

Mgr inż. Maciej CADER
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP
Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa
Telefon: +48 22 8740 341, e-mail: mcader@piap.pl
Maria USZYŃSKA
Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji
e-mail: maria.u@vp.pl

ANALIZA ZALEŻNOŚCI CZASU BUDOWANIA MODELI OD ZMIAN PARAMETRÓW WYTWARZANIA W TECHNOLOGII FDM

W pracy przedstawiono wyniki i wnioski z analiz czasu budowania modeli z zastosowaniem technologii FDM. Czas budowania modeli zależy od geometrii i doboru parametrów procesu oraz średnicy włókna wytłaczanego materiału. Dlatego w pracy skupiono się na analizie czasu budowania dwóch różnych typów modeli: o prostej i skomplikowanej geometrii. Modele wytworzono z trzech różnych materiałów, które różnią się od siebie właściwościami fizycznymi: ABS M30, PC (Poliwęglan), ULTEM*9085. Modele budowano przy zastosowaniu dwóch różnych typów końcówek drukujących, co oznacza że modele powstawały z włókien materiałowych o różnych średnicach.

ANALYSIS OF DEPENDENCE BETWEEN MODELS BUILDING TIME AND CHANGES OF PARAMETERS OF FUSED DEPOSITION MODELING FDM.

An article presents the results of study and conclusion based on the analysis of time of building models using FDM technology. Building time depends on the shape of geometry, process parameters and diameter of the extrudate materials fiber. Therefore, studies focuses on the analysis of time of build the different models of simple and complex geometries. Models were built from three different materials, which differ in physical properties: ABS-M30, PC (Polycarbonate), ULTEM9085. Models were built using two types of tips, which means that models formed from fibers of two different diameters.

1. WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój technologii przyrostowych pozwalających na wytwarzanie części maszyn z materiałów niemetalowych i metalowych sprawił, że technologie te stanowią coraz poważniejszą alternatywę dla tradycyjnych metod wytwarzania [1],[2]. Badania podstawowe technologii przyrostowych materiałów niemetalowych prowadzone w ramach prac statutowych w Instytucie PIAP wykazały, że obecnie najlepszym kandydatem nadającym się do produkcji części nie tylko prototypów ale również docelowych części użytku codziennego jest technologia FDM (ang. Fused Deposition Modeling). Dlatego od 2009 roku w PIAP w ramach działalności statutowej prowadzone są badania nad możliwościami wykorzystania technologii FDM do małoseryjnej produkcji. Ze względu na możliwości produkcyjne, możliwości optymalizację procesu wytwarzania, ingerencję w parametry wytwarzania oraz szeroką gamę stosowanych materiałów wybrano centrum wytwórcze FORTUS

400mc [7], [8] które w 2010 roku zakupił Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP. Po dokonaniu badań porównawczych materiałów używanych w technologii FDM pod kątem zastosowania w produkcji, dokonano wyboru trzech, w które następnie wyposażono centrum wytwórcze FORTUS 400mc. Wybrane materiały, pod kątem wytrzymałości i zdolności obróbczych najlepiej spełniają wymagania stawiane przez konstrukcje i produkty docelowe. Wytypowano trzy materiały, z których każdy posiada jakąś najlepszą cechę – ABS-M30 – najwyższy moduł Younga; (krytyczna temperatura pracy – 100°C) , PC – bardzo duża odporność na uderzenie (krytyczna temperatura pracy – 130°C) oraz ULTEM9085 – bardzo duża wytrzymałość na rozciąganie (krytyczna temperatura pracy – 160°C).

Materiały te zostały dobrane na podstawie badań porównawczych pozostałych materiałów stosowanych w technologii FDM oraz w innych technologiach przyrostowego wytwarzania dostępnych obecnie na rynku [4].

FORTUS 400mc (rys.1) to zaraz po centrum wytwórczym FORTUS 900mc obecnie najnowocześniejsza maszyna pracująca w technologii FDM [8]. Różnice pomiędzy obiema maszynami nie mają istotnego znaczenia w kontekście prac badawczych nad możliwościami technologii FDM. Wszystkie „niższe” względem FORTUS 400mc typy maszyn zawierają opcje i funkcjonalności zebrane i zaimplementowane w centrum wytwórczym FORTUS 400mc. Dlatego jest to maszyna, która dostarcza pełnego obrazu o możliwościach technologii FDM w kontekście produkcji części użytkowych [7],[8].

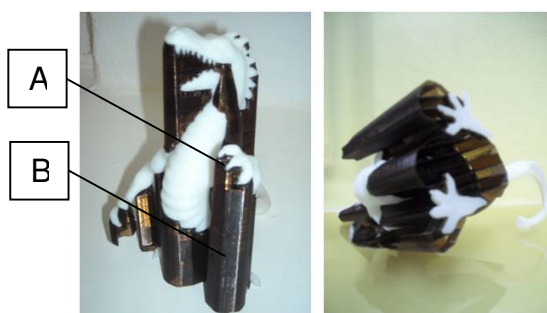


Rys.1. Zdjęcie przedstawiające rodzinę produktów firmy Stratasys producenta systemów FORTUS oraz właściciela technologii FDM. W środkowej części zdjęcia widoczne jest centrum wytwórcze FORTUS 400mc, po prawej stronie zdjęcia widoczne jest centrum wytwórcze FORTUS 900mc.

