

Mgr inż. Bartosz Blicharz  
Mgr inż. Maciej Cader  
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP  
Piotr Hermanowicz  
Politechnika Warszawska

DOI: 10.17814/mechanik.2015.7.211

## WYTWARZANIE MECHANIZMÓW METODĄ FDM

*Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki pomiarów dokładności odwzorowania modeli CAD z wykorzystaniem technologii FDM. Opisano sposób wykonywania pomiarów oraz wnioski z badań ukierunkowane na wytwarzanie ruchomych mechanizmów metodą FDM.*

## PRODUCTION OF MECHANISMS USING FDM TECHNOLOGY

*Abstract: The article presents the results of measurement of CAD models accuracy manufactured using FDM technology. Article describe the way of measure results of experiments and the conclusion from diagnose associate with working mechanisms manufactured using FDM technology.*

*Słowa kluczowe: mechanizmy, technologia FDM, pomiary tolerancji*  
*Keywords: mechanisms, FDM technology, measure of tolerance*

### 1. WPROWADZENIE

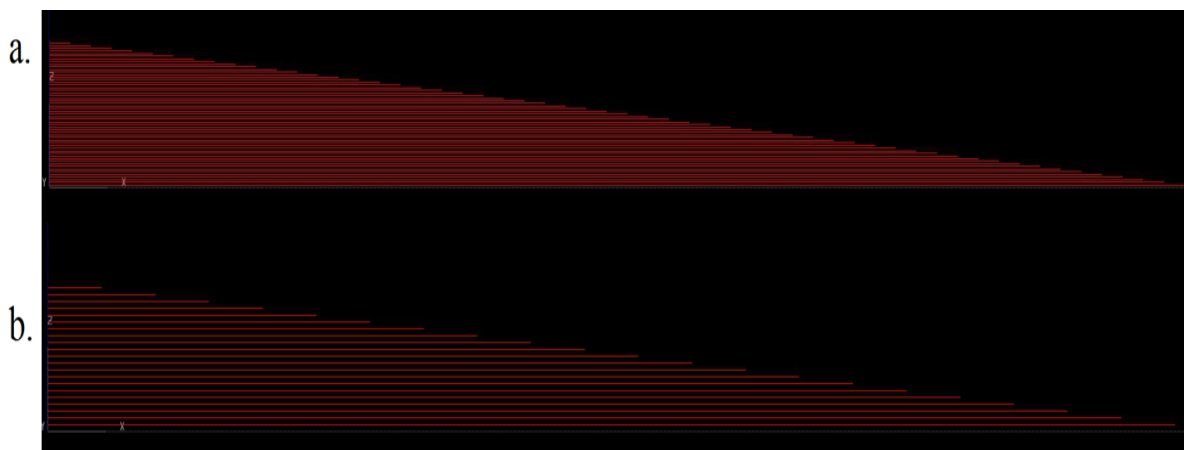
Technologie wytwarzania przyrostowego stają się coraz powszechniej stosowanymi metodami produkcji zarówno prototypów, jak i finalnych, w pełni funkcjonalnych, urządzeń [1]. Dużą zaletą jest możliwość produkowania elementów o niemal dowolnym kształcie i złożoności oraz skomplikowanych, niejednokrotnie niemożliwych do wykonania innymi metodami. Niewątpliwą zaletą druku 3D, w tym technologii FDM, jest możliwość wytwarzania gotowych, zmontowanych złożeń części konstrukcyjnych w jednym procesie. Celem artykułu jest analiza dokładności wykonania elementów złożeń wytwarzanych w jednym procesie metodą FDM w stosunku do komputerowego projektu CAD.

#### 1.1. Cechy elementów wytwarzanych przyrostowo

Wytwarzanie przyrostowe elementów dla wszystkich dostępnych obecnie na rynku technologii polega na podziale modelu geometrycznego na warstwy, przy czym geometria ta, w wyniku procesu zapisu projektu CAD do postaci powierzchniowej, obarczona jest błędem.

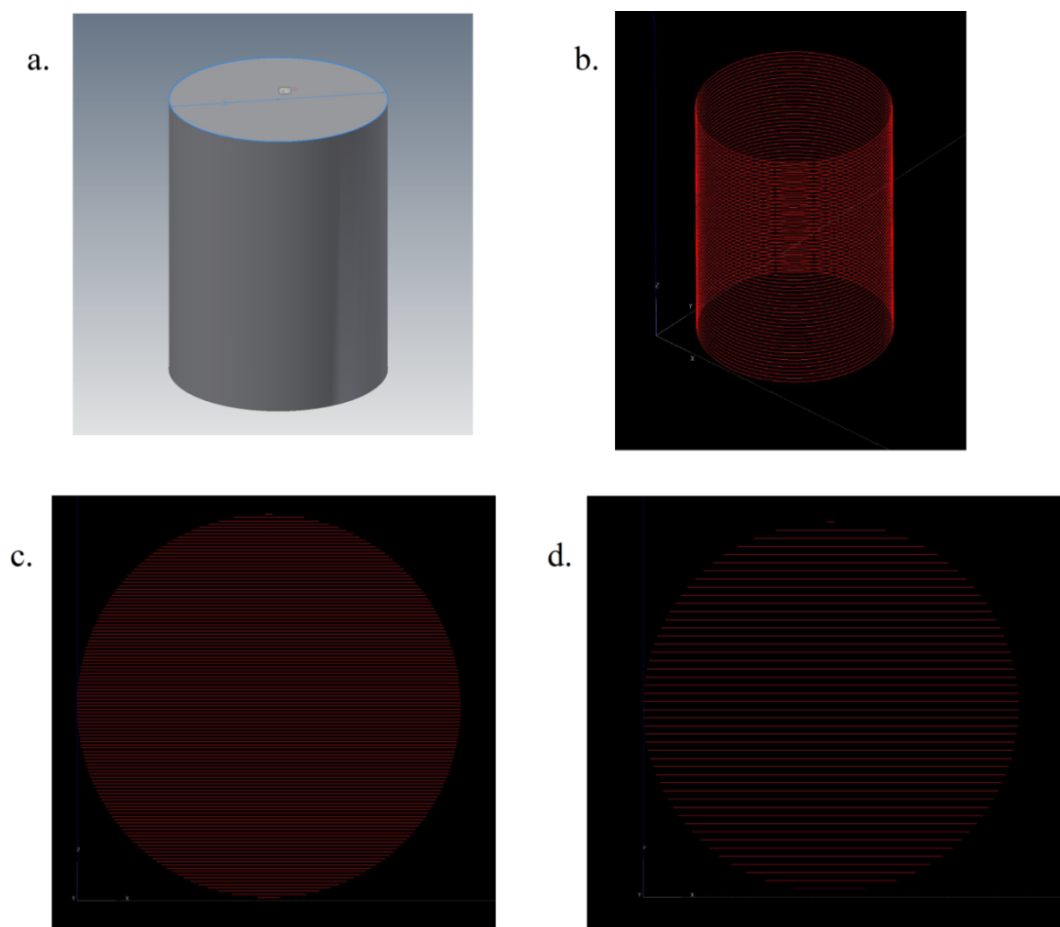
Wynikają one przede wszystkim z niedokładności w odwzorowaniu modelu CAD przy eksporcie do pliku STL oraz odwzorowania warstw wynikającego z charakteru technologii. Ich wielkość zależy od ustawień i możliwości maszyny. Następnie model wytwarzany jest warstwa po warstwie, z czego wynikają następujące niedogodności:

- powierzchnie nachylone w stosunku do podłoża będą odwzorowywane z widocznymi schodkami, których wielkość zależy od wartości kąta nachylenia – rys. 1,
- małe pole przekroju powierzchni warstwy znacząco osłabia model.



Rys. 1. Odwzorowanie ścianki skośnej dyszą dla wysokości warstwy:  
a – 0,127 mm; b – 0,330 mm

Niedokładności odwzorowania kształtu w modelu wytwarzanym warstwowo widoczne są na próbce o kształcie walca. Rysunek 2 przedstawia jego model geometryczny (rys. 2a), podział modelu ustawionego na ściance bocznej (rys. 2b), ustawionego na powierzchni walcowej o grubości warstwy 0,127 mm (rys. 2c) oraz ustawionego na powierzchni walcowej o grubości warstwy 0,330 mm (rys. 2d).



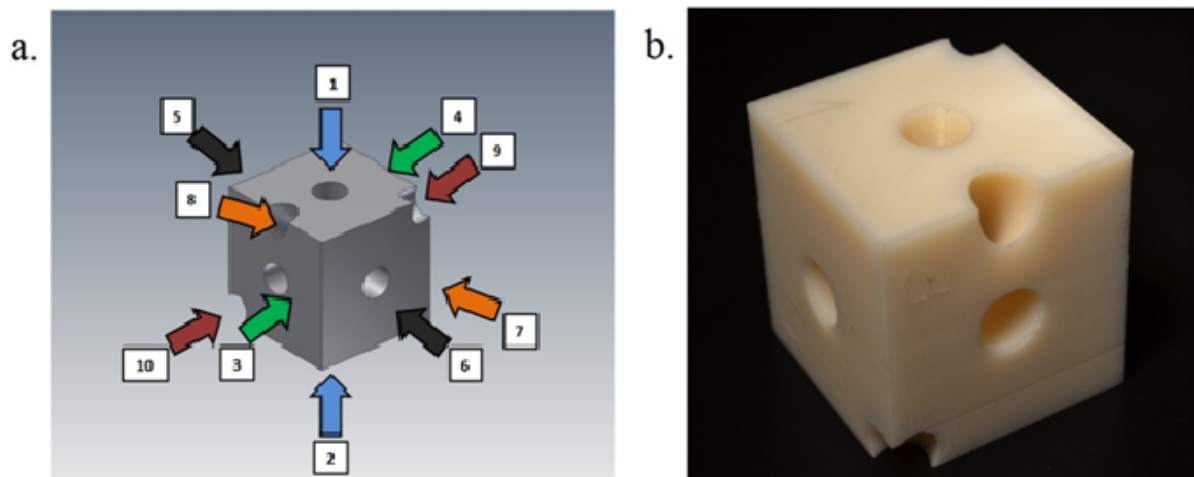
Rys. 2. Przedstawienie walca: a – modelu geometrycznego, b – modelu drukowanego w ułożeniu pionowym, c – odwzorowania kształtu walca w ułożeniu poziomym dyszą dokładną, d – odwzorowanie kształtu walca w ułożeniu poziomym dyszą zgrubną

Próbka wytworzona w ułożeniu zaprezentowanym na rysunku 2b posiada najdokładniej odwzorowany kształt okręgu z prezentowanych przypadków. Grubości warstw zostały dostosowane dla maszyny FORTUS 400 mc [2]. Wybrana maszyna jest reprezentatywna dla maszyn pracujących w technologii FDM [3], dlatego została wytypowana do przeprowadzenia badań.

## 2. PRZEBIEG I WYNIKI BADAŃ

W badaniach założono, że zostaną zbadane dwa warianty wytwarzania mechanizmów: w osobnych elementach do złożenia oraz wytwarzane w jednym procesie. W tym celu zaplanowano trzy serie pomiarów: pierwszy z nich zakłada pomiar średnic okręgów o osiach równoległych do osi głównych x, y, z, umieszczonej pod kątem  $45^\circ$  oraz  $35,26^\circ$  do podstawy. Wartości katowe zostały wybrane jako przekątne kostki sześciennej. Druga część pomiarów dostarczy informacji dotyczących tworzenia pasowań ruchomych (bez oporu i z oporem podczas ruchu) oraz nierozłącznych. Wynikiem trzeciej, ostatniej części pomiarów będzie informacja o tym, jaką wartość luzu między ściankami należy zostawić, aby zaprojektowany mechanizm pozostał ruchomy. Do wytworzenia badanych próbek zastosowano najmniejszą dostępną dyszę T10, o grubości warstwy 0,127 mm, szerokość ścieżki równą 0,203 mm oraz materiał ABS-M30 [4]. Deklarowana dokładność maszyny w osiach równoległych do podstawy wynosi  $\pm 0,0015$  mm dla każdego 1 mm długości modelu.

W pierwszym etapie wytworzono kostkę o wymiarach  $40 \times 40 \times 40$  mm z otworami o średnicy 10 mm. Wytworzoną kostkę oraz ułożenie otworów względem podłoża przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Kostka pomiarowa z zamodelowanymi otworami o kierunku osi:

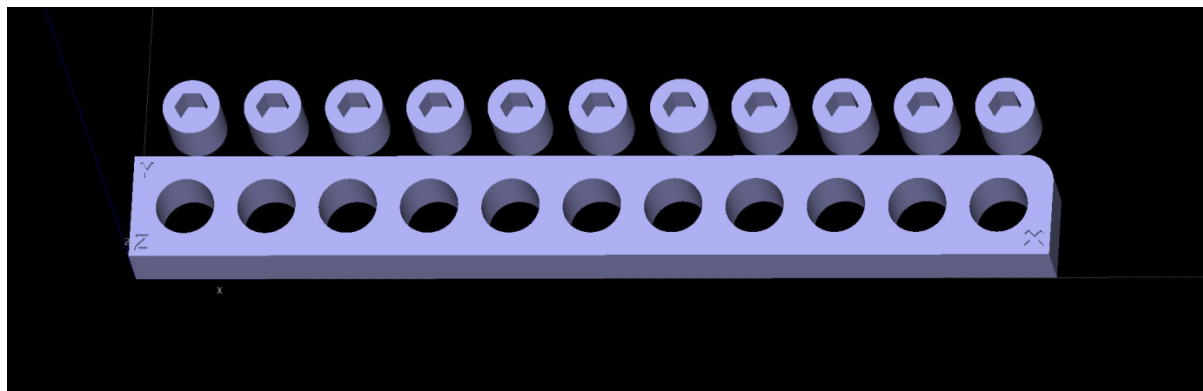
- 1 i 2 – zgodnym z osią z, 3 i 4 – zgodnym z osią x,
- 5 i 6 – zgodnym z osią y, 7 i 8 – pod kątem  $45^\circ$  do podstawy,
- 9 i 10 – pod kątem  $35,26^\circ$  do podstawy

Wykorzystując współrzędnościową maszynę pomiarową TESA MICRO – HITE 3D, dokonano pomiarów średnic otworów w wytworzonym obiekcie. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki pomiarów średnic otworów wykonanych maszyną współrzędnościową TESA MICRO – HITE 3D

Numer otworu	Średnica			Odchylenie maksymalne [mm]
	Pomiar I [mm]	Pomiar II [mm]	Nominalna [mm]	
1	10,136	10,107	10,000	0,029
2	10,082	10,078	10,000	0,004
3	9,978	10,072	10,000	0,094
4	10,034	9,964	10,000	0,070
5	9,949	9,955	10,000	0,006
6	9,917	9,959	10,000	0,042
7	10,024	10,071	10,000	0,047
8	10,016	10,073	10,000	0,057
9	9,874	9,254	10,000	0,620
10	10,065	9,618	10,000	0,447

W drugim etapie testów wykonano 11 wałków o zmiennych średnicach nominalnych (od 9,80 do 10,20 mm) oraz 11 otworów o stałej średnicy nominalnej równej 10,00 mm. Próbkę wytwarzano w taki sposób, aby najdokładniej odwzorować ich okrągły kształt (rysunek 2b). Wałki i element z otworami były wytwarzane w jednym procesie obok siebie. Przygotowane próbki przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Ułożenie próbek drukowanych w komorze roboczej

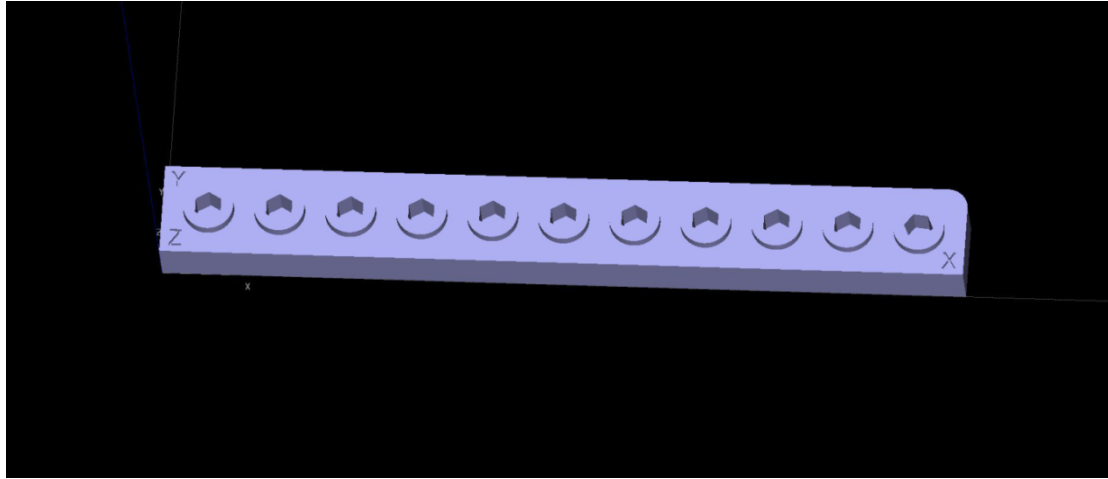
W wałkach wykonano otwory umożliwiające ich obrót w celu zbadania wartości pasowania. Wykonane wałki umieszczano w otworach i dokonywano pomiaru momentu obrotowego powodującego pokonanie oporów statycznych wałka i w efekcie jego obrót. Wyniki eksperymentu przedstawiono w tabeli 2.

Na podstawie wyników ustalono, że pasowanie luźne uzyskuje się dla próbek, gdzie średnica nominalna wałka, czyli zaprojektowana w geometrii na poziomie programu CAD, jest o 0,08 mm mniejsza od średnicy nominalnej otworu. Powyżej tej wartości pojawiły się opory podczas obrotu wałka w otworze, a moment konieczny do obrotu wyniósł od 0,042 do 0,902 Nm. Przy rozmiarze wałka równym 10,20 mm podczas próby obrotu doszło do uszkodzenia próbki. Uznano, że jest to granica połączeń ruchomych i nieruchomych dla tego rodzaju próbek.

Tabela 2. Wyniki pomiaru momentu obrotowego w próbkach niezbędnego do pokonania statycznych oporów

Numer próbki	Średnica nominalna wałka [mm]	Średnica nominalna otworu [mm]	Moment powodujący obrót [Nm]
1	9,80	10,00	Pomijalnie mały
2	9,84	10,00	Pomijalnie mały
3	9,88	10,00	Pomijalnie mały
4	9,92	10,00	Pomijalnie mały
5	9,96	10,00	0,042
6	10,00	10,00	0,216
7	10,04	10,00	0,189
8	10,08	10,00	0,392
9	10,12	10,00	0,453
10	10,16	10,00	0,902
11	10,20	10,00	Uszkodzenie próbki

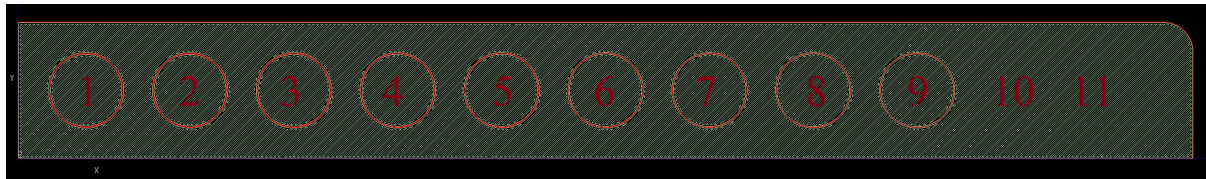
Ostatnim etapem pomiarów było wytworzenie serii próbek, w których wałek jest drukowany wewnątrz otworu. Średnice pomiarowe wałków zostały dobrane w oparciu o wyniki wcześniejszego eksperymentu dotyczącego oporów ruchu połączeń ruchomych. Celem tego eksperymentu było ustalenie wartości luzu między ściankami wałka i otworu, dla którego nie dojdzie do ich trwałego złączenia uniemożliwiającego ruch względny. Obiekt pomiarowy przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Rysunek próbki pomiarowej – wałki wytwarzane w otworach

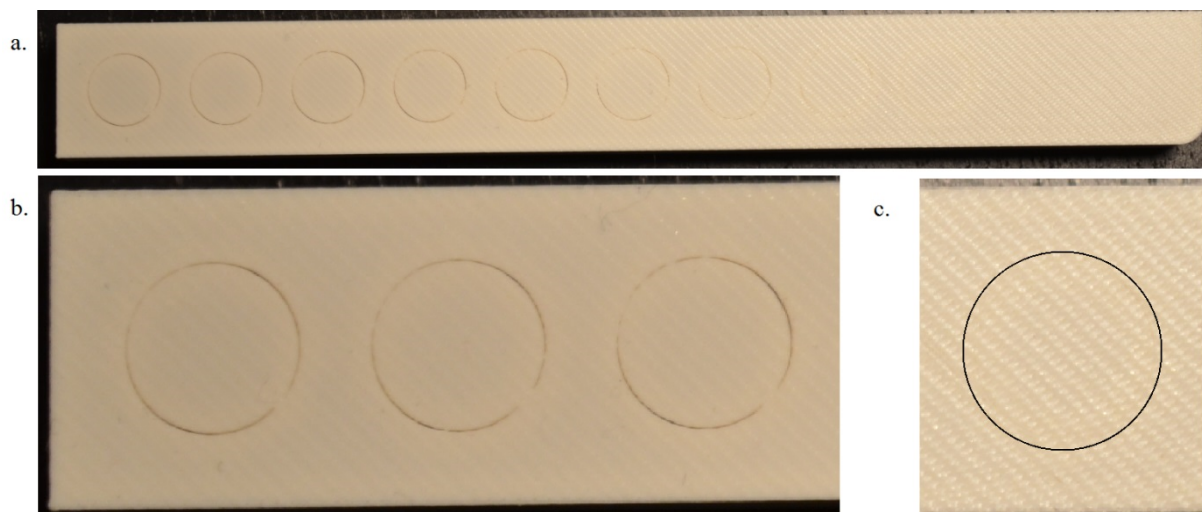
Średnice otworów pozostały stałe i miały wartość nominalną 10,00 mm, natomiast średnice wałków wynosiły od 9,82 do 10,02 mm ze zmianą co 0,02 mm. Łącznie wykonano 11 próbek.

Ocena wizualna modelu przygotowywanego do wytworzenia w oprogramowaniu dostarczyła informacji o złączeniu wałków i otworów dla średnic 10,00 mm i 10,02 mm, co zostało przedstawione na rysunku 6. W pozostałych przypadkach program nie wykazał takich sytuacji.



Rys. 6. Ułożenie ścieżek wytwarzanego elementu pomiarowego, numery od 1 do 11 wskazują miejsca, w których znajdują się wałki

Po wykonaniu próbki okazało się, że doszło do złączenia wszystkich przygotowanych próbek – powierzchnia połączeń była zależna od różnicy średnic wałka i otworu. Przedstawiono to na rysunku 7.



Rys. 7. Model pomiarowy z wałkami wytworzonymi wewnątrz otworów: a – wygląd całej próbki, b – wygląd pierwszych trzech próbek, c – wygląd ostatniej próbki, w której średnica wałka była mniejsza niż średnica otworu

Testy wykazały, że połączenie ruchome udało się uzyskać dla próbek numer 1 i 2 (średnica wałka odpowiednio 9,82 i 9,84 mm). Doprowadzenie do połączenia ruchomego próbek 3, 4 oraz 5 (średnice wałka odpowiednio 9,86, 9,88 mm i 9,90 mm) wymagały przyłożenia znacznego momentu w celu zerwania połączeń między wałkiem i otworem. Testy następnych próbek zakończyły się ich uszkodzeniem.

### 3. PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych badań wynika, że projektując model CAD ruchomego mechanizmu, który ma zostać wykonany w jednym procesie wytwarzania, należy pozostawić luz między ściankami przynajmniej 0,08 mm. Zastosowanie odstępu z przedziału od 0,05 do 0,08 mm również umożliwi uzyskanie ruchomego połączenia, lecz będzie ono wymagało rozerwania zlanych fragmentów ścieżek współpracujących elementów. Odstęp mniejszy niż 0,05 mm spowoduje uszkodzenie mechanizmu prędzej niż doprowadzenie go do połączenia ruchomego.

Projekt pary kinematycznej poruszającej się z oporem wymaga osobnego wytworzenia elementów składowych mechanizmu, a następnie jego złożenia. W tym przypadku, w zależności od wymaganych oporów ruchu, odległość ścianek należy dobierać według tabeli 2 – pomijalnie mały opór (mniejszy niż 0,02 Nm) uzyskano dla średnicy wałka do 9,92 mm, opór umożliwiający obrót (między 0,04 a 0,9 Nm) uzyskano dla średnicy wałka między 9,96 a 10,16 mm, natomiast próbka o średnicy 10,20 mm uszkodziła się podczas próby obrotu. Powyższe parametry zostały sprawdzone dla grubości warstwy 0,127 mm, szerokości wiązki 0,202 mm i maszyny FORTUS 400 mc. Aktualnie prowadzone są testy mające na celu skatalogowanie wartości odchyłek dla wariantów z innymi wysokościami pojedynczej warstwy oraz innym ułożeniem próbek w komorze roboczej.

## LITERATURA

- [1] Budzik G., Cader M., Zboiński, M.: *Technologie wytwarzania przyrostowego w praktyce*, Mechanik, nr 8-9/2013.
- [2] Specyfikacja techniczna maszyny FORTUS 400 mc:  
<http://www.stratasys.com/3d-printers/production-series/fortus-360-400mc>
- [3] Cader M., Jastrzębska A., Pakieła Z.: *Analiza wpływu orientacji modelu w komorze roboczej na wytrzymałość w procesie FDM*, Mechanik, nr 7/2012.
- [4] Karta materiałowa ABS-M30: <http://www.stratasys.com/materials/fdm/abs-m30>