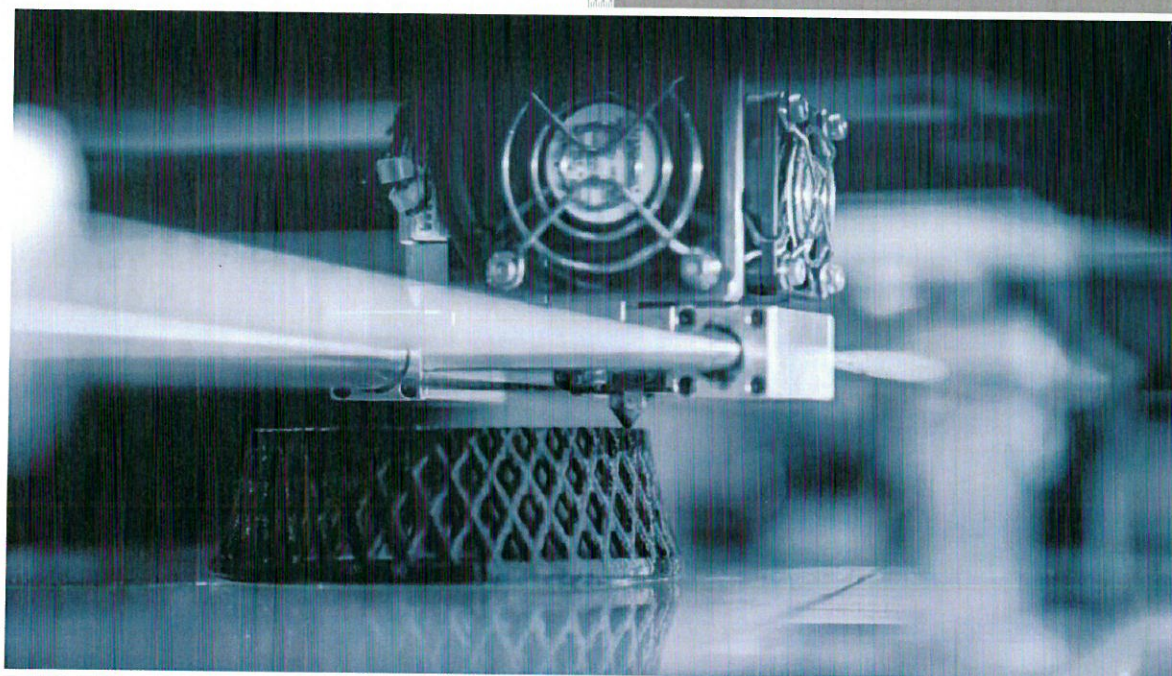


Etap I 2020

Modułowy, zintegrowany system do wielowymiarowego i wieloprzestrzennego projektowania wstecznego z hybrydową indywidualnie dopasowaną linią technologiczną do produkcji elementów chirurgicznych w metodach przyrostowych

RAPOR



dr inż. Dariusz Karpisz
dr inż. Marcin Cegielski
dr hab. inż. Jacek Pietraszek, prof.PK

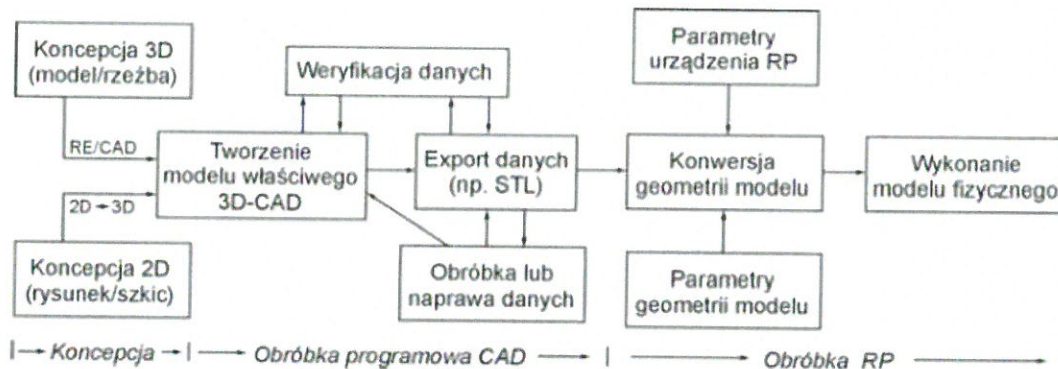
Raport z prac badawczych w ramach 1 etapu projektu obejmuje:

- 1. Dobór materiałów do druku 3D a następnie obróbki mechanicznej na podstawie analizy w celu uzyskania wymaganych parametrów i tolerancji oraz wyboru materiałów do wytwarzania elementów protetycznych i karty charakterystyki materiału.**
- 2. Opracowanie założeń pomiarowych przy pomocy laboratorium wykonawcy**
- 3. Opracowanie i projekt modułowej linii technologicznej do produkcji indywidualnych elementów protetycznych w zróżnicowanych technologiach i opracowanie założeń i parametrów użytkowych.**
- 4. Wybór i określenia dostawców poszczególnych elementów i harmonogramu dostaw.**

Zakres prac etapu I

1. Analiza technologii 3D i materiałów do druku 3D

Proces budowy prototypu za pomocą przyrostowych technik szybkiego prototypowania polega na tworzeniu modeli fizycznych na podstawie geometrycznego modelu trójwymiarowego, zapisanego za pomocą systemów CAD. Jego pierwszym etapem jest zdefiniowanie elementu jako wygenerowanego przez komputer trójwymiarowego modelu CAD-3D (Rys.1.1). Następnie uzyskany obraz jest przetwarzany w specyficzną postać zbioru danych między systemami CAD/RP [1.1].



Rys 1.1 Schemat procesu szybkiego prototypowania [1.1]

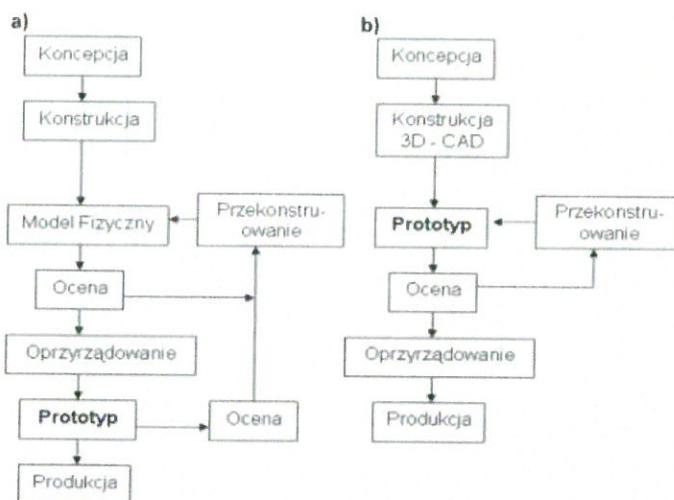
Większość dostępnych metod szybkiego prototypowania polega na dzieleniu modelu na warstwy poziome, z których w odpowiedniej kolejności budowany jest prototyp fizyczny. Przyrostowe kształtowanie przedmiotów w ten sposób staje się wysoce efektywne w przypadku produkcji jednostkowej czy realizowanej w niewielkich seriach [1.1,1.2].

Ze względu na wysokie koszty urządzeń i materiałów eksploatacyjnych, na szeroką skalę wykorzystywanych jest tylko kilka RP: stereolitografia (SLA), warstwowe nakładanie i utwardzenie fotonopolimeru (PolyJet), modelowanie ciekłym tworzywem (FDM), selektywne spiekanie proszków laserem (SLS), trójwymiarowe drukowanie (3DP) [1.2]. Główne ich właściwości zaprezentowano w tabeli nr1.

Tabela 1. Podstawowe metody druku 3D wraz z właściwościami [1.3]

Metoda RP	SL	SLS	LOM	FDM	JP
Opis	Lokalne warstwowe utwardzanie ciekłego fotonopolimeru za pomocą wiązki laserowej	Spajanie warstwowe proszków poprzez ich spiekanie wiązką laserową	Wycinanie laserowe obrysu modelu i sklepanie go do poprzedniej warstwy materiału	Modelowanie poprzez wytłoczenie sadzanie warstwowe stopionego materiału techniką druku z dwóch głowic	Nanoszenie fotonopolimeru za pomocą głowic drukujących
Wymiary przedmiotu, mm	600	400	800	500	200
Tolerancja, [mm]	0,1	0,20	0,15	0,2	0,1
Dokładność urządzeń [mm]	0,3	0,5	0,9	0,8	0,1
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	80	50	10	30	10

W porównaniu z konwencjonalnymi metodami produkcji tj. obróbka skrawaniem, zastosowanie metod RP i RT umożliwi znaczne skrócenie procesu przygotowania i wykonywania modelu, prototypu czy finalnego wyrobu oraz jego łatwiejsze modyfikowanie we wczesnych stadiach rozwoju, co zostało zobrazowane na Rys 1.2.

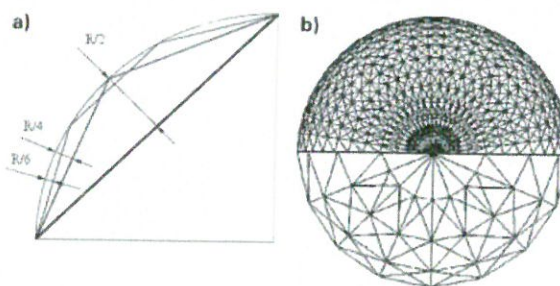


Rys 1.2 Etapy projektowania metodami tradycyjnymi (a) oraz z wykorzystaniem RP (b) [1.1]

1.1. Przygotowanie danych dla technik przyrostowych

Przygotowanie danych ma znaczący wpływ na dokładność modelu otrzymanego w procesie szybkiego prototypowania. Parametry eksportowanych danych z systemów CAD powinny umożliwić wykonanie modelu fizycznego z najwyższą dokładnością, jaką dysponuje urządzenie RP [1.1].

