

Techniki szybkiego prototypowania – rapid prototyping

MIROSŁAW MIECIELICA

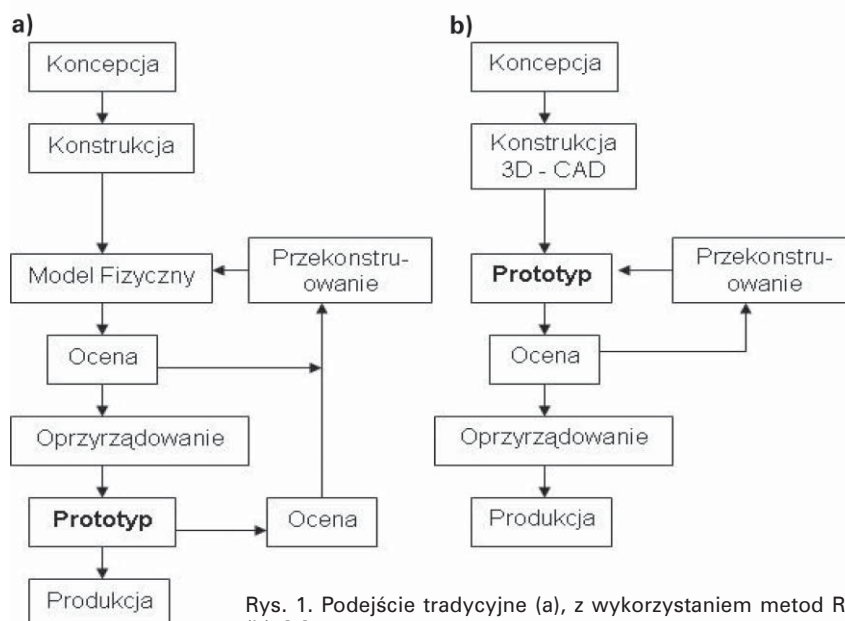
Szybkie prototypowanie (ang. rapid prototyping – RP) jest to tworzenie, warstwa po warstwie, trójwymiarowych obiektów fizycznych bezpośrednio z modeli komputerowych wykonanych przy użyciu oprogramowania CAD. Proces ten określany jest również jako kształtowanie przyrostowe – metody addytywne. Nazwa szybkie prototypowanie jest najczęściej spotykana, jednak nie oddaje w pełni istoty technologii, która nie ogranicza się jedynie do tworzenia prototypów. Jest ona również wykorzystywana do tworzenia narzędzi (rapid tooling – RT), a nawet gotowych produktów (rapid manufacturing – RM). Szybkie prototypowanie jest technologią stosowaną od niedawna i jako taka podlega ciągłemu rozwojowi.

W porównaniu z konwencjonalnymi metodami produkcji zastosowanie metod RP i RT umożliwia znaczne skrócenie procesu przygotowania i wykonywania modelu, prototypu czy finalnego wyrobu oraz jego łatwiejsze modyfikowanie we wczesnych stadiach rozwoju (rys. 1).

Stosując metody RP i RT, można wytwarzać przedmioty o bardzo złożonych kształtach wewnętrznych, których wykonanie było kłopotliwe, drogie lub niemożliwe innymi metodami produkcyjnymi. Możliwość zastosowania różnych materiałów stwarza perspektywę dalszego udoskonalania tych metod. Obecnie wiele metod RP i RT zostało skomercjalizowanych, a urządzenia RP są produkowane seryjnie i stosowane w przemyśle.

W tradycyjnych metodach obróbki elementy są tworzone przez zdejmowanie materiału z prefabrykatu. Są to technologie ubytkowe, ponieważ po obróbce otrzymujemy elementy mniejsze od wejściowego oraz odpady. Do procesów subtraktywnych zaliczamy takie metody, jak: frezowanie, toczenie, wiercenie, szlifowanie, obróbka elektroerozyjna.

