

Adam PONIKIEWSKI¹, Damian KOLNY², Robert DROBINA³

Opiekun naukowy: Robert DROBINA

ANALIZA PROCESU WYTWARZANIA ADDYTYWNEGO - REALIZACJA ZAŁOŻEŃ (CZĘŚĆ II)

Streszczenie: W artykule przedstawiono praktyczną aplikację druku addytywnego w obszarze zastosowania laboratoryjnego. Zrealizowany projekt stanowi kompleksową instrukcję dotyczącą przygotowania i prowadzenia procesu druku 3D w warunkach laboratoryjnych. Praca zakresem obejmowała przygotowanie modelu, generowanie kodu dla drukarki wraz z jego objaśnieniem, konfigurację drukarki i przygotowanie jej do pracy oraz kontrolę procesu podczas druku.

Słowa kluczowe: stanowisko laboratoryjne, prototypowanie, analiza procesu druku 3D

ANALYSIS OF ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS - IMPLEMENTATION OF ASSUMPTIONS (PART II)

Summary: The article presents a practical application of additive printing in the field of laboratory use. The completed project is a comprehensive instruction on preparing and conducting the 3D printing process in laboratory conditions. The scope of work included preparing the model, generating code for the printer along with its explanation, configuring the printer and preparing it for operation, and controlling the process during printing.

Keywords: laboratory station, prototyping, analysis of the 3D printing process

1. Wprowadzenie – koncepcja projektu

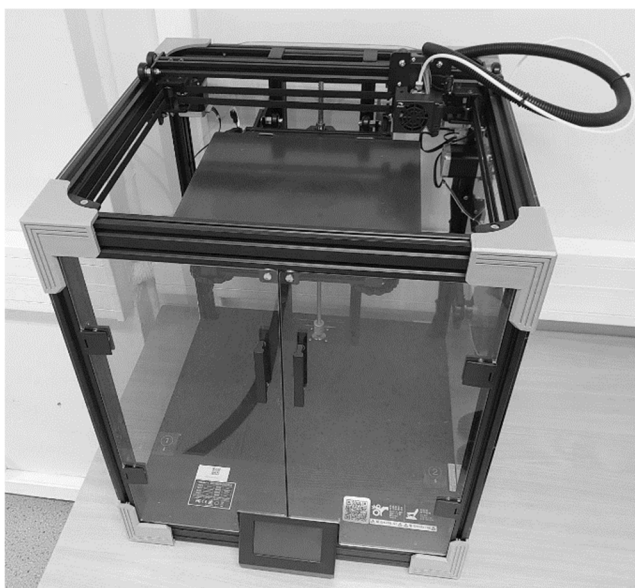
Koncepcja projektu obejmowała wybór modelu 3D, stworzonego wcześniej i przygotowanego w pliku o odpowiednim rozszerzeniu, a także zaprojektowano inny przykładowy model w programie Autodesk Fusion 360 i wyeksportowanie go w odpowiednim formacie. Następnie model został przygotowany pod kątem drukowania w slicerze. Do tego celu wykorzystany został program UltiMaker Cura w wersji 5.3.1. Konfiguracji poddane zostaną najistotniejsze parametry, takie jak materiał (PLA) i rozmiar dyszy (0.4mm) [4,5]. Po dobraniu odpowiednich ustawień

¹ inż., Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Inżynieria Zarządzania Przedsiębiorstwem, aadam.ponikiewski@gmail.com

² mgr inż. Damian Kolny, Uniwersytet Bielsko-Bialski, email: dkolny@ubb.edu.pl

³ dr hab. inż., prof. UBB, Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, email: rdrobina@ubb.edu.pl

slicera, wygenerowany został G-code, który zawierać będzie niezbędne instrukcje ruchu dla drukarki 3D. W tym miejscu G-code zostanie krótko omówiony – tak by użytkownik zapoznał się z kluczowymi poleceniami zawartymi w instrukcji. Kolejnym etapem było przygotowanie samej drukarki do pracy, w tym sprawdzenie napięcia zasilania i wypoziomowanie stołu. Następnie rozpoczęto proces drukowania modelu, który przeprowadzony został na drukarce Creality Ender-6 (rys. 1) w laboratorium Katedry Inżynierii Produkcji Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego.



