

# STRATEGIE WYTWARZANIA WYROBÓW POLIMEROWYCH PRZYROSTOWĄ TECHNIKĄ FUSED DEPOSITION MODELING

Filip GÓRSKI, Radosław WICHNIAREK, Wiesław KUCZKO

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia problem planowania wytwarzania wyrobów z materiałów polimerowych za pomocą przyrostowej techniki Fused Deposition Modeling, znanej również jako druk 3D. W artykule wyróżniono trzy podstawowe strategie wytwarzania z punktu widzenia wskaźników techniczno-ekonomicznych procesu oraz uzyskiwanych wyrobów. Dla każdej ze strategii przedstawione zostały wyniki badań eksperymentalnych, ukierunkowanych na wyznaczenie parametrów procesu oraz wyrobów gotowych możliwych do osiągnięcia podczas realizacji wybranej strategii. Na podstawie wyników badań zdefiniowano możliwe sprzężenia przedstawionych strategii.

**Słowa kluczowe:** Rapid Manufacturing, wytwarzanie przyrostowe, Fused Deposition Modeling

## 1. Wprowadzenie

Zmieniający się rynek zbytu wyrobów przemysłowych w ciągu ostatnich lat spowodował, że przedsiębiorstwa muszą rywalizować już nie tylko ceną czy jakością, ale również czasem w jakim są w stanie dostarczyć finalnemu klientowi pełnowartościowy wyrób. Współczesne wyroby cechują się najczęściej dużą złożonością swojej struktury, która w dodatku często jest zmieniana ze względu na konieczność dodawania nowych funkcji odpowiadających wymaganiom użytkowników. Z drugiej strony coraz rzadziej spotyka się produkcję masową i długookresową tego samego wyrobu, a coraz częściej mówi się o produkcji małoseryjnej lub jednostkowej, lub też zindywidualizowanej produkcji masowej (ang. *mass customization* [1]). Przygotowanie konstrukcyjne, technologiczne oraz organizacyjne produkcji jest bardzo dużym wyzwaniem, które w znacznym stopniu decyduje o rynkowym sukcesie lub porażce produktu. Kluczowym problemem w przypadku opracowywania jednocześnie wielu wyrobów, nierzadko zindywidualizowanych, jest ich prototypowanie. W przypadku krótkich serii i produkcji jednostkowej, nieocenione są techniki szybkiego wytwarzania (ang. *Rapid Manufacturing* [2]), które oparte są głównie o przyrostowe wytwarzanie wyrobów.

Wiele przedsiębiorstw, szczególnie w krajach Europy Zachodniej i USA, ale też i w Polsce, korzysta z technik przyrostowych w prototypowaniu wyrobów [3]. Wciąż jest to jednak grupa technik rzadko wykorzystywana do produkcji wyrobów funkcjonalnych (tj. gotowych). Stan ten zmienia się jednak dynamicznie, m. in. dzięki pojawieniu się na rynku klasy niskokosztowych urządzeń do wytwarzania przyrostowego, dostępnych również dla małych i średnich przedsiębiorstw [4]. W literaturze naukowej można znaleźć wiele opracowań związanych z wyborem metody wytwarzania przyrostowego i jej parametrów technologicznych [5, 6, 7].

Dla najszerzej rozpowszechnionej metody wytwarzania przyrostowego, jaką jest kształtowanie przyrostowe uplastycznionym tworzywem sztucznym (z ang. *Fused Deposition Modeling* – FDM) zbadano już wpływ parametrów technologicznych takich jak:

orientacja modelu w przestrzeni roboczej [8, 9], grubość pojedynczej warstwy [10], czy temperatury procesu wytłaczania [11, 12] na wskaźniki techniczne i ekonomiczne wyrobu. Optymalizacja procesu FDM pod kątem zdefiniowanych wymagań rozumianych jako konkretne wartości wskaźników techniczno-ekonomicznych jest natomiast wciąż problemem otwartym.

Autorzy niniejszej pracy podejmują tę tematykę w swoich badaniach analitycznych [13], jak i eksperymentalnych [14, 15]. W artykule zaprezentowano propozycję trzech możliwych do zastosowania strategii wytwarzania wyrobu gotowego, zakładając odmienne priorytety dotyczące wskaźników techniczno-ekonomicznych dla każdej ze strategii. Artykuł zawiera również wyniki badań eksperymentalnych, mających na celu ustalenie granic zmienności tych wskaźników dla klasycznej odmiany procesu FDM.

## **2. Materiał i metodyka badań**

### **2.1. Technika FDM**

Cechą wspólną wszystkich dostępnych metod przyrostowego wytwarzania (a więc również techniki FDM) jest warstwowa natura procesu wytwarzania. Wytwarzanie odbywa się bezpośrednio na podstawie danych z trójwymiarowej reprezentacji cyfrowej CAD modelu, która dzielona jest na przekroje odpowiednio dla narzuconej przez operatora grubości warstwy i orientacji w przestrzeni roboczej. Takie rozwiązanie umożliwia otrzymywanie znacznie bardziej skomplikowanych kształtów geometrycznych niż dla tradycyjnych metod ubytkowych, przy jednoczesnym braku konieczności stosowania jakiegokolwiek dodatkowego oprzyrządowania technologicznego.

Kształtowanie uplastycznionym tworzywem polimerowym jest jedną z najbardziej popularnych, pod względem stosowania w przemyśle, metod wytwarzania przyrostowego [3, 16, 17]. Metoda FDM pod względem liczby dotychczas sprzedanych urządzeń ustępuje wyłącznie wcześniej wspomnianej stereolitografii [3]. Schemat metody przedstawia rys. 1.

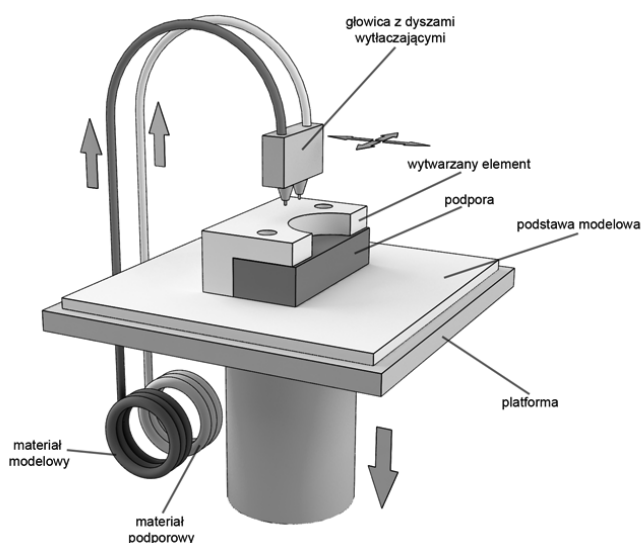
Materiałem budulcowym stosowanym w metodzie FDM w procesie nakładania kolejnych warstw wytwarzanego wyrobu są powszechnie dostępne termoplastyczne tworzywa sztuczne, takie jak: akrylonitrylo-butadieno-styren (poli(akrylonitryl-co-butadien-co-styren) – ABS), poliwęglan (polycarbon – PC), polilaktyd (PLA) oraz ich odmiany. Możliwe jest także wytwarzanie wyrobów z wosków i termoplastów wysokogatunkowych, a także materiałów kompozytowych z bazą polimerową. W badaniach prowadzonych przez autorów zastosowano materiał ABS.

Nakładanie każdej warstwy można podzielić na dwa etapy:

- nakładanie konturu zewnętrznego warstwy,
- wypełnianie wnętrza konturu warstwy.

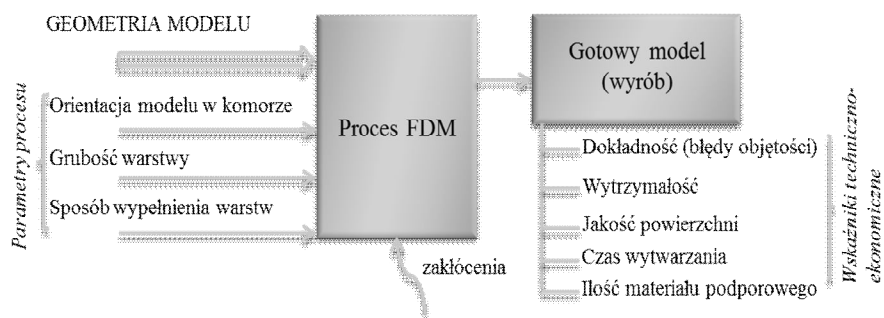
Sposób wypełnienia wnętrza konturu warstwy zależy od przyjętej strategii wytwarzania – można wytwarzać wyroby z wypełnieniem pełnym lub częściowym, w celu zaoszczędzenia materiału jak i czasu wytwarzania, jeśli aspekt wytrzymałościowy jest mniej istotny.

Podstawowym ograniczeniem techniki modelowania uplastycznionym tworzywem sztucznym jest konieczność stosowania struktur podporowych [2, 17]. W przypadku podpór nierozpuszczalnych ograniczenie to ma bardzo duże znaczenie, jako że uniemożliwia wytworzenie dowolnego kształtu – może zdarzyć się sytuacja, w której podpora będzie niemożliwa do usunięcia z niektórych miejsc wyrobu. Podpory wpływają też znacząco na koszt wyrobu.



Rys. 1 Schemat działania metody kształtowania uplastycznionym tworzywem sztucznym.  
Źródło: [Pająk, Wichniarek et al. 2011]

Gotowy wyrób wykonany techniką kształtowania przyrostowego uplastycznionym tworzywem sztucznym może zostać scharakteryzowany z wykorzystaniem wskaźników technicznych, do których należą m.in. jego wytrzymałość na określone rodzaje obciążeń czy dokładność wykonania, jak też wskaźników ekonomicznych, takich jak czas wytwarzania i ilość zużytego materiału podporowego. Na wartości ww. wskaźników bezpośredni wpływ ma wiele czynników [18]. Podobnie jak w innych technikach wytwarzania, wartości wskaźników wynikają bezpośrednio z cech wewnętrznej struktury uzyskanego wyrobu, na którą składają się dwie grupy czynników: zbiór charakterystyk materiału wyjściowego oraz zbiór parametrów procesu przeróbki tego materiału. Charakterystycznym dla omawianej techniki wytwarzania zjawiskiem jest relatywnie duże znaczenie drugiej grupy – parametrów procesu wytwarzania przyrostowego. Parametry tego procesu oraz podstawowe wskaźniki wyrobu wyróżniono na rys. 2.



Rys. 2. Parametry procesu FDM i wskaźniki techniczno-ekonomiczne wyrobu

## 2.2. Strategie wytwarzania techniką FDM

Aby zdefiniować strategie wytwarzania, należy najpierw określić jakie wskaźniki wyrobu należy brać pod uwagę i jakie parametry procesu na nie wpływają. Zbiór wszystkich wskaźników opisujących cechy wyrobu można podzielić na dwa główne podzbiory:

- wskaźniki ekonomiczne,
- wskaźniki techniczne.

Dotychczasowe badania naukowe oraz praktyczne doświadczenia autorów zdobyte w czasie praktyki przemysłowej oraz prowadzenia projektów badawczych wskazują, że dla większości wskaźników technicznych, poprawa ich wartości stoi w sprzeczności ze wskaźnikami ekonomicznymi. Dlatego ustalenie z odbiorcą hierarchii ważności wskaźników oceny oraz ich minimalnych akceptowanych wartości jest bardzo istotne. Narzędziami, które pozwalają na uzyskanie możliwie najlepszych wskaźników oceny wyrobu, są uwzględniające wiedzę empiryczną algorytmy doboru metody wytwarzania lub wartości wybranych parametrów procesu. W pierwszym przypadku, obszar wiedzy eksperckiej zawęża się do wyrobów charakteryzujących się pewną wspólną cechą – na przykład wyrobów cienkościennych [6]. W drugim przypadku, wiedza ściśle empiryczna dotyczy korelacji wybranego parametru procesu wytwarzania i wskaźnika oceny [5].

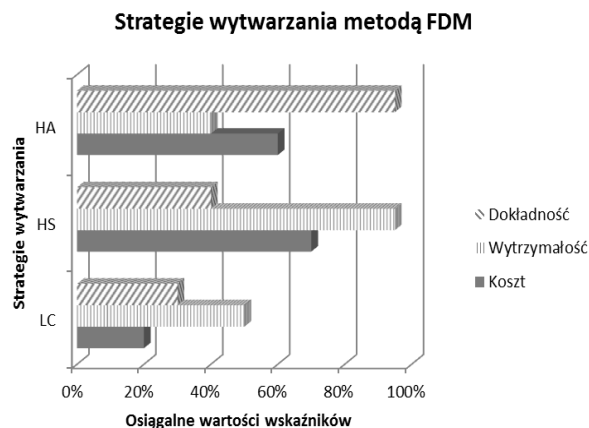
W przypadku dostępnych w literaturze opisów prób dokonywania wielokryterialnych optymalizacji parametrów procesu wytwarzania, autorzy sięgają najczęściej po wybrane techniki sztucznej inteligencji. Są to między innymi: algorytmy genetyczne [19] czy inteligencja roju [9, 20]. Jednak wyjątkowo rzadko badacze podejmują próby optymalizacji wskaźników związanych z właściwościami wytrzymałościowymi. W nielicznych publikacjach poruszających te zagadnienia, szczegółowe parametry procesu takie jak wypełnienie warstwy oraz stopień wypełnienia wyrobu jako parametr procesu wytwarzania nie są praktycznie brane pod uwagę.

Z praktyki przemysłowej oraz badawczej autorów niniejszego artykułu wynika, iż można wyróżnić trzy podstawowe strategie wytwarzania wyrobów technikami przyrostowymi. Przedstawia je obrazowo rys. 3. Są to następujące strategie:

- 1) Strategia **niskiego kosztu** (ang. *low-cost* – LC), skupiająca się na doborze parametrów procesu w taki sposób, aby zminimalizować koszt wytworzenia wyrobu.
- 2) Strategia **wysokiej wytrzymałości** (ang. *high strength* – HS), skupiająca się na uzyskaniu jak najwyższych wskaźników wytrzymałości na rozciąganie i zginanie.
- 3) Strategia **wysokiej dokładności** (ang. *high accuracy* – HA), która skupia się na uzyskaniu jak najlepszej dokładności wymiarowo-kształtowej.

Strategię LC stosuje się zazwyczaj do wytwarzania prototypów nieużytkowych, tj. spełniających wyłącznie funkcję wizualną lub służących jako prototyp montażowy czy np. (częściowo) ergonomiczny. Rzadziej ma ona zastosowanie do wyrobów gotowych, gdyż zwykle zdefiniowane są wobec nich pewne wymagania co do pozostałych wskaźników. Jest to strategia najłatwiejsza do wdrożenia, gdyż już na etapie planowania procesu w oprogramowaniu komputerowym można łatwo określić ilość zużytego materiału oraz czas wytwarzania i dokonać manualnej minimalizacji.

Strategia HS jest zwykle stosowana do prototypów użytkowych i wyrobów gotowych, które będą podlegały standardowej eksploatacji lub intensywnym testom, podczas których sprawdzane będzie m. in. zachowanie wyrobu pod obciążeniem. Wyroby wykonane techniką FDM mają z reguły mniejszą wytrzymałość niż wyroby wykonane z tego samego

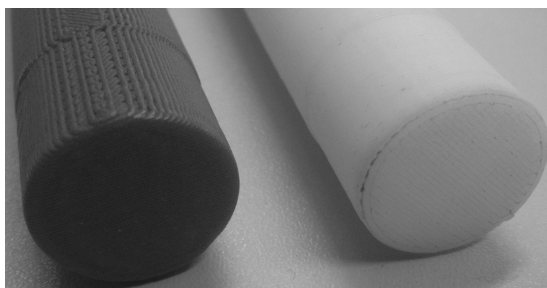


Rys. 3. Możliwe strategie wytwarzania wyrobów technikami przyrostowymi

materiału technikami konwencjonalnymi, a przewidywanie tej wytrzymałości przed wytwarzaniem jest bardzo trudne, zwłaszcza przy złożonej geometrii wyrobów [13]. Wdrożenie tej strategii jest więc zazwyczaj dość trudne i wymaga dużego doświadczenia oraz wiedzy eksperckiej technologa odpowiedzialnego za procesy wytwarzania przyrostowego.

Strategia HA ma mniej częste zastosowanie od pozostałych strategii i najczęściej jest wdrażana w przypadku wytwarzania wyrobów będących częściami określonych mechanizmów czy urządzeń, gdzie dokładność wykonania jest wymagana ze względów montażu oraz późniejszego sprawnego działania danego mechanizmu. Dokładność wymiarową wyrobów FDM można też częściowo poprawić w procesach obróbki wykańczającej. Strategia jest trudna do wdrożenia ze względu na generalnie niską dokładność wyrobów wytwarzanych przyrostowo i nieliniowe zmiany dokładności podczas modyfikacji parametrów procesu. Jej skuteczne wdrożenie wymaga dużej wiedzy eksperckiej.

Przykład tego samego wyrobu wytworzonego z realizacją dwóch różnych strategii – HS i HA – przedstawia rys. 4. Różnica między strategią HS i LC w tym wypadku polega tylko na zmniejszeniu gęstości wewnętrznego wypełnienia wyrobu (obniżenie wytrzymałości i jednocześnie kosztu wytworzenia), nie jest więc uwidoczniła na zdjęciu.



Rys. 4. Przykład wyrobu (wałek) wytworzonego strategią HS (po lewej) i HA (po prawej)

Wyróżnione strategie nie zawsze są wzajemnie wykluczające się – zachodzą między nimi częściowe sprzężenia, zależne znacząco od geometrii wyrobu wytwarzanego. Dla

niektórych klas wyrobów o prostej geometrii sprzężenia te można ustalić w sposób czysto eksperymentalny – jest to jeden z celów badań omawianych w dalszej części artykułu.

### 2.3. Koncepcja i metodyka badań eksperymentalnych

Badania eksperymentalne opisane w niniejszej pracy były ukierunkowane na wyznaczenie zakresów zmienności wskaźników techniczno-ekonomicznych wyrobów wytwarzanych metodą FDM z uwzględnieniem możliwych strategii wytwarzania. Następujące wskaźniki przyjęto jako wzorcowe dla realizacji strategii wybranego typu:

- wytrzymałość na rozciąganie – dla strategii wysokiej wytrzymałości (HS),
- dokładność wymiarowa – dla strategii wysokiej dokładności (HA),
- koszt wytworzenia – dla strategii niskiego kosztu (LC).

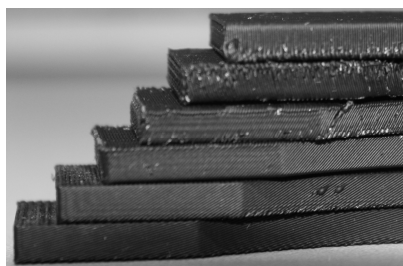
Aby zbadać zakres zmienności, różnicowaniu poddano następujące czynniki:

- orientację wyrobu w komorze roboczej podczas wytwarzania – jako czynnik podstawowy, wpływający zarówno na wytrzymałość i dokładność wyrobu, jak i na jego koszt,
- sposób wypełnienia warstw wewnętrznych wyrobu – jako drugi w kolejności czynnik wpływający przede wszystkim na wytrzymałość i koszt wytworzenia wyrobu (wpływ wypełnienia na dokładność został uznany za pomijalny [21]).

W ramach badań wskaźników wytworzono następujące zestawy próbek badawczych:

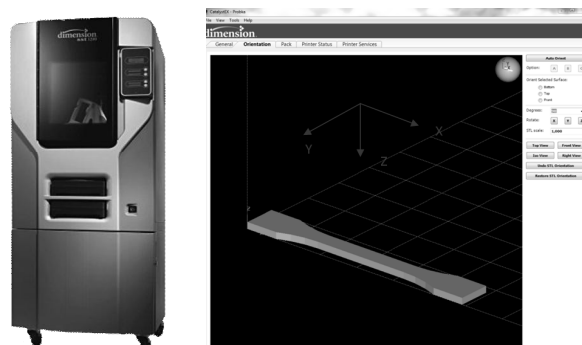
- 13 rodzajów próbek do badań wytrzymałości na rozciąganie różniących się wyłącznie orientacją wytwarzania (rys. 5), wytworzonych z wypełnieniem pełnym (bez różnicowania gęstości),
- 11 rodzajów próbek do badań wytrzymałości na rozciąganie różniących się wyłącznie gęstością wypełnienia wewnętrznego (od wypełnienia pełnego do wypełnienia o maksymalnym rozstawie oczek wewnętrznej siatki).

Jako geometrię próbek przyjęto podstawową geometrię typu „wioselko”, określaną przez Polską Normę dotyczącą badania wytrzymałości na rozciąganie tworzyw sztucznych. Próbki wytwarzano na maszynie Stratasys Dimension BST 1200 (rys. 6), przyjmując stałą grubość warstwy równą 0,254 mm, z materiału ABS o oznaczeniu handlowym P400 i gęstości 1,05 g/cm<sup>3</sup>, dostarczonym przez producenta maszyny. Wytworzono po 3 próbki każdego rodzaju.



Rys. 5 Próbki do badań wytrzymałości na rozciąganie ze zmienną orientacją

Podsumowanie wytworzonych próbek przedstawiają tabele 1 i 2. W tabelach znajdują się również podstawowe dane procesu FDM, które umożliwiają obliczenie kosztu wytworzenia próbek.



Rys. 6. Urządzenie Dimension BST 1200 (po lewej) oraz interfejs programu CatalystEX do planowania procesu wytwarzania (po prawej). Widoczna geometria próbki do badań na rozciąganie.

Tabela 1. Zestawienie parametrów próbek ze zmienną orientacją

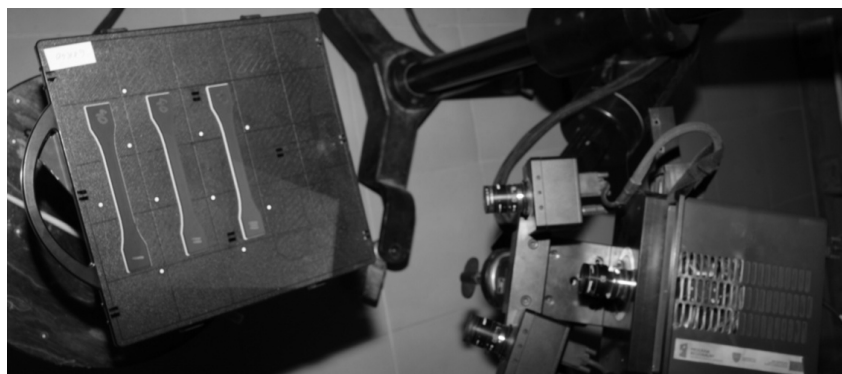
Lp.	Nazwa serii	Orientacja X	Orientacja Y [°]	Czas wytwarzania [min]	Materiał podporowy [g]	Materiał budulcowy [g]
1.	Flat-0	płaska (0°)	0	22	21.714	9.135
2.	Flat-15		15	109	36.152	9.093
3.	Flat-30		30	181	28.014	9.104
4.	Flat-45		45	218	49.749	9.062
5.	Flat-60		60	264	33.590	8.988
6.	Flat-75		75	246	12.275	8.936
6.	Vert	nd.	90	222	2.394	9.146
7.	Side-0	boczna (90°)	0	46	10.574	9.093
8.	Side-15		15	102	18.123	9.062
9.	Side-30		30	157	17.546	9.030
10.	Side-45		45	192	29.190	9.009
12.	Side-60		60	247	20.360	8.957
13.	Side-75		75	236	21.714	9.135

Tabela 2. Zestawienie parametrów próbek ze zmienną gęstością wypełnienia (odsunięciem wewnętrznych ścieżek materiału)

Lp.	Nazwa serii	Odsunięcie ścieżek [mm]	Czas wytwarzania [min]	Materiał podporowy [g]	Materiał budulcowy [g]
1.	R00	0,00	64	8.147	1.254
2.	R05	1,27	51	6.198	0.988
3.	R10	2,54	48	5.816	0.939
4.	R15	3,81	47	5.644	0.926
5.	R20	5,08	47	5.556	0.916
6.	R25	6,35	46	5.496	0.899
7.	R30	7,62	46	5.464	0.892
8.	R35	8,89	45	5.417	0.901
9.	R40	10,16	45	5.397	0.889
10.	R45	11,43	44	5.391	0.867
11.	R50	12,70	44	5.368	0.873

Próbki poddano następującym badaniom:

- pomiarowi z użyciem optycznego skanera 3D GOM ATOS I, w celu wyznaczenia dokładności wymiarowej (rys. 7); ze względu na pracochłonność pomiaru, wykonany został on tylko dla wybranych orientacji (0°, 45° oraz 90°),
- statycznemu rozciąganiu na maszynie Zwick ROELL Z020, z zachowaniem parametrów wg normy PN-EN ISO 527-1:2012 (rys. 8), w szczególności prędkości rozciągania równej 10 mm/min.



Rys. 7 Pomiar próbek badawczych z użyciem skanera 3D



Rys. 8 Próby wytrzymałości na rozciąganie

### 3. Wyniki badań

Wyniki badań opracowano statystycznie i zestawiono w tabeli 3. Wyznaczono następujące wskaźniki syntetyczne:

- wskaźnik wytrzymałościowy – wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  w MPa,
- wskaźnik dokładności – syntetyczny wskaźnik dokładności, obliczony wzorem:

$$k_d = \frac{k_{len} + k_{w1} + k_{w2} + k_{th}}{4} \quad (1)$$



gdzie:

$k_d$  – wskaźnik dokładności,

$k_{len}$ ,  $k_{w1}$ ,  $k_{w2}$ ,  $k_{th}$  – wskaźniki dokładności czterech wymiarów kontrolnych (długość, dwie szerokości oraz grubość próbki), pojedynczy wskaźnik obliczany wzorem:

$$k_x = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{d_{xi}}{x_{nom}}}{n} \cdot 100 \quad (2)$$

gdzie:

$x$  – indeks oznaczający wymiar (długość, szerokość 1, 2 oraz grubość),

$n$  – liczba próbek ( $n=3$ ),

$d_{xi}$  – wartość bezwzględna średniej odchyłki od wymiaru  $x$  w próbce  $i$ ,

$x_{nom}$  – wartość nominalna wymiaru.

Im wyższa wartość wskaźnika, tym gorsza dokładność [22]. Wskaźnik można interpretować jako ogólną, uśrednioną procentową odchyłkę wymiarową dla wyrobu względem czterech podstawowych wymiarów nominalnych.

– wskaźnik kosztów – syntetyczny wskaźnik ekonomiczny, obliczony wzorem:

$$k_c = k_{mat} + k_{sup} + t_{pm} * k_{pm} \quad (3)$$

gdzie:

$k_c$  – wskaźnik kosztów,

$k_{mat}$  – koszt materiału budulcowego, przyjęto wg aktualnych stawek 1300 PLN / kg,

$k_{sup}$  – koszt materiału podporowego, jw.,

$t_{pm}$  – czas pracy maszyny, wg czasów wytwarzania próbek z tabeli 1 i 2,

$k_{pm}$  – koszt pracy maszyny, przyjęto wg stawek ogólnych 50 PLN / h.

Wyróżniono dwie grupy próbek – różniące się orientacją (przy zachowaniu wypełnienia pełnego) oraz różniące się gęstością wypełnienia (przy zastosowaniu wypełnienia w postaci siatki o oczkach kwadratowych o konkretnej wielkości). We wcześniejszych badaniach stwierdzono, że zmiana gęstości wypełnienia wewnętrznego nie ma wpływu na dokładność uzyskanych wyrobów, stąd nie podano jej dla tych próbek.

Na podstawie wyników można wysunąć następujące obserwacje ogólne:

- różnice w wytrzymałości na rozciąganie przy różnych orientacjach sięgają kilkuset procent – najmniej wytrzymała próbka wykazała 8,7 MPa, podczas gdy najbardziej wytrzymała – 22,9 MPa,
- różnice w dokładności przy zmieniających się orientacjach również są znaczne – wskaźnik dla najlepszej próbki wynosi 0.665 a dla najlepszej – 1.403, czyli różnica w odchyłkach jest ponad dwukrotna,
- koszt i czas wytwarzania to najbardziej zróżnicowany parametr, koszt wytworzenia najdroższej próbki wyniósł 252,45 PLN, a najtańszej – 17,89 PLN,
- różnice w orientacji wytwarzania mają zdecydowanie największy wpływ na wszystkie wskaźniki wyrobów,
- zmniejszenie gęstości wypełnienia wewnętrznego może spowodować obniżenie kosztów o 33%, a wytrzymałości maksymalnie o 28%,
- nie występuje korelacja między dokładnością a pozostałymi wskaźnikami – próbki o największej zbadanej dokładności są próbkami o wysokim koszcie i średniej wytrzymałości na rozciąganie.

Tabela 3. Wyniki badań – wskaźniki techniczno-ekonomiczne dla poszczególnych rodzajów próbek

Lp.	ID	Koszt	Koszt [%]	Wytrzymałość [MPa]	Wytrzymałość [%]	Dokładność (1- $k_d$ )
1	Flat-0	29.37 PLN	11.63%	19.0	83%	99.024
2	Flat-15	112.77 PLN	44.67%	18.1	79%	nd.
3	Flat-30	179.48 PLN	71.10%	13.8	60%	nd.
4	Flat-45	193.59 PLN	76.68%	12.9	56%	<b>99.335</b>
5	Flat-60	<b>252.45 PLN</b>	<b>100.00%</b>	13.7	60%	nd.
6	Flat-75	219.35 PLN	86.89%	11.1	48%	nd.
7	Vert	175.57 PLN	69.55%	11.0	48%	98.954
8	Side-0	45.67 PLN	18.09%	<b>22.9</b>	<b>100%</b>	98.56
9	Side-15	93.57 PLN	37.06%	21.6	94%	nd.
10	Side-30	140.01 PLN	55.46%	17.3	76%	nd.
11	Side-45	162.55 PLN	64.39%	14.9	65%	99.148
12	Side-60	214.33 PLN	84.90%	8.7	38%	nd.
13	Side-75	195.44 PLN	77.42%	10.9	48%	nd.
14	R00	<b>26.44 PLN</b>	<b>100.00%</b>	<b>21.09</b>	<b>100%</b>	nd.
15	R05	20.68 PLN	78.19%	15.49	73%	nd.
16	R10	19.45 PLN	73.55%	14.33	68%	nd.
17	R15	18.99 PLN	71.80%	14.74	70%	nd.
18	R20	18.86 PLN	71.31%	15.09	72%	nd.
19	R25	18.54 PLN	70.10%	14.03	67%	nd.
20	R30	18.49 PLN	69.90%	14.56	69%	nd.
21	R35	18.21 PLN	68.88%	14.51	69%	nd.
22	R40	18.17 PLN	68.72%	14.57	69%	nd.
23	R45	17.91 PLN	67.74%	14.89	71%	nd.
24	R50	17.89 PLN	67.66%	15.11	72%	nd.

#### 4. Wnioski i podsumowanie

Wyniki badań pozwalają na stwierdzenie, że nawet dla wyrobu o tak prostej geometrii, jak próbka do badań wytrzymałości na rozciąganie, zakres możliwych do osiągnięcia wskaźników techniczno-ekonomicznych jest bardzo rozległy. Szczególnie wyraźnie widoczne jest to w przeliczonym koszcie próbek – w ujęciu globalnym, najtańsza próbka to zaledwie 7% kosztu wytworzenia najdroższej próbki.

Można z całą pewnością potwierdzić, że wdrożenie strategii LC (niskiego kosztu) jest najłatwiejsze do przeprowadzenia. Strategia ta dla prostych wyrobów o dużej smukłości wykazuje wysokie sprzężenie ze strategią HS (wysokiej wytrzymałości) – próbki o

najwyższej wytrzymałości należą do próbek o niskim koszcie wytworzenia. Jest to ważna informacja dla projektantów i wytwórców korzystających z techniki FDM – dla niektórych klas wyrobów strategię wytwarzania można ze sobą częściowo łączyć. Strategia HA (wysokiej dokładności) w przytoczonych badaniach nie wykazała korelacji z pozostałymi strategiami, lecz badana próba jest zbyt mała, by można było to stwierdzić z całą pewnością. Jako że wpływ gęstości wypełnienia na dokładność jest pomijalny, istnieje możliwość sprzężenia ze sobą strategii HA i LC. Nie ma natomiast możliwości sprzężenia ze sobą wszystkich trzech strategii wytwarzania – nawet dla prostego wyrobu nie istnieje taka kombinacja parametrów, aby wszystkie wskaźniki techniczno-ekonomiczne przyjęły najlepsze możliwe wartości.

Analiza wartości liczbowych wyników badań eksperymentalnych pozwala stwierdzić, że zależności wskaźników wyrobu od parametrów procesu nie należą do liniowych, w żadnym z przytoczonych przypadków. Utrudnia to znacząco intuicyjne przewidywanie uzyskiwanych wskaźników wyrobów, nawet przy dużej wiedzy eksperckiej. Jako kierunek dalszych badań, autorzy przewidują zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji oraz technik symulacyjnych w celu optymalizacji procesu wytwarzania przyrostowego metodą FDM pod kątem konkretnej strategii wytwarzania. Celem tych badań będzie utworzenie skutecznego narzędzia dla projektantów i technologów korzystających z technik druku 3D, tak aby możliwe było skuteczne przewidywanie rezultatów procesu wytwórczego.

Prezentowane wyniki badań zostały sfinansowane z dotacji na naukę przyznanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, w ramach tematu nr 02/23/DSPB/7640. Badania częściowo finansowane przez NCN, w ramach (nr 2011/01/N/ST8/07603).

## Literatura

1. Da Silveira G., Borenstein D., Fogliatto S. (2001): Mass customization: Literature review and reserch directions, *International Journal Production Economics*, no 72, s. 1-13.
2. Chua C. K., Leong K. F., Lim C. S. (2010), *Rapid Prototyping: Principles and Applications*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore
3. Wohlers T. (2011): *Wohlers Report 2011 – Additive manufacturing and 3D printing state of the industry*, Wohlers Associates
4. Basiliere P. (2013), *How 3D Printing Disrupts Business and Creates New Opportunities*, Gartner, <https://www.gartner.com/doc/2373415?ref=ddisp>
5. Xu F., Wong Y. S., Loh H. T. (2000), Toward generic models for comparative evaluation and process selection in rapid prototyping and manufacturing, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 19, no. 5
6. Górski F., Wichniarek R., et al. (2010), Choosing optimal rapid manufacturing process for thin-walled products using expert algorithm, *Journal of Industrial Engineering and Management*, Vol. 3, no. 2, Spain
7. Khrais S., Al Hawari T., Al Araidah O. (2011), A fuzzy logic application for selecting layered manufacturing techniques, *Expert Systems with Application*, vol. 38
8. Masood S.H., Rattanawong W., Iovenitti P. (2000), Part Build Orientations Based on Volumetric Error in Fused Deposition Modelling, *Advanced Manufacturing Technology*, vol. 16
9. Ghorpade A., Karunakaran K.P., Wiwari M.K. (2007), Selection of optimal part orientation in fused deposition modeling using swarm intelligence, *Journal of Engineering Manufacture*, vol. 221

10. Vosniakos G.C., Maroulis T., Pantelies D. (2007), A method for optimizing process parameters in layer-based rapid prototyping, Proc. IMechE vol. 221 Part B
11. Bellini A., Shor L., Guceri S. I. (2005), New developments in fused deposition modeling of ceramics, Rapid Prototyping Journal, vol. 14
12. Sun Q., et al.(2008), Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments, Rapid Prototyping Journal, 14/2
13. Górski F., Wichniarek R., Kuczko W., Hamrol A. (2015), Computation of Mechanical Properties of Parts Manufactured by Fused Deposition Modeling Using Finite Element Method, Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer 2015, ISSN 2194-5357, pp. 403-414
14. Górski F., Wichniarek R., Kuczko W., Zawadzki P., Buń P. (2015), Strength of ABS parts produced by Fused Deposition Modelling technology – a critical orientation problem. Adv. Sci. Technol. Res. J. 2015; 9(26):12-19. DOI: 10.12913/22998624/2359.
15. Górski F., Wichniarek R., Kuczko W., Andrzejewski J., Experimental determination of critical orientation of ABS parts manufactured using Fused Deposition Modelling technology, Journal of Machine Engineering, ISSN 2391-8071, 2015
16. Bourell D.L., Leu M.C., Rosen D.W. (2009), Roadmap for Additive Manufacturing, The University of Texas at Austin,
17. Pająk E., Wichniarek R., et al. (2011), Techniki przyrostowe i wirtualna rzeczywistość w procesach przygotowania produkcji, Poznań, ISBN 978-83-86912-56-8
18. Bellini A., Guceri S. (2003), Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling, Rapid Prototyping Journal, vol. 9
19. Thrimurthulu K., Pandey P. M., Reddy N. V. (2004), Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 40
20. Li A. (2010), Optimization Method to Fabrication Orientation of Parts in Fused Deposition Modeling Rapid Prototyping, Mechanic Automation and Control Engineering (MACE)
21. Wichniarek R., Górski F., Kuczko W. (2012), Analiza wpływu stopnia wypełnienia modeli FDM na ich dokładność kształtową, Przetwórstwo Tworzyw 9/2012
22. Górski F., Kuczko W., Wichniarek R. (2013), Influence of process parameters on dimensional accuracy of parts manufactured using Fused Deposition Modelling technology, Adv. Sci. Technol. Res. J. 2013, 7(19): 27-35, DOI: 10.5604/20804075.1062340

Dr inż. Filip GÓRSKI

Dr inż. Radosław WICHNIAREK

Mgr inż. Wiesław KUCZKO

Katedra Zarządzania i Inżynierii Produkcji

Politechnika Poznańska

60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3

tel./fax: (0-61) 665 27 08

e-mail: filip.gorski@put.poznan.pl

radoslaw.wichniarek@put.poznan.pl

wieslaw.kuczko@put.poznan.pl