Całkowicie odmienne podejście jest realizowane w metodach addytywnych wykorzystywanych w procesie RP. Tworzenie elementu odbywa się przez



Rys. 1. Podejście tradycyjne (a), z wykorzystaniem metod RP (b), [1]

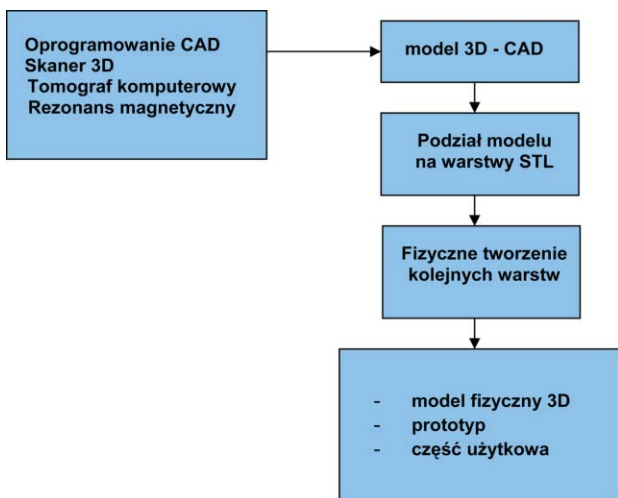
dodawanie kolejnych warstw materiału, które tworzą trójwymiarowy obiekt. Cechą charakterystyczną, odróżniającą metody przyrostowe od metod ubytkowych, jest możliwość wykonywania w pełni dowolnych geometrii, jak na przykład wydrążona kula. Techniki addytywne nie są jeszcze tak efektywne jak

Dr inż. Mirosław Miecielica jest pracownikiem Politechniki Warszawskiej, Instytutu Metrologii i Inżynierii Biomedycznej.

substraktywne, ponieważ są one dopiero w fazie badań i rozwoju, jednak ich znaczenie w przemyśle ciągle rośnie.

Podstawy procesu szybkiego prototypowania

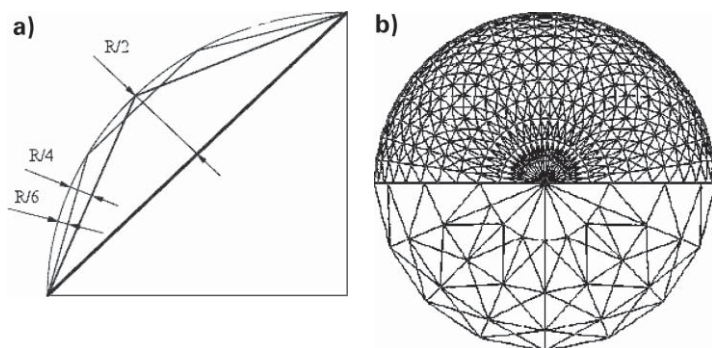
Każda z metod szybkiego prototypowania bazuje na odmiennej technice tworzenia modeli, jednak ogólny schemat całego procesu jest zbliżony. Opiera się na podstawowych krokach, które muszą zostać zrealizowane, zanim rozpocznie się generowanie obiektów. Na rys. 2 przedstawiono podstawowe etapy niezbędne do zrealizowania w celu otrzymania gotowego wyrobu.



Rys. 2. Idea technologii szybkiego prototypowania [2]

● Przygotowanie geometrii

Współczesny proces projektowania rozpoczyna się od stworzenia modelu w oprogramowaniu typu CAD. Model taki opisany jest najczęściej za pomocą brył i powierzchni, które określają precyzyjnie jego kształt. Dane wygenerowane w ten sposób pozwalają na poprawne zrealizowanie procesu szybkiego prototypowania. Nie zawsze jednak model tworzony jest od początku w programie CAD. Projekt może być dostępny w postaci szkiców 2D wykonanych na papierze. W takim wypadku niezbędne jest jego całkowite przeniesienie na zapis komputerowy, gdyż jedynie w takiej wersji może być dalej użyty. Kolejną wersją są dane uzyskane z pomiarów, np. w postaci chmury punktów – skanowanie 3D lub w inżynierii biomedycznej uzyskanie obrazu 3D z tomografu komputerowego lub z rezonansu magnetycznego. W takiej postaci uzyskane obrazy nie są w pełni



użyteczne. Konieczna jest zatem obróbka w programie CAD i wygenerowanie poprawnej bryły. Należy zawsze pamiętać o kontroli poprawności stworzonej geometrii. Błędy, takie jak niedomknięte krzywe lub powierzchnie, nie są zauważalne podczas obserwacji na ekranie komputera, jednak uniemożliwiają poprawną budowę modelu fizycznego.

● Zapis w formacie STL

Po utworzeniu geometrii w oprogramowaniu CAD, niezbędne jest zapisanie jej w neutralnym formacie, umożliwiającym dalszą obróbkę w systemie RP. Najbardziej rozpowszechnionym formatem jest STL, który został opracowany przez firmę 3D Systems początkowo na potrzeby stereolitografii (stąd nazwa), a później znalazł zastosowanie także w innych metodach. W formacie STL powierzchnia elementu przybliżana jest siatką trójkątów, w pliku zapisane są współrzędne x , y , z każdego wierzchołka trójkąta oraz wektor normalny do powierzchni każdego z trójkątów. Taki zapis wiąże się oczywiście z pewnymi niedokładnościami, utworzone trójkąty nie oddają idealnie rzeczywistej powierzchni, przy czym im mniejsze trójkąty, tym większa dokładność (rys. 3), ale także większy rozmiar pliku. Często występującym błędem jest również 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).

Format STL jest najbardziej upowszechniony w systemach szybkiego prototypowania, istnieją jednak także inne formaty, takie jak: SLC (format zawierający kolejne przekroje opisane za pomocą polilinii), HGPL (HP Grafical Language), CLI (Common Layer Interface).

● Orientowanie elementu

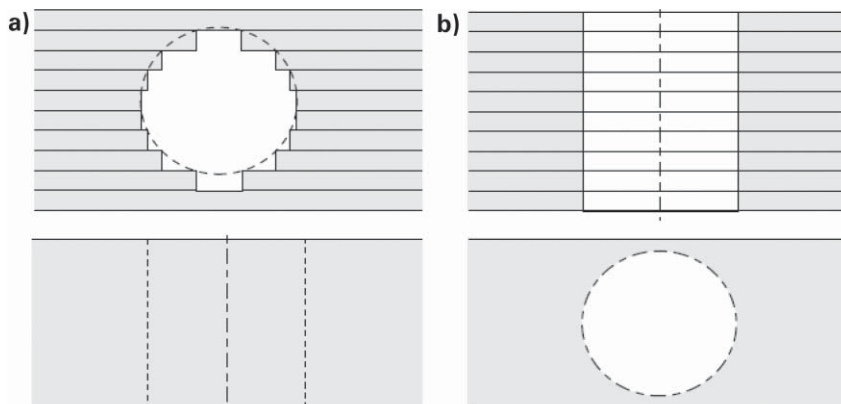
Pierwszym krokiem po zaimportowaniu geometrii do systemu RP (po upewnieniu się, że nie zawiera błędów) jest jej zorientowanie w przestrzeni roboczej maszyny. Zależnie od stosowanej metody wytwarzania oraz wymagań dotyczących elementu, decydującymi parametrami są dokładność oraz czas budowy.

Wpływ ułożenia modelu na dokładność wynika z samej istoty technologii przyrostowych. Obiekty powstają z warstw o określonej grubości, a zatem odwzorowanie krzywizn w osi z jest mniej dokładne niż w płaszczyźnie x, y . Przy dużych nachyleniach powstaje tzw. efekt schodkowy (rys. 4). Zmienna jest również chropowatość, zazwyczaj najmniejsza jej wartości występują na górnej powierzchni.

Czas budowy elementu ma bardzo istotne znaczenie ze względu na koszt wytwarzania. W większości współczesnych systemów szybkiego prototypowania budowany element umieszcza się w sposób maksymalnie skracający czas jego powstawania, a zatem najmniejszy wymiar umieszcza się w osi z . Wiąże się to z tym, że parametrem mającym decydujący wpływ na czas budowy jest liczba

Rys. 3. Błąd siecznej przy przybliżaniu okręgu siecznymi (a) oraz wpływ ilości trójkątów na jakość odwzorowania sfery (b) [3]

Rys. 4. Odtworzenie otworu o osi równoległej do warstw (a) i osi prostopadłej do warstw (b) [3]



warstw, a im mniejszy wymiar, tym mniejsza jest ta liczba.

Istotne znaczenie ma również takie zorientowanie elementu, aby konieczne było stosowanie jak najmniejszej liczby geometrii pomocniczych (ze względu na zużycie materiału, jakość powierzchni oraz minimalizację czasu obróbki przeznaczonego na ich późniejsze usunięcie). Zostało to przedstawione na rys. 5.

Kolejnym problemem przy orientacji elementu w przestrzeni roboczej są jego wymiary. Model może okazać się zbyt duży i niezbędne jest wtedy dokonanie jego podziału i wytworzenie w częściach, a następnie ich sklejenie. Podział taki może być również dokonywany ze względów ekonomicznych, w celu przyspieszenia procesu, a zatem zmniejszenia kosztów.

● Geometrie pomocnicze

Po ostatecznym ustaleniu położenia budowanego elementu w przestrzeni roboczej systemu RP, konieczne jest utworzenie geometrii pomocniczych, nazywanych również elementami wspierającymi. Są one niezbędne w celu utrzymania elementu we właściwej pozycji, wspierania powierzchni pozbawionych dodatkowego podparcia, oddzielenia modelu od platformy podmodelowej w celu jego łatwego usunięcia oraz usztywnienia nie w pełni utwardzonego elementu. Tworzenie podpór odbywa się automatycznie w specjalistycznym oprogramowaniu. Podstawowymi wymaganiami są przy tym: łatwość ich późniejszego oddzielenia od modelu bez uszkodzenia powierzchni, zużycie jak najmniejszej ilości materiału przy zachowaniu odpowiedniej sztywności. Elementy wspierające mogą mieć różne kształty i zależą od użytego oprogramowania oraz systemu szybkiego prototypowania. Należy przy tym zaznaczyć, że nie są one wykorzystywane we wszystkich technologiach RP. Nie ma konieczności ich stosowania tam, gdzie element jest samoczynnie podpierany przez materiał, z którego powstaje, jak np. w technologiach opartych na spajaniu sproszkowanego materiału.

● Podział na warstwy

Ostatnim etapem w procesie przygotowawczym do wytworzenia modelu fizycznego jest jego podział na warstwy. Cała geometria (wraz z ewentualnymi

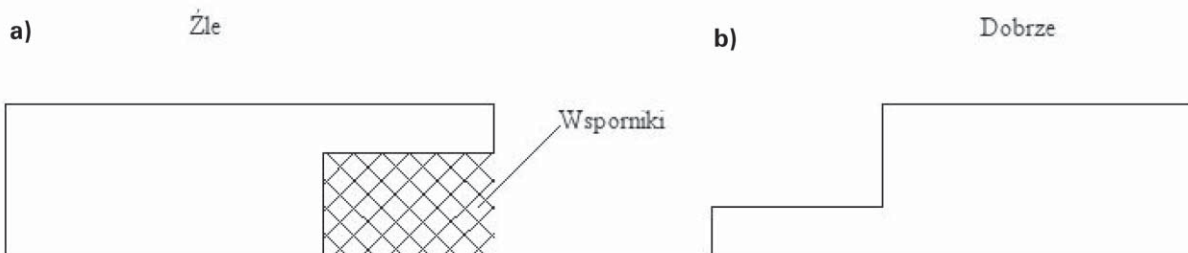
wspornikami) jest dzielona na warstwy prostopadłe do osi z, o grubości określonej daną technologią. Podział ten jest istotą wszystkich technologii szybkiego prototypowania. Wiąże się z nim pewne problemy, takie jak brak ciągłości modelu w osi z. Po utworzeniu warstw mamy bowiem zbiór skończonej liczby przekrojów modelu, które są przesyłane do maszyny i w ten sposób odtwarzane. Skutkiem takiego podejścia jest powstawanie błędów w postaci efektu schodkowego, spowodowanego niedokładnym odtworzeniem krzywych zorientowanych pionowo oraz niepoprawne odtworzenie wymiarów w osi z, niebędących wielokrotnościami grubości warstwy. Stosowane są różne sposoby kompensowania tych błędów. Podstawowym dążeniem we wszystkich nowoczesnych systemach RP jest zmniejszenie do minimum grubości warstw, w celu tworzenia quasi-ciągłych modeli.

● Tworzenie modelu fizycznego

Budowa modelu fizycznego w procesach szybkiego prototypowania odbywa się przez nakładanie materiału budującego. Modele są tworzone warstwami, zaczynając od dołu. Każda kolejna warstwa spajana jest z poprzednią aż do zakończenia budowy. Sposób nakładania materiału oraz szczegóły technologiczne różnią się znacznie w zależności od zastosowanej metody.

● Obróbka wykańczająca

Model wyjęty z maszyny do szybkiego prototypowania w większości wypadków nie jest w pełni gotowy do natychmiastowego użycia. Konieczne są pewne operacje, zależne od używanej technologii, mające doprowadzić model do postaci finalnej. Głównym ich zadaniem jest oczyszczanie, poprawa właściwości mechanicznych i wizualnych, zmniejszenie chropowatości. Do metod wykorzystywanych w tych celach należą np.: mycie, nasączenie, woskowanie, malowanie, szlifowanie.



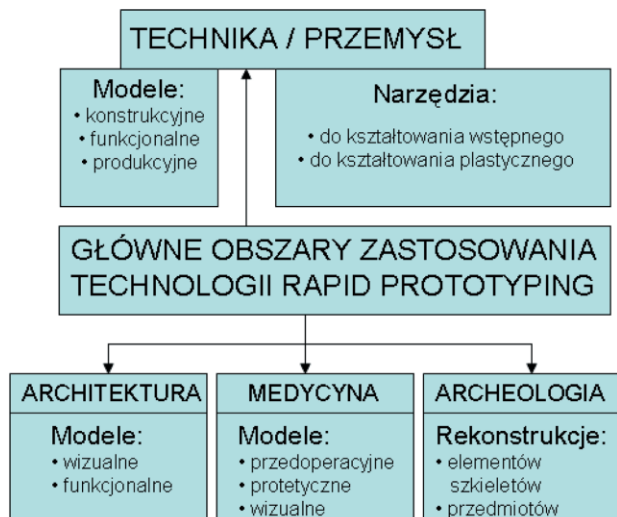
Rys. 5. Zorientowanie elementu w maszynie wymagające zastosowania wsporników (a) oraz niewymagające ich stosowania (b) [4]

Zastosowanie metod szybkiego prototypowania

Typowymi obszarami zastosowania technik RP są:

- studia projektowe i ergonomiczne,
- badania i ocena rozwiązań konstrukcyjnych na bazie modeli fizycznych,
- ocena procesów wytwarzania i montażu,
- badania i ocena marketingowa nowych produktów,
- wielofunkcyjne modele stosowane w odlewnictwie i przeróbce plastycznej,
- modelowanie i wytwarzanie implantów w medycynie.

Na rys. 6 pokazano przykładowe działy zastosowania technik RP.



Rys. 6. Ważniejsze obszary zastosowania technologii RP [1]

Główne zalety i wady technik RP

Zalety technik RP to:

- szybkie tworzenie fizycznych modeli,

- część wzorcowa jest do dyspozycji już podczas opracowania konstrukcji,
- nadają się szczególnie do części o złożonej geometrii, powierzchni o kształtach swobodnych,
- małe koszty wykonania w porównaniu z innymi metodami (frezowanie, toczenie, obróbka elektroerozyjna) przede wszystkim przy małej liczbie sztuk,
- możliwość zastosowania różnych metod w obrębie łańcucha procesów (rapid engineering).

Wady to przede wszystkim:

- ograniczone wymiary budowanych obiektów,
- ograniczona gama materiałów,
- części spełniają wymagania mechaniczne tylko w ograniczonym zakresie,
- ograniczona dokładność, a jakość powierzchni zależna od stosowanej techniki,
- często konieczna jest dodatkowa obróbka wygładzająca.

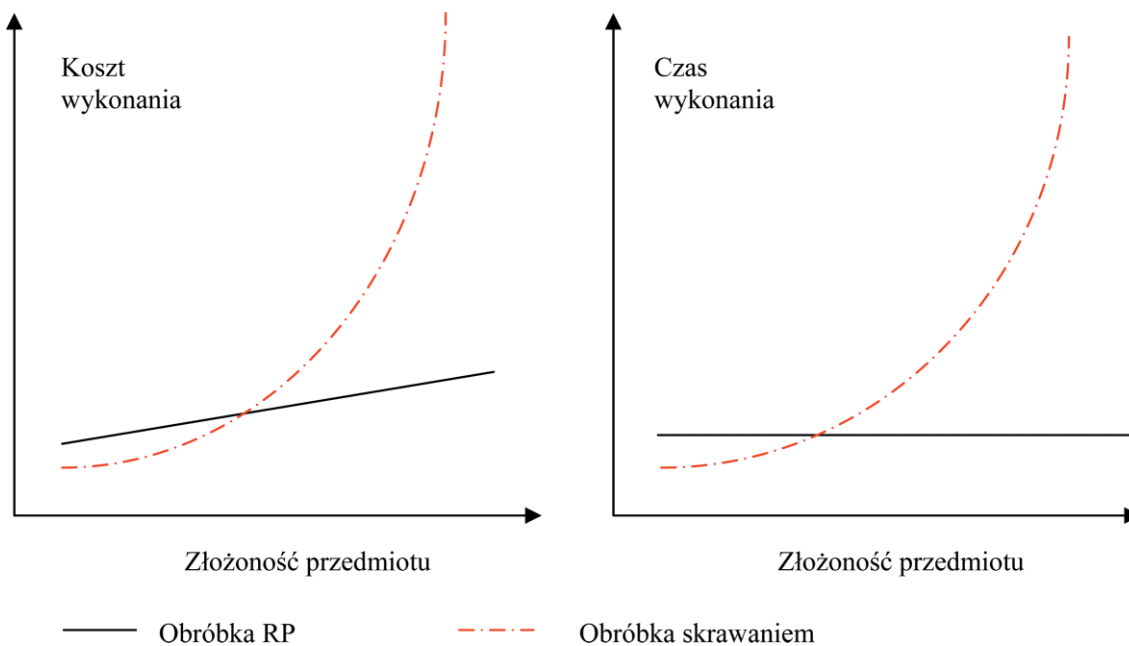
Należy jednak pamiętać, że techniki RP są krótko stosowane w porównaniu z konwencjonalnymi technikami kształtowania (toczenie, frezowanie) i bardzo dynamicznie się rozwijają. Rośnie gama stosowanych materiałów wyjściowych, zwiększa się dokładność i jakość powierzchni wytwarzanych elementów.

Zagadnienia ekonomiczne

Tworzenie coraz doskonalszych produktów rynkowych i ich wdrażanie do produkcji przemysłowej wiąże się z pokonywaniem wielu barier. O szybkości i kosztach pierwszych etapów projektowania decydują przede wszystkim zastosowane techniki. Ważna jest też ocena trafności wyboru cech funkcjonalnych, użytkowych i wytwórczych danego produktu, a także akceptacja rynku. Wstępne fazy rozwoju produktu decydują o najistotniejszych składnikach kosztów jego wytwarzania, gdyż wynikają z wyboru konstrukcji, stosowanych materiałów i technologii.

Jako kryterium stosowania technik przyjmuje się najczęściej czas obróbki (generowania) oraz koszty wytworzenia modelu – prototypu.

Te parametry przedstawiono poglądowo na rys. 7.



Rys. 7. Zależność kosztów i czasu wykonania przedmiotu od jego złożoności dla obróbek skrawaniem i metod RP [5]

Techniczny prototyp wytworzony w fazie opracowywania produktu pozwala na pierwszą wizualną i funkcjonalną ocenę przyszłego wyrobu. Zwykle na tym etapie zapada decyzja o prowadzeniu dalszych prac rozwojowych.

Techniki RP, które na podstawie modelu trójwymiarowego CAD umożliwiają szybkie wykonanie fizycznych modeli, znajdują zastosowanie w technicach 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 25% czasu rozwoju produktu (rys. 8).

Wykonanie prototypu tradycyjnymi metodami (najczęściej metodami obróbki skrawaniem) jest długotrwałe i kosztowne, gdyż wymaga dużych nakładów pracy ręcznej. Budowa prototypów pochłania w niektórych branżach nawet 50 – 60% kosztów rozwoju.

Porównanie technik RP

Zestawienie najczęściej stosowanych technik RP z podaniem nazwy i krótkiej charakterystyki procesu obrazuje tab. I.

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 tab. II.

Szczegółowe porównanie najpopularniejszych obecnie technik RP przedstawiono w tab. III. Zaprezentowano w niej 6 technologii wraz z firmami wiodącymi na rynku, ogólne cechy jakościowe, wady i zalety, typowe zastosowania oraz stosowane materiały wyjściowe.

Podsumowanie

Jedną z technik RP, warstwa po warstwie, nakłada się proszki tworzyw sztucznych, ceramicznych, metalu lub kompozyty różnych materiałów według kolejnych przekrojów poziomych modelu komputerowego. Istnieje wiele komercyjnych urządzeń umożliwiających stosowanie tych technologii.

TABELA I. Zestawienie najbardziej popularnych metod szybkiego prototypowania [1, 2]

Skrót	Nazwa	Opis
FDM	Fused Deposition Modeling	Modelowanie poprzez wyłoczone osadzanie warstwowe stopionego materiału techniką sterowania numerycznego
SL	Stereolithography	Lokalne warstwowe utwardzanie ciekłego fotopolimeru za pomocą wiązki laserowej
LOM	Laminated Object Manufacturing	Wycinanie laserowe obrysu modelu i klejanie go do poprzedniej warstwy materiału
SLS	Selective Laser Sintering	Spajanie warstwowe proszków poprzez ich spiekanie wiązką lasera
3DP	Three Dimensional Printing	Sklejanie proszku za pomocą lepiszcza techniką druku z dwóch głowic
JP	Jetted Photopolymer	Nanoszenie fotopolimeru za pomocą głowic drukujących

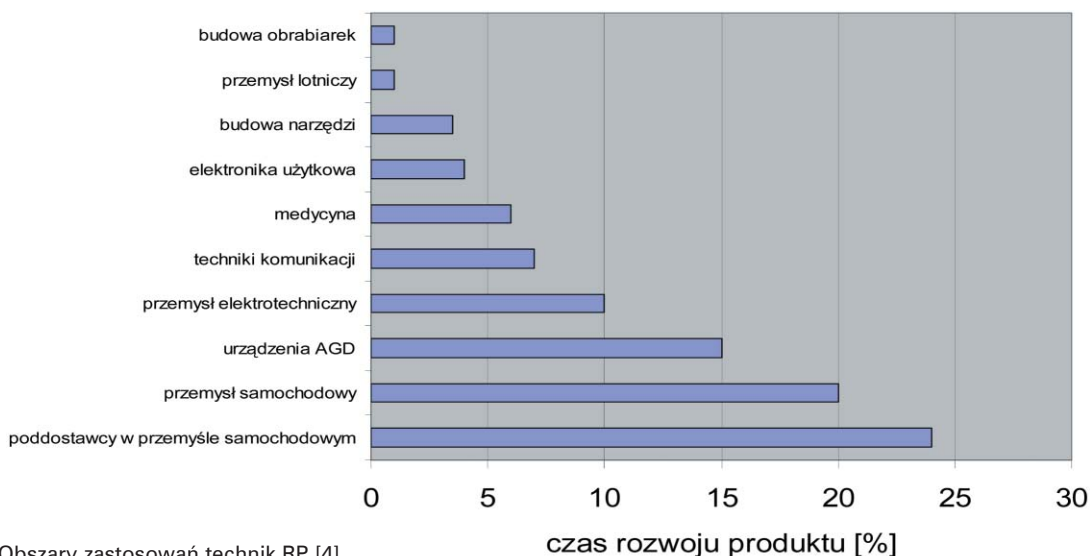
TABELA II. Cechy i własności fizycznych modeli wytworzonych najpopularniejszymi technikami RP [3]

Metoda RP	SL	SLS	LOM	FDM	JP
Wymiary przedmiotu, mm	600	400	800	500	200
Tolerancje, 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

Na koszt wykonania modelu fizycznego w nieznacznej mierze wpływa złożoność kształtu, natomiast na czas wykonania modelu złożoność kształtu nie ma wpływu.

W porównaniu z tradycyjnymi technikami, w których występuje usuwanie nadmiaru materiału, np. frezowanie czy toczenie, współczesne technologie przyrostowe wykazują wiele zalet. Obiekty mogą być tworzone pomimo skomplikowanej geometrii oraz złożoności, bez konieczności opracowywania specjalnej technologii obróbki czy montażu końcowego.

Możliwość technik RP budzą duże zainteresowanie kadry inżynierskiej stosowaniem tych technologii, ponieważ zredukowany jest czas od przygotowania do wprowadzenia prototypu na rynek. Jednocześnie



Rys. 8. Obszary zastosowań technik RP [4]

TABELA III. Porównanie najpopularniejszych metod Rapid Prototyping [1, 4]

Technologia	Stereolitografia	Wytwarzanie strumieniem kropli fotopolimeru	Selektywne spiekanie laserowe	Wytwarzanie przez nakładanie warstw materiału	Wytłoczne osadzanie stopionego materiału	Wytwarzanie strumieniem kropli materiału
Skrót	SL	JP	SLS	LOM	FDM	3DP
Firma wiodąca	3D Systems		EOS GmbH	Solidimension	Stratasys	Z Corp.
Maksymalne wymiary budowanego elementu (mm)	500 x 500 x 600	300 x 180 x 200	700 x 380 x 580	160 x 210 x 130	600 x 500 x 600	500 x 600 x 400
Szybkość	średnia	dobra	średnia / dobra	dobra	słaba	doskonała
Dokładność	b. dobra	dobra do b. dobrej	dobra	dość dobra	dość dobra	dość dobra
Wykończenie powierzchni	b. dobra	dobra do b. dobrej	dobra do b. dobrej	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 powstania elementu, cena systemu	ograniczenie materiałów, – wykończenie i dokładność, anizotropia	szybkość, słaba jakość powierzchni	mała 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 biżuteria i precyzyjne elementy, wzory do formowania części RTV	nieznacznie mniej szczegółowe części i modele do testowania w porównaniu z fotopolimerowymi metodami używającymi tworzyw sztucznych, szybkie wytwarzanie części zawierających liczne szczegóły, takie jak kanały powietrzne, części z dopasowanymi zatrzaskami i ruchomymi przegubami, inżynieria biomedyczna, formy do odlewów	niewiele mniej szczegółowe części i modele do testowania, większe wzory do odlewów piaskowych	szczegółowe części i modele do testowania, szczegółowe części w zastosowaniach z kontaktem pacjentów 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 stali nierdzewnej stop brązu stop kobalt-chrom tytan	PVC – oparte na folii z tworzywa sztucznego pakiety papieru	ABS poliwęglany (PC) elastomery	warstwy plastrów kompozytowych elastomery
Skrót	SL	JP	SLS	LOM	FDM	3DP
Technologia (ang.)	Stereo-lithography	Jetted Photopolymer	Selective Laser Sintering	Laminated Object Manufacturing	Fused Deposition Modeling	Three Dimensional Printing

dzięki tym technikom występują lepsze relacje pomiędzy twórcami a odbiorcami – zrozumienie i przekazanie informacji na etapie tworzenia modelu pozwala na uniknięcie pomyłek. Konstruktorzy, technolodzy, chirurdzy, architekci, artyści oraz przedstawiciele wielu innych dyscyplin stosują te techniki w swojej pracy.

LITERATURA

1. *Miecielica M.*: Analiza wybranych metod szybkiego prototypowania. PW IPIB, Warszawa 2007.
 2. *Miecielica M.*: Rapid prototyping – metody i możliwości zastosowania w inżynierii biomedycznej. AGH, Kraków 2009.
 3. *Gebhardt A.*: Rapid prototyping. Carl Hanser Verlag, Munich 2003.
 4. *Chlebus E.*: Innowacyjne technologie Rapid Prototyping – Rapid Tooling w rozwoju produktu. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
 5. *Cooper K.*: Rapid prototyping technology – selection and application. Marcel Dekker, New York 2001.
 6. http://home.att.net/~castleisland/rp_int1.htm
-