

Multimateriałowe oraz wielokolorowe drukowanie wysokiej jakości części z żywic utwardzanych światłem UV w technologii PolyJet

MGR INŻ. DAWID ZIELIŃSKI

Możliwość budowania multimateriałowych oraz wielokolorowych elementów stanowi ważny trend w rozwoju technologii żywicznym druku 3D. W niniejszym opracowaniu skupiono się na charakterystyce podstawowej metody przetwarzającej ciekłe fotopolimery – technologii PolyJet. Omówiono zasadę jej działania oraz najważniejsze aspekty procesu dotyczące m.in. parametrów drukarki, stosowanych struktur podporowych oraz rodzaju uzyskiwanej powierzchni wydruków. Wskazano ponadto główne grupy przetwarzanych materiałów wraz z charakterystyką ich wybranych właściwości. W końcowej części pracy zaprezentowano kluczowe korzyści oraz ograniczenia związane z wykorzystaniem technologii PolyJet, jak i również szereg praktycznych wskazówek.

Technologia PolyJet polega na drukowaniu elementów z ciekłych żywic fotopolimerowych utwardzanych światłem UV. Budowa elementu odbywa się w sposób bardzo podobny do pracy standardowych drukarek 2D. Podobnie jak w przypadku tradycyjnych drukarek atramentowych, piezoelektryczne głowice drukujące natryskują na platformę roboczą kolejne warstwy ciekłego światłoutwardzalnego fotopolimeru, który następnie pod wpływem światła ultrafioletowego (UV) ulega utwardzeniu. Proces ten, który wykorzystywany jest również w technologii SLA, nosi nazwę fotopolimeryzacji. Technologia PolyJet została opracowana przez firmę Objet (obecnie Stratasys), która nieustannie dąży do rozwoju wykorzystywanych w metodzie fotopolimerów oraz ich właściwości mechanicznych. Obecnie w wersji Triple-Jet uważana jest za jedną z najbardziej zaawansowanych oraz multimateriałowych technologii przetwarzających fotopolimery. Elementy wydrukowane w technologii PolyJet charakteryzują się wysoką dokładnością, przy jednoczesnym uzyskaniu dużej gładkości powierzchni. Dodatkową zaletą jest możliwość budowania modeli z szerokiej gamy materiałów twardych (podobnych do ABS), elastycznych (gumopodobnych) oraz transparentnych.

Zasada działania technologii PolyJet

Zasada działania technologii PolyJet, jak zostało to już wcześniej wspomniane, bazuje na tradycyjnych wielkoformatowych drukarkach 2D. Cały proces drukowania elementów składa się z 4 następujących po sobie etapów, co zaprezentowano schematycznie na rysunku 1:

- 1) na początku materiał w formie płynnej żywicy podgrzewany jest do temperatury 30–60°C, co pozwala na uzyskanie jej optymalnej lepkości;
- 2) w kolejnym etapie piezoelektryczne głowice drukujące, która przemieszczają się bezpośrednio nad platformą roboczą, natryskują rozgrzaną żywicę, tworząc tym samym pierwszą warstwę materiału;
- 3) umieszczone na głowicy drukującej źródło światła UV utwardza na niesiony wcześniej materiał, co prowadzi do jego krzepnięcia i uzyskania gotowego fragmentu (warstwy) drukowanej części;
- 4) po zakończeniu etapu układania i budowania danej warstwy elementu, platforma robocza obniża się w dół o wartość odpowiadającą jej wysokości, a cały proces powtarza się aż do momentu uzyskania pełnej geometrii drukowanej części.

Cechą charakterystyczną technologii PolyJet, w odróżnieniu od pozostałych metod szybkiego prototypowania, jest możliwość nakładania

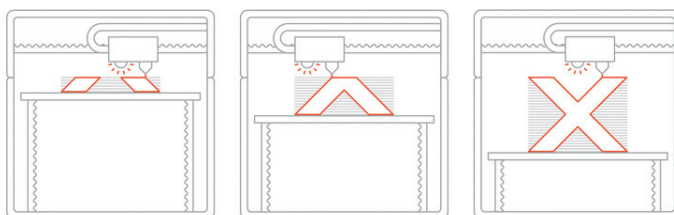
materiału w sposób ciągły z różnych grup głowic drukujących. Tego typu rozwiązanie pozwala na kontrolowanie ilości dozowanych materiałów, a sam proces drukowania elementu jest stosunkowo prosty. Dodatkowo każda z nałożonych warstw materiału zostaje w pełni usieciowiona oraz naświetlona, co w przeciwieństwie do innych metod wykorzystujących ciekłe fotopolimery (SLA, DLP), eliminuje konieczność powtórnego naświetlania elementu po wydruku. Wydrukowany w technologii PolyJet model zbudowany jest z materiału modelowego oraz natrykiwanego przez oddzielną grupę głowic drukujących materiału podporowego. Wykorzystywana w tym celu specjalna żywica po zestaleniu i zakończeniu procesu wydruku może zostać usunięta przy użyciu myjki wysokociśnieniowej lub rozpuszczona w specjalnym roztworze o odczynie zasadowym. Warty podkreślenia jest również fakt, iż oferowane przez producenta drukarki 3D mogą pracować w 3 trybach:

- HS (*High Speed*), odznaczającym się dużą szybkością wydruku części;
- HQ (*High Quality*), wydrukiem elementów o niższej prędkości, ale o bardzo dużej dokładności, dzięki zastosowaniu wysokości warstwy materiału 16 µm;
- DM (*Digital Material*), umożliwiającym łączenie ze sobą różnych materiałów.

Charakterystyka technologii PolyJet

Parametry drukarki

W przypadku systemów pracujących w technologii PolyJet prawie wszystkie parametry procesu wydruku ustawiane są automatycznie przez producenta urządzenia. Każdy z rodzajów przetwarzanych polimerów posiada z góry ustaloną grubość możliwej do nałożenia warstwy materiału. Wynika to ze złożoności fizyki tworzenia się kropli natrykiwanej żywicy. Typowa wysokość warstwy nakładanego/natrykiwanego materiału wynosi w granicach 16–32 µm.



Rys. 1. Zasada budowy części w technologii PolyJet

Technologia PolyJet, z uwagi na możliwość budowania elementów z bardzo cienkich warstw materiału o wysokości 16–32 μm , uważana jest za jedną z najbardziej precyzyjnych i dokładnych spośród wszystkich metod przyrostowych. Systemy pracujące w technologii PolyJet umożliwiają uzyskanie wysokiej dokładności wymiarowej wynoszącej $\pm 0,1\%$ przy standardowej dolnej granicy $\pm 0,1\text{ mm}$, a w niektórych przypadkach $\pm 0,02\text{ mm}$. Standardowa wielkość przestrzeni roboczej wynosi 300 x 200 x 150 mm dla maszyny przetwarzającej jeden materiał oraz 350 x 350 x 150 mm dla urządzenia przetwarzającego dwa materiały. Przeprowadzanie procesu przyrostowego w temperaturach bliskich pokojowej zmniejsza prawdopodobieństwo wystąpienia odkształceń drukowanych elementów, które są charakterystyczne dla innych technologii przyrostowych, takich jak SLS (*Selective Laser Sintering*) lub FDM (*Fused Deposition Modeling*). Zestawienie najważniejszych cech technologii PolyJet podsumowano w tabeli 1.

Drukowanie wielomateriałowych oraz wielokolorowych modeli

Jedną z kluczowych zalet technologii PolyJet jest możliwość budowania bardzo dokładnych wielomateriałowych oraz wielokolorowych elementów, które mogą służyć zarówno jako modele poglądowe, jak i również funkcjonalne. Na rysunku 2 zaprezentowano wybrane przykłady tego typu części. Wykorzystanie opcji wielomateriałowego oraz wielokolorowego wydruku może być stosowane na 3 różnych poziomach:

- Na poziomie obszaru budowy elementu. Dzięki możliwości jednoczesnego drukowania części w odmiennych kolorach lub z różnych materiałów zostaje przyspieszony proces ich wytwarzania.
- Na poziomie drukowanego elementu. Poszczególne sekcje drukowanej części mogą być budowane z różnych materiałów oraz kolorów.
- Na poziomie materiału. Przed rozpoczęciem procesu przyrostowego możliwe jest zmieszanie ze sobą 2 lub więcej żywic w odpowiednich proporcjach. Stworzenie tzw. materiałów cyfrowych (*Digital Materials*) pozwala na uzyskanie określonych właściwości, takich jak barwa, sztywność lub jego twardość. Tego typu materiały kompozytowe wykorzystywane są powszechnie w technologiach PolyJet Matrix oraz Triple-Jet. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest budowanie twardych i odpornych na działanie wysokich temperatur struktur z wypełnieniami z elastycznych oraz wytrzymałych na zginanie materiałów.

Zastosowanie opisanej opcji multimateriałowego oraz multikolorowego wydruku wymaga właściwego przygotowania modelu. Przykładowo wykonanie elementu o różnych kolorach lub materiałach w jego poszczególnych sekcjach wymusza konieczność wyeksportowania modelu w oddzielnych plikach STL. Wykorzystanie materiałów cyfrowych wymaga natomiast wyeksportowania całego projektu jako plik OBJ lub VRML. Tego typu formaty pozwalają bowiem na określenie charakterystycznych cech m.in. tekstury, wypełnienia kolorem, w odniesieniu do każdego fragmentu budowanego elementu.

