

Drukowanie trwałych elementów z tworzyw termoplastycznych w technologii FDM/FFF

Dawid Zieliński

Drukowanie detali z tworzyw sztucznych stanowi aktualnie jedną z najczęściej wykorzystywanych form druku 3D, która znajduje szerokie zastosowanie zarówno w obszarze amatorskim, jak i również przemysłowym. Omawiane w pracy zagadnienia dotyczą zasady działania oraz charakterystyki najważniejszych czynników technologii FDM/FFF. Przedstawiono najczęściej występujące błędy oraz defekty drukowanych elementów. Wskazano ponadto najważniejsze korzyści i ograniczenia wykorzystania metody, rodzaje przetwarzanych materiałów, a także szereg praktycznych wskazówek umożliwiających drukowanie trwałych elementów z tworzyw sztucznych.

Drukowanie elementów polegające na wytłaczaniu materiału (termoplastu) w formie żyłki z głowicy drukującej stanowi jedną z głównych i aktualnie najbardziej popularnych grup technologii przyrostowych. Budowa części odbywa się na skutek osadzania kolejnych warstw stopionego tworzywa termoplastycznego. Za twórcę technologii FDM (*Fused Deposition Modeling*) uznawana jest amerykańsko-izraelska firma Stratasys, która od początku lat 90. inwestuje w jej rozwój. W związku z ogromnym zainteresowaniem technologią FDM oraz możliwością budowy własnych urządzeń bazujących na produkcji firmy Stratasys, wprowadzono nową alternatywną nazwę FFF (*Fused Filament Fabrication*). Technologia FDM wykorzystywana była początkowo do budowy relatywnie tanich prototypów oraz modeli poglądowych. Obecnie stosowana jest do wytwarzania wysokiej jakości prototypów funkcjonalnych oraz modeli koncepcyjnych z szerokiej gamy materiałów termoplastycznych, takich jak: ABS, ASA, PC, PC-ABS oraz PEI. Aktualnie technologia FDM jest najczęściej wykorzystywaną spośród wszystkich metod przyrostowych na świecie. Świadczy o tym ilość zainstalowanych i wykorzystywanych systemów pracujących w technologii FDM.

ZASADA DZIAŁANIA TECHNOLOGII FDM/FFF

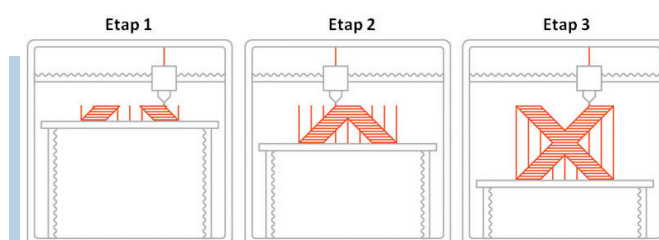
Zasada generowania obiektu w technologii FDM/FFF składa się z 3 kolejno następujących po sobie etapów, co zaprezentowano w sposób schematyczny na rysunku 1:

- 1) na początku materiał w formie żyłki nawiniętej na szpulę tzw. filament zostaje umieszczony w drukarce 3D. Następnie po osiągnięciu przez ekstruder założonej temperatury materiał w formie żyłki wprowadzany jest do głowicy drukującej, w której następuje jego przekształcenie do stanu półpłynnego.
- 2) w kolejnym etapie roztopione tworzywo sztuczne jest wyciskane oraz rozprowadzane warstwa po warstwie na platformie roboczej, aż do uzyskania pełnej wysokości drukowanego elementu. Nałożone warstwy materiału łączą się z poprzednimi wskutek chłodzenia, a następnie ich zastygania. W niektórych przypadkach proces zastygania roztopionych warstw materiału jest przyspieszany, dzięki wykorzystaniu dodatkowych wentylatorów wewnątrz komory roboczej urządzenia. Przymocowanie głowicy drukującej do 3-osiowe-

go systemu umożliwia jej poruszanie się, a tym samym budowanie elementów w kierunkach X, Y oraz Z.

- 3) pełne wykonanie elementu wymaga wielokrotnego przejścia głowicy drukującej. W zależności od rodzaju drukarki 3D, po nałożeniu danej warstwy materiału platforma robocza obniża się o zadaną wartość lub głowica drukująca przesuwana do góry. Cały proces nakładania kolejnych warstw materiału powtarza się aż do uzyskania pełnej wysokości obiektu.

