

Annales Universitatis Paedagogicae Cracoviensis

Studia Technica V (2012)

Marzena Pulchna, Andrzej Baliński

Metody szybkiego prototypowania*

Techniki szybkiego prototypowania *RP (Rapid Prototyping)* stosowane są w wielu dziedzinach do wykonywania modeli funkcjonalnych, prototypów, a nawet wyrobów gotowych. Rosnące zainteresowanie tymi metodami związane jest z wysokimi wymaganiami rynku dotyczącymi jakości nowych wyrobów. Powstanie i rozwój omawianych technik był możliwy dzięki dynamicznemu rozwojowi takich dziedzin, jak inżynieria materiałowa, modelowanie komputerowe, elektronika i automatyka. Synergiczne połączenie różnorodnej wiedzy dało początek tego rodzaju nowoczesnym technologiom. Na tej podstawie powstały dalsze systemy efektywnego projektowania i wytwarzania złożonych geometrycznie elementów, takie jak szybkie wykonywanie narzędzi *RT (Rapid Tooling)* czy też szybka produkcja seryjna *RM (Rapid Manufacturing)*. Nowatorskie metody umożliwiają wykonanie przedmiotów o złożonych, skomplikowanych kształtach, trudnych lub niemożliwych do realizacji technikami tradycyjnymi. Nie stanowią dla nich konkurencji, ale uzupełniają lukę jaka istniała do niedawna w technologiach wytwarzania.

Istota i klasyfikacja technik szybkiego wykonywania prototypów

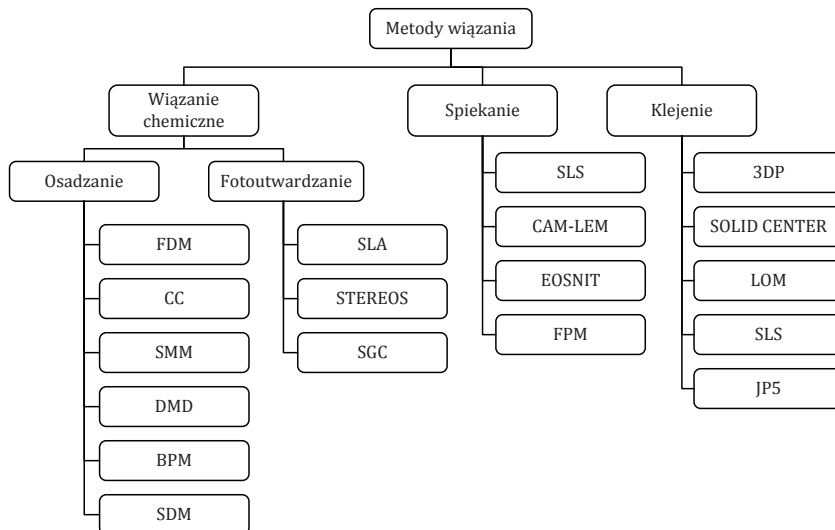
Początek technik szybkiego wykonywania prototypów związany jest z opatentowaniem stereolitografii pod koniec lat 80. XX w., opracowanej z myślą o przyspieszeniu czasu tworzenia elementów o złożonych kształtach. Zapoczątkowało to bardzo szybki rozwój metod wspomagających proces powstawania nowych produktów. Wykonanie prototypu jest bardzo ważne, gdyż jest to pierwsza materialna wizualizacja przygotowywanego przedmiotu, pozwalająca na weryfikację założeń projektowych. Tradycyjne metody związane są z dużymi nakładami pracy ręcznej, przez co są czasochłonne i opóźniają wprowadzenie wyrobu na rynek.

* Artykuł został opracowany na podstawie wybranych wyników badań wykonanych w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie, opisanych w pracy magisterskiej p. Marzeny Pulchnej, której promotorem był współautor niniejszego artykułu.

Szybkie wykonanie prototypu jest możliwe z zastosowaniem dwóch podstawowych metod:

- metody warstwowego ubytku tworzywa konstrukcyjnego, za pomocą obróbki ubytkowej, np. frezowanie, obróbka elektroerozyjna, skrawanie. Przedmiot wykonywany jest przy użyciu obrabiarek z dużymi prędkościami, stąd też nazwa tych metod – obróbki szybkościowe lub wysokowydajne *HSM (High Speed Machining)*. Wykonywanie modeli, prototypów, matryc czy gotowych narzędzi tymi technikami określane jest jako *RM (Rapid Manufacturing)*,
- metody warstwowego przyrostu tworzywa konstrukcyjnego, z wykorzystaniem wirtualnego modelu utworzonego w programie typu *CAD-3D*, bez użycia narzędzi. Do tej grupy zalicza się wiele technik, ogólnie określanych jako techniki szybkiego wykonywania prototypów *RP*. Najczęściej wykorzystywane są do wykonywania przedmiotów o dużym stopniu złożoności i nieregularnych kształtach [1].

Techniki szybkiego prototypowania charakteryzują się tym, że model fizyczny powstaje przez tworzenie kolejnych warstw z materiału, którym może być wosk, tworzywo sztuczne, materiały drewnopodobne, materiały ceramiczne, papier. Materiał budulcowy zmienia swoją postać z cieczy, proszku lub ciała stałego w stan stały przez wykorzystanie różnych procesów fizycznych i chemicznych (rys. 1). Metody szybkiego wykonywania prototypów można ponadto podzielić na przystosowane do pracy w technice 2D i 3D, z nanoszeniem materiału w sposób punktowy (dyskretny lub ciągły) albo warstwowy (rys. 2).

