

Efektywność technik przyrostowych

BARTOSZ PRZYBYŁ, JAROSŁAW ROBERT MIKOŁAJCZYK *

W artykule przedstawiono rozważania dotyczące efektywności przyrostowych technik wytwarzania. Wskazano czynniki, które tę efektywność determinują. Zidentyfikowano także ograniczenia w rozwoju tych technik. Przedstawiono rezultaty eksperymentalnej weryfikacji wniosków z przeprowadzonej analizy teoretycznej.

Wprowadzenie

W technikach przyrostowych wyróżnić można dwie grupy. Do pierwszej grupy zalicza się takie, w których wytwarzany element powstaje przez dodawanie kolejnych warstw tworzywa konstrukcyjnego. W tym zbiorze technik znajdują się liczne metody nazywane początkowo ogólnie *Rapid Prototyping (RP)* [8]. W drugim zbiorze dominują obróbki polegające na fizycznym (*PVD*) lub chemicznym (*CVD*) osadzeniu atomów, jonów lub cząsteczek pierwiastków z fazy gazowej, na podłożu wcześniej wytworzonego elementu. W pierwszym przypadku tworzona jest od podstaw postać konstrukcyjna, opisana zbiorem wymiarów, natomiast w drugim – wymiary geometryczne wytworzonego wcześniej elementu ulegają bardzo niewielkim zmianom, gdyż grubości powłok *PVD* oraz *CVD* są rzędu mikrometrów. Zmiany te mieszczą się zazwyczaj w przyjętych tolerancjach wykonania.

Współcześnie obserwuje się dynamiczny rozwój obróbek zaliczanych do pierwszego z wyżej wymienionych zbiorów. W istotny sposób zwiększa się różnorodność tworzyw konstrukcyjnych, które stosowane są w tych obróbkach. W ten sposób rozszerza się zakres możliwych zastosowań obróbek tego typu. W problematyce tej zawsze jednak istotne będzie zagadnienie dotyczące efektywności tych obróbek. W artykule podjęto próbę wskazania czynników, które mają najistotniejszy wpływ na ten aspekt obróbek przyrostowych.

Obszar zastosowań operacji drukowania 3D

Liczne zalety obróbek przyrostowych powodują, że znajdują one zastosowanie w coraz większym zakresie. Tradycyjnym już obszarem zastosowań jest wykorzystywanie ich w różnych gałęziach przemysłu, zarówno w fazie prototypowania jak sugerowała ich początkowa nazwa (*Rapid Prototyping*), a także w fazie produkcji.

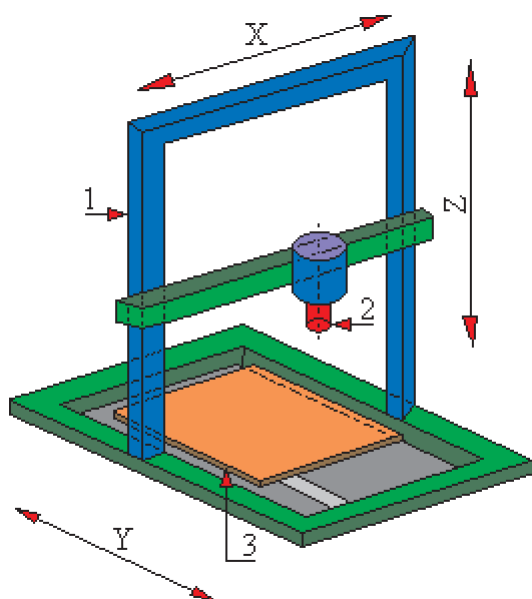
Od dłuższego czasu obserwuje się także wykorzystywanie druku 3D w medycynie, przede wszystkim w protetyce ortopedycznej i stomatologicznej [4]. Biodrukarki wykorzystywa-

ne są jednak także do warstwowania komórek, a materiałem drukowanym są w tym przypadku żywe komórki [3, 8].

