DOKŁADNOŚĆ ELEMENTÓW UZYSKANYCH ZA POMOCĄ METODY FDM W ZALEŻNOŚCI OD PARAMETRU PRĘDKOŚCI WYTWARZANIA

Patrycja Kabat, Dominika Magdziarz, Paweł Maćkowiak¹, Maciej Kotyk

1. WSTĘP

Prototypowanie umożliwia weryfikację przyjętych założeń konstrukcyjnych oraz przedstawienie wyników pracy potencjalnym inwestorom. W procesie projektowym nie występuje potrzeba, aby elementy prototypowe lub pokazowe wykonane były z tego samego materiału co materiał docelowy [Byun i Lee 2006]. W takich sytuacjach istnieje możliwość zastosowania tworzyw termoplastycznych i technologii przyrostowych FDM.

Prototypy mechanizmów wymagają określonej dokładności wykonania części, z których się składają. Wytwarzanie ich w technologii FDM związane jest z koniecznością określenia dokładności używanych urządzeń. Odchyłki wymiarowe tak wytworzonych prototypów mogą być spowodowane wieloma czynnikami, m.in.:

- rozdzielczością komputerowych modeli formatu .stl,
- błędami programu powstałymi podczas generowania gcode,
- wadami urządzenia, np. nieprostopadłością osi, rozdzielczością silników krokowych, tarciem na prowadnicach,
- ograniczeniami materiału, np. skurczu przetwórczego,
- nieprawidłowym doborem parametrów przetwórczych, w tym: temperatur procesu i prędkości nakładania warstw filamentu.

Sterowanie parametrem prędkości wytwarzania, czyli prędkości nakładania tworzywa przez głowicę, powoduje wydłużenie lub skrócenie czasu uzyskania elementu. Niektórzy producenci materiału wejściowego podają prędkość liniową głowicy, która jest optymalna dla ich produktu [Anitha i in. 2001]. W sytuacji gdy nie jest ona znana lub istnieje potrzeba przyspieszenia procesu bądź uzyskania większych dokładności, należy przeprowadzić badanie wpływu prędkości wytłaczania i nakładania tworzywa na dokładność uzyskanych wymiarów [Cader i in. 2013].

Celem badań było określenie wpływu prędkości roboczej głowicy na dokładność wymiarów próbek modeli uzyskanych z wykorzystaniem technologii FDM oraz weryfikacja zalecanej przez producenta drukarki prędkości wytwarzania. Uzyskane wyniki pozwalają na optymalizację parametru prędkości roboczej głowicy, co skutkuje skróceniem czasu wytwarzania detali.

2. OBIEKT BADAŃ

Do przeprowadzenia badania wpływu prędkości druku na dokładność wymiarów detali wytwarzanych w technologii FDM wykorzystano autorski model testowy do badań wpływu prędkości na jakość uzyskanych powierzchni zewnętrznych. Powstał on

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Podstaw Konstrukcji Maszyn, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: pawel.mackowiak@utp.edu.pl

na podstawie analizy literatury [Budzik 2009, Kotyk i Maćkowiak 2015, Maćkowiak i in. 2016] oraz własnych doświadczeń. W modelu występują powierzchnie, przy odtworzeniu których spodziewano się pojawienia określonych błędów, które można wykorzystać do pomiarów dokładności wykonania. Za pomocą zaprojektowanych, a później wytworzonych próbek możliwe jest sprawdzenie tolerancji wykonania wymiarów: zewnętrznych i wewnętrznych w każdej z par osi. Dodatkowo powierzchnie, które podlegają pomiarom, powtarzają się we wszystkich trzech płaszczyznach. Pozwala to zbadać wpływ kierunku wytwarzania we wszystkich osiach. Wymiary detalu testowego stanowiącego sześcian, wyłączając elementy wypukłe, wynoszą 40 mm × 40 mm × 40 mm. Należy zaznaczyć, że otwory przelotowe o przekroju okrągłym oraz kieszenie o zarysie kwadratowym leżą w każdej osi detalu. Próbkę testową wraz z drukarką, na której próbki były wytwarzane, zaprezentowano na rysunku 1.



