



## Zastosowanie wiązki lasera w procesie Rapid Prototyping

Ł. Czernikowski<sup>a</sup>, M. Bonek<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny  
email: lczerwikowski@gmail.com

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów  
Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie  
email: mirosław.bonek@polsl.pl

**Streszczenie:** W pracy dokonano analizy procesów Rapid Prototyping. Przedstawiono znaczenie i rozwój stosowania technologii RP w projektowaniu produktu. Dokonano podziału metod RP oraz przedstawiono siedem najważniejszych technologii. Przedstawiono również zastosowanie wiązki lasera w procesach Rapid Prototyping.

**Abstract:** This paper provides an overview of the information about Rapid Prototyping. The meaning and usage up growth of the RP techniques in product development was showed. The RP methods were divided and seven most important RP techniques were presented. In this study there was also presented examples of the utilization of laser beam in RP process.

**Słowa kluczowe:** Rapid Prototyping, laser, prototypowanie, wytwarzanie

### 1. WSTĘP

Kształtowanie rzeczywistości adekwatnie do zamierzeń i wyobrażeń człowieka od zawsze było motorem rozwoju. Postęp cywilizacyjny jest nieustannie związany z dążeniem do dopasowania otoczenia lub jego fragmentów do naszych potrzeb. Zwykle obiekty modeluje się poprzez usuwanie nadmiaru materiału, łączenie brył bądź zmianę stanu skupienia, w czasie której materiał w postaci płynnej (metal, polimer itp.) zastyga wewnątrz wykonanej uprzednio formy.

Dotychczasowe technologie kształtowania mają jednak dziesiątki wad. Popularna obróbka skrawaniem wymaga drogich urządzeń, specjalnych warunków pracy i jest stosunkowo niebezpiecznym i drogim procesem. Skrawanie daje sporo odpadów, a kształt obiektu podlega istotnym ograniczeniom, jak choćby podczas zabiegu toczenia, możliwego wyłącznie w przypadku brył obrotowych. Z kolei wykonanie odlewu wymaga niezwykle czasochłonnego przygotowania formy. Czasu potrzeba na to tym więcej, im bardziej złożona jest topologia docelowej bryły [1].

Najlepszym rozwiązaniem byłoby, zamiast usuwać nadmiar materiału z tworzonych modeli, tworzyć przedmioty i narzędzia od razu w docelowym kształcie, kontrolując

powstawanie bryły w każdym fragmencie jej objętości. Zakres kontroli mógłby obejmować szerszy zbiór własności, nie tylko geometryczne. Odpowiednio dobierając materiały, istniałaby możliwość decydowania o takich własnościach obiektu, jak kolor, twardość, elastyczność, przewodnictwo cieplne czy elektryczne. Dodatkowo dobrym rozwiązaniem byłoby stworzenie technologii umożliwiającej kontrolowanie tych własności nie tylko dla całego obiektu, ale również jego poszczególnych fragmentów.

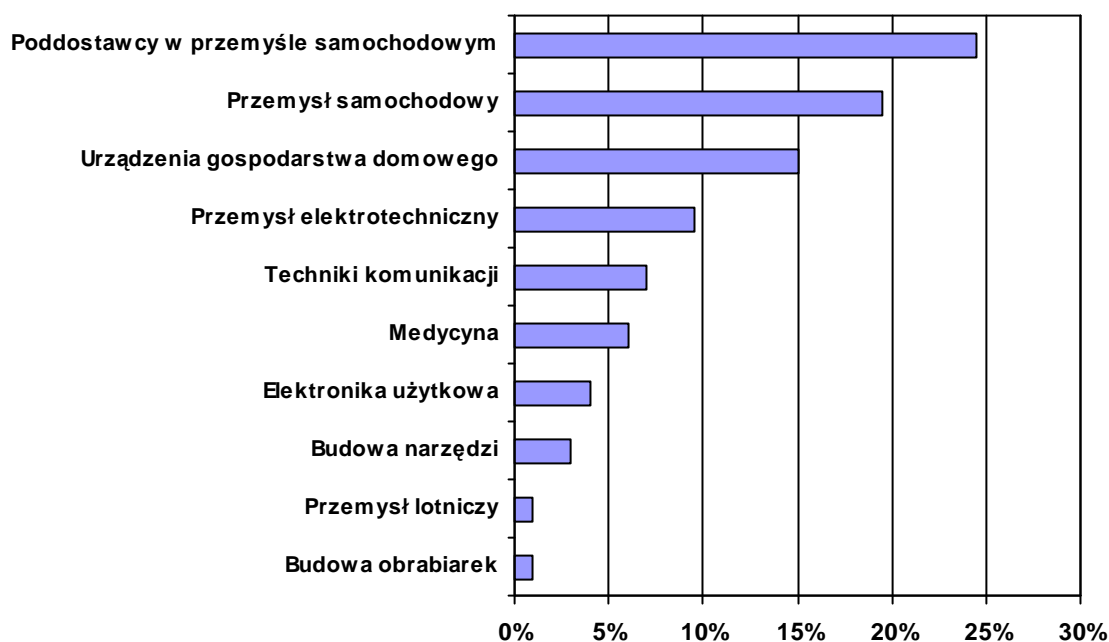
Taka technologia umożliwiłaby precyzyjne budowanie modeli, uwzględniając założone wymagania, a także tworząc w jednym cyklu produkcyjnym element o właściwościach precyzyjnie dobranych w każdym punkcie [1].

### Zastosowanie technologii Rapid Prototyping

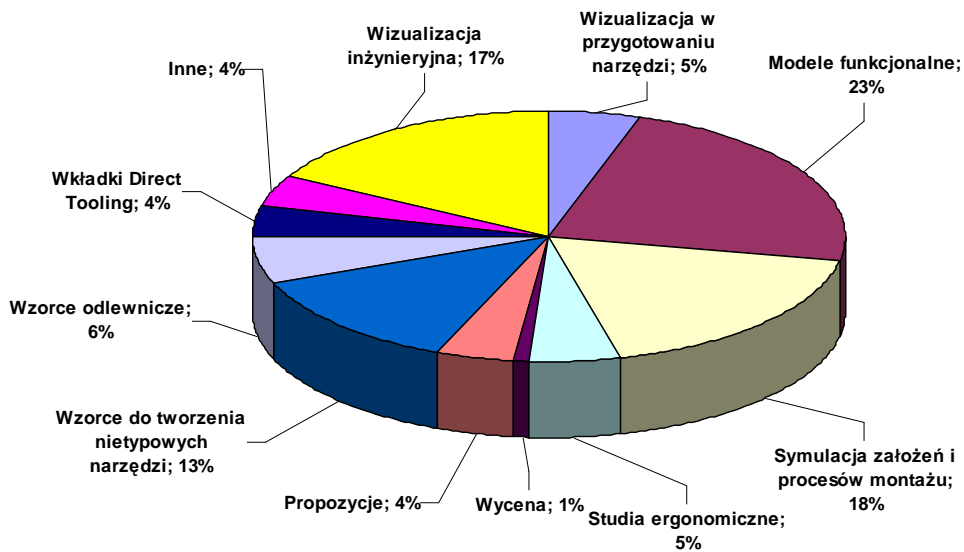
Techniki RP, dzięki którym na podstawie trójwymiarowego, wirtualnego modelu CAD-3D możliwe jest wykonanie fizycznych modeli, części wzorcowych i prototypów, znajdują coraz szersze zastosowanie w technikach rozwoju produktu i przyczyniają się do szybkiego wytwarzania prototypów, jak i całego produktu oraz przygotowanie jego procesu wytwarzania.