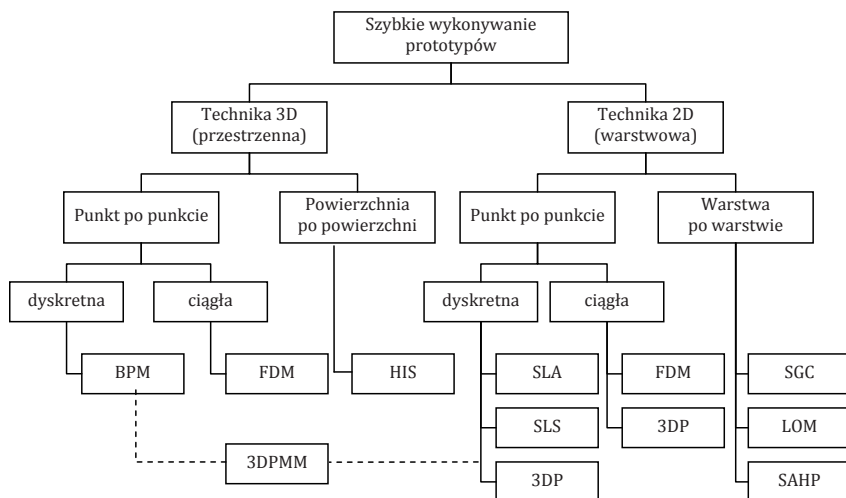


Rys. 1. Podział metod szybkiego prototypowania ze względu na rodzaj materiału budulcowego

W tabeli 1 przedstawiono najpopularniejsze techniki szybkiego wykonywania prototypów oraz firmy lub instytucje, które stworzyły poszczególne technologie.

Największe zastosowanie praktyczne mają metody SL (ok. 70%), LOM (ok. 12%), FDM (ok. 9%) oraz SLS (ok. 6%) [1].

Techniki szybkiego wykonywania prototypów znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu, przyspieszając czas opracowywania i testowania nowych produktów. Na każdym etapie projektowania oraz wytwarzania można tworzyć modele i prototypy wykorzystywane do oceny koncepcji pod względem funkcjonalnym, ekonomicznym oraz technologicznym. Prototyp funkcjonalny umożliwia badanie najważniejszych własności projektowanego wyrobu z ograniczonymi parametrami eksploatacyjnymi, natomiast prototyp techniczny pozwala na ocenę i określenie dopuszczalnych parametrów użytkowych. Tworzenie wzorców na poszczególnych etapach powstawania produktu daje szansę na modyfikację konstrukcji przed wprowadzeniem jej do seryjnej produkcji. Bardzo ważne jest skrócenie czasu od powstania pomysłu do jego realizacji. Rysunek 3 przedstawia etapy powstawania wyrobu w sposób tradycyjny (a) oraz z zastosowaniem technik szybkiego prototypowania (b).

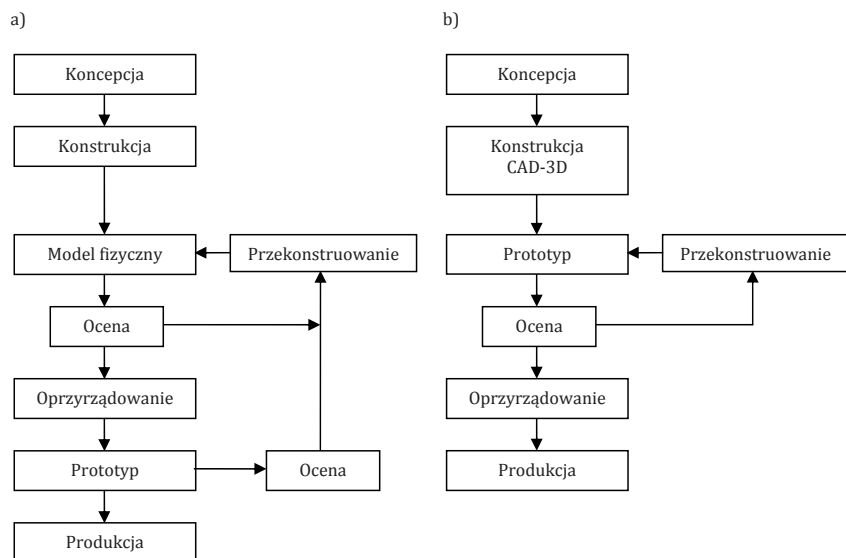


Rys. 2. Klasyfikacja metod szybkiego prototypowania ze względu na sposób budowania modelu

Tab. 1. Najbardziej popularne metody szybkiego prototypowania

Technologia (skrót/nazwa/charakterystyka)			Twórca
BIS	Beam Interference Solidification	utwardzanie wiązką świetlną	brak danych
BPM	Ballistic Particle Manufacturing	wytwarzanie prototypów przez natryskiwanie kropeł materiału	BPM Inc.
DLF	Direct Laser Fabrication	laserowe, bezpośrednie spiekanie proszków	Interdisciplinary Research Centre on Material Processing, Birmingham
FDM	Fused Deposition Modeling	modelowanie poprzez osadzenie topionego materiału	Stratasys
HIS	Holographic Interference Solidification	utwardzanie holograficzne	QUADTEC

LOM	Laminatem Object Manufacturing	wycinanie obrysu modelu na przyklejonej do poprzedniej warstwie papieru	Helisys
SAHP	Selective Adhesive and Hot Press Process	warstwowe zlepianie z prasowaniem	Kira
SDM	Shape Deposition Manufacturing	wytwarzanie przez kształtowanie osadzaniem	Stanford University
SGC	Solid Ground Curing	powierzchniowe zestalanie ciekłego materiału za pomocą lampy UV	Cubital Ltd.
SL	Stereolitography	stereolitografia	3D Systems Inc.
SLS	Selective Laser Sintering	selektywne spiekanie laserowe proszków	Texas & DTM (3D Systems)
SMM	Sanders Model Maker	wykonywanie modeli poprzez nanoszenie głowicą topionego materiału	Sanders Prototype
3DP	3D Printing	drukowanie 3D	MIT & Z Corp.
3DPMM	ModelMaker 3D Plotting	warstwowe natryskiwanie spoiwa	Sanders



Rys. 3. Porównanie konwencjonalnych metod produkcji (a) oraz z wykorzystaniem technik *RP* (b) [2]

Techniki *RP* stosowane są do tworzenia modeli wykorzystywanych między innymi:

- do analizy i oceny przepływów tworzyw sztucznych,
- do oceny możliwości montażu i łączenia części,
- do badań marketingowych nowych produktów,
- w medycynie (rys. 4) (przykładowo do projektowania implantów kostnych),

- w odlewnictwie (wytworzenie elementów o złożonej geometrii kształtu, z zastosowaniem form wykonanych z udziałem ognioodpornej osnowy ziarnowej oraz metody traconego modelu),
- do formowania próżniowego,
- do badań ergonomicznych i koncepcji projektowych,
- we wzornictwie przemysłowym,
- w architekturze (rys. 5),
- w przemyśle lotniczym,
- w przemyśle samochodowym.