Prace statutowe dotyczące możliwości wykorzystania technologii FDM do produkcji gotowych części użytkowych przyniosły wiele doświadczenia z zakresu planowania procesu wytwarzania, którego nie dało by się osiągnąć poprzez badania literaturowe [3]. Niniejszy artykuł stanowi przedstawienie jedynie niewielką część wyników prac realizowanych w ramach projektów i prac statutowych w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP.

2. WAŻNIEJSZE MOŻLIWOŚCI CENTRUM WYTWÓRCZEGO FORTUS 400MC I OPROGRAMOWANIA INSIGHT

Pokrótkce, Technologia FDM polega na warstwowym nakładaniu przez dwudyszową głowicę rozpuszczonego materiału modelowego i odpowiadającego mu materiału podporowego. Dwudyszowa głowica zawierająca tak zwane końcówki drukujące przetłaczająca materiał przez otwór o ściśle określonej średnicy, sterowana numerycznie, nanosi na ruchomy stół opuszczany o kolejne grubości warstwy naprzemiennie materiał podstawowy i materiał podporowy. W ten sposób powstaje gotowa część z materiału modelowego wsparta materiałem podporowym w miejscach np. nawisów (rys. 2). Powstałe podpory, po procesie wytwarzania, usuwa się najczęściej poprzez całkowite wypłukiwanie z zastosowaniem specjalnej myjki cyrkulacyjnej lub/i przez odrywanie - w zależności od typów materiałów. Części wytwarzane z wykorzystaniem technologii FDM charakteryzują się dużą wytrzymałością mechaniczną, odpornością na wysokie temperatury (obecnie rzędu 160 °C), niezmiennością kształtów w czasie, odpornością na działanie wody oraz dużymi możliwościami obróbki – obróbka skrawaniem, galwanizacja, lakierowanie itp. Dodatkowo specyfika technologii FDM pozwala na ingerencję w wytwarzaną część w trakcie procesu jej wytwarzania. Możliwe jest zamocowanie na wybranej warstwie cienkiej metalowej siatki lub wtapienie metalowych części w warstwy celem dodatkowego umocnienia konstrukcji. Możliwe jest również wtapienie nakrętek, tulei lub innych elementów mocujących, które np. zawierają gwint.



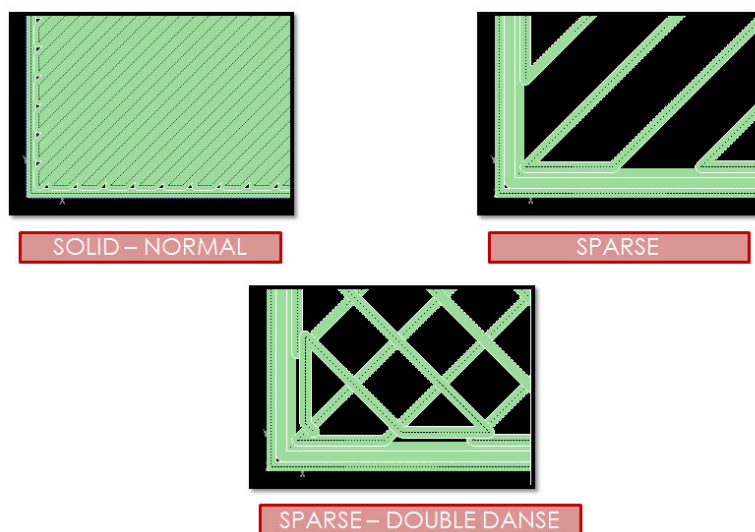
Rys.2. Zdjęcie przedstawiające figurkę wytworzoną z zastosowaniem technologii FDM.

Po lewej stronie widoczny widok z boku, po prawej stronie widok z dołu: A – materiał modelowy PC (Poliwęglan); B – materiał modelowy SR-20, rozpuszczalny w roztworze wodnym.