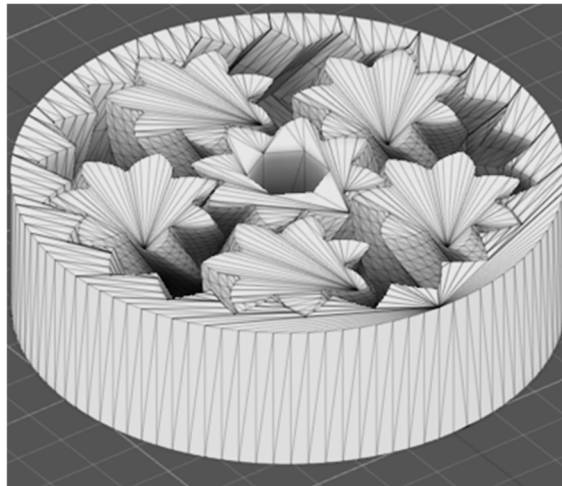
Rysunek 1. Stanowisko laboratoryjne drukarki 3D Creality Ender-6 [8]

Proces druku 3D zaprojektowanego detalu był szczegółowo monitorowany w aspekcie kontroli takich parametrów, jak temperatura stołu oraz nakładanego filamentu. Finalnie wydrukowany element poddano kontroli i weryfikacji obejmującej aspekty estetyczne i praktyczne [1-3]. Wydrukowany obiekt poddano analizie weryfikującej czy elementy są wystarczająco precyzyjnie wydrukowane tak, aby możliwe było ich odpowiednie skonfigurowanie względem siebie. Miało to kluczowe znaczenie dla funkcjonalności wydrukowanego obiektu po zrealizowaniu montażu. Artykuł powstał w ramach prac Koła Naukowego VIP - Virtual Industrial Production na Uniwersytecie Bielsko-Bialskim.

2. Przygotowanie modelu 3D wraz z wygenerowaniem G-codu

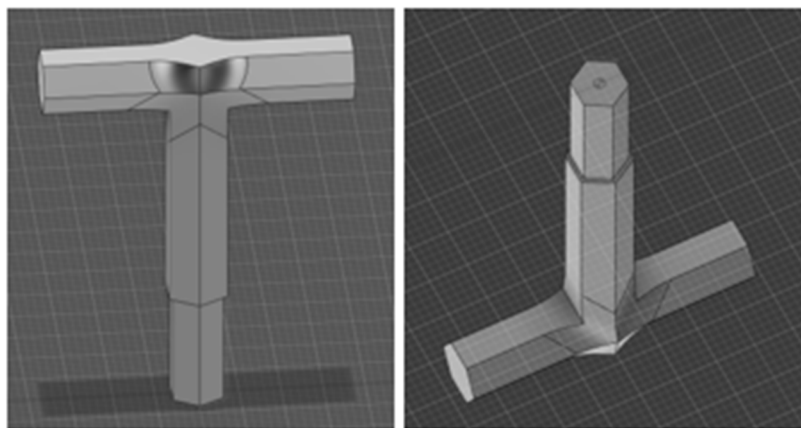
Na potrzeby pracy wybrano gotowy model zespołu kół zębatach znaleziony w popularnym serwisie internetowym [10], na którym znaleźć można pracę innych użytkowników drukarek przestrzennych jak i zwykłych pasjonatów modelowania 3D. Podczas wyboru modelu do wydruku zasugerowano się przede wszystkim tym, by element mógł uwidocznić zalety drukarek FDM [6, 7], na przykład możliwości tworzenia skomplikowanych zespołów ruchomych w jednym, drukowanym

w całości, elemencie. Wybrano model o nazwie “Gear Bearing” łączący w estetyczny sposób kilka elementów, które po wydrukowaniu mogą się względem siebie przemieszczać. Interesującym dla tego przedmiotu jest fakt, że model jest drukowany w całości za jednym razem, a nie każdy element osobno. To jak prezentuje się pobrany model ukazuje rysunek 2.



Rysunek 2. model o nazwie pliku “bearing5” [10]

Z uwagi na to, iż warto przedstawić również sytuację w której to użytkownik sam projektuje element, postanowiono, że do wcześniej przedstawionego elementu zostanie zaprojektowana specjalna rączka (rys. 3), która odpowiednio zamontowana w środkowej zębatce pozwoli na łatwiejszy obrót całego mechanizmu. Model tego chwytu zaprojektowano w programie Autodesk Fusion 360 w licencji edukacyjnej.



Rysunek 3. Model uchwytu zaprojektowany w programie Autodesk Fusion 360 [8]

Zaprojektowany model uchwytu wyeksportowano w rozszerzeniu STL do folderu „pobrane”, wykonując następujące operacje:

- Operacja 1: należy rozwinąć zakładkę “bryły”.
- Operacja 2: należy prawym klawiszem myszy nacisnąć na interesującą użytkownika bryłę, którą chce wyeksportować.
- Operacja 3: należy wybrać opcję “zapisz jako siatkę”, w angielskiej wersji programu spotkać możemy “save as mesh”.