Elementy wykonane w technologii FDM wymagają zastosowania dodatkowych struktur podporowych. Najczęściej generowane są z oddzielnej głowicy drukującej i w zależności od rodzaju wykorzystanego tworzywa sztucznego mogą być rozpuszczane w specjalnym roztworze lub odłamywane. W przypadku niskobudżetowych (amatorskich) drukarek 3D wykorzystywana jest tylko jedna głowica drukująca, która buduje struktury podporowe z tego samego materiału co drukowany model, lecz o zmienionej strukturze. Dla standardowych tworzyw sztucznych, takich jak: ABS lub PC, stosowany jest rozpuszczalny materiał podporowy. W przypadku tworzyw wysokotemperaturowych np. PEI oraz PEEK koniecznym jest jego ręczne odłamanie. Sam proces budowy elementu odbywa się w wysokich temperaturach, co pozwala na uniknięcie późniejszych odkształceń. Konieczność przełączania pracujących głowic drukujących pomiędzy budową modelu oraz struktury podporowej powoduje częściową degradację termiczną tworzywa sztucznego. W związku z powyższym przy każdym przełączeniu pracujących głowic drukujących następuje wypuszczenie do specjalnego pojemnika niewielkiej ilości materiału oraz jednoczesne oczyszczenie całego układu plastyfikującego.



Rys. 1. Zasada budowy części w technologii FDM/FFF

CHARAKTERYSTYKA TECHNOLOGII FDM/FFF

Parametry drukarki

W przypadku systemów pracujących w technologii FDM/FFF możliwe jest ustawienie własnych parametrów procesu przyrostowego. Do regulowanych parametrów można zaliczyć: temperatury dysz drukujących oraz platformy roboczej, wysokość nakładanej warstwy materiału, prędkość budowy elementu oraz prędkość wentylatora chłodzącego.

Wielkość przestrzeni roboczej urządzenia oraz wysokość nakładanej warstwy materiału należą do jednych z najważniejszych parametrów drukarek 3D pracujących w technologii FDM/FFF. Szczególnie istotna jest wysokość warstwy nakładanego materiału, gdyż wpływa ona bezpośrednio na czas i koszt budowy części, jej wygląd, a także właściwości fizyczne. Typowa wielkość przestrzeni roboczej desktopowych drukarek 3D wynosi zazwyczaj 200 x 200 x 200 mm. W przypadku większych części możliwe jest osobne drukowanie ich poszczególnych elementów, a następnie zmontowanie poszczególnych podzespołów w całość.

Stosowana w technologii FDM/FFF grubość pojedynczej warstwy materiału wynosi zazwyczaj 50-400 μm i uzależniona jest w głównej mierze od rodzaju i wielkości drukowanego obiektu. Ustawienie mniejszej wysokości warstwy materiału pozwala na uzyskanie elementów o gładkich powierzchniach oraz większej dokładności, szczególnie w przypadku zakrzywionych i złożonych geometrii. Większa wysokość pojedynczej warstwy materiału umożliwia z kolei szybsze oraz tańsze zbudowanie elementu, kosztem dokładności jego wykonania. W większości przypadków ustawiana jest jednak wysokość 200 μm . Podsumowanie najważniejszych cech technologii FDM/FFF zaprezentowano w tabeli 1.

Tabela 1. Główne cechy technologii FDM/FFF podsumowano w poniższej tabeli

Materiał	Tworzywa termoplastyczne (PLA, ABS, PETG, PC, PEI itd.)
Dokładność wymiarowa	$\pm 0,5\%$ (dolna granica $\pm 0,5$ mm) - desktopowe drukarki 3D $\pm 0,15\%$ (dolna granica $\pm 0,2$ mm) - przemysłowe drukarki 3D
Typowa (przybliżona) wielkość przestrzeni roboczej	200 x 200 x 200 mm - desktopowe drukarki 3D 1000 x 1000 x 1000 mm - przemysłowe drukarki 3D
Typowa grubość warstwy	50-400 μm
Struktura podporowa	nie zawsze wymagana (możliwość zastosowania rozpuszczalnego materiału podporowego)