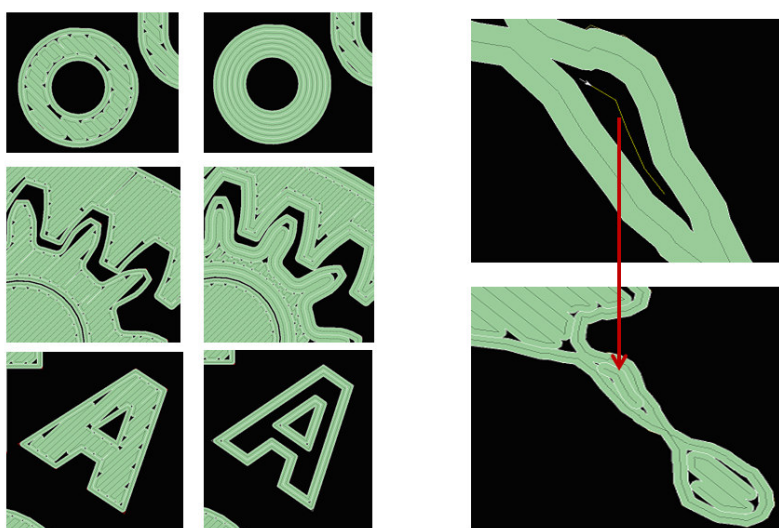
Za przygotowanie procesu wytwarzania z zastosowaniem centrum wytwórczego FORTUS 400mc odpowiedzialne są dwa programy: Insight oraz Control Center. Control Center jest odpowiedzialny za nadzorowanie procesu wytwarzania, kolejnkowanie plików zawierających przygotowane modele oraz komunikację komputera biurowego z maszyną. Oprogramowanie Insight odpowiada za szczegółowe przygotowanie modelu do wytwarzania. Procedura przygotowania modelu CAD do wytwarzania składa się z następujących kroków:

- prawidłowe wygenerowanie pliku STL zawierającego model [5],[6],
- ustawienie podstawowych parametrów modelu: rodzaj materiału modelowego, rodzaj materiału podporowego, typ końcówek drukujących [7],
- ustawienie zaawansowanych parametrów modelu: sposobu wypełnienia części materiałem (rys.3), sposobu prowadzenia ścieżek (rys.4), rodzaju materiału

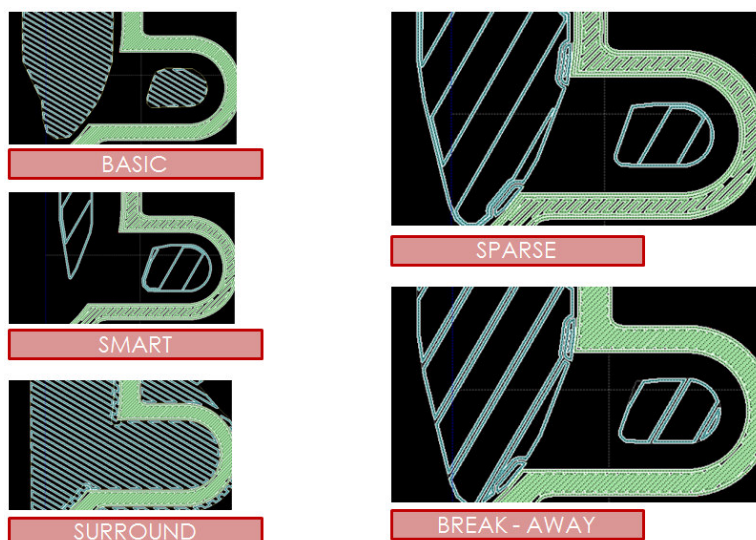
podporowego (rys.5) oraz z tym związanych subparametrów (rys.6) [7].



Rys.3. Przekrój poprzeczny przez model. Na rysunku widoczne są trzy możliwe struktury wypełnienia budowanego modelu – lite (ang. solid – normal); żeberkowe (ang. sparse) oraz kratowe (ang. sparse – double danse).



Rys.4. Przykłady możliwości programowania ścieżek głowicy nakładającej materiały. Ścieżki mogą być programowane automatycznie w zależności od kształtu zewnętrznego modelu (po lewej stronie) lub niezależnie od kształtu, przez operatora (po prawej stronie).



Rys.5. Przekrój poprzeczny przez model. Na rysunku widoczne są cztery możliwe sposoby budowania struktur podporowych (kolor niebieski) wspierające budowany obiekt z materiału modelowego (kolor zielony).



Rys.6. Subparametry, które odpowiadają za manipulowanie kształtem struktur wypełnienia budowanego modelu.

Wytwarzanie modeli odbywa się przez ekstruzję roztopionego materiału przez odpowiednie końcówki drukujące. Średnice końcówek drukujących (typy końcówek drukujących) są ściśle dobrane do materiału modelowego, co przedstawiono w tabeli nr 1. To oznacza, że dobierając materiał z którego ma zostać wykonany model trzeba wybrać jedną spośród dedykowanych do niego typów końcówek drukujących: T10, T12, T16, T20.

Przeprowadzone badania miały na celu wyznaczenie zależności czasu wytwarzania modeli od zmiany subparametrów (rys.6) i w zależności od typów końcówek drukujących. Potrzeba manipulowania subparametrami wynika przede wszystkim z konieczności skrócenia czasu wytwarzania modeli w produkcji małoseryjnej. Świadome manipulowanie subparametrami może znacząco zoptymalizować proces i koszty małoseryjnej produkcji realizowanej z zastosowaniem centrów wytwórczych rodziny FORTUS.

