

PRZEGLĄD DOSTĘPNEGO OPROGRAMOWANIA DO STEROWANIA ŚCIEŻKĄ PRACY GŁOWICY DLA PERSONALNYCH DRUKAREK PRZESTRZENNYCH

REVIEW OF AVAILABLE SOFTWARE FOR PATH CONTROL OF PERSONAL 3D PRINTERS TOOLHEADS

Michał Olejarczyk

Konrad Gruber

Grzegorz Ziółkowski

Politechnika Wrocławska

Wydział Mechaniczny

Katedra Technologii Laserowych, Automatykacji i Organizacji Produkcji

ul. Łukasiewicza 5

50-370 Wrocław

e-mail: michal.olejarczyk@pwr.edu.pl

e-mail: konrad.gruber@pwr.edu.pl

e-mail: grzegorz.ziolkowski@pwr.edu.pl

Abstract: Personal 3D printers, based on fused deposition modeling (FDM) technology, established a relatively new category in Additive Manufacturing (AM) systems. Adding material layer by layer allows to manufacture complex parts at low cost. Recent dynamic demand growth in this segment forced 3D printer manufacturers to simultaneously develop machines and dedicated software, which enables to convert CAD 3D model to toolhead path control codes (G-code). The work presented in this paper compares currently available 3D printers software: Cura, Slic3r, Voxelizer, Matter Control. The aim of presented study was to investigate dimensions and shape precision of test specimens using computed tomography (CT). Specimens used in the study were designed to capture a representative set of geometrical features for comparison. Specimens were made of PLA (polylactide), a widely used FDM material, on Hbot 3D (personal 3D printer from 3D Printers Ltd, Poland). CT systems enable to measure external and internal dimensions with high precision. In the study, analysis of specimens external geometry, including diameters, distances and angles measurement, was performed. Standard deviation was estimated through comparison of reference values from CAD model with measurement results. In order to analyze the internal geometry, cross-section verification was done. The fundamental result of the paper demonstrates the influence of different 3D printer software on geometrical accuracy. Although the most important process parameters for each software were set up in the same way, there were significant differences between the models. Based on these results, it is concluded that the best results were obtained using Cura software.

Keywords: personal 3D printers, Fused deposition modeling (FDM), computed tomography (CT), 3D printers software.

Wprowadzenie

Grupa technologii przyrostowych (*Additive Manufacturing*; AM) pozwala na kształtowanie modeli rzeczywistych poprzez dodanie

materiału w sposób warstwowy. W przeciwieństwie do konwencjonalnych metod ubytkowych czy kształtujących, istnieje tu możliwość uzyskania kompleksowych obiektów w jednym procesie wytwórczym.

Choć obecnie w technologiach tych główny nacisk kładzie się na wytwarzanie finalnych wyrobów to jednak podstawowym obszarem ich zastosowań wciąż pozostaje prototypowanie wspomagające początkowe etapy cyklu rozwoju produktu.

Drukarki personalne są stosunkowo nową kategorią w systemach AM, przeznaczone dla odbiorców indywidualnych. Obecnie do tej grupy zalicza się systemy, których koszt zakupu nie przekracza pięciu tysięcy dolarów. Pomimo różnic w jakości i zakresie zastosowań wyrobów, drukarki personalne śmiało rywalizują z komercyjnymi systemami AM na polu szybkiego prototypowania. Zauważalny trend rozwoju w tym obszarze notuje się od sześciu lat, choć pierwsze tego typu urządzenie zbudowano w roku 2004 z inicjatywy Adriana Bowyer'a z Uniwersytetu Bath znane szerzej jako projekt RepRap (*Replicating Rapid-prototyper*). Dynamika rynku drukarek personalnych w porównaniu do roku poprzedniego w 2013 roku wyniosła 104,2%, co przekłada się na 72 503 sprzedanych urządzeń i przychód na poziomie 87,6 miliona dolarów. Co więcej, dochody ze sprzedaży tej klasy urządzeń stanowią już 9% całego sektora maszynowego AM [1]. Taki rozwój urządzeń wymusił równoległy rozwój dedykowanego oprogramowania, które pozwala na konwersję obiektów zapisanych w systemach CAD3D do postaci kodów sterujących ścieżką pracy głowicy (G-code). Od programu sterującego zależy bowiem jakość budowanych modeli oraz czas i tym samym ekonomika procesu. Publikacja ta jest próbą prześledzenia najnowszych trendów oraz porównania możliwości powszechnie dostępnego oprogramowania t.j. Cura, Slic3r, Voxelizer, Matter Control.