Struktura podporowa

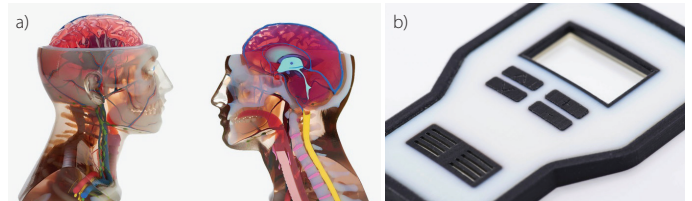
Modele wykonywane w technologii PolyJet wymagają zastosowania struktur podporowych. Jako materiał podporowy wykorzystywana jest specjalna żywica, która natrykiwana jest przez oddzielną grupę głowic drukujących. Usunięcie warstwy materiału podporowego następuje przy użyciu myjki wysokociśnieniowej lub rozpuszczenie w specjalnym roztworze o odczynie zasadowym. Wydrukowane elementy odznaczają się dużą gładkością matowej powierzchni. Orientacja części na platformie roboczej nie odgrywa w technologii PolyJet aż tak dużego znaczenia, jak w przypadku innych metod przyrostowych, takich jak SLA lub FDM. Właściwa orientacja elementu umożliwia natomiast zmniejszenie ilości zużytego materiału podporowego, co pozwala również na obniżenie ogólnych kosztów procesu produkcyjnego.

Rodzaj powierzchni wydruków – matowa czy błyszcząca

Technologia PolyJet umożliwia drukowanie elementów o powierzchniach matowych (*matte*) lub błyszczących (*glossy*), co za-

Tabela 1. Główne cechy technologii PolyJet

Materiał	Żywice fotopolimerowe (światłoutwardzalne)
Dokładność wymiarowa	$\pm 0,1\%$ (dolna granica $\pm 0,05\text{ mm}$)
Typowa wielkość przestrzeni roboczej	300 x 200 x 150 mm
Typowa grubość warstwy	16-32 μm
Struktura podporowa	Zawsze wymagana (możliwość zastosowania rozpuszczalnego materiału podporowego)



Rys. 2. Przykłady elementów wykonanych w technologii PolyJet: wielokolorowy edukacyjny model medyczny (a) i wielomateriałowy prototyp (b)



Rys. 3. Przykład drukowanego elementu z powierzchniami błyszczącą (z lewej) oraz matową (z prawej)

prezentowano na rysunku 3. W przypadku drukowania części o błyszczących powierzchniach materiał podporowy stosowany jest tylko wtedy, gdy jest to konieczne ze względów konstrukcyjnych, np. podczas drukowania elementów wystających i niemających bezpośredniego kontaktu z podłożem platformy roboczej. Podczas drukowania elementów o powierzchniach matowych, bez względu na ich orientację oraz wymagania konstrukcyjne, dodawana jest całościowo cienka warstwa materiału podporowego. Drukowanie modeli błyszczących pozwala na uzyskanie bardzo gładkiej powierzchni. Do podstawowych wad tego rozwiązania należą natomiast nierównomierne wykończenie wydrukowanych powierzchni oraz powstające lekkie zaokrąglenia w miejscach występowania ostrych krawędzi oraz narożników. Części o matowych powierzchniach powinny być wykonywane w przypadkach, gdy wymagana jest wysoka dokładność oraz jednolite wykończenie wydrukowanych powierzchni. Wymagany jest również dodatkowy czas przeznaczony na usunięcie materiału podporowego. Ponadto elementy o powierzchniach matowych, w porównaniu do

Tabela 2. Zestawienie najpopularniejszych grup materiałów przetwarzanych w technologii PolyJet

Materiał	Właściwości
Standardowy	- nieprzezroczyste, sztywne tworzywo sztuczne - symuluje części wykonane metodą formowania wtryskowego - kruchy i łamliwy
Elastyczny	- gumopodobny - odpowiednia twardość - małe wydłużenie przy zerwaniu
Symulujący polipropylen	- symulujący części wykonane z polipropylenu - duża wytrzymałość na zginanie - kruchy oraz łamliwy
Symulujący ABS	- duża odporność na działanie wysokich temperatur - wytwarzanie oprzyrządowania do formowania wtryskowego - kruchy i łamliwy - wymagana dodatkowa obróbka cieplna
Wysokotemperaturowy	- duża stabilność temperaturowa (do 80 °C) - wysokie właściwości wytrzymałościowe - kruchy i łamliwy - wymagana dodatkowa obróbka cieplna
Transparentny	- duża gładkość powierzchni - transparentny - możliwość przeprowadzenia dodatkowej obróbki i uzyskania 100% przezroczystości
Klasy medycznej	- krótkotrwała biokompatybilność - wykorzystywany powszechnie w stomatologii oraz medycynie - wymagana sterylizacja

błyszczących, charakteryzują się zazwyczaj dużo mniejszą twardością powierzchni.

Materiały wykorzystywane w technologii PolyJet

Materiałami powszechnie wykorzystywanymi w technologii PolyJet są fotopolimerowe żywice utwardzane pod wpływem działania światła UV. Posiadają one bardzo zbliżone właściwości do tych stosowanych w technologii SLA, m.in. kruchość, podatność na odkształcenia/ugięcia pod wpływem ciepła oraz podatność na pęcznienie. Z drugiej strony jednak są mniej lepkie, a konsystencją przypominają standardowe farby drukarskie.

Oprócz standardowych materiałów możliwe jest również stosowanie wcześniej wspomnianych materiałów cyfrowych lub materiałów specjalistycznych, które przeznaczone są dla konkretnych aplikacji, np. wytwarzania oprzyrządowania (termoformowanie, formowanie wtryskowe) lub zastosowań medycznych. W tabeli 2 zaprezentowano krótką charakterystykę najbardziej popularnych grup materiałów stosowanych w technologii PolyJet.

Wady i ograniczenia związane z zastosowaniem technologii PolyJet

Technologia PolyJet, jako jedna z najdokładniejszych metod przystawowych, umożliwia wytwarzanie złożonych elementów o bardzo wysokiej dokładności wymiarowo-kształtowej oraz dużej gładkości

powierzchni. Z uwagi na możliwość zastosowania różnych typów materiałów (twarde, elastyczne oraz transparentne), ich kolorów oraz łączenia ze sobą różnych materiałów, a także uzyskiwania charakterystycznej powierzchni (błyszcząca, matowa), technologia PolyJet może być wykorzystywana w wielu gałęziach przemysłu do budowy modeli poglądowych i funkcjonalnych. Zalety technologii PolyJet zostały zauważone m.in. przez branżę medyczną. Budowanie modeli medycznych pozwala nie tylko na odtworzenie kształtu anatomii pacjenta, ale również dzięki transparentności na wyróżnienie najważniejszych struktur oraz symulowanie kolorowych tkanek. Poniżej przedstawiono najważniejsze zalety oraz wady związane z wykorzystaniem technologii PolyJet:

- budowanie elementów o złożonych geometriach z wysoką dokładnością oraz rozdzielczością, dzięki natryskiwaniu bardzo cienkich warstw materiału;
- uzyskiwanie dokładności wymiarowej drukowanych detali na poziomie od $\pm 0,05$ mm do $\pm 0,2$ mm, w zależności od stopnia skomplikowania geometrii oraz jej wielkości;
- uzyskiwanie gładkiej powierzchni wydrukowanych elementów, porównywalnej z gładkością części wykonanych metodą formowania wtryskowego;
- wydrukowane elementy posiadają jednorodne właściwości mechaniczne oraz termiczne;
- szeroka gama stosowanych materiałów (twarde, elastyczne, transparentne) oraz uzyskiwanie różnych typów powierzchni (błyszcząca, matowa);
- relatywnie szybkie tempo procesu wydruku niewielkiej ilości części;
- możliwość budowania wielobarwnych oraz wielomateriałowych elementów (zastosowanie materiałów cyfrowych);
- nieskomplikowany proces obróbki postprocesingowej oraz możliwość wykorzystania w warunkach biurowych;
- szeroki zakres zastosowań aplikacyjnych: oprzyrządowanie do formowania wtryskowego (wkładki do form tryskowych), prototypy oraz modele medyczne;
 - relatywnie wysokie koszty produkcyjne, szczególnie w przypadku wykonywania elementów z materiałów cyfrowych (łączenia kilku materiałów ze sobą);
 - elementy wykonane w technologii PolyJet są światłoczułe, przez co ich właściwości mechaniczne mogą z czasem ulec degradacji;
 - ograniczone właściwości mechaniczne, przede wszystkim małe wydłużenie przy zerwaniu, zawężają zakres zastosowań wykonywanych elementów, głównie do modeli poglądowych oraz niefunkcjonalnych.

Podsumowanie

Technologia PolyJet umożliwia wykonywanie modeli poglądowych o bardzo gładkiej powierzchni oraz wysokiej dokładności wymiarowo-kształtowej z szerokiego spektrum materiałów twardych, elastycznych oraz transparentnych. Wspominany szeroki zakres stosowanych materiałów pozwala na wykonywanie elementów oprzyrządowania m.in. do formowania wtryskowego, a także budowania wielokolorowych oraz wielomateriałowych modeli medycznych. Ich wykonanie wymaga jednak właściwego przygotowania związanego z wyeksportowaniem modelu w oddzielnych plikach STL (w przypadku druku w różnych kolorach) oraz wyeksportowania całego projektu jako plik OBJ lub VRML (w przypadku użycia materiałów cyfrowych).

Źródło pierwotne: <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/>