Do niekonwencjonalnych jeszcze zastosowań druku 3D należy natomiast zaliczyć wykorzystanie tej techniki w gastronomii i to nie tylko w procesach produkcyjnych maszyn dla tej branży lecz także w przygotowywaniu potraw [3]. Niekonwencjonalnym jest także wykorzystanie tej techniki w budownictwie. W pracy [6] opisano zrealizowany projekt budowy budynku mieszkalnego za pomocą techniki przyrostowej. Ciekawostką jest to, że w tworzeniu tego obiektu wykorzystano obserwacje dokonane przy budowie kopców przez termity. Owady te potrafią budować swoje siedliska metodami podobnymi do *RP*, uzyskując cechy użytkowe, np. stabilność temperatury i wilgotności oraz przewietrzanie na oczekiwanym poziomie. Taką też strukturę ścian próbowano odtworzyć przy realizacji wspomnianego budynku techniką przyrostową.

Jako pewne ograniczenie w wykorzystaniu technik przyrostowych można uznać gabaryty wytwarzanych elementów. Kinematyka drukarek jest w zasadzie prosta – Rys. 1. Tor po jakim porusza się głowica wytłaczająca (2) jest składową sterowanych ruchów w osiach X i Y. Przy drukarkach do wytwarzania małych elementów ruchy te wykonuje stolik krzyżowy, na którym powstaje element. Przy gabarytach dużych, tworzony obiekt jest nieruchomy, a przemieszcza się w tych osiach rama (1) i usytuowana na niej głowica (2). Przy gabarytach średnich ruch w osi X może wykonywać głowica przemieszczając się po belce, a przedmiot wykonuje jedynie ruchy w osi Y. Ograniczeniem jest więc przestrzeń robocza, w której powstaje tworzony obiekt. Ruchy w osi Z muszą być sterowane z dużą rozdzielczością odpowiednio do grubości nakładanych warstw. W zależności od rodzaju tworzywa konstrukcyjnego platforma robocza może być podgrzewana.

* Inż. Bartosz Przybył, dr inż. Jarosław Robert Mikołajczyk, Katedra Inżynierii Mechanicznej Akademii Nauk Stosowanych im. S. Staszica w Pile; e-mail: jmikolajczyk@ans.pila.pl.



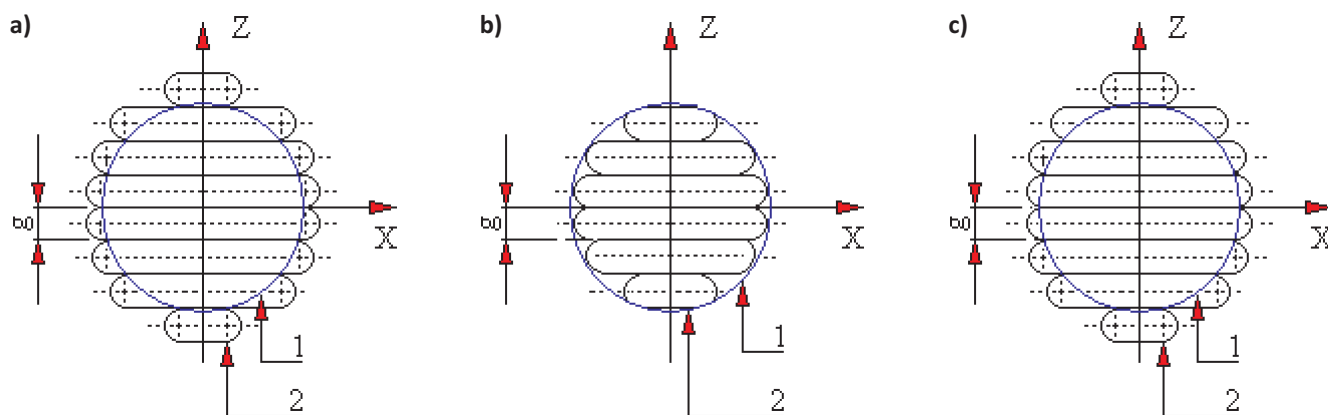
Rys. 1. Schemat kinematyki drukarki: 1 – rama, 2 – głowica wytłaczająca, 3 – platforma robocza

Drugim ograniczeniem może być tworzywo konstrukcyjne. W początkach RP filamentem było praktycznie jedynie tworzywo sztuczne. Z biegiem czasu zbiór tworzyw konstrukcyjnych powiększał się o metale, ceramikę, a także o tworzywa sztuczne o zróżnicowanych cechach użytkowych [9].

wykonania można zatem przyjąć za jeden z czynników determinujących efektywność tego procesu, gdyż jego celem jest wytwarzanie produktów o określonych cechach, w tym także geometrycznych cechach konstrukcyjnych (wymiarach).