Opis zagadnienia

Technologia FDM

Przeważająca większość drukarek personalnych działa w technologii *Fused Deposition Modeling* (FDM). Autorem tej metody jest S. Scott Crump (U.S. Patent 5,121,329, 9 czerwca, 1992). Ta metoda osadzania topionego materiału, polega na nakładaniu warstwa po warstwie materiału termoplastycznego. Głowica, stanowiąca najważniejszy podzespół, podgrzewa materiał doprowadzając go do stanu półpłynnego tuż powyżej temperatury topnienia. Sterowalny trójosiowy układ kinematyczny pozwala na nałożenie materiału w

żądane miejsce. Na początku odkładanie materiału następuje na odpowiedniej płycie/platformie. Po wykonaniu zadania w jednej płaszczyźnie roboczej następuje jej przesunięcie o grubość warstwy w kierunku normalnym. Kolejna warstwa nakładana jest bezpośrednio na warstwę poprzednią, gdzie stygnąc trwale się łączy. Sukcesywne powtarzanie niniejszego cyklu daje w efekcie kompletny model. W celu zapewnienia stabilności przebiegu procesu stosuje się podgrzewaną komorę lub platformę. Ma to za zadanie zmniejszyć skurcz materiału po wyjściu z głowicy oraz zwiększyć jego adhezję. Cechą charakterystyczną jest stosowanie materiału podporowego w celu uzyskania konstrukcji nawisowych oraz niwelacji podstawy wydruku. W rozwiązaniach drukarek personalnych jest to opcjonalnie, bowiem materiałem podporowym najczęściej jest ten sam materiał modelowy, który po zakończonym procesie usuwany jest mechanicznie. Modele uzyskane tą techniką mogą być wykonane z: ABS, PC, PPSU, PC-ABS, PC-ISO, PA, czy PLA [2].

Przepływ danych w systemach Additive Manufacturing

Każdy proces w technologiach przyrostowych możemy rozpatrywać w następujących krokach: modelowanie obiektów typu *solid* w systemach CAD3D, teselacja modelu i zapisanie go do formatu STL (*STereoLithography*), zapis warstw do pliku SLI, budowa modelu fizycznego. Obecnie większość systemów do komputerowego wspomaganego projektowania posiada możliwość zapisu modelu do postaci siatki trójkątów. Najpowszechniejszy i ogólnie przyjęty format plików STL za pomocą zbioru tzw. trójkątnych faset aproksymuje powierzchniowo obiekt wygenerowany w systemie CAD. Podczas matematycznego podziału powierzchni na płaskie trójkąty, zapisywane są współrzędne x , y , z każdego z wierzchołków trójkąta. Wielkości te podaje się w globalnym układzie współrzędnych kartezjańskich. Oprócz powyższych danych, w pliku STL zapisywany jest również wektor normalny do powierzchni każdego trójkąta siatki. Jego zwrot jednoznacznie określa kierunek zewnętrznej strony powierzchni opisywanego modelu (reguła śruby prawoskrętnej). Drugą ważną regułą jest reguła sąsiedztwa mówiąca, że każda faceta musi mieć wspólne dwa wierzchołki z sąsiednią i każda krawędź facety musi być współdzielona przez inną. W konsekwencji, gdy zostaną

ponumerowane wierzchołki tych facet zwrot współdzielonej krawędzi jest wtedy przeciwny. Reguły te zapewniają ciągłość i poprawność modelu, który jest przybliżeniem powierzchni modelu CAD w akceptowalnym przedziale tolerancji Chordala [3].

Slicing pozwala na podział modelu CAD na sekwencje poszczególnych przekrojów utworzonych przez przecięcie modelu równoległymi płaszczyznami przebiegającymi w kierunku budowy oddalonymi od siebie o zadaną grubość warstwy. W rezultacie poprowadzenia płaszczyzny przez model w postaci siatki trójkątów otrzymujemy zbiór punktów na obwodzie przyszłego przekroju, po połączeniu których otrzymamy kontur. Przekrój ten następnie należy wypełnić odcinkami zamykającymi się w jego obrębie. Tak poprowadzone odcinki będą ostatecznie odpowiadać ścieżce pracy głowicy [4].

