

Paweł MAĆKOWIAK, Dominika MAGDZIARZ, Radosław TOMKIEWICZ,
Patrycja KABAT, Maciej KOTYK

**WIELKOŚĆ I LICZBA WAD W ELEMENTACH
WYPRODUKOWANYCH METODĄ FDM W ZALEŻNOŚCI
OD PARAMETRU PRĘDKOŚCI WYTWARZANIA**

Streszczenie: W pracy zaprezentowano rodzaje wad występujących w elementach wytwarzanych technologią szybkiego prototypowania FDM. Przedstawiono wyniki badań wpływu prędkości wytwarzania na liczbę i wielkość wad oraz opisano przyczyny ich powstawania.

Słowa kluczowe: FDM, szybkie prototypowanie, wady, prędkość wytwarzania

1. WPROWADZENIE

W procesie projektowania i wdrażania niektórych, nowych produktów buduje się prototypy. Wykrycie problemów na etapie prototypu umożliwia wprowadzenie zmian, których koszt wdrożenia jest mniejszy niż po uruchomieniu serii produkcyjnej [7, 8].

W ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania urządzeniami do szybkiego prototypowania. Przyczyną tego stanu jest opracowanie i rozpowszechnienie przyrostowej technologii FDM (*fused deposition modeling*), polegającej na nakładaniu kolejnych warstw tworzywa wytłaczanego przez głowicę. Urządzenia wykorzystujące tę technologię nie są uciążliwe dla otoczenia podczas eksploatacji, nie wytwarzają szkodliwych substancji, nie generują znacznego hałasu, są stosunkowo małych gabarytów. Połączenie tych zalet z niskim kosztem urządzeń i materiałów eksploatacyjnych powoduje powszechne ich zastosowanie [1, 2, 7].

Wytwarzanie prototypów technologią FDM jest czasochłonne. Jedną z możliwości przyspieszenia procesu jest zwiększanie prędkości głowicy nanoszącej tworzywo. Wzrost prędkości może jednak powodować pojawienie się lub powiększenie występujących wad w wytwarzanych elementach.

mgr Paweł MAĆKOWIAK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: pawel.mackowiak@utp.edu.pl

Dominika MAGDZIARZ, UTP Bydgoszcz

Radosław TOMKIEWICZ, UTP Bydgoszcz

Patrycja KABAT, UTP Bydgoszcz

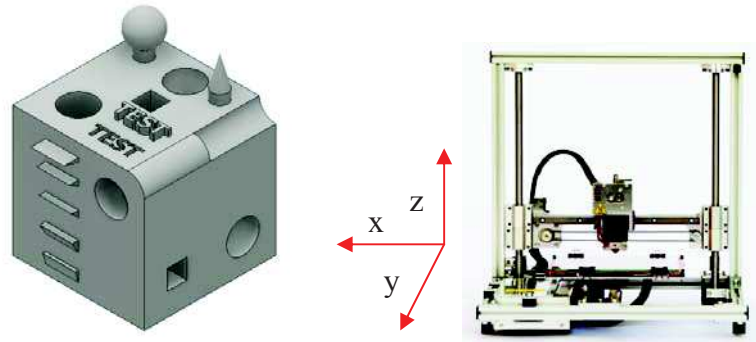
mgr inż. Maciej KOTYK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: Maciej.Kotyk@utp.edu.pl

Anitha, Arunachalam, Radhakrishnan [1] przeprowadzili badania mające na celu ocenę wpływu poszczególnych parametrów na chropowatość powierzchni wytwarzanych prototypów. Wynikiem pracy było wyznaczenie najbardziej efektywnej wysokości warstw oraz szybkości wytwarzania. Górski, Kuczko, Wichniarek [8] badali wpływ parametrów procesu wytwarzania próbek metodą FDM na ich powtarzalność i zgodność z modelem numerycznym. Próbkę mierzono za pomocą skanera 3D. Wyniki badań wykazują na istotny wpływ orientacji próbki w komorze roboczej oraz wpływ wielkości elementu na dokładność jego wykonania. Tyberg, Bøhn [11] przeprowadzili badania mające na celu redukcję czasu wytwarzania prototypów w technologii FDM poprzez maksymalizację grubości warstw materiału nakładanego przez głowicę.

W pracy przedstawiono wady występujące w prototypach i opisano przyczyny ich powstania. Celem dodatkowym było określenie zależności pomiędzy prędkością nanoszenia tworzywa a wielkością i liczbą występujących wad w wytworzonych próbkach.