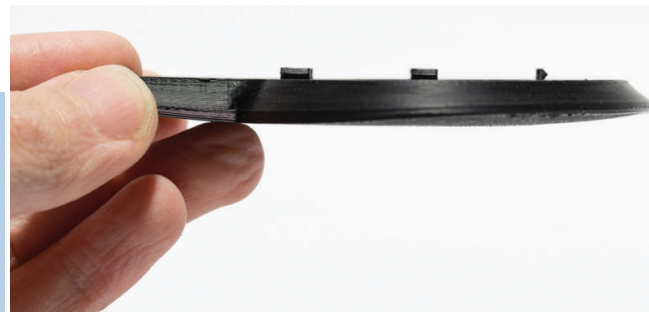
Odształcanie się elementów

Odształcanie się należy do jednych z najczęściej występujących wad elementów wydrukowanych w technologii FDM/FFF. Schładzanie, a w konsekwencji zastyganie wytłoczonego z dysz drukujących materiału powoduje zmniejszenie jego wymiarów. W związku z tym, iż poszczególne sekcje wydruku chłodzą się z różną prędkością, zmiana ich wymiarów nie jest także jednokowa. Różnice w tempie chłodzenia poszczególnych sekcji wydruku powodują powstanie naprężeń wewnętrznych, które prowadzą do powstania skurczu liniowego materiału, a w konsekwencji odkształcenia elementu. W miarę schładzania i krzepnięcia nowo rozprowadzonych warstw materiału oraz powstałych naprężeń wewnętrznych, następuje niejako „podciągnięcie” niżej znajdujących się warstw do góry, co powoduje ich odkształcenie – rys. 2.

Z technologicznego punktu widzenia możliwe jest zminimalizowanie skurczu liniowego materiału, dzięki właściwemu kontrolo-



Rys. 2. Schemat obrazujący odkształcanie się krawędzi elementu wydrukowanego w technologii FDM



Rys. 3. Przykład odkształconej części wydrukowanej z tworzywa sztucznego ABS w technologii FDM

waniu temperatury zarówno komory roboczej, jak i również samej platformy roboczej oraz zwiększeniu przyczepności pomiędzy drukowanym elementem, a platformą roboczą. Szczególnie narażone na odkształcenia są duże płaskie powierzchnie np. prostokątne skrzynki lub cienkie wystające elementy. W tym przypadku możliwe jest uniknięcie odkształcenia, poprzez zastosowanie dodatkowej warstwy materiału chroniącej krawędzie cienkich elementów, co prowadzi tym samym do zwiększenia powierzchni styku elementu z platformą roboczą. Kolejnym sposobem jest projektowanie elementów o zaokrąglonych krawędziach, które ulegają odkształceniom znacznie rzadziej aniżeli ostro zakończone krawędzie. Bardzo duże znaczenie ma również wybór przetwarzanego materiału, który związany jest z ich różną podatnością na odkształcenia. Przykładowo jeden z najczęściej stosowanych tworzyw sztucznych ABS odznacza się dużo większą podatnością na odkształcenia w porównaniu do materiałów, takich jak np. PLA lub PETG. Wynika to z wyższej temperatury zeszklenia (witryfikacji) tworzywa ABS oraz relatywnie wysokiego współczynnika rozszerzalności cieplnej. Na rysunku 3 przedstawiono odkształcony element wykonany z tworzywa sztucznego ABS.

Przyleganie warstw materiału

Zapewnienie dobrej przyczepności pomiędzy osadzonymi warstwami materiału odgrywa bardzo dużą rolę dla właściwości wydrukowanej w technologii FDM/FFF części. Wytłaczany przez dyszę drukującą roztopiony materiał jest niejako dociskany do wcześniej nałożonej warstwy. Dzięki wysokiej temperaturze procesu oraz wytwarzanemu ciśnieniu możliwe jest ponowne przetopienie górnej powierzchni uprzednio nałożonej warstwy i jej optymalne połączenie z nowo nałożoną warstwą termoplastycznego tworzywa sztucznego. Istotnym czynnikiem, który decyduje o własnościach mechanicznych wydrukowanego elementu, jest jego orientacja na platformie roboczej. Części wydrukowane w technologii FDM/FFF odznaczają się dużą anizotropią, co oznacza, iż wykazują odmienne właściwości mechaniczne dla różnych kierunków. Wytrzymałość wiązania między poszczególnymi warstwami materiału jest zawsze niższa od wytrzymałości budującego tworzywa. W związku z tym, wytrzymałość części w osi Z będzie zawsze niższa, aniżeli wytrzymałość uzyskana w płaszczyźnie XY.

Przeprowadzone badania próby rozciągania dla próbek wykonanych z tworzywa sztucznego ABS z 50% wypełnieniem pokazały odmienne właściwości, które uzyskano dla orientacji pionowej



Rys. 4. Element z widocznymi charakterystycznymi liniami łączenia poszczególnych warstw materiału

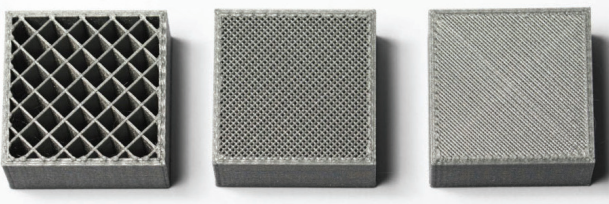
oraz poziomej. Próbkki wydrukowane poziomo (dla kierunku XY) posiadały prawie 4-krotnie większą wytrzymałość na rozciąganie, w porównaniu z próbkami wydrukowanymi pionowo (dla kierunku Z). Ponadto osiągnięto dla nich prawie 10-krotnie większe wydłużenie przy zerwaniu.

Elementy wydrukowane w technologii FDM/FFF posiadają charakterystyczną falistą powierzchnię, która powstaje wskutek dociskania roztopionego materiału do uprzednio nałożonych warstw. Ponadto wskutek przeprowadzonego procesu przyrostowego widoczne są charakterystyczne linie łączenia poszczególnych warstw materiału – rysunek 4. Powstałe w miejscu połączenia sąsiednich warstw materiału nacięcia powodują koncentrację niekorzystnych naprężeń. Kolejne utrudnienie w wykorzystaniu technologii FDM/FFF może stanowić budowanie niewielkich elementów, takich jak otwory lub gwinty, które mogą wymagać przeprowadzenia po zakończonym procesie wydruku dodatkowej obróbki.

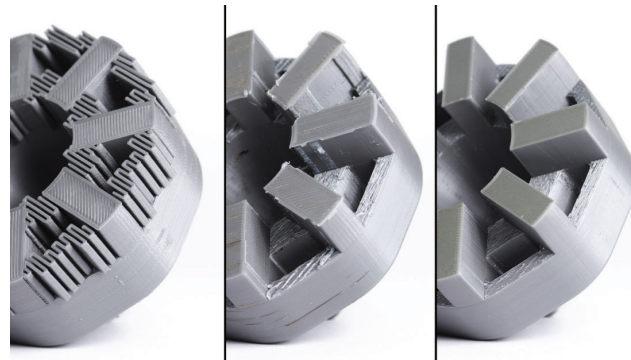
STRUKTURA PODPOROWA

Niektóre z modeli wykonywanych technologią FDM/FFF wymagają stosowania dodatkowych struktur podporowych. Konstrukcje te są niezbędne przede wszystkim przy wykonywaniu części z elementami wiszącymi. Powierzchnie, które bezpośrednio przylegają do struktury podporowej, są jednak zazwyczaj gorszej jakości niż pozostała część. Z tego powodu należy w taki sposób zaprojektować element, aby zminimalizować konieczność stosowania tego typu struktur.

Konstrukcje podporowe usuwane są po zakończonym procesie przyrostowym. Jak zostało to już wcześniej opisane, w zależności od klasy wykorzystywanego systemu przyrostowego, mogą one być rozpuszczane w specjalnym roztworze lub usuwane ręcznie przez odłamywanie. Najczęściej konstrukcja podporowa oraz model drukowane są z tego samego materiału. Takie rozwiązanie wykorzystywane jest przede wszystkim w niskobudżetowych (amatorskich) drukarkach 3D, gdzie struktury podporowe są ręcznie usuwane. W przypadku wysokiej klasy desktopowych lub przemysłowych drukarek 3D materiał podporowy rozpuszczany jest



Rys. 6. Wewnętrzne elementów wydrukowanych w technologii FDM o różnej wielkości wypełnienia



Rys. 5. Przykład elementu ze strukturą podporową: (a) trudno usuwalną (b) i łatwo usuwalną (c)

w specjalnych roztworach. Zastosowanie rozpuszczalnych i droższych struktur podporowych pozwala, w przeciwieństwie do tych usuwanych ręcznie, na znaczącą poprawę jakości powierzchni do nich przylegających. Z drugiej strony koniecznym jest stosowanie maszyny z podwójną dyszą drukującą, co zwiększa ogólne koszty wytworzenia elementu. Przykłady konstrukcji podporowych łatwo oraz trudno usuwalnych przedstawiono na rys. 5.

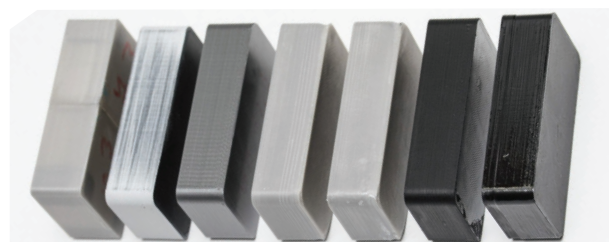
WYPEŁNIENIE I GRUBOŚĆ POWŁOKI

Zastosowanie technologii FDM/FFF, z uwagi na brak pełnego wypełnienia materiałem wnętrza drukowanego elementu, pozwala na skróceniu czasu trwania procesu przyrostowego oraz ilości zużytego materiału. Cechą charakterystyczną tak wydrukowanych modeli jest zewnętrzna powłoka, która wyznaczona jest przez przejścia głowicy drukującej. Wnętrze elementu wypełnia struktura, która może posiadać różny stopień zagęszczenia, jak zaprezentowano na rys. 6.

Zarówno wielkość wypełnienia, jak i grubość uzyskanej powłoki wpływają na właściwości wydrukowanego elementu. Ważną czynnością poprzedzającą proces wydruku jest więc optymalny dobór tych parametrów. W przypadku standardowych desktopowych systemów pracujących w technologii FDM/FFF domyślnie stosowane jest wypełnienie o 25% zagęszczeniu, przy jednoczesnej grubości powłoki 1 mm. Takie zestawienie pozwala na osiągnięcie kompromisu pomiędzy wytrzymałością wydrukowanego modelu, a czasem jego budowy.

MATERIAŁY WYKORZYSTYWANE W TECHNOLOGII FDM/FFF

Jedną z podstawowych zalet technologii FDM/FFF jest możliwość wykonywania obiektów z wielu rodzajów tworzyw sztucznych. Do najczęściej wykorzystywanych, szczególnie w niskobudżetowych (amatorskich) drukarkach 3D, należą ABS oraz PLA. Obecnie coraz częściej stosowane są również tworzywa kon-



Rys. 7. Elementy poddane kolejnym rodzajom obróbki wykończeniowej (od prawej): powlekanie żywicą epoksydową, malowanie, polerowanie, szlifowanie, niepoddany obróbce element, wypełnianie szczelin i wgłębień, spawanie na zimno (łączenie)

strukcyjne (PA, TPU, PETG) oraz wysokowydajne tworzywa (PEEK, PEI). Ogólny podział wykorzystywanych materiałów dotyczy zatem tworzyw termoplastycznych przeznaczonych dla drukarek niskobudżetowych (amatorskich), tworzyw termoplastycznych konstrukcyjnych oraz materiałów wysokojakościowych. Rodzaj zastosowanego materiału decyduje o właściwościach wydrukowanego modelu, a także jego dokładności wymiarowo-kształtowej. W zależności od przeznaczenia tworzywa termoplastyczne różnią się między sobą zarówno wymaganą temperaturą procesu przyrostowego, jak i również ceną. W tabeli 2 zaprezentowano krótki opis najpopularniejszych tworzyw termoplastycznych wykorzystywanych w technologii FDM/FFF.

POSTPROCESING – OBRÓBKA WYKAŃCZAJĄCA

Elementy wydrukowane w technologii FDM/FFF, podobnie jak w przypadku innych metod przyrostowych, mogą zostać poddane dodatkowej obróbce wykańczającej. Podstawowym zabiegiem obróbki postprocesingowej jest usunięcie struktur podporowych. Zastosowanie kolejnych dodatkowych metod obróbki wykańczającej pozwala na usunięcie charakterystycznych linii łączenia warstw materiału, a tym samym uzyskanie gładziej powierzchni modelu. Niektóre z nich wpływają również na poprawę jego właściwości mechanicznych. Do najczęściej wykorzystywanych metod obróbki wykańczającej, której celem jest poprawa jakości powierzchni elementu po wydruku, można zaliczyć szlifowanie, polerowanie oraz piaskowanie. Powstałe w wyniku przeprowadzonej obróbki szczeliny lub wgłębienia mogą zostać wypełnione np. specjalnym epoksydem, a cały element warstwą żywicy epoksydowej. Elementy wykonane w technologii FDM/FFF można również poddać malowaniu, po wcześniejszym przeprowadzeniu procesu ich zagruntowania. W przypadku wydruku dużych obiektów, których rozmiary przewyższają wielkość komory roboczej drukarki 3D, możliwe jest drukowanie ich pojedynczych elementów, a następnie montowanie w cały obiekt. Bardzo często elementy łączone są ze sobą w sposób chemiczny za pomocą tzw. spawania na zimno, w którym jako substancję spajającą dwie części wykorzystywany jest aceton. Efekty zastosowania wybranych metod obróbki wykończeniowej zaprezentowano na rys. 7.

KORZYŚCI I OGRANICZENIA ZWIĄZANE Z ZASTOSOWANIEM TECHNOLOGII FDM/FFF

Technologia FDM/FFF umożliwia drukowanie wysokojakościowych i w pełni funkcjonalnych prototypów oraz modeli poglądowych w relatywnie krótkim czasie. Poniżej zaprezentowano zestawienie najważniejszych zalet oraz wad technologii FDM/FFF:

- jedna z najbardziej ekonomicznych metod produkcji elementów z tworzyw termoplastycznych, z uwagi na szybkie tempo budowy części oraz niewielkie straty materiałowe;
- krótkie czasy realizacji zleceń produkcyjnych, z uwagi na dużą dostępność systemów FDM/FFF oraz krótki czas budowy elementów;
- możliwość drukowania elementów z wysokowytrzymałych tworzyw termoplastycznych posiadających wysokie właściwości wytrzymałościowe oraz dużą odporność na działanie wysokich temperatur oraz chemikaliów;
- szeroka gama przetwarzanych tworzyw termoplastycznych, pozwalająca na wytwarzanie wysokiej jakości prototypów funkcjonalnych oraz modeli koncepcyjnych;
- możliwość wykorzystania rozpuszczalnego materiału podporowego;
- brak konieczności przeprowadzania skomplikowanej obróbki postprocesingowej;

Tabela 2. Zestawienie najpopularniejszych materiałów wykorzystywanych w technologii FDM/FFF

Materiał	Właściwości
ABS	- dobre właściwości wytrzymałościowe - dobra odporność termiczna - podatność do odkształcania się
PLA	- ekologiczny i biodegradowalny materiał - duża sztywność - duża wrażliwość na działanie wysokich temperatur
Nylon (PA)	- bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe - duża odporność na zużycie ścierne i działanie chemikaliów - niska odporność na wilgoć
PETG	- dobre właściwości wytrzymałościowe - niski skurcz materiału - duża odporność na wilgoć oraz działanie chemikaliów
TPU	- duża elastyczność - niska dokładność wydrukowanych elementów
PEI	- bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe - ognioodporność oraz odporność na działanie chemikaliów - wysoka cena

- uzyskiwanie wysokich dokładności wymiarowo-kształtowych drukowanych elementów rzędu $\pm 0,15$ do $\pm 0,3$ mm, w zależności od sposobu ułożenia na platformie roboczej oraz stopnia złożoności geometrii;
- możliwość wykorzystania drukarki 3D w warunkach biurowych tzw. drukarki desktopowe.

Wady:

- duża anizotropia wydrukowanych części;
- ograniczona możliwość drukowania elementów o skomplikowanych i złożonych geometriach, z uwagi na niższą w porównaniu z innymi metodami przyrostowymi dokładność wymiarowo-kształtową części;
- konieczność zastosowania dodatkowej obróbki wykańczającej, w celu usunięcia charakterystycznych linii łączenia kolejnych warstw nakładanego materiału.

PODSUMOWANIE

Technologia FDM/FFF to aktualnie jedno z najczęściej wykorzystywanych rozwiązań druku 3D, które stosowane jest powszechnie do wykonywania prototypów, modeli, a także w pełni funkcjonalnych części o wysokiej jakości i z szerokiej gamy materiałów. Typowa wielkość przestrzeni roboczych w przypadku drukarek biurowych (desktopowych) wynosi 200 x 200 x 200 mm, przy czym systemy typowo przemysłowe wyposażone są w znacznie większe komory robocze. Podczas projektowania należy unikać dużych płaskich powierzchni oraz cienkich wystających elementów, które są szczególnie narażone na odkształcenia. Pożądanym jest zastosowanie dodatkowej warstwy materiału w niewralgicznych miejscach modelu np. ostrych narożach. Cechą charakterystyczną wydrukowanych elementów jest ich duża anizotropia. Właściwości wytrzymałościowe w kierunku osi Z są znacznie niższe od właściwości uzyskiwanych w płaszczyźnie XY. W związku z tym technologia FDM/FFF nie jest wykorzystywana do budowy części oraz zespołów silnie obciążonych mechanicznie.

mgr inż. Dawid Zieliński

Instytut Technologii Maszyn i Materiałów

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej

Źródło pierwotne: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>