



BADANIE PŁASKOŚCI ORAZ CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI MODELI CIENKOŚCIENNYCH WYKONANYCH TECHNOLOGIĄ PRZYROSTOWĄ FUSED DEPOSITION MODELING

Paweł Zmarzły, Magdalena Klamka, Wiktoria Szwej, Eliza Wróblewska

Kielce University of Technology, Poland

Corresponding author:

Paweł Zmarzły

Kielce University of Technology

aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7

25-314 Kielce, Poland

phone: (+48) 41 3424453

e-mail: pzmarzly@tu.kielce.pl

EXAMINATION OF THE FLATNESS AND SURFACE TOPOGRAPHY OF THIN WALL MODELS MANUFACTURED USING FUSED DEPOSITION MODELING TECHNOLOGY

ABSTRACT

3D printing technologies are gaining popularity year by year. They allow for a significant improvement in the production of prototypes and utility models. In addition, 3D printing facilitates the production of thin-walled elements and complex shapes, which is difficult when using traditional manufacturing methods. It should be noted that the technological parameters of 3D printing, such as the printing orientation and the thickness of a single layer, are very important because they affect the printing time, material expenditure and the dimensional accuracy of the printed details. There are many types of 3D printers, the operating principle of which and the building material used are different. However, one of the most popular and available types of additive manufacturing is Fused Deposition Technology. Therefore, detailed studies of this technology are particularly desirable by economic entities. The article presents research aimed at assessing the influence of the print direction and the thickness of a single layer of a building material on the flatness deviation and the 3D surface roughness parameters. Special thin-walled models were designed and printed from PLA material using a printer named MakerBot Replicator+. The research results presented in the article showed that the direction of printing and the thickness of a single layer of building material in the Fused Deposition Modeling Technology affect the roughness parameters, flatness and printing time of the produced models.

KEYWORDS

3D printer, additive technologies, FDM, flatness, surface roughness.

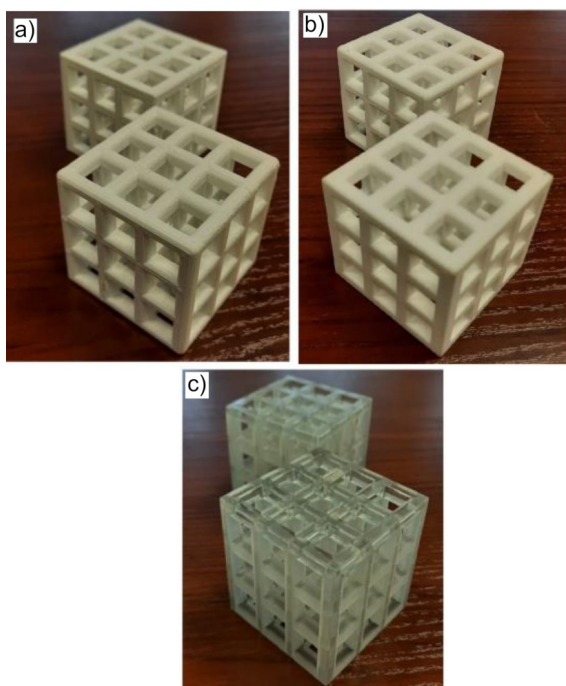
1. Wprowadzenie

Produkcja prototypów oraz produktów jednostkowych wiąże się z dużym nakładem pracy oraz kosztów. Produkcja prototypów polegała zazwyczaj na tradycyjnym wytwarzaniu części i gotowych wyrobów, które następnie były testowane. Niejednokrotnie pierwotna koncepcja prototypu ulega całkowitej zmianie lub jest odrzucana. Wszystkie te zabiegi wpływają w sposób znaczący na cenę finalnego produktu. W związku z tym, należy szukać nowych rozwiązań które pozwolą usprawnić produkcję prototypów oraz krótkich serii produktów. Do tego celu można zastosować technologie przyrostowe zwane również drukiem 3D [10].