Następnie wyświetla się okno w którym można ustawić format. Wybrać należy opcję “STL (binary)”. Na końcu pokazać się powinno okno samego zapisu. Należy w nim wpisać to jak nazywać będzie się plik, typ pliku powinien być ustawiony jako STL, a na samym dole wybrać można gdzie zapisany zostanie owy plik. W tym przypadku nazwa pliku to “klucz_uchwy_t_raczka”. Profilaktycznie przerwy które przeważnie robi się spacją zastąpiono podkreśleniem dolnym oraz nie użyto polskich znaków (zamiast “rączka” napisano “rączka”) - ma to na celu zminimalizowanie ryzyka powstania błędu podczas zapisu pliku, jak i utrwalenie dobrych nawyków stosowanych podczas obsługi programów inżynierskich. Plik został zapisany w folderze “downloads” czyli “pobrane”.

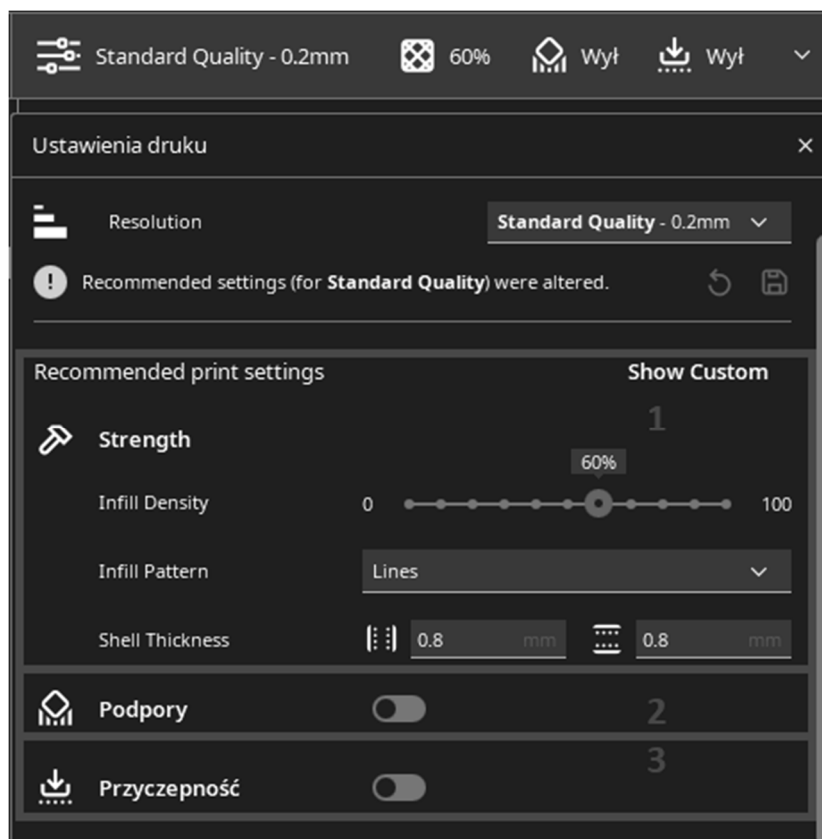
3. Przygotowanie modelu w slicerze pod kątem druku addytywnego

Podstawowa konfiguracja “slicera” oraz dobór parametrów wykonanego druku obejmował szereg działań, z uwagi na ich obszerność zdecydowano się jedynie przedstawić wybrane etapy toku. Przygotowanie modelu do druku pokazano na przykładzie darmowego programu UltiMaker Cura wersji 5.3.1.

Pierwszą operacją po zainstalowaniu programu był wybór stołu roboczego. W tym celu rozwinięto zakładkę wyboru drukarki, a następnie zdefiniowano drukarkę poprzez jej dodanie.

Następnie należy rozwinąć opcję “dodaj drukarkę niesieciową” i znaleźć właściwy model drukarki, na którym będzie drukowany model. Na potrzeby instrukcji zaznaczona zostanie drukarka Creality Ender-6. Aby dodać drukarkę należy kliknąć “Dodaj”. Drugim bardzo ważnym aspektem który należy ustawić jest rozmiar dyszy oraz materiał z którego będzie drukowany element. Na potrzeby tego projektu używany będzie filament PLA [4,5] oraz proces drukowania będzie przebiegał za pomocą dyszy 0.4mm. Należy wprowadzić te parametry do slicera.

Trzecią istotną rzeczą są ustawienia druku. Skupiono się na gęstości wypełnienia “infill density” oraz jego wzorze “infill pattern” cyfra “1” (rys. 4). W prostokącie oznaczonym cyfrą “2” za pomocą suwaka włączyć można podpory, których używa się gdy jakaś część elementu drukowana będzie “w powietrzu”. Suwakiem w ostatnim prostokącie włączyć można dodatkową adhezję dla drukowanego elementu (przydatne dla elementu o małej powierzchni podstawy – dodatkowa adhezja może pomóc na lepszą stabilizację drukowanego obiektu).



Rysunek 4. Rekomendowane ustawienia druku [8]

W zrealizowanym projekcie z uwagi na mały stopień skomplikowania druku “podpory” oraz “przyczepność” (adhezja) nie były w opcji wybrane. Gęstość wypełnienia ustawiono na poziomie 60%, gdyż była to wartość wystarczająca - wydrukowany detal jako zespół nie był poddawany działaniom dużych naprężeń. Po przygotowaniu elementu do druku wygenerowano kod, na podstawie którego został on wydrukowany – wykonano to za pomocą przycisku „potnij”, bądź „slice”. Po pocięciu powinna pojawić się informacja na temat czasu druku oraz tego, ile materiału zostanie zużyte do jego wydrukowania. Na tym etapie zapisano projekt - zostanie on domyślnie zapisany w G-code.

4. Objaśnienie kluczowych instrukcji G-code’a

Z momentem kliknięcia w opcje “potnij” został wygenerowany G-code (rys. 5). Z uwagi na wielkość kodu nie został on przytoczony w całości. Kod elementu przygotowanego do druku na potrzeby tego projektu zajął ponad 294 000 wierszy.

Plik	Edytuj	Wyświetl
G0	X116.119	Y101.413
G0	X116.585	Y102.006
G0	X117.689	Y103.117
G0	X117.267	Y104.23
G0	X116.927	Y104.403
G0	X116.515	Y104.737
G0	X116.036	Y105.335
G0	X115.594	Y106.226
G0	X115.828	Y106.609
G0	X116.792	Y106.827
G0	X117.543	Y106.832
G0	X119.106	Y106.66
G0	X119.637	Y107.757
G0	X119.947	Y106.937
G1	F1500	X121.68 Y108.669 E3397.85867
G0	F9000	X121.462 Y109.017
G1	F1500	X120.107 Y107.662 E3397.92241
G0	F9000	X120.034 Y108.155
G1	F1500	X121.208 Y109.329 E3397.97763
G0	F9000	X120.904 Y109.59
G1	F1500	X120.09 Y108.776 E3398.01592
G0	F9000	X120.394 Y109.646
G1	F1500	X120.59 Y109.842 E3398.02513
;TIME_ELAPSED:12512.439346		
G1	F2700	E3393.02513

```

G91 ;Relative positioning
G1 E-2 F2700 ;Retract a bit
G1 E-2 Z0.2 F2400 ;Retract and raise Z
G1 X5 Y5 F3000 ;Wipe out
G1 Z10 ;Raise Z more
G90 ;Absolute positioning

G1 X0 Y235 ;Present print
M106 S0 ;Turn-off fan
M104 S0 ;Turn-off hotend
M140 S0 ;Turn-off bed

M84 X Y E ;Disable all steppers but extruder

M82 ;absolute extrusion mode
M104 S0
;End of Gcode
;SETTING_3 {"global_quality": "[global_quality]"}
;SETTING_3 #2\\ndefinition = create_gcode_quality_type = [global_quality]
;SETTING_3 n\\n", "extruder_quality": "[extruder_quality]"}
;SETTING_3 d Quality #2\\ndefinition = [global_quality]
;SETTING_3 quality_changes\\nquality_changes = [global_quality]
;SETTING_3 sition = 0\\n\\n[values]

```

Wiersz 294570, kolumna 74

Rysunek 5. G-code pliku przygotowanego do druku [8]

Najczęściej występującą funkcją jest funkcja G0 - jest to ruch jałowy prostoliniowy. Zaraz po nim występują współrzędne punktu, do którego będzie zmierzało narzędzie. Funkcja G1 definiuje ruch narzędzia wg interpolacji liniowej [11].

Wartość występująca przy literze "F" to prędkość posuwu, natomiast parametr "E" oznacza ilość filamentu przechodzącego przez ekstruder. Funkcje zaczynające się literą "M" noszą miano funkcji pomocniczych. M140 S0 to ustawienie temperatury stołu na 0 stopni Celsjusza. Z pozostałych występujących na powyższym rysunku (rys. 5) [11-14]:

- G91 - programowanie przyrostowe (metoda, w której punkt końcowy ruchu narzędzia określony jest na podstawie obecnego położenia narzędzia),
- G90 - programowanie absolutne (metoda, w której położenie końcowego punktu narzędzia określane jest na podstawie punktu zerowego),
- M106 S0 - wyłączenie wentylatorów,
- M104 S0 - wyłączenie hotendu,
- M84 - wyłączenie wszystkich silników,
- M82 - ustawienie osi E w trybie bezwzględny.

5. Realizacja założeń projektowych

5.1. Przygotowanie drukarki do pracy

Na samym początku niezależnie od tego czy drukarka została zakupiona już złożona czy użytkownik sam ją składał przed podłączeniem zasilacza trzeba upewnić się czy drukarka posiada przełącznik do napięcia zasilania. Należy wybrać właściwe napięcie zasilania. W Polsce, zgodnie z normą PN-IEC 60038 obowiązuje napięcie sieciowe o wartości 230V (oraz 50Hz).

5.2. Weryfikacja stanu drukarki i odpowiednie przygotowanie podłoża

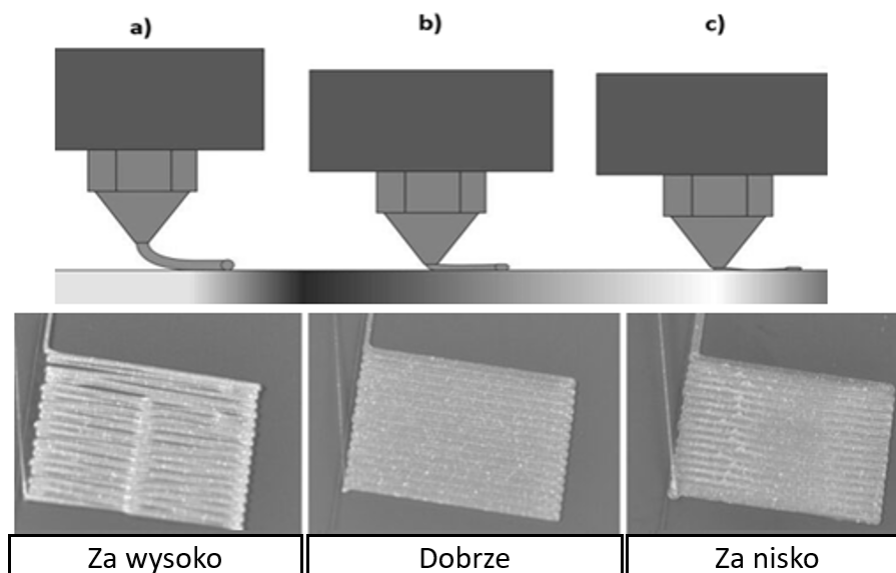
Kolejnym etapem jest weryfikacja stanu drukarki, należy sporządzić dokładne oględziny czy drukarka jest w dobrym stanie i nie posiada uszkodzeń które mogłyby spowodować szkody na zdrowiu lub życiu; szczególnie należy zwrócić uwagę czy spod obudowy nie wystają nieosłonięte żyły przewodów oraz czy elementy grzejne są odpowiednio zabezpieczone - pozwoli to zminimalizować ryzyko porażenia prądem jak i wystąpienia oparzeń.

Zaraz po włączeniu drukarki należy wypoziomować stół. By ułatwić tą czynność warto wyszukać opcję „auto home”. Aktywujemy funkcję z menu, a po zakończonym procesie wyłączamy silniki opcją: „disable stepper” – w tym momencie można regulować stół pokrętkami znajdującymi się pod stołem.

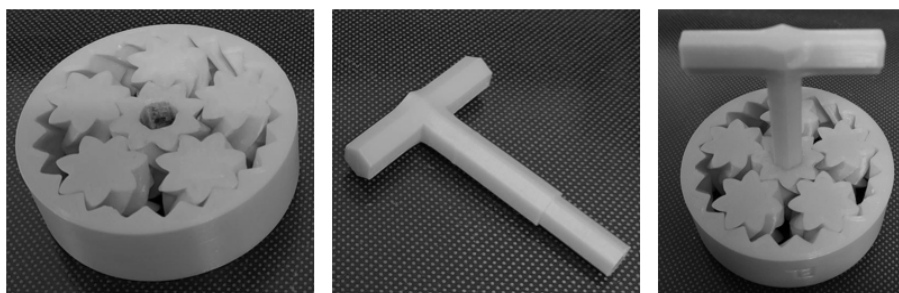
5.3. Proces drukowania modelu 3D oraz jego kontrola