Rys. 4. Model anatomiczny miednicy wykonany techniką 3DP [3]



Rys. 5. Model architektoniczny wykonany techniką 3DP [4]

Procesy szybkiego prototypowania wykorzystywane są głównie w produkcji jednostkowej i seryjnej, nie sprawdzają się natomiast w produkcji masowej ze względu na stosunkowo długi czas wykonania przedmiotu. Do wykonania dużej ilości sztuk wybierane są metody pozwalające na wykonanie jak największej liczby przedmiotów w jednostce czasu. Techniki RP nadają się szczególnie do modeli o złożonej geometrii, przede wszystkim w przestrzeniach wewnętrznych, których

realizacja innymi metodami jest bardzo kosztowna, trudna lub wręcz niemożliwa. W tabeli 2 przedstawiono podstawowe zastosowania poszczególnych metod przyrostowego wykonywania. Ograniczeniem zastosowania technik szybkiego prototypowania jest niewielka przestrzeń robocza, co pozwala na budowanie w całości jedynie małowymiarowych modeli. Ewentualnie większe obiekty można podzielić na części i wykonać je osobno. Pomimo dość dużej dokładności wymiarowej (ok. $\pm 0,1$ mm), jakość powierzchni jest zróżnicowana i zależy od stosowanej metody. Niedogodnością stanowi również często niezbędna dodatkowa obróbka wykańczająca. Ponadto stosuje się ograniczoną gamę materiałów, o odmiennych właściwościach mechanicznych, nie zawsze spełniających wymagania stawiane danemu wyrobowi [1].

Tab. 2. Zakres zastosowań i dokładność wykonania modeli fizycznych za pomocą technik szybkiego prototypowania [6]

wizualizacja	Model			
	SL	SLS	LOM	FDM
forma zewnętrzna	X	X	X	X
niezamknięte przestrzenie wewnętrzne, rzeczywista grubość ścianek	X	X	X ¹	X
zamknięte lub częściowo zamknięte przestrzenie wewnętrzne	X	X ^{3,4}	X ^{3,4}	X ⁴
	dokładność odtworzenia kształtu			
minimalna grubość ścianek	< 0,5 mm	0,5–1 mm	> 1 mm	> 1 mm
dokładność w płaszczyźnie X–Y	$\geq \pm 0,05$ mm	$\geq \pm 0,1$ mm	$\geq \pm 0,1$ mm	$\geq \pm 0,15$ mm
dokładność w osi Z	$\geq 0,1$ mm	$\geq 0,13$ mm	$\geq 0,1$ mm	$\geq 0,1$ mm

1 – jeżeli jest możliwość wyjęcia części

2 – przez podział modelu

3 – brak możliwości oczyszczenia wnęk wewnętrznych

4 – nie stosowane w medycynie, modele nieprzezroczyste

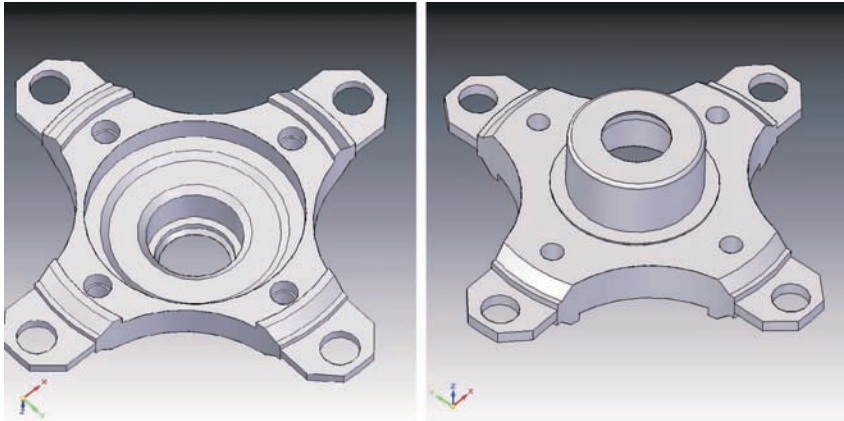
Przykład wykonania modelu prototypu piasty napędowej z zastosowaniem metody 3DPrinting oraz FDM (Fused Deposition Modelling)

Wykonanie prototypu poprzedzono wykonaniem rysunku konstrukcyjnego CAD-2D w programie *Solid Works* (w module do tworzenia rysunków 2D i dokumentacji technicznej). Na podstawie opisu geometrycznego na płaszczyźnie opracowano model bryłowy w programie *Solid Edge v.20* (rys. 6). Obiekt 3D wykonano bardzo dokładnie, tak aby wszystkie linie były domknięte. Jeżeli ten warunek nie jest spełniony, niemożliwe jest wygenerowanie programu sterującego urządzeniem do szybkiego prototypowania.

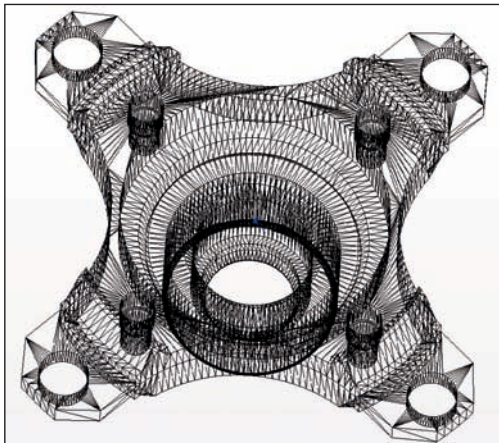
Kolejnym etapem pracy była transformacja obiektu bryłowego do formatu *STL*. Można to wykonać w programie *CAD-3D* lub w systemie *RP* (wówczas plik z danymi 3D musi być zapisany z rozszerzeniem obsługiwany przez dany system). W przypadku omawianego modelu dane zapisano do formatu *STL* bezpośrednio

w programie *Solid Edge*. Po wybraniu odpowiedniej funkcji nastąpiła automatyczna aproksymacja elementu trójkątami. Na tym etapie sprawdzono poprawność wykonania triangulacji, szczególnie w miejscach zagięć czy zaokrągłeń elementu. Jest to działanie niezbędne, przeciwdziałające dokonaniu błędnego podziału przez program (np. wierzchołek trójkąta nie jest wspólny z innym, ale znajduje się na jego boku). Nieprawidłowości w tym przekształceniu również mogą uniemożliwić wykonanie prototypu technikami przyrostowymi. Model piasty w formacie *STL* przedstawia rysunek 7.