Metody druku 3D opierają się na nakładaniu na siebie kolejnych warstw materiału. Dzięki temu obiekt rzeczywisty otrzymujemy w wyniku połączenia poszczególnych warstw materiału w oparciu o model 3D. Druk obejmuje rozległy zakres przeznaczenia i wytwarzania. Początkowo technologie przyrostowe stosowane były głównie do tworzenia prototypów, których dokładność wymiarowo-kształtowa oraz jakość warstwy wierzchniej

odbiegała od elementów wytworzonych metodami konwencjonalnymi np. obróbką skrawaniem lub metodami obróbki plastycznej [11, 15]. Natomiast obecnie dzięki dynamicznemu rozwojowi technik komputerowych oraz inżynierii materiałowej, technologie przyrostowe mogą być wykorzystywane do tworzenia w pełni funkcjonalnych elementów np. w przemyśle lotniczym, przemyśle samochodowym, medycynie, odlewnictwie itp. [1, 2, 4, 8, 13]. Ponadto obniżenie kosztu drukarek 3D oraz materiałów budulcowych zwiększa ich dostępność do zastosowań w życiu codziennym [16]. Technologie druku 3D mogą być wykorzystywane do wytwarzania elementów, których wytworzenie jest trudne lub wręcz niemożliwe np. elementy cienkościenne lub puste w środku. Na rysunku 1 przedstawiono model szkieletowy kostki wykonany przy użyciu wybranych technologii przyrostowych.

Bez względu na metodę wytwarzania addytywnego niezbędna jest konwersja zapisu pochodzącego z systemu CAD do formatu STL, a także podzielenie elementu w płaszczyźnie XY na warstwy o grubości wynikającej z zastosowanej technologii oraz wymaganej dokładności



Rys. 1. Modele szkieletowe wykonane wybranymi technologiami przyrostowymi: a) Fused Deposition Modeling, b) Selective Laser Sintering, c) PolyJet Matrix [18].

odtworzenia modelu CAD. Po wydrukowaniu elementu, w przypadku większości metod druku 3D, konieczna jest obróbka końcowa (mechaniczna lub chemiczna) zwana post-processingiem polegająca na usunięciu materiału podporowego i wykończeniu powierzchni [5, 7].

Istnieje wiele parametrów pozwalających opisać jakość wykonania elementów przy użyciu technologii przyrostowych. Jednym z kluczowych jest jakość warstwy wierzchniej opisana poprzez parametry topografii powierzchni [9, 14]. Chropowatość powierzchni wpływa na właściwości funkcjonalne współpracujących mechanizmów, dlatego w szczególności w przypadku prototypów powinna być analizowana. Kolejnym istotnym parametrem jest odchyłka płaskości, której badania są poruszane jedynie w nielicznych publikacjach [3, 12].

Ze względu na to, że parametry technologiczne technologii przyrostowych są kluczowe w artykule przebadano jak kierunek wydruku oraz grubość pojedynczej warstwy budulcowej technologii Fused Deposition Modeling wpływają na parametry chropowatości 3D oraz odchyłkę płaskości zaprojektowanych oraz wydrukowanych modeli badawczych. Przedstawione badania stanowią efekt prac dyplomowych realizowanych przez studentki Wydziału Zarządzania i Modelowania Komputerowego Politechniki Świętokrzyskiej [7, 18, 19].

2. Technologia Fused Deposition Modeling

Technologia FDM/FFF, czyli Fused Deposition Modeling to metoda druku 3D polegająca na wykonywaniu elementów poprzez osadzanie topionego materiału [17]. Drukarki FDM wykorzystują dwa rodzaje materiałów –

materiał modelujący, który stanowi gotowy obiekt i materiał wspierający, który jest nazywany suportem, aby wspierać obiekt podczas drukowania. Drukowane materiały mają postać plastikowych włókien lub nici, które są rozwijane ze szpuli i podawane przez dyszę do wytłaczania. Dysza topi włókna i wytłacza je na platformę roboczą [18].

