

Podstawy technologii selektywnego spiekania laserowego proszków polimerowych – SLS

Dawid Zieliński

W pracy zaprezentowano zbiór informacji oraz praktycznych wskazówek związanych z drukowaniem elementów metodą selektywnego spiekania laserowego proszków polimerowych – SLS. Zawarte treści dotyczą omówienia zasady działania, charakterystyki poszczególnych czynników procesu oraz powszechnie stosowanych materiałów. Przedstawiono ponadto najważniejsze korzyści i ograniczenia związane z wykorzystaniem metody SLS.

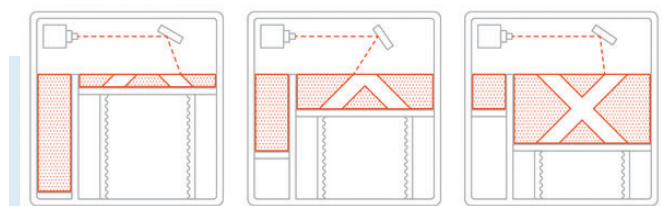
Technologia SLS (*Selective Laser Sintering*) stanowi jedną z podstawowych metod szybkiego prototypowania, należących do grupy technologii typu Powder Bed, których cechą charakterystyczną jest selektywne spajanie kolejnych warstw proszku. Zaraz obok stereolitografii (SLA) uznawana jest za jedną z najstarszych metod druku 3D. Wykorzystywany w metodzie SLS laser spieka cząsteczki sproszkowanego termoplastycznego polimeru, łącząc go następnie w kolejne warstwy, aż do uzyskania pełnej geometrii wyrobu.

Technologia SLS znajduje szerokie zastosowanie, zarówno w prototypowaniu, jak i również w małoseryjnej produkcji funkcjonalnych części z tworzyw sztucznych o dobrych właściwościach mechanicznych. Obecnie spośród wszystkich dostępnych technologii druku 3D, jest najczęściej wykorzystywaną z metod w małoseryjnej produkcji części finalnych maszyn i urządzeń technicznych. Duża swoboda projektowania, wysoka dokładność wykonanych elementów oraz produkcja części o dobrych właściwościach mechanicznych sprawiają, iż technologia SLS zyskuje na coraz większym znaczeniu ze strony przemysłu.

Zasada działania technologii SLS

Zasada działania technologii SLS obejmuje 3 następujące po sobie etapy, które zaprezentowano w sposób schematyczny na rysunku 1:

- 1) W pierwszej fazie pojemnik z proszkiem oraz obszar roboczy drukarki 3D są wstępnie podgrzewane poniżej temperatury topnienia wykorzystywanego w procesie przyrostowym polimeru. Recoater (zgarniacz) rozprowadza następnie cienką warstwę proszku na platformie roboczej maszyny.
- 2) W kolejnym etapie skupiona wiązka lasera pracującego w paśmie długiej podczerwieni (najczęściej CO₂) skanuje kontur danej warstwy materiału i selektywnie spieka (łączy ze sobą) cząsteczki proszku polimerowego. Promień lasera, zanim trafi na dwa zwierciadła skanera galwanometrycznego, jest wstępnie powiększany. Takie rozwiązanie zapobiega uszkodzeniu zwierciadeł przez skupioną energię wiązki lasera. Po odbiciu się od zwierciadeł promień przechodzi w dalszej fazie przez soczewkę pola płaskiego typu F-theta i jest skupiany na powierzchni rozproszanego wcześniej proszku. Poprzez ruch zwierciadeł następuje skanowanie konturu danej warstwy materiału i jego selektywne spiekanie. Skanowanie całego przekroju komponentu warunkuje uzyskanie jego wysokiej wytrzymałości po zakończonym procesie przyrostowym.