Pierwszy prototyp wykonano metodą *3DPrinting*, z zastosowaniem drukarki firmy *ZCorporation*, model *ZPrinter 310 Plus*, na której tworzone są przedmioty jednokolorowe z proszku wzmacnianego spoiwem. W tabeli 3 przedstawiono specyfikację techniczną urządzenia.



Rys. 6. Rysunek 3D piasty napędowej wykonany w programie *Solid Edge*: a) widok z góry, b) widok z dołu



Rys. 7. Model piasty napędowej w formacie *STL*

Tab. 3. Specyfikacja techniczna drukarki ZPrinter 310 Plus [7]

liczba nanoszonych warstw	2–4/ minutę
maksymalne wymiary drukowanego przedmiotu	203 x 254 x 203 mm
wysokość nanoszonej warstwy, ustalana przez użytkownika	0,089 – 0,203 mm
stosowane materiały	wysoko wydajne kompozyty, elastomery
oprogramowanie	oprogramowanie ZCorp akceptuje dane w postaci plików <i>STL</i> , <i>VRML</i> oraz <i>PLY</i> . Oprogramowanie pracuje w systemach <i>MS Windows NT, 2000 Professional</i> oraz <i>XP</i>

Stanowisko do wykonywania prototypów techniką 3DP składa się z: urządzenia drukującego, komputera z oprogramowaniem dla danego modelu drukarki oraz komory do oczyszczania prototypów z nieutwardzonego materiału (rys. 8).

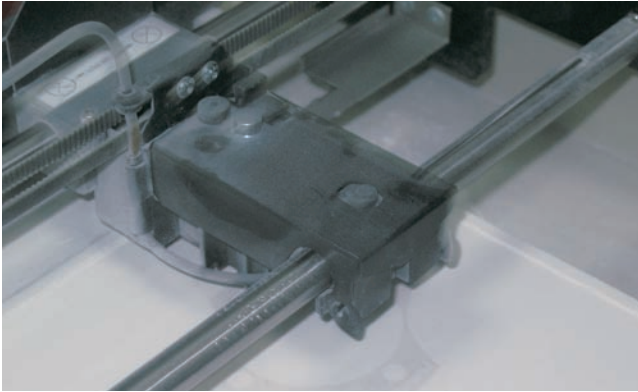
**Rys. 8.** Stanowisko do wykonywania prototypów techniką 3DPrinting

Do wykonania modelu piasty zastosowano materiał proszkowy *Zp 131* oraz spoiwo *Zb 60*. Materiał *Zp 131* jest uniwersalny i stosowany do wykonywania elementów wymagających dobrych właściwości mechanicznych (dzięki zastosowaniu infiltratora z układu wiążącego „żywica epoksydowa – utwardzacz”) i wyrazistych detali. W programie sterującym urządzeniem (program *ZPrint*) został wybrany rodzaj proszku oraz spoiwa, a także określono grubość nanoszonej jednorazowo warstwy materiału, wynoszącej 0,0875 mm. Model automatycznie został podzielony na 342 przekroje. Ustalono również lokalizację przedmiotu w przestrzeni roboczej drukarki. Jest to szczególnie ważne, gdy wykonywanych jest jednocześnie kilka modeli. Nie decyduje to o czasie drukowania, gdyż głowica musi wykonać cały ruch roboczy i powrotny. Na czas budowy wpływ ma ustawienie modelu względem osi Z (budowany model powinien mieć w tym kierunku najmniejszy wymiar). Szacowany czas wykonania elementu wynosił 66 minut. Na rysunku 9 przedstawiono drukowanie jednej z warstw piasty napędowej.

W trakcie wykonywania elementu można kontrolować proces w programie *ZPrint*, w którym wyświetlane są informacje dotyczące:

- czasu rozpoczęcia i zakończenia wykonywania modelu,
- czasu jaki upłynął od rozpoczęcia i jaki pozostał do zakończenia drukowania,
- ilości przekrojów na jakie został podzielony model,
- ilości wydrukowanych warstw,
- procentowego postępu wykonania elementu,
- aktualnie nanoszonego przekroju.

Ponadto, aplikacja *ZPrint* pozwala na przeglądanie, skalowanie, obracanie oraz dodawanie informacji tekstowych do projektu tworzonego modelu.



Rys. 9. Wykonywanie prototypu piasty techniką *3DPrinting*

Do wykonania prototypu piasty napędowej zużyto 29,9 ml proszku, a rzeczywisty czas jej budowy wynosił 53 minuty. Po zakończeniu drukowania element musiał pozostać przez około 60 minut w komorze urządzenia, aby materiał uległ zespoleniu i możliwe było bezpieczne wyjęcie modelu oraz przeprowadzenie dalszych czynności wykańczających. Rysunek 10 przedstawia wykonany z zastosowaniem metody *3DPrinting* prototyp piasty napędowej.



Rys. 10. Prototyp piasty napędowej wykonany metodą *3DPrinting*

Prototyp został wzmocniony przez pokrycie całej jego powierzchni infiltratorem epoksydowym.

Drugi prototyp został wykonany z zastosowaniem urządzenia *FDM Titan* firmy *Stratasys* (tab. 4). Przed przystąpieniem do wykonania przedmiotu tą techniką zamocowano w głowicy urządzenia odpowiednie dysze oraz kasety z materiałami. Materiały dla detalu i podpory występują w postaci włókna nawiniętego na szpulach. Do wykonania piasty napędowej zastosowano materiał modelowy *ABS* z dyszą T16 oraz materiał podporowy *ABS* rozpuszczalny z dyszą T12. Liczba w symbolu dyszy oznacza jej średnicę: T12–1,2 mm, T16 – 1,6 mm. *ABS* jest to termoplastyczne tworzywo sztuczne charakteryzujące się dobrymi właściwościami mechanicznymi.

