanie pierwszego prototypu.
- Określenie wymagań materiałowych dla konstrukcji.
- Modelowanie bryłowe
- Wygenerowanie dokumentacji konstrukcyjnej.
- Wykonanie prototypu funkcjonalnego.
- Badania parametrów funkcjonalnych a w określonych przypadkach i wytrzymałościowych.
- Ewentualne zmiany dokumentacji konstrukcyjnej i ponowne badania prototypu.

c) Przygotowanie produkcji i produkcja.

- Projekt technologiczny.
- Planowanie stanowisk, narzędzi, maszyn.
- Projekt zarządzania produkcją.

PROGRAM WIEDZA EDUKACJA ROZWÓJ





- Sterowanie procesami produkcji
- d) Dystrybucja.
- Sprzedaż
 - Serwis.
 - Recycling.

2.3. Planowanie techniczne przedsiębiorstwa

W gospodarce rynkowej zakłady produkcyjne największą wagę przykładają do finalnej ceny produktu. Pod uwagę brana jest nie tylko wartość samego elementu, ale także jego serwisowanie i eksploatacja. W celu uzyskania kompleksowej analizy rynkowej na ten temat zbierane są opinie nie tylko przyszłych użytkowników, ale także: inwestorów dystrybutorów i serwisantów. Zwłaszcza, gdy planowane jest wypuszczenie na rynek całkiem nowego rozwiązania [4].

Ciągły wzrost technologii powoduje rozwój innowacyjnych metod funkcjonowania przedsiębiorstwa. Optymalizacja procesu konstrukcyjnego i produkcyjnego jest priorytetem. Ma ona na celu skrócenie faz w cyklu rozwoju produktu. Producenci są ukierunkowywani na nowoczesne technologie informatyczne wspomagające wszystkie działy produkcji. Wdrażane są moduły systemu CAx. Terminem tym określamy systemy informatyczne, na które składa się zespół współpracujących aplikacji. Wspomagają one znaczną ilość działań w przedsiębiorstwie. Wspomaganie to może obejmować wszystkie lub część szczebli. System ten zwykle obejmuje następujące obszary: moduł CAD-wspomagający prace konstrukcyjne i generujący dokumentację konstrukcyjną, moduł CAP- obejmujący programowanie CNC a także planowanie obróbki i montażu, moduł CAM- pozwalający programować obrabiarki, roboty, systemy pomiarowe i transportowe, moduł CAQ- określanie parametrów jakości poprzez pomiary i statystykę, ERP - magazynowanie, planowanie produkcji, zaopatrzenie, finanse, zarządzanie zasobami ludzkimi (płace, kadry). Główną cechą tego systemu jest gromadzenie i przetwarzanie danych oraz szybkie przekazywanie ich do innych działów[67]. Istnieje jeszcze metoda CPM - Metoda Ścieżki Krytycznej (z ang. Critical Path Method) to jedna z metod stosowanych w zarządzaniu projektami. Utworzona została w roku 1958 w amerykańskiej

PROGRAM WIEDZA EDUKACJA ROZWÓJ





firmie chemicznej DuPont, w celu usprawnienia procesów produkcji. Metoda ta pozwala na graficzną prezentację kolejnych czynności wykonywanych w ramach projektu, z zaznaczeniem szacowanego czasu trwania tych czynności, oraz z zachowaniem ich sekwencji. Metodę tą stosujemy wtedy, gdy znane są czasy trwania poszczególnych czynności. Ścieżka krytyczna będąca najdłuższą sekwencją czynności niezbędnych do wykonania projektu, wyznacza jednocześnie najkrótszy czas realizacji projektu. Składa się z czynności krytycznych, w przypadku realizacji których nie mamy żadnego zapasu czasu.

Systemy informatyczne sukcesywnie skracają czas powstawania produktu i jego produkcji, jednocześnie obniżając koszty przedsiębiorstwa. Należy jednak zwrócić uwagę na park maszynowy z naciskiem na wczesny okres rozwoju produktu, czyli na wykonywanie prototypu i serii próbnych. W 1986 roku pojawiło się pojęcie Rapid Prototyping, które w niedługim czasie wyewoluowało do metod Rapid Tooling.

2.4. Zastosowanie Rapid Prototyping i Rapid Tooling w rozwoju produktu

Prototyp jest pierwszą materialną wizualizacją rozwijanego wyrobu i jest niezbędny w procesie opracowywania produktu. Umożliwia on określenie funkcjonalności i ergonomii już we wczesnym etapie procesu. Wykonywanie prototypów zajmuje jednak zbyt wiele czasu i pochłania zbyt wiele środków. Więc bardzo często firma nie dysponuje prototypem w każdej sytuacji, gdy jest on potrzebny.

Współczesna gospodarka staje coraz bardziej przed wyzwaniem globalizacji rynków oraz przyspieszeniem rozwoju technologicznego, połączonym z rosnącą złożonością wyrobów. Przedsiębiorstwa są zmuszone do coraz szybszego wdrażania nowych innowacji. Bez możliwości szybszego wytwarzania prototypów było to niemożliwe. Na tym tle w końcu lat osiemdziesiątych zaczęły rozwijać się nowe, rewolucyjne struktury uruchamiania produkcji nowego wyrobu. Wśród nich należy wymienić Concurrent Engineering (projektowanie współbieżne wyrobów), Rapid Prototyping (szybkie wykonywanie prototypów) oraz scalające a następnie Rapid Tooling (szybkie wytwarzanie narzędzi) [14].

Technologie RP z sekwencyjnym nanoszeniem warstw materiału – pozwoliły na wytwarzanie bezpośrednio z modeli CAD-3D skomplikowanych geometrycznie fizycznych produktów



w jednostopniowym procesie (bez potrzeby stosowania przyrządów czy specjalnych narzędzi). Największe oszczędności technologia RP przynosi przy jednostkowej lub małoseryjnej produkcji elementów o bardzo skomplikowanych kształtach. Oszczędności rosną wprost proporcjonalnie do złożoności bryły modelu. Najważniejszą zaletą RP jest znaczna oszczędność czasu. W zakresie wzornictwa przemysłowego jest to już technologia, której nie da się wyłączyć z łańcucha prac badawczych.

Największą wadą metod RP jest nadal niewystarczająca wytrzymałość elementów, a także raczej słaba jakość powierzchni, która wynika z warstwowego sposobu nakładania/utwardzania materiału. Mimo tych wad liczba użytkowanych na świecie RP-urządzeń czy systemów stale wzrasta. Metody RP zostały początkowo zaprojektowane dla przemysłu samochodowego. W obecnym czasie wydruki 3D stały się tańsze a dostęp do nich uzyskało szersze grono przedsiębiorstw [15].

Po nadejściu ery RP zaczęto opracowywać schematy działań, które można byłoby używać w szerszym zakresie podczas badań projektowych, a także w samym procesie produkcyjnym. Technolodzy rozwinęli technologię RP dla intensyfikacji procesów produkcyjnych do technologii Rapid Tooling i Rapid Manufacturing. W technologii Rapid Tooling stosuje się metody Rapid Prototyping do szybkiego wykonywania narzędzi i form wykorzystywanych w produkcji części prototypowych i przedseryjnych a także do wykonywania niewielkich serii. Możliwe jest też użycie metody RT do wyprodukowania formy mogącej wykonać kilkadziesiąt tysięcy ostatecznych produktów. Metody RT stanowią, więc kolejny stopień ewolucji metod RP. Różnią się tym od metod RP, że dane CAD obejmują nie tylko pozytywową geometrię wyrobu, ale również uwzględniają informacje dotyczące nadlewów, pochyłości odlewniczych, odformowalności, podziału form, tolerancji, skurczów itp. [13].

Zasadniczym celem zastosowań metod RP i RT jest modelowanie fizyczne na podstawie modelu komputerowego 3D oraz budowa form i narzędzi w technologiach przetwórstwa tworzyw wielkocząsteczkowych, odlewniczych i obróbki plastycznej, a także w mechanice precyzyjnej i w medycynie [4].

Typowymi obszarami zastosowania technik RP/RT/RE są:

- Studia projektowe i ergonomiczne,

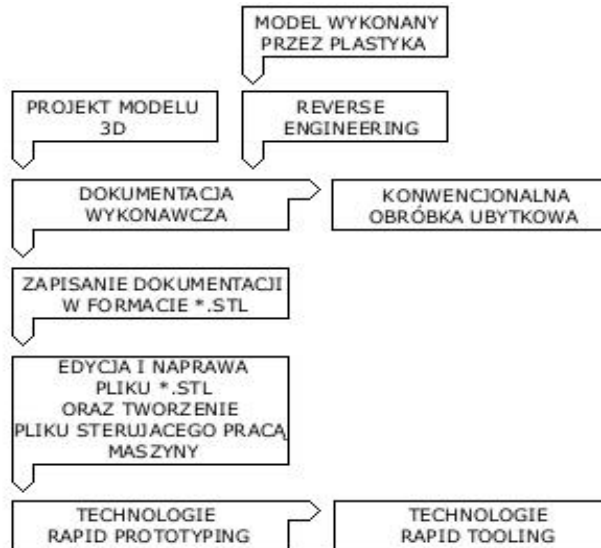
- Badania i ocena rozwiązań konstrukcyjnych na bazie modeli fizycznych oraz
- Metod, badawczych z zakresu elastooptyki, termowizji, rentgenografii, modelowania przepływów itp.,
- Analiza i ocena procesów wytwarzania, a zwłaszcza montażu,
- Badanie i modelowanie przepływów formowania tworzyw,
- Badanie i ocena marketingowa nowych produktów,
- Wielofunkcyjne modele stosowane w odlewnictwie i obróbce plastycznej,
- Modelowanie i wytwarzanie implantów kostnych oraz miękkich w medycynie.

Procesy kształtowania modeli metodami RP/RT/RE mimo tego, że uchodzą za powolne i dlatego nie są stosowane w produkcji masowej, to są jednak efektywne w produkcji jednostkowej i małoseryjnej. Dzięki zastosowaniu tych metod można znacznie skrócić cykl rozwojowy produktu, a także zmniejszyć nakłady na jego opracowanie i wdrożenie do produkcji. Możliwość wytwarzania przedmiotów bez stosowania specjalnego oprzyrządowania, tzn. narzędzi, form lub matryc, stała się niewątpliwie decydującym czynnikiem wzrostu zainteresowania tymi metodami. Inną przyczyną rozwoju i zastosowań tych technik jest łatwość automatyzacji.

Dzięki zastosowaniu zasady addytywnego tworzenia przedmiotu w procesach RP/RT można wyeliminować większość problemów występujących w tradycyjnych procesach wytwarzania.

3. Drogi do powstania prototypu funkcjonalnego

W poprzednim rozdziale opisano cel stosowania technologii RP a także cykl życia produktu od momentu powstania koncepcji do sprzedaży. Jedną z faz tego cyklu jest faza projektowo-konstrukcyjna. Polega ona na przejściu od założeń konstrukcyjnych i eksploatacyjnych do zbadania tych założeń na jednostkowym egzemplarzu produktu (prototypie). Wykorzystywane są w tym celu metody modelowania matematycznego i fizycznego oraz badania empiryczne. Do metod modelowania matematycznego zaliczane są programy CAD i CAE natomiast do metod modelowania fizycznego technologie Rapid Prototyping i Rapid Tooling.



Rys 2. Ogólny schemat procesu wytworzenia prototypu

3.1. Projektowanie modelu CAD 3D

3.1.1. Oprogramowanie do wykonywania dokumentacji 3d

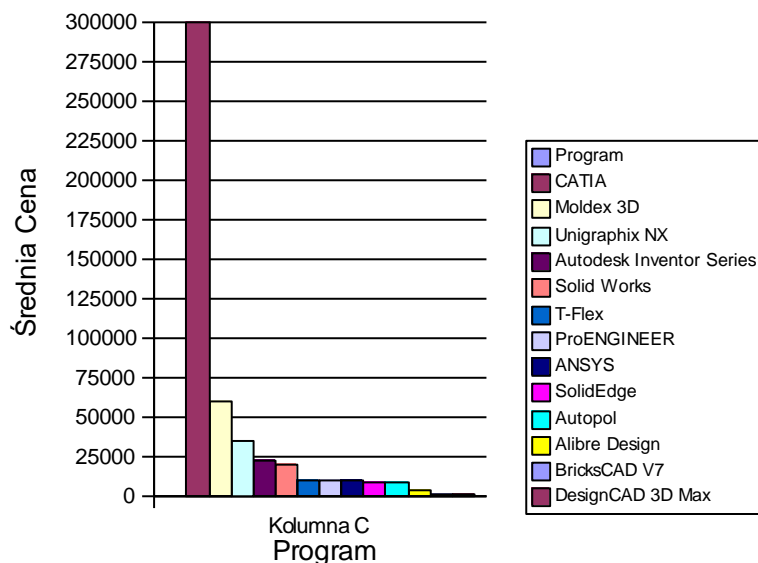
Mówiąc o innowacyjnych technologiach nie możemy zapomnieć o wciąż rozwijającym się rynku oprogramowania wspierającego pracę inżyniera. Oprogramowanie wspomagające projektowanie (CAD) pozwala zaprojektować różne konstrukcje. Wykorzystanie przez inżyniera systemów CAD umożliwia:

- Skrócenie czasu przygotowania projektów
- Zmniejszenie liczby błędów w czasie projektowania
- Skrócenie czasu wprowadzenia wyrobów na rynek i podniesienie ich jakości.

Jednym z najpotężniejszych i najdroższych zintegrowanych systemów CAD/CAM/CAE/FEM jest CATIA firmy Dassault Systemes. System powstał w latach 70. XX wieku pod nazwą CATI i był jednym z pierwszych programów tego typu. Drugim potężnym programem jest Unigraphics firmy UGS [63]. Obydwa systemy są jednocześnie najdroższymi i z tego względu używane przez wielkie korporacje. Związane są głównie z przemysłem lotniczym. Ale są również używane do wspomagania prac inżynierskich

w przemyśle lotniczym, samochodowym, stoczniovym, maszynowym, sprzętu AGD, energetycznym, produkcji form wtryskowych i wielu innych. Są to programy z najwyższej półki wybierane przez największe firmy takie jak: Toyota, Volvo, Nissan, DaimlerChrysler, Airbus, Lockheed Martin, Pratt & Whitney Kanada (branża lotnicza) [23].

Ale oprócz drogich programów renomowanych producentów na rynku jest wiele produktów mniej zaawansowanych, SolidWorks, SolidEdge, ProEngineer, pakiet Inventor (Autocad). To programy z półki środkowej i najpowszechniej wybierane rozwiązania 3D CAD. Istnieją także programy napisane z myślą o zastosowaniach w konkretnych firmach. Są np. programy takie jak pakiet ArtCAM pozwalające projektować prace grawerskie oraz wykonywać reliefy (także artystyczne).



Rys 3. Konkurencyjność cenowa programów 3D dostępnych na rynku [19].

Cena CATI V5 jest bardzo dużym przybliżeniem, natomiast inne ceny są uśrednioną wartością cen polskich dystrybutorów. Wszystkie ceny są to ceny nieuwzględniające ilości modułów, które wersja zawiera. Więc część programów jest w wersji minimum.



„Obecne możliwości oprogramowania 3D są ograniczone tylko wyobraźnią projektanta. - Możliwość weryfikacji już na etapie modelu wirtualnego wielu rozwiązań, projektowanie szybsze i wyższej jakości, a w efekcie krótszy czas od projektu do produkcji, to zalety projektowania w trzech wymiarach - podkreślają specjaliści firmy Autodesk.”[23]

3.1.2. Metoda Reverse Engineering

Innowacyjność produktów rynkowych polega na nowoczesności rozwiązań technicznych, prostocie obsługi, zwiększeniu możliwości w porównaniu do wyrobu tej samej klasy, który był dostępny na rynku wcześniej. Jednak, aby zaspokoić jak największą grupę klientów należy również zwrócić uwagę na gusta klientów i modę. Bowiem bardzo częstym kryterium wyboru produktu jest jego design, który musi być estetyczny i praktyczny, a w większości przypadków nowoczesny i nadążający za obecnymi trendami. Badań marketingowe umożliwiają dotarcie dużego kręgu przyszłych użytkowników produktu, o bardzo różnych preferencjach. Producent, aby dostosować swój produkt do wymagań jak największej grupy klientów powierza stworzenie pierwszego modelu wizualnego zazwyczaj artyście plastykowi. Ten pierwszy egzemplarz powstaje z materiałów łatwo formowalnych takich jak: modelina, gips lub podobne tworzywa. Rozwiązanie, które proponuje ów stylistę musi posiadać niekonwencjonalne (oryginalne) rozwiązanie zewnętrzne i estetyczne [3]. Taki model, aby mógł zostać wdrożony do produkcji trzeba zapisać jako dokumentację techniczną. Musi ona umożliwiać dalsze przetwarzanie informacji dotyczących wyglądu i dostosowanie jej do potrzeb projektu. Zważając na duże użycie technik CAx w produkcji, najlepszą wersją dokumentacji jest dokumentacja cyfrowa. Model taki jest więc poddawany digitalizacji. „Czyli cyfrowy zapis przestrzennej i geometrycznej formy modelu w postaci współrzędnych punktów, na których można „rozpiąć” powierzchnię swobodną, w pełni oddającą formę pierwowzoru”.

Najpierw powstaje poglądowy (jeszcze nie funkcjonalny) model fizyczny, a na jego podstawie tworzy się dopiero dokumentację techniczną. Stąd bierze się nazwa inżynierii odwrotnej (reverse engineering).

Digitalizację tę możemy przeprowadzić na wiele sposobów. Schemat takiego działania składa się z dwóch części jest to skanowanie obiektu chmury punktów za pomocą urządzenia skanującego, a następnie

przetworzenie tych punktów na dane przestrzenne przez system CAD-3D. Digitalizować powierzchnie swobodne można metodami dotykowymi, z pomocą współrzędnościowych maszyn pomiarowych, lub metodami bezdotykowymi takimi jak skanery laserowe czy tomografy.



Rys. 4. Widok pracującego Zscannera 700, na zdjęciu widoczna siatka markerów na przedmiocie i zrzut ekranu programu skanującego [36]

Metoda reverse engineering jest wciąż rozwijana o nowe technologie. Na rysunku powyżej pierwszy samopoziomujący się ręczny skaner 3D Zscannner 700 firmy Zcorporation. Jest on urządzeniem plug-and-play, który daje możliwość zapisu skanowanego modelu w czasie rzeczywistym. Podstawowe dane techniczne tego skanera to

Waga:	980 gram
Wymiary:	160 x 260 x 210 mm
Pomiar:	18 000 pomiarów/s
Klasa lasera:	II (bezpieczny dla oczu)
Rozdzielczość w osi z:	0,1 mm
Dokładność:	do 0,05 mm
ISO:	20 μm + 0,2 L/1000

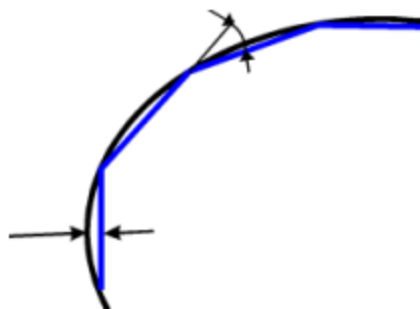
Największą jego zaletą jest to, iż jest skanerem ręcznym o stosunkowo niewielkiej masie. Dzięki konstrukcji i mobilności, uzyskuje możliwość skanowania niedostępnych dla stacjonarnych skanerów przestrzeni. Niedogodnością jest nanoszenie markerów na powierzchnię przedmiotu [36].

Wynikiem takiego skanowania (digitalizacji) jest plik zawierający współrzędne odpowiadające poszczególnym punktom, które następnie należy, z pomocą odpowiedniego programu, przetworzyć do postaci powierzchni lub bryły przetwarzanej w środowisku systemów CAD-3D

3.2. Format *.stl

Mamy już dane konstrukcyjne w postaci modelu bryłowego CAD-3D. Następnym etapem jest transformacja danych do układu warstw, zawierających kontury modelu. Dzięki tym danym możemy sterować maszyną wykonującą prototyp.

W tym celu transformuje się dane z modeli przestrzennych 3D-CAD na model, którego powierzchnia odwzorowana jest siatką trójkątów. Technologią tą opracowała firma 3D Systems i nazwano STL, ponieważ dedykowana była wówczas do systemu Stereolitografii. Po pewnym jednak czasie została przystosowana do innych metod Rapid Prototyping.



Rys. 5. Zakładane odchyłki przy formacie STL.

Cechą takiej transformacji jest zamiana zarysów krzywizn (linii) ścianek, przez cięciwy będące bokami trójkątnych płatów. Podczas zapisywania zarysu określana jest odległość między jego krzywizną, a cięciwą (rys. 5) a także kąt między bokami trójkątów. Od tych wartości zależy ilość trójkątów opisujących

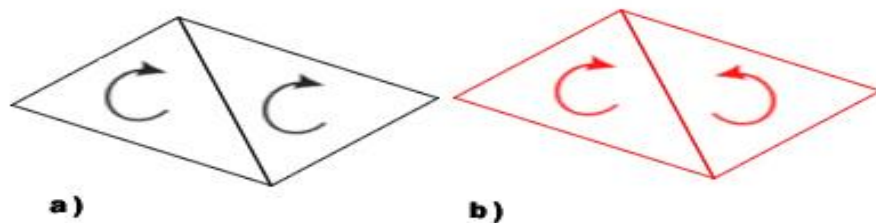
model co determinuje również wielkość pliku z danymi[53]. Dlatego plik STL jest odzwierciedleniem obiektu 3D lub tylko jego przybliżeniem.