Rys. 1. Schemat procesu selektywnego spiekania laserowego - SLS

- 3) Po zakończeniu procesu selektywnego spiekania cząsteczek proszku polimerowego platforma robocza przesuwa się w dół, po czym za pośrednictwem recoatera zostaje nałożona nowa warstwa niespieczonego proszku. Czynność ta powtarza się aż do momentu uzyskania pełnej geometrii elementu. Cały proces przyrostowy odbywa się ponadto w atmosferze gazu ochronnego – azotu, aby nie doprowadzić do spalenia materiału.

Po zakończeniu procesu przyrostowego, wydrukowane elementy znajdują się w pojemniku wraz z niespieczonym materiałem polimerowym. Ich rozpakowanie wymaga wcześniejszego ostygnięcia pojemnika z elementami, co może potrwać nawet do 12 h. Po ich wypakowaniu następuje proces czyszczenia, który zazwyczaj realizowany jest za pośrednictwem sprężonego powietrza lub innego środka czyszczącego. Tak przygotowane elementy są już gotowe do użycia lub mogą zostać poddane dodatkowej obróbce. Niespieczony proszek zostaje odzyskany i może być częściowo ponownie użyty w kolejnym procesie przyrostowym. W przypadku technologii SLS jest on w około 50% ponownie przetwarzany.

CHARAKTERYSTYKA TECHNOLOGII SLS

Parametry drukarki

W przypadku technologii SLS prawie wszystkie parametry procesu przyrostowego ustawiane są automatycznie przez producenta drukarki 3D. Domyślna grubość pojedynczej warstwy materiału wynosi 100-120 μm .

Jedną z głównych zalet technologii SLS jest brak konieczności stosowania dodatkowych struktur podporowych dla drukowanych elementów. Niespieczony proszek stanowi dla nich swego rodzaju wsparcie. W związku z tym możliwe jest budowanie modeli o złożonych, posiadających wolne przestrzenie geometriach, które są kłopotliwe lub czasami niemożliwie do wykonania za pośrednictwem metod obróbki skrawaniem.

Tabela 1. Porównanie właściwości proszku poliamidowego PA12 stosowanego w metodzie SLS ze standardowym PA12

	kierunek X - Y	Kierunek Z	standardowy PA12
wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	48	42	35-55
moduł sprężystości [MPa]	1650	1650	1270-2600
wydłużenie przy zerwaniu [%]	18	4	120-300

Podczas procesu przyrostowego ważne jest, aby wykorzystać całą objętość pojemnika. Ilość elementów znajdujących się w pojemniku nie wpływa znacząco na skrócenie bądź wydłużenie czasu trwania całego procesu przyrostowego. Dzieje się tak, gdyż całkowity czas trwania procesu wyznaczany jest na podstawie ilości nałożonych przez recoater warstw materiału. Sam etap skanowania oraz spiekania warstw materiału odbywa się w bardzo krótkim czasie. W przypadku realizacji małych zamówień, niektórzy operatorzy czekają aż pojemnik zostanie częściowo wypełniony niespieczonym proszkiem, po czym rozpoczyna się proces drukowania elementów.

Przyleganie warstw materiału

Wytrzymałość wiązania/przylegania między kolejnymi warstwami materiału w technologii SLS jest bardzo silna, dzięki czemu wydrukowane elementy posiadają prawie izotropowe właściwości mechaniczne. W tabeli 1 przedstawiono porównanie właściwości mechanicznych próbek wydrukowanych w technologii SLS dla kierunku X,Y oraz Z ze standardowego, najczęściej wykorzystywanego proszku poliamidowego w metodzie SLS (PA 12 lub Nylon 12), z właściwościami mechanicznymi standardowego materiału PA12.

Dane zawarte w tabeli 1 wskazują, iż próbki wykonane w technologii SLS charakteryzują się wysoką wytrzymałością na rozciąganie oraz modułem sprężystości. Właściwości te są porównywalne do standardowego materiału PA12. Jednocześnie ich wydłużenie przy zerwaniu, w porównaniu ze standardowym PA12, jest znacznie mniejsze. Oznacza to, iż próbki są bardziej kruche, czego przyczyną jest wewnętrzna porowatość wydrukowanych elementów.