Przebieg badań na potrzeby weryfikacji oprogramowania do sterowania ścieżką pracy głowicy

Celem badań było porównanie wybranych programów do sterowania ścieżką pracy głowicy dla personalnych drukarek przestrzennych. Oprogramowanie wykorzystane w czasie badań pobrano bezpośrednio ze stron internetowych producentów, zapewniając tym samym najnowszą wersję każdego z programów. W badaniach pod uwagę wzięto następujące programy:

- Cura – wersja 14.09 (z 09.2014 r.). Cura jest jednym z najpopularniejszych programów tego typu, obecna na rynku od 2011 roku, rozwijana przez holenderską firmę Ultimaker.
- Slic3r – wersja 1.1.7 (z 09.2014 r.). Najpopularniejszy program tego typu, opracowana przez niezależnych autorów – Allesandro Ranellucci’ego (główny pomysłodawca i programista) i innych w ramach projektu RepRap.
- Voxelizer – wersja 1.0 (z 09.2014 r.). Rozwijany od niedawna przez wrocławskiego producenta drukarek 3D – firmę zMorph.
- Matter Control – wersja 1.1 (z 10.2014r.). Nowość na rynku, dlatego nie zdobyło jeszcze dużej popularności.

Wykonane badania polegały na analizie geometrii próbek wykonanych w technologii FDM na urządzeniu klasy personalnych drukarek 3D – Hbot 3D, produkowane przez wrocławską

firmę 3D Printers sp. z o.o. Do wytworzenia próbek użyto polilaktydu (PLA), czyli termoplastycznego tworzywa sztucznego, używanego jako podstawowy materiał w większości personalnych drukarek 3D dostępnych na rynku. PLA zyskał popularność ze względu na swoje właściwości, takie jak wysokie właściwości mechaniczne (wytrzymałość na rozciąganie dochodząca nawet do 60-100 MPa, w zależności od składu i masy molowej polimeru), biodegradowalność (materiał otrzymuje się m.in. z mączki kukurydzianej) czy też technologiczność (np. stosunkowo niska temperatura przetwarzania, niski skurcz przetwórczy, co implikuje brak konieczności posiadania przez urządzenie podgrzewanego stołu roboczego lub podgrzewanej komory) [5].

Próbki testowe zostały zaprojektowane w taki sposób, aby na pojedynczym obiekcie umieścić reprezentatywny zestaw cech geometrycznych do porównania. Na rys. 1 przedstawiono geometrię próbek wraz z zaznaczeniem charakterystycznych wymiarów i cech geometrycznych porównanych w późniejszych badaniach. Zamodelowano następujące elementy:

- Stożek, kula, krawędź zaokrąglona, krawędź fazowana, równia pochyła o zmiennym kącie nachylenia – celem sprawdzenia odwzorowania powierzchni pochyłych,
- Cienkie ścianki, jako zestaw płytek o różnej grubości – celem zbadania wpływu grubości ścianki zadanej na grubość rzeczywistą,
- Otwory – o przekrojach kołowych i sześciennych, o osiach umieszczonych w pozycji normalnej i równoległej do płaszczyzny stołu roboczego drukarki – celem sprawdzenia dokładności odwzorowania wymiarów wewnętrznych,
- Łuk – celem sprawdzenia odwzorowania geometrii o dużych pochyleniach,
- Obiekty o ostrych kątach – celem zbadania ewentualności tworzenia się niecelowych zgrubień materiału w miejscach gwałtownych nawrotów głowicy,
- Mostki, czyli płaszczyzny niepodparte, przez które urządzenie „rozciąga” materiał jednocześnie szybko go chłodząc – celem sprawdzenia algorytmów generowania tego typu struktur przez oprogramowanie.
- Zestaw walców o różnych średnicach – celem zmierzenia odchyłek na obiektach o kształtach cylindrycznych.

- Grubość ścianek (powłoki bocznej): 0,8 mm – grubość bocznych ścianek modelu. Jest to zazwyczaj wielokrotność średnicy dyszy głowicy wytłaczającej stosowanej w urządzeniu.
- Rodzaj wypełnienia: siatka – rodzaj wypełniania określa geometrię struktury wewnętrznej modelu. Z przyczyn ekonomicznych większość modeli w technologii FDM buduje się jako elementy cienkościenne wypełnione wewnątrznie określoną strukturą przestrzenną nadającą elementom odpowiednią wytrzymałość, równocześnie zmniejszając czas procesu oraz ilość zużytego materiału.
- Procent wypełnienia: 30% – parametr określa objętościowy stosunek wypełniania do całości przestrzeni zajmowanej przez to wypełnienie.
- Ogólna prędkość druku: 30 mm/s – prędkość, z jaką porusza się głowica w czasie normalnych ruchów roboczych.
- Prędkość obrysów: 30 mm/s – prędkość, z jaką porusza się głowica w czasie wykonywania bocznej powłoki zewnętrznej obiektu.
- Prędkość wypełnienia: 50mm/s – prędkość, z jaką porusza się głowica w czasie wykonywania wypełnienia.
- Prędkość pierwszej warstwy: 15 mm/s – prędkość, z jaką porusza się głowica w czasie wykonywania pierwszej warstwy modelu.
- Prędkość ruchów ustawczych: 100 mm/s – prędkość, z jaką porusza się głowica w czasie wykonywania ruchów ustawczych.
- Prędkość retrakcji: 35 mm/s – prędkość, z jaką głowica drukująca cofa materiał podczas przejazdu pomiędzy poszczególnymi, niepołączonymi na danej warstwie elementami modelu. Parametr nazywany jest retrakcją.
- Długość retrakcji: 1,2 mm – długość cofniętego materiału podczas wykonywania retrakcji - czyli cofania materiału wykonywanego podczas przejazdu pomiędzy poszczególnymi, niestykającymi się na danej warstwie elementami modelu.
- Temperatura głowicy: 210°C – temperatura, do której podgrzewany jest materiał w celu jego wytłoczenia przez głowicę urządzenia.
- Temperatura stołu: 70°C – temperatura, do której podgrzewany jest stół roboczy urządzenia w celu uzyskania odpowiedniej adhezji modelu.
- Moc wentylatorów głowicy: 100% – parametr określający prędkość chłodzenia modelu bezpośrednio przy głowicy urządzenia powodujący odpowiednie utwardzenie tłocz-

nego tworzywa w celu uzyskania pożądanego kształtu budowanego obiektu.

- Średnica dyszy: 0,4 mm – wyjściowa średnica dyszy głowicy wytłaczającej drukarki.

- Średnica filamentu: 2,85 mm – nominalna średnica drutu z materiału modelowego, będącego materiałem wejściowym do procesu.

- Mnożnik wytłaczania ogólny: 1 – dodatkowy parametr pozwalający sterować ilością tłoczonego materiału.

- Mnożnik wytłaczania pierwszej warstwy: 2 – dodatkowy parametr pozwalający sterować ilością tłoczonego materiału w stosunku do standardowego przepływu materiału przez głowicę. Parametr ten odpowiada za odpowiednią adhezję elementu do powierzchni roboczej urządzenia.

Następnie zbudowane próbki poddano analizie geometrii z wykorzystaniem tomografu komputerowego CT Metrotom 1500. Deklarowany przez producenta maksymalny dopuszczalny błąd graniczny urządzenia (MPPE) wynosi $9+L/50 \mu\text{m}$, gdzie L jest mierzoną długością. W ocenie oprogramowania uwzględniono również stopień optymalizacji instrukcji sterujących (rozmiar pliku .gcode), a także porównano szacowaną i rzeczywistą wagę próbek. Wyniki przedstawiono w kolejnym rozdziale.

Wyniki badań cech geometrycznych próbek

Zastosowanie tomografu komputerowego pozwoliło na przeprowadzenie precyzyjnych pomiarów geometrii otrzymanych próbek. Analizę geometrii próbek podzielono na trzy etapy: pomiary średnic (oznaczone jako D), pomiary odległości (oznaczone jako L) oraz pomiary odwzorowania wartości kątowych (oznaczone jako K) – cechy geometryczne próbek wybrane do pomiarów zaznaczono na rys. 1. Na podstawie porównania wartości referencyjnych (zadanych w modelu CAD próbek) z wartościami otrzymanymi z pomiarów, wyznaczono średnie bezwzględne odchylenie wymiaru rzeczywistego. Częściowe wyniki pośrednie (dla wybranych cech geometrycznych) oraz całościowe wyniki średnie zaprezentowano w tabeli 1. Tym samym określono dokładność odwzorowania wymiarów geometrycznych każdego testowanego oprogramowania. Dla średnic, najlepsze odwzorowanie geometrii próbek uzyskano dla Voxelizer'a, a najgorsze dla Slic3r'a. W przypadku odległości

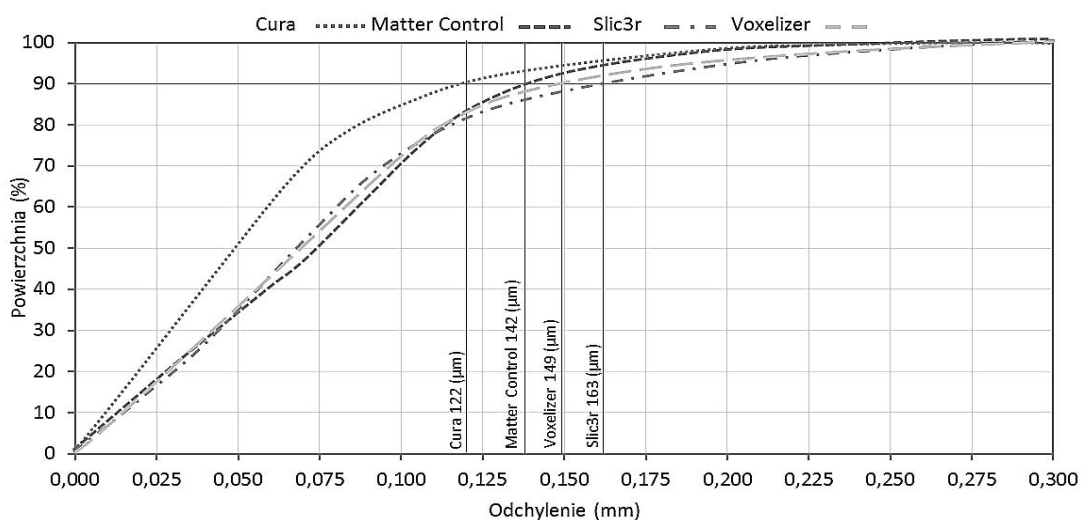
najdokładniejsza okazała się Cura, a najmniej dokładny Voxelizer. W przypadku odwzorowania kątów najdokładniejszy był Matter Control, a najmniej dokładny Slic3r. Różnice pomiędzy poszczególnymi wynikami można uznać za małe, ale znaczące.

Na rys. 3. przedstawiono skumulowanych histogram odchyłek. Na wykresie oznaczono krzywe dla wszystkich programów, z zaznaczeniem punktu, w którym 90% wszystkich odchyłek jest równa lub mniejsza od zaznaczonej wartości. Dzięki takiemu przedstawieniu danych, wyraźnie można zaobserwować, jak rozkłada się dokładność odwzorowania cech

geometrycznych w przypadku każdego z programów od powierzchni referencyjnej. Krzywa dla programu Cura osiąga ten punkt już dla wartości 0,122 mm. Dodatkowo na wykresie jej przebieg wyraźnie nie pokrywa się z pozostałymi. Przebieg pozostałych krzywych ma podobny charakter, różnica można zaobserwować w części kumulującej największe odchyłki. Z wykresu można odczytać, że najwięcej cech geometrycznych o dużych odchyłkach charakteryzuje model z programu Slic3r.

Tabela 1. Wartości zmierzonych cech geometrycznych i odchyłki od wartości referencyjnych dla wybranych programów