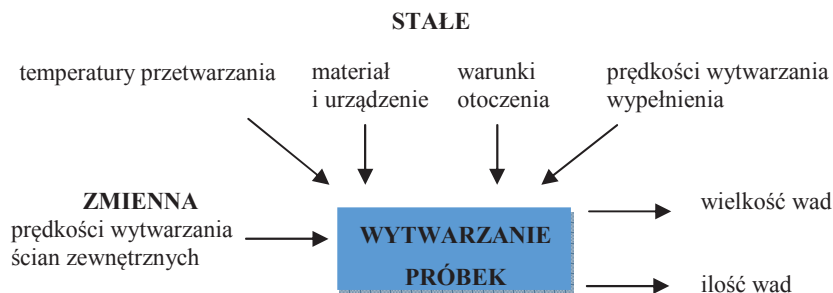
2. METODA BADAWCZA

Celem przeprowadzenia badań zaprojektowano model testowy. Na podstawie przeglądu literatury zaproponowano występowanie w nim powierzchni, przy których odtworzeniu spodziewano się pojawienia wad. Za pomocą jednego detalu umożliwiono sprawdzenie wielu rodzajów wad, które w dotychczasowych pracach oceniane były oddzielnie na osobnych modelach. Wymiary detalu testowego stanowiącego sześciąt, wyłączając elementy wypukłe, wynoszą $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ (rys. 1). Detal testowy ma płaszczyzny umożliwiające pomiary wymiarów zewnętrznych i wewnętrznych. W modelu przewidziano pochylenia ścianek pod kątem 15° , 30° , 45° , 60° , 75° względem płaszczyzny pionowej. Otwory przelotowe oraz kieszenie o przekroju kwadratowym leżą w każdej osi detalu, co umożliwia weryfikację i porównanie błędów związanych z kierunkiem wytwarzania. Powierzchnie zaokrąglone w postaci promieni wklęsłych, wypukłych, sfery wypukłej i wklęsłej oraz stożka umożliwiają obserwacje wad wynikających z grubości nakładanej warstwy. Tekst wypukły oraz wklęsły umożliwia ocenę możliwości wytwarzania cienkościennych struktur i szczelin [2, 6, 13].



Rys. 1. Model testowy oraz urządzenie do szybkiego prototypowania DIM200
 Fig. 1. Test model and device for rapid prototyping DIM 200

W celu badania wpływu prędkości wytwarzania ścianek zewnętrznych na liczbę i wielkość występujących wad przyjęto, że prędkości nanoszenia wypełnienia oraz prędkości dojazdu będą stałe i wyniosą odpowiednio $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ oraz $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Prędkości wytwarzania ścianek zewnętrznych wynoszą dla kolejnych próbek $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Liczbę warstw zewnętrznych przyjęto 3. Wybrano sposób wypełnienia w postaci linii prostych przecinających się między warstwami pod kątem prostym. Współczynnik wypełnienia wyniósł 20%. Parametry temperaturowe dobrano zgodnie z zaleceniami producenta dla wykorzystanego tworzywa jakim był ABS+. Schemat zmiennych i stałych wejściowych oraz badanych wartości wyjściowych przedstawiona na schemacie (rys. 2). Do zwiększenia przyczepności detalu do stołu użyto roztworu ABS w acetonie [10].



Rys. 2. Schemat stałych i zmiennych wejściowych oraz zmiennych wyjściowych
 Fig. 2. Diagram of fixed and variable input and output variables

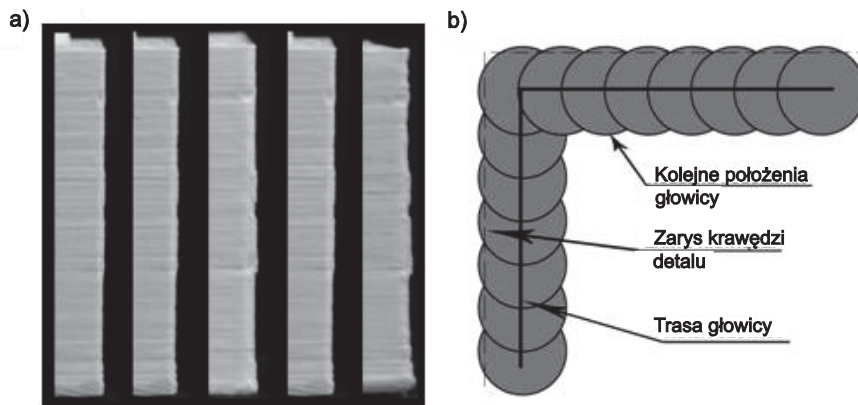
Próbki wytworzono na urządzeniu DIM200. Urządzenie realizuje ruch stołu w kierunku y, ruch głowicy w kierunku x oraz ruch trawersu wraz z głowicą w kierunku z. Napęd stanowią silniki krokowe.

Wykonano pomiar występujących wad na mikroskopie pomiarowym i chropowatościomierzu.

3. OPIS ZAOBESERWOWANYCH WAD W WYTWORZONYCH PRÓBKACH

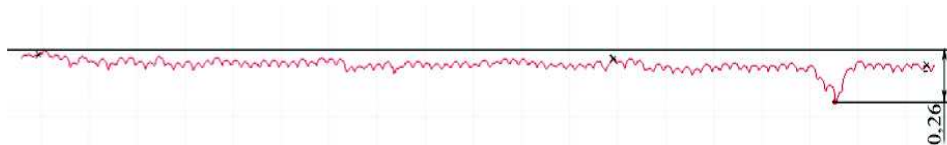
3.1. Wady krawędzi

Pierwsze omawiane wady występują na krawędziach. Boki próbek nie są proste, można zaobserwować na nich uwypuklenia, których ilość, a w szczególności wielkość, wzrasta wraz z prędkością wytwarzania (rys. 3a). Dokonano wykreślenia profilu powierzchni krawędzi na chropowatościomierzu (rys. 4). Następnie zmierzono odchyłkę prostoliniowości jako odległości pomiędzy prostymi przechodzącymi przez najdalej wysunięte punkty krawędzi (rys. 5). Wyniki pomiaru przedstawiono na rysunku. Obserwuje się wzrost wielkości wad krawędzi wraz ze wzrostem prędkości wytwarzania.



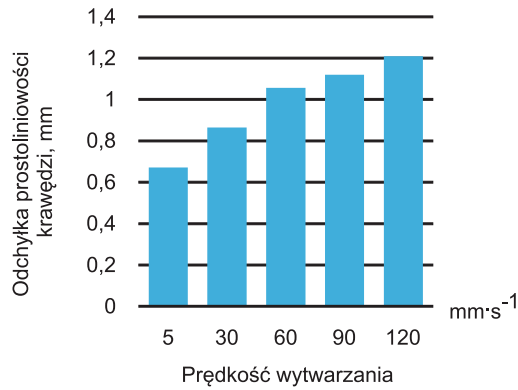
Rys. 3. a) zestawienie uzyskanych krawędzi próbek, w zależności od prędkości: $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,
b) teoretyczny minimalny promień krawędzi

Fig. 3. a) the edges of the samples, depending on the speed: $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, b) the theoretical minimum edge radius



Rys. 4. Przedstawienie odchyłki prostoliniowości krawędzi na próbce wykonanej z prędkością $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

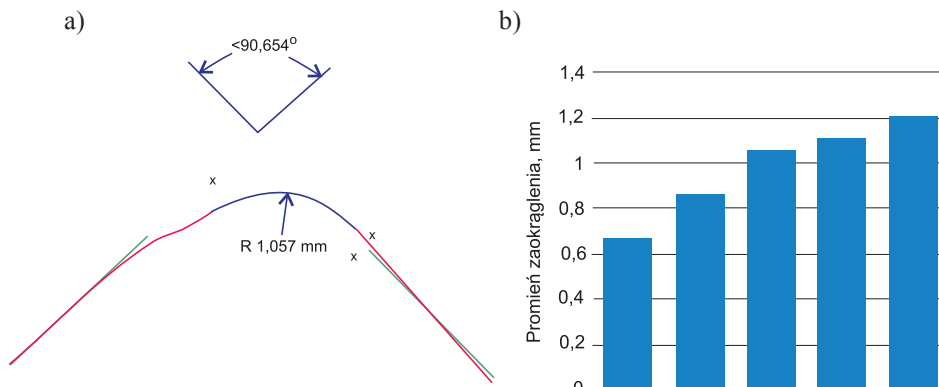
Fig. 4. Presentation of the straightness deviations edge of the sample performed at a speed $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$



Rys. 5. Odchyłka prostoliniowości krawędzi w zależności od prędkości: 5 mm·s⁻¹, 30 mm·s⁻¹, 60 mm·s⁻¹, 90 mm·s⁻¹, 120 mm·s⁻¹
 Fig. 5. Straightness deviation edge depending on speed: 5 mm·s⁻¹, 30 mm·s⁻¹, 60 mm·s⁻¹, 90 mm·s⁻¹, 120 mm·s⁻¹

Zaobserwowano, że miejsca występowania większej liczby wad oraz ich kształt powtarza się w każdej próbce. Może to sugerować źródło występowania tych błędów w urządzeniu prototypującym bądź w programie.

W każdej próbce można zaobserwować zaokrąglenia krawędzi, rosnące wraz ze wzrostem prędkości głowicy. W modelu komputerowym krawędzie nie były zaokrąglone. Pomiar promieni wykonano na chropowatościomierzu (rys. 6a) i porównano na wykresie (rys. 6b).



Rys. 6. Przykładowy wynik pomiaru promienia zaokrąglenia krawędzi próbki oraz porównanie na wykresie wyników pomiarów dla próbek wytwarzanych z różną prędkością
 Fig. 6. An example measurement result of the edge radius of the of the samples and to compare the graph of measurement results for samples produced at different speeds

Minimalny teoretyczny promień zaokrąglenia wynika z okrągłego otworu dyszy. W urządzeniu prototypującym DIM200 średnica otworu dyszy wynosi 0,4 mm. W związku z tym minimalny promień, jaki można osiągnąć wynosi

0,2 mm. Rysunek 4b przedstawia schemat kolejnych położenia głowicy zakreślającej krawędź próbki.

3.2. Wady przewieszeń

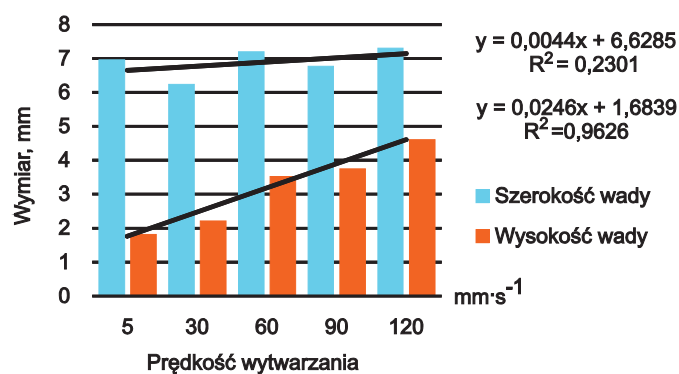
Kolejną widoczną wadą są zniekształcenia wyjść otworów leżących w osiach równoległych do powierzchni stołu (rys. 7).



Rys. 7. Zestawienie otworów przelotowych w osi Y w zależności od prędkości:
5 mm·s⁻¹, 30 mm·s⁻¹, 60 mm/s, 90 mm·s⁻¹, 120 mm·s⁻¹

Fig. 7. The through holes in the Y-axis, depending on the speed:
5 mm·s⁻¹, 30 mm·s⁻¹, 60 mm/s, 90 mm·s⁻¹, 120 mm·s⁻¹

Wady te występowały przy każdej prędkości głowicy, przy czym wraz z jej wzrostem następowało zwiększenie zniekształceń na powierzchniach przyległych do wyjść otworów. Za pomocą mikroskopu pomiarowego dokonano pomiaru szerokości i wysokości występujących w próbkach wad. Wyniki pomiaru przedstawiono na rysunku (rys. 8). Naniesiono linie trendu i zaobserwowano, że prędkość wytwarzania ma większy wpływ na wzrost wysokości wady niż na wzrost jej długości. Świadczy o tym o ponad 5,5 razy większy współczynnik kierunkowy linii trendu dla wysokości wady. Ponadto linia trendu ta posiada wysoki współczynnik determinacji R², który świadczy o bardzo dobrym dopasowaniu modelu.

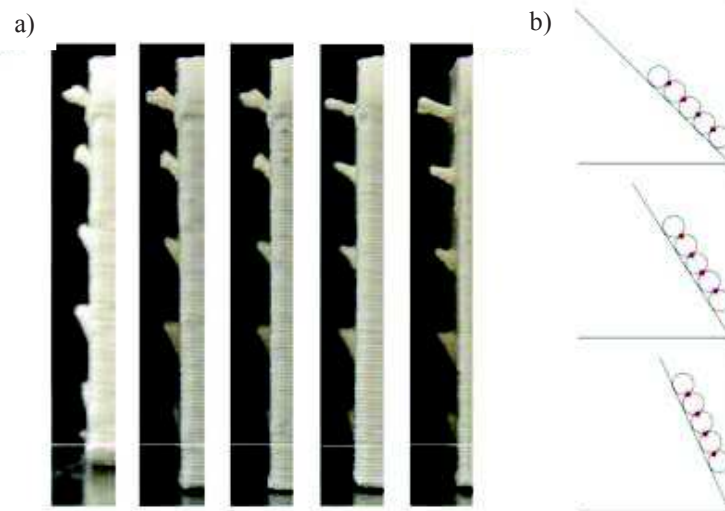


Rys. 8. Powierzchnia wad w okolicach otworów w zależności od prędkości:
5 mm·s⁻¹, 30 mm·s⁻¹, 60 mm/s, 90 mm·s⁻¹, 120 mm·s⁻¹

Fig. 8. The size of surface defects around holes, depending on the speed:
5 mm·s⁻¹, 30 mm·s⁻¹, 60 mm/s, 90 mm·s⁻¹, 120 mm·s⁻¹

Wada ta jest spowodowana koniecznością wykonania przewieszenia tworzywa nad otworem w trakcie jego wytwarzania. Nakładane tworzywo nieoparte od dołu ugina się pod swoim ciężarem, powodując zniekształcenie. Wraz ze wzrostem prędkości tworzywo jest wytłaczane szybciej, co skutkuje skróceniem czasu na jego wychłodzenie poniżej temperatury plastyczności. Może to wyjaśnić wzrost wielkości wady wraz ze wzrostem prędkości głowicy. Im dłuższe przewieszenie, tym ugięcie i zaistniała wada będą większe.

Na każdej próbce wystąpiły wady na powierzchniach pochyłych (rys. 9a). Pomiaru kąta pochylenia ścian oraz długości półek dokonano na chropowatościomierzu (rys. 10).



Rys. 9. a) zależność deformacji pochyłości próbek w zależności od prędkości:

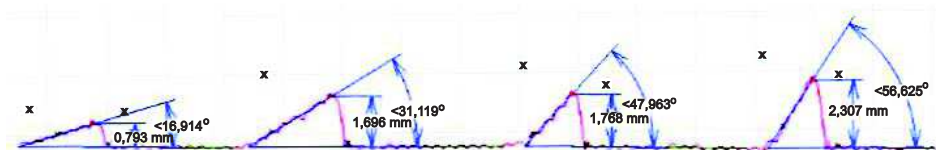
$5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,

b) przyczyna powstawania wady na pochyłościach

Fig. 9. a) The dependence of the deformation gradient of samples depending on the head speed:

$5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,

b) cause the formation of defects on the slopes

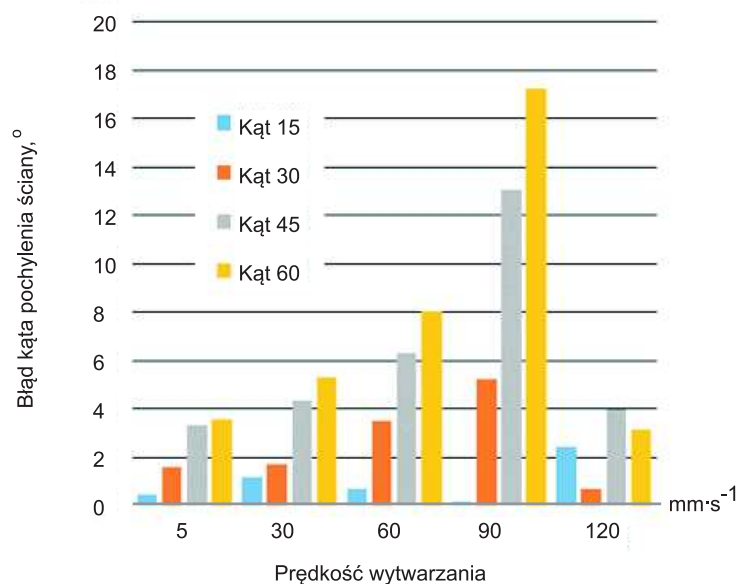


Rys. 10. Pomiar kąta pochylenia oraz długości półek

Fig. 10. The measurement of the angle and length of the shelves

Wraz ze wzrostem kąta pochylenia względem pionu wzrasta różnica pomiędzy jego wartością nominalną a rzeczywistą. Wady w postaci zbyt krótkiej półki w stosunku do modelu komputerowego są obserwowane przy pochyle-

niach 60° względem pionu. Pochyłości pod kątem 75° są znacząco zdeformowane, co uniemożliwia jednoznaczny pomiar. Wykres porównawczy odchyłek kątów rzeczywistych od nominalnych przedstawiono na rysunku (rys. 11).



Rys. 11. Pomiar kąta pochylenia oraz długości półek
Fig. 11. The measurement of the angle and length of the shelves

Wraz ze wzrostem prędkości wytwarzania wzrasta różnica pomiędzy kątem nominalnym a pomierzonym. Stwierdzenie to nie dotyczy prędkości $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ oraz pochylenia ściany 15° względem pionu.

Występujące wady i błędy mogą być spowodowane zmniejszaniem się powierzchni styku pomiędzy nałożoną warstwą a jej podstawą przy wzrastającym kącie pochylenia ściany. Coraz większa część włókna jest zawieszona bez podparcia. W pochyleniach ścian zbliżających się do kąta 90° kolejne warstwy są doklejane do bocznych krawędzi wcześniej nałożonych warstw, a nie do ich górnych powierzchni. Miejsce dołączenia kolejnych włókien jest przedstawione w postaci czerwonych punktów na rysunku 9b. Wraz ze wzrostem wysokości pochylenia, błędy sumują się, powodując coraz większe deformacje. Jest to wada, która na podstawie przeprowadzonych obserwacji nie zależy od prędkości [2, 7].

3.3. Wady chropowatości powierzchni

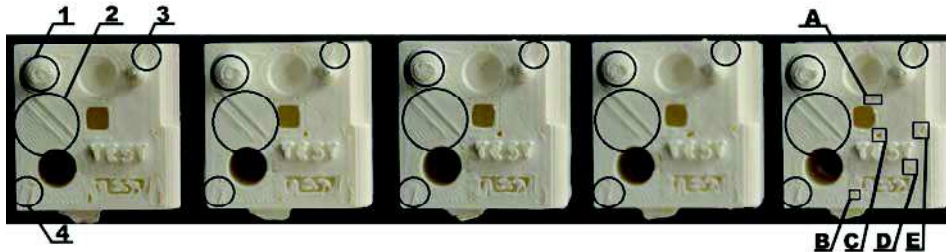
Kolejną wadą, która występowała niezależnie od prędkości, jest wysoka chropowatość szczególnie widoczna na promieniach (rys. 12). Widoczne są wyraźne przejścia pomiędzy poszczególnymi warstwami. Na każdej próbce sfera jest spłaszczona na górze, co zaznaczono cyfrą 1 na rysunku 13. Sfera nie ma

idealnie kulistej formy, natomiast stożki nie są zakończone ostrym wierzchołkiem, jak było zaprojektowane w modelu komputerowym. Wklęsłe czasy mają płaskie, równoległe do podłoża powierzchnię, a promienie nie są gładkie.



Rys. 12. Chropowatość na powierzchniach promieni wypukłych w zależności od prędkości ruchu głowicy: $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 12. The roughness of the convex surfaces of the radii depending on the head speed: $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 90 mm/s , $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

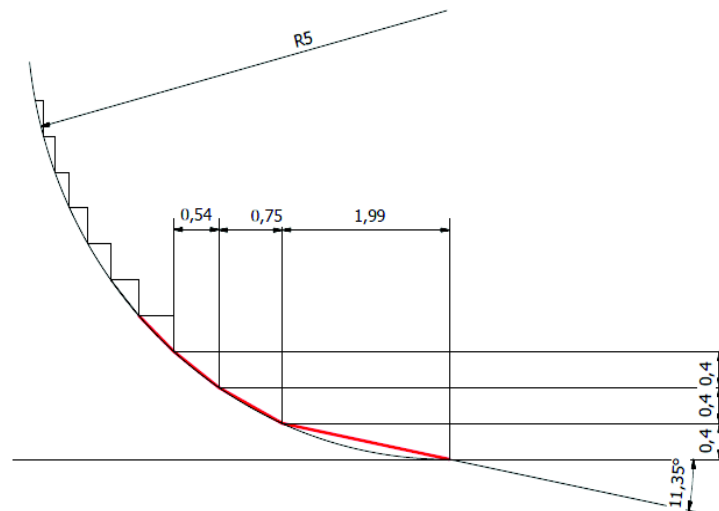


Rys. 13. Błędy przejazdu głowicy (1,2,3,4) oraz nieciągłości tworzywa (A,B,C,D,E) w zależności od prędkości głowicy: $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 13. Errors traveling head (1,2,3,4) and the material discontinuity (A, B, C, D, E) according to the head speed: $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Niska klasa chropowatości powierzchni spowodowana jest tym, że średnica filamentu po wyjściu z głowicy ma określoną wartość, która stanowi wysokość nakładanych warstw tworzywa.

Proces tworzenia programu wykonywanego przez maszynę polega na podzieleniu stworzonego modelu na warstwy o określonej grubości. Kolejnym krokiem jest generowanie programu nakładającego tworzywo na obrysie danego poziomu, a następnie wypełnienia jego środka. Po odtworzeniu pierwszej warstwy program przechodzi do kolejnej wyższej warstwy, leżącej nad poprzednio wykonaną. W przypadku badanych próbek wysokość warstwy wynosiła $0,4 \text{ mm}$. Jest to wartość średnicy tworzywa, które wytłaczane jest z ekstrudera głowicy. Jeśli podzielimy łuk na warstwy, otrzymamy schodkowy jego przekrój (rys. 14). Wysokość schodka będzie równa wysokości warstwy. Efekt schodków jest większy w miejscu, w którym promień płaszczyzny jest najbardziej odchylony od pionu. Wada tego typu nie jest obserwowalna, gdy łuk leży w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny stołu np. powierzchnia otworu w osi z [1, 5, 7, 12].



Rys. 14. Schodkowe ułożenie filamentu na powierzchni łuku
 Fig. 14. Arrangement of the material in the form of steps on the surface of arcs

W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiaru wysokości wytwarzanych warstw. Pomiar został wykonany za pomocą mikroskopu pomiarowego. Procedura pomiarowa polegała na odczytywaniu wartości w momencie przekroczenia kolejnych linii oddzielających warstwy. Średnia wysokość wyniosła 0,401 mm, a odchylenie standardowe 0,038 mm.

Tabela 1. Wyniki pomiarów wysokości warstw próbki
 Table 1. The results of measurements of the amount of specimen layers

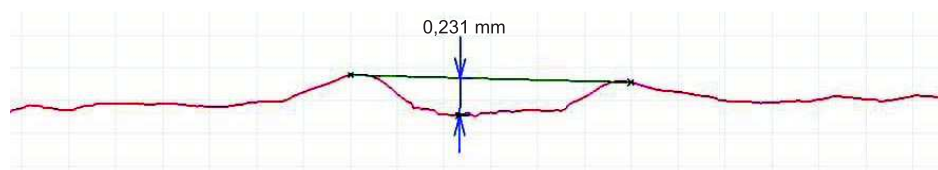
Ilość mierzonych warstw	Kolejne pomierzone wysokości, mm	Wysokość pojedynczych warstw, mm
0	0	–
1	0,38	0,38
2	0,81	0,43
3	1,19	0,38
4	1,62	0,43
5	1,96	0,34
6	2,38	0,42
7	2,85	0,47
8	3,23	0,38
9	3,64	0,41
10	4,01	0,37
Średnia wysokość warstwy		0,401
Odchylenie standardowe		0,038

Analizując sposób działania urządzenia, silników krokowych oraz tworzenia programu gcode, można spodziewać się, że błąd dyskretyzacji łuku obejmie również łuki leżące w płaszczyźnie stołu. Silniki krokowe przemieszczają z dużą prędkością ekstruder pomiędzy kolejnymi położeniami. Ekstruder porusza się pomiędzy nimi po liniach prostych. Prędkość głowicy jest sterowana częstotliwością tych przemieszczeń. Tworzenie programu gcode również ogranicza możliwości wykonania łuków. Program w formacie gcode stanowią kolejne położenia – współrzędne punktów głowicy z dodatkowymi informacjami zapisanymi w formie kodu. Podobnie jak w silnikach krokowych głowica będzie przemieszczała się po odcinkach prostych. Ich długość zależy będzie w tym przypadku od liczby punktów na danym odcinku łuku. Im większa liczba punktów, tym dokładniej będzie odwzorowana krzywizna.

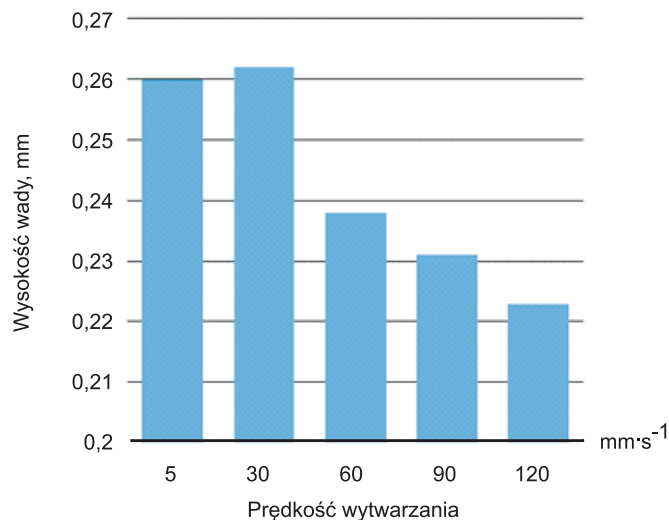
Kolejną przyczyną wad tego typu jest rysunek importowany do formatu stl. Format ten może cechować się zróżnicowaną rozdzielczością. Wraz z jej pogorszeniem zapis do formatu stl może powodować pojawienie się widocznych błędów w wytwarzanym detalu [3, 9].

3.4. Wady górnych powierzchni

Na każdej próbie pojawiły się wady w postaci wypukłych linii, które zostały oznaczone cyframi 1, 2, 3, 4 na rysunku 13. Mogą one być spowodowane błędami powstałymi w trakcie generacji programu lub wynikać z przejazdu głowicy. Pojawiają się one na łączeniu fragmentów powierzchni (linie oznaczone cyfrą 2), które głowica wykonuje oddzielnie np. wykonując środkową część powierzchni, następnie lewą i na końcu prawą. Wady mogą wynikać z niedokładnego pozycjonowania głowicy i nakładania się wytwarzanych fragmentów. W celu porównania wysokości wad wykreślono profil powierzchni na linii prostopadłej do kierunku wad. Następnie wykreślono linię pomiędzy wierzchołkami wad i wyznaczono odległość między tą linią a najniższym punktem pomiędzy tymi wadami. Przykładowy pomiar przedstawiono na rysunku 15. Wyniki pomiaru przedstawiono na rysunku (rys. 16). Z obserwacji wynika, że powyżej prędkości $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ wraz z jej dalszym wzrostem zmniejsza się wysokość opisywanej wady.



Rys. 15. Przykładowy pomiar wysokości wypukłych wad powierzchni
Fig. 15. An example of measuring the height of the convex surface defects

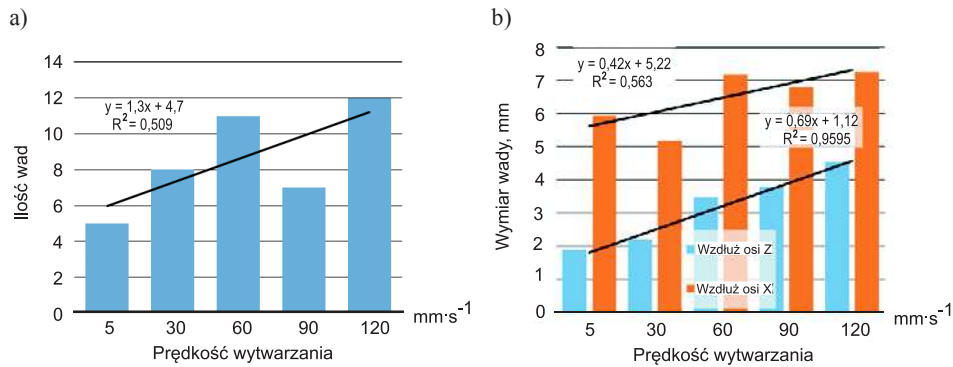


Rys. 16. Porównanie wyników pomiarów wysokości wypukłych wad powierzchni
Fig. 16. Comparison of the results of measurements of the height convex surface defects

Wraz ze wzrostem prędkości głowicy wzrastała liczba wad w postaci małych otworów – niedolań, pustych obszarów powierzchni (rys. 13 A, B, C, D, E). Wadę można wyjaśnić ciągnięciem nałożonego już tworzywa przez głowicę. W chwili, gdy głowica wykonuje ruch po promieniu tworzywo zagęszcza się po wewnętrznej stronie łuku, zostawiając po zewnętrznej wolną przestrzeń.

Wada typu „pociągnięcie” (oznaczona cyfrą 1) jest spowodowana szybkim ruchem odjazdu głowicy po zakończeniu nakładania tworzywa w danym fragmencie. Szybki ruch powoduje pociągnięcie uplastycznionego jeszcze tworzywa, powodując jego przemieszczenie i utwardzenie w zdeformowanej formie. Błędy w postaci szerokich linii oznaczonych cyframi 3 i 4 na rysunku 13 są spowodowane ruchem dojazdowym ciepłej głowicy nad już wytworzoną warstwą i ponownym uplastycznieniem jej materiału. Docisk głowicy pozostawia trwały ślad po zastygnięciu tworzywa.

Za pomocą mikroskopu pomiarowego policzono liczbę wad występujących na wybranej powierzchni. Wyniki przedstawiono na wykresie (rys. 17). Widoczny jest wzrost liczby wad wraz z wzrostem prędkości wytwarzania. Na rysunku 17 przedstawiono również wykres zależności wymiarów wady w dwóch kierunkach w zależności od szybkości nakładania tworzywa. Pomimo różnicy w wielkościach długości wad dla obu osi obserwujemy wzrost długości wad wraz ze wzrostem prędkości wytwarzania.



Rys. 17. Wykresy a) liczby i b) długości wad w zależności od prędkości wytwarzania
 Fig. 17. Charts the number a) and b) length of defects depending on the production speed

3.5. Wady elementów cienkościennych

Tekst na każdej próbce jest nieczytelny (rys. 18). Napis wklęsły oraz wypukły został zniekształcony w wyniku zastosowania zbyt małej szerokości liter. Zamiana prędkości wydruku nie spowodowała subiektywnej poprawy lub pogorszenia czytelności tekstu. Należałoby powiększyć szerokość liter, aby stał się on bardziej czytelny. Trudno wnioskować na podstawie analizowanych próbek, czy prędkość wytwarzania wpłynęła na jego czytelność [6, 7].



Rys. 18. Jakość tekstu wklęsłego i wypukłego w zależności od prędkości głowicy:
 5 mm·s⁻¹, 30 mm·s⁻¹, 60 mm·s⁻¹, 90 mm·s⁻¹, 120 mm·s⁻¹

Fig. 18. The text quality concave and convex depending on the head speed:
 5 mm·s⁻¹, 30 mm·s⁻¹, 60 mm·s⁻¹, 90 mm·s⁻¹, 120 mm·s⁻¹

4. PODSUMOWANIE

Uzyskane z przeprowadzonych prac badawczych wyniki wskazują, że najmniej zdeformowane powierzchnie i najmniejszą liczbę wad uzyskuje się przy niższych prędkościach roboczych głowicy.

Zaistniałe wady można podzielić na zależne oraz niezależne od prędkości wytwarzania. Wielkość i liczba wad zależnych od prędkości wzrasta wraz ze wzrostem prędkości wytwarzania.

Zmniejszenie się liczby i wielkości wad niezależnych od prędkości można uzyskać poprzez modyfikacje elementów urządzenia, np.: zmniejszenie średnicy dyszy wytłaczającej tworzywo, zwiększenie rozdzielczości urządzenia, skró-

cenie czasu schładzania wytłoczonego tworzywa poprzez dobór parametrów procesu bądź wymuszoną wentylację.

W detalach mogą występować powierzchnie powodujące pojawienie się określonych wad. Przy doborze parametrów wytwarzania prototypów techniką FDM konieczne jest zatem przeanalizowanie detalu pod kątem występowania trudnych do wykonania powierzchni oraz żądanej jakości wyrobu. Na tej podstawie możliwy jest wybór odpowiedniej prędkości głowicy nanoszącej tworzywo, a tym samym zminimalizowanie wielkości i liczby wad oraz czasu trwania procesu.

LITERATURA

- [1] ANITHA R., ARUNACHALAM S.: Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modeling. *Journal of Material Processing Technology*, 2001, 385-388.
- [2] BLICHARZ B., CEDER M.: Wytwarzanie mechanizmów metodą FDM. *Mechanik* 7, 2015, 37-44.
- [3] BUDZIK G.: Odzworowanie powierzchni krzywoliniowej łopatek części gorącej silników lotniczych w procesie szybkiego prototypowania. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej*, 2009.
- [4] BYUN H., LEE K.H.: Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 22, 2006, 69-80.
- [5] CHOI S.H., SAMAVEDAM S.: Modelling and optimisation of Rapid Prototyping. *Computers in Industry* 47, 2002, 39-53
- [6] CUNICO M.W.M.: Study of fdm process parameter for deposition of filament in area with no support material. *Conference: 17th European Forum on Rapid Prototyping and Manufacturing*, 2012.
- [7] DZIUBEK T., FILIP M.: Analiza i porównanie dokładności wybranych przyrostowych metod wytwarzania. *Mechanik* 12, 2015, 54-61.
- [8] GÓRSKI F., KUCZKO W.: Choosing optimal rapid manufacturing process for thin-walled products using expert algorithm. *Journal of Industrial Engineering and Management* 2, 2010, 408-420.
- [9] MARCINIEC A., BUDZIK G.: Ocena dokładności prototypów stożkowych kół zębatych z zastosowaniem CMM. *Mechanika* 7, 2010, 75-80.
- [10] MARKOWSKI T., BUDZIK G.: Analiza możliwości wytwarzania kół zębatych o małych modułach technologią FDM. *XII Forum inżynierskie ProCAX, Sosnowiec 2013*.
- [11] TYBERG J., BØHN J.H.: FDM systems and local adaptive slicing. *Materials and Design* 20, 1999, 77-82.
- [12] RAYEGANI F., ONWUBOLU G.: Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 73, 07, 2014, 509-519.
- [13] SKAWIŃSKI P., SIEMIŃSKI P.: Zastosowanie przyrostowej metody FDM/FFF do wytwarzania kół przekładni zębatych. *Mechanik* 12, 2015, 173-179.

QUALITY ITEMS OBTAINED BY FDM DEPENDING ON THE PARAMETER MANUFACTURING SPEED

Summary: The paper presents the types of defects occurring in the elements produced FDM rapid prototyping technology. The results of studies the impact of manufacturing speed on the number and size of defects and describes their causes.

Key words: FDM, rapid prototyping, defects, manufacturing speed