Wyniki prowadzonych badań wskazują, iż typowa część wydrukowana w technologii SLS jest w około 30% porowata. Występująca porowatość nadaje elementom charakterystyczny, ziarnisty wygląd powierzchni. Oznacza to, iż mogą one dodatkowo absorbować wodę, dzięki czemu możliwe jest ich barwienie w gorących kąpielach na wiele różnych kolorów – rysunek 2. W przypadku stosowania drukowanych modeli w środowisku wilgotnym, konieczne jest przeprowadzenie dodatkowej obróbki postprocesingowej.



Rys. 2. Wielobarwne elementy wykonane w technologii SLS (ich porowatość sprawia, iż doskonale nadają się do barwienia w gorących kąpielach)

Kurczenie i odkształcanie się elementów

Elementy wydrukowane w technologii SLS są podatne na kurczenie się oraz odkształcanie. Podczas procesu przyrostowego w miarę schładzania nowo spieczonej warstwy materiału jej wymiary zaczynają maleć. Dodatkowo rosnące naprężenia wewnętrzne powodują niejako „ciągnięcie” do góry znajdującej się poniżej spieczonej już wcześniej warstwy materiału. Typowa wartość skurczu wynosi od 3 do 3,5% i jest już najczęściej uwzględniana w fazie przygotowywania konstrukcji przyszłego obiektu.

W przypadku odkształceń najbardziej narażone są duże, płaskie powierzchnie. Efekt ten może zostać nieco zminimalizowany dzięki właściwej - pionowej orientacji na platformie roboczej drukarki 3D. Najlepszym jednak sposobem jest zmniejszenie całkowitej objętości drukowanego elementu, poprzez zmniejszenie grubości jego płaskich powierzchni oraz zastosowanie wycięć w modelu. Zastosowanie tego typu strategii pozwala również na zmniejszenie ogólnego kosztu wykonania elementu, w związku z mniejszą ilością zużytego do procesu przyrostowego materiału.

Przepieczenie – nadmierne spiekanie

Nadmierne spiekanie występuje w przypadku, gdy promieniowanie cieplne powoduje stopienie niespieczonego proszku, znajdującego się wokół drukowanego elementu. Zjawisko to może uniemożliwić wykonanie obiektów zaprojektowanych w niewielkich modelach, w formie otworów lub rowków.

Występowanie zjawiska nadmiernego spiekania materiału zależy zarówno od wielkości elementu, jak i również grubości jego ścianek. Aktualne badania wskazują, iż grubość ścianki znacząco wpływa na możliwość i jakość wykonania elementów o niewielkich średnicach, takich jak rowki lub otwory. Obecnie technologia SLS umożliwia wykonywanie rowków o średnicy większej niż 0,8 mm oraz otworów o średnicach powyżej 2 mm.

Usuwanie proszku

Elementy wykonane w technologii SLS nie wymagają stosowania dodatkowych struktur podporowych, dzięki czemu możliwe jest łatwe oraz dokładne wytwarzanie obiektów o złożonych i posiadających otwarte przestrzenie geometriach.

Możliwość wydrukowania elementu posiadającego otwarte przestrzenie zmniejsza zarówno wagę samego elementu, jak i również dzięki zużyciu mniejszej ilości materiału całkowity koszt jego wykonania. W celu usunięcia niespieczonego proszku, który znajduje się wewnątrz wydrukowanego modelu, zalecane jest umieszczenie przynajmniej 2 otworów ewakuacyjnych o średnicy min. 5 mm.

Jeżeli od części wymagana jest wysoka sztywność, należy wówczas wydrukować ją w całości, bez pozostawiania otwartych struktur wewnątrz obiektu. Alternatywą jest wykonanie pustej konstrukcji bez zastosowania otworów ewakuacyjnych. Dzięki takiemu podejściu szczelnie upakowany proszek, znajdujący się wewnątrz konstrukcji, pozwoli na zwiększenie masy elementu, zapewniając jednocześnie dodatkowe wsparcie przed obciążeniami mechanicznymi. Innym sposobem pozwalającym na zwiększenie sztywności elementu jest stosowanie specjalnych wypełnień o strukturze plastra miodu, umieszczanych we wnętrzu pustej konstrukcji modelu.

MATERIAŁY WYKORZYSTYWANE W TECHNOLOGII SLS

Aktualnie najczęściej stosowanym materiałem w technologii SLS jest Poliamid 12 (PA12), znany również jako Nylon 12. Cena za 1 kg proszku PA12 wynosi w przybliżeniu 50-60 \$. Pozostałe termoplasty konstrukcyjne, takie jak PA11 oraz PEEK są również dostępne, ale nie są stosowane na aż tak szeroką skalę. W technologii SLS możliwe jest ponadto stosowanie mieszaniny poliamidów z wypełniaczami i dodatkami, takimi jak mączka

Tabela 2. Zestawienie powszechnie wykorzystywanych materiałów w technologii SLS

Materiał	Właściwości
Poliamid 12 (PA12)	- dobre właściwości mechaniczne - dobra odporność chemiczna - matowa, chropowata powierzchnia elementów
Poliamid 11 (PA11)	- wysoka elastyczność - bardzo wysoka udarność - duża izotropia materiału
Poliamid 12 z dodatkiem aluminium (alumide)	- duża sztywność - metaliczny wygląd elementów
PA12 z dodatkiem włókien szklanych (PA-GF)	- wysoka odporność na ścieranie i działanie wysokich temperatur - duża sztywność - anizotropia materiału
PA12 z dodatkiem włókien węglowych (PA-FR)	- bardzo duża sztywność - wysoka wytrzymałość oraz lekkość elementów - duża anizotropia materiału

szklana, proszek aluminiowy, czy też włókna węglowe, szklane lub aluminiowe. Celem stosowanych dodatków jest poprawa właściwości mechanicznych oraz termicznych drukowanych elementów. Z drugiej strony części wydrukowane z tych materiałów są bardziej kruche i posiadają bardziej anizotropowe właściwości.

W tabeli 2 przedstawiono krótką charakterystykę najpopularniejszych materiałów wykorzystywanych w technologii SLS.

W roku 2011 firma EOS wprowadziła nowy materiał PEEK HP3, który może być przetwarzany na drukarce 3D EOS P800. Materiał ten należy do grona wysokotemperaturowych tworzyw sztucznych z grupy poli-arylo-etero-ketonów. Dzięki wysokim właściwościom mechanicznym, dużej odporności chemicznej oraz możliwości pracy w temperaturach sięgających nawet do 280°C, posiada bardzo duży potencjał produkcyjny, również do uzyskania certyfikowanej biogodności.

POSTPROCESING – OBRÓBKA WYKAŃCZAJĄCA

Części wykonane w technologii SLS odznaczają się ziarnistą oraz proszkową powierzchnią zewnętrzną, która daje się jednocześnie bardzo łatwo barwić. Podstawowa obróbka postprocesingowa polega na oczyszczeniu modeli z resztek niespieczonego proszku polimerowego. Wykorzystanie dodatkowych metod obróbki wykańczającej pozwala na poprawę wyglądu wydrukowanych elementów. Do najczęściej wykorzystywanych metod obróbki wykańczającej elementów wykonanych w technologii SLS można zaliczyć: polerowanie, barwienie, malowanie natryskowe oraz lakierowanie. Ich funkcjonalność może zostać również poprawiona, dzięki zastosowaniu specjalnych wodoszczelnych powłok lub metalowych płytek.

KORZYŚCI I OGRANICZENIA ZWIĄZANE Z ZASTOSOWANIEM TECHNOLOGII SLS

Technologia SLS, stanowiąca alternatywę dla produkcji elementów z formowania wtryskowego, umożliwia wytwarzanie części o złożonych geometriach. Poniżej przedstawiono najważniejsze korzyści (+) oraz ograniczenia (-) związane z zastosowaniem tej technologii:

- + dobre, izotropowe właściwości mechaniczne elementów, które można wykorzystywać jako prototypy lub części funkcjonalne maszyn;
- + duża swoboda projektowania oraz budowania elementów o złożonych i skomplikowanych geometriach, w związku z brakiem

- konieczności stosowania dodatkowych struktur podporowych;
- + możliwości produkcyjne dostosowane do wytwarzania małych oraz średnich partii produkcyjnych;
- + duża wytrzymałość elementów, wynosząca 80-90% wytrzymałości części z poliamidu PA12 wykonanych metodą formowania wtryskowego;
- + łatwa obróbka poprocesowa (postprocessing), polegająca na oczyszczeniu detali z resztek niespieczonego proszku;
- + możliwość zastosowania dodatkowej obróbki wykańczającej elementów, m.in. polerowania, barwienia, lakierowania;
- + możliwość ponownego wykorzystania niespieczonego proszku polimerowego;
- + wysoka prędkość procesu budowy dużej ilości elementów oraz relatywnie niskie koszty materiału i eksploatacji drukarki 3D, w porównaniu do pozostałych technologii przyrostowych;
- + wysoka trwałość i niezawodność drukarek 3D pracujących w technologii SLS oraz relatywnie szybki zwrot inwestycji;
- + uzyskanie 12-13 klasy dokładności wymiarowej wg DIN EN ISO 286-1 uzależnione od wielkości detalu. W praktyce dla detali do 100 mm dokładność wymiarowa od +/-0,15 do +/-0,3; dla większych detali, w zależności od stopnia złożoności i rodzaju geometrii oraz sposobu ułożenia w komorze roboczej. W przypadku zastosowania produkcji seryjnej możliwość zoptymalizowania procesu i uzyskania dokładności wymiarowej lepszej niż +/-0,1 mm;
- dostępność przede wszystkim przemysłowych systemów SLS, która wpływa na dłuższe czasy realizacji zleceń produkcyjnych, aniżeli w przypadku systemów SLA lub FDM;
- ziarnista, proszkowa powierzchnia wydrukowanych elementów z dodatkowo występującą porowatością wewnętrzną. Konieczność zastosowania dodatkowej obróbki, w celu uzyskania gładkiej powierzchni części lub zapewnienia jej wodoszczelności;
- duża skłonność do kurczenia oraz odkształcania się części uniemożliwiająca precyzyjne wydrukowanie dużych i płaskich powierzchni, a także elementów o niewielkich średnicach, takich jak rowki oraz otwory.

PODSUMOWANIE

Technologia SLS stanowi obecnie jedną z najdynamiczniej rozwijających się metod druku 3D. Pozwala na produkcję w pełni funkcjonalnych części o złożonych geometriach z szerokiego zakresu tworzyw konstrukcyjnych (obecnie najczęściej z nylonu), dzięki czemu stanowi alternatywę dla elementów wytwarzanych za pośrednictwem formowania wtryskowego. Typowy rozmiar przestrzeni roboczej systemów pracujących w technologii SLS wynosi 300 x 300 x 300 mm. Wydrukowane elementy odznaczają się dobrymi właściwościami mechanicznymi oraz izotropowymi. Dla potrzeb budowy części o specjalnych wymaganiach dostępne są materiały polimerowe z dodatkami (fazami) wzmacniającymi. W tabeli 3 podsumowano główne cechy technologii SLS.

Tabela 3. Główne cechy technologii SLS

Materiał	termoplasty (najczęściej Nylon)
Dokładność wymiarowa	± 0.3% (dolna granica wynosząca ± 0,3 mm)
Typowa wielkość przestrzeni roboczej	300 x 300 x 300 mm (do 750 x 550 x 550 mm)
Typowa grubość warstwy	100-120 µm
Struktura podporowa	niewymagana

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

mgr inż. Dawid Zieliński

Katedra TMiAP, Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej