

The influence of 3D printing parameters on surface roughness of thin-walled parts manufactured using FFF technology

Kamil Wyrobek ^{1*}, Jacek Pezda ²

¹ *University of Bielsko-Biala, Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biala, Poland, kwyrobek@ubb.edu.pl*

² *University of Bielsko-Biala, Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biala, Poland, jpezda@ubb.edu.pl*

* *Corresponding author, e-mail*

Abstract: 3D printing technologies are becoming increasingly popular every year, significantly streamlining the process of creating prototypes and functional parts. These technologies also make it easier to manufacture thin-walled elements and complex shapes, which pose challenges for traditional manufacturing methods. It is worth emphasizing that technological parameters of 3D printing, such as flow rate and material plasticization temperature, play a key role in the quality of manufactured parts. One of the most commonly used and widely available additive manufacturing technologies is Fused Filament Fabrication (FFF). For this reason, detailed research in this field is crucial for companies looking to effectively leverage the potential of 3D printing. This paper presents the results of research on the influence of the flow rate and the temperature of the printing head's melting zone on the surface roughness of the top layer of parts manufactured using FFF technology. Thin-walled samples made of PLA, ABS, and PETG materials were printed using the BambuLab X1C printer. The results indicate that both temperature and flow rate significantly affect the surface roughness parameters of such elements. The study showed that with a flow rate (w_p) below 0.8, material shortages increase the Ra value, whereas at $w_p > 1.2$, material excess causes overflow.

Keywords: surface roughness; 3D printing, FFF technology

Wpływ parametrów druku 3D na chropowatość powierzchni cienkościennych części wykonanych w technologii FFF

Kamil Wyrobek ^{1*}, Jacek Pezda ²

¹ *University of Bielsko-Biala, Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biala, Poland, kwyrobek@ubb.edu.pl*

² *University of Bielsko-Biala, Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biala, Poland, jpezda@ubb.edu.pl*

* *Corresponding author, e-mail*

Streszczenie: Technologie druku 3D z każdym rokiem stają się coraz bardziej popularne, znacząco usprawniając proces tworzenia prototypów i części użytkowych. Dzięki nim możliwe jest również łatwiejsze wytwarzanie elementów cienkościennych oraz złożonych kształtów, które stanowią wyzwanie dla tradycyjnych metod wytwarzania. Warto podkreślić, że kluczowe znaczenie dla jakości wykonywanych części mają parametry technologiczne druku 3D, takie jak współczynnik przepływu oraz temperatura uplastyczniania materiału. Jedną z najczęściej stosowanych i powszechnie dostępnych technologii przyrostowych jest technologia Fused Filament Fabrication (FFF). Z tego powodu szczegółowe badania w obszarze tej technologii są niezwykle istotne dla firm i przedsiębiorstw, które chcą efektywnie wykorzystywać potencjał druku 3D. W artykule zaprezentowano wyniki badań wpływu współczynnika przepływu oraz temperatury strefy przetapiania głowicy drukującej na chropowatość górnej powierzchni części wykonanych w technologii FFF. Wydrukowano w tym celu próbki cienkościenne wykonane z materiału PLA, ABS oraz PETG przy użyciu drukarki BambuLab X1C. Uzyskane rezultaty wskazują, że zarówno temperatura jak i współczynnik przepływu mają istotny wpływ na parametry chropowatości powierzchni tego typu elementów. Badania wykazały, że przy współczynniku przepływu (w_p) poniżej 0.8 występują braki materiału zwiększające Ra, natomiast przy $w_p > 1.2$ nadmiar materiału powoduje jego wypływanie.

Słowa kluczowe: chropowatość powierzchni; druk 3D; technologia FFF;