Tab. 4. Specyfikacja techniczna urządzenia *FDM Titan* [8]

przestrzeń robocza	406 x 355 x 406 mm
stosowane materiały	<i>ABS</i> (akrylobutadienostyren), poliwęglany, polietyleny, polifenylosulfonian
grubość nanoszonej warstwy	0,127–0,254 mm
dokładność wykonania	±0,1% wymiaru przedmiotu (np. model o wymiarach 127 mm ma dokładność ±0,127 mm)

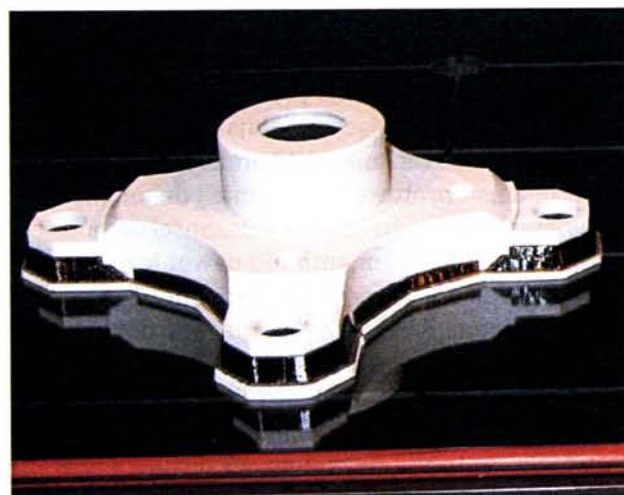
Po przebrojeniu urządzenia należało je ponownie skalibrować, tzn. wprowadzić dane dotyczące średnic oraz parametrów zużycia dysz, a także sprawdzić ich położenie. Czas pracy dysz oraz ilość materiału jaka została przez nie dozowana są ewidencjonowane. Następnie wykonano próbne drukowanie elementu roboczego (tzw. *job*), aby ustalić jak najdokładniej wzajemne nanoszenie materiału modelowego i podporowego. Jest to czynność powtarzana aż do uzyskania wymaganej dokładności, przeprowadzana bezpośrednio na urządzeniu, poprzez wybieranie określonych pozycji na manipulatorze. Następnie przystąpiono do ustawienia parametrów pracy urządzenia dla danego elementu. Po wprowadzeniu danych dotyczących rodzaju stosowanych materiałów oraz dysz, program *Insight* dokonał automatycznego podziału modelu na warstwy, które można przeglądać pojedynczo, w celu wyszukania ewentualnych błędów. Obliczona przez program grubość warstwy została określona na 0,1270 mm. Wybierając odpowiednią funkcję, uruchomiono generator elementów umożliwiających wykonanie modelu fizycznego. Program oznaczył kolorami poszczególne jego części. Model podzielony na warstwy z wyróżnionymi częściami niezbędnymi do wykonania piasty ilustruje rysunek 11. Kolorami zaznaczono poszczególne elementy modelu: fioletowy – podstawa, popielaty – materiał podporowy, czerwony – materiał modelowy.

W celu zmniejszenia zużycia surowców budulcowych oraz skrócenia czasu wykonywania elementu można zmniejszyć gęstość pozorną nanoszonych materiałów – podporowego i modelowego, albo nie wypełniać wewnętrznych przestrzeni modelu. Oczywiście wiąże się to ze zmniejszeniem dokładności wykonania modelu. Równocześnie należy zwrócić uwagę na to, że program nie pozwala na całkowite wyeliminowanie materiału podporowego wewnątrz modelu, gdyż uniemożliwiłoby to wykonanie elementu tą techniką. Skuteczne zmniejszenie czasu wykonania elementu można uzyskać, lokalizując element w komorze, tak by był on usytuowany

w miejscu jak najbliższym zamocowania głowicy z dyszami. Dla omawianego modelu wybrano następujące parametry: tryb budowy – szkic; sposób wypełniania części – rastrowy; sposób wypełniania części wewnętrznej – normalny, stały; część zewnętrzna – normalna, rastrowa; sposób wypełniania podpór – rzadki. Po ustawieniu wszystkich parametrów program został przesłany do urządzenia wykonawczego. Ze względu na wysoką temperaturę jaką muszą osiągnąć dysze (305°C–350°C) oraz komora robocza, urządzenie musiało zostać uruchomione znacznie wcześniej przed rozpoczęciem procesu budowania modelu. Budowa prototypu piasty napędowej trwała 12 godz. 50 min., zużyte zostało 40,776 cm³ materiału modelowego i 15,279 cm³ materiału podporowego. Wykonany element osadzony na podstawie przedstawia rysunek 12.



Rys. 11. Model piasty napędowej podzielony na warstwy z zaznaczonymi elementami konstrukcyjnymi



Rys. 12. Prototyp piasty w komorze urządzenia FDM

Część podpór została usunięta ręcznie, natomiast pozostałe, usytuowane w miejscach trudno dostępnych, zostały usunięte z zastosowaniem roztworu zasadowego, rozpuszczającego tylko tworzywo podporowe. Do oczyszczania modelu z materiału pomocniczego zastosowano myjkę ultradźwiękową firmy *Polsonic*. W przypadku prezentowanego modelu piasty napędowej wyfukiwanie materiału podporowego trwało 1 godz. 30 min.

Gotowy model, wykonany z tworzywa *ABS*, można poddać obróbce wykańczającej (malowanie, szlifowanie, utwardzanie, wiercenie). Prototyp piasty napędowej został wypolerowany w miejscach, gdzie bezpośrednio stykały się elementy modelu i konstrukcji pomocniczej.

Ocena zastosowanych metod

Do oceny jakości wykonania prototypów wykorzystano metodę kontrolno-pomiarową, z zastosowaniem skanowania trójwymiarowego. Celem tego badania było określenie stopnia dokładności odwzorowania modelu *CAD-3D* przez wybrane techniki przyrostowe, analiza przebiegu procesów budowy i obróbki wykańczającej oraz ich optymalizacja na podstawie uzyskanych wyników.