Zakres zastosowań tych technik ciągle się powiększa, co jest szczególnie widoczne w przemyśle motoryzacyjnym, gdzie ich udział sięga nawet 25% czasu rozwoju produktu. Można stwierdzić, że w dzisiejszych realiach jest to udział stosunkowo mały. Wiadomo jednak, że z zastosowaniem tradycyjnych technik budowy prototypów (najczęściej metodami obróbki skrawaniem) czas budowy prototypu sięgał nieraz 60% czasu realizowanych prac rozwojowych i projektowych [2].

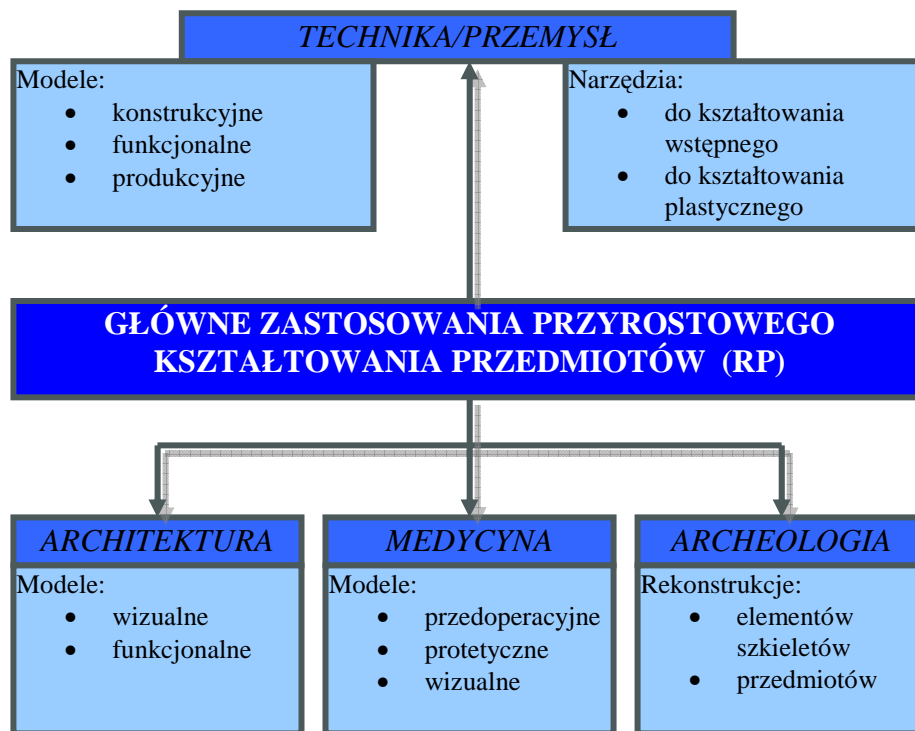
Zakres zastosowań technik RP, ilustrują poniższe rysunki (rys. 1-3):



Rysunek 1. Obszary zastosowań technik RP [2].



Rysunek 2. Obszary zastosowań modeli wykonanych technikami RP [2].



Rysunek 3. Przykładowe zastosowania technik RP [3].

### Podział metod Rapid Prototyping

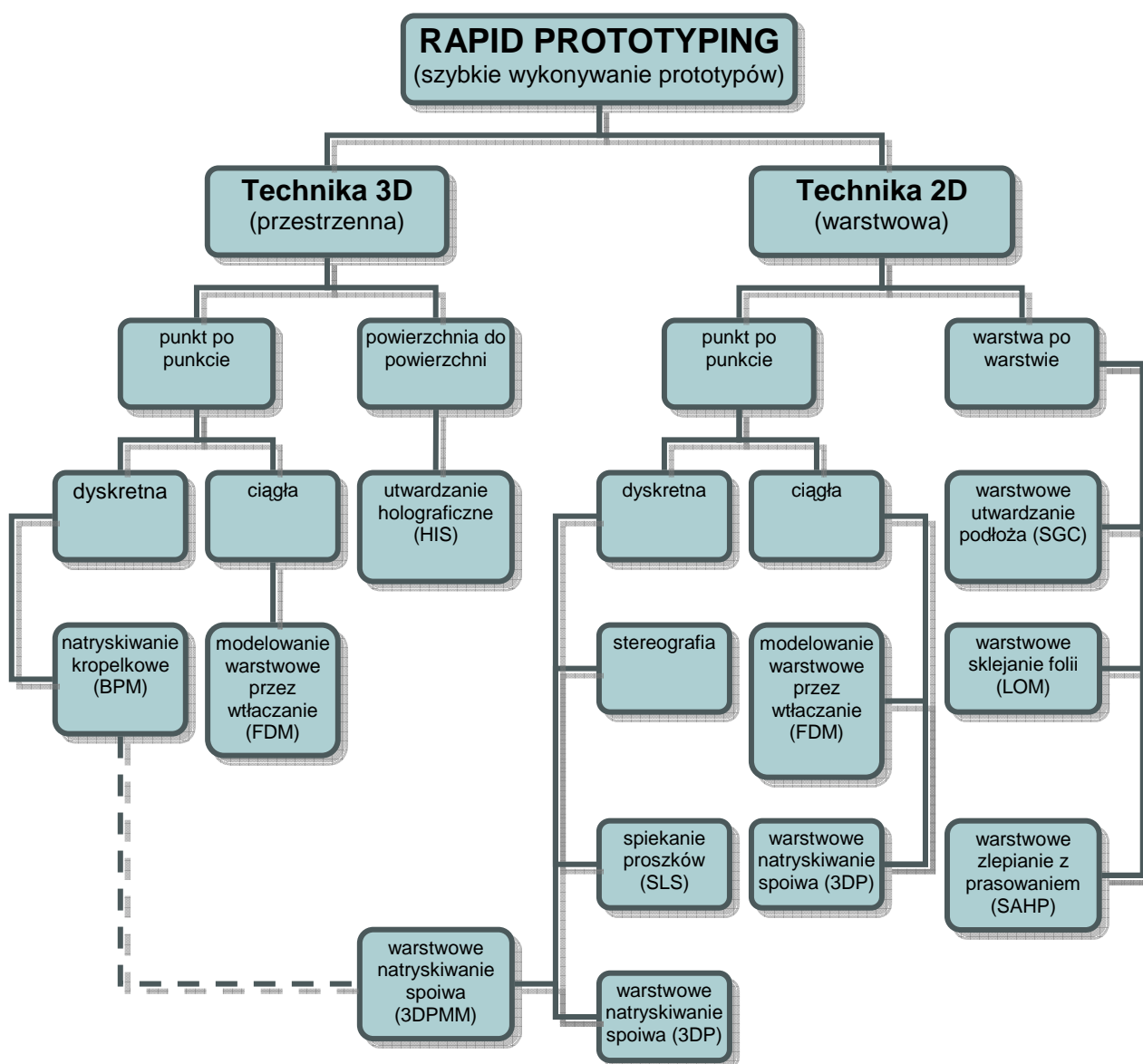
Obecnie istnieje wiele technik Rapid Prototyping, są one rozwijane oraz powstają ich nowe odmiany. Do najpopularniejszych i najpowszechniejszych technik należą [1,2,26].