Proces zapisu modelu za pomocą trójkątów nosi nazwę teselacji. W jej wyniku w pliku *.stl zapisywane są współrzędne x,y,z każdego z wierzchołków trójkąta. Wielkości te są w globalnym układzie współrzędnych kartezjańskich. Dane te mogą zostać zapisane na dwa sposoby w postaci binarnej lub w postaci kodu ASCII. Druga metoda z racji wydajności jest częściej wykorzystywana [3]. W pliku takim zapisywane są współrzędne wierzchołków i składowe wektora normalnego określające orientację ścianki. Uzyskuje się tym samym model zapisany w formacie STL.

3.2.1. Edycja i naprawa plików *.stl

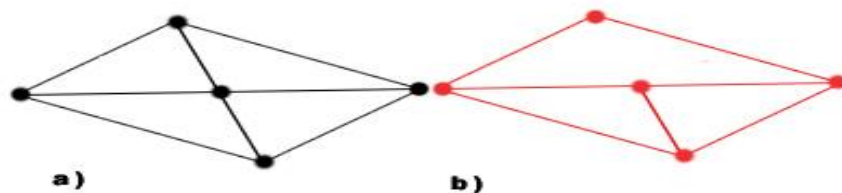
Po stworzeniu pliku *.STL następuje proces przygotowania procesu technologicznego. Dane zawarte w pliku STL muszą być zweryfikowane pod względem dokładności, ponieważ błędy mogą doprowadzić do niewłaściwego wytworzenia prototypu [53]. Najczęstszymi błędami są:

- przeciwne kierunki wektorów normalnych przy opisie płatów trójkątnych (rys. 6),



Rys. 6. Kierunki wektorów normalnych przy opisie płatów trójkątnych prawidłowe (a) i błędne (b)

- przypisanie krawędzi do więcej niż jednego trójkąta (rys. 7),



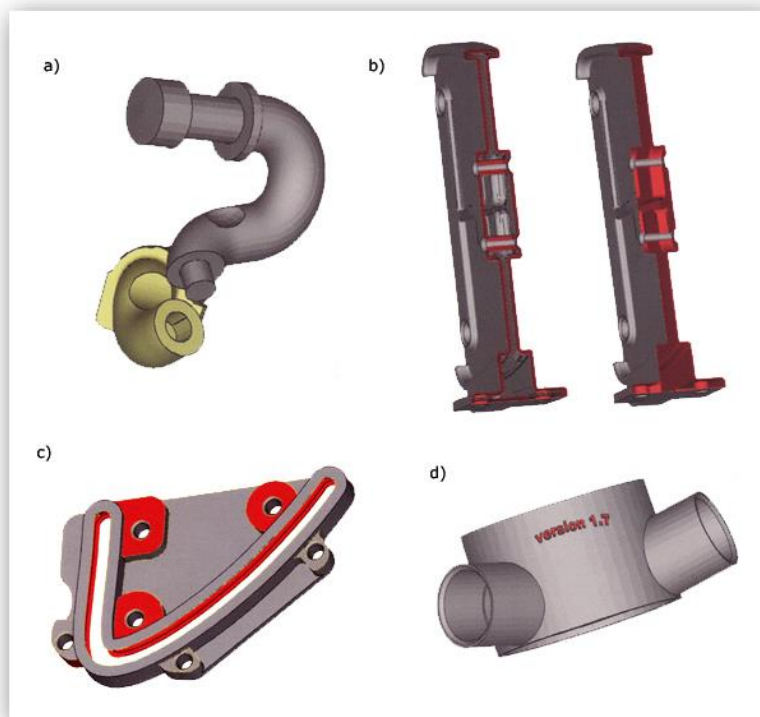
Rys. 7. Przypisywanie krawędzi do trójkątów prawidłowe (a) i błędne (b)

- szczeliny i luki geometryczne pomiędzy płatkami modelu (rys. 8)



Rys. 8. Szczeliny i luki geometryczne pomiędzy płatkami modelu [53].

Błędy wykrywane są przez programy, które edytują i przygotowują pliki *.stl do procesu wytwarzania prototypu. Z reguły są one wyposażone w algorytmy pozwalające automatycznie lub manualnie naprawiać te błędy. W przypadku produktów firmy 3D Systems do maszyn realizujących procesy rp dodawane są programy Maestro i 3D Lightyear. Potężnym programem jest też Magics firmy Materialise software. Pozwala on na import danych bezpośrednio z plików IGES, VDA, STEP, Unigraphics, Pro/E and Catia (V4.5x and V5) oraz oczywiście STL. Po wyedytowaniu w nim pliku *.STL w bardzo przejrzysty sposób widać wszystkie defekty dzięki zmianie koloru obszaru [6].



Rys. 9. Wizualizacja możliwości programu Magics, dzielenie modelu (a), wydrążanie modelu (b), wykrywanie i naprawa błędów (c), labelling (d) [6]

Oprogramowanie Magics umożliwia:

- Przeprowadzić szybką automatyczną korektę błędów, a także przeprowadzić podstawowe operacje modyfikujące model CAD (w podobny sposób jak w programach CAD 3D).
- Podzielić długi element na kilka części generując przy tym łączenie pozwalające później połączyć części w całość.
- Wygenerować napis na powierzchni przedmiotu.
- Wydrążyć przedmiot dla oszczędności materiału.

3.2.2. Orientacja modelu w systemie

Orientacja modelu w systemie zawiera się w optymalizacji wartości [3]:

- odległości modelu od początku układu współrzędnych,
- wysokości wsporników,
- wysokości budowanych elementów, należy zorientować modele w ten sposób, aby najkrótsza krawędź była wysokością,
- optymalizacja otworów drenażowych przez redukcję powierzchni zatrzymujących żywicę wewnątrz modelu w trakcie i po zakończeniu procesu budowy,
- liczby powierzchni skośnych, przy drukowaniu powstaje efekt schodków, aby go zminimalizować należy tak ustalić przedmiot, aby powierzchni skośnych było jak najmniej, a powierzchnie, na który kładziony jest największy nacisk pod względem estetycznym powinna być ułożona poziomo do płaszczyzny drukowania,
- liczby krzywizn w płaszczyźnie poziomej, ponieważ w tej płaszczyźnie dokładność jest większa,
- sprawdzenie czy model ma gabaryty nie większe od przestrzeni roboczej maszyny RP, w przypadku, gdy tak się stanie należy podzielić model na mniejsze części i złożyć po wykonaniu.

3.2.3. Dodawanie wsporników do modelu

W następnym etapie tworzone są podpory mocujące i ustalające element fizyczny budowany na platformie roboczej urządzenia RP. Podpory oddzielają model od platformy i umożliwiają łatwiejsze usunięcie obiektu po zakończeniu budowy (nie pozostawiając trudnych do usunięcia śladów). Podpory wspierają powierzchnie wymagające dodatkowego wsparcia, zmniejszają zniekształcenia kolejnych budowanych warstw oraz redukują błąd grubości pierwszej warstwy niezależnie od płaskości platformy [53].

Wsporniki można generować w programach CAD 3D a także w wyspecjalizowanych do tego programach, które wstępnie omówiono w 3.2.1. Oczywiście programy z drugiej grupy pozwalają uczynić to



automatycznie co znacznie skraca czas pracy. Dlatego też są dużo częściej używane [3].

Wsporniki po usunięciu pozostawiają ślady na powierzchni elementu z tego też względu należy unikać podpierania nimi powierzchni, od których wymagana jest duża gładkość.

Długość oraz rodzaj podpór zależy od używanego oprogramowania, a także od używanej metody realizacji procesu. Zwiększenie wysokości podpór umożliwia łatwiejsze oderwanie modelu od platformy. Jednak model powinien być tak zorientowany w przestrzeni roboczej maszyny, aby tych wsporników było jak najmniej, ponieważ zwiększają ilość materiału użytego w produkcji i wydłużają czas budowy co powoduje wzrost kosztów wytwarzania.

3.2.4. Podział na warstwy

Po weryfikacji błędów i stworzeniu podpór model jest dzielony na warstwy. W zależności od stosowanych technik Rapid prototyping stosowane są różne kryteria grubości warstwy. Dzieje się tak z powodu używania różnych materiałów. W niektórych metodach np. LOM grubość warstwy jest ściśle uzależniona od grubości folii. Natomiast w Stereolitografii możemy regulować grubością warstwy poprzez ustalenie obniżenia platformy.

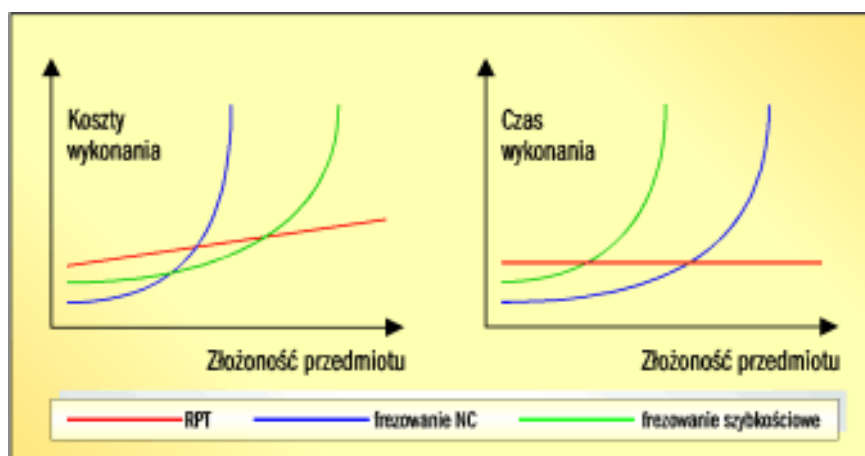
Grubość warstw wpływa przede wszystkim na dokładność wykonania modelu. W elementach wykonanych metodami przyrostowymi możemy zauważyć budowę schodkową. Powstaje ona na skutek nakładania kolejnych warstw [53]. Zwiększenie liczby warstw a jednocześnie zmniejszenie ich grubości prowadzi do wydłużenia cyklu i do zwiększenia kosztów budowy prototypu.

3.2.5. Konwersja geometrii warstw i generowanie pliku sterującego maszyną

Ostatnim etapem jest wygenerowanie plików sterujących pracą maszyny RP. Pliki inicjują analizę, w której wirtualny obiekt z podporami dzielony jest na warstwy o zadanej grubości, aproksymują geometrię modelu podzielonego na warstwy poprzez zbiór wektorów, oblicza optymalną trajektorię wypełniania przekrojów i formuje program do wykonania konkretnego prototypu [53].

3.3. Wytwarzanie poprzez obróbkę ubytkową

Najstarszą metodą wytwarzania przedmiotów jest obróbka ubytkowa. Niestety, ta metoda nie jest przystosowana do produkcji jednostkowej. Zajmuje zbyt wiele czasu i pochłania zbyt wiele środków. Na rys. 10 widać różnicę w cenie i czasie wykonania między obróbką ubytkową i przyrostową. Widać również małą opłacalność metod RP dla mało skomplikowanych modeli. Ale dla metod RP złożoność przedmiotu nie jest żadną barierą, koszty i czas zależą wyłącznie od objętości modelu. Można zaobserwować duży skok w technice obróbki ubytkowej. Niestety nawet we frezowaniu szybkościowym przy przekroczeniu pewnej granicy złożoności przedmiotu cena jak i czas wykonania gwałtownie się podnoszą.



Rys. 10. Porównanie czasu i kosztów wykonania od złożoności geometrii przedmiotu dla metod RP i obróbki ubytkowej [33]

3.4. Metody Rapid Prototyping

Rapid Prototyping jest to termin określający wszystkie metody wykonywania prototypów za pomocą kształtowania przyrostowego. Technologia ta jest ciągle udoskonalana i wzbogacana już od ponad 20 lat. Technologia ta daje duże możliwości korzystającym z niej zakładom [16].

W tym rozdziale zostaną przybliżone najpopularniejsze technologie RP:

3DP - Three Dimensional Printing- drukowanie przestrzenne polegające na spajaniu luźnego proszku spoiwem. Technikę tę wprowadziła firma Z Corporation w 1997 roku.

FDM - Fused Deposition Modeling - warstwowe nakładanie stopionego materiału - zapoczątkowana przez firmę Stratasys w 1989 r.

SLS - Selective Laser Sintering - selektywne spiekanie proszku materiału laserem – wprowadzona przez EOS GmbH w 1991 r.

LOM - Laminated Object Manufacturing - laminowanie kolejnych warstw materiału i wycinanie profilu warstwy laserem - wprowadzona przez firmę Helisys Inc. W 1991r.

SGC - Solid Ground Curing- polimeryzacja żywicy światłem przenikającym przez maskę z profilem warstwy technika wprowadzona przez firmę Cubital Ltd w roku 1991.

IJP - Fused Deposition Modeling- nanoszenie stopionego materiału na kolejne warstwy - metoda zapoczątkowana w 1995 r przez firmę Sanders Prototype Inc.

SLA - Stereolitografia- utwardzanie ciekłej żywicy promieniem lasera- opracowana w 1987 roku przez specjalistów z 3D Systems.

Istnieją oczywiście jeszcze inne metody, jeszcze inne dopiero powstają. Wymienione powyżej są najbardziej znanymi i dość dobrze rozpowszechnionymi.

3.4.1. Klasyfikacja metod Rapid Prototyping

Metody Rapid Prototyping można sklasyfikować według kilku kryteriów. W podanych niżej klasyfikacjach zostały zawarte najpopularniejsze technologie i produkty rynkowe.

Tabela 1. Klasyfikacja metod według dokładności przy uwzględnieniu konkretnych maszyn

Przedział dokładności	Metoda Rapid Prototyping	Wytwórca urządzenia	Typ urządzenia	Grubość warstwy	Materiał
Do 0,05 mm	MJM	3D Systems Inc.	InVision SR	0,04	VisiJetSR 200
			InVision HR	0,03	VisiJetHR 200
	SL	3D Systems Inc.	Viper SLA	0,02- 0,1	Żywice Accura SL

		Next Factory S.r.l.	Digital Wax	0,01- 0,15	Żywice
		Envisiontec GmbH	Prefactory	0,015- 0,1	Żywice Akrylowe
	PolyJet	Objet Geometries Ltd.	Eden 250 i 260	0,03	Zespół materiałów firmowych
			Eden 350, 350 V, 500 V	0,016	
	SLM	MCP-HEK GmbH	SLM Realizer 100 i 250	0,02- 0,1	Proszki metali
Od 0,05 do 0,1	SLS	3D Systems Inc.	Sinterstation HiQ SLS	0,07- 0,2	Proszki np: DuraForm
			Sinterstation Pro SLS	0,1- 0,15	Proszek DuraForm
	EOS GmbH	Formiga P100	0,1	Proszki: poliamidowe polistyrenowe	
		EOSINT P390	0,1- 0,2		
		EOSINT P730			
	3DP	Z Corp.	Seria Z Printer	0,089- 0,203	Proszek na bazie gipsu lub skrobi
Od 0,15 do 0,2	SLS	EOS GmbH	EOSINT S750	0,2	Piasek z powłoką żywiczną.
	FDM	Stratasys Inc.	Prodigy Plus	0,178- 0,33	ABS, PC
			FDM Titan	0,127- 0,254	Polisulfon fenylenu
			FDM Vantage X		PC, PC ISO, ABS, ABSi,
			FDM Vantage S		
			FDM Vantage SE		
FDM Maxum	ABS, ABSi,				
Od 0,2	MJM	3D Systems Inc.	InVision DP	0,3	VisiJetDP 200
	FDM	Dimension Printing-	Dimension 1200	0,254- 0,33	ABS

PROGRAM WIEDZA EDUKACJA ROZWÓJ

		Stratasys Inc.			
	3DP	Prometal RCT GmbH	S 15	0,2- 0,35	Proszki formierskie

Tabela 2. Klasyfikacja metod ze względu na postać materiału budującego

Rodzaje materiałów stosowanych w metodach RP		
Ciecz	Proszek	Ciało stałe
FDM	SLS	LOM
MJM	SLM	LOM- SAHP
PolyJet	3DP	
SGC	LC	
SL	DLF/DLM	
MM3DP		

Tabela 3. Klasyfikacja metod ze względu na metodę spajania materiału budulcowego

Metody spajania materiału w metodach RP			
Laser	Promienie UV	Spoiwo	Temperatura
DLF/DLM	MJM	3DP	FDM
SLS	SGC		LOM (+wycinanie laserem)
SLM	PolyJet		MM3DP
SL			

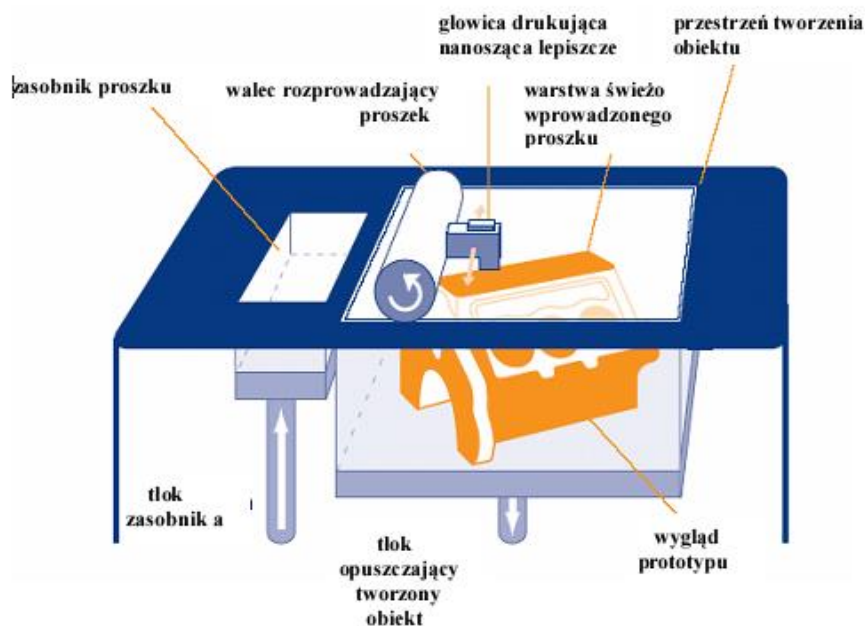
3.4.2. Metoda 3D PRINTING.

Metoda trójwymiarowego drukowania została opracowana przez naukowców z uniwersytetu w Cambridge pod koniec lat osiemdziesiątych. Metodę na rynek wprowadziła firma Soligen Technologies i była przeznaczona do bezpośredniego wyrobu form ceramicznych. W latach dziewięćdziesiątych firma Extrude Hone opracowała urządzenie do wytwarzania elementów metalowych o nazwie RTS-300. Dzisiaj

wiodącym producentem maszyn do realizacji procesu 3DP jest firma Z-Corporation. Ich pierwsze urządzenie ukazało się na rynku w 1997 roku [12].

Metoda ta polega na scalaniu sproszkowanego materiału za pomocą lepiscza nakładanego za pomocą dysz drukarki. Najpierw drukarka 3D rozprowadza ciekłą warstwę proszku. Następnie nanoszony jest w odpowiednie miejsca środek lepiący za pomocą głowicy atramentowej. Miejsca te dla danego przekroju poprzecznego obiektu tworzą konstrukcję. Następnie platforma, na której znajduje się budowany obiekt obniża się o grubość warstwy i proces powtarza się. Po zakończeniu procesu drukowania przedmiot o strukturze zestalonej lepisczem jest otoczony i wypełniony luźnym materiałem sproszkowanym. Co pozwala na niestosowanie struktur podporowych. Następnie usuwany jest luźny proszek [30].

Po zakończeniu wytwarzania model można nasączać woskiem polistyrenem lub żywicą. W ten sposób można nadać części większą wytrzymałość, a także różne własności.



Rys. 11. Schemat ideowy procesu 3DP [31]

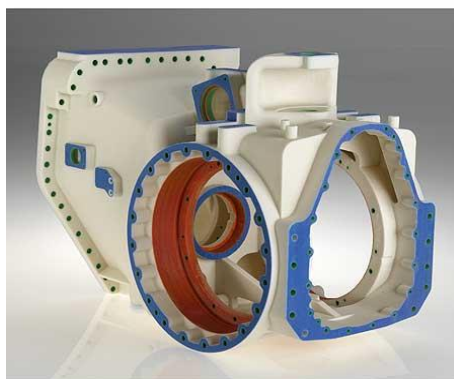
Firma Z-Corp produkuje urządzenia do wytwarzania małych i średnich obiektów. Oferuje przy tym

dużą gamę materiałów, dzięki którym można uzyskać różne właściwości fizyczne. Drukarki te pozwalają drukować w 24 bitowej gamie kolorów [70].



Rys. 12. Seria drukarek Z-corp która ukazała się w listopadzie 2005 roku [31]

Przykładowo Drukarka Spectrum Z 510 posiada przestrzeń robocza o wymiarach: 254x356x203 mm drukuje z prędkością od 2 do 4 warstw na minutę przy grubościach warstw od 0,089 do 0,203 mm. Posiada ona 4 głowice drukujące z 1216 dyszami razem. System ten jest jednym z najbardziej konkurencyjnych na rynku cena wykonania podeszwy Reebok w trybie kolorowym o objętości 1446,05 cm³ (477 warstw) zajmuje 02:25 godziny i kosztuje bez dalszego nasączenia infiltratami 180,5 € [31].



Rys. 13. Blok wykonany metodą 3DP [31]



3.4.3. Metoda DLF/DLM

Metoda DLF (Direct laser fabrication) jest też nazywana metodą DLM (Direct laser manufacturing). Proces ten daje nam możliwość wyprodukowania wyrobu, którego parametry wytrzymałościowe będą odpowiadały oryginalnemu materiałowi wejściowemu. W czasie procesu bezpośrednio z danych 3D CAD powstaje model (półfabrykat), który od razu możemy poddać procesowi obróbki ubytkowej takiej jak: frezowanie, polerowanie i obróbki erozyjnej.

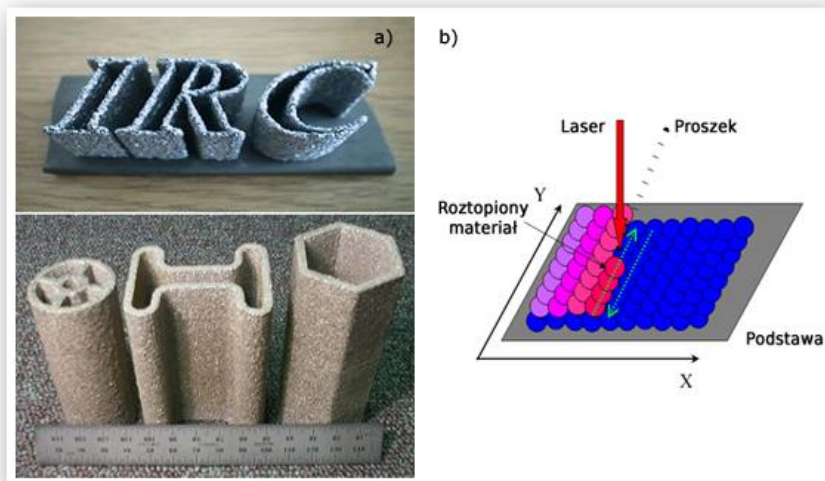
Materiałami stosowanymi mogą być proszki metali. Jednak dokładność powierzchni nie jest wystarczająca, aby można było zastosować produkt tego procesu jako formę bez dodatkowej obróbki. Na jakość modelu składa się jego porowatość i chropowatość powierzchni. Parametry możemy sterować poprzez podawanie odpowiedniej ilości oraz odpowiedniego rodzaju proszku i ustalając grubość warstwy [15].

W metodzie tej wiązka lasera jest ogniskowana na powierzchni obiektu co pozwala osiągnąć temperaturę do 1000°C. Stapiany jest wówczas proszek dostarczany w miejsce ogniskowania. Dzięki temu otrzymujemy obiekt o prawie pełnej gęstości. Dzięki DLF możemy szybko stworzyć części z trudnych do odlewania materiałów. Oprócz seryjnej budowy form i oprzyrządowania innymi obszarami zastosowań prototypów, z takimi parametrami jak wyroby seryjne, są techniki medyczne. Np. Budowa implantów i korzeni zębów z tytanu [3].



Zintegrowany
Program
Rozwoju
Politechniki
Lubelskiej

Biuro Projektu:
ul. Nadbystrzycka 38H
20 - 618 Lublin



Rys. 14. Elementy wykonane metodą DLF (a), i schemat działania tej metody (b) [45]

Urządzeniem bazującym na metodzie DLF jest TrumaForm firmy Trumpf. Realizuje on proces za pomocą wiązki lasera o grubości 100 nm. Jest to pompowany diodowo laser tarczowy HLD 251. Jego moc wynosi 250 W i umożliwia kształtowanie materiałów takich jak aluminium i jego stopy.



Rys. 15. Urządzenie firmy Trumpf TrumaForm LF 130 [42]

PROGRAM WIEDZA EDUKACJA ROZWÓJ



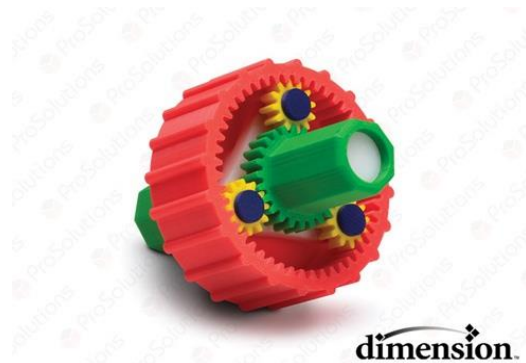
Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny



3.4.4. Metoda FDM

Technologia Fused Deposition Modeling została wprowadzona na rynek w latach '80 ubiegłego stulecia [64]. A w latach '90 została rozpowszechniona na rynku przez firmę Stratasys. FDM. Proces wytwarzania polega na warstwowym nakładaniu przez głowicę z dwoma dyszami, rozpuszczonego materiału modelowego (jedna dyszą) i podporowego (drugą dyszą). Podczas procesu urządzenie nanosi jedną warstwę materiału bazowego (np. ABS) , a następnie warstwę materiału podporowego. Po zakończeniu procesu jest praktycznie od razu gotowy jest do użycia [54].

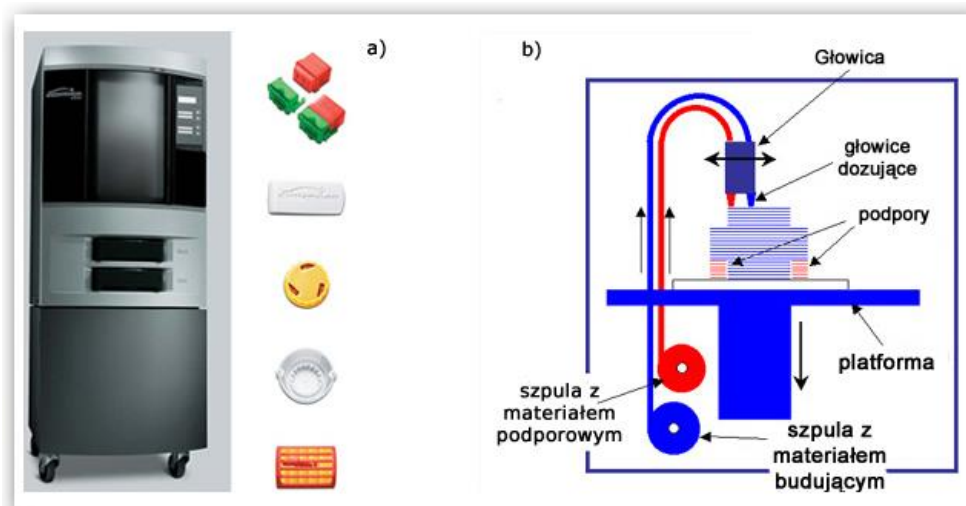
W porównaniu z innymi technologiami Rapid Prototyping, modele uzyskane w technologii FDM są jednymi z najdokładniej wykonanych. Drukarki 3D wytwarzające tą metodą mogą zbudować ścianki o grubości nawet 0,3 mm (a w przypadku elementów o kształcie walca - minimalna średnica wynosi 0,75 mm). Prototypy FDM charakteryzują się wysoką funkcjonalnością - łatwo poddają się obróbce (np. szlifowaniu, wierceniu, malowaniu, chromowaniu). Przy budowaniu wielkogabarytowych modeli możliwe jest podzielenie go na kilka mniejszych (proste klejenie wydrukowanych części). Dodatkowo, są stosunkowo trwałe i odporne na działanie wody, substancji chemicznych i temperatury.



Rys. 16. Model przekładni planetarnej wykonanej w technologii FDM [54]

Bardzo interesującą maszyną do procesu FDM jest 3D Dimension SST 1200. Zastosowano w niej unikalny

materiał podporowy, który rozpuszcza się pod wpływem wody. Dzięki temu nie ma ryzyka uszkodzenia modelu odrywając podpory tak jak to się dzieje w Stereolitografii. Podstawowym tworzywem budującym model jest ABS w siedmiu kolorach. Znajduje się on w kasecie podobnie jak materiał podporowy. Maksymalne wymiary obiektu to 254x254x305mm, grubość warstwy możemy ustalić na 0,254 mm lub 0,33 mm. Wymiary urządzenia (838x737x1143mm) i „kultura”(duża czystość i cichość) pracy pozwalają na użytkowanie go również w biurach [21].



Rys. 17. Drukarka pracująca w technice FDM - Dimension Elite (a) [21], i schemat ideowy powstawania modelu FDM (b) [69]

Metoda FDM jest dostępna już od 28000 Euro. Cena dotyczy maszyny Dimension Elite (rys. 17 a). Dzięki tak niskiej cenie coraz więcej biur projektowych może pozwolić sobie na wykonywanie własnych prototypów podczas procesu projektowego [37]. Intensywność rozwoju tej techniki zaowocowała powstaniem szeregu firm na światowym rynku i tym samym wyprodukowaniem ogromnej liczby rozwiązań technicznych. Dzięki temu na rynku można znaleźć dobrej jakości urządzenia w bardzo przystępnych cenach, nawet dla użytkowników domowych.

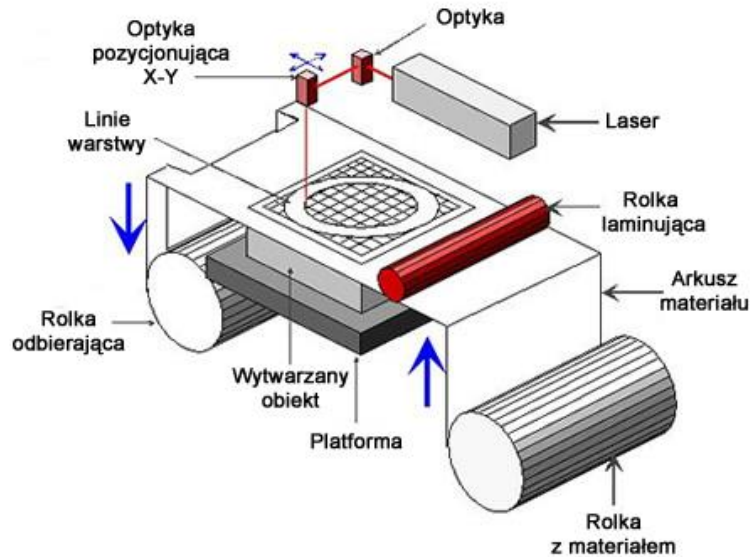
3.4.5. Metoda LOM

Metoda Laminated Object Manufacturing (warstwowego wytwarzania obiektów) została opracowana przez amerykańską firmę HELISYS [3].



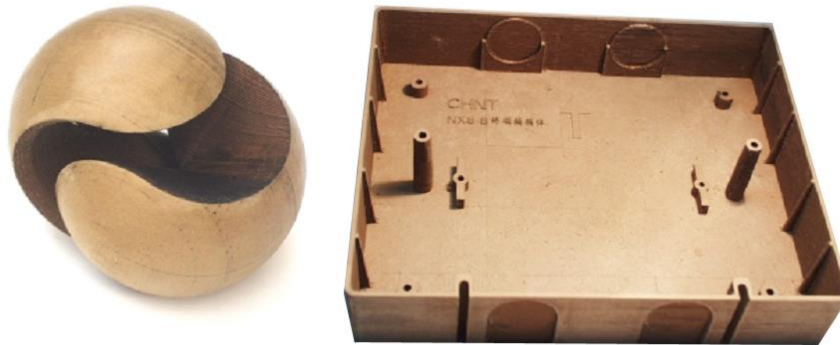
Rys. 18. Maszyna Helisys 2030 H do realizacji procesu LOM [56]

Metoda ta polega na spajaniu ze sobą kolejno nakładanych i wycinanych arkuszy lub folii materiału. Model jest umieszczony na platformie, która w miarę jego tworzenia jest stopniowo opuszczana (o grubość arkusza). Taśma foliowa lub arkusze najczęściej są powleczone od dołu ciepłnie uaktywnianym klejem. Warstwy materiału są więc spajane za pomocą rozgrzanego wałka dociskającego i wyrównującego. Po zakończeniu budowania modelu za pomocą lasera na części niewykorzystanej folii nacinane są kwadraty. Są one po procesie odłupywane i stanowią tylko odpady. Niedogodnością tej metody jest to, iż przestrzenie wewnątrz modelu zostają wypełnione i nie można ich opróżnić.



Rys. 19. Rysunek pokazujący ideę powstawania modelu metodą LOM [61]

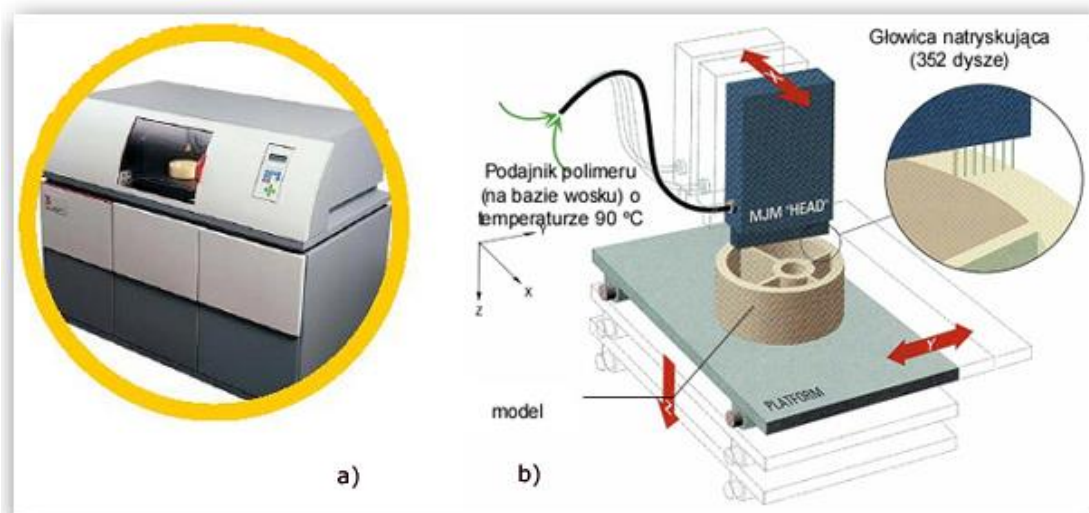
Do procesu LOM używane jest wiele rodzajów folii. Specjaliści z Helisys wraz z Uniwersytetem w Dayton opracowała różne folie z włókien szklanych o osnowie polimerowej i papierowej. Charakteryzują się one dużą udamnością. Stosuje się też arkusze ceramiczne. Są to taśmy z proszku SiC w osnowie polimeru, składają się z włókien SiC i warstwy żywicy termoutwardzalnej. Możliwe jest wykorzystanie w miejsce SiC Al_2O_3 . Możliwe jest też użycie taśm metalowych. Do ich wycinania używa się lasera molekularnego CO_2 . W tym przypadku łączenie warstw odbywa się za pomocą zgrzewania punktowego, dyfuzyjnego lub płomieniowego kolejnych arkuszy. Do stali nierdzewnej paterowanej miedzią używa się lutowania Twardego [12].



Rys. 20. Przykładowe modele wykonane metodą LOM [61]

3.4.6. Technologia MJM

Kolejną metodą Rapid Prototyping jest MJM (Multi Jet Modelling), gdzie głowica wielostrumieniowa nakłada termoutwardzalny polimer, przesuwając się na płaszczyźnie w taki sposób, aby odtworzyć całą powierzchnię przekroju [60].



Rys. 21. Drukarka przestrzenna Thermojet firmy 3D Systems (a), schemat działania tej maszyny (b) [60]

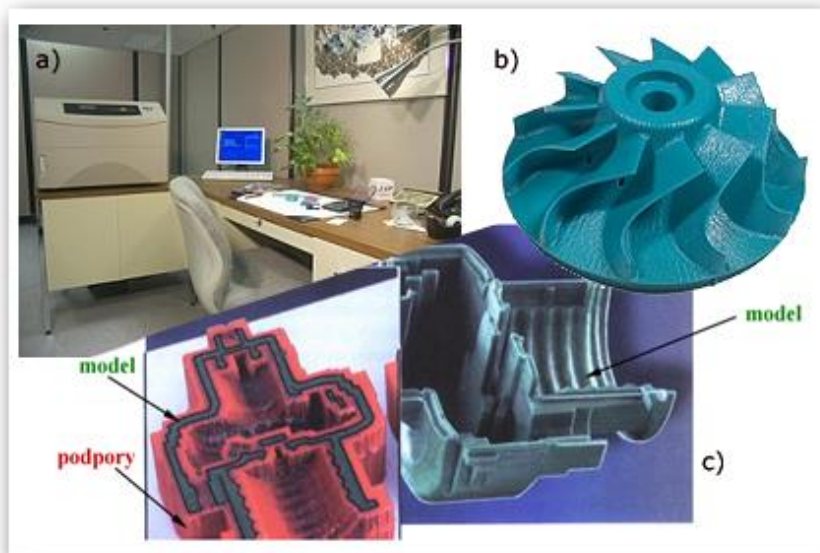


Jest to metoda opatentowana przez firmę 3D Systems. Zostały opracowane dwa rodzaje żywic do tego procesu. Termoutwardzalna do drukarek przestrzennych ThermoJet i utwardzana promieniami UV do drukarek InVision. Podstawowe parametry drukarki ThermoJet to przestrzeń robocza o wymiarach 250x190x200mm i rozdzielczość budowanego modelu 300x400x600 dpi. Materiałami wsadowymi do budowy modeli w tej metodzie są polimery na bazie wosku. Budowany model potrzebuje wsparcia ze strony podpór, które budowane są za pomocą tego samego materiału. Po zakończeniu budowy obiektu podpory muszą zostać usunięte mechanicznie co może pozostawić ślady. Realizacja metodą InVision daje dużo lepsze efekty niż Thermojet w zakresie: odwzorowania kształtów i szczegółów, gładkości powierzchni i wytrzymałości mechanicznej prototypu [60].

3.4.7. Technologia MM3DP

Metoda MM3DP czyli Model Maker 3D Ploting została zastosowana w urządzeniu Model Maker II Firmy Sanders Prototype . Urządzenie to, podobnie jak w technologii FDM, stosuje dwudyszową głowicę do nakładania materiału budującego i materiału podporowego na podłożu [14].

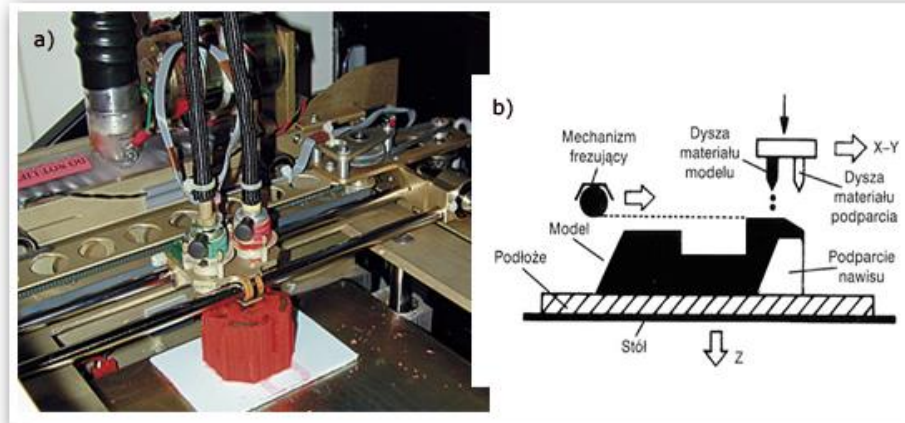
Metoda ta korzysta z techniki natryskiwania materiału BPM (Ballistic Particle Manufacturing). Technika ta została opatentowana w 1987 r. Jest to proces wytwarzania modeli strumieniem balistycznych kropelek materiału i dotyczy celowego natryskiwania każdego dowolnego materiału, ze zmiennym jego doprowadzaniem w trójwymiarowej przestrzeni. Wykorzystywana jest zasada *drop-on-demand* (kropla na żądanie). Cały model budowany jest pojedynczymi kroplami, warstwa po warstwie. Dysza na podstawie sygnałów elektrycznych wystrzeliwuje pojedyncze, drobne i roztopione krople z bardzo dużą częstotliwością (12500 s^{-1}). Kropleki wtapiają się a następnie stygną tworząc kolejną warstwę. Do najważniejszych właściwości wystrzeliwanych kropelek zalicza się lepkość materiału w fazie stopionej i jego właściwe napięcie powierzchniowe. Właściwości materiału wykonanego modelu powinny być jak najdokładniej dostosowane do jego zastosowania [14].



Rys. 22. Maszyna T612 Benchtop firmy Solid Scape wkomponowane w przestrzeń biurową (a), Model wirnika zbudowanego technologią Model Maker na urządzeniu T612 Benchtop (b), odróżnienie modelu od materiału podporowego (c) [57]

Po nałożeniu każdej warstwy mechanizm frezujący dokonuje sfrezowania części ostatnio dodanego materiału. Dzięki temu metoda ta może zapewnić, poprzez regulację grubości warstwy od 0,013 do 0,13 mm, skrajnie dużą lub małą dokładność. Można dowolnie dobrać jakość, czas i koszty produkcji do wymagań i preferencji odbiorcy. W urządzeniu tym stosuje się termoplasty o temperaturze topnienia w zakresie 90-113°C [14]. Materiał podparcia jest w kolorze czerwonym natomiast budulec ma kolor zielony. Materiał jest wystrzeliany poprzez dysze w postaci kropelek o średnicy 0,075mm. Na modelu tworzą one linię 0,1 mm x 0,06 mm co pozwala na budowę modeli o grubości ścianek 0,1 mm. Materiałami podporowymi są woski lub estry, naturalne lub syntetyczne o temperaturze topnienia do 74°C. Po zbudowaniu model wkłada się do kadzi z rozpuszczalnikiem w celu roztopienia podpór.

Przykładowym urządzeniem stosującym tą metodę jest T612 Benchtop firmy Solidscape Inc. Przestrzeń robocza tego urządzenia to 30x15x15cm [57]. Grubość warstwy można ustalić od 0.013 do 0,003 mm, a rozdzielczość warstwy to 25 M kropli na 25,4 cm².

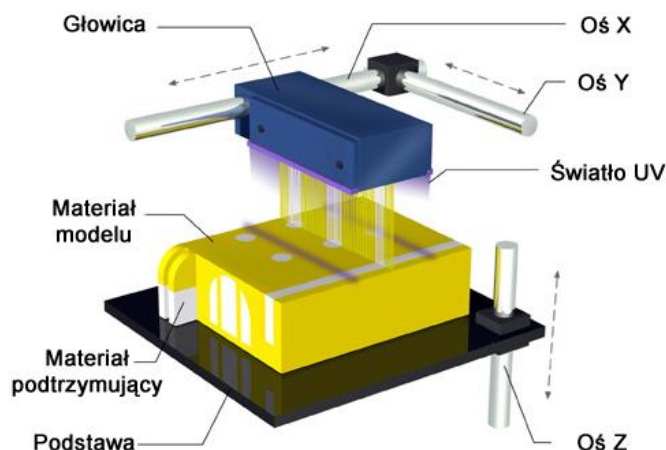


Rys. 23. Otwarta przestrzeń robocza maszyny z budowanym modelem (a), schemat działania metody MM3DP (b) [52].

3.4.8. Technologia PolyJET

Proces Poly Jet został opracowany przez firmę Objet Geometries Ltd. Firma ta stworzyła pełną linię urządzeń, do realizacji tej metody, o nazwie Eden. A technologia natrysku odpowiada generalnie technice BPM.

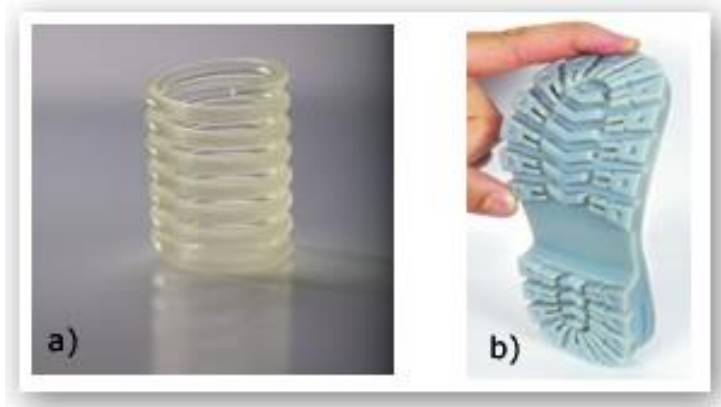
Nie jest więc najważniejsze, w jaki sposób materiał jest nakładany na kolejne warstwy, ale postęp jaki został dokonany przez inżynierów z firmy Objet Geometries [10]. Blok dyszowy składa się z 4-8 głowic dozujących PolyJet™. Model budowany jest na specjalnej, wewnętrznej tacy. Głowica porusza się po osi X, podobnie jak w zwykłej drukarce, dozując pojedynczą super-cienką warstwę fotopolimeru. Po każdym nałożeniu warstwy żywicy, zostaje ona natychmiast utwardzona światłem UV. Ten etap eliminuje konieczność dodatkowej obróbki (utwardzania, moczenia itp.), wymaganej przez inne technologie.



Rys. 24. Schemat działania urządzenia w technologii PolyJet [50]

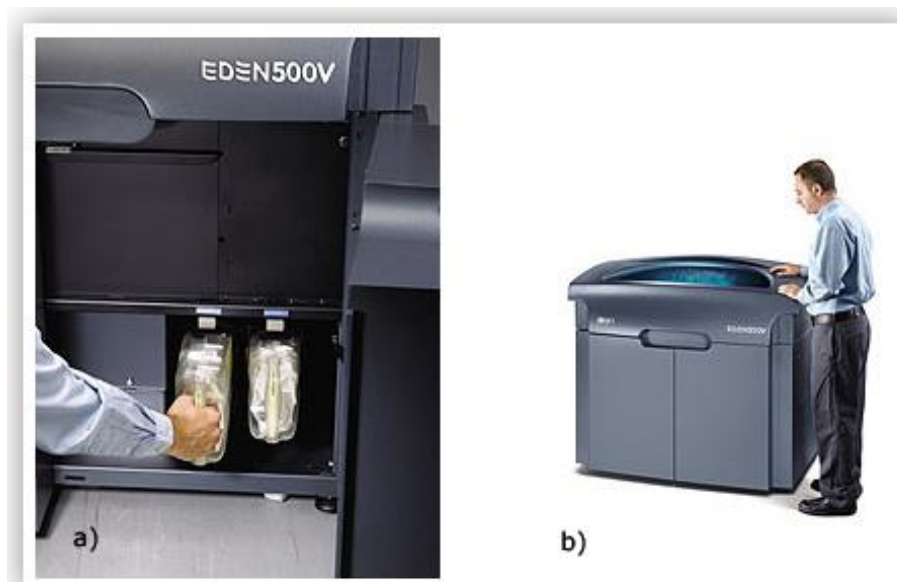
Wewnętrzna taca na model opuszcza się z bardzo dużą precyzją i głowice drukują dalej, warstwa po warstwie, aż do skończenia modelu. Nakładane są precyzyjnie bardzo drobne krople fotopolimeru, aby uzyskać warstwy o grubości 16 mikronów, rezultatem tego jest równa i gładka powierzchnia. Do budowania używane są dwa rodzaje materiału: jeden do wytwarzania właściwego modelu i drugi jako materiał pomocniczy do budowania konstrukcji podpierających. Celem materiału pomocniczego jest pomoc w formowaniu skomplikowanych geometrii modelu typu otwory, występy, podcięcia, wnęki, delikatne formy i bardzo cienkie ścianki. Kiedy drukowanie jest zakończone, urządzenie Water Jet łatwo i szybko usuwa materiał pomocniczy pozostawiając gładką powierzchnię.

Systemy drukowania PolyJet mogą być używane w warunkach biurowych. Materiały są bezpieczne dla środowiska, dostarczane w zamkniętych kasetach. Co jest dużą zaletą, ponieważ można je samodzielnie wymienić. Maszyny posiadają system zarządzania materiałem informujące o konieczności wymiany kasety. Dla potrzeb PolyJet została stworzona i opatentowana specjalna gama materiałów, oferujących zróżnicowane właściwości wizualno-mechaniczne. Dokładność drukowania wg. Producenta to zakres od 100 do 200 mikrometrów.



Rys. 25. Modele wykonane w technologii PolyJet: z materiału Fullcure (a), i z materiału TangoGray (b) [50]

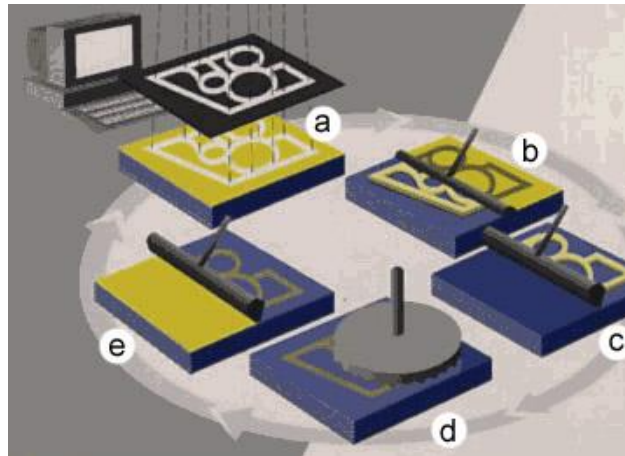
Dane jednego z urządzeń, drukarki Eden 500 V to: wielkość komory 500x400x200 mm, rozdzielczość 600 dpi, dokładność od 0,1 do 0,3 mm, materiał znajduje się w dwóch kasetach o wadze 3,6 kg. A całkowite wymiary to 1320x990x1200mm.



Rys. 26. Zakładanie nowych pojemników z materiałem budulcowym do urządzenia Eden 500V (a) i urządzenie Eden 500V wraz z obsługującym je człowiekiem [50]

3.4.9. Metoda SGC

Kolejną technologią Rapid Prototyping jest SGC (ang. *Solki Ground Curing*). Czyli Metoda bezpośredniego utwardzania podłoża. Została opracowana przez izraelską firmę Cubital Ltd [3].



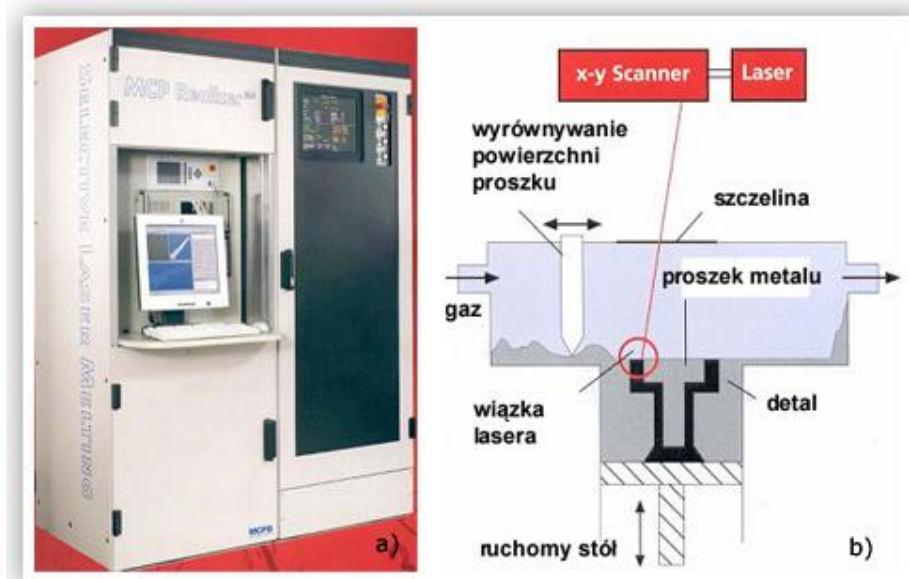
Rys. 27. Kolejne etapy procesu SGC : drukowanie maski i naświetlenie polimeru światłem UV (a), usuwanie nieutwardzonego polimeru (b), wyrównywanie woskiem, który będzie również materiałem podporowym (c), frezowanie warstwy (d), nakładanie kolejnej warstwy fotopolimeru (e) [55]

Model jest w tym przypadku budowany warstwa po warstwie przez utwardzanie fotopolimeru lub specjalnej żywicy. Utwardzanie odbywa się za pomocą lampy ultrafioletowej. Kolejne warstwy modelu powstają całościowo przez naświetlenie przygotowanej wcześniej na szklanej płytce maski danej warstwy. Maska jest wykonywana jako negatywowo obraz warstwy modelu. Oznacza to, że w miejscach, gdzie przedmiot ma zostać utwardzony maska jest przezroczysta i przepuszcza promienie UV aby utwardziły warstwę żywicy. Pozostała część maski jest pokrywana tonerem. Po skończonym cyklu tworzenia warstwy maska jest czyszczona. Każda utworzona warstwa modelu jest wyrównywana do odpowiedniej wysokości, do średnio 0,15 mm, przez frezowanie, co umożliwia dobranie odpowiedniej dokładności a także całkowitego usunięcia poprzedniej warstwy. Następnie na taką gładką i równą powierzchnię tworzonego modelu nanoszona jest kolejna warstwa polimeru. Platforma maszyny porusza się w dwóch kierunkach: wzdłużnym jako kolejne etapy produkcji i pionowym do tworzenia kolejnych warstw. Podczas tworzenia

kolejnych warstw modelu nieutwardzony polimer jest zbierany, a wolna przestrzeń w powstającym przedmiocie jest wypełniana woskiem. Wosk staje się wtedy elementem podporowym [3].

3.4.10. Technologia SLM

Selective Laser Melting (SLM) czyli selektywne natapianie laserowe zostało rozwinięte przez firmę MCP Hek Tooling GmbH [15]. Pozwala na szybkie wykonywanie części maszyn, narzędzi takich jak stalowe formy do formowania wtryskowego i odlewania, a także elementów ceramicznych. W technice tej wiązka lasera o mocy 100 W roztopia w płaszczyźnie XY proszki metali (stal narzędziową i szlachetną, brąz, cynk, tytan oraz chrom/kobalt, węgiel krzemu, tlenek aluminium). System pozycjonowania wiązki lasera oparty jest na precyzyjnym systemie 16 bitowego przestrzennego skanowania [60].

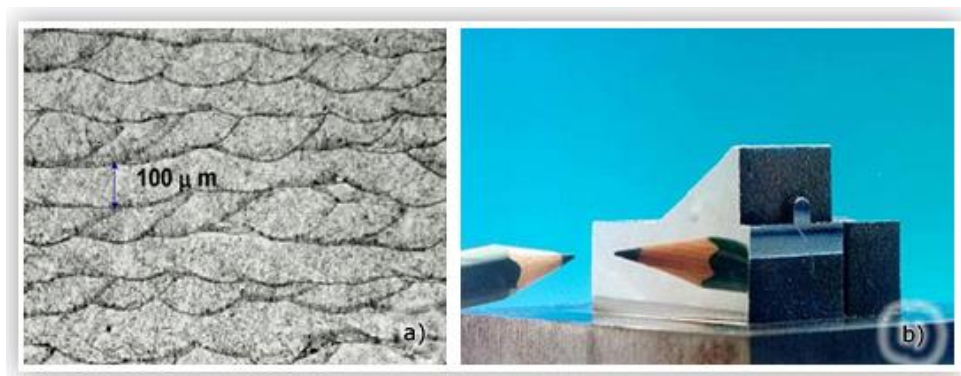


Rys. 28. MCP Realizer do wykonywania prototypów metoda SLM (a) i schemat działania urządzenia (b) [60]

Proces rozpoczyna się naniesieniem i wyrównaniem warstwy proszku. Następnie wiązka lasera stapia proszek na powierzchni zarysu obiektu. W urządzeniu MCP Realizer zastosowano laser z promieniowaniem podczerwonym. Następnie opuszczany jest stół o grubość warstwy i proces się powtarza. W komorze jest ciągły przepływ gazu ze średnią prędkością 3 l/min i zależy od topionego proszku.

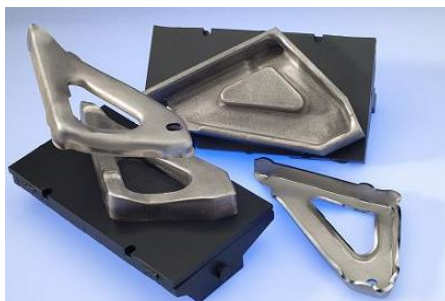
Zaletami tej technologii są:

- Możliwość stworzenie modelu z prawie każdej substancji, którą da się sproszkować.
- Jednorodna struktura bez porów, gęstość do 99%.
- Możliwość polerowania gotowego wyrobu.
- Brak lepiscza do spajania proszków.
- Bardzo duża twardość wyrobów umożliwiająca użycie ich jako form.



Rys. 29. Jednorodna struktura materiału stali nierdzewnej 316 L po procesie spiekania (a), polerowany element wykonany w technologii SLM, chropowatość równa 2 mikrometry [60]

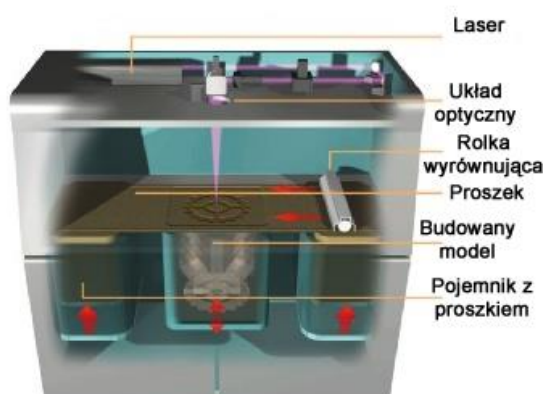
Firma MCP HEK posiada w sprzedaży urządzenie MCP Realizer. Jest on wyposażony w dwie stacje komputerowe i monitor. Posiada kamerą, która pozwala na bieżącą obserwację tworzącego się modelu. Zasobnik pozwala zmieścić 15 litrów proszku, co daje w przypadku stali 120 kg materiału. Model jest budowany w przestrzeni roboczej o wymiarach 250x250x240 mm, z szybkością 5 cm³/h, w warstwach o minimalnej grubości 0,05 mm. Materiał jest topiony laserem o mocy 100 W [60].



Rys. 30. Profil z blachy wykonany na wkładkach formujących wykonanych bezpośrednio w metodzie SLM [60]

3.4.11. Technologia SLS

Metodę polegającą na laserowym scalaniu lub spiekaniu proszków materiałów zwaną Selective Laser Sintering opracowali naukowcy z Uniwersytetu Tekszańskiego w Austin (USA) [3]. Metoda ta jest zarejestrowaną marką 3D Systems Inc. Głównymi producentami maszyn realizujących tą metodę jest EOS GmbH EOS (EOSINT P700) i 3D Systems (Sinterstation Pro SLS System) [62].

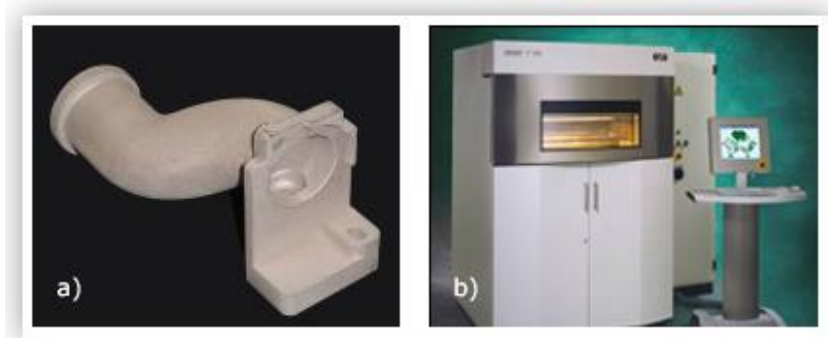


Rys. 31. Widok pokazujący działanie urządzenia do realizacji procesu SLS [59]

W technice tej określony obszar każdej warstwy spiekany jest za pomocą lasera CO₂ o mocy od 50 do 200 W lub Nd:YAG (laser neodymowy). Laser spieka warstwę proszku a także nadtapia część poprzedniej

nadając w ten sposób jednorodność materiałowi. Kolejne fazy nakładania proszku itd. Przebiegają jak w metodzie SLM. W metodzie SLS używa się proszków polimerów, metali i proszków materiałów ceramicznych. Stosowanie podpór zależy od indywidualnych parametrów każdego przedmiotu. Przy małych modelach podporę stanowi niestopiony proszek, natomiast przy budowaniu dużych obiektów podpory pozwalają na utrzymanie stabilności przedmiotu [3].

Metodą tą można wytwarzać modele, ale też pełnowartościowe narzędzia do produkcji seryjnej, np. matryce, tłoczniaki, formy odlewnicze lub formy do formowania wtryskowego tworzyw sztucznych, jak też gotowe wyroby wytwarzane jednostkowo lub w małej serii.



Rys. 32. Model wykonany w metodzie SLS (a) i maszyna EOSINT P700 (b) [24]

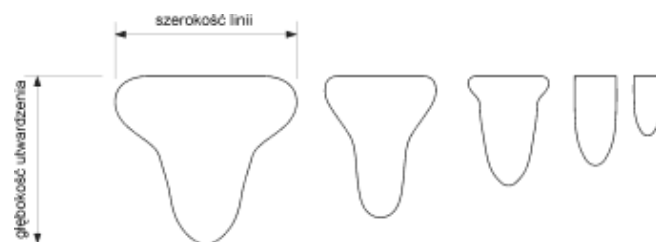
Firma EOS w urządzenie EOSINT P700 (rys. 32 b) zastosowała aż 2 lasery CO₂ o średnicy plamki 0,75mm. W zależności od materiału tworzone są w nim warstwy 0,15 do 0,2 mm. Pozwala to na zwiększenie szybkości budowy i na zwiększenie przestrzeni roboczej, która wynosi 700x380x580 mm [24].

3.4.12. Stereolitografia

Najstarszą i najbardziej popularną metodą Rapid Prototyping jest Stereolitografia. Została ona zaprezentowana na targach w Detroit przez firmę 3D Systems w 1986 roku. W Stereolitografii wykorzystuje się ciekłe żywice epoksydowe i akrylowe o odpowiednim składzie chemicznym, umożliwiającym utwardzanie promieniowaniem ultrafioletowym. Pod wpływem światła lasera zostają wywołane w żywicy procesy polimeryzacji, podczas których ciekła żywica zestala się. Z tym, że czas zestalania żywicy

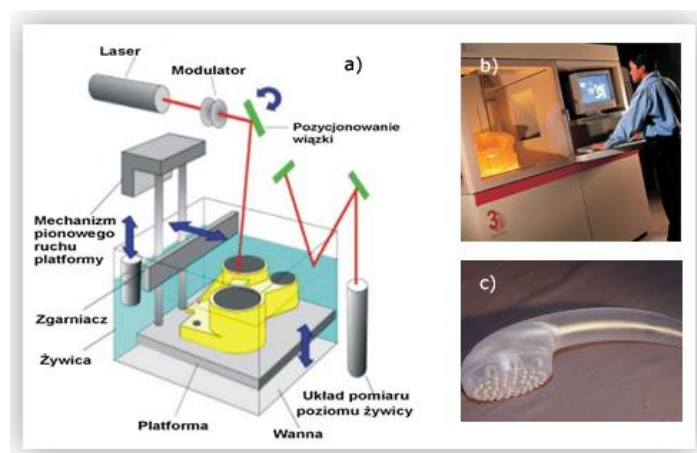
akrylowej jest dużo krótszy niż żywicy epoksydowej. Procesy zestalania występują tylko w miejscu naświetlenia. Umożliwia to uzyskanie pożądanych kształtów i wymiarów modelu.

Podczas procesu Stereolitografii należy utrzymywać stałą i odpowiednią temperaturę żywicy, ponieważ jej wahania mają zły wpływ na: znaczne zmiany lepkości, objętości i charakterystyki utwardzania żywicy. Nagłe zmiany temperatury grożą więc deformacjami modelu.



Rys. 33. Profile linii utwardzanego materiału w zależności od ilości zaabsorbowanej energii, czym większa ilość energii tym profil jest większy [34]

Stopień polimeryzacji żywicy jest proporcjonalny do ilości zaabsorbowanej energii. Ma to wpływ na szerokość i głębokość utwardzonej warstwy polimeru, czym szybszy jest proces skanowania laserem tym cieńsze warstwy. Żeby warstwy utwardzonej żywicy były ze sobą powiązane, głębokość utwardzenia musi być większa od grubości warstwy. Możliwe jest to wtedy gdy światło lasera przenika do poprzedniej warstwy [34].



Rys. 34. Schemat działania urządzenia stereolitograficznego (a) [34] Urządzenie SLA 5000 firmy 3D Systems (b) i model wykonany w Stereolitografii z materiału Accura 60 (c) [26]

Urządzenie składa się z kadzi wypełnionej żywicą, zgarniacza, platformy i lasera UV. Proces nakładania kolejnych warstw przebiega w następujący sposób:

- zgarniacz nakłada na platformę pierwszą warstwę żywicy.
- laser utwardza część warstwy, na której obszarze znajduje się profil bryły.
- Platforma zostaje opuszczona o grubość warstwy.
- Zgarniacz wyrównuje poziom żywicy na kolejnej warstwie i obieg się powtarza do zakończenia budowy modelu.

Po wykonaniu wszystkich warstw składających się na bryłę, model wyjmuje się z komory roboczej i poddaje obróbce wykończeniowej. Polega ona na usunięciu struktur podpierających, a następnie na mechanicznym obrobieniu niektórych powierzchni. Żywice stereolitograficzne są łatwo obrabialne, można je również kleić, szpachlować i lakierować. Klejenie odbywa się przy pomocy ciekłej żywicy tego samego typu, którą następnie utwardza się przez naświetlanie UV [49].

W przypadku maszyn do Stereolitografii należy pamiętać też o słabnącej mocy lasera. W urządzeniu SLA 5000 firmy 3D Systems producent zapewnia, że w ciągu 5000 przepracowanych godzin moc nie spadnie poniżej 216 W przy 354 W mocy początkowej. W urządzeniu tym średnica lasera wynosi od 0,2 do 0,3 mm a zalecana prędkość skanowania to 5 m/s. Pojemność kadzi a zarazem przybliżona maksymalna wielkość modelu to 508x508x584 mm. Do swoich urządzeń 3D Systems opracował całą gamę żywic o różnych właściwościach wytrzymałościowych i wizualnych (żywice transparentne i kolorowe) [26].

3.5. Technologie Rapid Tooling

Wzrastająca dynamika rynku, która wymuszała skracanie procesów projektowych i wdrożeniowych nowych produktów zmusiła wytwórców do szukania oszczędności. Zostały opracowane metody Rapid Prototyping pozwalające wykonywać modele koncepcyjne wiele mniejszym kosztem niż tradycyjnie. Wtedy jako kontynuacja i rozszerzenie pojawiły się technologie RT. Rapid Tooling jest to technologia szybkiego wykonywania narzędzi w postaci form i matryc. Technologie RT poprawiły funkcjonalność metod RP [3].

RT służy do wykonywania oprzyrządowania i wykonywania krótkich i średnich serii prototypowych i przed-produkcyjnych. Obszary RP i RT wzajemnie się uzupełniają, tworząc zintegrowany system pozwalający na znacznie szybsze, w porównaniu z konwencjonalnymi technikami, wdrożenie wyrobu do produkcji, przy jednoczesnej redukcji związanych z tym kosztów.

Metody RT wykorzystują proces tworzenia negatywowych wersji modelu do dalszego ich powielania. RT występuje jako zbiór technik do wykonywania form z różnych materiałów i do różnych celów. Na przykład tworzenie form do bezpośredniego odlewania metali nieżelaznych przy użyciu technologii ZCast. Natomiast metoda odlewania precyzyjnego znajduje najczęściej zastosowanie w odlewaniu drobnych, skomplikowanych części maszyn i urządzeń. Polega na wytworzeniu modelu z materiału nadającego się do wytopienia (np. wosk) lub wypalenia i połączenia go z układem wlewowym, który także jest wykonany z materiału łatwo ulegającego wytopieniu lub wypaleniu. Po jego wytopieniu forma jest wypalana w celu nadania jej odpowiedniej wytrzymałości [1].

3.5.1. ZCAST DIRECT METAL CASTING



Rys. 35. Forma wykonana metodą Diect Metal Casting i odlew wykonany w tej formie [2]

Technologia ZCast pozwala na odlewanie metali bezpośrednio w formach wykonanych przy pomocy drukarki 3D Zcorporation. W tym procesie można stosować następujące metody [2]:

- metoda bezpośredniego zalewania: Polega on na tym, że odlewanie następuje bezpośrednio w formie

wykonanej na drukarce 3D. Przy wykonaniu takiej formy zużywa się dużo więcej proszku niż przy normalnym wydruku. Ale nie ma konieczności wykonywania dodatkowych form. Co daje sporą oszczędność czasu. Już na etapie projektowania modelu projektant powinien znać zasady budowania form odlewniczych, ponieważ już w modelu CAD muszą być zawarte kanały wlewowe i chłodzące.

- b) metoda skorupowa. Stosowana jest do form zbyt dużych, aby wykonać je w drukarce. Polega na stworzeniu tylko cienkiej formy skorupowej (grubości 12,5 mm), która otacza zaprojektowaną część. Skorupa jest obsypana tradycyjnym piaskiem odlewniczym w krzyńce formierskiej w celu stworzenia formy gotowej do zalania.
- c) Metoda łączona. Metoda ta polega na wykonaniu rdzeni z materiału ZCast i użyciu ich w połączeniu z formą piaskową, która może być wytworzona metodami tradycyjnymi. Jednak aby zminimalizować czas odlewania, modele do formowania mogą powstać dzięki drukarce 3D Z Corporation przy użyciu proszków z serii zp100.

3.5.2. Vacuum Casting

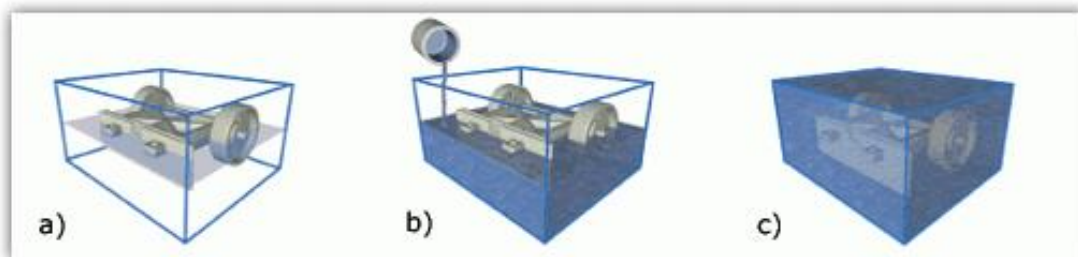
Jest to najszerzej stosowana metoda Rapid Tooling. Opracowana przez firmę MCP HEK. Metodą tą można uzyskać elastyczną formę odlewniczą do zalewania dwuskładnikowymi żywicami. Formy takie można również zalewać woskiem. Trwałość formy określa się na 40- 50 odlewów, a czas wykonania takiej formy to około 12 godzin [46].



Rys. 36. Zdjęcia z trzech etapów budowania formy: zalewanie formy z ustalonym modelem wzorcowym (a), rozcinięcie formy (b) i ustalanie otworów odpowietrzających (c) [46].

Zasada tej metody jest opisana schematem:

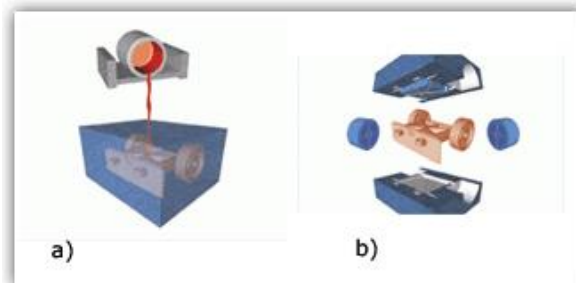
- ustalenie i zamocowanie modelu wzorcowego wykonanego metodą RP w gotowej obudowie formy (rys. 37a).
- ustalenie linii podziałów formy silikonowej, oznaczenie ich taśmą, ustalenie otworów wlewowych i odpowietrzających (rys. 36c).
- zalanie formy i modelu wzorcowego i umieszczenie w urządzeniu próżniowym, w którym zostaje odgazowany (rys. 37b i 36a).
- wygrzewanie w temperaturze ok 70°C (rys. 37c).
- wyjęcie silikonowej formy, rozcięcie jej i wyjęcie modelu wzorcowego (rys. 38).
- ponowne zamknięcie formy i włożenie z powrotem do urządzenia próżniowego gdzie następuje zalanie formy.
- Wyjęcie z formy gotowego przedmiotu.



Rys. 37. Ustalenie modelu wzorcowego w formie (a), zalanie formy (b), odgazowywanie i wygrzewania formy (c) [46]



Rys. 38. Wyjęcie modelu wzorcowego z formy



Rys. 39. Zalanie formy woskiem (a) i wyjęcie pierwszego gotowego elementu z serii (b) [46]

3.5.3. Epoxy Tooling

Metoda Epoxy tooling jest próżniową metodą wytwarzania form do produkcji seryjnej. Stosuje się tu kompozyty na osnowie żywic epoksydowych z wypełniaczem aluminiowym w postaci proszku aluminium [22].

Kolejne etapy budowy formy:

- wykonanie modelu wzorcowego dowolną techniką Rapid Prototyping lub dowolną inną techniką,
- przygotowanie modelu oraz płaszczyzn podziału, zamontowanie kanałów chłodzących oraz zatopienie pierwszej połówki gniazda formującego żywicą epoksydową,
- odgazowanie w komorze próżniowej i wygrzewanie,
- przygotowanie drugiej połówki i zalanie jej żywicą epoksydową, odgazowanie w komorze próżniowej i wygrzewanie,
- obróbka cieplna kompletnej formy w temperaturze 150

3.5.4. DIRECT AIM

Metoda opracowana przez firmę 3D Systems oferuje budowę form bezpośrednio z żywic epoksydowych. Polega ona na zastosowaniu techniki budowy modelu ACES. Stosuje się w niej odległości między liniami skalowania rzędu połowy szerokości linii utwardzania. Powoduje to takie samo naświetlenie



i utwardzenie żywicy w każdym miejscu. Ta technika jest najdokładniejszą z spośród technik budowania części z mało odkształcalnych żywic.

Przy dobrze dobranym chłodzeniu można na takiej formie wykonać od 20 do 100 wyprasek w temperaturze 300°C [13].

3.5.5. DMLS

DMLS czyli Direct Metal Laser Sintering jest to metoda formowania wkładek wtryskowych poprzez bezpośrednie spiekanie proszków metalowych na urządzeniu EOSINT M 250 firmy EOS. Proces nie jest niczym innym jak bezpośrednim wykonywaniem form w metodzie SLS. Używa się w tym celu mieszaniny proszków brązu i niklu. Czyli fazy nisko i wysoko topliwej. Takie dobranie materiałów zapewnia budowę odpowiedniej, lecz porowatej struktury. Porowatość likwiduje się poprzez infiltrację struktury żywicą epoksydową. Determinuje to użycie tak wykonanej wkładki do krótkich serii [13].

W nowym urządzeniu EOSINT M 250 Xtendet używa się proszku stalowego Direct-Steel 50-V1. Wykonaną tą techniką wkładką można wykonać ponad 100000 części poprzez formowanie wtryskowe. Natomiast przez odlewanie ciśnieniowe kilkaset części.

3.5.6. Rapid Tool

RapidTool jest to metoda wykonywania form bezpośrednio poprzez spiekanie proszków metali w systemie SLS. W metodzie tej istnieją dwa rozwiązania budowy form w zależności od żywotności części. Są to RapidTool Short Run (RTSR) do mniejszej ilości wyprasek i RapidTool Long Run (RTLRL) do większej ilości wyprasek [13].

Wkładki produkowane w systemie RTSR produkują się z kompozytu Cu-PA (Proszek poliamidowy z miedzią) jako modele skorupowe. Puste przestrzenie wewnątrz wypełnia się, po wstawieniu miedzianych przewodów chłodzących, żywicą epoksydową zmieszaną z miedzią. Wytrzymują one do 400 cykli produkcyjnych.

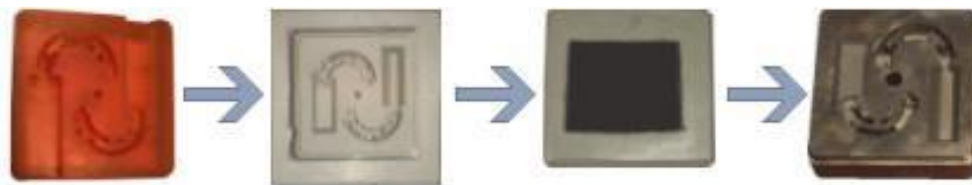
W procesie RTLRL wykorzystuje się materiał RapidSteel 2.0, który oferuje dużo lepszą dokładność

wykonania formy. Materiałem bazowym jest tu stal chromowo-niklowa a infiltratem jest brąz. Twardość takiej wkładki to 22 HRC a wytrzymałość na rozciąganie to 580 Mpa. W zależności od złożoności i rodzaju materiału wypraski można wykonać na tej wkładce od 10000 do 100000 elementów.

3.5.7. Metoda Keltool firmy 3D SYSTEMS

Proces Keltool pozwala na wykonanie wkładki formującej formy wtryskowej o twardości do 32 HRC a po hartowaniu do 50 HRC. Daje to możliwość wyprodukowania ponad miliona wyprasek. Cena to około 35% standardowej wkładki stalowej.

Wkładkę Keltool otrzymujemy w następującym procesie. Po wykonaniu modelu wkładki w procesie Stereolitografii wykonuje się formę silikonową w technice np. Vacuum Casting. Tak wykonaną formę zalewa się mieszaniną proszków stali narzędziowej i żywicy epoksydowej. Po tym następuje niskotemperaturowe wygrzewanie wkładki. W następnej fazie prowadzi się spiekanie i spiekanie z infiltracją w ciekłej miedzi w 900°C. Wkładkę taką można jeszcze obrobić mechanicznie [13].



Rys. 40. Schemat wykonania formy metodą Keltool [35]

3.5.8. Metoda QUICK CAST firmy 3DSYSTEMS

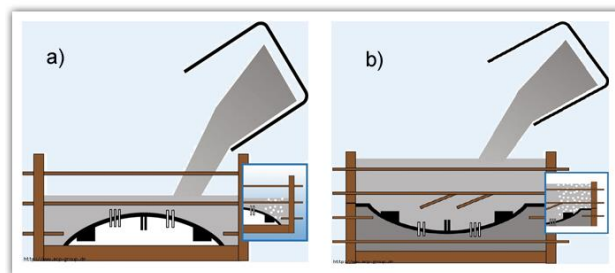
Metoda Quick Cast pozwala wykonać jednorazową formę odlewniczą do odlewania metali kolorowych (brązu i mosiądzu itp.). Do tej metody należy przygotować komorowy model SLA danego przedmiotu. Następnie następuje jego obsypanie piaskiem odlewniczym i proszkiem ceramicznym i zanurzenia w specjalnej zawieszynie. Podczas spiekania formy następuje wypalenie modelu SLA. Po zalaniu formy metalem i ostudzeniu następuje jego rozbicie i wyjęcie gotowego elementu [13].

3.5.9. Metoda EP Firmy MCP-HEK

Technika ta służy do uzyskiwania wkładek formujących do wtryskarek z materiału składającego się z proszków żywicy i aluminium. W zależności od kształtu wypraski a także parametrów wtryskiwania można osiągnąć tą metodą do kilkunastu tysięcy wyprasek. A koszt budowy formy to ok 15% kosztów wykonania jej tradycyjnymi metodami. Czas wykonania to 3 dni w przeciągu, których wykonuje się następujące czynność [46]:

Dzień pierwszy:

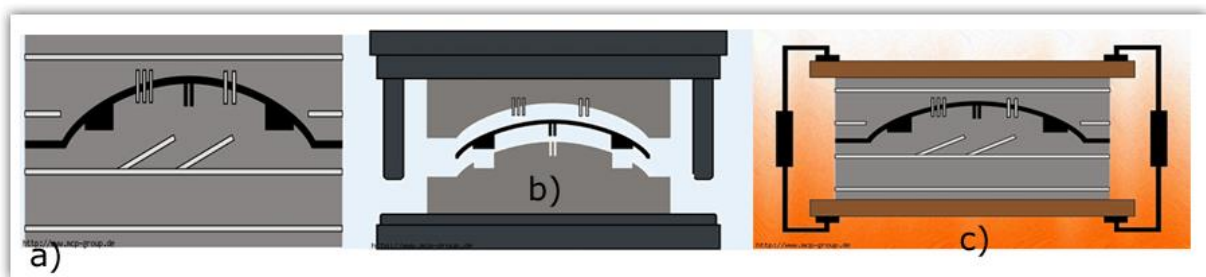
- w obudowie formy ustalany jest model wykonany dowolną techniką Rapid prototyping, montowane są przewody chłodzenia, ustalenie płaszczyzny podziału
- zalanie pierwszej połowy formy



Rys. 41. Zalanie pierwszej połowy formy (a) i zalanie drugiej połowy formy (b) [46]

Dzień drugi:

- odwrócenie pierwszej połówki formy i zalanie drugiej połowy



Rys. 42. Wyrzewnianie formy (c), gotowa forma (a) i forma zamontowana na wtryskarce (b) [46]

Dzień trzeci:

- zdjęcie obudowy formy i wygrzanie formy



Rys. 43. Przykładowa forma wykonana metodą EP[46]

3.5.10. Metoda METAL PART CASTING firmy MCP-HEK

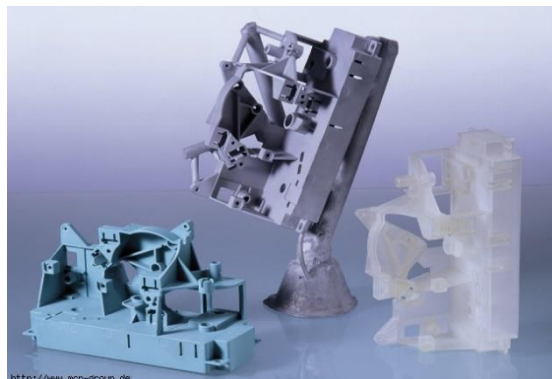
Metoda MPC daje możliwość wytworzenia jednorazowej formy do odlewania takich metali i stopów jak: cynk, aluminium, mosiądz, brąz.



Rys. 44. Urządzenie do odlewania w technologii MPC [46]

Po wykonaniu modelu na przykład poprzez stereolitografię następuje wykonanie kolejnego obiektu metodą Vacuum Casting. Tak wykonany model wkładany jest do stalowego pojemnika gdzie jest zalewany materiałem ceramicznym i umieszczany w piecu w celu zestalenia formy i wytopienia modelu woskowego.

Następnie forma jest zalewana metalem i studzona. Po czym następuje wyjęcie gotowego przedmiotu.



Rys. 45. Trzy modele od lewej: model woskowy wykonany metodą Vacuum Casting, odlew metalowy wykonany metodą MPC, model wykonany w Stereolitografii [46]

3.5.11. Metoda MCP LOW MELTING POINT ALLOYS

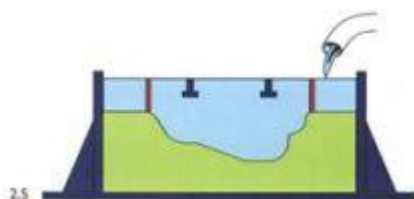
Jest to system tworzenia form do pras. Pozwalający na wykonanie od 20 do 200 wytłoczek z blachy. Forma powstaje w następujący sposób:

- zbudowanie modelu z dowolnego materiału i umiejscowienie go w ramie formy



Rys. 46. Zalanie modelu żywicą i piaskiem [46]

- zalanie modelu mieszanką żywicy i piasku kwarcowego



Rys. 47. Zalanie negatywu kwarcowo woskowego, wykonanie pierwszej połowy formy [46]

- odwrócenie formy wyjęcie modelu i przygotowanie ramy do zalewania pierwszej części matrycy materiałem MPC 137 Alloy



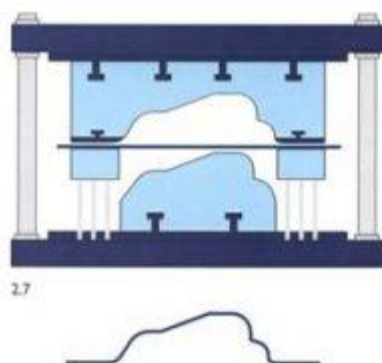
Zintegrowany
Program
Rozwoju
Politechniki
Lubelskiej

Biuro Projektu:
ul. Nadbystrzycka 38H
20 -618 Lublin

- odwrócenie matrycy i usunięcie mieszanki kwarcowo żywicznej a następnie pokrycie pierwszej części matrycy arkuszem wosku i zalanie drugiej części matrycy



Rys. 48. Zalanie drugiej połowy formy [46]



Rys. 49. Złożony zespół form (po lewej) i przykładowe elementy wykonane na takiej formie [46]

PROGRAM WIEDZA EDUKACJA ROZWÓJ



4. Komputerowo wspomagane wykonanie prototypu

Osiągnięcia współczesnej informatyki dały w ręce inżynierów potężne narzędzia ułatwiające prototypowanie. Z prototypowaniem nierozdzielnie wiąże się pojęcie „rozwój produktu”. Cykl rozwoju produktu rozpoczyna się w głowie inżyniera. Rodzi się wtedy koncepcja nowego lub ulepszanego urządzenia, które będzie w lepszy sposób zaspakajało potrzeby użytkowników. Wtedy pojawiają się różne problemy, które należy wnikliwie przeanalizować.

Cały proces dobiega końca gdy zostaje wyprodukowany w pełni sprawny prototyp, który zostaje przetestowany, a wyniki testów są zadowalające. Zadowalające to znaczy parametry techniczne, wizualne i ergonomiczne urządzenia są przynajmniej nie gorsze od poprzedniego urządzenia tego typu lub urządzenia konkurencji. W takim przypadku o sukcesie będzie decydować cena produktu [7].

Cały taki proces można podzielić na kilka etapów:

- Identyfikacja potrzeby
- Ustalenie końcowych własności eksploatacyjnych
- Projektowanie rozwiązania prototypowego
- Wytworzenie prototypu
- Projektowanie procesu weryfikacji własności eksploatacyjnych i planowanie eksperymentów
- Przeprowadzenie eksperymentów
- Ocena własności eksploatacyjnych

W pracy przedstawiono przykładowy projekt wykonania prototypu przyrządu biurowego jakim jest korektor taśmowy. W projekcie szczególny nacisk nałożono na etap projektowania przedmiotu, a także na wykonanie prototypu. Pokazane funkcjonowanie mechanizmów powstawania projektu z zastosowaniem nowoczesnych technologii. Wspomaganie komputerowe prototypowania pokazano na przykładzie programu Catia, który posłuży do budowy części modelu trójwymiarowego (moduł Part Design), do złożenia istniejących części w mechanizm i zbadania ich kompatybilności wymiarowej (moduł Assembly Design).



Program Magics, który posłużył do analiz i modyfikacji pliku *.stl części, które zostaną wykonane w jednej z technologii rapid prototyping.

4.1. Identyfikacja potrzeb

Na samym początku powstawania nowego produktu jest potrzeba. Ona to właśnie pcha do przodu cały system gospodarki i przemysłu. Zaspokojeniem potrzeby jest obiekt techniczny charakteryzujący się odpowiednimi własnościami.

Po analizie możliwości wytwórczych i stanu zapotrzebowania dział firmy odpowiedzialny za marketing na podstawie analiz rynkowych przygotowuje projekt produktu.

Aby prawidłowo zidentyfikować potrzebę wykonania takiego urządzenia należy zrobić jej charakterystykę zawierającą:

- ➔ Zakres potrzeby - w tym punkcie należy określić profil potencjalnego nabywcy i użytkownika urządzenia, będą to głównie ludzie młodzi uczący się w przedziale wiekowym od 7 do 25 lat, od ucznia szkoły podstawowej do studenta, ale także osoby pracujące w biurach.
- ➔ Pierwsze korektory były to korektory w długopisie, z wkładem w postaci ciekłej farby, projektowane urządzenie będzie posiadało rolkę z taśmą pokrytą substancją pokrywającą, która będzie odrywać się od papierowego nośnika przy kontakcie z kartką.
- ➔ Produkt ten ma służyć do zakrywania błędów w notatkach i innych pismach, tekst pokryty farbą zamiast skreślony wygląda estetyczniej i poprawia wygląd pracy (sprawozdania czy klasówki), niestety w części przypadków używanie korektora jest nieakceptowane.
- ➔ Przewagą korektora taśmowego nad długopisowym polega na tym, iż наносzony materiał buduje równą, cienką i prostą warstwę, która szybciej zasycha, korektor taśmowy eliminuje też takie zagrożenie jak rozlewanie się farby i przypadkowe zabrudzenia, minusem jest krótszy okres przydatności.
- ➔ Potrzeba zostanie zdezaktualizowana w przypadku wynalezienia i rozpowszechnienia lepszych środków maskujących błędy.

PROGRAM WIEDZA EDUKACJA ROZWÓJ



Rzeczpospolita
Polska

Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny





4.2. Ustalenie własności eksploatacyjnych

W przypadku opracowywania obiektów złożonych opracowuje się rozwiązania wariantowe całego zespołu, podzespołów lub pojedynczych elementów. Następnie następuje wybór odpowiedniego wariantu. Ma to związek z osiągnięciem kompromisu pomiędzy kosztami opracowania a możliwością popełnienia błędu w prognostycznej ocenie wariantu. Czym później wybierzemy wariant tym wyższe będą koszty projektu i mniejsza możliwość błędu [7].

W tym celu konieczne jest przeanalizowanie przyjętych na etapie sformułowania zadania założeń oraz możliwości osiągnięcia wymaganego poziomu własności obiektu. Zagadnienia prognozowania własności eksploatacyjnych obiektu oraz ich zmiany w czasie wymagają przewidywania działania obiektu na podstawie jego modelu. Nowoczesna technologia informatyczna pozwala na przeanalizowanie części własności już na etapie projektowania (prototypowanie wirtualne).

W oprogramowaniu inżynierskim zaczynamy od tworzenia modelu 3D i na podstawie tego modelu program generuje nam rysunki 2D, w których wybieramy potrzebne rzuty. Program sam generuje wymiarowanie, nam pozostaje modyfikacja ich. W wersjach zaawansowanych systemy te oferują między innymi moduły umożliwiające optymalizację konstrukcji na podstawie: analizy strukturalnej naprężeń, analizy kinematycznej wraz z symulacją dynamiczną, analizy zjawisk termicznych oraz odpowiedzi obiektu na obciążenia dynamiczne.

Po narysowaniu szkiców podstawowych i określeniu metody działania podzespołów i zależności między częściami należy określić ich własności eksploatacyjne czyli:

- funkcjonalność- przystosowanie do spełniania określonych funkcji,
- trwałość - okres w jakim spełnianie funkcji przez urządzenie nie będzie budziło żadnych zastrzeżeń,
- ergonomiczność i obsługiwalność - przystosowanie do cech psychomotorycznych użytkownika i określenie łatwości użytkowania, naprawy i eksploatacji,
- ekologiczność - określenie wpływu urządzenia na środowisko.



Przechodząc do określenia przyszłych własności eksploatacyjnych przedmiotu badań czyli korektora zaczęto od ekologiczności. Ekologiczność w tym przypadku zawęży się tylko do późniejszej utylizacji mechanizmu ponieważ jako urządzenie nie generuje zanieczyszczeń. Trwałość produktu określono na czas zużycia jednej rolki materiału pokrywającego. To jest 12 metrów taśmy. Takie postawienie trwałości odnosi się do kół zębatach, które do tego czasu nie mogą w żaden sposób ulec uszkodzeniu. Jeśli chodzi o obudowę dopuszczalne są pęknięcia na powierzchni wynikające ze zbyt dużej siły przykładanej przez użytkownika. Ostatnim elementem jest końcówka, po której ślizga się taśma. Za jej pomocą dociskamy taśmę do podłoża i наносimy materiał. Trwałość końcówki musimy określić w ilościach użyć korektora, a wytrzymałość musi być przeanalizowana statyczna (siła docisku) jak i zmęczeniowa ilość docisków, liczbę cykli obciążenia możemy oszacować.

Funkcjonalność elementu kinematycznego tego rozwiązania ma polegać na równoczesnym pokrywaniu kartki papieru farbą i nawijaniu zużytej taśmy papierowej na oś poprzez mechanizm kół zębatach. Podczas przesuwania po kartce papieru końcówki rozwija się szpulę z taśmą. Szpula znajduje się na osi jednego koła zębatego. To właśnie koło porusza drugą szpulę, na które nawijana jest zużyta taśma. Przełożenie i średnice szpul są obliczone w ten sposób, aby taśma była napinana.

Ergonomiczność i obsłużalność są to cechy połączone z designem obudowy. Należy wypracować kompromis pomiędzy zachęcającym wyglądem a dopasowaniem do dłoni. Duże znaczenie będzie miało również położenie końcówki. Nie powinna ona podczas korekcji wymuszać wygięcia nadgarstka w żadną ze stron.

4.3. Kształtowanie i modelowanie produktu

Wygląd produktu został zaczerpnięty z podobnego obiektu będącego w sprzedaży. Mają one pewne podobieństwa wyglądu i mechanikę opartą na tym samym pomysle. Jednak najważniejszy w tym przypadku będzie wygląd zachęcający do kupna i na nowoczesnym wyglądzie skoncentruje się projektant.

Całość produktu składa się z 5 części:

- Obudowy lewej. Obudowa 1.

PROGRAM WIEDZA EDUKACJA ROZWÓJ



Rzeczpospolita
Polska

Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny





- Obudowy prawej. Obudowa 2.
- Wałka z dużym kołem zębatym i osią, na którą osadza się rolkę z materiałem. Koło 1.
- Wałka z małym kołem zębatym z osią do zbierania odpadów. Koło 2.
- Końcówki dociskowej korektora.

Wszystkie elementy zostały opracowane w programie Catia V5 w module Part Design. Możliwości tego modułu okazały się wystarczające do zaprojektowania wszystkich części. Moduł ten oprócz całego złożonego asortymentu poleceń budowy modelu ma dosyć ciekawe narzędzia wizualizacji. 7 opcji renderingu w tym render według własnych ustawień i render z użyciem materiału, który możemy dobrać dla naszego elementu spośród dużej gamy dostępnych w programie. Program umożliwia nam robienie albumu zdjęć i zrzutów bezpośrednio z ekranu roboczego, a także robienie filmu demonstracyjnego. Do tego istnieje możliwość dowolnego manipulowania światłem. Na kolejnych rysunkach przedstawiono modele cyfrowe wykonane w programie Catia elementów korektora.

PROGRAM WIEDZA EDUKACJA ROZWÓJ



Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny



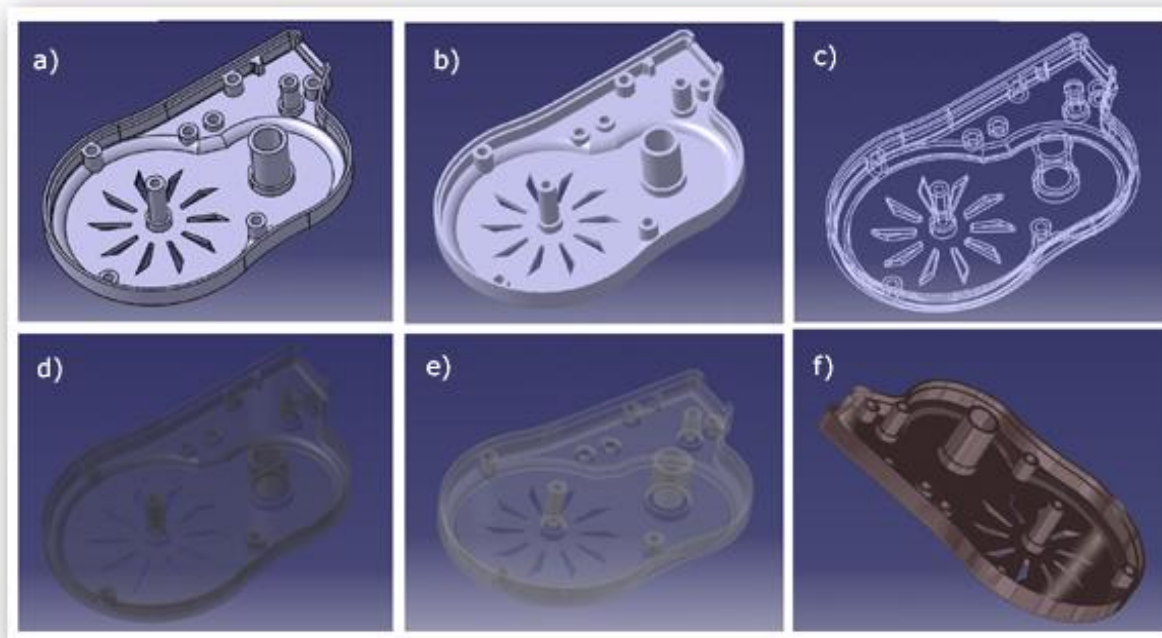


www.pl2022.pollub.pl
e-mail: pl2022@pollub.pl



Zintegrowany
Program
Rozwoju
Politechniki
Lubelskiej

Biuro Projektu:
ul. Nadbystrzycka 38H
20 - 618 Lublin



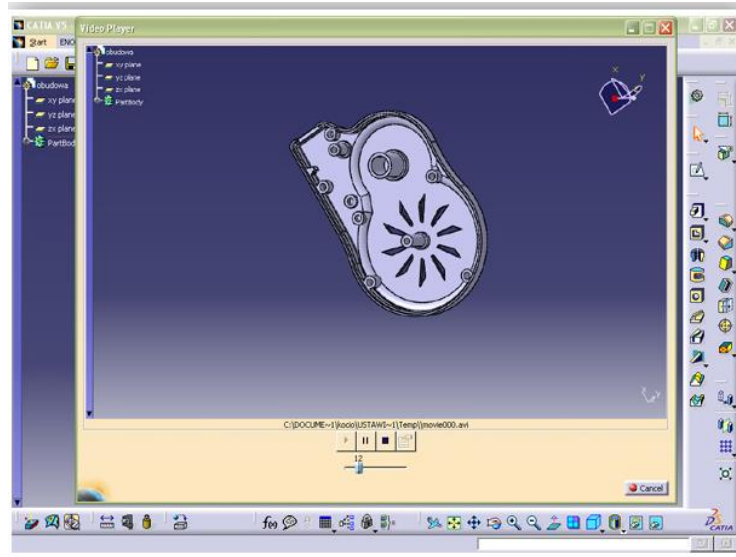
Rys. 70. Wyniki wizualizacji w programie CATIA V5: widok standartowy (a), widok bez widocznych krawędzi (b), siatka krawędzi (c), wizualizacja z materiałem plexiglass (d), plexiglas w zmienionym oświetleniu (e), zastosowanie materiału brąz (f)

PROGRAM WIEDZA EDUKACJA ROZWÓJ



Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny

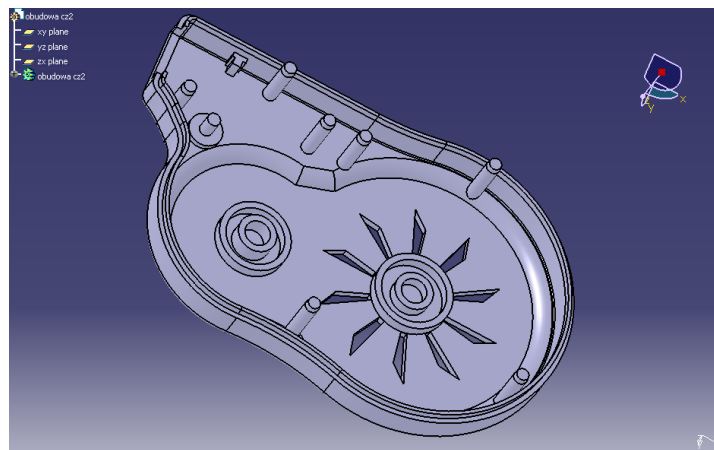




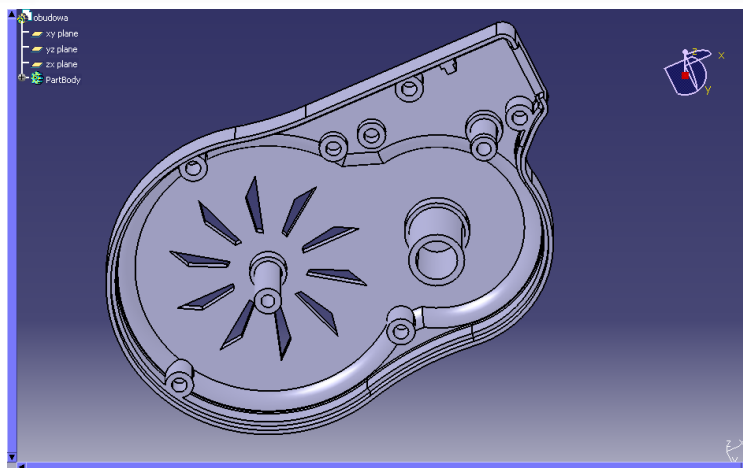
Rys. 71. Odtwarzanie wcześniej nagranych klipu prezentacyjnego w programie CATIA V5

4.3.1. Dokumentacja 3D

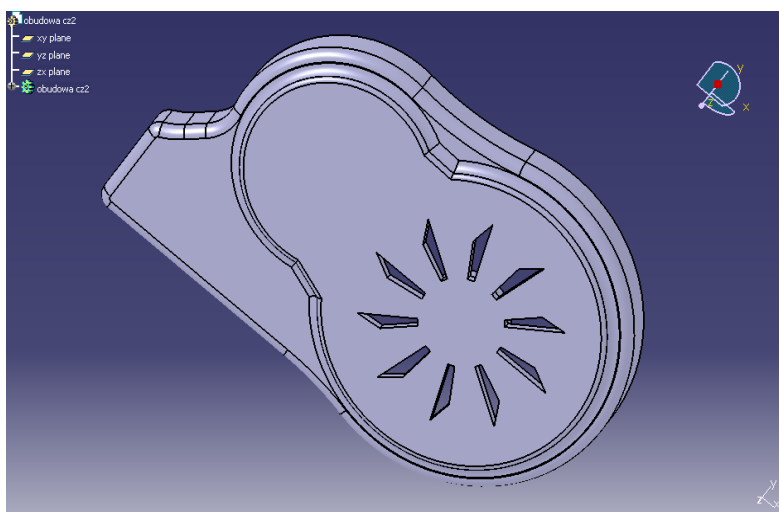
W programie CAD zostały stworzone modele bryłowe wszystkich części zespołu korektora. Efekty prac projektowych przedstawiono na kolejnych rysunkach.



Rys. 72. Model lewej części obudowy, widoczne kolki ustalające



Rys. 73. Model prawej części obudowy

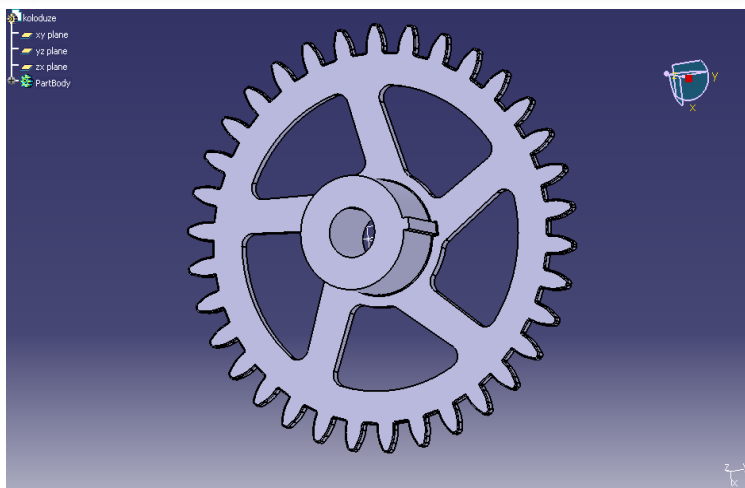


Rys. 74. Widok zewnętrznej części obudowy (dla obu połówek jest identyczny)

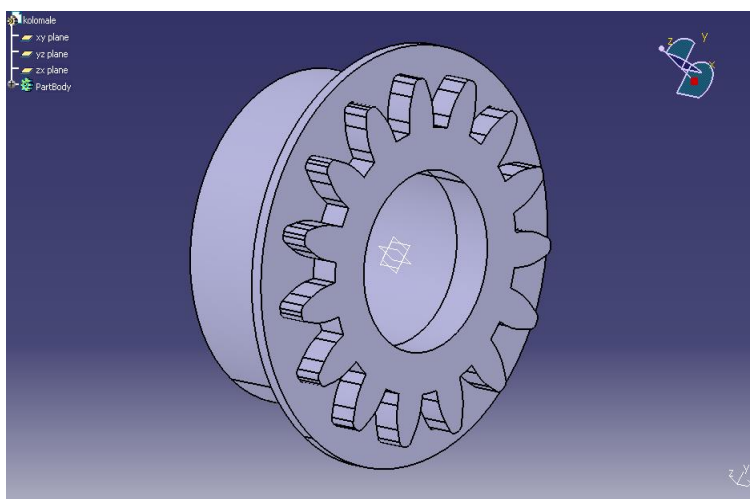


Zintegrowany
Program
Rozwoju
Politechniki
Lubelskiej

Biuro Projektu:
ul. Nadbystrzycka 38H
20 -618 Lublin



Rys. 75. Model dużego koła zębatego, ma wałku widoczny wypust do zamocowania rolki z taśmą



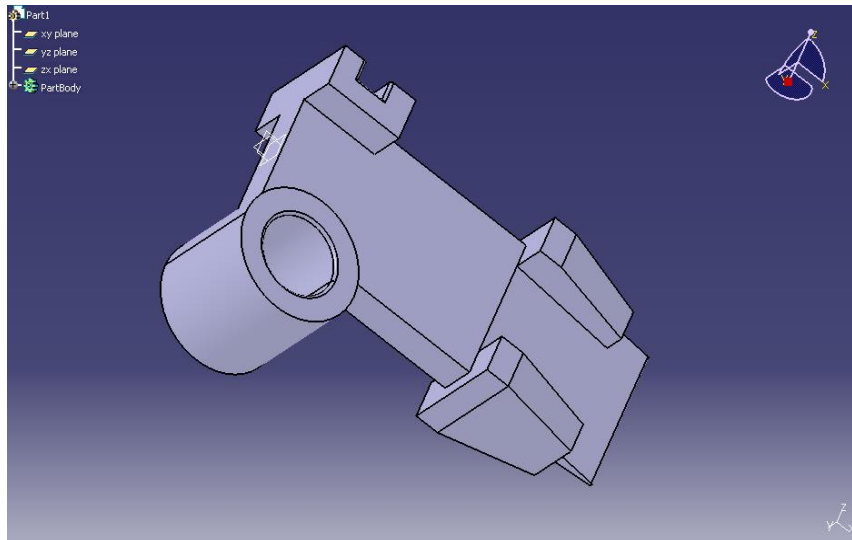
Rys. 76. Model małego koła zębatego

PROGRAM WIEDZA EDUKACJA ROZWÓJ



Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny



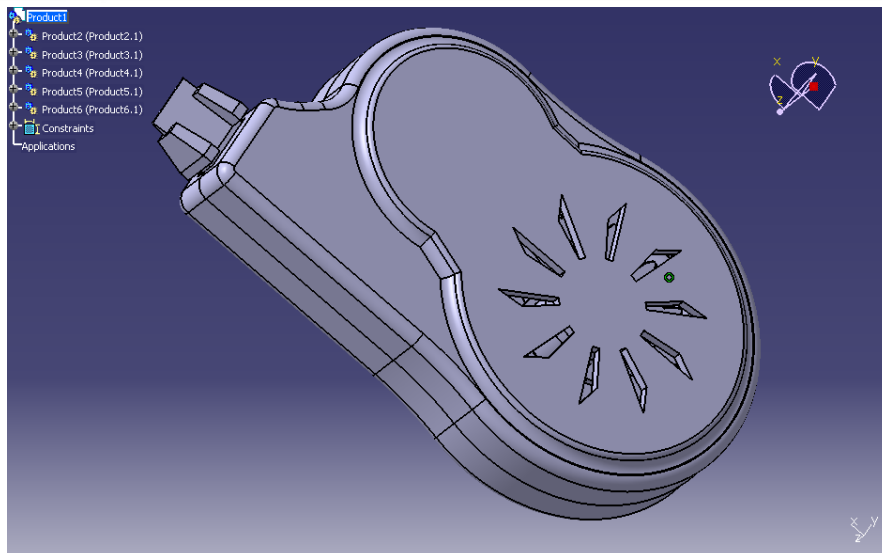


Rys. 77. Model końcówki korektora

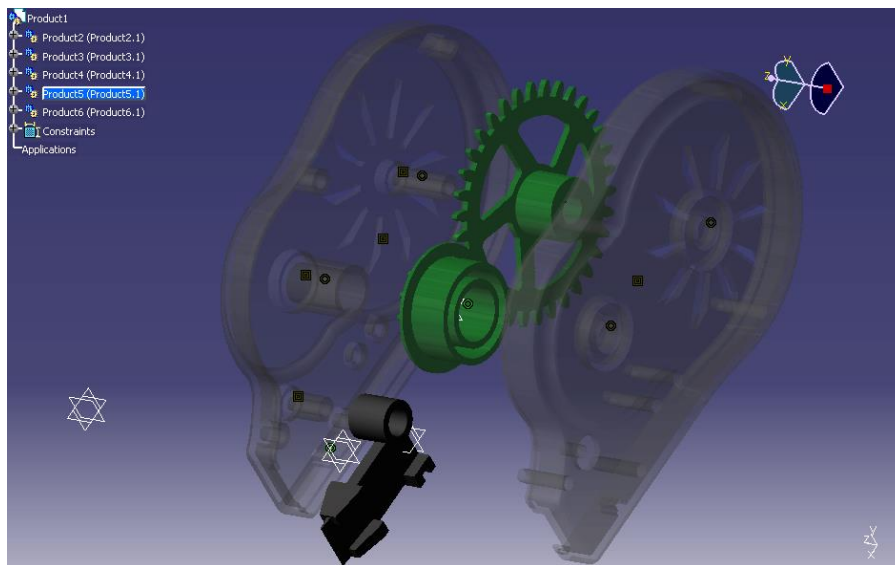
4.3.2. Złożenie modelu i analiza konstrukcji

W module tym można przeprowadzić pierwsze testy wirtualnego prototypowania. Po nadaniu więzów, zgodnych z rzeczywistym złożeniem zespołu, na wszystkich częściach została przeprowadzona analiza kolizyjności elementów zespołu. Okazało się, że kołek mocujący końcówkę wchodził w drugą część obudowy. Po tej analizie błąd został wykluczony. W ten prosty sposób można zaobserwować korzyści płynące z wirtualnego prototypowania. Błąd ten po wytworzeniu prototypu stworzyłby dodatkowe koszty opracowania urządzenia.

Ponadto na rysunku 79 zawarto rozłożony zespół części korektora, który może służyć jako instrukcja montażowa urządzenia.



Rys. 78. Widok ogólny złożenia w module AsemblyDesign programu CATIA V5



Rys. 79. Widok rozłożonego korektora jako schemat montażowy AsemblyDesign programu CATIA V5



www.pl2022.pollub.pl
e-mail: pl2022@pollub.pl

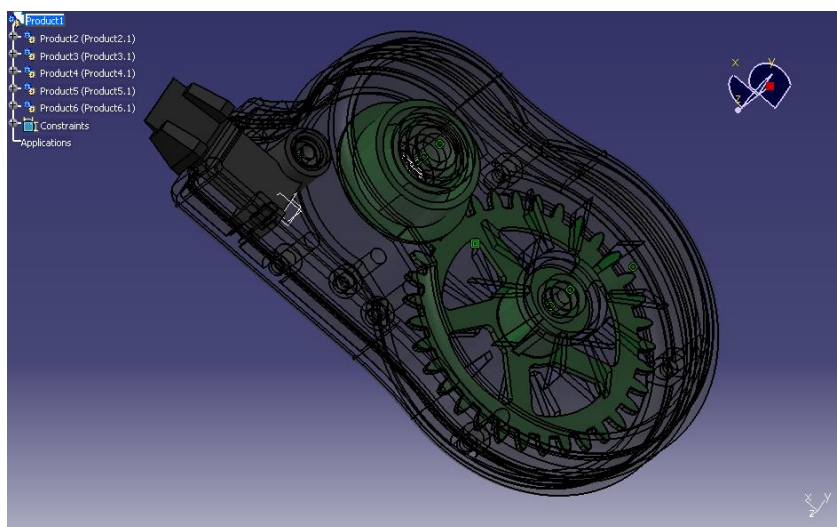


Zintegrowany
Program
Rozwoju
Politechniki
Lubelskiej

Biuro Projektu:
ul. Nadbystrzycka 38H
20 -618 Lublin



Rys. 80. Widok ogólny złożenia w module AssemblyDesign programu CATIA V5 z zastosowaniem przypisania materiałów do części urządzenia



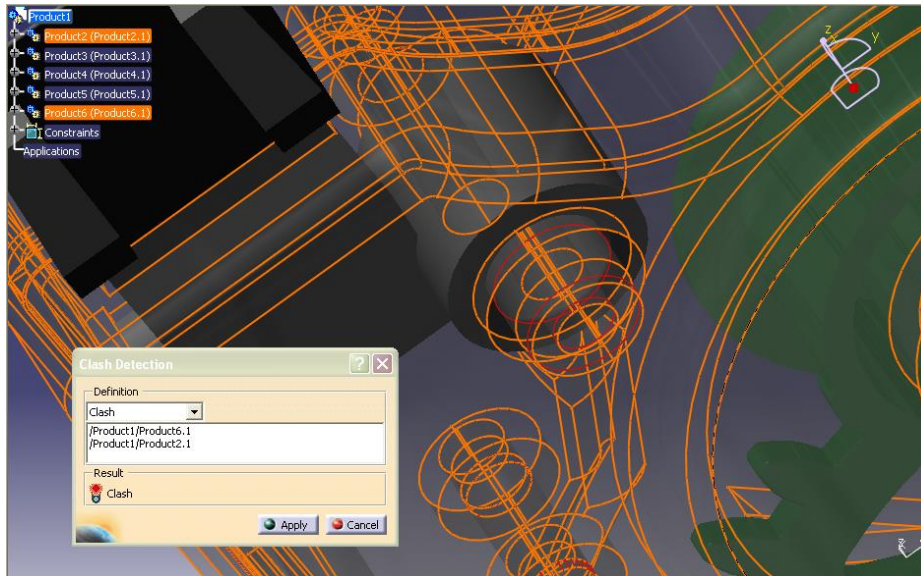
Rys. 81. Widok ogólny złożenia z przypisanymi materiałami i pokazanymi krawędziami

PROGRAM WIEDZA EDUKACJA ROZWÓJ



Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny





Rys. 82. Błąd konstrukcji wykryty podczas analizy kolizji

4.3.3. Dokumentacja konstrukcyjna: rysunki wykonawcze 2D

Modele 3D wykonane w programie CAD posłużyły do automatycznego wygenerowania rysunków wykonawczych poszczególnych części a także do wygenerowania plików *.stl potrzebnych później do opracowania programu sterującego urządzeniem RP.

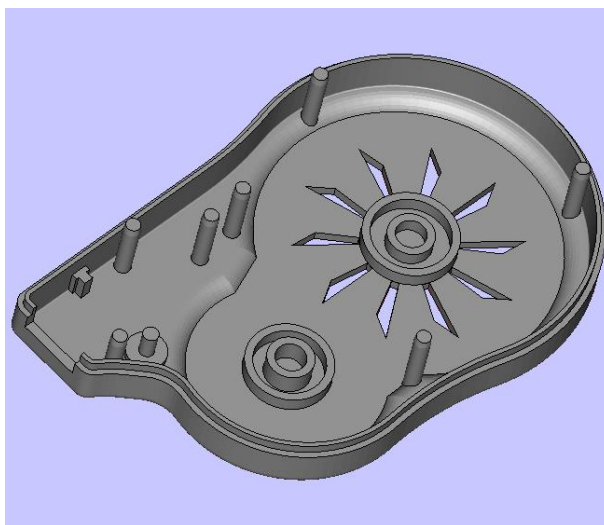
4.3.4. Edycja i manipulacja plików *.stl

Do analizy plików *.stl pochodzących z programu CATIA V5 posłużył program Magics RP Version 11.0. Jest to potężny i dość prosty w obsłudze program. Program służy do edycji, naprawy, modyfikacji i przygotowania modelu do drukowania w metodach RP. Już przy pierwszym uruchomieniu intuicyjnie można wykonać większość podstawowych operacji. Sposób manipulacji modelem jest bardzo prosty.

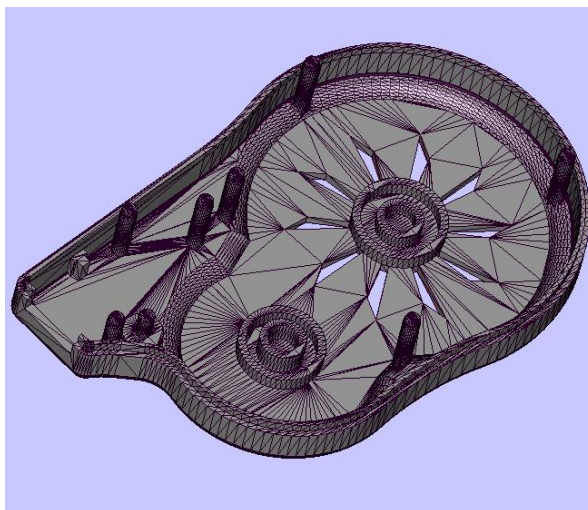
Po zaimportowaniu pliku obudowy korektora i porównaniu z modelami CAD 3D nasuwają się wnioski:

- wielkość pliku *.stl jest zależna od dokładności odwzorowania modelu,

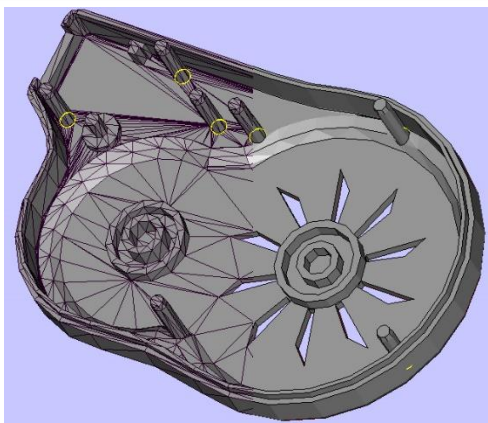
- dokładność modelu w pliku *.stl można opisać ilością trójkątów użytych na wygenerowanie powierzchni,
- istnieje zależność stopnia dokładności modelu *.stl od renderingu w programie 3D podczas zapisywania pliku,



Rys. 83. Model zapisany do pliku *.stl przy dużej dokładności modelu w programie Catia



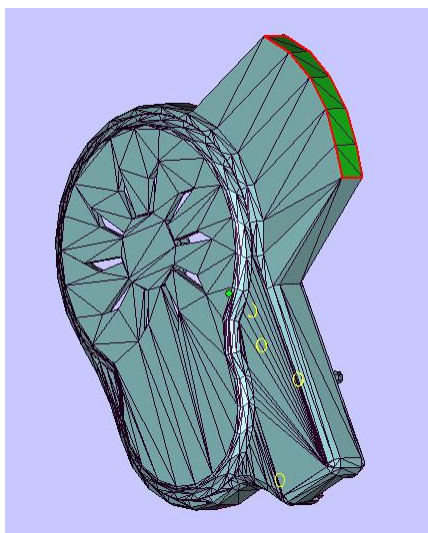
Rys. 84. Model zapisany do pliku *.stl przy dużej dokładności modelu w programie Catia. Widok uwzględniający siatkę trójkątów



Rys. 85. Model zapisany do pliku *.stl przy niskiej dokładności modelu w programie Catia. Połowa modelu pokryta siatką trójkątów

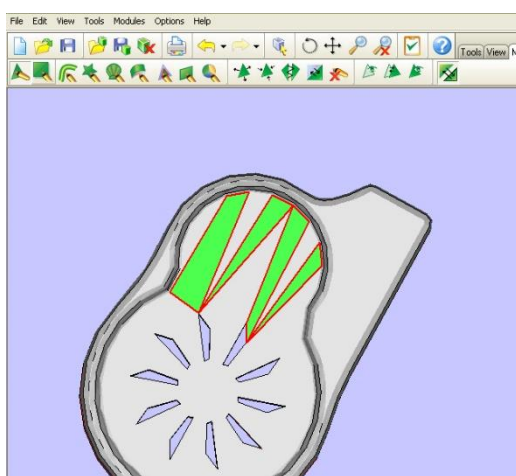
Plik znajdujący się na rysunku 84 zajmuje 4315 kb jest to plik o dużej dokładności. Natomiast plik z modelem na rysunku 85 zajmuje niespełna 800 kb. Na obydwu rysunkach widoczna jest budowa modelu z siatkami trójkątów.

Po otwarciu pliku możemy wykonać na nim kilka operacji CAD, wyciągnięcia, rowki, funkcje offset i hollow.

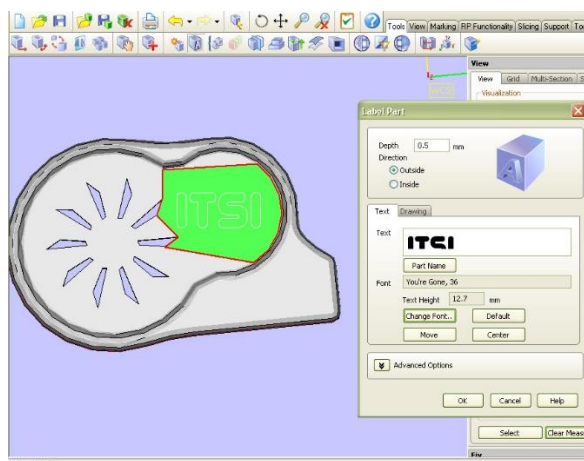


Rys. 86. Wyciągnięcie jednej ze ścianek na 20 mm w programie Magics

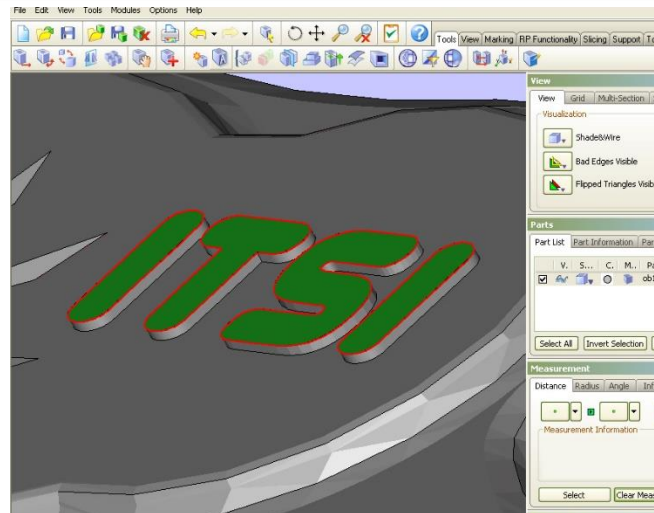
Każda operacja wiąże się ze wskazaniem trójkątów, których ma ona dotyczyć. Kolejną funkcją programu jest labelling czyli nanoszenie napisu na powierzchnię modelu. Operację wykonuje się w sposób szybki i intuicyjny. Pierwszym etapem jest zaznaczenie siatki trójkątów (powierzchni), na której ma się znajdować napis. Następnie ustalamy własny napis w miejscu przeznaczenia, dobieramy rodzaj czcionki i grubość napisu i gotowe. Wygenerowany w ten sposób napis jest integralną częścią modelu.



Rys. 87. Zaznaczanie trójkątów na płaszczyźnie w programie Magics

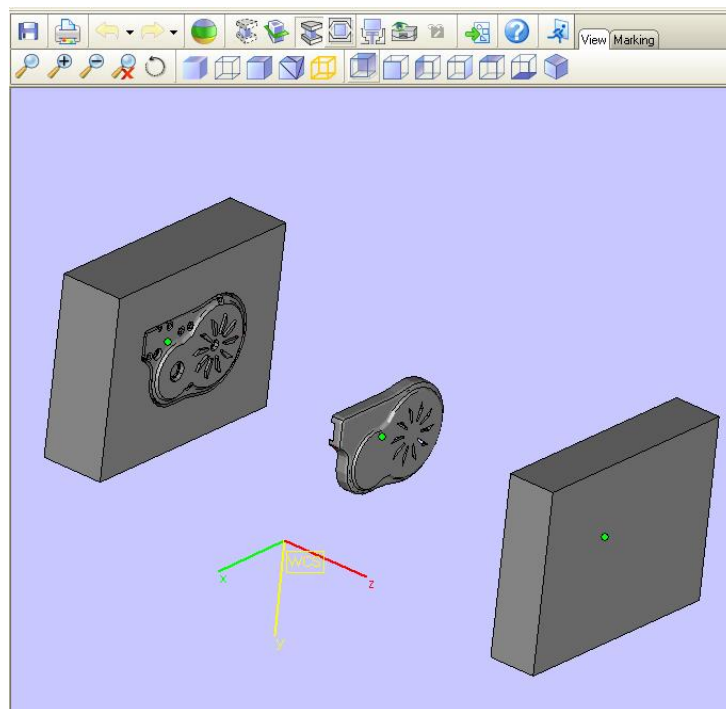


Rys. 88. Ustalanie napisu, wybór czcionki i definiowanie grubości napisu w programie Magics



Rys. 89. Widok gotowego napisu na obudowie korektora

W Magics można również w sposób automatyczny wygenerować formę do wybranego przez nas modelu.

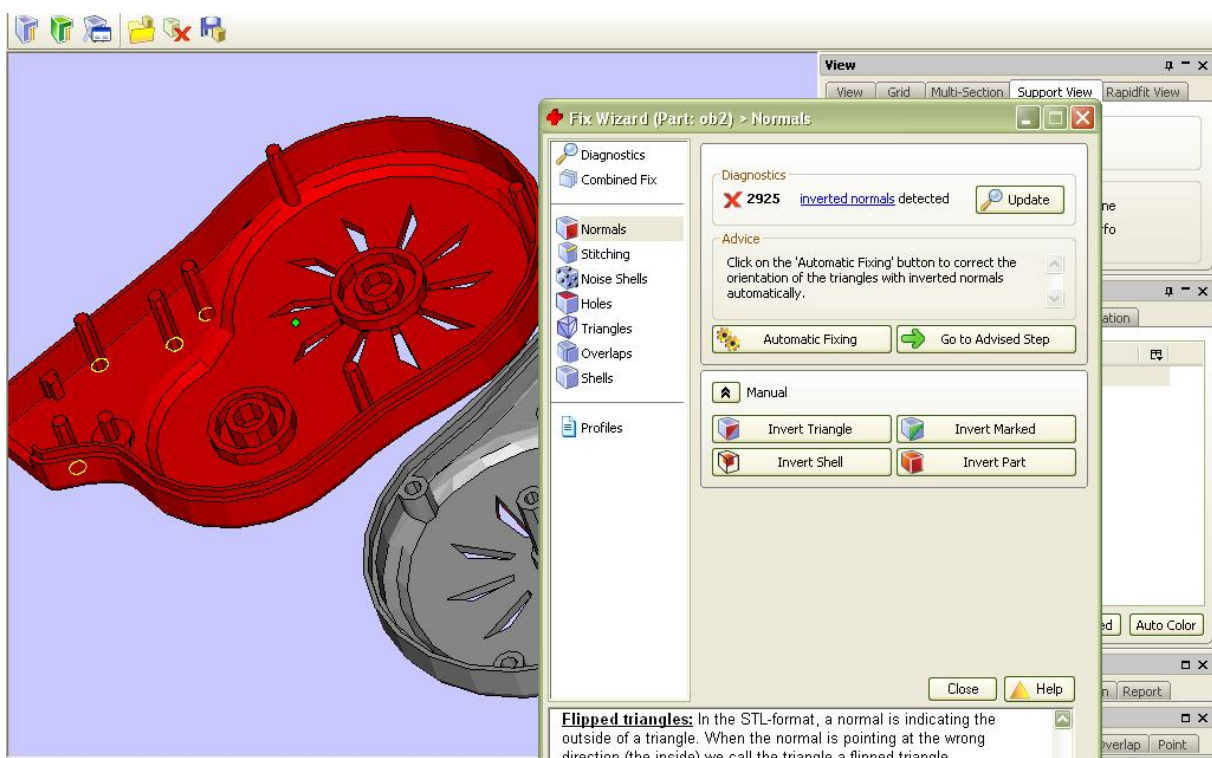


Rys. 90. Poglądowy widok formy wygenerowanej automatycznie w programie Magics

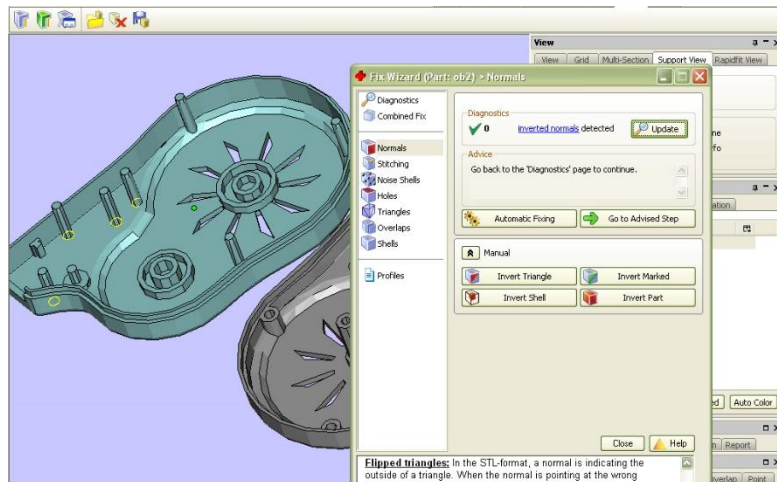
4.4. Przygotowanie modelu 3D do druku w technologii RP

Proces przygotowania druku warto zacząć od sprawdzenia błędów modelu *.stl ponieważ jego nieprawidłowa konstrukcja może skutkować błędami podczas tworzenia prototypu. Po uruchomieniu modułu Fix Wizard program automatycznie wykrywa błędy.