Rys. 1. a) próbka testowa (opracowanie własne), b) urządzenie do szybkiego prototypownia DIM 200 [Instrukcja... 2014]

Próbki wytworzono na drukarce 3D DIM 200 (rys. 1b). Urządzenie realizuje ruch stołu w kierunku y, ruch głowicy w kierunku x oraz ruch trawersy wraz z głowicą w kierunku z. Napęd stanowią silniki krokowe, których minimalny skok wynosi 1,8 stopnia. Warunkuje to minimalną odległość między kolejnymi położeniami urządzenia wynoszącą około 0,02 mm w osi x oraz y. W opisywanych osiach ruch przekazywany jest poprzez koła zębate pasowe i pasek zębaty. W osi z ruch jest natomiast realizowany poprzez mechanizm śruba – nakrętka. Wymiary próbki testowej, które poddawane były pomiarom podczas eksperymentu, wraz z zaznaczonymi osiami zaprezentowano na rysunku 2.



Rys. 2. Wymiary próbki testowej wraz z zaznaczonymi osiami urządzenia (opracowanie własne)

3. OPIS BADAŃ

Detal testowy został zamodelowany w programie Inventor Professional 2016 i następnie eksportowany do formatu stl. W programie Slic3r Version 1.1.7 wygenerowano programy gcode dla poszczególnych prędkości wydruku. Program Slic3r umożliwia oddzielne sterowanie parametrami prędkości wytwarzania ścianek zewnętrznych, wypełnienia oraz prędkością dojazdu. W celach badania wpływu prędkości wytwarzania ścianek zewnętrznych na dokładność i jakość ich wykonania przyjęto, iż prędkości nanoszenia wypełnienia oraz prędkości dojazdu będą stałe i wyniosą odpowiednio 60 mm·s⁻¹ oraz 120 mm·s⁻¹. Prędkości wytwarzania ścianek zewnętrznych wynoszą dla kolejnych próbek 5 mm s⁻¹, 30 mm s⁻¹, 60 mm s⁻¹, 90 mm s⁻¹, 120 mm s⁻¹. Pozostałe parametry wydruku przyjęto dla ustawień ogólnych. Jako liczbę warstw zewnętrznych, podstawy i wierzchu 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, którym był ABS+. Podana przez producenta zalecana prędkość głowicy wynosi 60 mm·s⁻¹. W celu zwiększenia przyczepności detalu do stołu użyto roztworu ABS w acetonie.

Badanie obejmowało pomiar długości, szerokości w osi x i y, a także wysokości osi z detalu i głębokości otworów. Do pomiaru zastosowano urządzenia pomiarowe zróżnicowane pod względem zakresu i dokładności:

- mikromierz kabłąkowy o zakresie pomiarowym od 25 do 50 mm oraz dokładności do 0,01mm,
- mikromierz szczękowy o zakresie pomiarowym od 5 do 30 mm oraz dokładności do 0,01mm,
- mikroskop pomiarowy.

Wartości długości, szerokości, wysokości detalu zostały zmierzone za pomocą mikrometra kabłąkowego o zakresie 25-50 mm. Średnice otworów przelotowych zmierzono z wykorzystaniem mikrometru szczękowego. Wielkości nominalne zaprojektowanego modelu wynoszą dla Sx (szerokości w osi x), Sy (szerokości w osi y) i Sz (szerokości w osi z) 40 mm, natomiast dx (średnica otworu, którego oś jest równoległa do osi x), dy (średnica otworu przelotowego, którego oś jest równoległa do osi z) oraz dz (średnica otworu przelotowego, którego oś jest równoległa do osi z) zostały zaprojektowane dla wartości nominalnej równej 10 mm. Pomiary wielkości rzeczywistej Sx, Sy oraz Sz nie odbywały się tylko w jednym punkcie wyznaczonym na danej płaszczyźnie, lecz dokonano 30 pomiarów punktowo rozłożonych na całej szerokości danego boku. Pomiary średnic dx, dy i dz były natomiast wykonywane co 12° na obwodzie otworu w celu uzyskania takiej samej średnicy jak w przypadku pomiarów ścian bocznych.

4. WYNIKI I ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

4.1. Wymiary zewnętrzne

Wymiar nominalny długości Sy, szerokości Sx oraz wysokości Sz sześcianu stanowił 40 mm. Wartość średnią, maksymalną i minimalną długości zmierzonych boków sześcianu względem prędkości wytwarzania ścianek zewnętrznych V przedstawiono w tabeli 1.

V	Sy	Sx	Sz	Sy _{min}	Sx _{min}	Sz _{min}	Sy _{max}	Sx _{max}	Sz _{max}
mm·s ⁻¹					mm				
5	40,08	40,04	40,03	39,99	39,97	39,9	40,20	40,10	40,20
30	40,03	40,06	39,93	39,95	39,99	39,78	40,11	40,18	40,04
60	40,04	40,03	39,94	39,96	39,97	39,83	40,15	40,15	40,09
90	40,02	40,07	40,00	39,96	39,97	39,86	40,25	40,22	40,09
120	40,05	40,05	39,98	39,97	40,00	39,8	40,15	40,24	40,15

Tabela 1. Wartości wymiarów długości, szerokości i wysokości: średnie, minimalne i maksymalne (opracowanie własne)

Pola tolerancji wykonania wymiarów detali testowych i ich zmianę w zależności od prędkości wytwarzania ścianek zewnętrznych przedstawiono na rysunku 3. Wartość średnią danego wymiaru przedstawiają linie ciągłe. Położenie maksymalnych i minimalnych wymiarów przedstawiają wierzchołki słupków. Można zaobserwować, że wymiary średnie długości i szerokości detali testowych uzyskano niezależnie od wartości prędkości w przedziale od 40 do 40,1 mm. Wartość średnia wysokości detalu testowego mieściła się w przedziale od 39,9 do 40,05 mm. Nie zaobserwowano wpływu zwiększania prędkości na zmniejszenie lub zwiększenie się wymiarów zewnętrznych detalu testowego.



Rys. 3. Zależność pomiędzy prędkością wytwarzania odpowiednio 5, 30, 60, 90, 120 mm·s⁻¹ a wymiarami długości ścian detalu (opracowanie własne)

Różnica pomiędzy górną a dolną odchyłką wymiarową stanowi pole tolerancji. Wymiary pola tolerancji wykonania wymiaru długości, szerokości i wysokości przedstawiono na rysunku 4. Nie można określić jednoznacznego trendu wielkości pola tolerancji w zależności od prędkości wytwarzania detali testowych. Różnice mogą mieć charakter przypadkowy. W większości wytworzonych detali testowych największe pole tolerancji dotyczyło wymiaru wysokości.



Rys. 4. Zależność pomiędzy prędkością wytwarzania odpowiednio 5, 30, 60, 90, 120 mm·s⁻¹ a wielkością pola tolerancji wykonania poszczególnych wymiarów detalu testowego (opracowanie własne)

Chcąc porównać wartości błędów wykonania jako różnicy pomiędzy wymiarem nominalnym a rzeczywistym, wprowadzono pojęcie błędu średniego bezwzględnego. Stanowi on średnią arytmetyczną z modułów liczb S_i uzyskanych ze wzoru:

$$S_i = S_n - S_{irz}$$

gdzie:

 S_n – nominalna wartość wymiaru,

 S_{irz} – rzeczywista (zmierzona) wartość wymiaru w punkcie i.

Uzyskane wartości błędu średniego bezwzględnego przedstawiono na wykresie słupkowym (rys. 5). Wykres świadczy o braku jednoznacznej tendencji wzrostu lub zmniejszania się błędów wykonania wymiarów detali testowych wraz ze zmianą pręd-kości wytwarzania.



Rys. 5. Zależność pomiędzy prędkością wytwarzania odpowiednio 5, 30, 60, 90, 120 mm·s⁻¹ a wielkością średniego błędu bezwzględnego (opracowanie własne)

W celu udzielenia odpowiedzi na problem badawczy, jaki stanowiło pytanie o wpływie prędkości wytwarzania na dokładność wymiarową wykonania detali, postawiono hipotezę 0: wymiary zewnętrzne wytworzonych detali nie zmieniają się podczas zwiększania prędkości wytwarzania w badanym zakresie.

Statystyczne potwierdzenie hipotezy 0 wymagało wykonania testu Fishera w celu porównania wariancji w dwóch porównywanych populacjach pomiarów. Pozytywny wynik testu Fishera powyżej 0,05 dla poziomu istotności 0,05 umożliwia stwierdzenie, że wariancje w obu populacjach wyników są jednakowe i można zastosować test t-Studenta, aby porównać dwie wartości średnie. Test Fishera wykazał jednakowość wariancji dla każdej pary porównywanych populacji pomiarów. Wyniki testu t-Studenta w celu porównania wszystkich detali testowych między sobą zaprezentowano w tabeli 2. Czerwonym kolorem oznaczono wyniki testu, które dla poziomu istotności 0,05 świadczą o odrzuceniu hipotezy 0 o jednakowych porównywanych wartościach średnich. Z zestawienia wynika, że detal testowy wytworzony z prędkością 120 mm·s⁻¹ ma najbardziej zbliżone wymiary średnie do pozostałych detali. Detal testowy wytworzony z najmniejszą prędkością 5 mm·s⁻¹ ma najmniej zbliżone wymiary do pozostałych detali wytworzonych z większą prędkością.

Tabela 2. Wyniki testu t-Studenta dla wymiarów zewnętrznych detalu testowego (opracowanie własne)

Prędkość wytwarzania, mm·s ⁻¹	5	30	60	90	120
5	1	0,001	0,002	0,000	0,014
30	-	1	0,000	0,032	0,207
60	-	-	1	0,184	0,432
90	-	-	-	1	0,054
120	-	-	-	-	1

4.2. Wymiary wewnętrzne

Wymiar nominalny średnicy dy otworu leżącego w osi Y, średnicy dx otworu w osi X oraz średnicy dz otworu w osi Z stanowił 10 mm. Wartość średnią, maksymalną i minimalną średnic zmierzonych otworów względem prędkości wytwarzania ścianek zewnętrznych v przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wartości wymiarów długości, szerokości i wysokości: średnie, minimalne i maksymalne (opracowanie własne)

V	dy	dx	dz	dy_{min}	$d\mathbf{x}_{\min}$	dz _{min}	dy _{max}	dx _{max}	dz _{max}
mm·s ⁻¹					mm				
5	9,93	9,90	9,44	9,72	9,71	9,315	10,29	10,31	9,55
30	9,90	9,91	9,44	9,67	9,67	9,28	10,32	10,28	9,58
60	9,81	9,94	9,41	9,64	9,65	9,31	10,09	10,35	9,53
90	9,86	9,89	9,41	9,67	9,64	9,31	10,33	10,18	9,55
120	9,87	9,90	9,41	9,68	9,68	9,34	10,19	10,30	9,505

Pola tolerancji wykonania wymiarów detali testowych i ich zmianę w zależności od prędkości wytwarzania ścianek zewnętrznych przedstawiono na rysunku 6. Wartość średnią danego wymiaru przedstawiają linie ciągłe. Położenie maksymalnych i minimalnych wymiarów przedstawiają wierzchołki słupków. Można zaobserwować, że wymiary średnie średnic otworów, których osie są równoległe do stołu dx i dy, mieściły się w przedziale od 9,81 do 9,94 mm. Wartość średnia średnicy prostopadłej do stołu dz detalu testowego mieściła się w przedziale od 9,41 do 9,44 mm. Nie zaobserwowano wpływu zwiększania prędkości na zmniejszenie lub zwiększenie się wymiarów we-wnętrznych detalu testowego.



Rys. 6. Zależność pomiędzy prędkością wytwarzania odpowiednio 5, 30, 60, 90, 120 mm·s⁻¹ a wymiarami długości ścian detalu (opracowanie własne)

Różnica pomiędzy górną a dolną odchyłką wymiarową stanowi pole tolerancji. Wymiary pola tolerancji wykonania wymiaru długości, szerokości i wysokości przedstawiono na rysunku 7. Nie można określić jednoznacznego trendu wielkości pola tolerancji w zależności od prędkości wytwarzania detali testowych. Różnice mogą mieć charakter przypadkowy. Zaobserwowano znacząco mniejsze pole tolerancji dla średnicy otworu prostopadłego do płaszczyzny stołu dz w stosunku do dwóch pozostałych otworów dx i dy.



Rys. 7. Zależność pomiędzy prędkością wytwarzania odpowiednio 5, 30, 60, 90, 120 mm·s⁻¹ a wielkością pola tolerancji wykonania poszczególnych wymiarów detalu testowego (opracowanie własne)

Wartości błędu średniego bezwzględnego przedstawiono na wykresie słupkowym (rys. 8). Z wykresu można wnioskować o braku jednoznacznej tendencji wzrostu lub zmniejszania się błędów wykonania wymiarów detali testowych wraz ze zmianą prędkości wytwarzania. Można natomiast zaobserwować większą wartość błędu bezwzględnego dla średnicy otworu prostopadłego do płaszczyzny stołu dz. Wartości błędu dla średnic otworów równoległych do płaszczyzny stołu dx i dy są zbliżone do siebie.



Rys. 8. Zależność pomiędzy prędkością wytwarzania odpowiednio 5, 30, 60, 90, 120 mm·s⁻¹ a wielkością średniego błędu bezwzględnego (opracowanie własne)

Tak jak w przypadku wymiarów zewnętrznych sześcianu przeprowadzono analizę statystyczną dla wartości średnich średnic otworów. Test Fishera wykazał jednakowość wariancji dla każdej pary porównywanych populacji pomiarów. Wyniki testu t-Studenta w celu porównania wszystkich detali testowych między sobą zaprezentowano w tabeli 4. Kolorem czerwonym oznaczono w niej wyniki testu, które dla poziomu istotności 0,05 świadczą o odrzuceniu hipotezy 0 o jednakowych porównywanych wartościach średnich. Z zestawienia wynika, że detal testowy wytworzony z prędkością 60 mm·s⁻¹ ma wymiary średnie średnic dx istotnie różne od średnic dx pozostałych detali. Nie ma wskazań do odrzucenia hipotezy 0, mówiącej o tym, że średnice wytwarzane z różnymi prędkościami są jednakowe. Podobne wyniki uzyskano dla pozostałych wymiarów średnic dy i dz.

Tabela 4. Wyniki testu t-Studenta dla wymiarów zewnętrznych detalu testowego dla otworu dx (opracowanie własne)

V $[mm \cdot s^{-1}]$	5	30	60	90	120
5	1	0,415	0,002	0,091	0,147
30	-	1	0,000	0,892	0,559
60	-	-	1	0,166	0,076
90	-	-	-	1	0,755
120	-	-	-	-	1

5. WNIOSKI

- 1. Zwiększenie prędkości drukowania nie powoduje powstania odchyłek wymiarowych, powoduje natomiast powstanie większej ilości wad.
- 2. W większości przypadków można uznać, że średnice otworów z uwzględnieniem poziomu ufności 0,05 są jednakowe.
- 3. Pole tolerancji wymiarów otworów w płaszczyznach równoległych do stołu jest zdecydowanie mniejsze niż w płaszczyznach do niego prostopadłych.
- Zastosowanie mechanizmu śruba nakrętka w drukarce powoduje powstawanie większej ilości błędów i odchyłek niż w przypadku rozwiązania prowadnica – silnik krokowy.

LITERATURA

Anitha R., Arunachalam S., Radhakrishnan R., 2001. Critical parameteres influencing the quality of prototypes in fused deposition modeling. J. Mater. Process. Technol. 118, 385-388.

Budzik G., 2009. Odwzorowanie powierzchni krzywoliniowej łopatek części gorącej silników lotniczych w procesie szybkiego prototypowania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.

Byun H., Lee K., 2006. Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making. Rob. Comput. Integr. Manuf. 22, 69-80.

Cader M., Jastrzębska A., Pakieła Z., 2013. Analiza wpływu orientacji modelu w komorze roboczej na wytrzymałość w procesie FDM. Mechanik 7, 85-94.

Instrukcja montażu drukarki DIM 200. 3Dimenstion 2014.

Kotyk M., Maćkowiak P., 2015. Badanie podstawowych właściwości mechanicznych próbek z tworzywa ABS wykonanych za pomocą drukarki 3D w zależności od stopnia ich wypełnienia. Nauka niejedno ma imię..., t. 3, 43-55.

Maćkowiak P., Magdziarz D., Tomkiewicz R., Kabat P., Kotyk M., 2016. Wielkość i ilość wad w elementach uzyskanych metodą FDM w zależności od parametru prędkości wytwarzania. Postępy w Inżynierii Mechanicznej 7(4), 17-31.

36