

I Krajowa Konferencja Naukowa
Szybkie prototypowanie
Modelowanie - Wytwarzanie - Pomiary
 Rzeszów - Pstrągowa, 16 - 18 września 2015



POLITECHNIKA
RZESZOWSKA
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

Organizatorzy:



WYDZIAŁ
BUDOWY MASZYN
I LOTNICTWA
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ



CENTRUM NAUKOWO TECHNICZNE

KLASTER SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA
RAPIDROM

Analiza i porównanie dokładności wybranych przyrostowych metod wytwarzania

Analysis and comparison of the accuracy of selected incremental manufacturing methods

TOMASZ DZIUBEK
MICHALINA FILIP*

DOI:10.17814/mechanik.2015.12.557

Artykuł przedstawia problematykę związaną z dokładnością wybranych przyrostowych technik wytwarzania. Celem zdefiniowania dokładności wytwarzanej geometrii dla metod FDM, MEM oraz PolyJet wykonano wzorcowy model badawczy złożony z różnych cech geometrycznych. Na jego podstawie przeprowadzono pomiary optyczne, które umożliwiły określenie błędów geometrii i opracowanie analizy porównawczej dla analizowanych metod szybkiego prototypowania.

SŁOWA KLUCZOWE: szybkie prototypowanie, CAD, pomiary optyczne, dokładność

The article presents the problems connected with the accuracy of selected incremental manufacturing techniques. To define the accuracy of generated geometry for FDM, PolyJet MEM and made reference research model consisting of various geometric features. On the basis of optical measurements were carried out, which enabled determination of fault geometry and a comparative analysis of the analyzed methods for Rapid Prototyping.

KEYWORDS: Rapid Prototyping, CAD, optical measurements, accuracy

Nieustanny rozwój technologii i wzrost konkurencji na rynku powoduje konieczność obniżania kosztów produkcji, przy równoczesnym stałym doskonaleniu jakości wyrobów. Właśnie naprzeciw tym potrzebom wychodzą przyrostowe metody wytwarzania. Poprzez szybkie tworzenie prototypów umożliwiają one weryfikację zgodności z założeniami konstrukcyjnymi i doskonalenie produktu już na wczesnych etapach produkcji.

W ostatnich latach stale rośnie popularność przyrostowych metod wytwarzania i poszerzają się obszary ich zastosowań. Technologia ta została stworzona z myślą o produkcji prototypów, form i matryc, dziś jednak dotyka już znacznie liczniejszych aspektów życia. Istotnymi dziedzinami są tu medycyna i stomatologia. Stale zwiększa się także grupa materiałów, jakie można stosować w wytwarzaniu. Poza materiałami inżynierskimi, takimi jak metale, ceramika, guma czy tworzywa sztuczne, możliwe jest drukowanie z materiałów spożywczych czy tekstylnych.

W zastosowaniach inżynierskich, przyrostowe metody wytwarzania charakteryzują się szeregiem zalet, które decydują o zasadności ich wykorzystania w produkcji jednostkowej oraz wytwarzaniu prototypów [4]. Do pozostałych wad należą także [5]: ograniczenie wymiarowe budowanych obiektów, ograniczone spektrum materiałów, spełnianie wymagań mechanicznych w wąskim zakresie, a także często niewystarczająca dokładność, z którą wiązać się może konieczność dodatkowej obróbki mechanicznej.

Błędy odwzorowania geometrii wzorcowej w procesie wytwarzania technikami przyrostowymi często eliminują poszczególne metody. Jednak odpowiednie wiadomości z zakresu specyfiki ich działania umożliwiają zwiększenie dokładności niektórych metod. Stąd też istotne jest prowadzenie badań dotyczących wpływu geometrii i sposobu jej położenia na dokładność wydruku.

Cel badań

Niniejszy materiał przedstawia przeprowadzenie analizy dokładności wybranych metod przyrostowego wytwarzania na podstawie modelu wzornika. Wykonana analiza dokładności prezentuje określenie, jakiego rodzaju elementy geometrii są możliwe do uzyskania z wysoką do-

* Dr inż. Tomasz Dziubek (tdziubek@prz.edu.pl),
 inż. Michalina Filip (michalinafilip92@gmail.com)

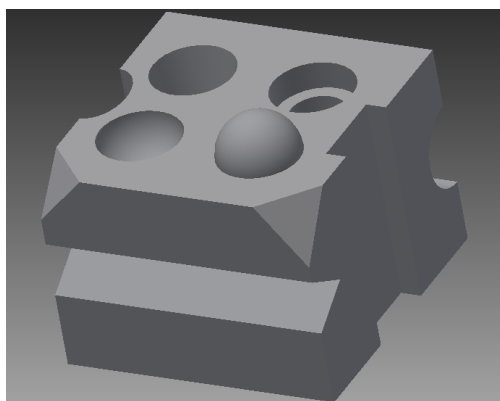
kładnością, a także zbadanie zgodności rzeczywistej dokładności maszyn z deklarowaną przez producentów.

Pierwszym krokiem było zaprojektowanie, z zastosowaniem oprogramowania typu CAD, modelu wzornika zawierającego typowe elementy stosowane w konstrukcji. Do analizy dokładności przeprowadzonej w środowisku programu GOM Inspect V8 wykorzystano siatki odwzorowujące rzeczywistą geometrię powierzchni wzorników, które uzyskano poprzez poddanie gotowych modeli pomiarom skanerem optycznym 3D. W programie tym utworzono mapy odchyłek oraz wykonano zestawienie i porównanie cech zaobserwowanych w poszczególnych wzornikach.

Charakterystyka geometrii modelu badawczego

Jako model badawczy zaprojektowano prostopadłościenny wzornik uzupełniony o podstawowe elementy geometryczne, w postaci otworów, rowków oraz ściętych naroży. Wzornik zaprojektowano w taki sposób, aby odzwierciedlał on typowe, podstawowe cechy wykorzystywane w konstrukcji oraz charakterystyczne wartości kątów. Jest on prostopadłościannym o ogólnych wymiarach gabarytowych 60mm x 60mm x 45mm. Na jego poszczególnych ściankach umieszczono dodatkowe elementy geometryczne.

Na górnej powierzchni w szyku prostokątnym rozmieszczone są: otwór walcowy z pogłębieniem, otwór stożkowy, otwór sferyczny oraz wypukła powierzchnia sferyczna. Na ścianach bocznych umieszczone zostały rowki o czterech różnych przekrojach. Dwa z nich są prostopadłe do płaszczyzny podstawy wzornika i mają przekroje w kształcie prostokąta oraz połowy walca. Kolejne dwa umieszczone są równoległe do podstawy, a ich przekroje to trójkąt równoboczny oraz połowa okręgu. Rozmieszczenie rowków w kierunku równoległym oraz prostopadłym do kierunku nakładania warstw materiału pozwoliło na określenie wpływu wybranej konfiguracji na dokładność i jakość odwzorowania powierzchni. Model został zaprojektowany z wykorzystaniem oprogramowania Autodesk Inventor Professional (rys. 1).



Rys. 1. Widok modelu w oknie programu Autodesk Inventor Professional

Specyfikacja maszyn

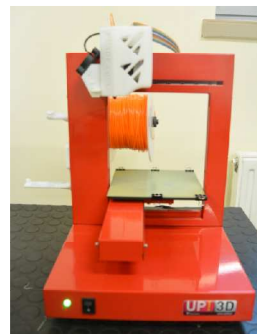
Do wykonania modeli badawczych zastosowane zostały urządzenia uPrint firmy Dimesion, UP! Plus firmy PP3DP oraz Eden260V firmy Objet. Wszystkie te maszyny pracują z wykorzystaniem różnych technologii, przetwarzają różne gatunki materiałów oraz zapewniają odmienne parametry procesu i jakość uzyskiwanych wyrobów.

Maszyna uPrint wytwarza modele z zastosowaniem technologii FDM, materiał podgrzany do stanu półpłynnego nakładany jest przez głowicę na platformę roboczą (rys. 2). Modele tworzone są z materiału ABSplus [11], dzięki czemu są mocne i trwałe.



Rys. 2. Urządzenie uPrint firmy Dimension

Zasada działania maszyny UP! Plus oparta jest na technologii MEM, zatem system wykorzystuje dyszę do nakładania topionego materiału (rys. 3). Materiały wykorzystywane do druku to ABS oraz PLA, występujące w szerokiej gamie kolorystycznej. Konstrukcja podpierająca wykonywana z tego samego materiału co model. Możliwa do uzyskania grubość warstwy wynosi, zależnie od wykonywanego modelu, między 0,2 - 0,4 mm lub 0,25 - 0,35 mm [9].



Rys. 3. Urządzenie UP! Plus firmy Beijing Tiertime Technology Co.

Maszyna Eden260V pracuje z wykorzystaniem technologii PolyJet, czyli natrykuje na platformę roboczą ciekły fotopolimer, a następnie utwardza go światłem UV (rys. 4). Urządzenie umożliwia wykorzystanie licznych materiałów, cechujących się odmiennymi właściwościami. Konstrukcja podpierająca wykonywana jest na ogół z nietoksycznego żelopodobnego fotopolimeru SUP705 [10]. Grubość warstwy może wynosić nawet 16 mikronów.



Rys. 4. Urządzenie Objet Eden260V

Przygotowanie procesów wytwarzania modeli oraz ich przebieg

Gotowy model stworzony w środowisku CAD wyeksportowano do pliku w formacie STL, obsługiwanym przez urządzenia stosujące technologię przyrostowego wytwarzania. Oprogramowania właściwe każdej z maszyn przystosowują plik do ich potrzeb.

Maszyna uPrint wykorzystuje oprogramowanie CatalystEX. Dostępna grubość warstwy wynosiła 0,254 mm. Poniższe zdjęcie przedstawia gotowy model przed operacją oddzielenia podpór (rys. 5).



Rys. 5. Widok modelu wykonanego technologią FDM

Wytwarzanie modelu w technologii MEM na maszynie UP! Plus przeprowadzono z zastosowaniem filamentu ABS w kolorze pomarańczowym. Jest to materiał higroskopijny, dlatego podczas przechowywania należy zabezpieczyć go przed dostępem powietrza. Konstrukcje podpierające usuwa się w sposób mechaniczny. Dokładny widok gotowego modelu jeszcze przed oddzieleniem podpór przedstawiono na poniższym zdjęciu (rys. 6).



Rys. 6. Model wykonany technologią MEM

Wytwarzanie modelu w technologii PolyJet na maszynie Eden260V wykonano z sztywnego nieprzezroczystego fotopolimeru, materiału VeroBlue RGD840 (rys. 7). Konstrukcję podpierającą natomiast wykonano z rozpuszczalnego fotopolimeru żelopodobnego. Konstrukcja podporowa jest następnie zmywana z powierzchni modeli przy użyciu myjki wysokociśnieniowej.



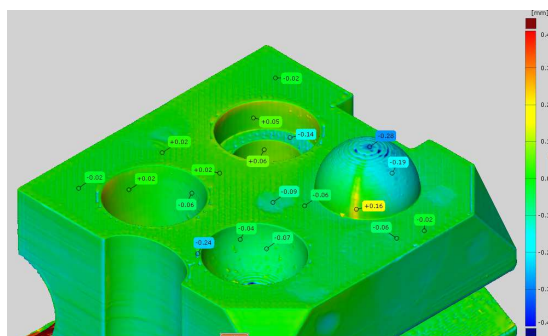
Rys. 7. Model wytworzony technologią PolyJet

Określenie i porównanie dokładności wybranych przyrostowych metod wytwarzania na podstawie przykładowych modeli testowych

Do badań dokładności wytworzonych wzorników zastosowano optyczny skaner 3D Atos II Triple Scan oraz program GOM Inspect V8. Wykonane w nim zostały trójwymiarowe mapy odchyłek powierzchni wzornika rzeczywistego w stosunku do zaprojektowanego modelu. Do stworzenia map zastosowano dwa pliki – wyeksportowane z oprogramowania typu CAD projekt modelu oraz trójwymiarowe siatki odwzorowujące rzeczywistą geometrię poszczególnych wzorników, które uzyskano poprzez odwzorowanie modeli z użyciem optycznego skanera 3D.

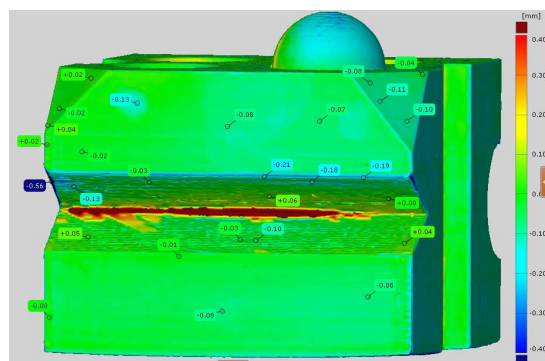
Określenie dokładności modelu wykonanego urządzeniem uPrint

Górna powierzchnia odwzorowuje model z odchyłką dodatnią około 0,02 mm, natomiast dno rowków to odchyłka około 0,06 mm w głąb materiału (rys. 8). Wyraźnie widoczne są także obszary o miejscowo obniżonej powierzchni, na poziomie -0,09 mm. Powierzchnie sferyczne wykonane są w przeważającej części z odchyłką ujemną. Powierzchnie te cechuje tzw. schodkowość. Szczyt powierzchni sferycznej wypukłej jest także miejscem zakończenia nakładania materiału, co również ma duży wpływ na niedokładność odwzorowania kształtu.



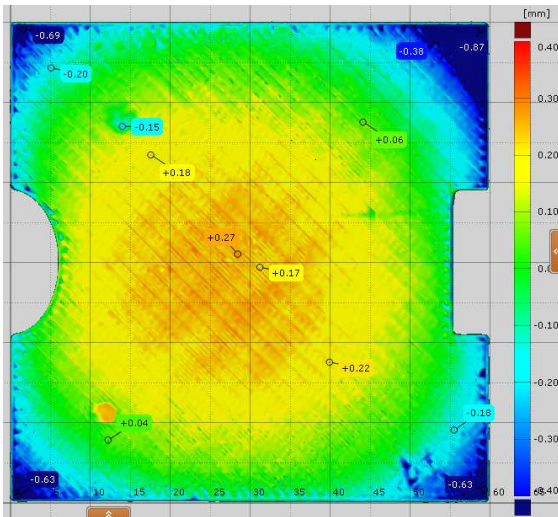
Rys. 8 Widok górnej powierzchni modelu

Kolejnym analizowanym obszarem modelu jest ściana boczna zawierająca rowek o przekroju trójkąta równobocznego oraz przyległe do niej ścięte naroża (rys 9). Podczas oddzielania konstrukcji podpierających od modelu nie udało się usunąć ich całkowicie. Obszary te nie podlegają zatem analizie. Obie ścianki rowka cechują się dość dużymi nierównościami w kierunku wzdłużnym czyli tym, w którym nakładane były nitki. Ścięcie naroża pod kątem 60° do podstawy modelu dokładnością $\pm 0,2$ mm. Naroże ścięte pod kątem 45° charakteryzuje się na całej powierzchni odchyłką nieprzekraczającą -0,11 mm.



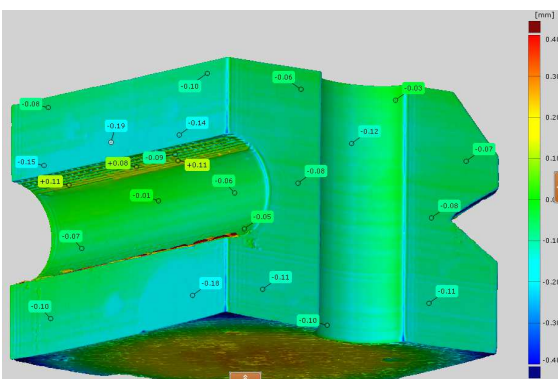
Rys. 9. Widok rowka o przekroju trójkątnym oraz ścięte naroża

Widok podstawy modelu cechuje bardzo charakterystyczny, promienisty sposób rozłożenia odchyłek. W obszarze centralnym występuje największe odchylenie dodatnie, sięgające 0,27 mm. Odchyłki te maleją stopniowo, aby następnie zmienić kierunek w głąb materiału. Największe wartości ujemne występują w narożach podstawy i obserwowane w nich odchyłki osiągają wartości, na poziomie -0,87 mm. Taka deformacja geometrii może być spowodowana skurczem materiału (rys. 10).



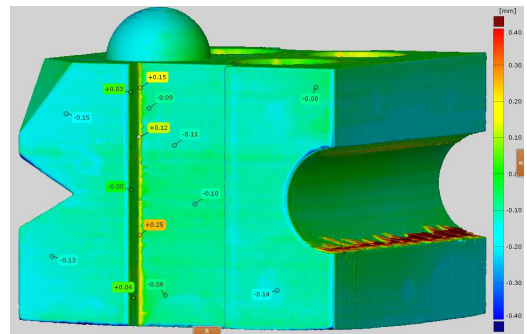
Rys. 10. Widok podstawy modelu

Ścianki, w których poprowadzone zostały rowki o przekrojach okrągłym oraz eliptycznym w przeważającej części powierzchni tych ścianek wykonane zostały z odchyłką w głąb materiału, wahającą się od wartości od 0,06 do około 0,11 mm, jednak na ścianie z rowkiem równoległym do podstawy występują obszary o zwiększonym odchyleniu, sięgającym 0,19 mm. Rowek o przekroju eliptycznym zorientowany jest prostopadłe do płaszczyzny podstawy modelu, a więc tworzony jest w sposób stabilny, tj. kolejne jego przekroje są identyczne i nakładane są na siebie w kierunku pionowym. Powyższe obserwacje ilustruje rysunek 11.



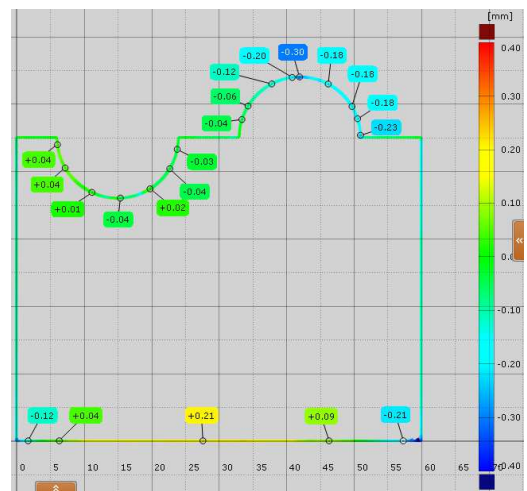
Rys. 11. Widok rowków o przekrojach okrągłym oraz eliptycznym

Podobnie jak rowek o przekroju eliptycznym powstaje rowek o przekroju prostokątnym (rys. 12). Istotną różnicą jest zaś występowanie naroży, które rozdzielają powierzchnię rowka prostokątnego na trzy części. Powierzchnie rowka wykonane są z dokładnością nie przekracza +0,04 mm.

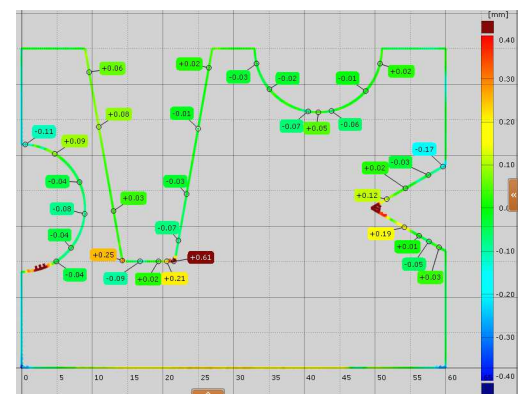


Rys. 12. Widok rowka prostokątnego

Aby uszczegółwić prowadzone analizy wykonano dodatkowo przekroje inspekcyjne (rys. 13 i 14). Na przekrojach tych widoczny jest promienisty sposób rozłożenia odchyłek na podstawie modelu. Przekrój pokazany na rysunku 14 wykonany został tak, że umożliwia on analizę niewidoczną wcześniej w całości otworu stożkowego.



Rys. 13. Przekrój mapy poprowadzony przez średnice powierzchni sferycznych

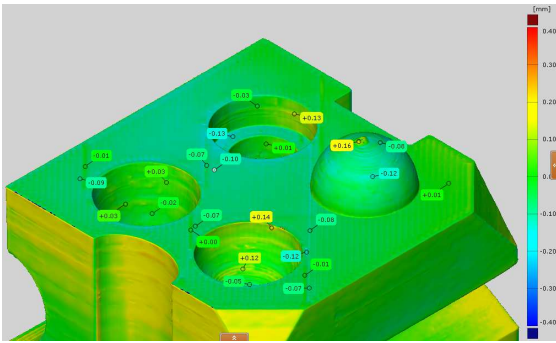


Rys. 14. Przekrój modelu poprowadzony przez średnice otworu stożkowego równoległe do płaszczyzny XY

Określenie dokładności modelu wykonanego urządzeniem UP! Plus

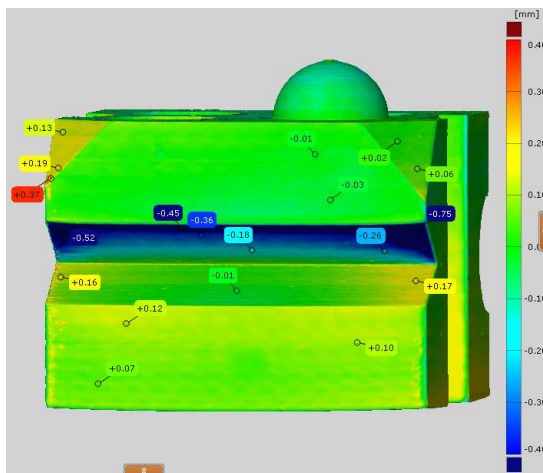
Wytwarzanie metodą MEM jest pokrewne z technologią FDM. Górna powierzchnia nie jest zatem gładka, jednak występujące na niej odchyłki mieszczą się w granicach około -0,09 mm do 0,01 mm. Powierzchnie sferyczne cechuje tzw. schodkowość, co dobrze widoczne jest szczególnie odpowiednio na ich szczycie i dnie. Powierzchnia wypukła wykonana jest w większości z odchyłką w głąb materiału, powierzchnia wklęsła zaś

w kierunku przeciwnym. Cechy te przedstawione są na rysunku 15.



Rys. 15. Górna powierzchnia modelu

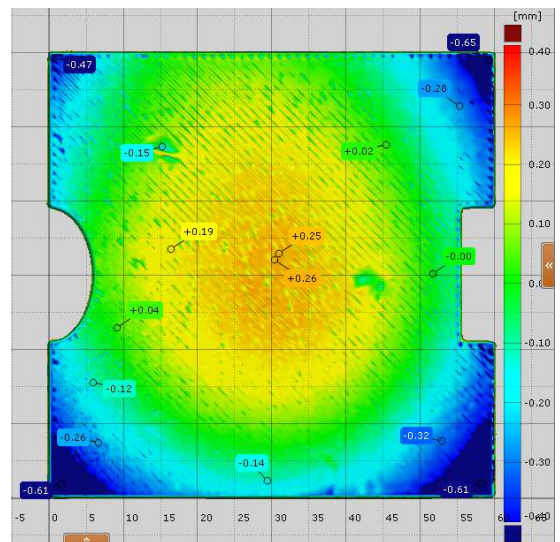
Na kolejnym widoku (rys. 16) przedstawiona została ściana boczna modelu z wyciętym rowkiem o przekroju trójkąta równobocznego. Dolna powierzchnia rowka budowana jest na utworzonych uprzednio warstwach modelu stanowiących dla niej podparcie, dzięki czemu cechują ją niewielka odchyłka, zwiększona jedynie przy końcach rowka do wartości około 0,16 mm w kierunku dodatnim. Obserwowane odchyłki na powierzchni górnej mają kierunek w głąb materiału, co może być spowodowane np. wygenerowaniem błędnej konstrukcji podpierającej, lub skurczem materiału. Na przedstawionym widoku występują także ścięte naroża modelu. Naroże o kącie 45° cechuje się odchyłką około +0,06 mm, natomiast naroże o nachyleniu 60° wykonane jest z mniejszą dokładnością, odchyłka jest bliska +0,2 mm.



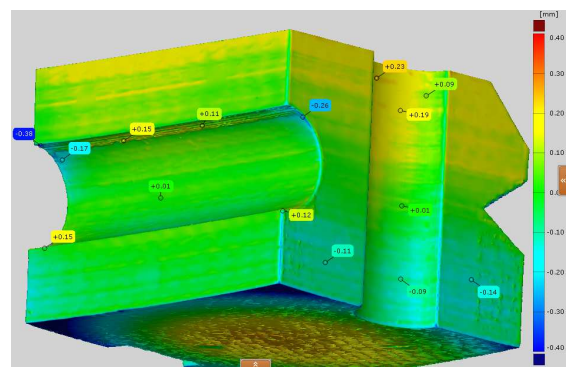
Rys. 16. Widok rowka o przekroju trójkątnym

Podobnie jak w przypadku modelu wykonanego w technologii FDM, również i tu zaobserwować możemy promienisty rozkład odchyłek w centrum podstawy o wartości 0,26 mm. W narożach odchyłki są o maksymalnej wartości 0,65 mm. Ilustrację omówionych cech stanowi rysunek 17.

Na ściankach zawierających rowki o przekroju okrągłym oraz eliptycznym można zauważyć pewną tendencję, tj. występowanie odchyłek ujemnych na poziomie 0,15 mm w ich dolnej części, niewielkich odchyłek dodatnich ok. 0,01 mm pośrodku, a także odchyłek dodatnich do około 0,19 mm w części górnej. Zaobserwowane cechy widoczne są na rysunku 18.

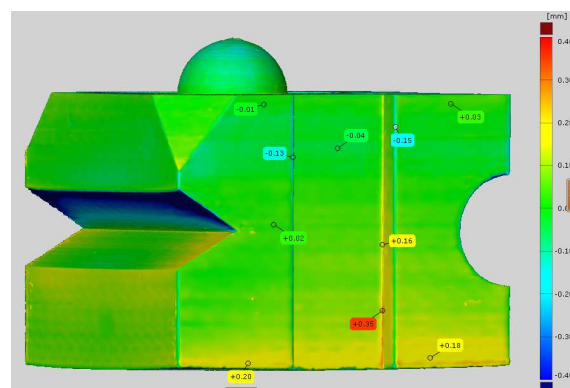


Rys. 17. Widok podstawy wzornika



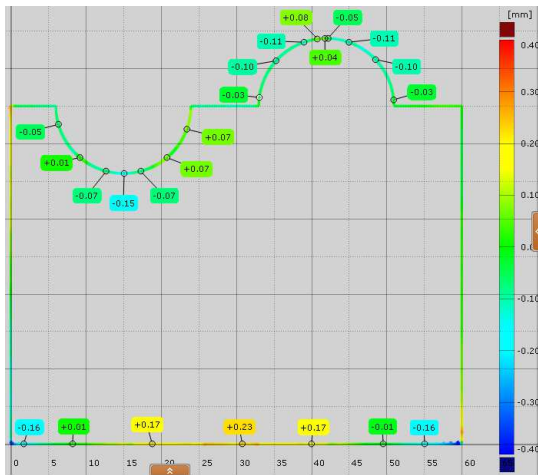
Rys. 18. Widok rowków o przekrojach okrągłym oraz eliptycznym

Tendencję odwrotną do opisanej powyżej zauważyć można na pozostałych ścianach bocznych (rys. 19). Różnicę stanowi kierunek rozkładu odchyłek, ponieważ w tym przypadku odchyłki ujemne występują w górnej części powierzchni, a dodatnie w dolnej.



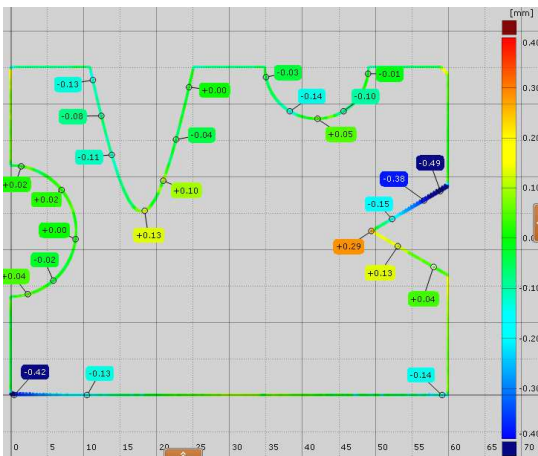
Rys. 19. Widok rowka o przekroju prostokątnym

Do analizy powierzchni sferycznych przydatne okazują się ich przekroje. Na powierzchni wypukłej zaobserwować można symetrię rozkładu odchyłek. Analizę tę ilustruje rysunek 20.



Rys. 20. Widok przekroju powierzchni sferycznych

Ze względu na ograniczenia techniczne skanera 3D oraz specyfikę struktury materiału, nie zostało w pełni odwzorowane dno otworu stożkowego. Przekrój rowka trójkątnego dobrze obrazuje gwałtowną zmianę odchyłek spowodowaną występowaniem naroża. Górna część powierzchni wykonana jest z odchyłkami sięgającymi aż -0,49 mm przy krawędzi zewnętrznej. W samym narożu nadmiar materiału wynosi 0,29 mm. Omówiona mapa zamieszczona została na rysunku 21.

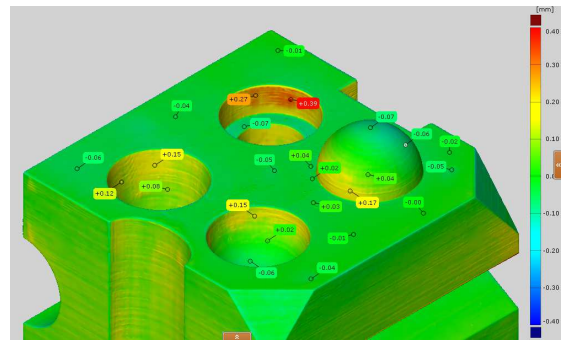


Rys. 21. Widok przekroju płaszczyzn równoległą do XY

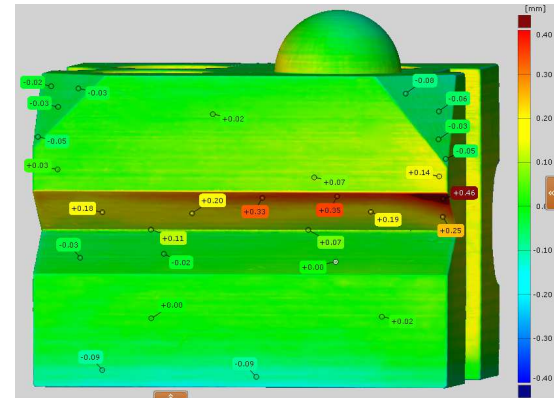
Określenie dokładności modelu wykonanego urządzeniem Eden 260V

Górna powierzchnia modelu nie jak w przypadkach poprzednich, jest gładka i równomierna. Wykonana została z odchyłką w głąb materiału, nie przekraczającą 0,06 mm. Również powierzchnie sferyczne są stosunkowo gładkie i nie posiadają wyraźnych schodków. Skrajne obszary tych powierzchni, czyli szczyt i dno, cechują się odchyłkami w głąb materiału, około 0,07 mm. Powierzchnia stopnia otworu walcowego jest równoległa do płaszczyzny podstawy i wykonana jest odchyłką ujemną 0,07 mm. Fragment mapy przedstawia rysunek 22.

Dolna powierzchnia rowka (rys. 23) wykonana jest z wysoką dokładnością. Niewielkie fragmenty cechują odchyłki w głąb materiału, które nie przekraczają 0,03 mm. Górna zaś powierzchnia zaznaczona jest kolorem żółtym, sygnalizującym, iż jest ona wykonana z odchyłką dodatnią, co obrazuje występowanie zjawiska osiadania elementów. Ściana modelu odwzorowana jest z odchyłkami około +0,02 mm.

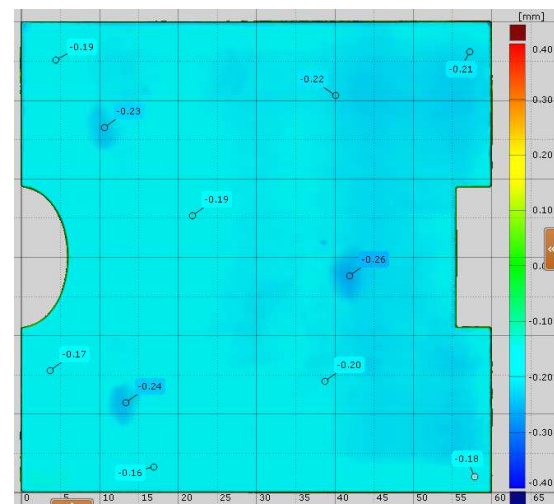


Rys. 22. Widok górnej powierzchni modelu wykonanego urządzeniem Eden 260V



Rys. 23. Widok rowka trójkątnego

Na przeważającej części powierzchni podstawy modelu zaobserwować można równomierną odchyłkę w głąb materiału, mieszczącą się w zakresie wartości 0,16 – 0,22 mm (rys. 24). W związku z niewielkimi różnicami odchyłek podstawę wykonanego modelu cechuje duża płaskość, naroża nie są jak w poprzednich przypadkach uniesione ku górze.



Rys. 24. Widok podstawy modelu

Pozostałe ściany modelu również wykonane są z niewielkimi odchyłkami, wynoszącymi na większości obszarów 0,02 - 0,04 mm (rys. 25). Jedynie miejscowo są to wartości zwiększone do około 0,05 mm. W obszarze górnym rowka o przekroju okrągłym występuje zjawisko osiadania, odzwierciedlone dodatnimi odchyłkami bliskimi 0,15 mm.

o przekroju okrągłym w metodzie FDM i MEM cechują się dużymi nierównościami wzdłużnymi na obszarach zewnętrznych. Nierówności takie nie występują w modelu wykonanym urządzeniem Eden 260V, jednak zaobserwować można zwiększone obniżenie jednego z naroży.

Podobnie jak w przypadku rowków o przekroju eliptycznym, również te o przekroju prostokątnym cechują się odchyłkami analogicznymi do tych występujących na ścianach modelu. We wszystkich modelach występują także dodatnie odchyłki na krawędziach rowków, wynoszące maksymalnie odpowiednio 0,12, 0,16 i 0,13 mm.

Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych prac badawczych, uzyskane wyniki analiz wskazują, że najładniejsze i najmniej zdeformowane powierzchnie uzyskać można przy pomocy technologii PolyJet. Technologia ta jest jednak najdroższą spośród opisywanych w pracy, zatem należy rozważyć ekonomiczną zasadność jej zastosowania. Dobrym stosunkiem ceny do jakości charakteryzuje się maszyna uPrint, wiążąca się z kilkakrotnie niższym kosztem zakupu, a wytwarzająca modele o jakości wystarczającej do zastosowań badawczych. Maszyna UP! Plus jest najbardziej przystępna dla szerokiego grona odbiorców, o czym decyduje jej niska cena oraz prostota obsługi - jest to urządzenie typu Plug & Play.

Z opracowanych wyników pomiarów zaobserwować można, iż w przypadku każdej z metod ściany modeli oraz rowki skierowane prostopadle do podstawy, wykonane są z niewielkimi odchyłkami, mieszczącymi się w deklarowanej przez producentów urządzeń dokładności. W przypadku rowków równoległych do platformy roboczej oraz powierzchni wymagających podparcia podczas wytwarzania, w procesie ich projektowania zalecane jest uwzględnienie skurczu materiału oraz zjawiska osiadania geometrii. Występującą na powierzchniach sferycznych schodkowość można zmniejszyć jedynie poprzez zmianę ustawienia grubości warstwy materiału, o ile umożliwi to dane urządzenie, bądź można zaprojektować je z nadładkiem, który zostanie usunięty przez obróbkę mechaniczną.

Odnosząc uzyskane wyniki do danych producentów okazuje się, iż nie wszystkie elementy wzorników zostały wykonane z deklarowaną dokładnością. Jedynie dla maszyny Eden 260V ponad 90% odwzorowanej geometrii CAD wytworzono z dokładnością znacznie większą niż wynosi dokładność deklarowana przez producenta. W jej przypadku nadmierne niedokładności występują miejscowo na krawędziach otworów oraz rowków. Pozostałe dwie metody wytwarzania charakteryzują się odchyłkami dokładności zarówno w obszarach krawędzi, jak i na powierzchniach często przekraczającymi parametry podawane w specyfikacji urządzeń. Występują one często lokalnie, jednak trudno jednoznacznie określić ich przyczyny.

Przeprowadzone w trakcie realizacji niniejszej pracy badania, mogą sugerować rozwinięcie jej zakresu polegające na opracowaniu sprzężenia zwrotnego CAD - RP - CMM, mającego na celu zmniejszenie deformacji wytwarzanej geometrii. W miejscach, w których występują niedokładności odwzorowania wykraczające poza osiąganą dokładność maszyny, można wprowadzać odpowiednio zmiany geometrii modeli w środowisku oprogramowania CAD. Może to skutkować zwiększeniem dokładności otrzymywanych modeli, lecz wymaga przeprowadzenia

stosowych prób i badań w celu określenia odpowiednich algorytmów korekcji geometrii.

LITERATURA

1. Budzik G. "Odwzorowanie powierzchni krzywoliniowej topatek części gorącej silników lotniczych w procesie szybkiego prototypowania". Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009.
2. Budzik G. "Synteza i analiza metod projektowania i wytwarzania prototypów elementów o skomplikowanych kształtach na przykładzie wirników turbosprężarek". Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007.
3. Budzik G., Kozik B., Bernaczek J., Markowski T., Dziubek T., Zaborniak M. "Analysis of the geometric accuracy of gears RP casting moulds". 6th International Scientific Conference – Management of Technology – Step to Sustainable Production – MOTSP 2014; 6th International Scientific Conference – Management of Technology – Step to Sustainable Production – MOTSP 2014, 10 – 13 June 2014, Bol, Croatia; Croatian Association for PLM, Zagreb, Croatia, (2014), ISSN 1848-9591
4. Oczko K., Kawalec A. "Kształtowanie metali lekkich". Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 2012
5. Mielecica M. "Techniki szybkiego prototypowania – rapid prototyping". *Przegląd Mechaniczny* (2010) nr 2
6. Rokicki P., Budzik G., Kubiak K., Bernaczek J., Dziubek T., Magniszewski M., Nowotnik A., Sieniawski J. "Rapid prototyping in manufacturing of core models of aircraft engine blades". *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal* 86/4 (2014) 323–327 © Emerald Group Publishing Limited [ISSN 1748-8842] [DOI 10.1108/AEAT-10-2012-0192]
7. Rudnicki Z. "Nowoczesne techniki przyspieszające wytwarzanie". www.kkiem.agh.edu.pl
8. "uPrint and uPrint Plus Personal 3D Printers User Guide". Stratasys Inc. (2011)
9. "UP! 3D Printer User Manual". PP3DP-2013-V3. www.pp3dp.com
10. "Objet Eden 3D Printers". www.stratasys.com
11. "ABSplus Spec Sheet". Stratasys Inc. (2014)