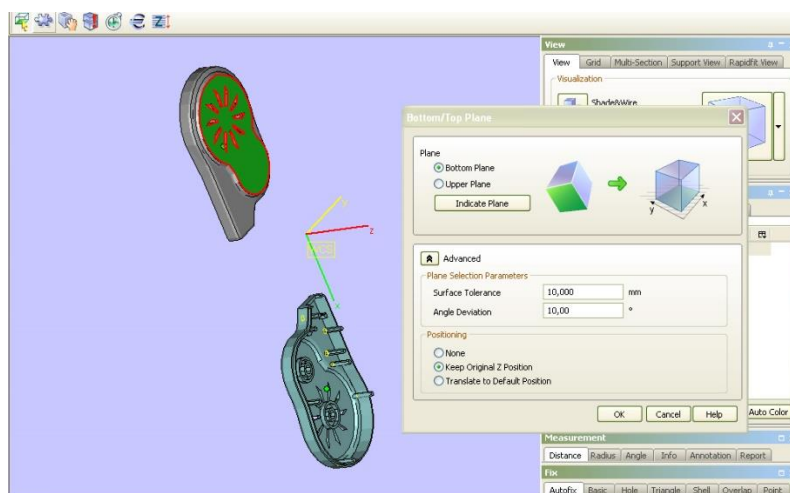
W przypadku dwóch części obudowy korektora program wykrył 2925 błędów polegających na odwróceniu wektorów normalnych w trójkątach. Błędy wynikają z wcześniejszego etapu projektowania, gdzie druga połowa obudowy została wykonana jako mirror (odbicie lustrzane) pierwszej. Liczba błędów wielka ale nie dla tego programu. Wystarczy wcisnąć przycisk Automatic Fixing aby wszystkie błędy zniknęły. Oprócz tych błędów wykryto błędy złego przypisania krawędzi, a także pokrywania się trójkątów.



Rys. 91. Wykrywanie błędów w programie magics. W kolejnych zakładkach analizowane są inne rodzaje błędów. Kolorem czerwonym zaznaczono błędne trójkąty



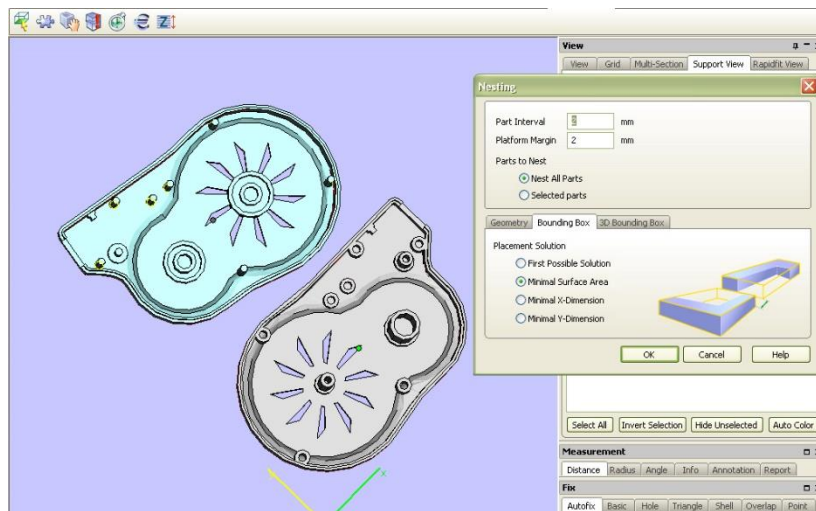
Rys. 92. Automatycznie naprawione błędy i widok naprawionego elementu.



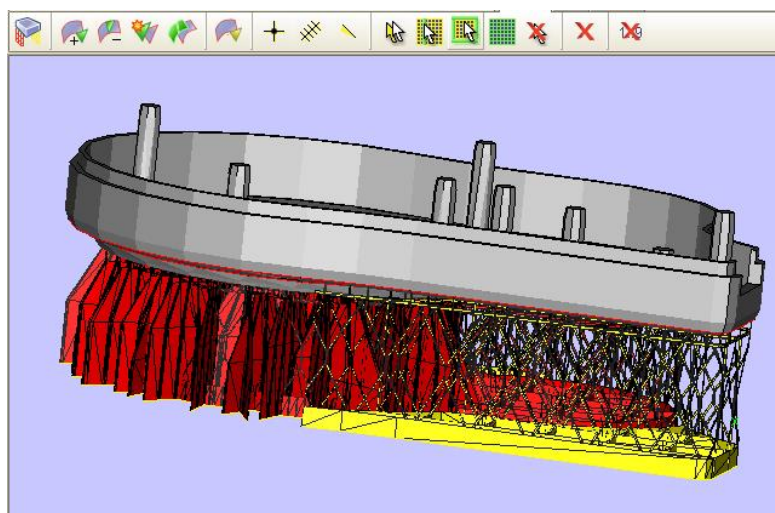
Rys. 93. Automatyczne wyrównanie zaznaczonej płaszczyzny.

Kolejną operacją jest ustalenie elementów i umieszczenie na płaszczyźnie roboczej. W tym celu należy zdefiniować powierzchnie modelu, od których rozpocznie się proces. W dalszej kolejności wykonujemy operacje zmniejszającą ilość zajmowanego miejsca w przestrzeni przez modele, które chcemy wydrukować. Po kolei zaznaczamy płaszczyzny i definiujemy ich przyleganie do płaszczyzny. A następnie uruchamiamy moduł minimalizujący zajmowane miejsce i zaznaczamy opcję „minimalize surface area”.

Końcowym etapem jest generowanie podpór do modelu. W programie istnieje biblioteka podpór, które można dobrać według indywidualnych potrzeb. Do wygenerowania podpór użyto biblioteki podpór z urządzenia firmy 3D Systems SLA 7000. Po tych zabiegach można obliczyć czasy przygotowania prototypu korzystając oczywiście z danych umieszczonych już w programie.



Rys. 94. Grupowanie i zagnieżdżanie elementów za pomocą narzędzia do minimalizacji zużytej powierzchni



Rys. 95. Generowanie podpór w programie Magics

Build time estimation

Select Machine: 3D Systems SLA 7000 (mm) Lightweic

Material: none

Comments: Feel free to change the SG-parameters

Method: SLA parameters

Calculate

Scan Time

Part :	0 hrs 30 min
Support :	0 hrs 6 min
Recoat time:	0 hrs 51 min
Total Time:	1 hrs 28 min

OK Cancel Help

Rys. 96. Automatyka kalkulacja czasów potrzebnych do zbudowania modelu

4.5. Wybór metody i wykonanie prototypu

Po analizie możliwości metod dostępnych na rynku, dokładności o trzymywanych w czasie procesu i cen materiałów, zdecydowano wykonać model w technologii PolyJet. Wytworzenie pozostałych elementów, czyli kółek zębatych i końcówki korektora, okazało się być nie do końca pewne. Bowiem technologia 3DP nie oferuje na tyle wytrzymałych i dokładnych modeli, aby prototyp mógł spełniać swoje funkcje, a nawet nie było pewności co do prawidłowego wyjęcia tych elementów z komory urządzenia.

Biorąc pod uwagę różnicę ceny została wybrana technologia PolyJet. Cena w tym przypadku była prawie dwa razy wyższa, lecz dokładność metody i właściwości fizyczne materiału FullCure przesądziły o wykonaniu prototypowych części obudowy właśnie w tej metodzie.



Zintegrowany
Program
Rozwoju
Politechniki
Lubelskiej

Biuro Projektu:
ul. Nadbystrzycka 38H
20 - 618 Lublin

Nazwa pliku:	Obudowa
Technologia wykonania:	system Objet - technologia PolyJet
Rodzaj materiału	FullCure720
Zużycie materiału	25,00 g
Zużycie komponentu wspierającego	33 g
Czas wydruku	01:07 hh:mm
Tryb wydruku	HS
Czas realizacji	2-3 dni od dnia akceptacji kalkulacji kosztów wydruku
Koszt wydruku modelu (netto):	€ 63,33

Rys. 97. Oferta wykonania modelu w technologii PolyJet zawierająca czas i koszt wydruku

Nazwa pliku:	obudowa
Technologia wykonania:	system Z-Corp - technologia 3DP
Pole powierzchni	172,24 cm ²
Objętość	9,92 cm ³
Materiał	zb130
Czas wydruku	00:23 hh:mm
Monochrom czy kolor	monochrom
Infiltrator	z-bond 101
Czas realizacji	4 dni od dnia akceptacji kalkulacji kosztów wydruku
Koszt wydruku modelu (netto):	€ 34,00

Rys. 98. Oferta wykonania modelu w technologii 3DP zawierająca czas i koszt wydruku

Dwa elementy składowe obudowy zostały wykonane z żywicy FullCure720 w trybie najwyższej dokładności. Cena obejmowała post processing obu elementów przy użyciu wody pod ciśnieniem.

PROGRAM WIEDZA EDUKACJA ROZWÓJ



Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny





Rys. 99. Dwie połowy obudowy korektora wykonane w procesie PolyJet z materiału FullCure 720

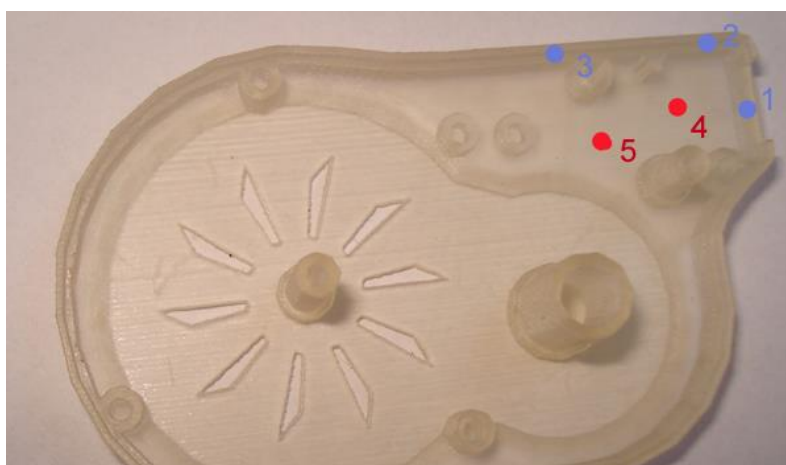
4.6. Analiza wykonania modelu fizycznego korektora w procesie POLYJET

Technologia PolyJet jest jedną z najdokładniejszych metod RP. Analiza wykonania modelu sprowadza się do oceny powierzchni i oceny wymiarów modelu.

Jedną z większych wad Rapid Prototypingu jest niska jakość powierzchni. Analizując model obudowy wykonano pomiar chropowatości na urządzeniu Pethometer M2. Dwoma najważniejszymi wskaźnikami chropowatości są R_a i R_z . Dla modelu obudowy korektora wykonano badanie chropowatości na linii przebiegającej przez płaszczyznę podstawową obudowy. Niestety urządzenie nie było w stanie zbadać chropowatości na profilu bocznym. Już przez obserwację wzrokową można powiedzieć że chropowatość boczna czyli ta chropowatość, która powstała na skutek budowy kolejnych warstw modelu (rys. 102) jest o wiele większa niż ta na badanej powierzchni. Wyniki chropowatości dla badanej powierzchni okazały się bardzo dobre, współczynnik $R_a = 4.7 \mu\text{m}$. pozwala zakwalifikować powierzchnię do 5 klasy chropowatości.

Następnie skupiono się na pomiarach zgodności wymiarów. Pierwszym krokiem było zmierzenie grubości ścianek. Pomiaru tego dokonano w 5 miejscach. Wielkości w punktach oznaczonych na rysu 103 czerwonymi kropkami (pomiar 4 i 5) wykonano mikrometrem elektronicznym, natomiast pomiary w punktach oznaczonych na niebiesko wykonano za pomocą suwmiarki. Odpowiednio pomiary wynosiły: 1:

$h=1.29\text{mm}$, 2: $h=1.33\text{mm}$, 3: $h=1.32\text{mm}$, 4: $h=1.317\text{mm}$, 5: $h=1.332\text{mm}$. Wymiar według projektu wynosił $h=1.3\text{ mm}$, uzyskane więc wartości przy założeniu luzu montażowego $0,1\text{ mm}$ spełniają wymagania projektu. Dokonano też pomiaru wysokości kołka łączącego obudowy i wyrównującego taśmę. Wymiar nominalny to $10,7\text{ mm}$ wymiar w modelu to $10,62\text{mm}$. Taka odchyłka mogła nastąpić poprzez nadmierne wtapienie się kolejnych warstw w poprzednie lub po prostu była wymuszona poprzez nadanie danej grubości warstwy.



Rys.103. Miejsca pomiarów grubości ścianki





Rys. 105. Pomiar wysokości bolca montażowego mikrometrem

W ten oto sposób otrzymano prototyp nowego urządzenia, który powstał dzięki zastosowaniu wsparcia technicznego w postaci zaawansowanego programu CAD oraz technik szybkiego wytwarzania prototypów jakimi są metody przyrostowe druku 3D.

5. Podsumowanie

Prototypowanie stało się dziedziną, w której dokonano w ostatnich dziesięcioleciach wielkiego przełomu. Szybki proces projektowy jest istotny z tego względu, iż na rynku liczą się tylko produkty zaawansowane technologicznie z nowoczesnym i modnym wyglądem. Dlatego tworzenie prototypów na każdym etapie projektowania jest takie ważne. Zagadnienie prototypowania nie jest identyczne dla wszystkich typów działalności produkcyjnej. Producent telefonów będzie wykonywał więcej prototypów swoich urządzeń niż producent samochodów czy samolotów. Dzieje się tak ze względów ekonomicznych i czasowych. W przemyśle samochodowym, lotniczym, górniczym, kolejowym wyprodukowanie prototypu wiąże się z ogromnymi nakładami finansowymi i dużą stratą czasu. W tych gałęziach z powodzeniem stosuje się techniki wirtualnej symulacji właściwości technicznych maszyn. Techniki te zwane wirtualnym prototypowaniem pozwalają na wykonanie większości testów wytrzymałościowych, ergonomicznych i funkcjonalnych na wirtualnych modelach 3D maszyn bez użycia prototypów fizycznych i sprzętu. Wirtualne prototypy mają dużo zalet: wybudowanie kosztuje tylko tyle ile praca inżyniera, ewentualne błędy konstrukcyjne usuwane są bez ponoszenia dużych kosztów już na początku procesu konstrukcyjnego, istnieje możliwość zbudowania kilku wersji urządzenia i wyboru najlepszego. Testy na wirtualnych prototypach są bardzo wiarygodne, a ich zakres obejmuje nawet testy zderzeniowe samochodów.

Ale każdy producent stanie w końcu przed wyborem metody w której zostanie wyprodukowany prototyp zaprojektowanego urządzenia. I tu wybór może paść albo na konwencjonalną obróbkę lub na szybkie prototypowanie (Rapid Prototyping). Sposoby te można porównać ze sobą stosując kilka kryteriów określających wykonywany model. Pierwszą z nich będzie wielkość serii wykonanych urządzeń. Koszty i czas wytworzenia modelu w technologii RP są stałe i zależą tylko od wielkości modelu. Proces



Zintegrowany
Program
Rozwoju
Politechniki
Lubelskiej

Biuro Projektu:
ul. Nadbystrzycka 38H
20 - 618 Lublin

przygotowania programu sterującego jest praktycznie automatyczny. Dla obróbki ubytkowej rozwiązaniem może być wykorzystanie wysokowydajnej obróbki ubytkowej z dużymi prędkościami. Ale w odniesieniu do krótkich serii prototypowych czasochłonne programowanie obrabiarek CNC jest mało opłacalne. Jednak przy dużej serii więcej zysku daje obróbka konwencjonalna.

Drugim kryterium jest złożoność modelu. W tym kryterium metody RP mają najwięcej do zaoferowania, a mianowicie całkowitą nieograniczoność kształtu. Można wykonać całkowicie nie technologiczne konstrukcje podczas jednego procesu. Natomiast wytworzenie wałka trzy stopniowego z wpustem na koło zębate będzie mało opłacalne.

Metody RP są ciągle rozwijane i dają coraz większe możliwości. Można je podzielić na kilka grup. Metody związane z budową modeli pokazowych, metody budowy modeli testowych w różnych warunkach, metody wytwarzające gotowe produkty (ale nie seryjne). Do pierwszej grupy można zakwalifikować wszystkie metody, ale powinno wybierać się w tym przypadku metody najtańsze i dające dobre efekty wizualne. Metodą taką jest 3DP oferująca wydruk w pełnej gamie kolorów w atrakcyjnych cenach. Do drugiej grupy można zaliczyć metody o dużej dokładności, w której stosuje się materiały dobrej jakości. Najbardziej popularne to FDM, Stereolitografia i PolyJet. Bardzo ciekawymi metodami są SLM i SLS. Metody te oferują budowę modeli z każdego rodzaju materiałów: polimerów, ceramiki, proszków metali. Używane są do produkcji pełnowartościowych matryc, tłoczników, form odlewniczych i wtryskowych. Czyli można je zakwalifikować jako odrębne metody Rapie Tooling (szybkie wytwarzanie narzędzi). Na ich przydatność wpływają duża gęstość materiału po budowie modelu i możliwość obróbki skrawaniem. Jednak to nie koniec ich zastosowania. Dzięki opracowywaniu coraz lepszych materiałów urządzenia SLS wykorzystywane są do produkcji protez i implantów medycznych.

Metody RP oferują gamę materiałów, dzięki którym można wykonać i przetestować większość prototypów. Jednak szybkie prototypowanie nie jest w stanie, przynajmniej na razie, całkowicie wyprzeć metod konwencjonalnych. Dzieje się tak ze względu na wady tych metod. Są nimi duża niedokładność powierzchni wymagająca dodatkowej obróbki, a także niewystarczająca wytrzymałość materiałów. Lecz w niektórych metodach inżynierowie doszli do całkiem przyzwoitych wyników. Materiały oferowane przez producentów są

PROGRAM WIEDZA EDUKACJA ROZWÓJ



Rzeczpospolita
Polska

Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny





coraz lepsze i pozwalają na stosownie szybkiego prototypowania w większej ilości przypadków.

Proces konstrukcyjny wspierany jest też przez metody inżynierii odwrotnej (Reverse Engineering). Pozwala to na szybsze wykonywanie modeli o złożonej powierzchni z dużą ilością płaszczyzn swobodnych. Metoda ta ciągle się rozwija i znajduje zastosowanie nie tylko w przemyśle ale i w medycynie.

Metody RP z pewnością nie są idealne, ale dają niezliczoną ilość możliwości w wielu dziedzinach produkcji. Z pewnością zrewolucjonizowały proces projektowania przyspieszając go i zmniejszając koszty. Technologia RT pomaga wytwarzać formy do pół seryjnej produkcji. Metody RP cieszą się coraz większym zainteresowaniem. Mimo wysokiej ceny urządzeń realizujących procesy RP. Albowiem koszty te dość szybko się zwracają. W Polsce rynek rapid technologii się rozwija. Na uczelniach powstają laboratoria szybkiego prototypowania (Politechnika Rzeszowska, Politechnika Warszawska, Politechnika Wrocławska). Jeśli chodzi o usługi RP dostępne na polskim rynku to ilość firm oferujących swe usługi się zwiększa. Przez co nie ma zbytniego problemu z wykonaniem prototypu w jednej z metod RP. O popularności RP świadczyć może zainteresowanie środowiska modelarskiego tym tematem. Ale póki co metody RP nie są na tyle doskonałe aby wytwarzać miniaturowe obiekty w odpowiednich cenach.

PROGRAM WIEDZA EDUKACJA ROZWÓJ



Fundusze Europejskie
Wiedza Edukacja Rozwój



Rzeczpospolita
Polska

Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny