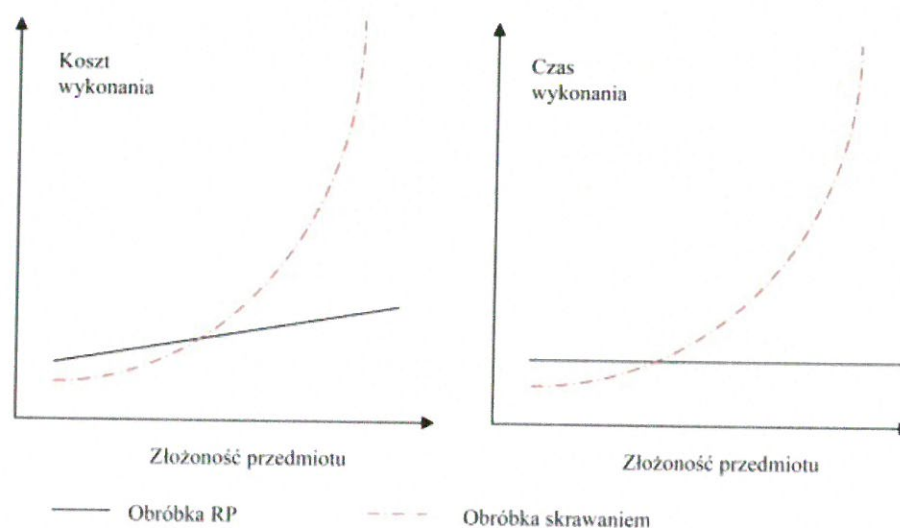
Najbardziej rozpowszechnionym formatem plików jest STL, który został opracowany na potrzeby stereolitografii przez firmę 3D Systems. W formacie STL powierzchnia elementu przybliżana jest siatką trójkątów, a w pliku zapisane są współrzędne x, y, z każdego wierzchołka trójkąta oraz wektor normalny do powierzchni każdego z trójkątów. Taki zapis wiąże się z pewnymi niedokładnościami, ponieważ utworzone trójkąty nie oddają idealnie rzeczywistej powierzchni - przy czym im mniejsze trójkąty, tym większa dokładność (Rys.1.3), ale także większy rozmiar pliku. Często występującym błędem jest odwrócenie normalnych niektórych trójkątów, co uniemożliwia poprawne zbudowanie modelu przez maszynę RP. Błędy takie, w większości przypadków, są jednak łatwe do naprawienia przez specjalistyczne oprogramowanie (np. Magics RP) [1.1].



Rys.1.3. (a) Błąd siecznej przy przybliżaniu okręgu siecznymi oraz (b) wpływ ilości trójkątów na jakość odwzorowania sfery [1.1].

W przypadku danych z procesu skanowania 3D to obróbka programowa jest zależna od ich formatu zapisu i dokładności [1.1]. Dokładne pliki zapisane po skanowaniu w formacie STL mogą być bezpośrednio użyte do wykonania modelu fizycznego. Czas otrzymania danych wyjściowych z procesu RP zależy od stopnia złożoności elementu, przeznaczenia elementu, zakładanych dokładności wyjściowych i parametrów pliku zeskanowanego obiektu (dokładność, szumy, format zapisu) [1.1,1.2,1.4,1.5,].

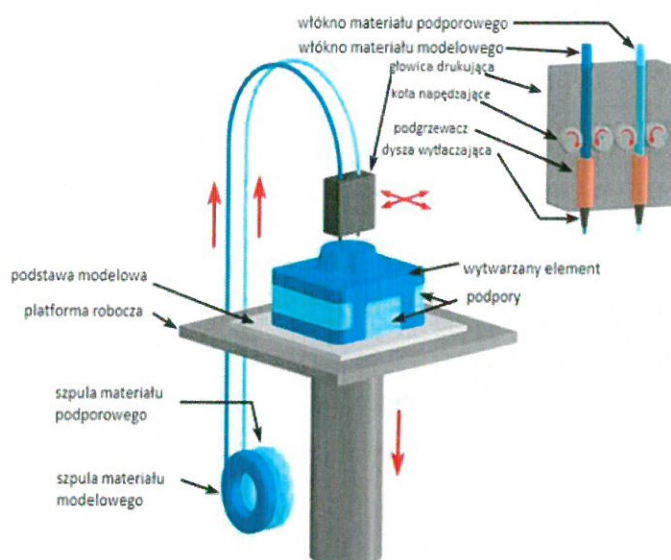
Wstępne fazy rozwoju produktu decydują o najistotniejszych składnikach kosztów jego wytwarzania, gdyż wynikają z wyboru konstrukcji, stosowanych materiałów i technologii. Jako kryterium (Rys.1.4) stosowania technik przyjmuje się najczęściej czas obróbki/generowania oraz koszty wytworzenia modelu – prototypu [1.1].



Rys.1.4. Zależność kosztów i czasu wykonania przedmiotu od jego złożoności dla obróbek skrawaniem i metod RP [1.6].

1.2. Metoda FDM

Metoda FDM (*Fused Deposition Modelling*), czyli modelowanie ciekłym tworzywem polega na wytworzeniu trójwymiarowego elementu warstwa po warstwie z półpłynnego, termoplastycznego materiału podawanego przez głowice wyposażone w wymienne dysze.



Rys.1.5. Budowa drukarki 3D wraz z przedstawieniem procesu FDM [1.7]

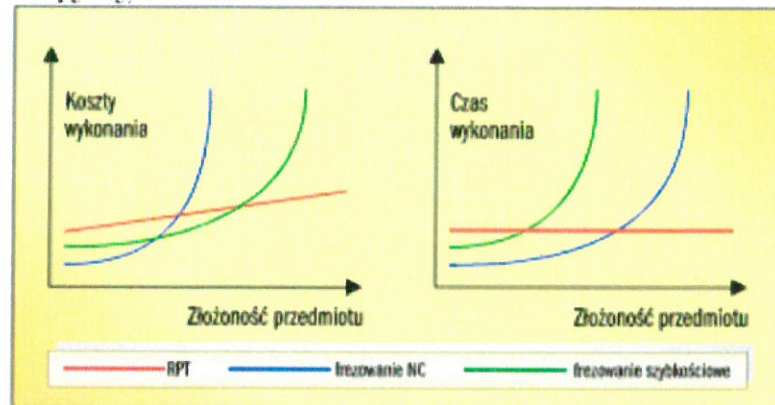
W przypadku, gdy konstrukcja wykonywanego elementu wymaga podparcia, w każdej warstwie układany jest, oprócz materiału do budowy właściwego modelu, także materiał do budowy podparcia zwany suportem. Materiały dla detalu i podparcia są umieszczone w postaci włókna nawiniętego na szpulach. Włókna są odwijane i podawane do ekstrudera, następnie podgrzewane do stanu półpłynnego i nanoszone w postaci warstwy, która szybko zastyga i sztywnieje, tworząc podstawę dla kolejnych warstw. Grubość pojedynczej warstwy wynosi od 0,1 mm do 1,25 mm. Głowice wykonują ruch w osiach X - Y, natomiast w osi Z porusza się stolik, na którym wytwarzany jest produkt. Po nałożeniu jednej warstwy stolik obniża się i proces się powtarza. W metodzie tej dostępny jest szeroki asortyment różnorodnych materiałów na bazie tworzyw sztucznych i wosków [1.1].

Badania zawarte w artykule „Wytwarzanie modeli łopatek przyrostowymi metodami szybkiego prototypowania” [1.2] wskazują, że przyrostowe metody Rapid Prototyping (RP) pozwalają na znaczne skrócenie czasu wykonywania prototypu. W pracy porównano czas przygotowania danych i wykonania prototypu łopatki metodami RP i obróbką skrawaniem przy wykorzystaniu maszyn CNC dla łopatki o długości całkowitej 70 mm i szerokości pióra 25 mm, ustawionej w pozycji pionowej. Uzyskane wyniki wskazały, że metody RP umożliwiają zwykle uzyskanie krótszych czasów procesu wytwarzania niż CNC. Obliczenia czasu wykonania prototypu prowadzono dla grubości warstwy 0,1 mm dla pojedynczego elementu w obszarze roboczym urządzenia. Porównując metody szybkiego prototypowania stwierdzono, że stereolitografia oraz selektywne spiekanie laserowe należą do metod najbardziej czasochłonnych. Po drugiej stronie osi znalazły się metody FDM oraz 3DP.

Tabela 2. Porównanie czasu wykonania prototypu łopatki metodami RP i CNC [1.3]

Metoda	CNC	SLA	3DP	FDM	SLS
Czas operacji					
Czas przygotowania danych, h	2,5	0,6	0,3	0,3	0,5
Czas wykonywania prototypu, h	15,8	10,5	2,9	6,7	7,3
Czas sumaryczny, h	18,3	11,1	3,4	7,0	8,8

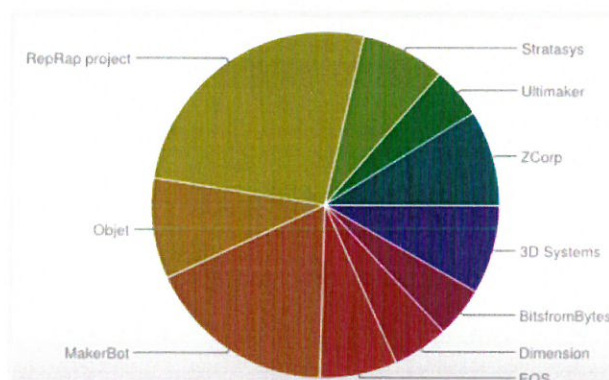
Analiza kosztów wykonania prototypów metodami przyrostowymi wykazała, że metody SLA i SLS należą do najmniej efektywnych i najdroższych (w grupie metod stosujących materiały niemetaliczne do budowy modelu). Dotyczy to zarówno kosztów materiałów jak i zakupu urządzenia. Natomiast koszty zakupu i eksploatacji urządzeń JS-PolyJet są na średnim poziomie. Metody 3DP i FDM charakteryzują się mniejszymi kosztami zarówno zakupu urządzenia jak i kosztów eksploatacji [1.4].



Rys. 1.6. Porównanie kosztów i czasu wytworzenia prototypu w różnych technikach[1.8].

Produktem substytucyjnym do druku 3D mogą być metody konwencjonalne (frezowanie, toczenie itp.) Wykonanie prototypu przy użyciu tradycyjnych metod jest długotrwałe i kosztowne. Tradycyjne metody wymagają zazwyczaj dużego nakładu pracy ręcznej oraz pracownika o bardzo wysokich kwalifikacjach zawodowych, podnosi to znacznie koszty, co przedstawiono na Rys 1.6. Ręcznie wytwarzany model zakłóca również cykl obiegu informacji elektronicznych pomiędzy poziomem projektowania a poziomem właściwej produkcji[1.9].

Prototypy FDM łatwo można poddać obróbce, np. szlifowaniu, wierceniu, malowaniu, chromowaniu, można również łączyć elementy w większe modele poprzez klejenie. Zaletą takiego rozwiązania jest fakt, że wytrzymałość takiej spoiny jest większa niż wytrzymałość przedmiotu wydrukowanego.



Rys. 1.7. Wykorzystanie drukarek według firmy produkcyjnej (technologii)[1.10].

Według badań przeprowadzonych przez pracowników portalu Yeggi (Rys. 1.7.) największym popytem na świecie cieszą się drukarki RepRap (drukarki typu FDM, których projekt budowy jest ogólnodostępny, często nazywane są drukarkami domowymi) oraz MakerBota (drukarki typu FDM, które są najtańszymi drukarkami profesjonalnymi). Należy zwrócić uwagę, że większość drukarek

typu Rep Rap posiada otwarte kabiny i nie są w żaden sposób wentylowane.

1.2.1. Przegląd materiałów dostępnych w technologii FDM

W związku z rozwojem metody FDM, zauważa się również rozszerzenie zakresu stosowanych materiałów obejmujący: wszelkiego rodzaju metale, polimery, materiały ceramiczne, materiały wzmacniane włóknami, drewno oraz różne kompozyty na podstawie metalowej czy polimerowej. Do najważniejszych materiałów dostępnych w technologii FDM można zaliczyć: ABS, PLA, Z - Hips, Z – Ultrat, Z – Glass, Filament gumowy i Laywood[1.9].

ABS jest materiałem zbudowanym, dzięki odpowiedniemu połączeniu, z trzech monomerów: butadienu, akrylonitrylu i styrenemu. Połączenie tych trzech monomerów nadaje materiałowi wysoką odporność na uderzenie, zarysowania czy twardość [1.11]. Oprócz wymienionych właściwości ABS charakteryzuje się obojętnością toksykologiczną, niskim ciężarem, dobrą odpornością na ścieranie czy obojętnością biologiczną (brak rozwoju mikroorganizmów). W technologii druku 3D ze względu na wymienione właściwości jak również możliwości pracy w szerokim zakresie temperatur i elastyczność znajduje zastosowanie w takich gałęziach przemysłu jak przemysł AGD czy motoryzacyjnym. Powszechność tego materiału, jak również jego niska cena sprawiały, że obecnie jest on szeroko stosowanym materiałem w technologii FDM. Ponowne użycie materiału poprodukcyjnego jest jedną z możliwości zmniejszenia zagrożenia wynikającego z rosnącej liczby odpadów, lecz należy pamiętać, że powoduje to pogorszenie właściwości materiału i proces ten nie może być stosowany w nieskończoność.

PLA jest materiałem całkowicie biodegradowalnym otrzymanym z kwasu mlekowego. Jest zaliczany do grupy biopolimerów ze względu na swoją całkowitą biodegradowalność oraz odnawialność, co sprawiło, że jest szeroko stosowany w przemyśle spożywczym, farmaceutycznym czy chemicznym. Kwas mlekowy jest naturalnym kwasem organicznym, który może być pozyskiwany zarówno na drodze syntezy chemicznej czy biologicznej. Preferowaną metodą pozyskiwania kwasu mlekowego z uwzględnieniem aspektów środowiskowych jest synteza biologiczna, w której kwas mlekowy otrzymuje się z węglowodanów pochodzących z mączki kukurydzianej, trzciny cukrowej, ziemniaków czy buraków cukrowych [1.12]. Posiada podobne właściwości do ABS, ale jest bardziej kruchy.

W stosunku do ABS-u wykazuje niższą rozszerzalność temperaturową. Zastosowanie PLA w druku 3D wynika z jej biodegradacji, która pożądana jest w takich gałęziach przemysłu jak przemysł spożywczy czy medyczny.

Z - Hips - termoplastyczny polimer o wysokiej odporności na uderzenia [1.13],

Z – Ultrat - jednym z najtwardszych materiałów do druku 3D [1.13],

Z – Glass - termoplastyczny kopolioester zmieszany z włóknem szklanym [1.13],

Filament gumowy (Rubber) - specjalny polimer termoplastyczny, który zachowuje się jak guma i jednocześnie nadaje się do drukowania 3D. Wydrukowane obiekty są elastyczne i sprężynujące, można je także wyginać. Doskonale nadaje się do drukowania wszelkiego rodzaju osłon, podkładek czy pokrowców na telefony.

Laywood - filament Laywood to mieszanka 40% drewna z odzysku oraz polimerów. Ta kompozycja umożliwia normalne drukowanie w drukarce 3D ale efekt końcowy jest zbliżony do drewna. Po wydruku obiekt wygląda i pachnie jakby był wykonany z drewna. Dodatkowo wydrukowane obiekty poddają się obróbce mechanicznej (wiercenie, cięcie, malowanie) tak jak drewniane. W zależności od temperatury wydruku zmienia się barwa wydruku - im wyższa temperatura, tym ciemniejsza barwa.

Na wykresie poniżej przedstawiono najczęściej stosowane materiały w technologii druku 3D.



Rys. 1.8. Wykorzystanie materiałów w druku 3D [1.10].

1.3. Metoda SLS/SLM

Metoda selektywnego spiekania proszków wiązką lasera (SLS – Selective Laser Sintering lub SLM - Selective Laser Melting) jest metodą przyrostową wytwarzania modeli prototypów i narzędzi polegającą na scalaniu warstw proszku przy użyciu wiązki światła laserowego. Budowanie modelu nie wymaga generowania dodatkowych elementów podtrzymujących – elementem podpierającym wystające części modelu, pochylenie lub powierzchnie zamykające jest tu materiał, z którego buduje się model, a który nie został poddany procesowi spiekania.

Całym procesem steruje program zainstalowany na specjalistycznym stanowisku komputerowym, a proces przeprowadza się przy użyciu promieniowania laserowego z zakresu podczerwieni, którego źródłem jest laser CO₂ (10.6 μm) lub Nd: YAG (1.06 μm). Rozpoczęcie procesu polega na rozprowadzeniu cienkiej warstwy proszku na stole o regulowanym względem osi Z położeniu (warstwa ta spełnia rolę podłoża dla powstającego przedmiotu). Wiązka laserowa prowadzona jest po powierzchni proszku, zgodnie z wprowadzonymi wcześniej i odpowiednio skonfigurowanymi informacjami dotyczącymi kolejnych warstw poprzecznego przekroju przestrzennego obrazu przedmiotu. Dobór odpowiednich parametrów wiązki laserowej pozwala na stopienie lub spiekanie w ściśle określonych obszarach cząsteczek proszku. Następnie stół z proszkiem obniża się o zadaną wysokość i rozprowadzana jest kolejna cienka warstwa proszku i następuje ponowne spajanie ziaren. Kolejne warstwy przekroju poprzecznego spiekają się ze sobą. Proces powtarzany jest aż do momentu uzyskania kompletnego spójnego obiektu. Po zakończeniu procesu spiekania i obniżeniu temperatury przedmiotu, i materiału, oczyszcza się gotowy do użytku model.

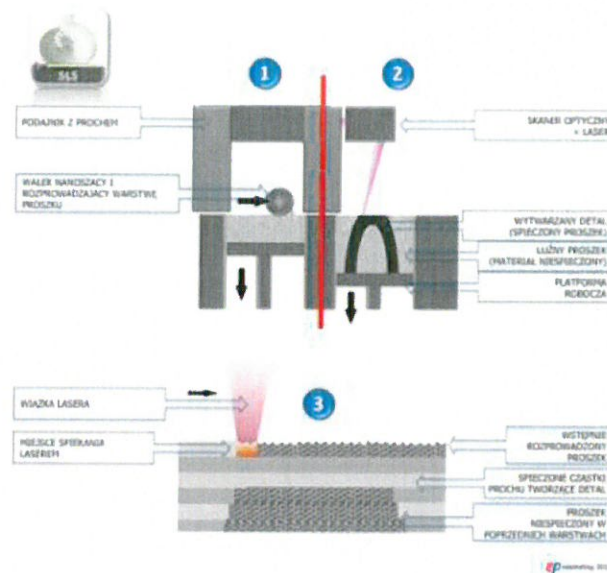
Dokładność wydruku w tej technologii osiąga wartość na poziomie. +/- 0,05 mm, prędkość budowania ok. 7 cm³/h.

Maszyna SLS® (Rys.1.9) składa się z :

- dwóch pojemników na pył na każdym z boków przestrzeni roboczej,

- wałka poziomującego poruszającego się wzdłuż przestrzeni roboczej od jednego do drugiego pojemnika,
- lasera śledzącego powierzchnię roboczą,
- platformy na której tworzony jest element (jest ona opuszczana o grubość warstwy
- „wydruku“ po czym następuje przetoczenie wałka poziomującego).

Proces powtarzany jest aż do momentu zakończenia wydruku [1.14].



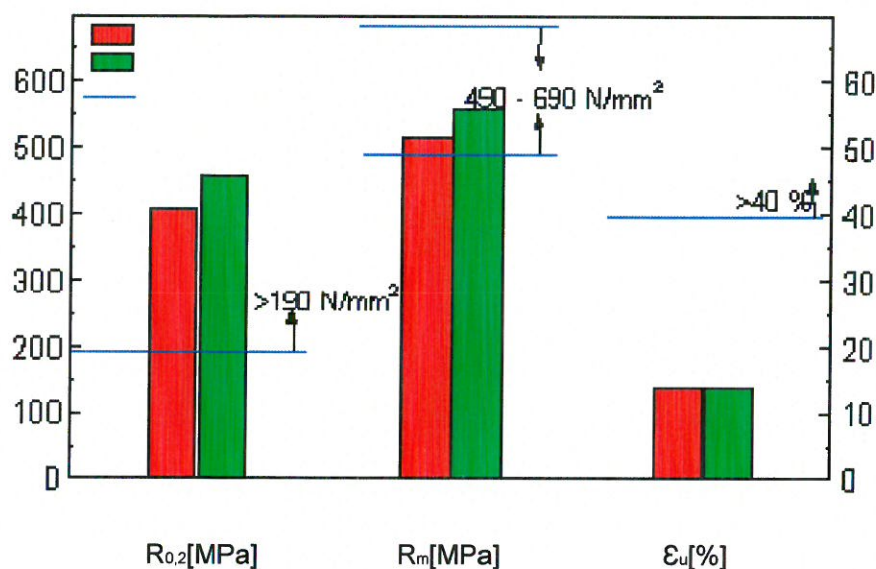
Rys.1.9. Budowa maszyny SLS oraz opis etapów spiekania [1.14].

Dzięki tej technologii, wytworzone produkty uzyskują idealnie gładki stan powierzchni, poprawie ulegają również inne parametry użytkowe i wytrzymałościowe. Dzięki zastosowaniu tej innowacyjnej technologii, wytwarzane w technologiach przyrostowych produkty z tworzyw sztucznych, nie odbiegają od produktów wykonanych w tradycyjnej technologii wtrysku tworzywa sztucznego [1.14].

SLM firmy MCP-HEK, pozwala na szybkie (do 24 h) wykonywanie narzędzi np. metalowych tłoczników, stalowych form do odlewania pod ciśnieniem, stalowych form do formowania wtryskowego czy też ceramicznych elementów i części maszyn. Metoda ta polega na miejscowym roztopianiu w płaszczyźnie x-y proszków zazwyczaj metali lub ceramiki przez wiązkę lasera o mocy 100 W, chłodzonego powietrzem, emitującego wiązkę o długości fali z zakresu podczerwieni. System pozycjonowania wiązki lasera oparty jest o precyzyjny system 16 bitowego skanowania przestrzennego. W technologii tej, możliwe jest tworzenie modelu wyrobu z każdej substancji, którą można sproszkować (np. stopy niskotopliwe firmy MCP, cynk, brązy, stal nierdzewna, stal narzędziowa, tytan, węgiel krzemu, tlenek aluminium itp.). Jest to pierwsza metoda RP/RT w której proszki nie muszą być pokrywane specjalnymi substancjami –lepiszczami (jak często ma to miejsce w technice SLS), dzięki czemu są one stosunkowo tanie)-Brak obróbek zwiększających gęstość.

SLM nie posiada wad metody SLS, ponieważ w detalach praktycznie nie występują pory (pustki materiału), które mogą obniżać wytrzymałość wyrobu. W związku z tym nie jest konieczna kosztowna, dodatkowa obróbka polegająca na infiltracji miedzi lub brązu w pory detalu. Inne zalety metody SLM to:

- możliwość tworzenia modelu wyrobu bądź wyrobu z praktycznie każdej substancji, którą można sproszkować (np. stopy niskotopliwe firmy MCP, cynk, brązy, stal nierdzewna, stal narzędziowa, tytan, węgiel krzemu, tlenek aluminium itp.),
- Wykorzystanie proszków danego materiału, które nie muszą być pokrywane specjalnymi substancjami (jak często ma to miejsce w technice SLS), dzięki czemu są one stosunkowo tanie,
- Szybkość (czas trwania od kilku do kilkunastu godzin) i względnie niskie koszty (brak obróbek wykańczających),
- Tworzenie precyzyjnych detali o dużej gęstości (do 100%),
- Wytworzone detale mogą być polerowane na wysoki połysk (lustro),
- W pełni zautomatyzowany proces, istnieje możliwość automatycznej pracy bez obsługi.

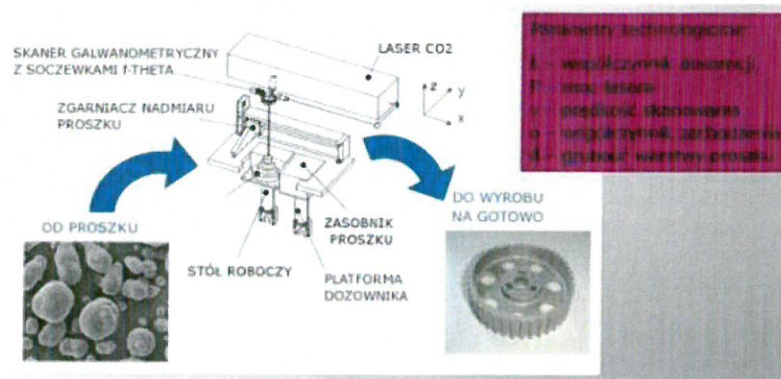


Rys.1.20.Porównanie właściwości detali tworzonych metodą SLM i metodami klasycznymi[1.14].

1.4.Metoda DMLS

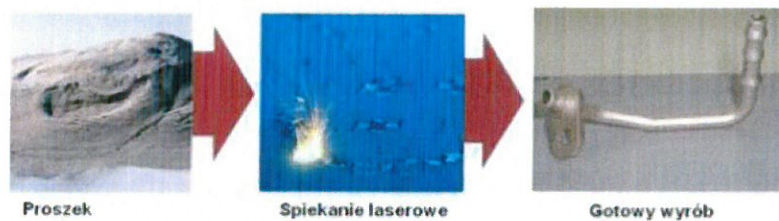
Selektywne spiekanie laserowe to rodzina metod polegających na wytwarzaniu wyrobów poprzez zestalanie materiałów w postaci proszku, warstwa po warstwie, które następuje dzięki oddziaływaniu wiązki laserowej na powierzchnię proszku. Są to metody przyrostowe, za pomocą których można wytwarzać modele prototypów oraz elementy funkcjonalne.

Model przestrzenny przedmiotu w postaci pliku zostaje wczytany przez specjalistyczne oprogramowanie komputerowe. W wyniku jego działania następuje podział modelu na warstwy i wygenerowanie programu sterującego pracą urządzenia (Rys.1.10) [1.15].



Rys.1.10. Budowa urządzenia wytwarzania wyrobu metodą DMLS [1.15].

Na warstwę proszku o grubości 0,02 – 0,1 mm rozprowadzoną na płycie bazowej, w punkty o ściśle zdefiniowanych współrzędnych, kierowany jest promień laserowy. Jego energia powoduje, że pojedyncze ziarna proszku łączą się ze sobą tworząc warstwę litego materiału. Przy budowie kolejnych warstw przedmiotu energia promienia laserowego doprowadza do połączenia się ziaren tej warstwy ze sobą oraz z warstwą poprzednią, która teraz spełnia rolę podłoża. Proces powtarzany jest aż do momentu wybudowania całego przedmiotu (Rys.1.11) [1.15].



Rys.1.11. Scalanie proszku przy użyciu światła laserowego [1.15].

Do tworzonego przedmiotu, w zależności od stopnia złożoności kształtu, mogą być dobudowywane dodatkowe, pomocnicze elementy (generowane przez program wewnętrzny urządzenia), które podtrzymują kolejne warstwy. Po zakończeniu procesu i oddzieleniu przedmiotu od płyty bazowej usuwa się elementy pomocnicze. Otrzymany przedmiot poddaje się obróbce wykończeniowej (prace ślusarskie i/lub obróbka mechaniczna oraz śrutowanie) głównie w celu usunięcia śladów pozostałych po podporach. Elementy spiekane mogą być także obrabiane elektroerozyjnie, skrawaniem, szlifowaniem [1.15].

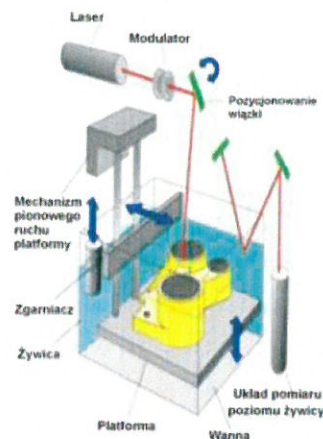
1.5. Stereolitografia

Stereolitografia (ang. *Stereolithography*), jest pierwszą technologią szybkiego wytwarzania prototypów. Zapoczątkowało ją wynalezienie dodatków do płynnych żywic, które powodowały po naświetleniu, rozpoczęcie procesu polimeryzacji. Jest to jedna z technologii wytwarzania trójwymiarowych modeli na podstawie geometrii wygenerowanej za pomocą programów CAD 3D. Polega ona na warstwowym utwardzaniu ciekłych żywic za pomocą światła laserowego małej mocy.

Wiązka lasera (Rys.1.12) odchylana jest przez system luster, skanuje powierzchnię żywicy w miejscu gdzie żywica ma być utwardzona. Proces tworzenia warstwy modelu dzieli się na etapy:

- Utwardzanie konturów warstwy,
- Utwardzanie warstwy przez tzw. kreskowanie przekroju. W ten sposób tworzy się sztywna siatka służąca do wzmocnienia granic i utrzymania kształtu modelu. Gęstość i kierunek linii siatki są określane przez użytkownika.
- Wypełnienie przekroju

Po utwardzeniu warstwy następuje obniżenie platformy na której powstaje model w celu naniesienia kolejnej warstwy nieutwardzonej żywicy. Zgarniacz wyrównuje warstwę żywicy i ustala grubość naniesionej warstwy [1.16].



Rys.1.12. Budowa urządzenia wykorzystującego metodę stereo litografii [1.16].

Etapy tworzenia modelu za pomocą stereolitografii:

- Budowa modelu w systemie CAD,
- Eksport modelu do formatu *.stl,
- Ustawienie parametrów budowy modelu: rozdzielczość, rodzaj żywicy, typ zgarniacza, minimalna wysokość podpór,
- Weryfikacja poprawności plików *.stl i ewentualna naprawa błędów geometrii,
- Projektowanie położenia i geometrii elementów wspierających model,
- Weryfikacja geometrii elementów wspierających,
- Podział modelu 3D na warstwy zgodnie z zadanymi parametrami tworzenia modelu fizycznego,
- Przesłanie plików z modelami do urządzenia,
- Budowa fizycznego modelu w procesie fotopolimeryzacji,
- Mycie utworzonego modelu z resztek nieutwardzonej żywicy,
- Zakończenie procesu fotopolimeryzacji w urządzeniu utrwalającym PCA,
- Obróbka wykańczająca model [1.16].

1.6. POLYJET

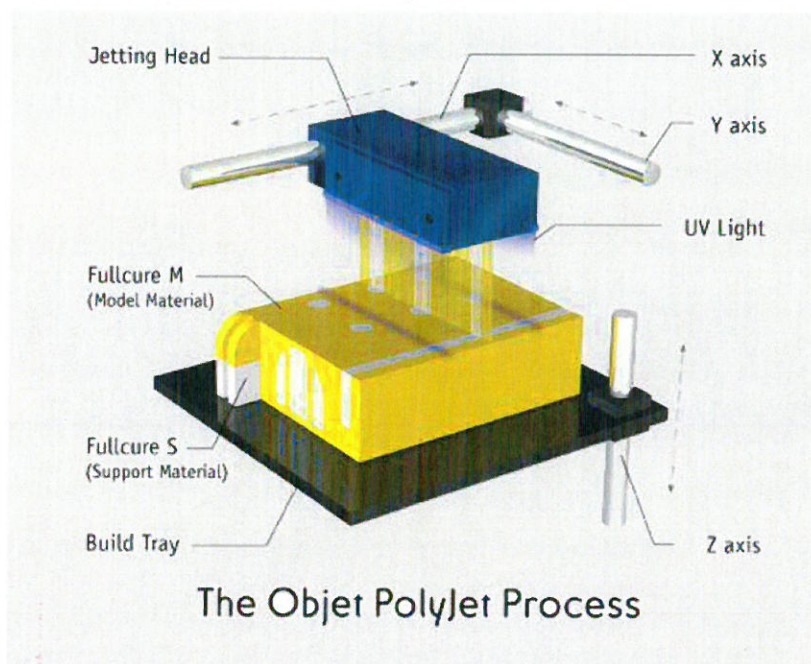
Jest to wydruk modeli poglądowych o gładkiej powierzchni i wysokiej dokładność z materiałów twardych, elastycznych i transparentnych. Technologia POLYJET daje możliwość drukowania prototypów z ciekłego fotopolimeru utwardzanego pod światłem UV, udostępnia ją producent drukarek Stratasys. Zaletą tej metody jest możliwość wydruku modeli z wysoką

dokładnością o skomplikowanej geometrii zapewniając przy tym gładką powierzchnię wydrukowanej części.

Modele tworzone są z ciekłej żywicy akrylowej, która jest наносzona za pomocą głowic drukujących na platformę roboczą i utwardzane światłem UV[1.17]. Wydrukowany prototyp składa się z materiału modelowego i podporowego. Należy zwrócić uwagę, że praca drukarek w technologii POLYJET(Rys.1.13) może odbywać się w 3 trybach:

- HS – szybki wydruk modeli,
- HQ – modele o najwyższej dokładności dzięki warstwie 16 mikrometrów,
- DM – gdzie mamy możliwość łączenia materiałów.

Modele 3D mogą służyć zarówno jako modele poglądowe jak i funkcjonalne. Model po wydruku jest oczyszczany z warstwy materiału wspierającego - można go usunąć ręcznie lub wodą za pomocą myjki ciśnieniowej [1.17].



Rys.1.13. Technologia POLYJET [1.17].

1.7. Metoda 3DP

Jedną z metod szybkiego prototypowania opierających się na technice kształtowania przyrostowego jest druk trójwymiarowy **3DP** (*Three Dimensional Printing*). Można ją określić wśród innych znanych metod RP, jako metodę najszybszą i najtańszą do wytwarzania trójwymiarowych modeli. Polega ona na warstwowym spajaniu proszku poprzez punktowy natrysk spoiwa, nanoszonego na dany przekrój elementu przez ruchomą głowicę (podobnie jak w zwykłych drukarkach atramentowych). Następnie wytworzoną bryłę po wysuszeniu i oczyszczeniu z luźnego proszku, należy dodatkowo utwardzić w celu uzyskania odpowiednich własności mechanicznych. Wydrukowane elementy mogą być utwardzane różnymi substancjami.

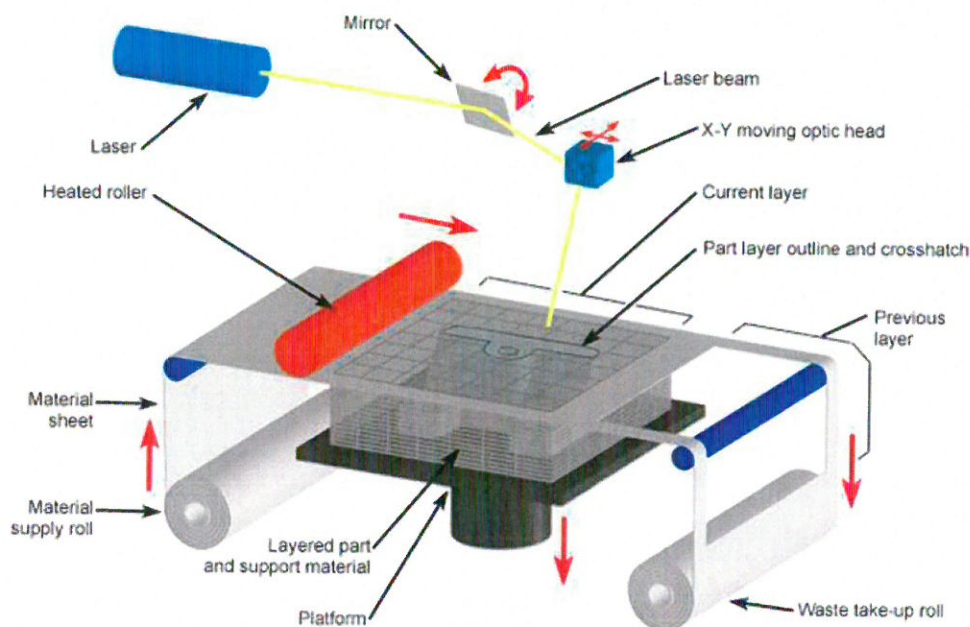
Do głównych zalet metody 3DP można zaliczyć szybkość wytworzenia prototypu oraz relatywnie niskie koszty (ok. 0,6 zł za cm³). Co więcej, możliwe jest tworzenie skomplikowanych modeli (różnego rodzaju żebra, podcięcia, elementy nie technologiczne w obróbce skrawaniem). Z

uwagi na grubość ziarna proszku (0,1 mm) i wytrzymałość bryły przed utwardzeniem ważne jest aby minimalna grubość ścianek była nie mniejsza niż 0,5 mm, co można uznać za wadę metody.

Mimo licznych zalet opisywana metoda posiada również kilka innych wad. Prototypy wykonane w tej technologii, ze względu na małą odporność mechaniczną, nadają się bardziej do celów wizualizacyjnych, pokazowych niż użytkowych. Ograniczone są również wymiary tworzonych modeli z uwagi na nieduże rozmiary komory roboczej maszyny drukującej. W przypadku tworzenia obiektów o większych gabarytach należy dany model podzielić na kilka elementów, które są drukowane pojedynczo, a następnie, po utwardzeniu klejami na bazie cyjanoakrylu, sklejane ze sobą tworząc cały model [1.18,1.19].

1.8. Metoda LOM

LOM (*Laminated Object Manufacturing*) jest to jedna z wielu technologii używanych w szybkim prototypowaniu. Polega na tworzeniu modelu z warstw papieru i laminatu poliestrowego połączonych razem (Rys.1.18). Specjalny papier pokryty cienką warstwą kleju zostaje podany na stół roboczy, następnie laser wycina odpowiedni kształt warstwy, reszta zostaje pocięta na małe kwadraty w celu łatwiejszego usunięcia. Po uzyskaniu odpowiedniego kształtu warstwy, stół obniża się o grubość warstwy i cały cykl zostaje powtórzony. Następnie otrzymuje się model laminowany, który zostaje czyszczony, czasami też malowany [1.20].



Rys.1.18. Wizualizacja technologii LOM [1.20].

1.9. Porównanie metod szybkiego prototypowania

Zakres zastosowania głównych technik RP oraz właściwości stosowanych materiałów w różnych technologiach i podstawowe wymagania dotyczące dokładności odwzorowania geometrycznego w stosunku do modeli CAD 3D zamieszczono w Tabeli 3.

Tabela.3. Cechy i własności fizycznych modeli wytworzonych najpopularniejszymi technikami RP [1.20].

Metoda RP	SL	SLS	LOM	FDM	JP
Wymiary przedmiotu, mm	600	400	800	500	200
Tolerancja, mm	0,1	0,20	0,15	0,2	0,1
Dokładność urządzeń, mm	0,3	0,5	0,9	0,8	0,1
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	80	50	10	30	10

Natomiast szczegółowe porównanie najpopularniejszych obecnie 6 technologii RP , pod względem ogólne cechy jakościowe, wady i zalety, typowe zastosowań oraz stosowanych materiałów wyjściowe, zawarto w Tabeli nr 4.

Tabela.4. Porównanie najpopularniejszych metod szybkiego prototypowania [1.4,1.5]

Technologia	Stereolitografia	Wytwarzanie strumieniem fotonowym	Selektywne spiekanie laserowe	Wytwarzanie poprzez nakładanie warstw materiału	Wytłoczone Osadzanie stopionego materiału	Wytwarzanie strumieniem kropli materiału
Skrót	SL	JP	SLS	LOM	FDM	3DP
Firma wiodąca	3D System		EOS GmbH	Solidimension	Stratasys	Z Corp.
Maksymalne wymiary budowanego elementu (mm)	500x500x600	300x180x200	700x380x580	160x210x130	600x500x600	500x600x400
Szybkość	średnia	dobra	Średnia/dobra	dobra	Słaba	doskonała
Dokładność	bardzo dobra	Dobra do bardzo dobra	dobra	dość dobra	dość dobra	dość dobra
Wykończenie powierzchni	bardzo dobra	dobra do bardzo dobra	dobra do bardzo dobra	dość dobra	dość dobra	dość dobra
Zalety	duży rozmiar części, dokładność	dokładność i wykończenie	dokładność, materiały, gotowe elementy	cena, wymiar	cena, materiały, gotowe elementy	Szybkość, cena, kolor
Wady	wymogi BHP, duży koszt	wielkość i waga, ograniczone materiały	Długi czas powstawania elementu, cena systemu	ograniczenie materiałów, wykończenie i dokładność, anizotropia	Szybkość, słaba jakość powierzchni	Mala dokładność, niska jakość powierzchni
Typowe zastosowania	bardzo szczegółowe części i modele do testowania, szybkie wytwarzanie małych części i detali, modele przedoperacyjne i wzory do formowania części RTV	bardzo szczegółowe części i modele do testowania, wzory do odlewów, szczególnie biżuterna i precyzyjne elementy, wzory do formowania części RTV	nieznacznie mniej szczegółowe części i modele do testowania w porównaniu z metodami używanymi tworzyw sztucznych, szybkie wytwarzanie części zawierających liczne szczegóły, takie jak kanały powietrzne, części z dopasowanymi zatrzaskami i ruchomymi przegubami, inżynieria biomedyczna, formy do odlewów	nieco mniej szczegółowe części i modele do testowania, większe wzory do odlewów piaskowych	szczegółowe części i modele do testowania, szczególnie części w zastosowaniach z kontaktem pacjenta i żywności, części z tworzyw sztucznych dla aplikacji wysokotemperaturowych, szybka produkcja małych szczegółowych części, wzory do odlewów, wzory do formowania części RTV	modele koncepcyjne części do ograniczonego funkcjonalnego testowania, kolorowe modele dla FEA (finite element analysis) i innych podobnych zastosowań, modele architektoniczne i krajobrazowe, odlewy
Materiały	akryle ABS Polipropylen (PP)	akryle elastomery	poliamidy polistyren (PS) poliwęglany stopy stali i etali nierdzewnej stop brązu stop kobalt-chrom tytan	PVC - oparte na folii z tworzywa sztucznego Pakiety papieru	ABS poliwęglany (PC) elastomery	Warstwy plasterów kompozytowych elastomery

2. Metody pomiarowe

Założenia dla elementów protetycznych:

- tolerancja wymiarowa na poziomie 10 do 50 mikronów
- wytrzymałość na rozciąganie – 300 MPa
- wytrzymałości na ściskanie - 500 MPa
- twardości – 20HRC

- Wydajność produkcji – Minimum 20 elementów protetycznych przy założeniu maksymalnej kompleksowości i wieloelementowości poszczególnych protez.

3. Projekt modułowej linii technologicznej

3.1. Lista elementów linii produkcyjnej do wytwarzania indywidualnych łączników hybrydowych.

1. Moduł akwizycji danych 3D
 - Skanowanie wewnętrzne
 - Skanowanie modeli
 - Skanowanie RTG 3D CBCT
2. Moduł integracji danych i wirtualnego projektowania
 - Oprogramowanie do łączenia surowych danych
 - Oprogramowanie do wirtualnego projektowania
 - Oprogramowanie do przygotowania danych do obrabiarek i drukarek 3D
 - Komputery z monitorami HD minimum 24 cali – 2 szt
 - Stacje robocze przenośne (notebooki, monitor HD 17 cali) – 2 szt
3. Moduł prototypowania i druku 3D w technologii SLA
 - Drukarka 3D z łatwą możliwością wymiany materiałów drukowanych
 - Oprogramowanie do druku 3D wraz z komputerem sterującym
4. Moduł druku 3D dla tytanu w technologii SLM
 - Drukarka SLM z polem budowy o średnicy minimalnej 150 mm w wersji z drukiem w osłonie argonu.
5. Moduł druku 3D do pozostałych materiałów w technologii SLM
 - Drukarka SLM z polem budowy o średnicy minimalnej o średnicy minimalnej 150 mm w wersji z drukiem w osłonie argonu
 - Oprogramowanie CAM do frezowania
6. Moduł oprogramowania CAM do druku 3D
 - Komputer sterujący z monitorem do obsługi obu systemów druku 3D
7. Moduł integracji druku i frezowania
 - Zaprojektowany i wykonany moduł do integracji
 - Bibliotekageometrii modułu do zastosowań we frezarkach 4 i 5 osiowych
8. Moduł Frezowania końcowego pięcioosiowego
 - Frezarka 5 osiowa z uniwersalnym uchwytem do
 - Oprogramowanie CAM do frezowania
 - Komputer sterujący z monitorem
9. Moduł kontroli pasowania zestawów i znakowania
 - Mikroskop 3D do oceny dokładności pasowania
 - Mikroskop pomiarowy – warsztatowy

- Drukarka laserowa do oznaczania parametrów , numerów seryjnych i oznaczeń typu

3.2 .Opis linii technologicznej

Linia technologiczna stanowi nowoczesne rozwiązanie wychodzące naprzeciw oczekiwaniom rynku. Ponieważ została ona opracowana w systemie modułowym może stanowić uzupełnienie obecnie istniejących systemów lub być nabywana w poszczególnych elementach w zależności od budżetu klientów.

Linia posiada możliwość wykonywania systemu łączników indywidualnych dopasowanych do elementów implantowanych i elementów protetycznych wykonywanych w technologii hybrydowej.

Połączenie w jednej linii produkcyjnej urządzeń do użycia technologii addytywnych to wytwarzania elementów protetycznych, szablonów i modeli na bazie technologii druku 3D i technologii frezowania to wytwarzania elementów protetycznych, łączników i belek wielopunktowych w technologii obróbki mechanicznej 3D.

3.3.Opis rozwiązań projektowych

1. Integracja poszczególnych modułów linii technologicznej
2. Opracowanie zaprojektowanie i wykonanie adapterów umożliwiających integracje danych z poszczególnych modułów modułów
3. Opracowanie modułów oprogramowania odpowiadających na integrację danych
4. Zaprojektowanie i udoskonalenie procesu technologicznego w celu optymalizacji czasu i kosztów wykonania poszczególnych elementów

Materiały do druku i frezowania z podziałem na zastosowanie

Ze względu na zróżnicowane technologie wykonywania elementów uzupełnień protetycznych na rynku linia technologiczna jest dostosowana do stosowania różnorodnych materiałów dostępnych i stosowanych na rynku protetyki stomatologicznej od stopów chromowo kobaltowych po stopy tytanowe.

Ze względu na gotowe komponenty oferowane na rynku nie przewiduje się używania linii to wytwarzania standardowych łączników i elementów protetycznych, aczkolwiek technicznie może to być wykonalne jednakże nie jest to sposób produkcji znajdujący ekonomiczne zastosowanie.

Nowa technologia hybrydowa wymaga dostosowania materiałów obrabianych za pomocą frezowania do elementów wykonywanych w technologii addytywnej druku 3D.

Przewidujemy zastosowanie elementów wykonanych w tytanu GRADE 4 i 5 oraz CHROM KOBALT-u.

Jako surowiec do druku w technologii SLM zastosujemy

Do wykonania prototypów w technologii SLA i DLP stosujemy żywice polimerowe

3.4. Opis funkcjonalny poszczególnych modułów

1. Moduł akwizycji danych 3D – Proces produkcji łączników indywidualnych, szablonów chirurgicznych, czy odbudów protetycznych na bazie cyrkonu zaczyna się od przetworzenia rzeczywistych warunków panujących w jamie ustnej pacjenta na wirtualną chmurę punktów tworzącą później powierzchnię 3D. Taki proces przetworzenia może być procesem bezpośrednim oraz procesem pośrednim.
 - Skanowanie wewnątrzustne – jest to bezpośrednio przechwytywanie i przetwarzanie danych rzeczywistych na chmurę punktów, które po przetworzeniu tworzą powierzchnię 3D. Do tego celu używa się skanerów wewnątrzustnych. Personel gabinetów stomatologicznych, którym skaner wraz z komputerem i oprogramowaniem zostanie wypożyczony, przejdzie na wstępie zaawansowane szkolenie z obsługi urządzenia i oprogramowania. Skany pobrane w gabinecie zostaną bezpośrednio udostępnione do naszego centrum z kompletem informacji do jakiego systemu implantologicznego i jaka praca ma zostać wytworzona.
 - Skanowanie modeli – jest to pośrednio przechwytywanie i przetwarzanie danych rzeczywistych na chmurę punktów, które po przetworzeniu tworzą powierzchnię 3D. Personel w gabinecie stomatologicznym pobiera wyciski z ust pacjenta przy pomocy specjalnej masy. Takie wyciski trafiają do laboratorium protetycznego gdzie przy ich użyciu odlewa się modele z masy gipsowej. Takie modele wstawia się do specjalnego skanera laboratoryjnego gdzie zostają zeskanowane, a ich powierzchnia przetworzona w wirtualna powierzchnię 3D. Laboratoria protetyczne, którym zostanie wypożyczony skaner wraz z komputerem i oprogramowaniem do przechwytywania danych i projektowania prac bezpośrednio przesyłają do naszego centrum projekt pracy.
 - Skanowanie RTG 3D CBCT – tomograf służy między innymi do sprawdzenia możliwości wszczepienia implantu pacjentowi, a po zabiegu, sprawdzenia poprawności wszczepienia implantu pacjentowi w wyniku czego wiadome jest, czy można zacząć pracę protetyczną – czy można pobrać skan, zaprojektować i wytworzyć łącznik indywidualny lub inną pracę. Kolejnym zastosowaniem jest sprawdzenie poprawności wyfrezowania kanału śrubowego łącznika.
2. Moduł integracji danych i wirtualnego projektowania – kolejnym modułem naszej linii produkcyjnej jest moduł obejmujący sprzęt komputerowy i oprogramowanie CAD do przetwarzania danych i projektowania. Celem tego modułu jest otrzymanie gotowego pliku projektu, który przenosimy do oprogramowania CAM. Do tego celu potrzebne jest:

- Oprogramowanie do łączenia surowych danych – Oprogramowanie to jest potrzebne w przypadku projektowania szablonów chirurgicznych. Jego celem jest połączenie skanu 3D i tomografii komputerowej. Dzięki temu połączeniu istnieje możliwość pozycjonowania implantów, a w dalszym etapie zaprojektowania szablonu.
 - Oprogramowanie do wirtualnego projektowania – Jest to oprogramowanie CAD, gdzie wcześniej uzyskane skany 3D są bazą do wykonania projektu. Wgrywamy dane ze skanera i oprogramowanie prowadzi technika przez kolejne kroki procesu projektowania, aż do uzyskania gotowego pliku .stl z projektem do druku lub frezowania.
 - Komputery z monitorami HD minimum 24 cali (3 sztuki) – Komputery są dołączone do skanerów laboratoryjnych wraz z oprogramowaniem CAD. Specyfikacja sprzętowa nie powinna być gorsza niż: system operacyjny – Win10; procesor – Intel Core i7-9700F; 16 GB RAM; karta graficzna – NVIDIA GeForce GTX 1660Ti; dysk SSD 500GB. Taka specyfikacja komputera pozwoli na płynne działanie sprzętu.
 - Stacje robocze przenośne (notebooki, monitor HD 17 cali ; 2 sztuki) – Komputery te są dołączone do skanerów wewnętrznych. Specyfikacja sprzętowa nie powinna być gorsza niż: system operacyjny – Win10; procesor – Intel Core i7-9750H; 16 GB RAM; karta graficzna – NVIDIA GeForce GTX 1660Ti; dysk SSD 500GB. Taka specyfikacja komputera pozwoli na płynne działanie sprzętu.
3. Moduł druku 3D w technologii SLA – technologia wydruku SLA jest technologią utwardzania żywicy za pomocą wiązki lasera. Drukarki 3D wykorzystujące technologię SLA charakteryzują się bardzo dobrą dokładnością oraz powtarzalnością wydruku. Moduł ten powinien składać się z:
- Drukarka 3D w technologii SLA z łatwą wymianą materiałów drukowanych i z platformą wydruku (polem wydruku) o średnicy minimum 150 mm – Różnorodność dostępnych żywic i ich zastosowania sprawia, że dzięki drukarkom 3D możliwe jest wydrukowanie szablonu chirurgicznego, pracy protetycznej tymczasowej, wydruków do odlewania, modeli stomatologicznych wraz z maską dziąsła. To wszystko determinuje konieczność ciągłej zmiany zbiornika z żywicą, co z kolei wymusza zastosowanie systemu jego szybkiej, bezproblemowej wymiany.
 - Oprogramowanie CAM do druku 3D wraz z komputerem sterującym – Dzięki oprogramowaniu CAM gotowy plik .stl projektu można spozycjonować na platformie drukarki i przeliczyć to na współrzędne, które tworzą ścieżkę ruchu lasera i platformy. Taki proces przeliczenia bardzo mocno obciąża komputer przez co należy zastosować komputer o parametrach min: system operacyjny Win10; procesor – Intel Core i9-10920X; 32 GB RAM; karta graficzna – NVIDIA

GeForce RTX 2070 SUPER; dysk SSD 500GB + 1TB HDD. Taka specyfikacja komputera pozwoli na płynną i szybką pracę.

4. Moduł druku 3D dla tytanu w technologii SLM – technologia wydruku SLM jest technologią roztapiania i spajania proszku tytanu za pomocą wiązki lasera. Drukarki 3D wykorzystujące technologię SLM charakteryzują się stosunkowo dobrą dokładnością oraz powtarzalnością wydruku. Moduł ten powinien składać się z:
 - Drukarka 3D w technologii SLM z platformą wydruku (polem wydruku) o średnicy minimum 150 mm w wersji z drukiem w osłonie Argonu – Dzięki drukarce SLM jest możliwość wytwarzania prac z tytanu, tj. łączniki indywidualne, protezy szkieletowe, mosty, belki tytanowe w sposób bardziej przystępny cenowo, a odpady redukują się praktycznie do zera, dzięki czemu centrum frezowania staje się bardziej ekologiczne. Gaz osłonowy w postaci Argonu jest niezbędny w procesie spiekania tytanu, a platforma robocza o średnicy 15 cm sprawi, że czas spiekania pojedynczej pracy jest relatywnie krótki. Tytan jest charakterystycznym materiałem do obróbki, dlatego do tego wydruku prac potrzebna jest drukarka specjalnie skonfigurowana pod tytan.
 - Oprogramowanie CAM do druku 3D wraz z komputerem sterującym – Dzięki oprogramowaniu CAM gotowy plik .stl projektu można spozycjonować na platformie drukarki i przeliczyć to na współrzędne, które tworzą ścieżkę ruchu lasera i platformy. Taki proces przeliczenia bardzo mocno obciąża komputer przez co należy zastosować komputer o parametrach min: system operacyjny Win10; procesor – Intel Core i9-10920X; 32 GB RAM; karta graficzna – NVIDIA GeForce RTX 2070 SUPER; dysk SSD 500GB + 1TB HDD. Taka specyfikacja komputera pozwoli na płynną i szybką pracę.
5. Moduł druku 3D dla pozostałych amateriałów w technologii SLM – technologia wydruku SLM jest technologią roztapiania i spajania proszku metalowego za pomocą wiązki lasera. Drukarki 3D wykorzystujące technologię SLM charakteryzują się stosunkowo dobrą dokładnością oraz powtarzalnością wydruku. Moduł ten powinien składać się z:
 - Drukarka 3D w technologii SLM z platformą wydruku (polem wydruku) o średnicy minimum 150 mm w wersji z drukiem w osłonie Argonu – Dzięki drukarce SLM jest możliwość wytwarzania prac np. z chromo-cobaltu, tj. łączniki indywidualne, protezy szkieletowe, mosty, belki tytanowe w sposób bardziej przystępny cenowo, a odpady redukują się praktycznie do zera, dzięki czemu centrum frezowania staje się bardziej ekologiczne. Gaz osłonowy w postaci Argonu jest niezbędny w procesie spiekania tytanu, a platforma robocza o średnicy 15 cm sprawi, że czas spiekania pojedynczej pracy jest relatywnie krótki. Gaz osłonowy w postaci Argonu jest niezbędny w procesie spiekania tytanu, a platforma robocza o średnicy 15 cm sprawi, że czas spiekania pojedynczej pracy jest relatywnie krótki.

- Oprogramowanie CAM do druku 3D wraz z komputerem sterującym – Dzięki oprogramowaniu CAM gotowy plik .stl projektu można spozycjonować na platformie drukarki i przeliczyć to na współrzędne, które tworzą ścieżkę ruchu lasera i platformy. Taki proces przeliczenia bardzo mocno obciąża komputer przez co należy zastosować komputer o parametrach min: system operacyjny Win10; procesor – Intel Core i9-10920X; 32 GB RAM; karta graficzna – NVIDIA GeForce RTX 2070 SUPER; dysk SSD 500GB + 1TB HDD. Taka specyfikacja komputera pozwoli na płynną i szybką pracę.
6. Moduł frezowania końcowego pięcioosiowego – frezowanie pozwala uzyskać najwyższą dokładność wytwarzanych prac, jednak frezowanie prac z prefabrykatów jest droższe niż prace drukowane. Dodatkowo generuje się większa ilość odpadów. Dlatego opracowano system druku prac oraz ich szlifowanie na frezarkach. Dzięki temu prace są wytworzone z najwyższą dokładnością przy małej ilości odpadów.
- Frezarka 5 osiowa z uniwersalnym uchwytem z możliwością frezowania wszystkich dostępnych materiałów – Maszyna do frezowania tytanu czy chromo-kobaltu powinna mieć wrzeciono o mocy co najmniej 3.0kW, co pozwoli na szybką obróbkę materiału. Uniwersalny uchwyt sprawia, że centrum nie będzie uzależnione od jednego dostawcy materiałów dzięki czemu będzie możliwość negocjacji cen i zredukować ceny gotowego produktu, przy centrum tego typu maszyna o 5 ruchomych osiach jest konieczna.
 - Oprogramowanie CAM do frezowania z komputerem sterującym - Dzięki oprogramowaniu CAM gotowy plik .stl projektu można spozycjonować w wirtualnym uchwycie ramki i przeliczyć to na współrzędne, które tworzą ścieżkę ruchu wrzeciona. Taki proces przeliczenia bardzo mocno obciąża komputer przez co należy zastosować komputer o parametrach min: system operacyjny Win10; procesor – Intel Core i9-10920X; 32 GB RAM; karta graficzna – NVIDIA GeForce RTX 2070 SUPER; dysk SSD 500GB + 1TB HDD. Taka specyfikacja komputera pozwoli na płynną i szybką pracę.
7. Moduł integracji druku i frezowania – moduł ten ma na celu zintegrowanie wszystkich maszyn oraz wszelkiego oprogramowania w jedną, spójną całość.
- Zaprojektowany i wykonany moduł do integracji – Celem jest połącznie wszystkich maszyn i oprogramowania w sposób ułatwiający pracę centrum frezowania i klientów w postaci laboratoriów protetycznych, czy gabinetów stomatologicznych. Skany wykonane w gabinetach stomatologicznych będą wysyłane bezpośrednio w sposób zaszyfowany z komputera klienta do centrum wraz z informacjami na temat tego jaka to będzie praca, na kiedy ma zostać wykonana. Dodatkowo klient będzie miał możliwość sprawdzenia na jakim etapie znajduje się obecnie praca, bezpośrednio w programie, a w momencie wysyłki będzie miał możliwość śledzenia przesyłki. Dokładnie taka sama sytuacja będzie miała miejsce w przypadku laboratoriów protetycznych,

- z tą różnicą, że w przypadku laboratorium mamy do czynienia z gotowym plikiem stl. projektu. Kolejnym etapem integracji będzie integracja oprogramowania CAD i oprogramowania CAM oraz stworzenia serwera z jedną zintegrowaną bazą danych. Do tego celu będzie potrzebny serwer z dyskami w macierzy o pojemności 5TB z możliwością rozszerzenia pamięci.
- Biblioteka geometrii modułu do zastosowań we frezarkach 4 i 5 osiowych – biblioteka geometrii połączeń implantologicznych i zastosowanie ich podczas procesu frezowania dużą wartością dodaną podczas wytwarzania prac bezpośrednio z pozycji implantu. Dzięki zastosowaniu geometrii zewnętrznej frezarka ma możliwość dokładnego oszlifowania połączenia implantologicznego co bezpośrednio wpływa na jego jakość. Skutkiem jest minimalizacja problemów zdrowotnych pacjenta i ewentualnego stanu zapalnego.
8. Moduł kontroli pasowania zestawów i znakowania – po wytworzeniu pracy konieczne jest sprawdzenie jakości wyrobu. Pierwszym krokiem jest ocena wizualna. Do kolejnych kroków potrzebny jest sprzęt, tj.:
- Mikroskop 3D do oceny dokładności pasowania – dzięki temu mikroskopowi można sprawdzić dokładność pasowania pracy oraz ewentualne pęknięcia na powierzchni. Dzięki tym krokom jesteśmy w stanie wyeliminować ewentualne wady produktów, co pozwoli zaoszczędzić czas i pieniądze lekarza oraz pacjentów.
 - Mikroskop pomiarowy (warsztatowy) – Mikroskop tego typu jest potrzebny do sprawdzenia geometrii zewnętrznej produktów. To kolejny krok w ocenie poprawności wykonania pracy.
 - Drukarka laserowa do oznaczania parametrów, numerów seryjnych i oznaczeń typu – laserowe grawerowanie oznaczeń na pracach jest szybkie i bardzo dokładne (konieczność stosowania małej czcionki ze względu na gabaryty produktów). Oznaczanie produktów jest konieczne i ma na celu między innymi ich identyfikowanie.

3.5. Założenia techniczne i funkcjonalne poszczególnych modułów

Założenia techniczne dane wejściowe i wyjściowe dla poszczególnych modułów

1. Moduł akwizycji danych 3D – Moduł w którym danymi wejściowymi są rzeczywiste warunki panujące w jamie ustnej pacjenta. Po wykonaniu skanu i przetworzeniu danych, dane wyjściowe to powierzchnie 3D w postaci pliku .stl (dane ze skanerów) oraz tomografia komputerowa w postaci plików .dcm, będące wirtualnym odwzorowaniem rzeczywistych warunków.

2. Moduł integracji danych i wirtualnego projektowania – Moduł, w którym danymi wejściowymi są skany .stl oraz pliki .dcm. Następnie w wyniku użycia oprogramowania CAD i przeprowadzenia procesu projektowania otrzymujemy gotowe projekty w postaci plików .stl.
3. Moduł druku 3D w technologii SLA – Moduł, w którym projekty w postaci plików .stl są przetwarzane w programie CAM, a następnie drukowane. Danymi wyjściowymi tego modułu są gotowe prace w postaci odbudów tymczasowych, modele stomatologiczne, szablony chirurgiczne, prace do odlewania.
4. Moduł druku 3D dla tytanu w technologii SLM - Moduł, w którym projekty w postaci plików .stl są przetwarzane w programie CAM, a następnie drukowane. Danymi wyjściowymi tego modułu są gotowe prace w postaci łączników indywidualnych, mostów, podbudów, belek, protez szkieletowych.
5. Moduł druku 3D dla pozostałych materiałów w technologii SLM - Moduł, w którym projekty w postaci plików .stl są przetwarzane w programie CAM, a następnie drukowane. Danymi wyjściowymi tego modułu są gotowe prace w postaci łączników indywidualnych, mostów, podbudów, belek, protez szkieletowych.
6. Moduł frezowania końcowego pięcioosiowego - Moduł, w którym projekty w postaci plików .stl są przetwarzane w programie CAM, a następnie frezowane. Danymi wyjściowymi tego modułu są gotowe prace w postaci łączników indywidualnych, mostów, podbudów, belek, protez szkieletowych, prace tymczasowe. Dodatkowo elementami wejściowymi są prace z drukarek SLM wraz z projektami w postaci .stl, następnie prace na podstawie projektu są szlifowane. Elementami wyjściowymi są gotowe prace w postaci łączników indywidualnych, mostów.
7. Moduł integracji druku i frezowania – Jest to moduł wspomagający, którego danymi wejściowymi są dane z różnych programów, a danymi wyjściowymi zintegrowany system informatyczny centrum frezującego
8. Moduł kontroli pasowania zestawów i znakowania – danymi wejściowymi w tym module są wszystkie prace z frezarek i drukarek, a danymi wyjściowymi prace po kontroli jakości i oznaczeniu.

4. Wybór i określenia dostawców poszczególnych elementów i harmonogramu dostaw.

Po przeprowadzeniu gruntownej analizy dostępnych rozwiązań na rynku międzynarodowym, biorąc pod uwagę przedstawione wcześniej założenia, w poniższym zestawieniu proponuje się wybrane urządzenia, spełniające podstawowe wymagania co do budowy kompletnego rozwiązania, będącego przedmiotem projektu.

1. Moduł akwizycji danych 3D
 - Skanowanie wewnątrzustne:
 - Skaner Medit i500 firmy MEDIT corp. (*),
URL: <https://www.medit.com/>

- Skanery Trios firmy 3Shape A/S,
URL: <https://www.3shape.com/>
- Skanery Emerald/PlanScan firmy PLANMECA,
URL: <https://www.planmeca.com/cadcam/dental-scanning/intraoral-scanners/>
- Skanery CEREC Primescan firmy Dentsply Sirona,
URL: <https://lp.dentsplysirona.com/pl/primescan.html>
- Skanery Aoralscan firmy SHINING 3D,
URL: <http://www.shining3ddental.com/intraoral-3d-scanner/>
- Skanowanie modeli:
 - Skaner AutoScan-DS-EX Pro firmy SHINING 3D Technology (*),
URL: <http://www.shining3ddental.com/AutoScan-DS-EX-Pro/Autoscan-DS-EX%20Pro%20dental%203D%20scanner.html>
 - Skaner PlanScan Lab firmy Planmeca,
URL: <https://www.planmeca.com/cadcam/dental-scanning/planmeca-planscan-lab/>
 - Skaner inEos firmy Dentsply Sirona,
URL: <https://www.dentsplysirona.com/pl-pl/explore/lab/cad-cam-equipment-dental-lab/scan.html>
- Skanowanie RTG 3D CBCT:
 - Tomografy typu CBCT X-era firmy YOSHIDA (*),
URL: <https://www.yoshida-net.co.jp/en/>
 - Tomografy X-View 3D Pan firmy Trident S.r.l.,
URL: <https://www.trident-dental.com/x-view-3d-panoramic-trident/>
 - Tomografia ProMax 3D Max firmy PLANMECA,
URL: <https://www.planmeca.com/imaging/3d-imaging/planmeca-promax-3d-max/>
 - Tomografy Orthophos SL 3D firmy Dentsply Sirona,
URL: <https://www.dentsplysirona.com/pl-pl/explore/imaging-systems/panoramic-cbct/extraoral-3d-units/orthophos-sl-3d.html>
 - Tomopgrafy VATECH,
URL: <https://www.vatech.com/>
- 2. Moduł integracji danych i wirtualnego projektowania
 - Oprogramowanie do łączenia surowych danych:
 - Oprogramowanie CAD/CAM INTERWARE (*),
URL: <https://www.inteware.com.tw/>
 - Oprogramowanie CAD/CAM EXOCAD,
URL: <https://exocad.com/>
 - Oprogramowanie do wirtualnego projektowania:
 - Oprogramowanie CAD/CAM INTERWARE (*),
URL: <https://www.inteware.com.tw/>

- Oprogramowanie CAD/CAM EXOCAD,
URL: <https://exocad.com/>
 - Stacje robocze stacjonarne z monitorami HD minimum 24 cali – 2 szt
 - Stacje robocze przenośne (notebooki, monitor HD 17 cali) – 2 szt
3. Moduł prototypowania i druku 3D w technologii SLA lub DLP
- Drukarka 3D z łatwą możliwością wymiany materiałów drukowanych:
 - Drukarki rodziny XFAB firmy DWS (*),
URL: <https://www.dwssystem.com/3d-printers/dental-lab-clinic/xfab-2500pd-en>
 - Drukarki rodziny Form2/3 firmy FORMLABS,
URL: <https://formlabs.com/eu/>
4. Moduł druku 3D dla tytanu w technologii SLM
- Drukarka SLM z polem budowy o średnicy minimalnej 150 mm w wersji z drukiem w osłonie argonu:
 - Drukarki SLM rodziny D z osłoną argonu firmy Foshan Rxton Technology (*),
URL: <https://www.rxton.com/en/index.html>
 - Drukarki SLM rodziny EP z osłoną argonu firmy Shining 3D Technology,
URL: <http://www.shining3ddental.com/ep-m150/EP-M150%203D%20Printer.html>
 - Drukarki SLM rodziny Truprint firmy TRUMPF,
URL: https://www.trumpf.com/pl_PL/produkty/maszyny-systemy/systemy-produkcji-wytwarzanie-przyrostowe/truprint-seria-1000/
 - Drukarki SLM rodziny Mysint firmy SISMA S.p.A.,
URL: <https://www.3d.sisma.com/mysint-100-3d?lang=en>
 - Drukarki SLM rodziny Lasertec firmy DMG MORI. CO. LTD.,
URL: <https://www.dmgmori.co.jp/en/products/machine/id=4367>
5. Moduł druku 3D do pozostałych materiałów w technologii SLM
- Drukarka SLM z polem budowy o średnicy minimalnej 150 mm w wersji z drukiem w osłonie argonu:
 - Drukarki SLM rodziny EP z osłoną argonu firmy Shining 3D Technology (*), URL: <http://www.shining3ddental.com/ep-m150/EP-M150%203D%20Printer.html>
 - Drukarki SLM rodziny Mysint RM/PM firmy SISMA S.p.A.,
URL: <https://www.3d.sisma.com/mysint-100-rmpm?lang=en>
 - Drukarki SLM rodziny Lasertec firmy DMG MORI. CO. LTD.,
URL: <https://www.dmgmori.co.jp/en/products/machine/id=4367>
 - Drukarki SLM rodziny Truprint firmy TRUMPF,
URL: https://www.trumpf.com/pl_PL/produkty/maszyny-systemy/systemy-produkcji-wytwarzanie-przyrostowe/truprint-seria-1000/

6. Moduł oprogramowania CAM do druku 3D
 - Oprogramowanie do druku 3D SLM – Materialise Magics,
URL: <https://www.materialise.com/en/software/magics>
 - Stacja robocza z monitorem do obsługi obu systemów druku 3D

7. Moduł integracji druku i frezowania
 - Zaprojektowany i wykonany moduł do integracji
 - Biblioteka geometrii modułu do zastosowań we frezarkach 4 i 5 osiowych

8. Moduł Frezowania końcowego pięcioosiowego
 - Frezarka 5 osiowa z uchwytem uniwersalnym:
 - Rodzina frezarek 5X firmy ARUM (*),
URL: <https://www.doowonid.com/eng/>
 - Rodzina frezarek Roland Mill DWX firmy ARGENT,
URL: <https://www.argen.com/#/>
 - Rodzina frezarek DMU firmy DMGMORI,
URL: <https://www.dmgmori.co.jp/en/products/machine/id=1440>
 - Rodzina frezarek C5/D5 firmy DATRON,
URL: https://www.datron.de/en_gb/dental-cadcam/dental-milling-machines.html
 - Oprogramowanie CAM do frezowania:
 - Oprogramowanie HYPERDENT firmy FOLLOW-ME! (*),
URL: <https://www.follow-me-tech.com/hyperdent/>
 - Oprogramowanie WORKNC Dental firmy Hexagon (*),
URL: <https://www.workncdental.com/>
 - Stacja robocza z monitorem

9. Moduł kontroli pasowania zestawów i znakowania
 - Mikroskop 3D do oceny dokładności pasowania:
 - Mikroskop stomatologiczny z kamerą 3D HD firmy ZUMAX Medical (*),
URL: <http://www.zumaxmedical.com/>
 - Mikroskop pomiarowy – warsztatowy:
 - Mikroskop serii MM firmy NIKON (*),
URL: <https://www.nikonmetrology.com/images/brochures/mm-series-en.pdf>
 - Drukarka laserowa do oznaczania parametrów , numerów seryjnych i oznaczeń typu:
 - Drukarka RXTON TECHNOLOGY,
URL: <https://www.rxton.com/en/index.html>

W powyższym zestawieniu za pomocą oznaczenia (*) wskazano rozwiązania sugerowane.

Przedstawione zestawienie oraz sugestie co do doboru sprzętu i oprogramowania mogą zostać zmienione przez Zamawiającego w zależności od zmian w modelu procesu technologicznego oraz zmieniającej się sytuacji gospodarczej.

5. Bibliografia

- [1.1] Ruszaj A.: Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi, Prace Instytutu Obróbki Skrawaniem; Seria: Monografie, 1999.
<http://3dtech.cba.pl/historia-druku-3d/>
- [1.2] Miecielica M.: *Rapid prototyping – metody i możliwości zastosowania w inżynierii biomedycznej*, AGH, Kraków 2009.
- [1.3] Budzik G.: *Wytwarzanie modeli łopatek przyrostowymi metodami szybkiego prototypowania*, wydaw. Polit. Rzeszowskiej, Rzeszów 2009.
- [1.4] Miecielica M.: *Analiza wybranych metod szybkiego prototypowania*, PW IIPiB, Warszawa 2007.
- [1.5] Gebhardt A.: *Rapid prototyping*, Carl Hanser Verlag, Munich 2003.
- [1.6] Cooper K.: *Rapid prototyping technology – selection and application*, Marcel Dekker, New York 2001.
- [1.7] Ocoś K.E: *Rapid Prototyping – znaczenie, charakterystyka metod i możliwości* Mechanik 10, 1997
- [1.8] Chlebus E.: *Techniki komputerowe CAx w inżynierii produkcji*, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 2000r.
- [1.9] Kiełbus A., Furyk-Grabowska K.: *Procesy wytwarzania elementów z technologii FDM i ich wpływ na środowisko, Bezpieczeństwo pracy środowisko zarządzanie. T. 2. – Katowice: Wyższa Szkoła Zarządzania Ochroną Pracy w Katowicach, 2015*
- [1.10] [http:// www.yeggi.com](http://www.yeggi.com)
- [1.11] Praca zbiorowa: *Chemia*. Małgorzata Wiśniewska (red.). Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2001, seria: Encyklopedia dla Wszystkich. ISBN 8320425905.
- [1.12] Nowak B., Pajak J.: *Biodegradacja polilaktydu (PLA)*, Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska, Vol. 12 nr 2 (2010),.
- [1.13] [http:// www.zortrax.pl](http://www.zortrax.pl).
- [1.14] [http:// www.e-prototypy.pl/drukowanie-3d-sls](http://www.e-prototypy.pl/drukowanie-3d-sls)
- [1.15] <http://www.ios.krakow.pl/59,a,spiekание-metoda-sls-drukowanie-3d.htm>
- [1.16] <http://swiatdruku3d.pl/stereolitografia/>
- [1.17] Kaziunas France A.: *Make: 3D Printing: The Essential Guide to 3D Printers*, Helion, Gliwice 2014
- [1.18] Chrostowski J.: *Jak królik z kapelusza – Wiedza i życie*, marzec 2009r.

[1.19] Płatek P., Zahor M.: *Zastosowanie metody FDM techniki szybkiego prototypowania w procesie projektowania modułowego systemu broni strzeleckiej kalibru 5,56 mm (MSBS-5,56)*, Problemy Techniki Uzbrojenia WITU Zeszyt 110, nr 2/2009

[1.20] Chlebus E.: *Innowacyjne technologie Rapid Prototyping – Rapid Tooling w rozwoju produktu*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.