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach technologia druku 3D rozwija się w szybkim tempie. Dzięki niej, możliwe jest wytwarzanie trójwymiarowych obiektów poprzez nakładanie na siebie kolejnych warstw materiału. Obecnie technologia jest uznawana za dynamicznie rozwijającą się dziedzinę, która od momentu wynalezienia jej przez Hulla [1] przeszła znaczącą ewolucję. Opracowano liczne techniki druku 3D, bazujące na różnych materiałach, takich jak polimery, metale czy ceramika, które rozwijano w ramach badań naukowych na całym świecie. Technologie druku 3D wyróżniają się wieloma zaletami w porównaniu z tradycyjnymi metodami wytwarzania. Wśród nich można wymienić skrócony czas przejścia od projektu do gotowego produktu, mniejsze zużycie materiałów, większą swobodę projektowania [2], możliwość tworzenia bardziej skomplikowanych kształtów [3-5] oraz wprowadzenie wewnętrznych struktur bez istotnego wzrostu kosztów czy czasu realizacji [2]. Ponadto druk 3D stanowi perspektywiczną technologię w zakresie produkcji wielofunkcyjnych struktur materiałowych w jednym procesie [6-9]. Jedną z najbardziej rozpoznawalnych metod druku 3D jest Fused Deposition Modeling (FDM), opracowana przez firmę Stratasys. Technologia ta została zaprojektowana przez Scotta Crumpa i wprowadzona na rynek w 1989 roku [10]. Od tamtej pory technologia FDM rozwija się w imponującym tempie, znajdując zastosowanie w wielu branżach, takich jak inżynieria, nauka, prototypowanie, medycyna i przemysł [11]. Proces ten opiera się na podgrzewaniu termoplastycznego filamentu, wytłaczaniu go przez dyszę, a następnie układaniu kolejnych warstw na platformie roboczej, tworząc model 3D zgodny z projektem cyfrowym. Popularność tej technologii wynika z jej niezawodności oraz stosunkowo niskich kosztów [11]. Po wygaśnięciu patentu na technologię FDM firmy Stratasys technologia zaczęła być określana mianem Fused Filament Fabrication (FFF). Otwarty dostęp do sprzętu i oprogramowania obniżył koszty, co przyczyniło się do wzrostu jej popularności. W rezultacie użytkownicy posiadający podstawową wiedzę z zakresu projektowania komputerowego (CAD) mogli korzystać z drukarek 3D. W ostatnim czasie osiągnięto znaczące postępy w technologii FFF, obejmujące rozwój procesów i materiałów. Wśród kluczowych osiągnięć można wymienić zwiększenie szybkości drukowania, maksymalnych rozmiarów wydruków oraz wydajności procesu. Technologia FFF umożliwia także wykorzystywanie różnych materiałów, w tym kompozytów wzmocnianych włóknami i nanokompozytów, co rozszerza jej zastosowanie od małych prototypów po duże konstrukcje przemysłowe [12,13]. Mimo osiągniętych postępów technologia FFF wciąż wymaga kalibracji i optymalizacji, która odbywa się głównie metodą eksperymentalną. Dotychczasowe badania [14-17] analizowały zależność między parametrami procesu a właściwościami mechanicznymi drukowanych elementów. Naukowcy badali wpływ różnych parametrów (gęstość wypełnienia, kąt trajektorii ruchu, temperatura dyszy, prędkość druku, grubość warstwy oraz temperatura stołu) na właściwości mechaniczne próbek. Obecnie trwają intensywne prace nad opracowaniem modeli umożliwiających przewidywanie zachowania materiałów podczas druku. Coraz większą uwagę poświęca się także powiązaniu parametrów druku z właściwościami gotowych produktów, takimi jak dokładność kształtowo-wymiarowa czy chropowatość powierzchni [18].

2. Materiały i metody

Badania przeprowadzono dla trzech różnych materiałów: Easy ABS, Easy PETG oraz Easy PLA firmy Fiberlogy. Zakres temperatury dyszy został określony na podstawie karty technologicznej badanych materiałów [19-21]. Zakres współczynnika przepływu określono na podstawie standardowych wartości dla których wykonuje się kalibrację nowych materiałów. Wartości poszczególnych parametrów zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wybrane materiały oraz wartości badanego współczynnika przepływu oraz temperatury dyszy [19-21].

Lp.	Materiał	Zakres temperatur, [°C]	Zakres współczynnika przepływu
1	PLA	200 - 240	0.8 - 1.2
2	PETG	220 - 260	0.8 - 1.2
3	ABS	220 - 260	0.8 - 1.2

W oparciu o wyznaczone zakresy parametrów dla wybranych materiałów (PLA, PETG, ABS) przeprowadzono badania mające na celu określenie wpływu zmiennych niezależnych (temperatury uplastycznienia (t_u) oraz współczynnika przepływu (w_p)) na chropowatość R_a wierzchniej warstwy (zmienną zależną) wydruków wykonanych metodą Fused Filament Fabrication (FFF). Współczynnik przepływu definiuje ilość filamentu dostarczanego przez dyszę w stosunku do wartości standardowej. Domyślnie jest ustawiony na 1 (100%), co odpowiada nominalnej ilości materiału. Zmniejszenie tego parametru powoduje ograniczenie ilości podawanego filamentu, natomiast jego zwiększenie

prowadzi do nadmiarowego wytłaczania materiału. Badania wykonano w oparciu o plan kompletny, zakładający wykonanie 27 próbek, umożliwiającą analizę wpływu parametrów procesu druku na badane właściwości wydruków. Dla każdego materiału przyjęto po trzy wartości temperatury oraz współczynnika przepływu, co łącznie dało 9 próbek dla każdego materiału. Dla każdego wariantu planu badań przygotowano 3 próbki w celu określenia powtarzalności wyników, a także minimalizacji wpływu przypadkowych odchyłeń oraz błędów pomiarowych.

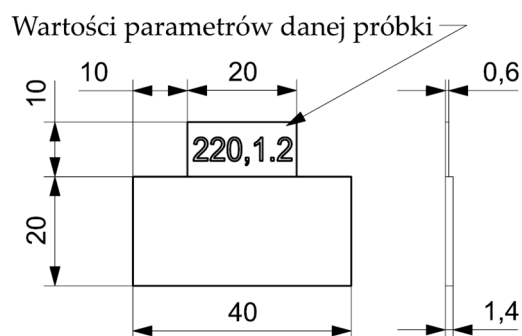
2. 1 Przygotowanie próbek

Do wykonania próbek wykorzystano drukarkę 3D BambuLab X1C wyposażoną w dyszę o średnicy 0,4 mm oraz platformę roboczą podgrzewaną do temperatury dostosowanej do badanego materiału (60°C dla PLA, 80°C dla PETG, 100°C dla ABS). Filamenty Easy PLA, Easy PETG oraz Easy ABS firmy Fiberlogy zostały poddane wstępnemu suszeniu w temperaturze 50°C przez 24 godziny w celu eliminacji wilgoci, co mogłoby negatywnie wpłynąć na proces drukowania i jakość wydruków. Wszystkie próbki zostały wydrukowane z warstwą o grubości 0,2 mm oraz gęstością wypełnienia wynoszącą 100%. Tabela 2 przedstawia parametry druku 3D zastosowane podczas badań.

Tabela 2. Plan badań dla wybranych materiałów oraz parametrów druku 3D

L.p.	Materiał	Temperatura, [°C]	Współczynnik przepływu
1	PLA	200	0.8
2			1.0
3			1.2
4		220	0.8
5			1.0
6			1.2
7		240	0.8
8			1.0
9			1.2
10	PETG	220	0.8
11			1.0
12			1.2
13		240	0.8
14			1.0
15			1.2
16		260	0.8
17			1.0
18			1.2
19	ABS	220	0.8
20			1.0
21			1.2
22		240	0.8
23			1.0
24			1.2
25		260	0.8
26			1.0
27			1.2

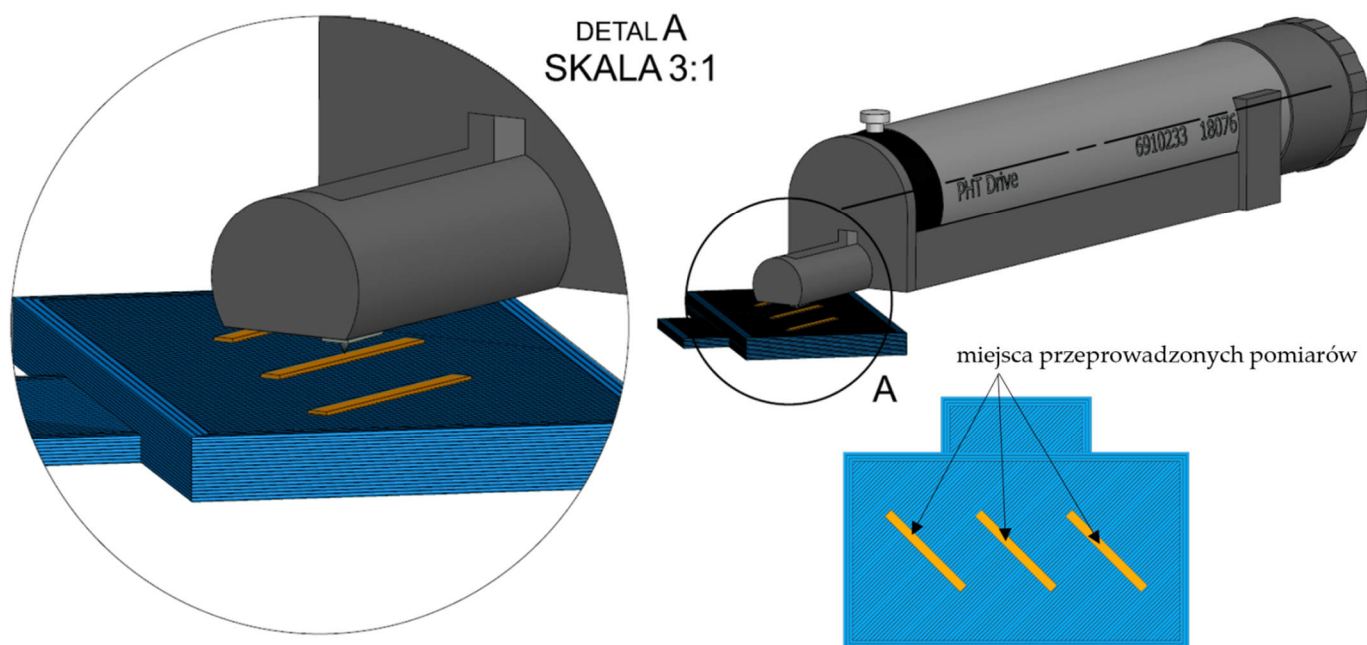
W celu minimalizacji czasu potrzebnego na wydrukowanie próbek, zaprojektowano uproszczony model 3D w oprogramowaniu Siemens NX. Kształt próbki oraz jej wymiary przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Wymiary próbki do badań dla parametrów $t_u = 220^{\circ}\text{C}$ oraz $w_p = 1.2$

2. 2 Metodyka badań

Na każdej próbce wykonano trzy niezależne pomiary chropowatości R_a , które przeprowadzono w różnych miejscach na jej powierzchni. Wyniki pomiarów zostały następnie uśrednione. Pomiar przeprowadzono za pomocą mobilnego chropowatościomierza MarSurf M310 firmy MAHR, zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 2.



Rysunek 2. Metodologia pomiaru chropowatości na wydrukowanej próbce.

Poniżej zestawiono parametry zastosowane podczas pomiarów chropowatości R_a :

- odcinek odwzorowania $L_t = 4,8\text{mm}$,
- odcinek pomiarowy 4 mm
- liczba odcinków elementarnych $N = 5$,
- standardowy filtr długofalowy L_c ,
- standardowy filtr krótkofalowy L_s ,
- prędkości pomiaru: $1.0 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$,
- typ głowicy: $350 \mu\text{m}$.

Uzyskane wyniki zostały wprowadzone do oprogramowania komputerowego NCSS zawierającego moduł DoE (ang. Design of Experiment), umożliwiający planowanie eksperymentów. Celem było wyznaczenie współczynników regresji i równań opisujących zależności pomiędzy druku zmiennymi niezależnymi (t_u , w_p) a zmienną zależną (R_a). Do

aproxymacji współczynników regresji wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów. Jako funkcję aproxymującą przyjęto wielomian drugiego stopnia, uwzględniający interakcje pomiędzy zmiennymi o postaci (1):

$$\hat{y}_{R_a} = b_0 + b_1 t_u + b_2 t_u^2 + b_3 w_p + b_4 w_p^2 + b_5 t_u w_p \quad (1)$$

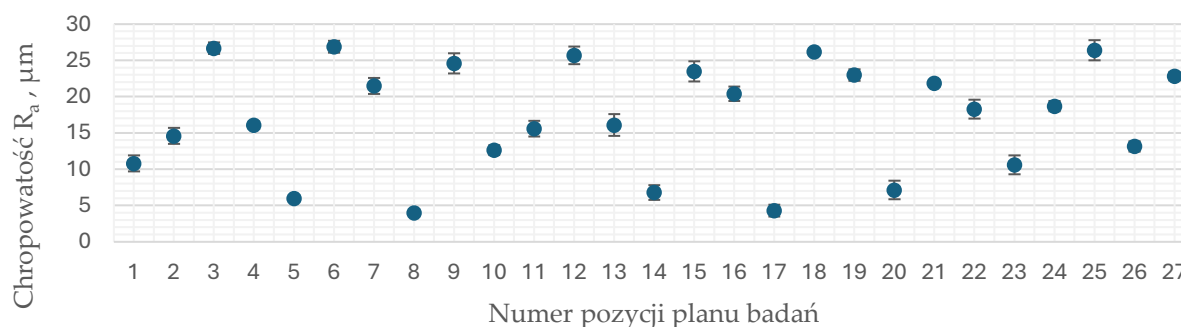
gdzie:

- b_0 – wyraz wolny,
- $b_1 - b_5$ – współczynniki regresji,
- t_u – temperatura uplastycznienia, °C
- w_p – współczynnik przepływu

Korelację między modelem, a wartościami rzeczywistymi oceniono za pomocą współczynnika determinacji R^2 , który przyjmuje wartości z przedziału $[0, 1]$. Im wartość R^2 jest bliższa 1, tym większy stopień dopasowania wartości rzeczywistych do modelu. Dodatkowo przeprowadzono test Shapiro – Wilka w celu określenia czy rozkład odstaje od normalnego na poziomie istotności $\alpha = 0.05$.

3. Wyniki

Zmiana parametrów druku 3D, takich jak temperatura uplastycznienia t_u oraz współczynnik przepływu w_p spowodowała uzyskanie chropowatości powierzchni w zakresie od $4 \mu\text{m}$ do $27 \mu\text{m}$. Wyniki przeprowadzonych badań zestawiono na wykresie punktowym (rys. 3) wraz z zaznaczonym odchyleniem standardowym.



Rysunek 3. Chropowatość R_a wydrukowanych próbek

W celu przedstawienia wpływu temperatury uplastycznienia tworzywa oraz współczynnika przepływu na chropowatość powierzchni R_a , wyznaczono równanie regresji, które przyjmuje postać zależności (2 – 4). Statystyczna istotność równania regresji wynosi $\alpha = 0,05$. Wartość krytyczna W_{kryt} dla testu Shapiro - Wilka przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ i $n = 9$ wynosi 0.8335 [19]. Jeśli obliczona wartość W_{obl} jest mniejsza od tej wartości, rozkład odstaje od normalnego. Dla równań regresji (2 - 4) można przyjąć, że każde z nich, nie odstaje rozkładem od normalnego, ponieważ wszystkie wartości W_{obl} są większe od wartości W_{kryt} . Współczynnik determinacji modelu wynosi dla poszczególnych materiałów: $R_{PETG}^2 = 0.8363$, $R_{PLA}^2 = 0.8655$, $R_{ABS}^2 = 0.9375$.

$$\hat{y}_{R_{a\text{PETG}}} = 729.9444444 - 2.8885422 \cdot t_u - 723.5416677 \cdot w_p + 0.0050211 \cdot t_u^2 + 0.4531255 \cdot w_p \cdot t_u + 296.4583333 \cdot w_p^2 \quad (2)$$

gdzie:

- $\hat{y}_{R_{a\text{PETG}}}$ – spodziewana wartość chropowatości powierzchni R_a dla materiału PETG
- t_u – temperatura uplastycznienia tworzywa, °C
- w_p – współczynnik przepływu tworzywa

$$\hat{y}_{R_{a\text{PLA}}} = 619.4333333 - 1.5866666 \cdot t_u - 845.8333333 \cdot w_p + 0.0017500 \cdot t_u^2 + 0.8000000 \cdot t_u \cdot w_p + 322.4999999 \cdot w_p^2 \quad (3)$$

gdzie:

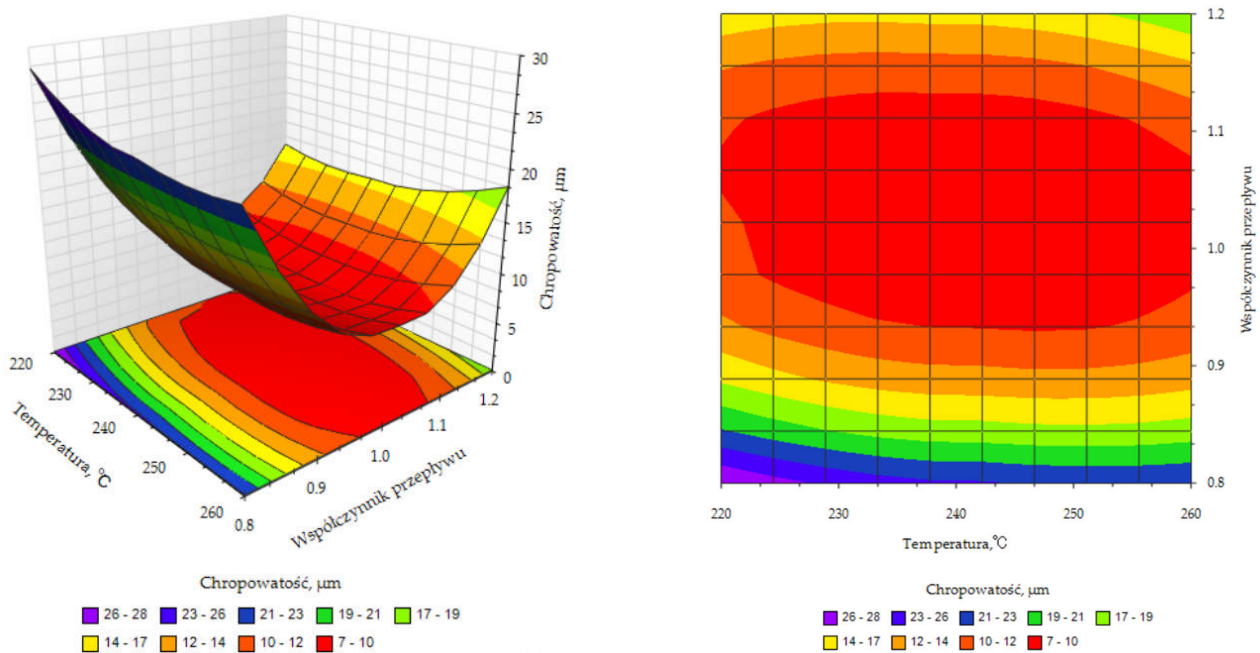
- $\hat{y}_{R_{a\text{PLA}}}$ – spodziewana wartość chropowatości powierzchni R_a dla materiału PLA
- t_u – temperatura uplastycznienia tworzywa, °C
- w_p – współczynnik przepływu tworzywa

$$\hat{y}_{Ra_{ABS}} = 770.7355555 - 3.9130416 \cdot t_u - 610.4416666 \cdot w_p + 0.0080166 \cdot t_u^2 + 0.1518750 \cdot t_u \cdot w_p + 288.7916666 \cdot w_p^2 \quad (4)$$

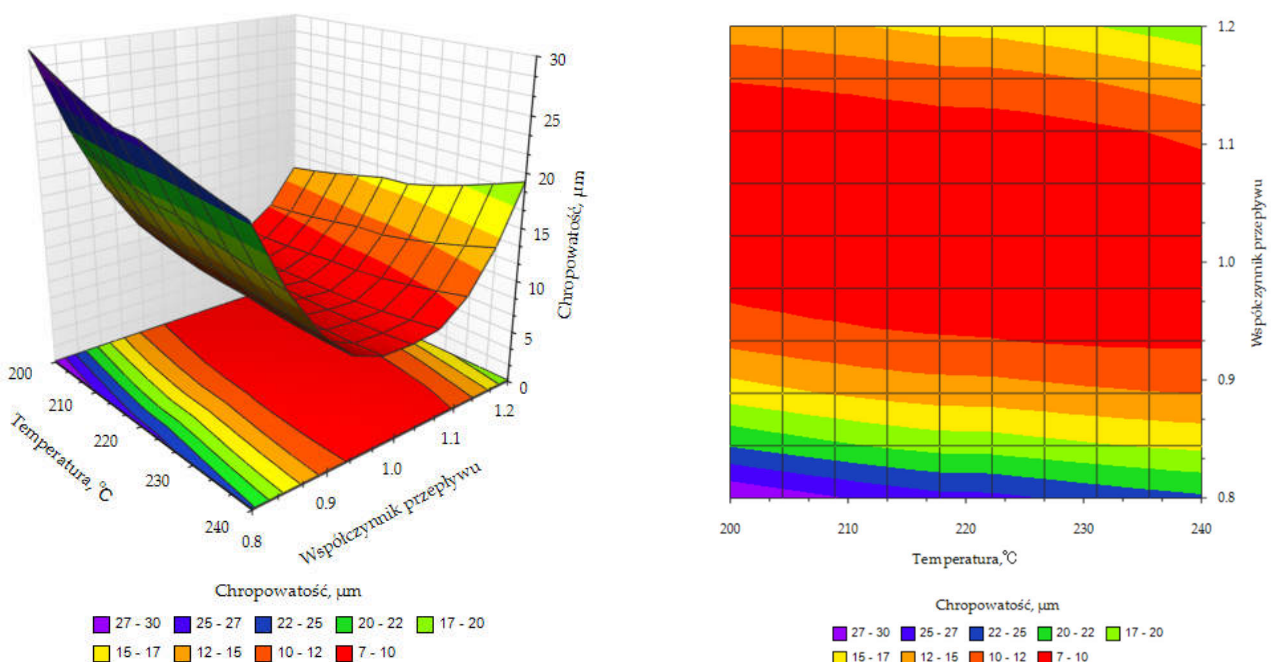
gdzie:

- $\hat{y}_{Ra_{ABS}}$ – spodziewana wartość chropowatości powierzchni Ra dla materiału ABS
- t_u – temperatura uplastycznienia tworzywa, °C
- w_p – współczynnik przepływu tworzywa

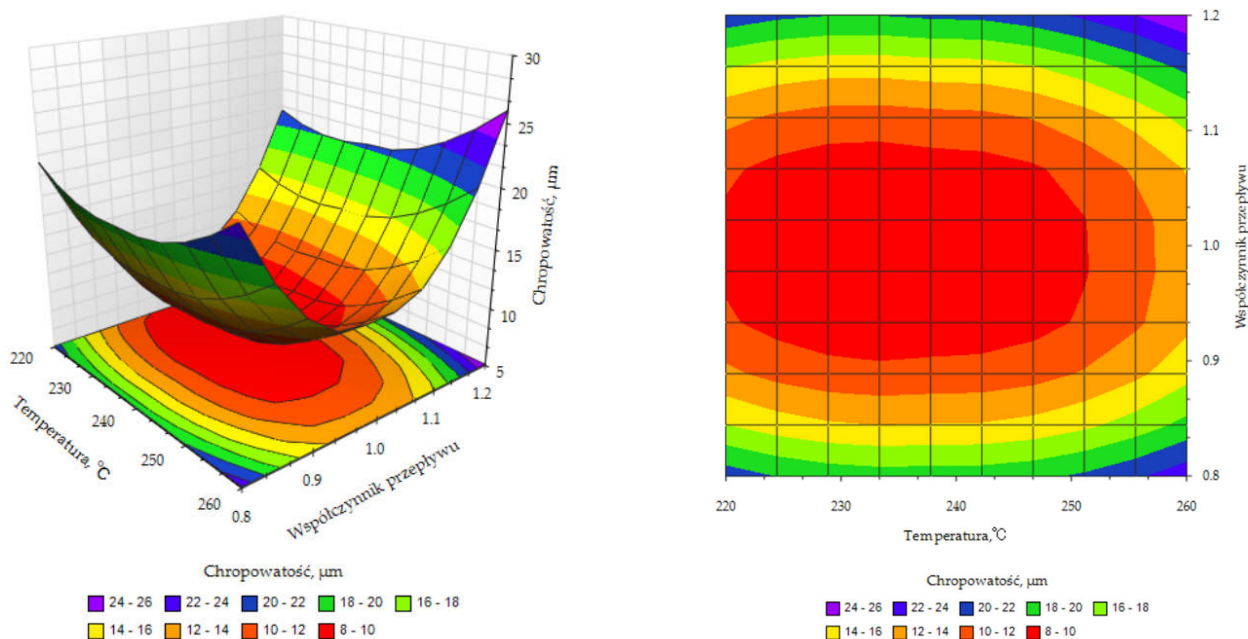
Na podstawie równań (2 - 4) opracowano wykresy przestrzenne, w jaki sposób zmienne niezależne (t_u, w_p), wpływają na wartość chropowatości powierzchni Ra. Wykresy warstwiczne 3D oraz 2D zostały wykonane dla każdego materiału, co pozwoliło na szczegółową analizę i porównanie ich w różnych warunkach druku (rys. 4-6).



Rysunek 4. Wpływ temperatury oraz współczynnika przepływu na chropowatość powierzchni dla materiału PETG



Rysunek 5. Wpływ temperatury oraz współczynnika przepływu na chropowatość powierzchni dla materiału PLA



Rysunek 6. Wpływ temperatury oraz współczynnika przepływu na chropowatość powierzchni dla materiału ABS

Z analizy wykresów wynika, że:

- **PLA:** Przy niższych temperaturach uplastycznienia oraz zbyt niskim współczynniku przepływu ($w_p < 1.0$) obserwuje się wzrost wartości R_a , co można przypisać niedostatecznemu uplastycznieniu materiału i niewystarczającemu wypełnieniu szczelin między ścieżkami. Na obu wykresach można zaobserwować, że dla zakresu współczynnika przepływu $0.8 < w_p < 1.2$ oraz temperatury uplastycznienia $200^\circ\text{C} < t_u < 240^\circ\text{C}$ występuje minimum lokalne.
- **PETG:** Materiał ten wykazuje większą tolerancję na zmiany parametrów w porównaniu do PLA, jednak zbyt wysoka temperatura uplastycznienia ($t_u > 240^\circ\text{C}$) prowadzi do nadmiernego wypływu materiału, co skutkuje pogorszeniem jakości powierzchni. W przypadku tego materiału lokalne minimum jest dobrze widoczne i umiejscowione jest w zakresach $230^\circ\text{C} < t_u < 250^\circ\text{C}$ oraz $0.9 < w_p < 1.1$
- **ABS:** W przypadku ABS kluczowe znaczenie ma utrzymanie stabilnej temperatury uplastycznienia w przedziale $230^\circ\text{C} < t_u < 250^\circ\text{C}$. Zbyt niski współczynnik przepływu powoduje wyraźne braki wyciskanego materiału, natomiast wartości $w_p > 1.2$ prowadzą do nadmiernego nakładania, co w obu przypadkach skutkuje zwiększeniem chropowatości powierzchni. Podobnie jak w przypadku PETG, na wykresie bardzo dobrze zarysowane jest minimum lokalne, które może być w łatwy sposób odnalezione poprzez zastosowanie odpowiednich algorytmów.

W celu optymalizacji parametrów, opracowano program w języku Python, wykorzystujący algorytm symulowanego wyżarzania w celu minimalizacji aproksymowanej wartości chropowatości powierzchni (\hat{y}_{Ra}) dla każdego z materiałów. Program został napisany w taki sposób, aby uwzględniać specyfikę materiałów wykorzystywanych w technologii FFF, takich jak PLA, PETG oraz ABS. Algorytm symulowanego wyżarzania został zaimplementowany w celu przeszukiwania przestrzeni parametrów procesu, obejmującej temperaturę uplastycznienia (t_u) oraz współczynnik przepływu (w_p). Funkcja celu została zdefiniowana na podstawie równań regresji 2 - 4, które opisują wpływ obu wspomnianych parametrów na chropowatość powierzchni (R_a).

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import dual_annealing

# Definicja funkcji celu z podanymi współczynnikami
def objective_function_new(params):
    temperatura, flow = params
    predicted_chropowatosc = (
```

```

729.944444444306
- 2.88854166666655 * temperatura
- 723.541666666667 * flow
+ 0.00502083333333081 * (temperatura**2)
+ 0.453125000000043 * temperatura * flow
+ 296.458333333333 * (flow**2)
)
return predicted_chropowatosc

# Zakresy parametrów
bounds = [(220, 260), (0.8, 1.2)]

# Optymalizacja przy użyciu algorytmu wyżarzania
result_new = dual_annealing(objective_function_new, bounds)
optimal_params_new = result_new.x
optimal_value_new = result_new.fun

# Wyświetlanie wyników
print("Optymalizacja algorytmem wyżarzania:")
print(f"Optymalna Temperatura: {optimal_params_new[0]:.2f}")
print(f"Optymalne Flow: {optimal_params_new[1]:.2f}")
print(f"Minimalna wartość Chropowatości: {optimal_value_new:.2f}")

# Funkcja do walidacji modelu
def validate_model(temperatura, flow):
    return objective_function_new((temperatura, flow))

# Generowanie danych do wykresu
temperatura_range = np.linspace(220, 260, 50)
flow_range = np.linspace(0.8, 1.2, 50)
temperatura_grid, flow_grid = np.meshgrid(temperatura_range, flow_range)
chropowatosc_grid = np.vectorize(validate_model)(temperatura_grid, flow_grid)

# Wizualizacja wyników w 3D
fig = plt.figure(figsize=(10, 6))
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
ax.plot_surface(
    temperatura_grid, flow_grid, chropowatosc_grid, cmap="viridis", alpha=0.8
)

ax.set_title("Powierzchnia odpowiedzi chropowatości", fontsize=14)
ax.set_xlabel("Temperatura (°C)", fontsize=12)
ax.set_ylabel("Flow", fontsize=12)
ax.set_zlabel("Chropowatość Ra", fontsize=12)
plt.show()

```

Zastosowanie algorytmu symulowanego wyżarzania pozwoliło na określenie optymalnych kombinacji parametrów procesu, minimalizujących przewidywaną wartość chropowatości powierzchni Ra drukowanych próbek. Wyniki obliczeń dla optymalnych parametrów przedstawiono w tabeli 3, uwzględniając zarówno przewidywane, jak i rzeczywiste wartości chropowatości Ra dla każdego z materiałów.

Tabela 3. Optymalne parametry temperatury uplastycznienia (t_u) oraz współczynnika przepływu (w_p) dla poszczególnych materiałów.

Materiał	t_u , °C	w_p , —	\hat{y}_{Ra} , μm	Ra, μm
PLA	214	1.045	7.22	4,15
PETG	241	1.036	7.16	4,62
ABS	235	0.995	7.92	3,01

4. Wnioski

Wyniki badań wykazały, że wzrost temperatury uplastycznienia materiału (t_u) wpływa na poprawę płynności materiału, co z kolei przekłada się na bardziej równomierne ułożenie warstw i zmniejszenie chropowatości powierzchni. Efekt ten jest bardziej widoczny w połączeniu z odpowiednio dobranym współczynnikiem przepływu (w_p). Współczynnik przepływu odgrywa kluczową rolę w procesie, wpływając na ilość materiału wytłaczanego przez dyszę, co pozwala na lepsze wypełnienie szczelin między ścieżkami i poprawę jednorodności powierzchni. Badania potwierdziły, że przy zbyt niskim współczynniku przepływu ($w_p < 0.8$), występują widoczne niedobory materiału, co prowadzi do wzrostu wartości Ra. Natomiast zbyt wysoki współczynnik przepływu ($w_p > 1.2$) może powodować nadmierne nakładanie materiału, co skutkuje powstawaniem niepożądanych wybrzuszeń na powierzchni. Dlatego optymalizacja w zakresie ($0.8 < w_p < 1.2$) jest kluczowa dla uzyskania niskiej chropowatości. Istotnym czynnikiem jest również odpowiedni dobór temperatury uplastycznienia (t_u). Wyniki wskazują, że zbyt niskie wartości temperatury powodują niewystarczające uplastycznienie materiału, co prowadzi do nieregularnego wytłaczania i wyższych wartości (Ra). Z kolei zbyt wysokie temperatury mogą powodować degradację materiału, szczególnie w przypadku PLA i PETG, co negatywnie wpływa na jakość powierzchni. Optymalny zakres temperatury uplastycznienia (214°C dla PLA, 241°C dla PETG, 235°C dla ABS) różni się w zależności od materiału, co zostało określone na podstawie badań. Dodatkowo, zastosowanie algorytmu symulowanego wyżarzania pozwoliło na precyzyjne określenie optymalnych parametrów druku. Podsumowując, badania potwierdziły istotny wpływ temperatury uplastycznienia oraz współczynnika przepływu na chropowatość powierzchni Ra części wykonanych w technologii FFF. Wyniki te mogą znaleźć zastosowanie w praktycznych wdrożeniach przemysłowych, szczególnie tam, gdzie wymagane są niskie współczynniki chropowatości wydruków.

5. Bibliografia

1. Hull, C.W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. 1986.
2. Jaisingh Sheoran A, Kumar H (2020) Fused deposition modelling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: review and reflection on present research. *Materials Today: Proceedings* 21:1659–1672. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.296>
3. Cole, D.P.; Riddick, J.C.; Jaim, H.M.I.; Strawhecker, K.E.; Zander, N.E. Interfacial mechanical behavior of 3D printed ABS. *J. Appl. Polym. Sci.* 2016, 133. <https://doi.org/10.1002/app.43671>.
4. Singh S, Ramakrishna S, Singh R (2017) Material issues in additive manufacturing: a review. *J Manuf Process* 25:185–200. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.11.006>
5. Kocsis B, Fekete I, Varga LK (2020) Metallographic and magnetic analysis of direct laser sintered soft magnetic composites. *J Magn Magn Mater* 501:166425
6. Ngo, T.D.; Kashani, A.; Imbalzano, G.; Nguyen, K.T.Q.; Hui, D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Compos. Part B* 2018, 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.
7. Hernandez-Contreras, A., Ruiz-Huerta, L., Caballero-Ruiz, A., Mook, V., Siller, H.R., 2020. Extended CT void analysis in FDM additive manufacturing components. *Materials* 13. <https://doi.org/10.3390/ma13173831>
8. Stansbury, J.W.; Idacavage, M.J. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dent. Mater.* 2016, 32, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.09.018>.
9. Aslani, K.E., Kitsakis, K., Kechagias, J.D., Vaxevanidis, N.M., Manolakos, D.E., 2020a. On the application of grey Taguchi method for benchmarking the dimensional accuracy of the PLA fused filament fabrication process. *SN Appl. Sci.* 2 <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2823-z>.
10. Crump, S.S. Apparatus and method for creating three-dimensional objects. 1992.
11. Schirmeister, C.G.; Hees, T.; Licht, E.H.; Mülhaupt, R. 3D printing of high-density polyethylene by fused filament fabrication. *Additive Manufacturing* 2019, 28, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.003>.
12. Barreno-Avila, A.F., Monar-Naranjo, M., Barreno-Avila, E.M., 2021b. Fusion deposition modeling (FDM) 3D printing parameters correlation: an analysis of different polymers surface roughness. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 1173, 012071 <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1173/1/012071>
13. Chaidas, D., Kitsakis, K., Kechagias, J., Maropoulos, S., 2016. The impact of temperature changing on surface roughness of FFF process. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012033>.

14. Fitzharris ER, Watanabe N, Rosen DW, Shofner ML (2018) Effects of material properties on warpage in fused deposition modeling parts. *Int J Adv Manuf Technol* 95:2059–2070. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1340-8>
15. Jaisingh Sheoran, A.; Kumar, H. Fused deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research. *Mater. Today Proc.* 2020, 21, 1659–1672. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.296>.
16. Harris, M.; Potgieter, J.; Archer, R.; Arif, K.M. Effect of material and process-specific factors on the strength of printed parts in fused filament fabrication: A review of recent developments. *Materials* 2019, 12, 1664. <https://doi.org/10.3390/ma12101664>.
17. Popescu, D.; Zapciu, A.; Amza, C.; Baciuc, F.; Marinescu, R. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polym. Test.* 2018, 69, 157–166. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.020>.
18. Vidakis, N., David, C., Petousis, M., Sagris, D., Mountakis, N., & Moutsopoulou, A. (2022). The effect of six key process control parameters on the surface roughness, dimensional accuracy, and porosity in material extrusion 3D printing of polylactic acid: Prediction models and optimization supported by robust design analysis. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100104>
19. Technical data sheet Fiberlogy Easy ABS, Styczeń, 2022
20. Technical data sheet Fiberlogy Easy PET-G, Styczeń, 2022
21. Technical data sheet Fiberlogy Easy PLA, Styczeń, 2022
22. Hanusz, Z., Tarasińska, J. (2011) Tables for Shapiro–Wilk W Statistic According to Royston Approximation. *Colloquium Biometricum*, 41, 211–219.