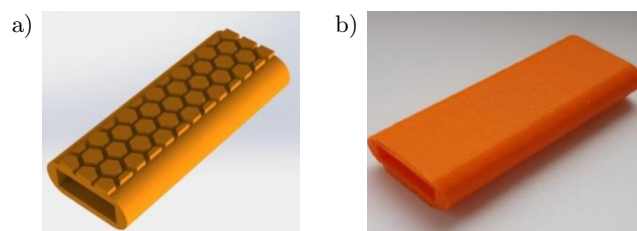
Obecnie wzrasta znaczenie technologii FDM jako alternatywnej metody wytwarzania, zwłaszcza w przypadku części produkowanych w niewielkich ilościach, na indywidualne zamówienie klienta. Wynika to z faktu, iż produkcja małoseryjna w omawianej technologii jest mniej kosztowna niż w tradycyjnych metodach wytwórczych. Stosowanie technologii FDM pozwala również znacznie skrócić czas realizacji wszystkich etapów projektu, począwszy od tworzenia prototypów aż po wykonywanie wyrobów w wersji finalnej. Inną przewagą metody FDM nad tradycyjną obróbką ubytkową jest ograniczenie ilości powstających odpadów, ponieważ w technologii tej element wytwarzany jest przez nanoszenie kolejnych warstw materiału, a nie w wyniku usuwania jego nadmiaru. W metodzie FDM odpadami są zatem jedynie usunięte struktury podporowe, na których wykonanie przeznaczona jest zwykle mała ilość materiału modelowego. Powstawanie odpadów podczas obróbki ubytkowej wiąże się natomiast z koniecznością ich późniejszej utylizacji, a zatem wymaga poniesienia dodatkowych kosztów. Produkcja elementów metodą FDM odbywa się bez użycia wyposażenia w postaci np. form, które to wymagane są przy tradycyjnych metodach wytwarzania. Ich przygotowywanie wydłuża czas wykonywania poszczególnych części i przyczynia się do wzrostu kosztów procesu [7].

3. Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne prowadzone były w laboratoriach Politechniki Świętokrzyskiej i polegały na ocenie wpływu kierunku wydruku oraz grubości pojedynczej warstwy budulcowej w technologii FDM na parametry chropowatości powierzchni oraz odchyłkę płaskości.

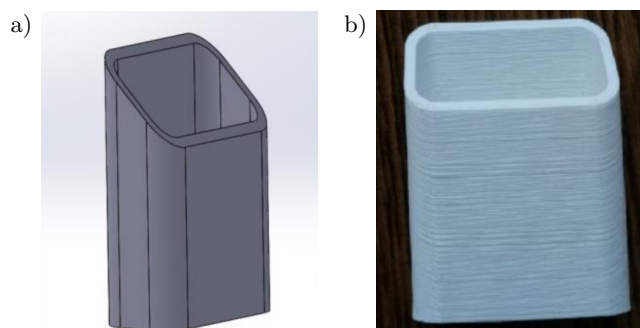
3.1. Modele badawcze

Do realizacji badań zostały zaprojektowane w oprogramowaniu Solidworks dwa typy modeli badawczych. Pierwszy posłużył do badania topografii powierzchni (rys. 2).



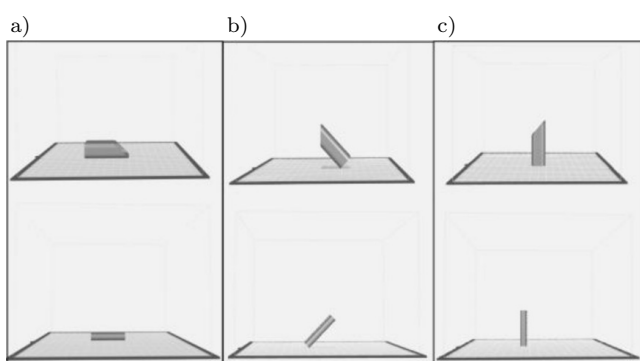
Rys. 2. Próbkki wykonane w technologii FDM przeznaczone do pomiarów topografii powierzchni: a) model CAD, b) wydrukowana próbka [7].

Natomiast drugi typ został opracowany w celu oceny odchyłki płaskości (rys. 3). Zarówno próbki zaprojektowane do badań topografii powierzchni jak i odchyłki płaskości są puste w środku. Taki kształt próbek może wpłynąć w sposób znaczący na wartości odchyłki płaskości oraz topografii powierzchni, dlatego należy taki kształt szczegółowo badać.



Rys. 3. Próbki wykonane w technologii FDM przeznaczone do pomiarów odchyłki płaskości: a) model CAD, b) wydrukowana próbka [19].

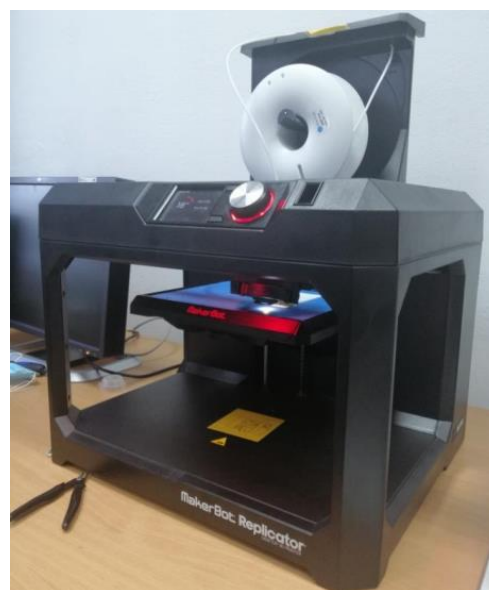
W oparciu o utworzone modele CAD, opracowano pliki w formacie STL, które następnie były przesyłane do drukarki 3D w celu realizacji procesu wydruku. Przed przystąpieniem do wydruku modeli badawczych należało dobrać odpowiednie parametry technologiczne druku w technologii FDM. W tym celu postanowiono analizować dwa zmienne parametry technologiczne, które pod względem aspektów metrologicznych są kluczowe, a mianowicie: położenia modelu względem platformy roboczej (kąt wydruku) Pd oraz grubość pojedynczej warstwy nakładanego materiału Lt . Badano zatem dwie grubości warstwy: $Lt = 0,1$ mm, $Lt = 0,2$ mm oraz trzy kąty wydruku: $Pd = 0^\circ$, $Pd = 45^\circ$ i $Pd = 90^\circ$. Przykład usytuowania modeli na wirtualnej platformie roboczej drukarki w zależności od badanego kąta wydruku przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Usytuowanie modeli na wirtualnej platformie roboczej drukarki: a) $Pd = 0^\circ$, b) $Pd = 45^\circ$, c) $Pd = 90^\circ$ [7, 19].

Do wykonania próbek badawczych użyto drukarki MakerBot Replicator+. Jest to drukarka desktopowa działająca w oparciu o technologię FDM, przeznaczona do dokładnego i szybkiego tworzenia prototypów o przeszerzeni roboczej $295 \times 195 \times 165$ mm. Na rysunku 5

przedstawiono drukarkę MakerBot Replicator+ w trakcie procesu drukowania.



Rys. 5. Drukarka MakerBot Replicator+ [19].

Do wykonania próbek wykorzystano filament Fiberlogy EASY PLA, wyprodukowany przez Fiberlogy S.A., składa się w ponad 98% z biopolimeru PLA (polilaktydu) i w mniej niż 2% z pigmentu. Charakteryzuje się dobrymi właściwościami adhezyjnymi, łatwością druku, bezwonnością oraz sztywnością i wytrzymałością. Może być stosowany m.in. do wytwarzania prototypów, zabawek, elementów biżuterii, a także różnego rodzaju gadżetów i dekoracji, takich jak np. obudowy, zawieszki czy ozdoby świąteczne [7]. Wybrane właściwości mechaniczne materiału Fiberlogy EASY PLA, który został wykorzystany do wykonania próbek przedstawiono w tabeli 1.

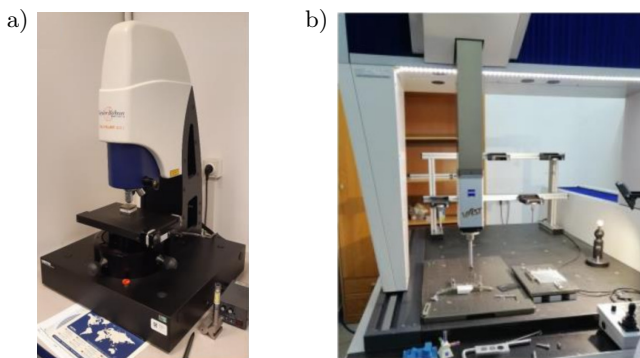
Tabela 1
Wybrane właściwości mechaniczne materiału
Fiberlogy EASY PLA [7, 19].

Moduł sprężystości podczas rozciągania	3,6 MPa
Moduł sprężystości podczas zginania	3,8 MPa
Wytrzymałość na zginanie	83 MPa
Wydłużenie pod obciążeniem	6%
Naprężenie zrywające	53 MPa
Gęstość	1,24 g/cm ³

3.2. Badania metrologiczne

Badania metrologiczne podzielone były na dwa etapy i realizowane były w Laboratorium Komputerowych Pomiarów Wielkości Geometrycznych Politechniki Świętokrzyskiej. Pierwszy etap pomiarów polegał na analizie topografii powierzchni próbek przedstawionych na rysunku 2. Do badań topografii powierzchni wykorzystano system pomiarowy Talysurf CCI Lite (patrz rys. 6a), który wykorzystuje bezstykową metodą koherentnej interferometrii korelacyjnej. Urządzenie za-

pewnia wysoką szczegółowość wyników, ponieważ standardowy obszar pomiarowy jest macierzą zawierającą 1024×1024 punkty pomiarowe. Maksymalne wymiary tego obszaru to $6,6 \times 6,6$ mm, a z wykorzystaniem funkcji Stitchingu 75×75 mm. Zakres pomiarowy wzdłuż osi Z jest równy 2,2 mm, jednak poprzez łączenie obrazów można go rozszerzyć do 10 mm. Rozdzielczość w osiach X i Y dla obiektywów o powiększeniach $10\times$, $20\times$ i $50\times$ wynosi kolejno $1,02 \mu\text{m}$, $0,76 \mu\text{m}$ oraz $0,4-0,6 \mu\text{m}$, natomiast w osi Z $0,01$ mm. Pomiar trwa zwykle od 5 do 40 sekund, jednak w przypadku niektórych powierzchni może wydłużyć się do kilku minut [6, 7, 18]. Ocenę topografii powierzchni dokonano w sposób ilościowy poprzez analizę parametrów chropowatości 3D (Sa , Sz , Sku , Ssk) oraz ocenę jakościową poprzez ocenę widoków izometrycznych zmierzonych powierzchni.



Rys. 6. Badania metrologiczne: a) pomiar topografii powierzchni – Talysurf CCI Lite, b) pomiar odchyłki płaskości – Prismo Navigator [7, 19].

Drugi etap badań metrologicznych polegał na analizie odchyłki płaskości $FLTt$ interpretowaną jako sumę największej dodatniej odchyłki płaskości i wartości bezwzględnej największej ujemnej lokalnej odchyłki płaskości ustalonych dla płaszczyzny odniesienia wyznaczonej metodą najmniejszych kwadratów. Pomiar odchyłki płaskości próbek (rys. 3) przeprowadzono używając współrzędnościowej maszyny pomiarowej Prismo Navigator firmy Zeiss (patrz rys. 6b).

4. Analiza wyników badań

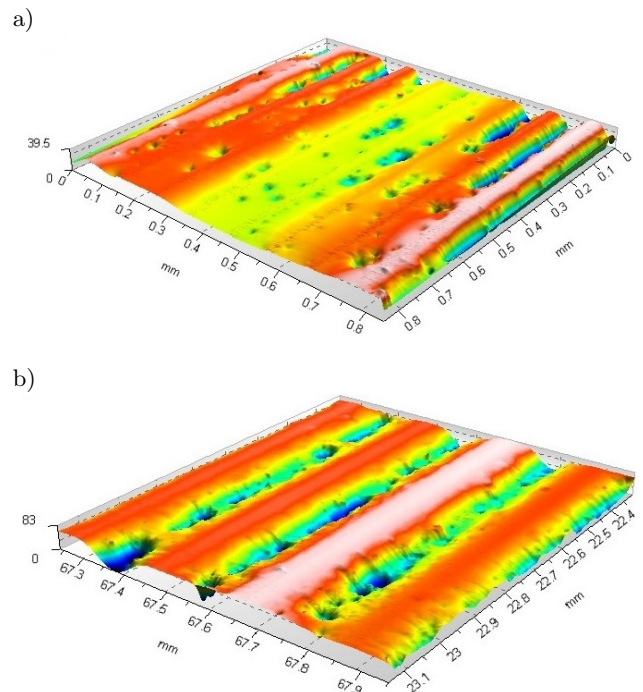
Wyniki badań zostały przedstawione w tabeli 2 oraz w postaci wykresów widoków izometrycznych topografii powierzchni badanych próbek.

Z tabeli 2 wynika, że w przypadku kierunków wydruku $Pd = 0^\circ$ i $Pd = 90^\circ$ wraz ze zwiększeniem grubości warstwy nakładanego materiału z $Lt = 0,1$ mm na $Lt = 0,2$ mm wzrosły wartości parametrów Sa oraz Sz , natomiast dla kierunku wydruku $Pd = 45^\circ$ wartości tych parametrów obniżyły się. Przy zastosowaniu grubości warstwy $Lt = 0,1$ mm najniższe wartości parametrów Sa oraz Sz otrzymano dla powierzchni próbki nr 1, a najwyższe dla próbki nr 2. Natomiast analizując parametry skośności (Ssk) oraz kurtozy (Sku), można stwierdzić, że w przypadku trzech kierunków wydruku wraz ze zwiększeniem grubości warstwy nastąpiło

Tabela 2
Wyniki pomiarów próbek wykonanych technologią druku Fused Deposition Modeling [7, 19].

Numer próbki	Lt [mm]	Pd [°]	Chropowatość 3D				Płaskość $FLTt$ [μm]
			Sa [μm]	Sz [μm]	Ssk	Sku	
1	0,1	0	3,82	27,6	0,49	2,67	0,209
2	0,1	45	7,21	81,3	-2,53	10,6	0,168
3	0,1	90	5,23	39,6	-0,92	4,28	0,329
4	0,2	0	6,14	31,6	0,10	1,71	0,245
5	0,2	45	3,25	23,0	-1,56	5,01	0,275
6	0,2	90	13,0	83,4	-0,74	3,20	0,169

zmniejszenie skośności rozkładu nierówności powierzchni. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe widoki izometryczne dla próbek wydrukowanych w technologii FDM przy uwzględnieniu kierunku wydruku $Pd = 90^\circ$ oraz grubości warstw $Lt = 0,1$ mm oraz $Lt = 0,2$ mm.

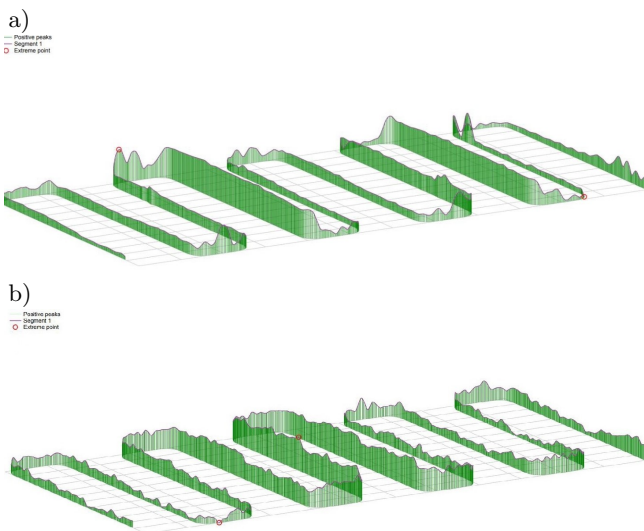


Rys. 7. Widoki izometryczne próbek wykonanych technologią FDM: a) próbka nr 3 ($Pd = 90$, $Lt = 0,1^\circ$), b) próbka nr 6 ($Pd = 90$, $Lt = 0,2^\circ$) [7].

Analizując widoki izometryczne przedstawione na rysunku 7, można zauważyć typowe ślady łączenia pojedynczych warstw materiału. Odstęp między pojedynczymi nierównościami są większe dla próbki nr 6, gdzie zastosowano grubość pojedynczej warstwy wynoszącej $Lt = 0,2$ mm. Ponadto na powierzchni próbki nr 1 (patrz rys. 7a) widoczne są pojedyncze zagłębienia co wynika z procesu stygnięcia materiału oraz nierównomiernego nakładania się pojedynczych warstw materiału.

Natomiast analizując odchyłkę płaskości opisaną parametrem $FLTt$, można stwierdzić, że najmniejszą odchyłkę płaskości otrzymano dla grubości warstwy $Lt = 0,1$ mm oraz kącie wydruku $Pd = 45^\circ$ tj.

$FLTt = 0,168 \mu\text{m}$. Dla modelu nr 3 o grubości warstwy $Lt = 0,1 \text{ mm}$ i kącie wydruku $Pd = 90^\circ$ wartość odchyłki płaskości uzyskano największą i wyniosła $FLTt = 0,329 \mu\text{m}$. Świadczy to o tym, że zastosowane parametry metody FDM mają znaczący wpływ na kształtowanie się płaskości elementów drukowanych. Mogą powodować powstawanie np. wypukłości czy wklęsłości powierzchni (patrz rys. 8). Z przeprowadzonych pomiarów można zauważyć, że zastosowanie pojedynczej grubości warstwy $Lt = 0,2 \text{ mm}$ i kąta wydruku $Pd = 90^\circ$ wartość odchyłki płaskości będzie stosunkowo mała niż dla modelu z grubością warstwy $Lt = 0,1 \text{ mm}$ oraz niezmiennym się kątem wydruku. Zmniejszenie kąta z $Pd = 90^\circ$ na $Pd = 45^\circ$ oraz grubości warstwy z $Lt = 0,2 \text{ mm}$ na $Lt = 0,1 \text{ mm}$ spowoduje obniżenie wartości odchyłki. Im mniejsza jest grubość warstwy i tym samym kąt wydruku daje to możliwość minimalizacji odchyłki płaskości. Jednocześnie w przypadku zwiększenia grubości warstwy i jednoczesnego zwiększenia kąta wydruku również można uzyskać niższą wartość odchyłki płaskości. Na rysunku 8 wybrane wykresy płaskości modeli drukowanych technologią FDM.



Rys. 8. Płaskość próbek wykonanych technologią FDM:
a) próbka nr 3 ($Pd = 90$, $Lt = 0,1^\circ$),
b) próbka nr 6 ($Pd = 90$, $Lt = 0,1^\circ$) [19].

5. Podsumowanie i wnioski

Technologie przyrostowe ze względu na redukcję kosztów drukarek 3D oraz materiałów budulcowych zyskują coraz bardziej na popularności. Początkowo wykorzystywane były głównie do tworzenia prototypów oraz produkcji jednostkowej. Obecnie znajdują zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu oraz w życiu codziennym. Jednym z najważniejszych parametrów technologicznych druku 3D jest kierunek wydruku oraz grubość pojedynczej warstwy materiału budulcowego. Parametry te w sposób znaczący wpływają na dokładność wymiarowo-kształtową wytworzonych elementów, czas ich wydruku oraz ilość zużytego materiału. Dlatego po-

winny być szczegółowo analizowane. Głównym celem badań przedstawionych w artykule była ocena wpływu grubości pojedynczej warstwy materiału budulcowego oraz kierunku wydruku na parametry chropowatości 3D oraz odchyłki płaskości. Badania pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków badawczych:

- Technologia Fused Deposition Technology przy uwzględnieniu odpowiednich parametrów technologicznych może być stosowana do produkcji elementów cienkościennych.
- Badając parametry chropowatości powierzchni 3D próbek wydrukowanych przy zmiennych parametrach $Pd = 0^\circ$ i $Pd = 90^\circ$ notujemy wzrost wartości parametrów Sa i Sz przy zwiększeniu grubości warstwy nakładanego materiału z $Lt = 0,1 \text{ mm}$ na $Lt = 0,2 \text{ mm}$, natomiast przy kierunku wydruku $Pd = 45^\circ$ odnotowano spadek wartości tych parametrów.
- Analiza topografii powierzchni elementów przy użyciu metod koherentnej interferometrii wiąże się z występowaniem pewnej ilości punktów niezmiernych, co wpływa na ostateczny obraz izometryczny badanych powierzchni. W szczególności jest to widoczne dla elementów wykonanych przy użyciu technologii FDM. W związku z tym, rekomendowane są stykowe metody pomiaru chropowatości powierzchni.
- W czasie drukowania modeli zauważono chwilowe zatrzymanie się i jednoczesne cofnięcie się materiału budulcowego w ekstruderze. Powoduje to powstawanie narostów pomiędzy nakładanymi warstwami, które mogą wpływać na kształtowanie się płaskości elementów drukowanych.
- Analizując odchyłkę płaskości modeli drukowanych, kluczowym parametrem technologicznym okazała się grubość pojedynczej warstwy materiału Lt . Badania wykazały, że zastosowanie większych warstw pojedynczego materiału redukowało wartości odchyłki płaskości.
- Zastosowanie kąta wydruku wynoszącego $Pd = 45^\circ$ w znaczny sposób skraca czas wydruku pojedynczego elementu oraz redukuje zużycie materiału budulcowego. W przypadku prototypów, gdzie głównym kryterium jest koszt i czas wytworzenia sztuki próbnej rekomendowane jest zastosowanie kąta wydruku $Pd = 45^\circ$ oraz grubości pojedynczej warstwy $Lt = 0,2 \text{ mm}$.

Czynności serwisowe związane z przygotowaniem drukarki 3D oraz maszyny współrzędnościowej zostały częściowo sfinansowane z projektu Lider XI o numerze LIDER/44/0146/L-11/19/NCBR/2020, pt. „Ocena przydatności przyrostowych technologii wytwarzania do szybkiej budowy modeli odlewniczych” finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

- [1] Adamczak S., Zmarzły P., Koziar T., Gogolewski D., *Analysis of the Dimensional Accuracy of Casting Models Manufactured By Fused Deposition Modeling*

- Technology, 23rd International Conference Engineering Mechanics 2017, 66–69, 2017.
- [2] Budzik G., Tomaszewski K., Soboń A., *Opportunities for the application of 3D printing in the critical infrastructure system*, Energies., 15, 2022, <https://doi.org/10.3390/en15051656>.
- [3] Bustillo A., Pimenov D.Y., Mia M., Kapłonek W., *Machine-learning for automatic prediction of flatness deviation considering the wear of the face mill teeth*, J. Intell. Manuf., 32, 895–912, 2021, <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01645-3>.
- [4] Cichoń K., Brykalski A., *Zastosowanie drukarek 3D w przemyśle*, Prz. Elektrotechniczny, 93, 2017, <https://doi.org/10.15199/48.2017.03.36>.
- [5] Dodziuk H., *Druk 3D/AM. Zastosowania oraz skutki społeczne i gospodarcze*, PWN, Warszawa, 2019.
- [6] Dzierwa A., Pawlus P., Zelasko W., *The influence of disc surface topography after vapor blasting on wear of sliding pairs under dry sliding conditions*, Coatings, 10, 2, 2020, <https://doi.org/10.3390/coatings10020102>.
- [7] Klamka M., *Ocena wpływu wybranych parametrów technologii FDM na topografie powierzchni drukowanych wybranymi technologiami przyrostowymi*, Praca dyplomowa magisterska, Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego, Politechnika Świętokrzyska, 2022.
- [8] Kozior T., Bochnia J., Gogolewski D., Zmarzły P., Rudnik M., Szot W., Szczygieł P., Musiałek M., *Analysis of metrological quality and mechanical properties of models manufactured with photo-curing PolyJet Matrix technology for medical applications*, Polymers, 14, 3, 2022, <https://doi.org/10.3390/polym14030408>.
- [9] Kozior T., Bochnia J., Zmarzły P., Gogolewski D., Mathia T.G., *Waviness of freeform surface characterizations from austenitic stainless steel (316L) manufactured by 3D printing-selective laser melting (SLM) technology*, Materials, 13, 19, 2020, <https://doi.org/10.3390/ma13194372>.
- [10] MacDonald E., Salas R., Espalin D., Perez M., Aguilera E., Muse D., Wicker R.B., *3D printing for the rapid prototyping of structural electronics*, IEEE Access, 2, 2014, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2014.2311810>.
- [11] Maloy R., Trust T., Kommers S., Malinowski A., La-Roche I., *3D Modeling and Printing in History/Social Studies Classrooms: Initial Lessons and Insights*, Contemp. Issues Technol. Teach. Educ., 17, 2017.
- [12] Mikó B., *Assessment of flatness error by regression analysis*, Measurement, 171, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108720>.
- [13] Paszkiewicz A., Bolanowski M., Budzik G., Przeszłowski Ł., Oleksy M., *Process of creating an integrated design and manufacturing environment as part of the structure of industry 4.0*, Processes, 2020, <https://doi.org/10.3390/PR8091019>.
- [14] Pawlus P., Reizer R., Wieczorowski M., *Comparison of results of surface texture measurement obtained with stylus methods and optical methods*, Metrology and Measurement Systems, 25, 3, 589–602, 2018, <https://doi.org/10.24425/123894>.
- [15] Peed E., Lee N., *3D Printing, History of*, [in:] Encycl. Comput. Graph. Games, 2019, https://doi.org/10.1007/978-3-319-08234-9_279-2.
- [16] Rayna T., Striukova L., *From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation*, Technological Forecasting and Social Change, 102, 214–224, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.023>.
- [17] Szczesiak R., Kowalik M., Cader M., Pyrzanowski P., *Parametric numerical model for predicting mechanical properties of structures made with FDM technology from polymeric materials*, Polimery, 63, 9, 626–632, 2021, <https://doi.org/10.14314/polimery.2018.9.7>.
- [18] Szwej W., *Ocena jakości warstwy wierzchniej elementów wykonanych wybranymi technologiami przyrostowymi*, Praca dyplomowa magisterska, Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego, Politechnika Świętokrzyska, 2022.
- [19] Wróblewska E., *Ocena odchyłki płaskości elementów wykonanych technologią przyrostową Fused Deposition Modeling*, Praca dyplomowa magisterska, Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego, Politechnika Świętokrzyska, 2022.