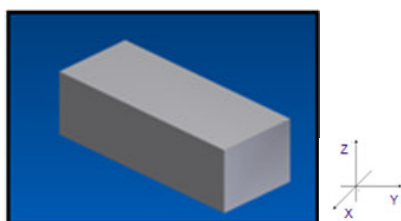
Material modelowy	Obsługiwany typ końcówki drukującej; w nawiasach podano wartość średnicy wytłaczania
ABS - M30	T10 (0,127 mm) T12 (0,178 mm) T16 (0,254 mm) T20 (0,330 mm)
PC	T12 (0,178 mm) T16 (0,254 mm) T20 (0,330 mm)
ULTEM 9085	T16 (0,254 mm)

Tab.1. Materiały modelowe i odpowiadające im typy końcówek drukujących.

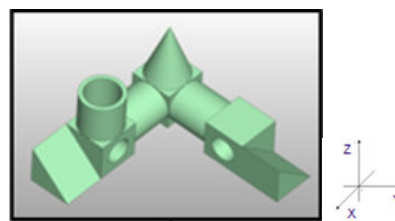
3. PRZEBIEG BADAŃ I WYNIKI

W celu przeprowadzenia badań opracowano modele CAD dwóch obiektów: o prostych kształtach (rys.7a) oraz o kształtach złożonych (rys.7b).

a)



b)



Rys.7. Modele CAD obiektów badań: a) o prostych kształtach, b) o kształtach skomplikowanych.

Model zostały odpowiednio przygotowane [5], [6] do wytworzenia z materiałów ABS – M30, PC (Poliwęglan) oraz ULTEM9085. Modele zostały wykonane według następujących założeń co do końcówek drukujących:

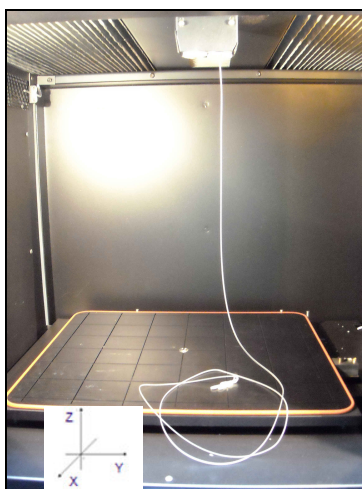
1. Materiał ABS – M30; zastosowany typ końcówki drukującej: T12, T16,
2. Materiał PC (Poliwęglan); zastosowany typ końcówki drukującej: T12, T16,
3. Materiał ULTEM*9085; zastosowany typ końcówki drukującej: T16.

Subparametry (rys.6), które zmieniano nie mogą przyjmować dowolnej wartości ale ściśle określone, wynikające z właściwości materiałów i technologii FDM. Dlatego spośród dostępnych wartości wybrano rozwiązanie optymalne na potrzeby prowadzonych badań. Wybrane do badań wartości subparametrów zestawiono w tabeli 2.

SUBPARAMETR (rys.6)	Oznaczenie końcówki drukującej oraz wartości subparametru przedstawione w mm.
a – ABS – M30	T12 – 0,012; 0,014; 0,016; 0,018; 0,02; 0,022; 0,024; 0,026; 0,028; T16 – 0,016; 0,018; 0,02; 0,022; 0,024; 0,026; 0,028; 0,03; 0,032;
a – PC	T12 – 0,01; 0,012; 0,014; 0,016; 0,018; 0,02; 0,022; 0,024; 0,026; T16 – 0,016; 0,018; 0,02; 0,022; 0,024; 0,026; 0,028; 0,03;
a – ULTEM	T16 – 0,016; 0,018; 0,02; 0,022; 0,024; 0,026; 0,028; 0,03;
b	T12, T16 – 0,07874; 0,1574; 0,2362; 0,3149; 0,3937
c	T12, T16 – 0,07874; 0,1574; 0,2362; 0,3149; 0,3937

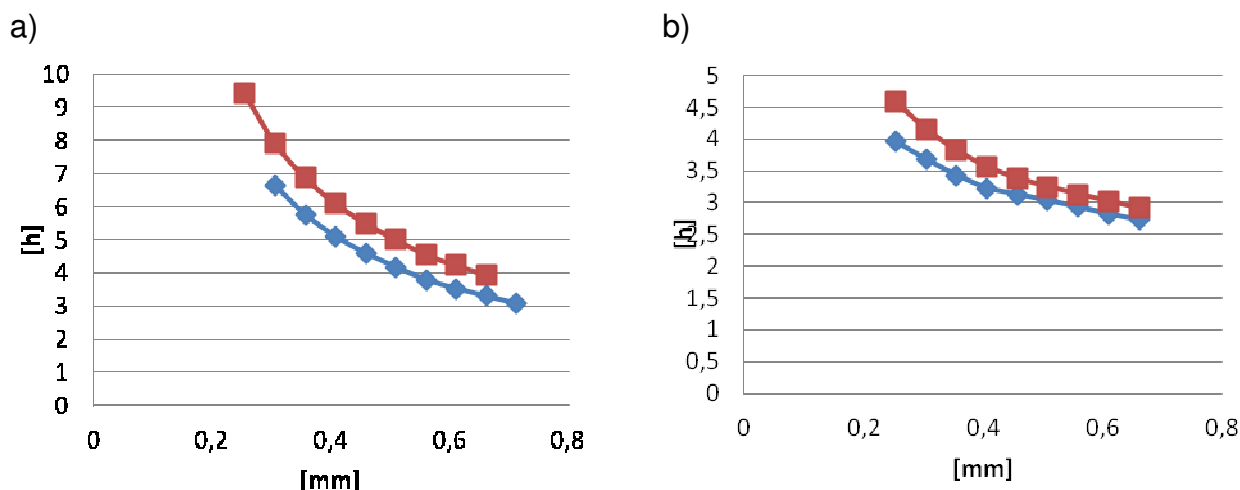
Tab.2. Tabela zastosowanych podczas badań subparametrów (rys.6).

Wszystkie powstałe modele zostały usytuowane dokładnie w tym samym miejscu komory roboczej maszyny. To oznacza że ścieżki narzędzia (głowicy z końcówkami drukującymi) były takie same dla każdego modelu. Orientacja modelu w komorze maszyny była tak dobrana aby kierunki osi głównych układów współrzędnych były zgodne z kierunkami osi układu współrzędnych komory roboczej maszyny.

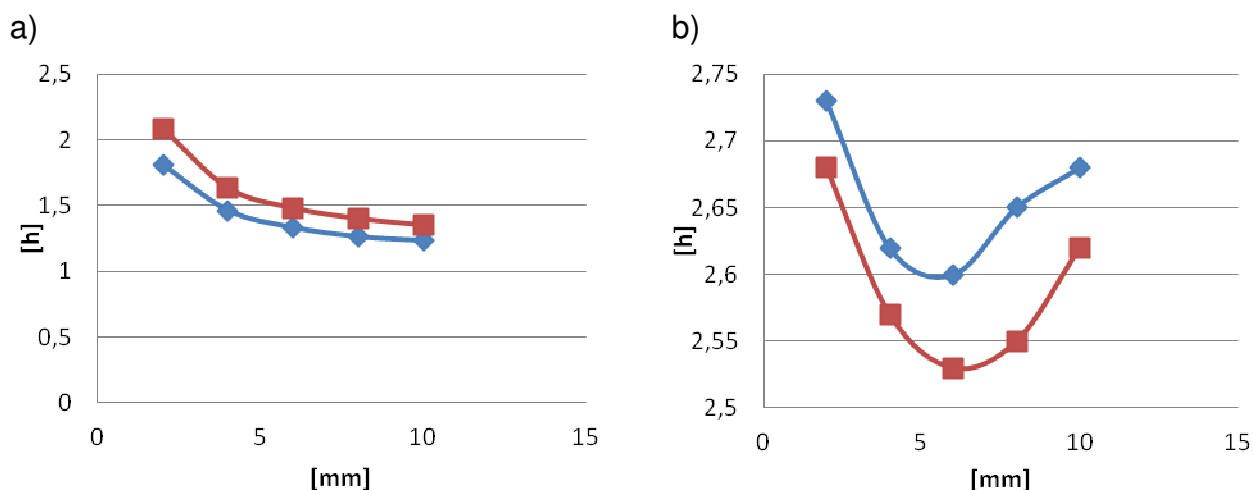


Rys.8. Komora robocza centrum wytwórczego FORTUS 400mc.
Użyteczne wymiary komory (XYZ): 405 x 355 x 405 mm.

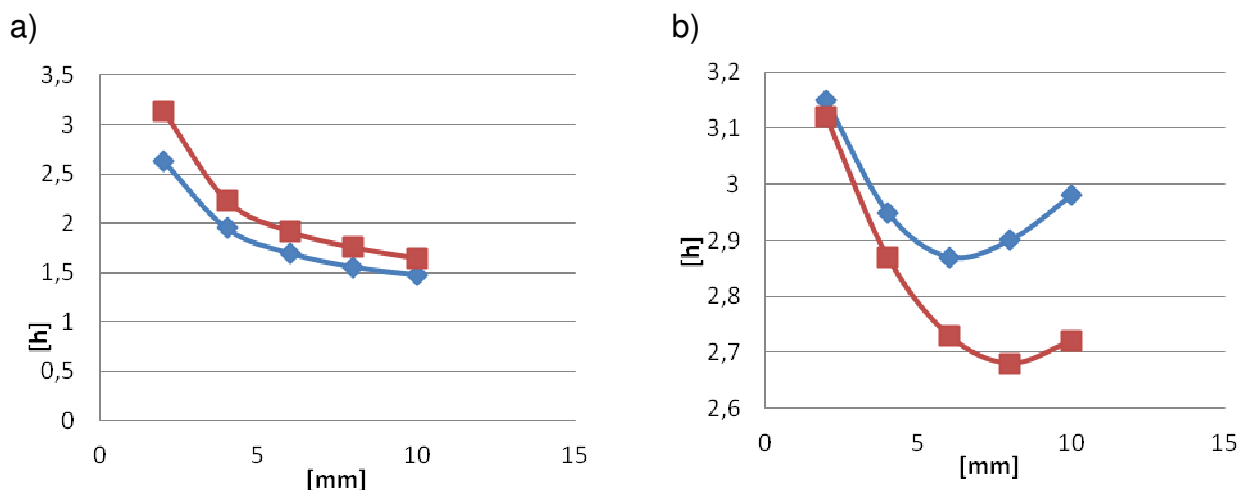
Podczas eksperymentów badano czas wydruku od momentu rozpoczęcia nakładania materiału przez głowicę do momentu zakończenia budowania modelu. Uzyskane wyniki zestawiono w postaci wykresów zaprezentowanych na rysunkach 9 – 14. Charakterystyki obrazują porównane czasów wydruków z zastosowaniem dwóch końcówek T12 i T16 oraz 3 materiały: ABS-M30, PC i ULTEM9085. Zmieniając wartości subparametru *part raster* w poszczególnych stylach wypełnienia, uzyskano różne czasy drukowania. Intuicyjnie czas drukowania powinien się skracać wraz ze zwiększaniem subparametru *part raster* lub *part sparse fill air gap*, jednak nie zawsze tak się dzieje. Wynika to ze stopnia zużycia końcówki drukującej, świeżości stosowanego materiału oraz przygotowania maszyny do pracy – „zimna” maszyna może drukować wolniej.



Rys.9. Wykres zależności czasu wytwarzania od wielkości part raster - struktura solid; wydruk końcówką T12: a) detal 1, b) detal 2. Kolorem czerwonym oznaczono charakterystykę związaną z materiałem ABS-M30. Kolorem niebieskim oznaczono charakterystykę związaną z materiałem PC. Materiał ULTEM9085 nie jest kompatybilny z końcówką drukującą T12.

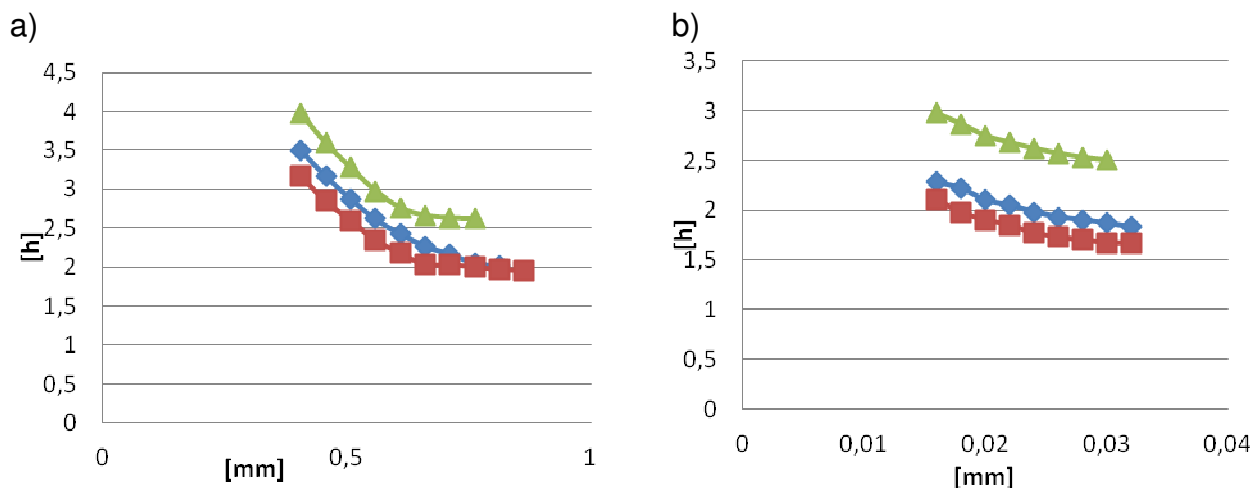


Rys.10. Wykres zależności czasu wytwarzania od wielkości part sparse fill air gap - struktura sparse; wydruk końcówką T12: a) detal 1, b) detal 2. Kolorem czerwonym oznaczono charakterystykę związaną z materiałem ABS-M30. Kolorem niebieskim oznaczono charakterystykę związaną z materiałem PC. Materiał ULTEM9085 nie jest kompatybilny z końcówką drukującą T12.

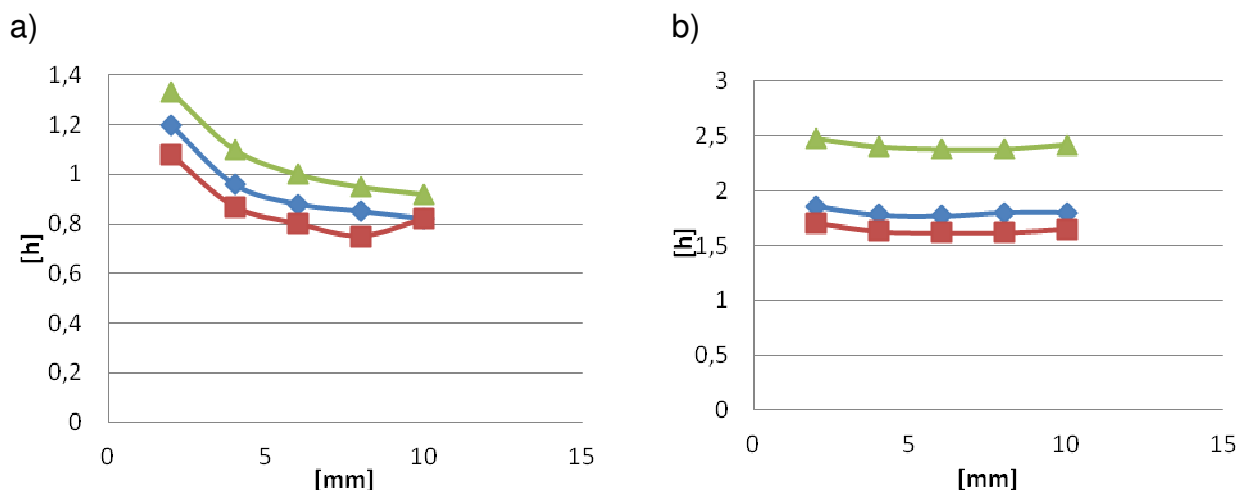


Rys.11. Wykres zależności czasu wytwarzania od wielkości part sparse fill air gap - struktura sparse; wydruk końcówką T12: a) detal 1, b) detal 2. Kolorem czerwonym oznaczono charakterystykę związaną z materiałem ABS-M30. Kolorem niebieskim oznaczono charakterystykę związaną z materiałem PC. Materiał ULTEM9085 nie jest kompatybilny z końcówką drukującą T12.

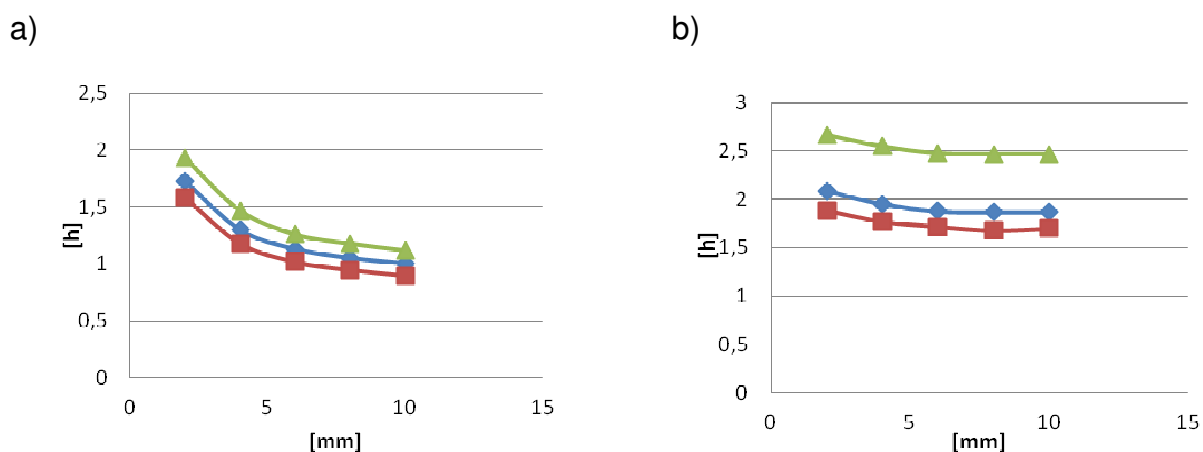
Wykorzystując końcówkę T12 i strukturę solid, wraz ze wzrostem odległości nakładanego materiału maleje również czas. jednak w strukturze sparse i sparse double dense czas początkowo maleje i w pewnym momencie zaczyna wzrastać co może wynikać z jakości materiału stosowanego do badań i stopnia zużycia końcówki drukującej – końcówka drukująca była częściej czyszczona przez maszynę podczas procesu wytwarzania.



Rys.12. Wykres zależności czasu wytwarzania od wielkości part raster - struktura solid; wydruk końcówką T16: a) detal 1, b) detal 2. Kolorem czerwonym oznaczono charakterystykę związaną z materiałem ABS-M30. Kolorem niebieskim oznaczono charakterystykę związaną z materiałem PC. Kolorem zielonym oznaczono charakterystykę związaną z materiałem ULTEM9085.



Rys.13. Wykres zależności czasu wytwarzania od wielkości part sparse fill air gap - struktura sparse; wydruk końcówką T16: a) detal 1, b) detal 2. Kolorem czerwony oznaczono charakterystykę związaną z materiałem ABS-M30. Kolorem niebieskim oznaczono charakterystykę związaną z materiałem PC. Kolorem zielonym oznaczono charakterystykę związaną z materiałem ULTEM9085.



Rys.14. Wykres zależności czasu wytwarzania od wielkości part sparse fill air gap - struktura sparse double dense; wydruk końcówką T16: a) detal 1, b) detal 2. Kolorem czerwony oznaczono charakterystykę związaną z materiałem ABS-M30. Kolorem niebieskim oznaczono charakterystykę związaną z materiałem PC. Kolorem zielonym oznaczono charakterystykę związaną z materiałem ULTEM9085.

4. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano charakterystyki obrazujące zależność czasu wytwarzania wybranych modeli od zastosowanego materiału i typów końcówki drukującej. Badania pozwoliły na wyznaczenie tak zwanej granicy opłacalności zmian subparametrów w odniesieniu do produkcji małoseryjnej. Aby lepiej zobrazować to zagadnienie poniżej przedstawiono dwie przykładowe tabele zestawiające czasy wytworzenia modeli.

Materiał	Parametr b w calach							
	0,07874	0,1574	0,2362	0,3149	0,3937			
ABS – M30	1,2 h	0,96 h	0,88 h	0,85 h	0,82 h			
PC	1,08 h	0,87 h	0,8 h	0,75 h	0,82 h			
ULTEM	1,33 h	1,1 h	1 h	0,95 h	0,92 h			

Tab.3. Zależność czasów wytwarzania modelu 1 od zmian subparametru sparse fill air gap; końcówka T16. Pomarańczowa linia wyznacza granicę opłacalności zmiany subparametrów.

Materiał	Parametr b w calach							
	0,07874	0,1574	0,2362	0,3149	0,3937			
ABS – M30	1,85 h	1,78 h	1,77 h	1,8 h	1,8 h			
PC	1,7 h	1,63 h	1,62 h	1,62 h	1,65 h			
ULTEM	2,47 h	2,4 h	2,38 h	2,38 h	2,42 h			

Tab.4. Zależność czasów wytwarzania modelu 2 od zmian subparametru sparse fill air gap; końcówka T16. Pomarańczowa linia wyznacza granicę opłacalności zmiany subparametrów.

Tabele pokazują, że na lewo od granicy zmiana subparametrów radykalnie wpływa na czas wytwarzania, natomiast na prawo od granicy widoczne są niewielkie zmiany czasów pomimo zmiany subparametrów o tę samą wartość. Co wyraźnie wskazuje, że od pewnego ustalonego momentu nie zachodzi konieczność modyfikowania subparametrów z punktu widzenia manipulowania czasem wytwarzania modeli.

Przeprowadzone badania zwiększyły świadomość manipulowania subparametrami procesu wytwarzania – świadomie kontrolowanie czasu małoseryjnej produkcji. Ponadto zaobserwowano, że czas wydruku może rosnać w miarę zużycia materiałów i końcówek drukujących oraz że czas wydruku może rosnać gdy detal zawiera dużo struktur podporowych. To wynika z częstego przełączania maszyny pomiędzy wytłaczaniem materiału modelowego i podporowego, co wiąże się z koniecznością nagrzewania odpowiedniej końcówki do zadanej temperatury wytłaczania. Zaobserwowano, że detal zawierający mało struktur podporowych o znacznie większych wymiarach może być wytwarzany krócej niż detal mniejszy zawierający dużą liczbę struktur podporowych.

LITERATURA

- [1] <http://www.stratasys.com/Solutions/Industries.aspx>
- [2] <http://www.freedomofcreation.com/>
- [3] Cader M., Trojnacki M.: Projektowanie konstrukcji mechanicznej robota o zmiennej konfiguracji Cameleon z przeznaczeniem do wytworzenia w technologii FDM, Mechanik 7/2012, 1-8, dodatek na CD.
- [4] Dobrzański L.: Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe. Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
- [5] Budzik. G.: Odwzorowanie powierzchni krzywoliniowej łopatek części gorącej silników lotniczych, w procesie szybkiego prototypowania, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Rzeszów 2009.
- [6] Budzik. G.: Określenie chwilowego śladu styku przekładni zębatach z zastosowaniem metod szybkiego prototypowania, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Rzeszów 2011.
- [7] FORTUS 400mc User Guide
- [8] <http://www.stratasys.com/Products/3D-Production-Systems.aspx>