Wpisywanie ścieżki druku w kontur wytwarzanego obiektu realizowane może być w różny sposób. Przypadek, gdy wymagane jest pełne pokrycie konturu przedmiotu przedstawiono na Rys. 2a. Gabaryty budowanego obiektu są wówczas większe niż modelu teoretycznego CAD. W tym przypadku zarówno czas druku jak i ilość niezbędnego filamentu jest większa niż w innych przypadkach. Tego typu rozwiązanie stosuje się, gdy operacja druku nie jest końcową operacją. Po niej mogą wystąpić, np. operacje obróbki skrawaniem [2].

Na Rys. 2b przedstawiono przypadek, gdy ekstrudat nie przekracza granic modelu CAD. W tym przypadku czas realizacji obróbki jest krótszy, mniejsze jest zużycie materiału niż w przypadku opisanym wcześniej. Dla tego przypadku również można stosować dodatkowe operacje postprocessingowe, chociaż niekoniecznie, np. szpachlowanie, klejenie, wzmacnianie struktury zewnętrznej dodatkowym pokryciem. Na Rys. 2c przedstawiono przypadek, w którym odchyłki wymiarowe budowanego obiektu od zarysu teoretycznego są najmniejsze. Producenci drukarek 3D różnie podchodzą do w/w tematu. Najczęściej jednak automatyczne programy krojenia części, obiektu na warstwy przyjmują wymiar środka ścieżki za punkt odniesienia. Im mniejsza grubość warstwy ścieżki g , tym wykonanie obiektu dokładniejsze. Takie ujęcie



Rys. 2. Dopasowanie ścieżek do wypełnianego konturu dla przypadku [7]: a) pełnego pokrycia konturu zaprojektowanego przedmiotu, b) gdy ekstrudat nie przekracza granic modelu CAD, c) gdy odchyłki wymiarowe od zarysu teoretycznego są najmniejsze; 1 – zarys teoretyczny konturu przedmiotu drukowanego; 2 – ścieżka druku; g – grubość warstwy ścieżki druku; Z – kierunek budowania

Obserwując postęp w inżynierii materiałowej spodziewać się można, że w niedługim czasie o tym ograniczeniu można będzie zapomnieć.

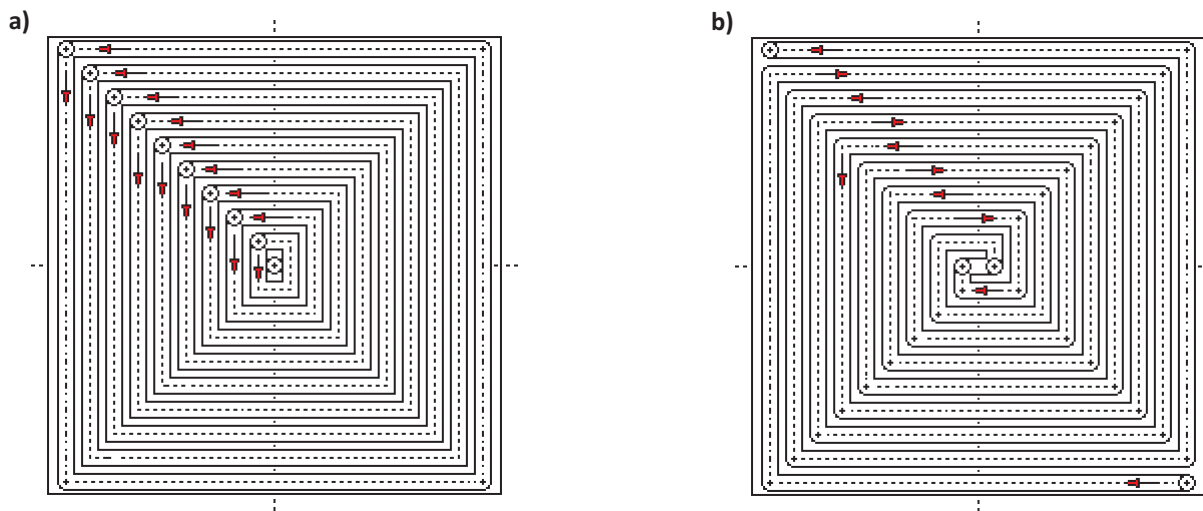
Czynniki determinujące efektywność

Analiza obszarów możliwych zastosowań obróbek przyrostowych ze zbioru RP wykazuje, że dokładność wykonania elementów tą techniką jest bardzo istotną cechą. Wynika to z faktu, że w przeważającej liczbie przypadków operacje drukowania 3D elementów, a także podzespołów są ostatnimi, kończącymi ich proces wytwarzania. Dokładność

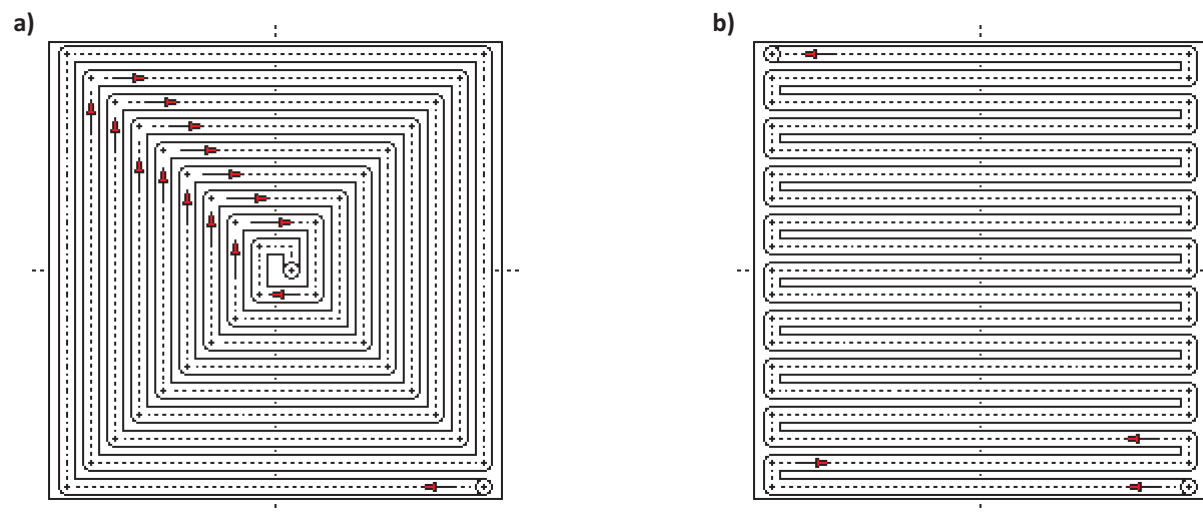
tego zagadnienia eliminuje konieczność wykonywania skomplikowanych obliczeń matematycznych.

Sposób wypełniania obszarów plastra jest istotnym elementem strukturalnej optymalizacji procesu typu FFF (Fused Filament Fabrication). Dzięki tym działaniom optymalizuje się m.in. ilość filamentu niezbędnego do wytworzenia danego obiektu, co można przyjąć jako kolejny czynnik determinujący efektywność procesu.

Najczęściej stosowanym wzorem wypełnienia we współczesnych drukarkach 3D jest wypełnienie typu zygzak (Rys. 3a) ze względu na prostotę ich budowy i możliwość wizualizacji. Dodatkową



Rys. 3. Wzory wypełnienia: a) typu zygzak, b) typu kontury równoległe [7]



Rys. 4. Wzory wypełnienia typu spirala: a) klasyczna, b) Fermata [7]

zaletą tego sposobu wypełniania jest możliwość drukowania z dużymi prędkościami, wynikająca z dużej liczby odcinków prostych występujących w tym wzorze wypełnienia. Innymi przykładami wypełnień są, m.in. wzory typu kontury równoległe (Rys. 3b), spirala klasyczna (Rys. 4a), spirala Fermata (Rys. 4b) i inne.

Wybór wariantu optymalnego w dużej mierze zależy od kształtu wytwarzanego elementu oraz jego przeznaczenia. Jeżeli wypełnienie następuje na licznych odcinkach krzywoliniowych z licznymi zmianami kierunków, wówczas czas drukowania wydłuża się, polepsza się jednak przy tym sztywność i wytrzymałość mechaniczna takiego elementu, mimo że całkowita długość ścieżki wzoru, a tym samym i masa zużytego materiału mogą być zbliżone.

Eksperymentalna weryfikacja zależności dokładności drukowania od jego prędkości

W celu ilościowego określenia stwierdzonej wyżej zależności dokładności wykonania od prędkości druku 3D przeprowadzono badania eksperymetalne. Szczegółowy ich opis zawarto w pracy [5], więc poniżej przedstawiono tylko pewne uzupełnienie.

W Tabelicy 1 zawarto uśrednione wyniki pomiarów dokładności wykonania koła zębatego wykonanego techniką przyrostową. Analiza zawartych w niej wyników potwierdza istnienie badanej relacji.

Wykorzystując otrzymane wyniki pomiarów, za pomocą programu R opracowano model regresji liniowej pierwszego rzędu ujmującej zależność odchyłek wymiarowych drukowanego elementu od prędkości drukowania. Model ten ma formę równania:

$$\Delta = 0.001302v + 0.04825$$

gdzie:

Δ – wartość odchyłki, mm,

v – prędkość drukowania, mm/sek.

W celu potwierdzenia poprawności opracowanego modelu obliczono współczynniki korelacji dwiema metodami: Pearsona i Spearmana. Uzyskane w obydwóch przypadkach duże wartości współczynników korelacji świadczą o poprawności opracowanego modelu.

Wyniki prezentowanych badań przedstawiono również w formie graficznej na Rys. 5.

Kąt pochylenia krzywej (prostej) na wykresie (Rys. 5b) świadczy o dużej istotności wpływu prędkości drukowania na dokładność druku. Zmiana prędkości drukowania w przedziale od 30 do 150 mm/sek. (5x) spowodowała zwiększenie odchyłek wymiarowych od 96 do 271 mikrometrów (3x).

Podsumowanie

Od dłuższego już czasu obserwuje się dynamiczny rozwój metod zaliczanych do przyrostowych technik wytwarzania. Przedstawione w artykule rozważania pozwalają na stwierdzenie, że w zakresie ich efektywności największe korzyści można uzyskać optymalizując proces przy kryteriach dotyczących:

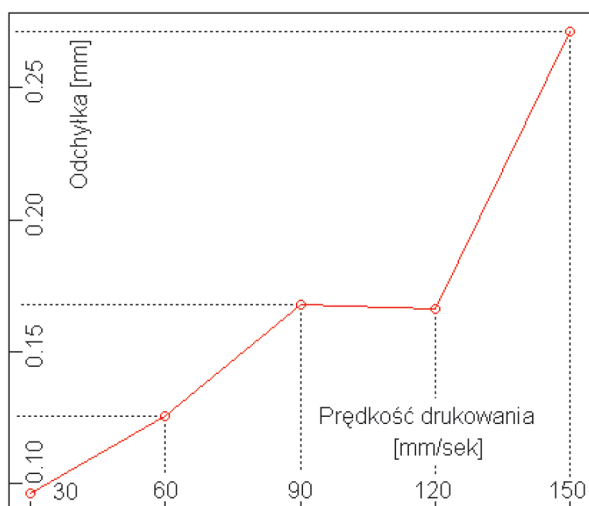
- prędkości drukowania,
- kształtu ścieżki drukowania,
- ilości filamentu.