- stereolitografia (Stereolithography SL, SLA),

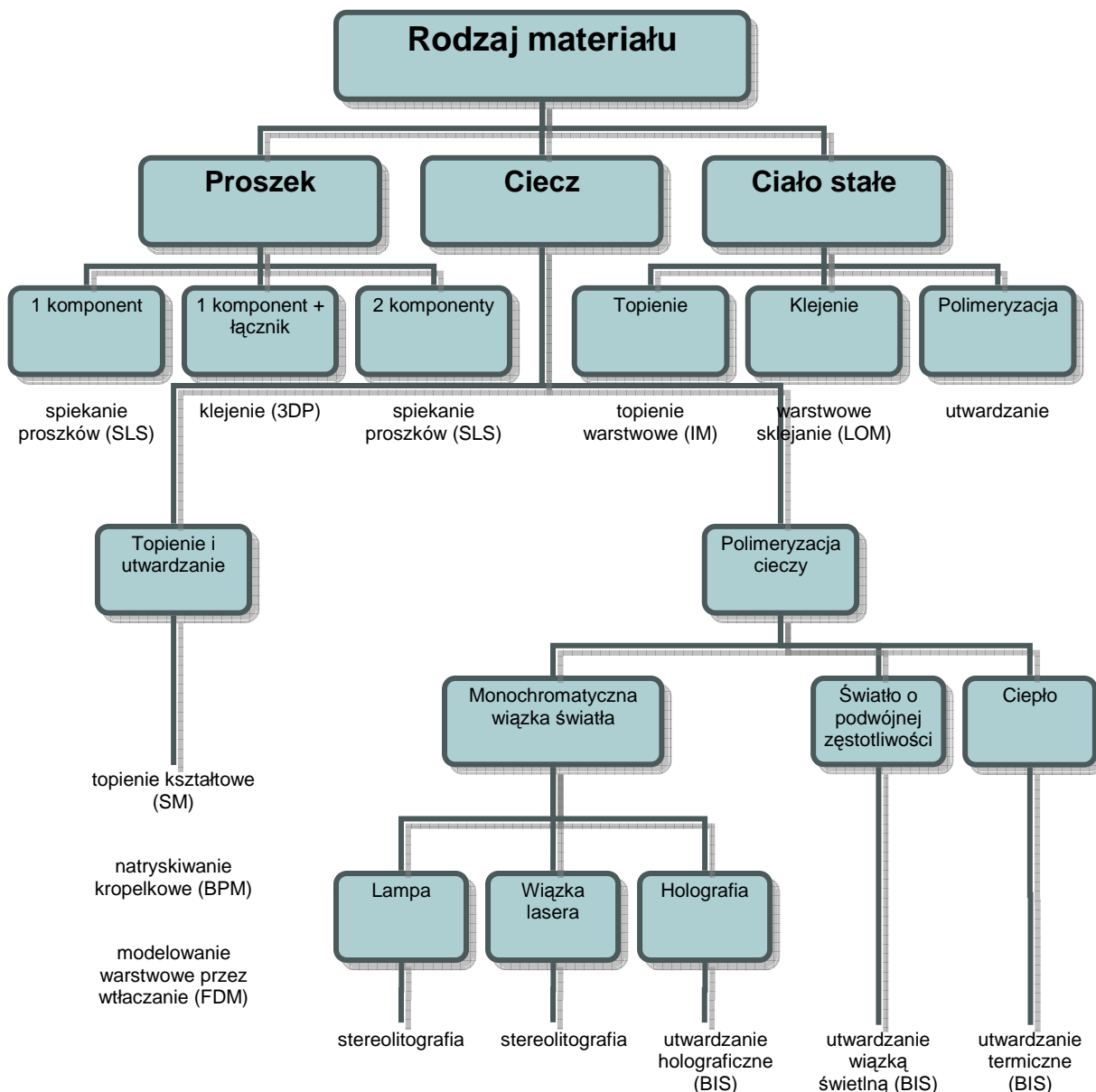
- selektywne laserowe spiekanie proszku (Selective Laser Sintering - SLS),
- przestrzenne zestalanie proszku lepiszczem (3D Printing- 3DP),
- wielostrumieniowe nanoszenie materiału (Ink Jet Printing IJP),
- wytłoczne osadzanie stopionego materiału (Fused Deposition Modeling FDM),
- warstwowe wytwarzanie obiektów (Laminated Object Manufacturing LOM),
- Laser Engineered Net Shaping (LENS).

Najpopularniejszymi metodami są: SLA – ok. 70% zastosowań, LOM – ok. 12%, FDM – ok. 9% oraz SLS ok. 6% [5].

Podział metod RP ilustrują poniższe rysunki (rys. 4,5):



Rysunek 4. Podział metod RP ze względu na sposób budowy modelu [2].



Rysunek 5. Podział metod RP ze względu na stosowane materiały i procesy [2].

## CHARAKTERYSTYKA POSZCZEGÓLNYCH METOD I TECHNIK RAPID PROTOTYPING

### Stereolitography – (SLA)

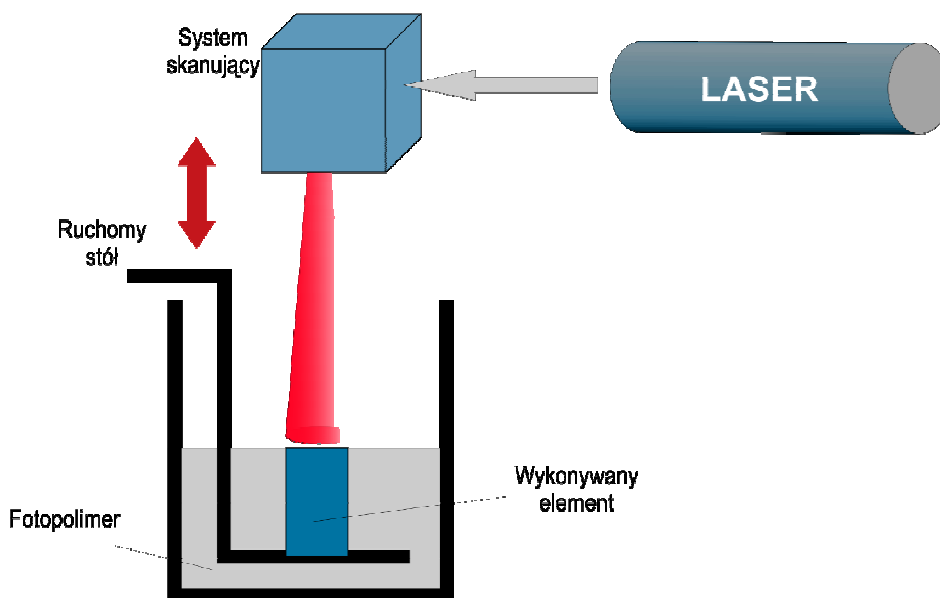
Najstarszą, najbardziej rozpowszechnioną i najlepiej poznaną metodą RP jest SLA (stereolitography) – stereolitografia. Została wprowadzona w 1987 roku przez C. Hulla i zaprezentowana po raz pierwszy przez amerykańską firmę 3D Systems Inc. roku na targach AUTOFACT w Detroit. Technologia ta nosiła nazwę 3D System's StereoLithography Apparatus (SLA) [5].

Pierwszym etapem realizacji tej metody jest geometryczne modelowanie przedmiotu w systemie CAD-3D, następnie dane geometryczne są przetwarzane za pomocą specjalnego programu, który dokonuje w płaszczyźnie X/Y podziału modelu 3D na warstwy grubości ok. 0,1 mm (grubość warstw zależy zadanej dokładności modelowania i mocy lasera). Na podstawie powstałego zbioru warstw tworzony jest program do sterowania wiązką lasera [5].

Schemat realizacji procesu stereolitografii, przedstawia rysunek 6. Program steruje wykreślaniami przez urządzenie stereolitograficzne, przekroju bryły w cienkiej warstwie płynnego fotopolimeru, za pomocą ultrafioletowej wiązki laserowej. W miejscu naświetlania następuje fotopolimeryzacja i miejscowa zmiana stanu skupienia polimeru, ze stanu ciekłego w stały. Utwardzony fragment obniża się o ułamek milimetra (spód komory roboczej jest ruchomy) i pokrywa nową warstwą płynnego fotopolimeru, która łączy się z warstwą poprzednią, tworząc jednolitą bryłę. Przed każdą fazą naświetlania wiązką lasera kolejnej warstwy, następuje wyrównanie poziomu polimeru (aby naświetlana warstwa miała taką samą wysokość). Cały proces jest powtarzany aż do uzyskania gotowej bryły. Po zakończeniu procesu tworzenia obiektu jest on wyjmowany i dodatkowo utwardzany przez naświetlenie światłem ultrafioletowym [1-5].

Elementy tworzone tą metodą wymagają zaprojektowania i wykonania odpowiednich elementów wspierających tzw. podpór, zapewniających stabilność podczas naświetlania kolejnych warstw materiału roboczego. Podpory te stanowią integralną część tworzonego obiektu i są dołączane do trójwymiarowego modelu tuż przed jego podziałem na poszczególne przekroje. Po wytworzeniu bryły trzeba je usunąć. Uzyskane za pomocą SLA elementy często poddawane są dodatkowym zabiegom wygładzającym powierzchnię lub poprawiającym ogólne parametry wytrzymałościowe [1-5].

Czas skanowania wiązką lasera zależy od kompleksowości powierzchni poszczególnych warstw obiektu, prędkości przemieszczania się lasera, oraz czasu utwardzania polimeru i łączenia z poprzednią warstwą. Aby zapobiec różnicom w wysokości poszczególnych warstw, wyrównuje się powierzchnię ciekłego polimeru za pomocą zgarniacza [5].



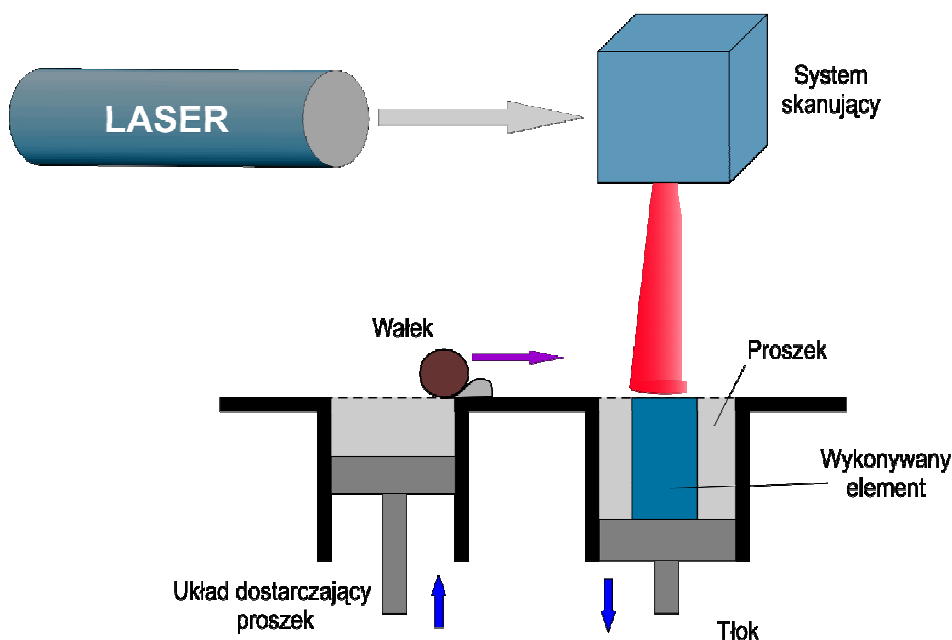
Rysunek 6. Zasada działania urządzenia stereolitograficznego (SLA) [7].

Metoda ta ma duże zastosowanie w budowie modeli oraz prototypów w branżach takich jak: wzornictwo przemysłowe, przemysł motoryzacyjny, medycyna, architektura.

### Selective Laser Sintering (SLS)

Metoda SLS (Selective Laser Sintering) – selektywnego spiekania laserem została opracowana na Uniwersytecie Austin w Stanach Zjednoczonych [5].

Schemat działania metody selektywnego spiekania laserem, ilustruje rysunek 7. W metodzie tej cienka warstwa termoplastycznego proszku, zostaje poddana punktowemu spiekaniu za pomocą ciągłej wiązki laserowej o dużej mocy (50-100W). Następuje wówczas również topienie poprzednio ułożonej warstwy, dzięki czemu uzyskuje się jednolitą bryłę tworzonego modelu. Ośrodkiem czynnym wykorzystywanym w laserze stosowanym w tej metodzie jest dwutlenek węgla. Aby zwiększyć wydajność urządzenia, często stosowane są zespoły laserów. W komorze roboczej panuje temperatura nieznacznie niższa od temperatury topnienia proszku roboczego. Komora wyposażona jest w ruchomą podstawę, na którą głowica podająca równomiernie nanosi warstwę proszku. Po przeprowadzeniu lokalnego spiekania laserem (z uwagi na temperaturę w komorze roboczej światło laserowe musi jedynie nieznacznie podnieść temperaturę w wybranych punktach) nanoszona jest kolejna warstwa proszku i cykl jest powtarzany. Materiał w tej metodzie przechodzi ze stany stałego (proszek), przez stan płynny, ponownie do stanu stałego (spiek). Proszek z miejsc znajdujących się poza przekrojem nie jest usuwany i może funkcjonować jako podpora. W niektórych urządzeniach możliwe jest spiekanie w środowisku gazowym o ściśle określonym składzie chemicznym. Materiałami stosowanymi w metodzie SLS są: tworzywa sztuczne, wosk, proszki metali (FE-Cu), mieszaniny proszków metali i proszków ceramicznych [1,5].



Rysunek 7. Druk za pomocą selektywnego spiekania laserowego (SLS) [7].

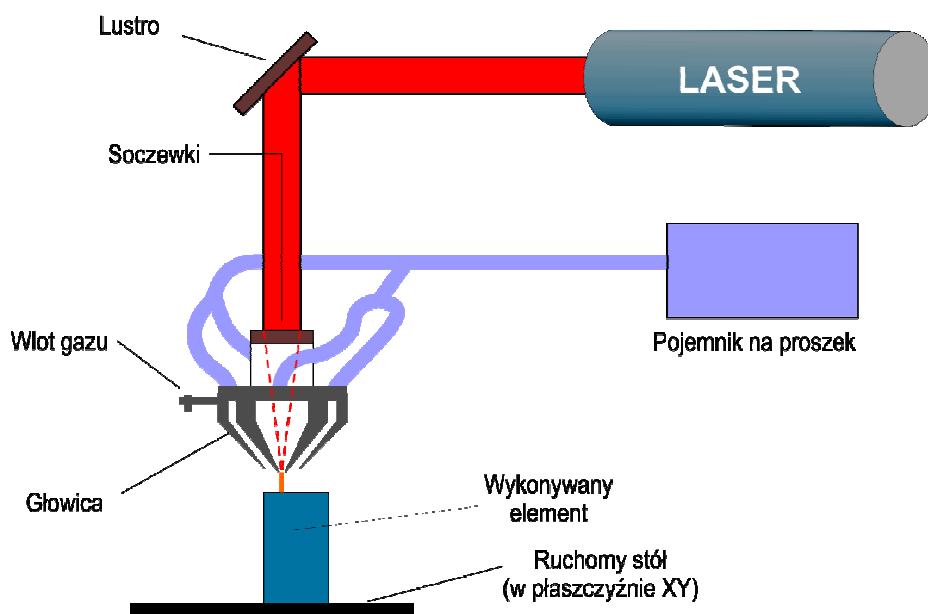
W wyniku spiekania, materiał staje się porowaty. W niektórych przypadkach wymaga on nasączenia (infiltracji) substancją wzmacniającą. Największą wadą tej technologii jest długi czas stygnięcia elementów o skomplikowanej strukturze wewnętrznej. W skrajnych

przypadkach obiekt wyjmuje się z komory roboczej dopiero po dwóch dniach. Urządzenia SLS są przy tym większe od urządzeń SLA oraz są bardziej skomplikowane pod względem mechanicznym. Urządzenia SLS są jedną z dwóch skomercjalizowanych technologii służących wytwarzaniu użytkowych części metalowych (druga to LENS) [1].

Metodą SLS można wytwarzać zarówno modele, jak i narzędzia takie jak: matryce, tłoczniki, formy odlewnicze, formy do wtryskarek oraz gotowe wyroby wytwarzane jednostkowo lub w produkcji małoseryjnej [5].

### Laser Engineered Net Shaping (LENS)

Schemat realizacji metody LENS, przedstawia rysunek 8. Stół z wytwarzanym elementem porusza się wyłącznie w poziomie. Nad stołem znajduje się głowica podająca, przez którą przechodzi światło lasera o dużej mocy, a następnie jest ogniskowane na płaszczyźnie odpowiadającej warstwie tworzonego obiektu. Jednocześnie w ognisko głowica wprowadza sproszkowaną substancję roboczą, ulegającej stopieniu, która może zostać naniesiona punktowo na tworzoną bryłę. Kanały podające, rozmieszczone koncentrycznie w głowicy służą do wytwarzania atmosfery gazowej, chroniącej materiał przed wiązaniem się z tlenem atmosferycznym. Proszek jest transportowany w ognisko wiązki laserowej albo z wykorzystaniem grawitacji, albo w strumieniu neutralnego gazu. W tej metodzie możliwe jest uzyskanie struktury wielomateriałowej, ze względu na możliwość zmiany rodzaju proszku podczas tworzenia się bryły [1].



Rysunek 8. Schematyczne przedstawienie technologii LENS [7].

Elementy wytworzone technologią Laser Engineered Net Shaping (LENS) cechują wysokie właściwości metalurgiczne (niekiedy nawet lepszych od uzyskiwanych tradycyjnymi metodami) przy zachowaniu dość wysokiej precyzji odwzorowania powierzchni.

W przeciwieństwie do SLS, LENS nie wymaga wygrzewania wydrukowanej bryły, gdyż materiał tworzący element ma zwykłą gęstość. Brak jest również ostrych ograniczeń w wyborze materiału roboczego. Można użyć stali nierdzewnej, aluminium, miedzi, a nawet

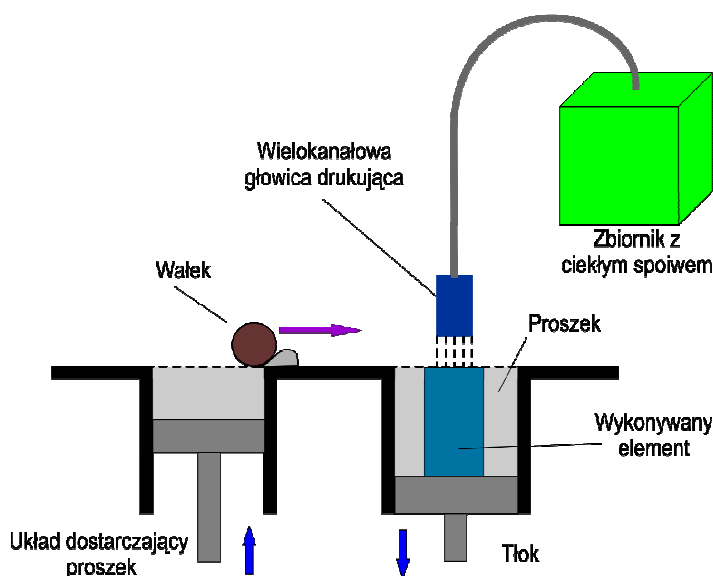


tytanu. Dodatkową zaletą LENS jest duża funkcjonalność: można ją stosować tylko do wytwarzania elementów, ale także do ich naprawiania [1].

Metoda LENS wykazuje duże podobieństwo do procesu napawania laserowego. Jest ono wykonywane zazwyczaj za pomocą lasera diodowego dużej mocy (HPDL – High Power Diode Laser). W obydwu metodach, obrabiany przedmiot (blachę) napawa się proszkami metali. Napawanie polega na tworzeniu pojedynczego ściegu napoiny, której jakość i kształt zależy w dużej mierze od natężenia podawania proszku, mocy wiązki lasera, prędkości napawania, przy czym zmiana natężenia proszku przy stałej energii liniowej napawania, pozwala na regulację składu chemicznego napawanej warstwy.

### 3D Printing (3DP)

Technologia 3D Printing (3DP), opracowana w Massachusetts Institute of Technology (MIT), wykorzystuje jako materiał roboczy substancje w formie sproszkowanej. Mogą one mieć dwojaką postać: sypką albo ciekłą (koloidy). W niektórych odmianach używa się substancji roboczej w formie roztopionej. Z uwagi na możliwość stosowania różnego rodzaju proszków - od polimerowych przez ceramiczne i kompozytowe, na metalowych kończąc - 3DP pozwala na przygotowywanie nie tylko modeli, ale również gotowych narzędzi [1].



Rysunek 9. Tradycyjny druk przestrzenny 3DP z wykorzystaniem spoiwa [7].

Schemat realizacji procesu 3DP, ilustruje rysunek 9. Proces budowy elementu przebiega następująco:

W pierwszej z komór, przed rozpoczęciem pracy tłok ustawiany jest w dolnym położeniu, a komora wypełniana jest proszkiem. Proszek z komory wejściowej przenoszony jest stopniowo za pomocą wałka, do komory w której tworzony jest model, po przeniesieniu wałek wyrównuje warstwę. Uruchamiana jest głowica drukująca. Na cienką warstwę proszku punktowo, wewnątrz przekroju tworzonego elementu, nanoszone jest spoiwo (lub od razu materiał roboczy w postaci płynnej). Po wstępnym oczyszczeniu fragmentu tworzonej bryły i nieznacznym obniżeniu dna komory roboczej głowica podająca nakłada kolejną warstwę proszku i cykl zaczyna się od nowa. Przed każdym cyklem ruchów wałka i głowicy, unoszony jest tłok w komorze z zapasem proszku i opuszczany jest tłok w komorze, w której budowany

jest model. W rezultacie otrzymuje się trójwymiarowy model składający się z ziaren proszku związanych spoiwem. Element poddaje się następnie wygrzewaniu, w wyniku którego ziarna proszku zespala się ze sobą, a spoiwo zanika. Bryły uzyskiwane w ten sposób mają dużą, nawet 40-procentową porowatość i wymagają niekiedy wypełnienia wolnych przestrzeni innym materiałem wzmacniającym. Problemu z porowatością nie ma w tych odmianach 3DP, w których elementy buduje się z płynnego materiału roboczego [1,4].

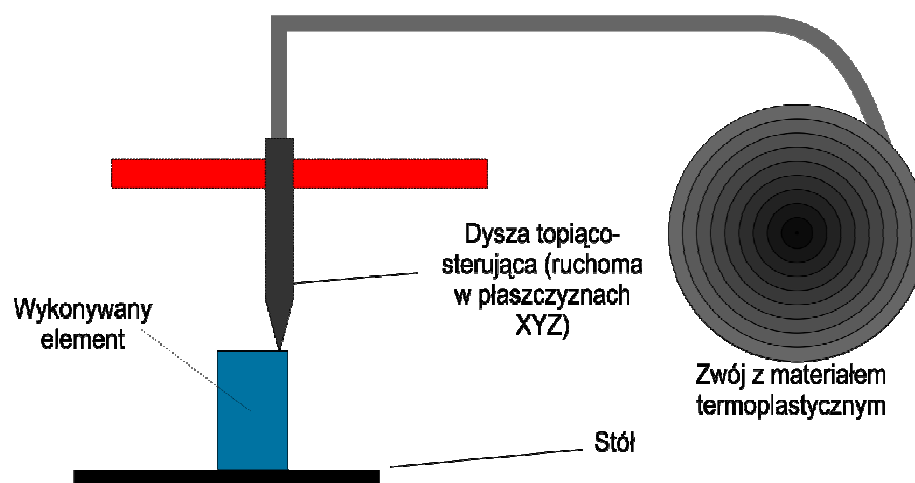
Warstwowa struktura elementu zwykle jest wyraźnie widoczna i wymaga szlifowania. Ostatnio opracowano urządzenia 3DP pracujące z dokładnością pozwalającą na odtworzenie nie tylko kształtu obiektu, ale i jego faktury [1].

Urządzenia wykorzystujące technologię 3D Printing mają kilka zalet: są niewielkie (nawet rozmiarów klasycznej kserokopiarki biurowej), ciche i dość tanie w stosunku do innych urządzeń tego typu. Metoda 3DP zalicza się do najszybszych ze współczesnych technik przyrostowych. Z uwagi na możliwość nanoszenia różnych proszków podczas generowania jednej bryły (dzięki wykorzystaniu różnych głowic podających), technologia 3DP pozwala kontrolować własności materiału w poszczególnych fragmentach budowanego elementu.

3D Printing ma wiele odmian. Jedną z nich jest MJM (Multi Jet Modelling), gdzie głowica wielostrumieniowa nakłada termoutwardzalny polimer, przesuwając się na płaszczyźnie w taki sposób, aby odtworzyć całą powierzchnię przekroju [1].

### Fused Deposition Modelling (FDM)

Metoda FDM, której twórcą jest firma Stratasys, to jedna z dwóch najpopularniejszych na świecie technika przyrostowych. Jej zasada działania przypomina zasadę działania drukarek atramentowych. Schemat działania tej metody ilustruje rysunek 10. Materiał roboczy stanowią włókna z termoplastycznego materiału. Włókno jest wprowadzane do głowicy, która podgrzewa je aż do uzyskania stanu półpłynnego. W tej postaci materiał nanosi się punktowo na podłoże, odtwarzając warstwami całą bryłę. Podobnie jak w SLS, w komorze roboczej panuje temperatura nieznacznie niższa od temperatury topnienia materiału roboczego. Cechą szczególną FDM jest to, że - odmiennie niż w przypadku pozostałych metod - głowica robocza porusza się we wszystkich wymiarach przestrzennych, a obiekt powstaje na nieruchomym podłożu [1].

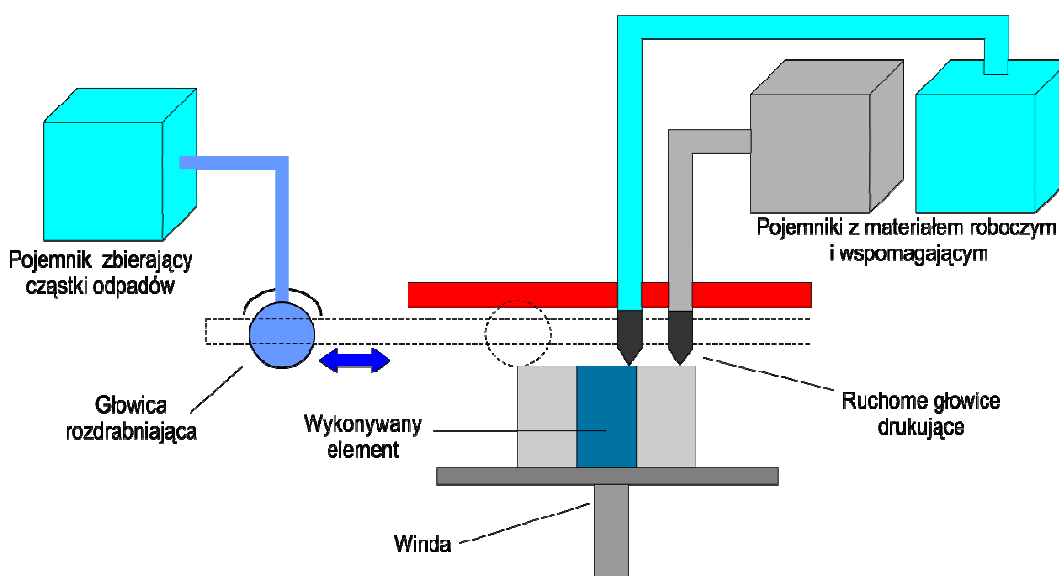


Rysunek 10. Metoda przyrostowa w wersji FDM [7].

Zaletą FDM jest możliwość stosowania dużej liczby materiałów, większej nawet niż w wypadku 3DP. Elementy wykonane za pomocą FDM cechuje również większa wytrzymałość. Kolejną zaletą jest możliwość zmiany kolorystyki, poprzez stosowanie włókien o różnym zabarwieniu. Jest to również technologia cicha, możliwa do stosowania poza halami produkcyjnymi, np. w pomieszczeniach biurowych. Największą wadą techniki FDM jest słaba jakość wykonania powierzchni [1]. Przedmioty wytworzone tą techniką cechuje „schodkowatość” powierzchni, wymagająca dalszej obróbki. Kolejną wadą jest niska wytrzymałość w kierunku prostopadłym do tworzonych warstw [27].

### Ink Jet Printing (IJP)

Firma Solidscape jest twórcą techniki Ink Jet Printing. Przedmioty wytworzone w tej metodzie cechuje dobre odwzorowanie powierzchni (dorównujące przedmiotom wytworzonym za pomocą obrabiarek CNC) [1].



Rysunek 11. Zasada pracy urządzenia wykonanego w technologii Ink Jet Printing (IJP) [7].

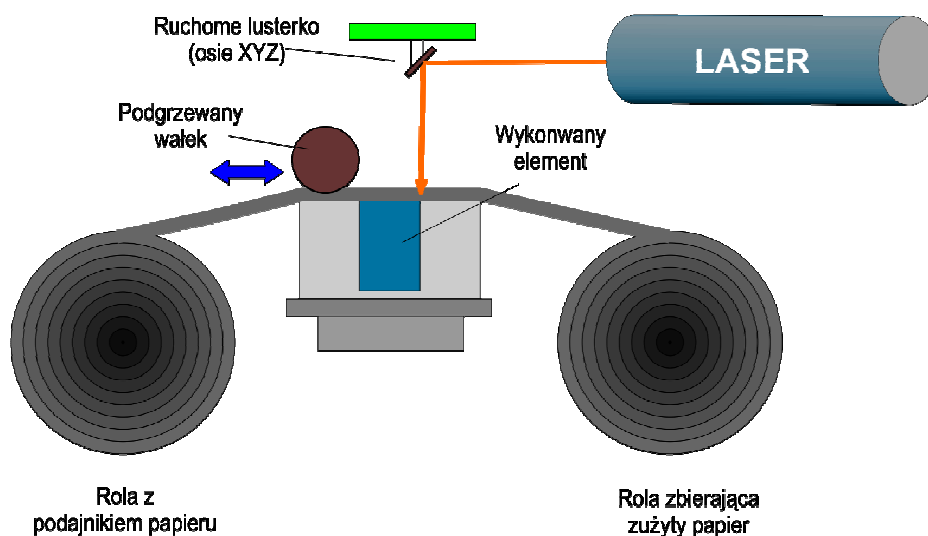
Schemat działania tej metody ilustruje rysunek 11. Na warstwę oprócz materiału roboczego nanosi się również substancję wspomagającą, gwarantującą stabilność bryły podczas drukowania. Oba materiały nanoszone są przez osobne głowice, i występują w postaci płynnej. Głowice poruszają się na płaszczyźnie XY (kolejną warstwę buduje się po obniżeniu dna komory roboczej) i rozdrabniają podawany materiał na niewielkie krople, które po naniesieniu na warstwę są gwałtownie schładzane i twerdnieją. Po utworzeniu warstwy przesuwa się nad nią głowica wyrównująca, której celem jest uzyskanie odpowiedniej grubości warstwy. Jest to etap powodujący dużo hałasu, stąd metody IJP nie są stosowane np. w biurach [1].

Technologie IJP doczekały się wielu odmian, wszystkie jednak mają podobne wady: dość wolne wytwarzanie brył oraz ograniczony zestaw materiałów roboczych, których można użyć do budowy elementów [1].

### Laminated Object Manufacturing (LOM)

Metoda LOM (Laminated Object Manufacturing) – warstwowego wytwarzania obiektów, została opracowana przez amerykańską firmę Helisys [5].

Schemat ilustrujący działanie metody LOM, przedstawia rysunek 12. Modele wytwarza się z kolejnych warstw termozgrzewalnego papieru lub folii. Materiał roboczy jest nawinięty na rolki lub nakładany arkuszami. Po umieszczeniu nowej warstwy folii nad obszarem roboczym przesuwana nad nią gorący wałek, który topi powłokę pokrywającą spód arkusza i trwale skleja go z już wykonanym fragmentem bryły. Następnie za pomocą lasera (w klasycznej metodzie LOM) lub noża (w opracowanej przez firmę Kira modyfikacji o nazwie Paper Lamination Technology - PLT) wycinany jest kształt warstwy. Ponieważ każda warstwa jest powleczona klejem, zespała się z wcześniejszymi warstwami. Technologia LOM pozwala na wykorzystanie folii z tworzyw sztucznych, ceramiki oraz metali. Efektem pracy urządzeń LOM jest zwykle prostopadłościan, którego zbędne fragmenty należy usunąć (wiązka lasera nacina na niewykorzystanych do budowy modelu fragmentach folii charakterystyczne kwadraty, które po zgrzaniu tworzą łatwe do usunięcia z przestrzeni wewnętrznych graniastosłupy). Obiekty wykonane w technice LOM nie wymagają podpór. Metoda LOM niezbyt się nadaje do budowania elementów o złożonej strukturze wewnętrznej z uwagi na późniejsze utrudnienia w usuwaniu zbędnych fragmentów. Można ten problem nieco zredukować, wypalając zbędne fragmenty przekroju, lecz znacząco wydłuża to czas budowy elementu [1-5].



Rysunek 12. Budowanie modelu w technologii LOM [7].

Wytrzymałość oraz jakość powierzchni brył uzyskiwanych za pomocą LOM są najniższe w porównaniu do wytworzonych innymi opisywanymi tu technologiami i kwalifikują ją wyłącznie jako technologię wizualizacyjną, typu RM. Materiał przypomina nieco drewno i może być obrabiany w podobny sposób. Mocną stroną LOM jest za to mały koszt materiału roboczego. Ten typ technologii wciąż się rozwija, prowadzone są badania nad możliwościami stosowania nowocześniejszych folii, w tym folii kompozytowych [1].

**LITERATURA**

1. J. Chrostowski: „Stoliczku nakryj się!”. Artykuł na stronie internetowej: <http://www.idg.pl/artykuly/40669.html>;
2. Praca zbiorowa pod red. E. Chlebusa: „Innowacyjne technologie Rapid Prototyping - Rapid Tooling w rozwoju produktu.”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2003.
3. K. Oczóś: „Niekonwencjonalne sposoby przyrostowego kształtowania przedmiotów – szybkie wykonywanie prototypów”. *Mechanik*, Nr. 8-9, 1995, str. 295-303;
4. Projektowanie z wykorzystaniem narzędzi Rapid Prototyping”. *Mechanik*, Nr. 12, 2003, str. 744-746;
5. E. Chlebus: „Techniki komputerowe CAx w inżynierii produkcji”. Wydawnictwa Naukowo Techniczne. Warszawa 2000;
6. K. Oczóś: „Rapid Prototyping – aktualne dokonania w zakresie rozwoju konstrukcji urządzeń i przetwarzanych tworzyw sztucznych”. *Mechanik*, Nr. 4, 2006, str. 247-261;
7. Strona internetowa: Castle’s Island Worldwide Guide to Rapid Prototyping: <http://home.att.net/~castleisland/home.htm>;
8. K. Oczóś: „Rapid prototyping/Rapid Tooling – rozwój konstrukcji urządzeń, stosowanych materiałów i technologii”. *Mechanik*, Nr. 4, 2001, str. 217-223;
9. Chlebus E., Cholewa M.: „Rapid prototyping – rapid tooling. Innowacyjne technologie w zastosowaniach przemysłowych”. *Zarządzanie produkcją*, Nr. 3-4, 1999.
10. Chlebus E., Cholewa M.: “Rapid prototyping – rapid tooling”. *CADCAM Forum*, Nr. 11, 1999.
11. Strona internetowa: Encyklopedia WIEM: <http://portalwiedzy.onet.pl/>
12. K. Oczóś: „Nowe materiały w procesach kształtowania przyrostowego wyrobów”. *Mechanik*, Nr. 3, 2007, str. 125-130;
13. K. Oczóś: „Nowe urządzenia do kształtowania przyrostowego wyrobów i przykłady ich zastosowań”. *Mechanik*, Nr. 4, 2007, str. 217-225;
14. K. Oczóś: „Nowe impulsy w szybkim konstruowaniu i wytwarzaniu prototypów i wyrobów seryjnych”. Cz. I. *Mechanik*, Nr. 2, 2003, str. 49-56;
15. [www.dimensionprinting.com](http://www.dimensionprinting.com)
16. Perfekte Loesungen durch 3D Printing Verfahren. *Transfer*. Nr. 35, 2006, str. 12
17. [www.solidimension.com](http://www.solidimension.com)
18. [www.2objet.com](http://www.2objet.com)
19. [www.eos.info](http://www.eos.info)
20. H. Reims: „Komplex – aber mit weinge Teile“. *Industrie-Anzeige*. Nr. 48, 2006, str. 32-34;
21. [www.prometal.rct.de](http://www.prometal.rct.de)
22. [www.mcp-group.de](http://www.mcp-group.de)
23. SLM – Medical Applications. Patients in Australia receive individual Rapid Manufacturing hip implants. *MCP Newsletter*. Nr. 7, 2006.
24. [www.arcam.com](http://www.arcam.com)
25. [www.solid-scape.com](http://www.solid-scape.com)

26. MSJ Hashmi: "Research directions in strategic manufacturing processes". Proceedings of the 1st International Conference & 7th AUN/SEED-Net Fieldwise Seminar on Manufacturing and Material Processing. 1-6. 14-15 March 2006. Kuala Lumpur
27. Dong-Xing Wang: "Rapid formation of individual workblank". Proceedings of the 1st International Conference & 7th AUN/SEED-Net Fieldwise Seminar on Manufacturing and Material Processing. 209-212. 14-15 March 2006. Kuala Lumpur
28. A. Klimpel: "Zastosowanie lasera diodowego dużej mocy do spawania i napawania". Przegląd spawalnictwa. Nr. 6, 2001, str. 1-6