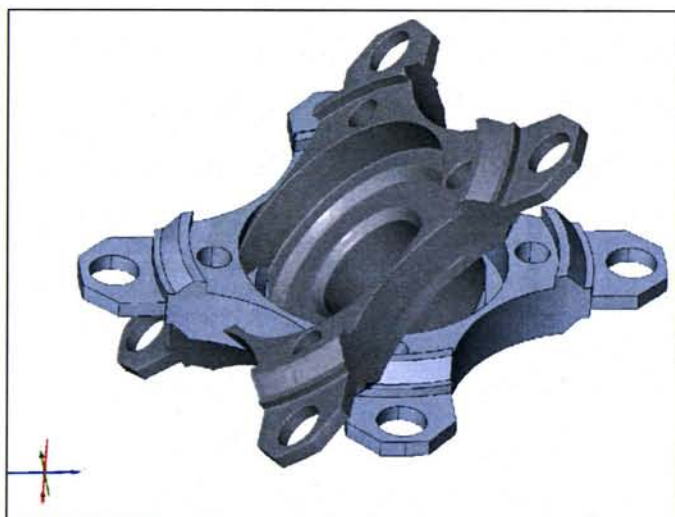
Proces *Rapid Inspection* zrealizowano z wykorzystaniem systemu pomiarowego *Atos III* firmy *GOM*. Jest to skaner optyczny działający na zasadzie triangulacji. Parametry techniczne urządzenia podano w tabeli 5.

Tab. 5. Specyfikacja techniczna skanera *ATOS III* [9]

liczba punktów pomiarowych	4 000 000
czas skanowania	2 sekundy
pole pomiarowe	od 150x150 do 2000x2000 mm
fizyczna odległość punktów	od 0,075 do 1,0 mm

Przygotowanie prototypów do skanowania polegało na umieszczeniu na ich powierzchni punktów referencyjnych. Na każdym modelu naklejono ok. 25 markerów, zlokalizowanych w taki sposób, aby w trakcie pomiarów w każdym ujęciu widocznych było kilka punktów. Ponieważ powierzchnia przedmiotów była matowa, nie wymagała pokrywania proszkiem zapobiegającym odbijaniu światła emitowanego przez urządzenie. Prototypy wykonane techniką *3DP* oraz *FDM* skanowano oddzielnie. Pierwszy model umieszczono na obrotowej platformie i dokonano kalibracji przyrządu adekwatnej do powierzchni przedmiotu. W zależności od potrzeb, skanerem można odwzorować kształt i wymiary elementu lub nawet jego fakturę. W tym celu odpowiednio ustawia się odległość przyrządu od obiektu oraz czułość pomiaru. Prototypy piasty napędowej badane były pod względem dokładności kształtowo-wymiarowej. Oba modele wymagały skanowania w dwóch rzutach (od góry i od dołu), aby uzyskać odwzorowanie całej bryły. W wyniku badania uzyskano po kilka obrazów każdego przedmiotu, które następnie połączono, tworząc dwa modele cyfrowe. „Chmura punktów” dla prototypu wykonanego techniką *3DP* zawierała 784 277 elementów, natomiast dla modelu *FDM* 776 151. Różnica w liczbie punktów wynika z tego, że dla pierwszego, kontrolowanego elementu wykonano

więcej zdjęć. Następnie dokonano poligonizacji, uzupełniono braki, usunięto punkty referencyjne oraz wygładzono powierzchnie. Efektem tych czynności było uzyskanie gęstej sieci poligonalnej, która może być traktowana jako model obiektu rzeczywistego. Do elementu *RE* importowano model bryłowy wykonany wcześniej w programie *Solid Edge* (rys. 13). Ponieważ elementy były inaczej zorientowane w układzie współrzędnych, wymagały wzajemnego ustawienia. W celu uzyskania jak najlepszego stopnia pokrywania się obu modeli wykorzystano różne sposoby dopasowania (automatyczne, wstępne i metodą *Best-Fit*). Końcowe dopasowanie zależne jest od użytkownika, wskazującego elementy, na podstawie których modele pokrywają się. Po dokładnym dopasowaniu można przystąpić do porównania dokładności kształtowo-wymiarowej.

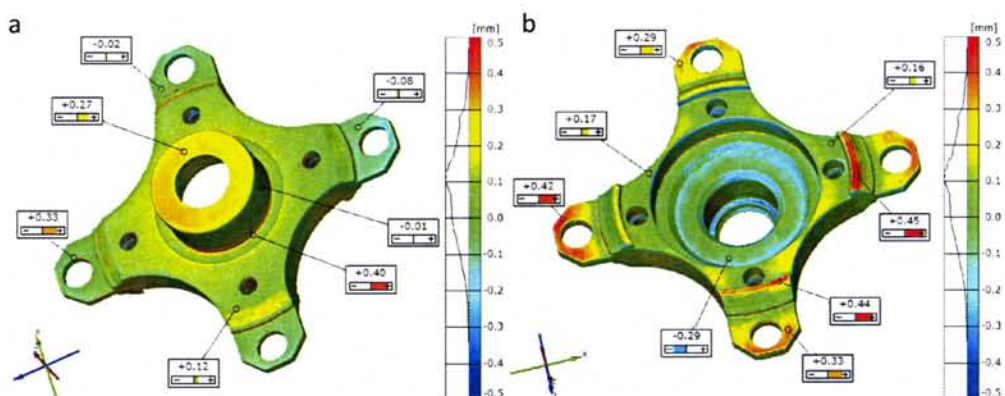


Rys. 13. Dopasowanie modelu zeskanowanego (ciemnopopielaty) i CAD-3D

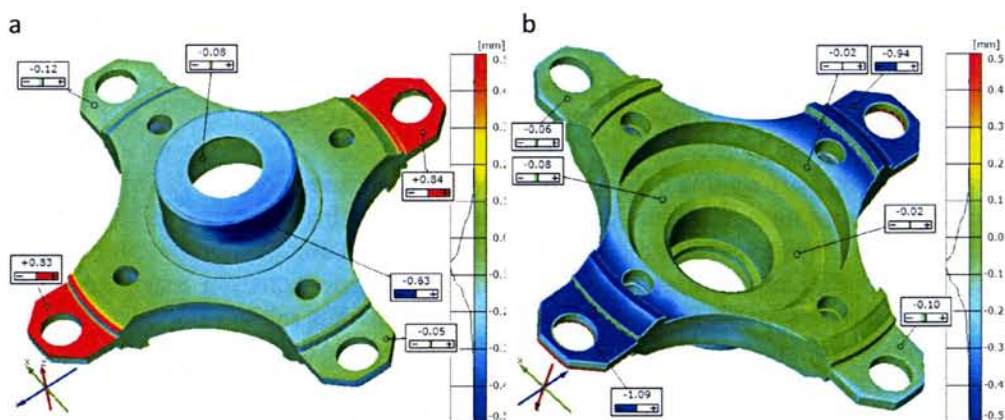
Wynikiem porównania było wygenerowanie graficznego raportu zawierającego barwne oznaczenie odchylenia kształtu modelu zdigitalizowanego obiektu rzeczywistego od odchylenia kształtu modelu CAD. Skalę odniesienia ustalono w zakresie od $-0,5$ mm do $+0,5$ mm, co umożliwiło wyraźne zaznaczenie wartości znacznie odbiegających od wzorcowych. Rysunki 14 oraz 15 przedstawiają raporty odpowiednio dla prototypu wykonanego techniką *3DP* i *FDM*. Zawierają one dwa rzuty (z góry i z dołu) z oznaczeniem orientacji w układzie współrzędnych, barwną skalę odniesienia z podziałką, histogram oraz wartości odchyłek dla wybranych punktów powierzchni.

Protokół pomiarowo-kontrolny prototypu wykonanego metodą drukowania przestrzennego wskazuje na występowanie odchyłek dodatnich o maksymalnej wartości ok. $0,45$ mm oraz niewielkiej ilości odchyłek ujemnych rzędu $0,3$ mm. Z histogramu wynika, iż większość powierzchni modelu jest wykonana z minimalnym naddatkiem. Dominują wartości od $-0,1$ mm do $+0,25$ mm. Niewielki nadmiar może wynikać z niedokładnego oczyszczenia modelu z pozostałości nieutwardzonego materiału znajdującego się wokół niego w przestrzeni roboczej drukarki. Świadczy o tym występowanie naddatków zarówno w górnej, jak i dolnej części prototypu. Największe

odchyłki dodatnie są na ramionach od spodu. Możliwe, że w tych miejscach w trakcie budowania elementu utwardzona została również warstwa wcześniejsza, która powinna stanowić jedynie podporę dla konstrukcji. Ten nadmiar można łatwo zniwelować przez polerowanie powierzchni, gdyż jest to miejsce dostępne. Największy problem stanowi część centralna. Jest ona przesunięta w dodatnim kierunku osi Z. Na widoku z góry występuje naddatek (+0,27 mm), natomiast na widoku od dołu niedomiar o podobnej wartości (-0,29). O ile górną powierzchnię można wypolerować, spodnia pozostanie niedokładna. Średnice otworów, gdzie wymagana jest największa dokładność, mają parametry zadowalające i nie wymagają poprawek.



Rys. 14. Raport graficzny z porównania modelu cyfrowego prototypu wykonanego techniką 3DP z jego modelem CAD: a) widok z góry, b) widok z dołu



Rys. 15. Raport graficzny z porównania modelu cyfrowego prototypu wykonanego techniką FDM z jego modelem CAD: a) widok z góry, b) widok z dołu

Z raportu graficznego ze skanowania prototypu wykonanego techniką FDM wynika, iż na naprzeciwległych ramionach występują znaczne odchyłki wymiarowe. Na części widocznej na rzucie od góry ich wartość wynosi maksymalnie +0,83 mm i +0,84 mm, a odpowiadające im odchyłki widoczne na rzucie od dołu to: -1,09 i -0,94. Te różnice wymiarowe w znacznym stopniu kompensują się. Możliwe, że

powstały na skutek odkształcenia się modelu podczas odrywania go z platformy roboczej lub w trakcie wyflukiwania materiału podporowego. Aby temu przeciwdziałać, należy ostrożniej usuwać element z platformy po jego wykonaniu i skrócić czas jego przetrzymywania w płuczce ultradźwiękowej. Dość duży brak materiału występuje w części centralnej (widok z góry) i wynosi on w punkcie pomiarowym $-0,63$ mm. Mógł on powstać w wyniku zbyt intensywnego polerowania powierzchni w tym miejscu (szczególnie, że powierzchnia wewnętrzna jest wykonana poprawnie). Niewykluczone również, że powstał na skutek odchylenia ramion. Jest to błąd, którego nie można poprawić. Na podstawie histogramu można stwierdzić, że rozkład odchyłek powierzchni jest skupiony w wąskim zakresie. Znaczna większość odchyłek mieści się między $-0,15$ mm a $+0,5$ mm. Otwory mają dobrą dokładność i nie wymagają dodatkowych czynności wykańczających. Jeżeli powodami powstania tych znaczących odkształceń są te, które zostały podane, ich wyeliminowanie pozwoli na wykonanie prototypu o lepszej dokładności kształtowo-wymiarowej.

Pierwszym i najważniejszym kryterium wyboru metody wykonania prototypu piasty napędowej była dokładność kształtowo-wymiarowa. Korzystniejsze pod tym względem jest drukowanie przestrzenne, gdyż w miejscach gdzie wartości powinny bezwzględnie odpowiadać projektowi, odchylenia nie występują lub są nieznaczne. Jeżeli udałoby się wyeliminować niekorzystne odchylenie ramion w prototypie wykonanym techniką *FDM*, a pozostałe powierzchnie pozostałyby bez zmian, wówczas jego ogólna ocena przewyższałaby model wykonany techniką *3DP*. Osiągnięte dokładności nie byłyby możliwe do uzyskania, gdyby element wykonano tradycyjnymi metodami.

Powierzchnia obu prototypów wymagała wygładzenia. Chropowatość elementu wykonanego na drukarce trójwymiarowej związana jest z granulacją proszku. Zastosowany materiał modelowy wraz z lepiszczem oraz cienkie warstwy zapewniły korzystne właściwości powierzchni. Drugi model również wymagał polerowania, ale nie w całości, a jedynie w miejscach, gdzie materiał konstrukcyjny stykał się bezpośrednio z podporowym. Nie było więc konieczne wygładzanie trudno dostępnych przestrzeni. Uzyskano to dzięki zastosowaniu optymalnych warunków procesu, tzn. dobrej jakości materiałów, odpowiednio dobranych dysz i poprawnie zaprojektowanej konstrukcji wspierającej.

Kolejnym kryterium był czas budowy, na który składa się wykonanie modelu techniką przyrostową oraz czas obróbki wykańczającej. Czynności przygotowawcze są takie same, więc nie są brane pod uwagę. Pod tym względem dużo lepsza jest technika *3DP*. Drukowanie przedmiotu, sezonowanie w komorze roboczej, utwardzanie i wygładzanie powierzchni trwało w sumie ok. 2 godz. 30 min. Budowa prototypu w urządzeniu *FDM Titan* i wyflukiwanie materiału podporowego trwało ponad 14 godz.

Całkowity koszt wykonania prototypu składa się z kosztów przygotowania projektu oraz kosztów budowy, do których zalicza się zużycie materiałów, czas pracy urządzenia, obróbka wykańczająca. Wykonanie dokumentacji modelu dla obu metod było takie samo, więc różnicę stanowi realizacja projektu. Koszt budowy prototypu techniką *3DP* wyniósł 500 zł, natomiast *FDM* 1700 zł. Związane jest to m.in. z tym, że komora i dysze urządzenia do osadzania wtłoczonego materiału muszą być utrzymywane w wysokiej temperaturze, co powoduje duże zużycie energii

elektrycznej. W przypadku porównywanych metod nie ma dużych strat w zużyciu materiału pomocniczego. Nieutwardzony proszek w druku przestrzennym, stanowiący podporę, jest usuwany z komory roboczej i może być wykorzystany ponownie. W oprogramowaniu systemu *FDM* użytkownik sam może wybrać lub zaprojektować konstrukcję podporową. Kolejnym aspektem wyboru techniki przyrostowej jest konieczność wykonania obróbki wykańczającej. To, czy jest ona niezbędna, zależy zarówno od metody, jak i wymagań stawianych prototypowi. Modele zbudowane techniką *3DP* muszą być poddane infiltracji, gdyż bez tego zabiegu są kruche i nietrwałe. Dzięki zastosowaniu różnych środków nasączających można modyfikować właściwości mechaniczne elementu. Ponadto, jeżeli wymagana jest bardzo mała chropowatość powierzchni, należy poddać je obróbce wykańczającej. W przypadku techniki *FDM* nie ma konieczności wykonywania tego rodzaju czynności, aczkolwiek również można wygładzić powierzchnię uzyskanego elementu, jeżeli jej jakość nie jest zadowalająca.

Zagadnieniem, które do tej pory nie zostało poruszone, jest problem związany z możliwością kontynuacji pracy urządzenia po przerwaniu procesu budowy elementu. Oprogramowanie drukarki przestrzennej wyświetla w trakcie pracy aktualnie wykonywany przekrój i nawet gdy proces zostanie z jakichkolwiek powodów wstrzymany, jest w stanie powrócić do jego realizacji. Nie ma to wpływu na jakość prototypu. Inaczej jest w przypadku techniki *FDM*. Jeżeli nastąpi przerwa w zasilaniu, urządzenie kończy wykonywanie modelu i nie ma możliwości powrotu do ostatnio nanoszonego przekroju. W przypadku krótkiej przerwy w pracy urządzenia zdarza się, że budowa jest kontynuowana, ale mogą wystąpić przesunięcia warstw względem siebie. Dlatego dla zapewnienia ciągłości pracy urządzenia powinno być zapewnione dodatkowe źródło zasilania.

Wnioski

W wyniku powyższego porównania metod zastosowanych do wykonania prototypu piasty napędowej stwierdzono, że korzystniejszą metodą jest drukowanie *3D*. Analizy dokonano na podstawie jednego modelu i wybranych kryteriów, więc nie można traktować jej jako uniwersalnej. Wybór metody jest oczywiście zindywidualizowany i musi uwzględniać oczekiwania jakie ma spełniać dany przedmiot. Zazwyczaj jednak nie ma możliwości weryfikacji poszczególnych technik przez wykonanie próbných modeli. Dlatego decyzja o wyborze sposobu wykonania opiera się na specyfice metody i właściwościach wytworzonych przedmiotów.

Literatura

- [1] Chlebus E., *Innowacyjne technologie Rapid Prototyping – Rapid Tooling w rozwoju produktu*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003
- [2] Ruszaj A., *Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi*, Prace Instytutu Obróbki Skrawaniem, Kraków 1999
- [3] http://www.car-t.pl/main.php?a=gallery&gallery_id=87&page=1 (06.03.2010)
- [4] Oczó K.E., *Rapid prototyping w procesach odlewniczych. Cz. I. Istota i charakterystyka metod szybkiego wytwarzania prototypów*, Prace Instytutu Odlewnictwa, 1997, nr 4

- [5] Chlebus E., *Techniki komputerowe CAx w inżynierii produkcji*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000
- [6] <http://www.zcorp.com/en/Products/3D-Printers/ZPrinter-310-Plus/spage.aspx> (27.03.2010)
- [7] Oczko K.E., *Postęp w szybkim opracowywaniu i produkcji wyrobów prezentowany na 8. Światowych Targach EuroMold 2001. Część II. Nowe materiały i urządzenia do realizacji metod RP*, Mechanik, 2002, nr 4
- [8] <http://www.gom.com/EN/measuring.systems/atos/system/variations/atos.iii.html> (27.03.2010)

Rapid Prototyping Methods

Abstract

In the article, practical methods used in the process of rapid prototyping and their basic advantages and disadvantages are described. The production cycle for the example-element with the use of two methods of rapid prototyping - *3DPrinting* and *FDM (Fused Deposition Modelling)* is discussed. The used methods are examined by three-dimensional scanning. It is ascertained that the method more profitable for the described element was *3DPrinting*.

Keywords: Rapid Prototyping, 3DPrinting, Fused Deposition Modelling

Marzena Pulchna, Andrzej Baliński
Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie
Instytut Techniki
ul. Podchorążych 2
30-084 Kraków

Andrzej Baliński
Instytut Odlewnictwa w Krakowie
ul. Zakopiańska 73
30-418 Kraków