Działania optymalizujące w tym zakresie przyczynią się niewątpliwie do poprawy dokładności wykonania druko-

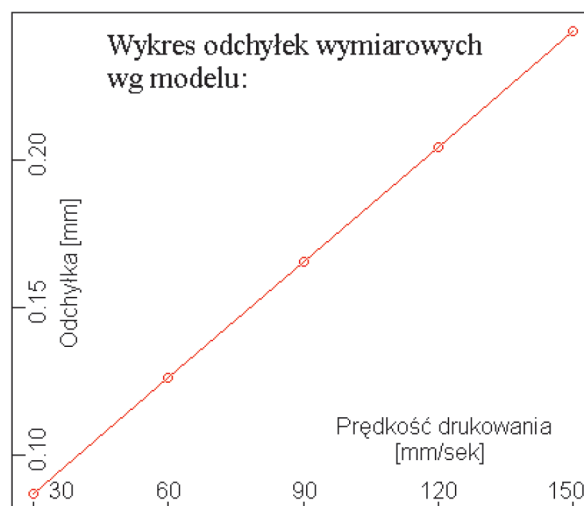
Tabela. 1. Zestawienie wyników badań eksperymentalnych i analitycznych

Prędkość drukowania mm/sek	Odchyłka, mm		Korelacja Pearson	Korelacja Spearman
	zmierzona (parametr Mean)	obliczona wg modelu		
30	0.0964	0.0873	0.93175	0.9
60	0.1254	0.1264		
90	0.1679	0.1654		
120	0.1663	0.2045		
150	0.2713	0.2436		

a)



b)



Rys. 5. Graficzny obraz zależności odchyłek wymiarowych od prędkości drukowania: a) eksperyment b) model

wanych elementów. Mogą także zmniejszyć koszty materiałowe w procesie drukowania.

Literatura

1. Caban J., Szala M., Kęsik J., Czuba Ł.: Wykorzystanie druku 3D w zastosowaniach automotive. Autobusy, technika eksploatacja, systemy transportowe, nr 6/2017, s. 573-579. Instytut Wydawniczy SPATIUM sp. z o.o., Radom 2017.
2. Królikowski M., Krawczyk M.: Obróbka skrawaniem oraz techniki przyrostowe jako integralne etapy procesu wytwarzania hybrydowego z metali w Przemśle 4.0. Mechanik nr 8-9/2018, s. 769-771.
3. Madej K., Kozioł P., Arabik R., Żyłka W., Hołota B.: Druk 3D w aspekcie zastosowań przemysłowych. Obróbka Metalu nr 2/2023, s.14-21.
4. Mikołajewska E., Macko M., Ziarnicki Ł., Stańczak S., Kawalec P., Mikołajewski D.: 3D Printing Technologies in

Rehabilitation Engineering. Journal of Health Science, No. 4(12) 2014, pp. 78-83.

5. Przybył B., Kabat M., Mikołajczyk J.R.: Wpływ prędkości drukowania 3D na dokładność zarysu kół zębatych. Obróbka Metalu 4/2023, s. 26-30.
6. Rouhana C.M., Aoun M.S., Faek F.S., Eljazzar M.F., Hamzeh F.R.: The reduction of construction duration by implementing contour crafting (3D Printing). Proceedings of 22nd Annual Conference IGLC, Oslo 2014, pp.1031-1042.
7. Strzycki R., Wyrobek K.: Projektowanie operacji druku 3D metodą FFF. Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku Białej, Bielsko Biała 2022.
8. Styp-Rekowski M., Matuszewski M., Oborski I.L., Polishchuk O.: Miejsce technik przyrostowych w procesach wytwórczych. Obróbka Metalu nr 3/2020, s.26-33.
9. Żyłka W., Hołota B., Madej K., Kozioł P.: Przemysłowy skok technologiczny: zastosowanie druku 3D z materiałów elastycznych. Obróbka Metalu nr 4/2023, s. 19-23.