Na początku wybrać należy element, który ma być drukowany. Następnie drukarka rozpoczyna proces grzania zespołu stołu oraz dyszy - temperatura oraz to co pierwsze będzie nagrzewane określone jest w G-code. Kolejnym etapem jest rozpoczęcie drukowania pierwszej warstwy - jest to moment w którym przyłożyć należy szczególną uwagę do tego czy filament jest odpowiednio rozprowadzony. Może zdarzyć się, że w niektórych miejscach odległość od stołu jest zbyt duża lub zbyt mała. W przypadku zbyt dużej odległości dyszy od stołu drukarka będzie drukować „w powietrzu” (rys. 6a). W przypadku kiedy dysza umiejscowiona jest zbyt blisko stołu, filament rozchodzi się na boki i są dostrzegalne „ścieżki” na powierzchni druku (rys. 6c). Rysunek 6b przedstawia właściwie dobraną odległość dyszy od stołu - filament rozchodzi się równomiernie.

Jeżeli obsługujący drukarkę zobaczy, że pierwsza warstwa nie została wydrukowana poprawnie, powinien zatrzymać druk za pomocą panelu obsługi, usunąć filament ze stołu i wypoziomować drukarkę jeszcze raz. Zdarzyć się może, że pierwsza warstwa nie przylegnie odpowiednio mocno do stołu - należy wówczas zweryfikować czy dobrano odpowiednie temperatury. Można również ustawić w slicerze dodatkową adhezję lub zastosować odpowiedni klej adhezyjny rekomendowany przez producentów danych filamentów lub drukarek. Jeżeli pierwsza warstwa zostanie wydrukowana poprawnie kolejne również nie powinny stanowić już problem. Efekt końcowy zrealizowanego procesu druku został przedstawiony na rysunku 7.



Rysunek 6. Wpływ odległości dyszy od stołu na sposób nanoszenia warstw [15]



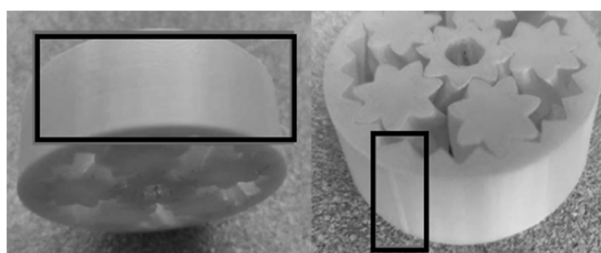
Rysunek 7. Wydrukowane elementy w ramach projektu [8]

Kluczowymi parametrami wydruku, o których warto wspomnieć, podając od razu ich ustawienia są: gęstość wypełnienia (infill density) na poziomie 60%, jest to również jego wzór (infill pattern): lines (mógłby być jeszcze np. cubic, cross, grid itd). Grubość zewnętrznych ścian została ustawiona na 0.8mm. Temperatura dyszy dla druku filamentem PLA została ustawiona na 200 stopni Celsjusza, tak samo temperatura stołu roboczego została ustawiona na 50 stopni Celsjusza. Druk był wykonany bez podpór oraz bez dodatkowej adhezji.

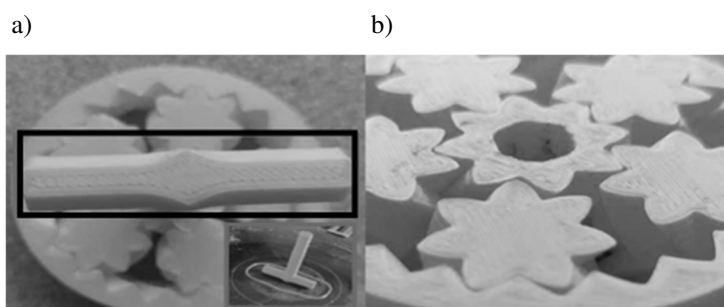
5.4. Ocena jakości druku 3D

Ocenie druku podlega przede wszystkim jego jakość. Kolejnymi aspektami podlegającymi ocenie będą te, które najściślej związane są z przeznaczeniem elementu który został wydrukowany - przedmioty ozdobne przede wszystkim będą podlegały ocenie ze względu na to jak wygląda powierzchnia druku i czy spełnia ona wcześniej przyjęte standardy estetyczne, natomiast elementy, które będą podlegać

działaniu naprężeń muszą być przetestowane za pomocą prób wytrzymałościowych. Na rysunku 8 oraz rysunku 9 ukazano szczegóły, na które warto zwrócić uwagę (np. widoczne nałożone warstwy jedna na drugiej, rys. 8a). Model na tym etapie nie został poddany postprocessingowi, który mógłby poprawić jego końcowy wygląd pod kątem estetycznym - usunąć wybrzuszenie powstałe przy przejściach podczas drukowania warstw (rys. 8b). Wyszlifowanie elementu pozwoliłoby również ukryć powstałe szczeliny ukazane na rysunku 9a, oraz zeszlifować koleiny przedstawione na rysunku 9b.



Rysunek 8. Zdjęcie pomocnicze w ocenie jakości wykonanego druku nr 1:
a) dobrze ułożone warstwy; b) miejsce przejścia z jednej warstwy na drugą [8]

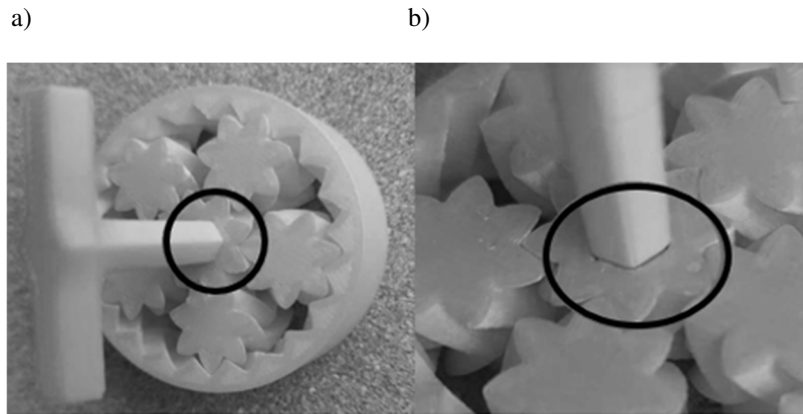


Rysunek 9. Zdjęcie pomocnicze w ocenie jakości wykonanego druku nr 2 – pierwsza warstwa: a) widoczne szczeliny; b) widoczne koleiny [8]

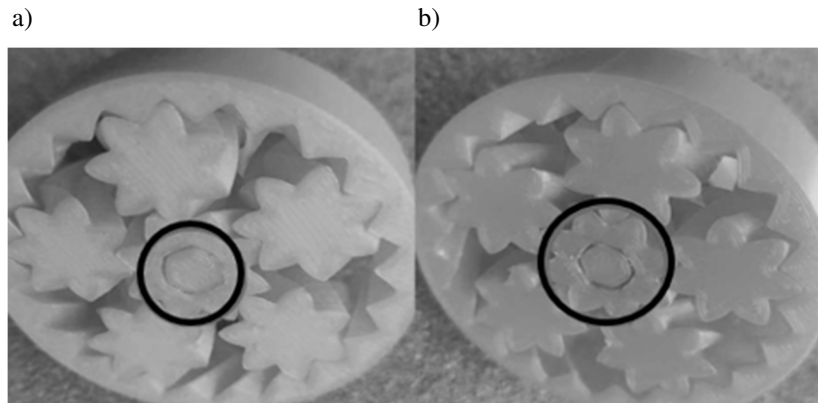
5.5. Analiza precyzji i funkcjonalności drukowanego obiektu

W przypadku tego konkretnego modelu zanim zostanie oceniona funkcjonalność, ocenie podlegać musi dopasowanie klucza do środkowego elementu koła - gdyż to on umożliwia komfortowe wprawianie w ruch całego mechanizmu. Na potrzeby niniejszego projektu wydrukowano również drugi klucz, który można porównać z właściwym.

Poniżej przedstawiono różnice wynikające z różnego rozmiaru elementów, często są to różnice milimetrowe, ale i one mają znaczący wpływ na to jak wygląda model i czy spełnia swoje przeznaczenie. Źle dopasowany klucz uniemożliwia poruszanie mechanizmem ponieważ sam nie jest odpowiednio zakotwiczony w ruchomym elemencie (rys. 10, 11).



Rysunek 10. Widok z góry: a) klucz dobrze dopasowany; b) klucz źle dopasowany [8]



Rysunek 11. Widok z dołu: a) klucz dobrze dopasowany; b) klucz źle dopasowany [8]

Na to czy elementy są dopasowane wpływ ma przede wszystkim odpowiednie zwymiarowanie części, wpływ ma również precyzja z jaką modele zostały wydrukowane. Element na rys. 11a jest dobrze dopasowany i stabilnie usadowiony w mechanizmie, można jednak dostrzec, że nie jest on wydrukowany wystarczająco precyzyjnie, gdyż widać minimalną szczelinę przy łączeniu się dwóch elementów (rys. 11b). W przypadku gdyby element był źle zwymiarowany, nawet w niewielkim stopniu, nakładający się z tym brak precyzji może uniemożliwić działanie mechanizmu zgodnie z jego przeznaczeniem (rys. 11b - klucz przekręca się wokół własnej osi ślizgając się w otworze; nie wprawia mechanizmu w ruch). Dobrze dopasowany klucz umożliwia wprawienie w ruch wcześniej wydrukowanego mechanizmu zębatkowego.

6. Podsumowanie

W perspektywie tak szybko rozwijającego się przemysłu, przyszłość druku 3D wydaje się niezwykle obiecująca. Jest to jeden z tych obszarów technologii, w którym stale zachodzą zmiany. Nieustannie pracuje się nad rozwojem tej technologii, dążąc do udoskonalenia drukarek, materiałów i procesów, co przyczynia się do dynamicznego rozwoju całej branży. Istotnym elementem niniejszej pracy jest także szczegółowa analiza wydrukowanego elementu obejmująca zwrócenie uwagi na aspekt estetyczny (np. czy dobrze schodzą się warstwy, czy prawidłowo zbudowana jest pierwsza i ostatnia warstwa – czyli czy dysza podczas druku była w odpowiedniej odległości, czy nie była za blisko lub za daleko) jak i praktyczny, czyli czy elementy do siebie pasują i zostały poprawnie wydrukowane pod kątem wymiarów. Kluczowe było poddanie wydruku weryfikacji, czy elementy które powinny być ruchome, takie są. W kolejnych analizach warto byłoby zastanowić się nad porównaniem jakości wydruków z różnych urządzeń – pomoże to faktyczne różnice pomiędzy określonymi drukarkami. Można również poddać wydrukowane elementy próbom wytrzymałościowym (np. na skręcanie oraz ściskanie) albo zweryfikować wpływ warunków atmosferycznych na elementy drukowane z różnych materiałów lub z różniącą się od siebie konfiguracją druku.

LITERATURA

1. BĘCEK K.: Assessing the Global Digital Elevation Models using the Runway Method: The Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Versus the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Case. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 52.8: 4823-4831.
2. CHLEBUS E.: Techniki komputerowe CAX w inżynierii produkcji, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
3. CICHON K., BRYKALSKI A.: Zastosowanie drukarek 3D w przemyśle. Przegląd Elektrotechniczny, 3, 2017, s. 156-158.
4. IRLA J.: Praktyka projektowa Autocad versus IRyda – przygotowanie i wydruk dużej ilości przekrojów (kładów) na podstawie prac związanych z projektem skrzydła samolotu IRyda, cad.pl, Nr 1, Warszawa 1997.
5. KRUNIĆ S., PERINIĆ M., MARIĆIĆ S.: Rapid Prototyping application. Engineering Review, 2010.
6. SZMIDT A., RĘBOSZ-KURDEK A.: Sposoby doskonalenia druku 3D w technologii FDM/FFF". Mechanik 3 (2017), s. 258-261.
7. SZMIDT A., RĘBOSZ-KURDEK A.: Sposoby doskonalenia druku 3D w technologii FDM/FFF". Mechanik 3 (2017), s. 258-261.
8. KOLNY D.: Materiały niepublikowane koła naukowego VIP – Virtual Industrial Production, 10.2023.
9. Technologia FDM/FFF: <https://drukarki3d.pl/technologie/technologia-fdm-fff/>, 13.09.2023.
10. Gear Bearing by Emmett: <https://www.thingiverse.com/thing:53451>, 13.09.2023.
11. G-code: <https://3dwpraktyce.pl/g-code/>, 13.09.2023.

12. G-cody które wypada znać: <https://forum-cnc.pl/index.php?topic=12.0;wap2>, 13.09.2023.
13. Beginners Guide to 3D Printing G-Code Commands: <https://www.simplify3d.com/resources/articles/3d-printing-gcode-tutorial/>, 13.09.2023.
14. Podstawy CNC, kody G: <https://mechatronikadlawszystkich.pl/tematy/mechanika/mechanika-na-co-dzien/podstawy-cnc-1-1>, 13.09.2023.
15. 3D Printer Issues and How to Troubleshoot them: <https://www.obico.io/blog/2021/12/16/3d-printer-issues-and-how-to-troubleshoot-them/>, 13.09.2023.