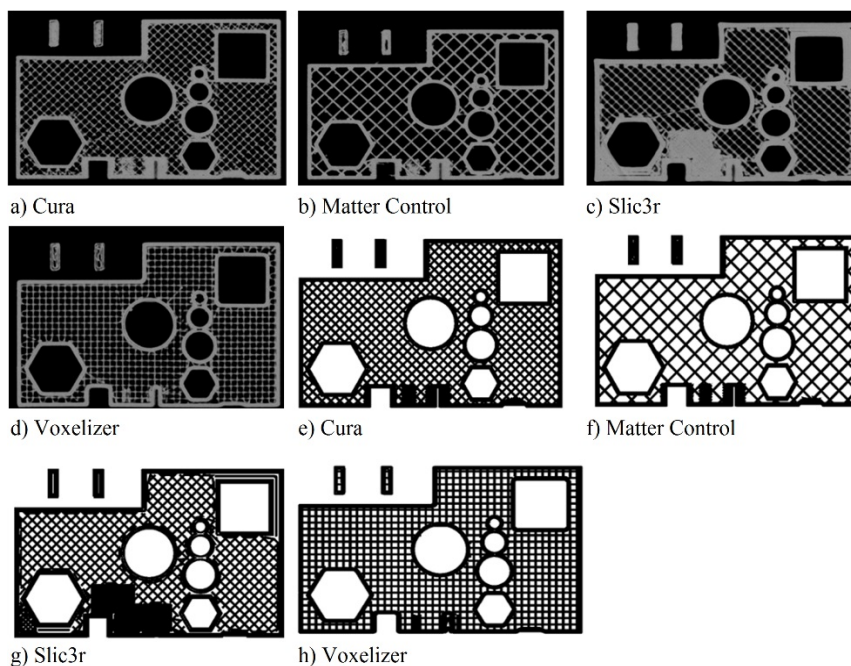
Wymiar	Referencja	Wartość rzeczywista				Bezwzględne odchylenie od wartości referencyjnej			
		Cura	Matter Control	Slic3r	Voxelizer	E_Cura	E_Matter Control	E_Slic3r	E_Voxelizer
Średnice [mm]									
D1	8	7,983	8,042	8,042	7,978	0,017	0,042	0,042	0,022
D2	5	4,945	4,98	5,027	4,943	0,055	0,02	0,027	0,057
D3	2	2,044	1,887	2,117	1,874	0,044	0,113	0,117	0,126
Średnie bezwzględne odchylenie od wartości referencyjnej						0,1421	0,1206	0,1863	0,0935
Odległości [mm]									
L1	6	5,991	5,958	5,881	5,999	0,009	0,042	0,119	0,001
L2	2	2,01	2,019	2,074	2,037	0,01	0,019	0,074	0,037
L3	1,5	1,519	1,529	1,617	1,552	0,019	0,029	0,117	0,052
Średnie bezwzględne odchylenie od wartości referencyjnej						0,0506	0,0741	0,0835	0,1134
Katy [°]									
A1	60	59,248	59,503	62,597	54,469	0,752	0,497	2,597	1,531
A2	45	44,664	44,45	45,063	45,518	1,336	0,55	0,063	0,518
A3	30	29,615	29,729	31,309	29,349	0,385	0,271	1,309	0,651
Średnie bezwzględne odchylenie od wartości referencyjnej						0,8243	0,4393	1,323	0,9



Rys. 3. Skumulowany histogram odchyłek. Model z Cura – 90% odchyłek powierzchni znajduje się w odległości do 122 µm i odpowiednio model z Matter Control: 142 µm, model z Slic3r: 163 µm, oraz model z Voxelizer: 149 µm

Pomiary tomografią komputerową prócz pomiaru wymiarów zewnętrznych umożliwiając również badanie nieniszczące struktur wewnętrznych. W ramach analizy geometrii próbek, porównano również przekroje zmierzone z przekrojami teoretycznymi. Na rys. 4. zaprezentowano przekroje rzeczywiste oraz przekroje teoretyczne. Pomiaru dokonano na wysokości 6,5 mm licząc od podstawy próbek testowych. Pomimo iż dla każdego z programów ustawiono gęstość wypełnienia na

poziomie 30%, gęstość siatki dla Matter Control jest inna niż w przypadku pozostałych trzech próbek. Można również obserwować różnicę w domyślnych sposobach układania wypełnienia. Wykonane przekroje rzeczywiste dobrze obrazują również dokładność odwzorowania obrysów zewnętrznych w modelach rzeczywistych. W tym przypadku znacząco od reszty odstaje Slic3r – program źle radzi sobie z odwzorowaniem kątów prostych.



Rys. 4. Widok 2D przekroju z CT modelu rzeczywistego (a-d) i teoretyczne (e-h) ścieżki głowicy otrzymane z: a), e) Cura; b), f) Matter Control; c), g) Slic3r; d), h) Voxeler.

W wynikach badań uwzględniono również wielkość pliku .gcode (świadcząca o stopniu optymalizacji kodu sterującego), oraz rzeczywistą wagę próbek (mierzoną na wadze precyzyjnej XYZ, podano średnią z 5 pomiarów). Wyniki prezentowały się następująco (kolejno rozmiar pliku i waga):

- Cura: 2 402 KB i 13,05 g,
- Matter Control: 1 575 KB i 12,07 g,
- Slic3r: 1 972 KB i 11,13 g
- Voxeler: 3 082 KB i 10,13 g.

Otrzymane różnice w wielkości plików sterujących są duże – przykładowo kod z Matter Control zajmuje 2 razy mniej miejsca na dysku, niż kod z Voxelizera. Również waga próbek nie jest jednakowa, i różni się nawet o 3 g (różnica pomiędzy Cura, a Voxeler) pomimo wybrania takich samych ustawień, które mogą wpływać

na ilość zużywanego podczas procesu materiału (procent wypełnienia, grubość obrysów, wysokość dolnej i górnej warstwy, itd.).

Podsumowanie

Na podstawie otrzymanych wyników wyciągnięto następujące wnioski cząstkowe:

- Dokładność geometryczna modeli zależy od programu sterującego (około 25% różnica pomiędzy najniższą a najwyższą odchyłką dla 90% powierzchni). Największą dokładność uzyskano dla Cura, a najmniejszą dla Slic3r.
- Największą dokładnością odwzorowania poszczególnych grup cech geometrycznych charakteryzowały się: Voxeler dla średnic, Cura dla odległości oraz Matter Control dla kątów.

- Pomimo tych samych parametrów stopnia wypełnienia, dla Matter Control otrzymano inną gęstość siatki wypełniania, niż dla pozostałych programów.

- Dla tego samego modelu wyjściowego i tych samych ustawień, otrzymano różne wagi próbek. Stopień wypełnienia nie jest więc jednoznacznie określony, a uzyskane wyniki zależą ściśle od wybranego oprogramowania.

- Nie zaobserwowano jednoznacznej korelacji pomiędzy wielkością kodu sterującego, a dokładnością wykonania modelu.

- Istotnym czynnikiem dla zachowania poprawności wymiarowo-kształtowej jest sposób odwzorowania konturu zewnętrznego. Najlepsze rezultaty otrzymano dla oprogramowania Cura. Przeprowadzone badania pokazały, że rodzaj stosowanego oprogramowania sterującego ma znaczący wpływ na otrzymywane rezultaty. Pomimo tego, iż najważniejsze parametry procesu dla każdego z programów ustawiono tak samo, poszczególne modele różniły się znacząco. Na podstawie uzyskanych wyników,

stwierdza się, że najlepsze rezultaty uzyskano dla oprogramowania Cura (najlepsze wodzorowanie odległości, najmniejsze średnie odchyłki skumulowane, najlepsza jakość powierzchni zewnętrznej i odwzorowanie konturu zewnętrznego). Jednocześnie jednak, w przypadku gdy kluczowym elementem staje się inna cecha geometryczna, taka jak średnica lub kąt, zaleca się zastosowanie kolejno Voxelizer oraz Matter Control.

Badania wykazały również, że dokładność modeli uzyskiwana za pomocą powszechnie dostępnego, darmowego oprogramowania sterującego do personalnych drukarek 3d, pozwala na budowę modeli o dużej precyzji. Na tej podstawie można zaryzykować stwierdzenie, że odwzorowanie wymiarowo-kształtowe jest na akceptowalnym poziomie, aby takie urządzenia stosować do prototypowania elementów konstrukcji przy codziennej praktyce inżynierskiej, a także do wykonywania mniej odpowiedzialnych elementów funkcjonalnych.

Literatura

1. Wohlers, T.T., Wohlers Report 2014, 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Wohlers Associates Inc., 2014, pp. 99-100, pp. 123-124. ISBN 978-0-9913332-0-2.
2. Gebhardt, A., Understanding Additive Manufacturing, Hanser Publishers. Monachium, 2011, pp. 45-47, ISBN 978-3-446-42552-1.
3. Chua, C.K, Chow, K.Y., Generation of three-dimensions shapes in CAD/CAM system using art-to-part technique, Computer aided and integrated manufacturing systems, Word Scientific Publishing, Singapur, 2003, (Vol.4), pp. 12-15, ISBN 981-238-980-6.
4. Bártolo, P.J., Stereoithography. Materials, Processes and Applications, Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2011, pp. 4-6, ISBN 978-0-387-92903-3.
5. Nowak, B., Pająk, J., Biodegradacja Polilaktydu (PLA), *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, 2010, Vol. 12 nr 2 (2010), s. 1–10, ISSN 1733-4381.

Zadanie współfinansowane ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego