

Mgr inż. Maciej CADER

DOI: 10.17814/mechanik.2015.7.218

Mgr inż. Bartosz BLICHARZ

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP

ANALIZA ZUŻYCIA KÓŁ ZĘBATYCH WYTWARZANYCH PRZYROSTOWO Z TERMOPLASTYCZNEGO MATERIAŁU LOTNICZEGO

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań zużycia kół zębatych wytwarzanych przyrostowo z polimeru ULTEM 9085. Podano sposób przygotowania procesu FDM oraz zestawiono wyniki pracy linii produkcyjnej, w której zamontowane były koła.

THE ANALYSIS OF WEAR OF THERMOSET MATERIAL GEARS MANUFACTURED USING ADDITIVE MANUFACTURING

Abstract: The article presents the results of gears wear manufactured using ULTEM 9085 polymer. Article presents the way of preparing FDM process and results of production line where gears was mounted.

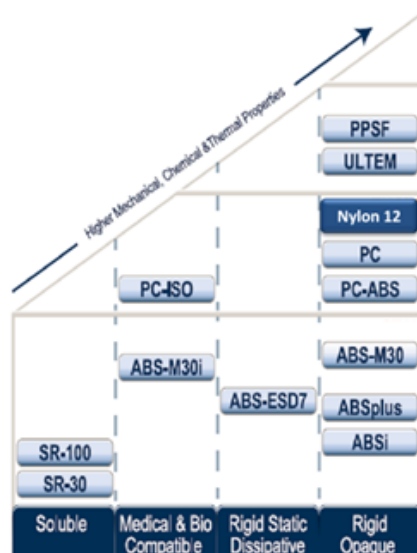
Słowa kluczowe: technologia FDM, materiał ULTEM 9085, wytwarzanie części maszyn, linia produkcyjna

Keywords: FDM technology, ULTEM9085 material, machines part production, production line

1. WPROWADZENIE

Współcześnie technologie przyrostowego wytwarzania stanowią poważną alternatywę dla klasycznych metod wytwarzania, takich jak np. obróbka skrawaniem, cięcie laserem, wodą itp. Technologie te są stosowane w różnych gałęziach przemysłu – od projektowania modeli koncepcyjnych, aż po wytwarzanie wysokowytrzymałych części na potrzeby lotnictwa i transportu ziemnego. W wielu firmach produkcyjnych proces produkcyjny jest uzupełniany, a nawet zastępowany przez technologie przyrostowego wytwarzania. Obecnie na świecie dostępnych i powszechnie używanych jest 16 reprezentatywnych technologii przyrostowego wytwarzania [1], które umożliwiają produkcję modeli, prototypów i części użytkowych z szerokiej gamy materiałów, od gipsu, poprzez polimery, aż po stal narzędziową, złoto, tytan [1]. Jedną z najpowszechniej stosowanych technologii na świecie jest FDM, z ang. *Fused Deposition Modeling*, która została opatentowana przez amerykańską firmę Stratasys. Firma Stratasys jest jedynym producentem maszyn i dystrybutorem technologii FDM, której zasada działania opisana jest w pracach [1, 2]. Sprzedaż rozpoczęła od 1994 r., a od 2007 r. jest dystrybuowana w Polsce. Technologia FDM przystosowana jest do produkcji nie tylko modeli i prototypów, ale również części użytkowych [1, 4, 8]. Materiały stosowane w technologii FDM są przeznaczone dla różnych gałęzi przemysłu: przemysł spożywczy, samochodowy, medyczny, a nawet lotniczy. Jednym z materiałów przeznaczonych do aplikacji, wymagających dużej wytrzymałości, przy relatywnie niewielkiej masie, a przy tym posiadających dodatkowe właściwości, takie jak niepalność, odporność na działanie środków chemicznych, jest polieteroimid (PEI) o nazwie handlowej ULTEM 9085. ULTEM jest

amorficznym termoplastycznym tworzywem o dobrych właściwościach mechanicznych (wytrzymałość na rozciąganie, sztywność, udarność), elektrycznych, termicznych, wysokiej odporności zmęczeniowej i chemicznej [4]. Otrzymywany jest w wyniku polikondensacji N-fenylo-4-nitroftalimidu i soli sodowej bisfenolu A (dianianu sodu, II). Materiał ten jest odporny na hydrolizę, kwasy mineralne, roztwory soli i promieniowanie UV. Posiada ograniczoną odporność na ketony, a rozpuszcza się w chloroformie, octanie etylu, trichloroetanie i chlorku metylenu. W hierarchii materiałowej producenta Stratasys ULTEM zajmuje wysokie miejsce (rys. 1).



Rys. 1. Hierarchia materiałów firmy Stratasys, zdjęcie pochodzi z prezentacji konferencyjnej firmy Stratasys. Materiały są podzielone na cztery grupy: Wypłukiwalne (ang. *Soluble*), Medyczne i biozgodne (ang. *Medical & Bio Compatible*), Materiały elektrostatyczne (ang. *Rigid Static Dissipative*) oraz sztywne nieprzezroczyste (ang. *Rigid Opaque*). Im materiał mocniejszy i bardziej odporny na działania obciążeń termicznych oraz oddziaływania chemiczne, tym wyżej znajduje się na piramidzie

W tabeli (tabela 1) przedstawiono podstawowe własności materiałowe tworzywa ULTEM 9085 z oferty firmy Stratasys, które w szczególności zostały przedstawione w pracy [4].

Tabela 1. Podstawowe właściwości materiałowe polimeru ULTEM 9085

Parametr	Wartość
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	71,64
Moduł Younga [Mpa]	2220
Wydłużenie [%]	5,9
Wytrzymałość na zginanie [Mpa]	115,1
Moduł sprężystości [Mpa]	2507
Udarność, test z karbem [J/m]	106
Udarność, test bez karbu [J/m]	613,8
Temperatura ugięcia [°C]	153
Temperatura zeszklenia [°C]	186
Gęstość względna	1,34

Materiał ULTEM 9085 i technologia FDM posłużyły do wyprodukowania zestawu kół zębatach: koło wieńcowe i koło małe – satelita (rys. 2) będących jednym z kluczowych elementów, które zapewniają realizację cyklu podawczego w linii służącej do automatyzacji produkcji bezpieczników topikowych. Koła są przeznaczone do stanowiska ucięcia nadmiaru drutu sygnalizacji zadziałania wkładki bezpiecznika [5]. Linia, którą szerzej opisano w pracy [5], została zaprojektowana i zbudowana w Instytucie PIAP na zlecenie klienta przemysłowego. Pokrótce idea zbudowania linii produkcyjnej miała na celu zapewnienie odpowiednich parametrów. „Do najważniejszych parametrów bezpiecznika topikowego należą rezystancja elementu bezpiecznikowego (topika) i stopień zagęszczenia piasku wypełniającego obudowę wkładki. Pierwszy zapewnia zadziałanie bezpiecznika przy odpowiednim prądzie. Odpowiednie zagęszczenie gwarantuje skuteczne wygaszenie łuku elektrycznego podczas przepalenia topika. W celu zapewnienia najwyższej jakości produkcji, oba te parametry powinny być kontrolowane dla każdej wkładki. Realizacja takiego zadania jest możliwa tylko w zautomatyzowanej instalacji wytwórczej, nadzorowanej przez inteligentny układ sterujący. Zespół PIAP zbudował dwa takie urządzenia do automatycznego montażu końcowego wkładek bezpiecznikowych WT, z kontrolą jakości w zakresie wspomnianych parametrów i archiwizowaniem danych o przebiegu produkcji dla firmy ETI Polam w Pułtusku” [5]. Wyprodukowane z wykorzystaniem technologii FDM koła służą jako część użytkowa, fabrycznie montowana w maszynie.



Rys. 2. Koła zębata wytworzone z polimeru ULTEM 9085 zamontowane w maszynie:
a) koło wieńcowe, b) koło wieńcowe wraz z satelitą

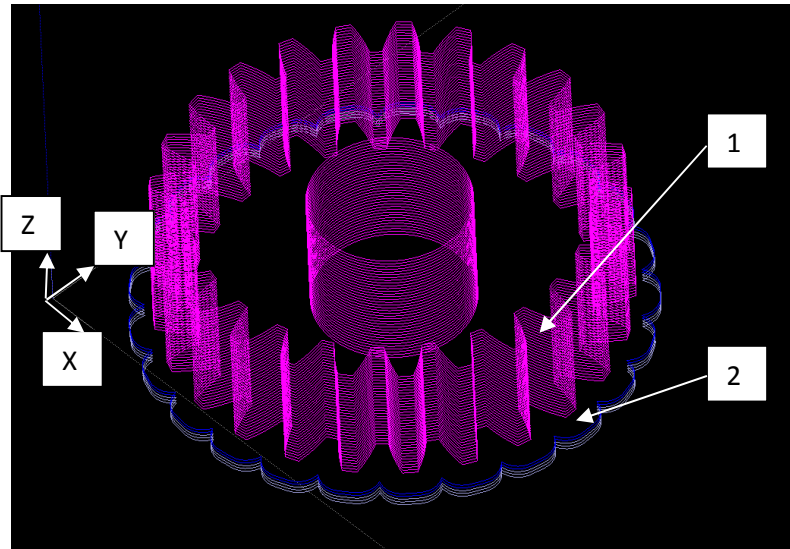
Ze względu na konieczność minimalizacji kosztów produkcji zestawu kół zębatach oraz na fakt, że zastosowane koła zębata wykonane metodami tradycyjnymi bardzo szybko się blokowały, ze względu na specyficzne środowisko pracy, zdecydowano o podjęciu prób wykonania obu kół zębatach z polimeru ULTEM. Takie założenie spowodowało obniżenie kosztów produkcji (metodą FDM) kompletu kół do kwoty 270 zł + VAT w przypadku produkcji 10 kompletów.

2. PRZEBIEG BADAŃ

2.1. Programowanie procesu wytwarzania koła zębatego metodą FDM

Koła zębata zostały wytworzone w laboratorium PIAP design z wykorzystaniem centrum wytwórczego FORTUS 400mc, które jest wyposażone w materiał ULTEM 9085. Przygotowanie modelu do produkcji odbywa się dwuetapowo. W pierwszym etapie należy przygotować geometrię do procesu wytwarzania. Tu odbywa się dzielenie na warstwy, generowanie struktur wspierających model oraz programowanie ścieżki głowicy nakładającej

warstwowo materiał. Drugi etap to przygotowanie procesu wytwarzania: ułożenie modeli w komorze oraz ustawienie parametrów maszyny i jej kalibracja. Etap pierwszy ma bezpośredni związek z przedmiotem badań oraz bezpośredni wpływ na ich wyniki, dlatego zostanie opisany szerzej. Wszystkie badane koła zębate były wytwarzane na płasko (rys. 3). Po przeprowadzeniu standardowych czynności związanych z przygotowaniem geometrii kół do procesu FDM – podział na warstwy (wysokość warstwy: 0,25 mm, ilość warstw na koło wieńcowe: 53, na satelitę: 41) i wygenerowanie struktur wspierających (podłoża kół) przystąpiono do zaprojektowania ścieżki głowicy nakładającej upłynniony polimer ULTEM. Fabrycznie głowica nakłada kolejne ścieżki pod kątem 45° i -45° naprzemiennie na kolejnych warstwach.



Rys. 3. Wizualizacja: koło zębate ułożone na płasko (płaszczyzna stołu modelowego XY) w komorze maszyny. Widoczny podział na warstwy (1) oraz wygenerowana struktura wspierająca (2)

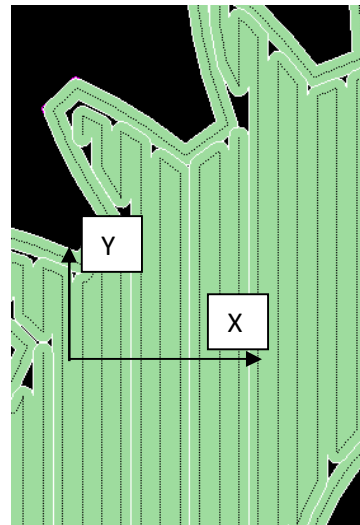
Wykorzystując szerokie możliwości oprogramowania centrum wytwórczego FORTUS 400mc oraz wiedzę zdobytą w toku równorzędnych badań [2, 3, 6-8], zaprogramowano ścieżki głowicy (rys. 4) nakładającej materiał w następujących wariantach dla kolejnych par kół współpracujących (względem osi X):

1. **Koło wieńcowe:** obwiedniowa, **satelita:** obwiedniowa,
2. **Koło wieńcowe:** obwiedniowa, **satelita:** co 60° (wzgl. osi X) dla kolejnych warstw,
3. **Koło wieńcowe:** obwiedniowa, **satelita:** co 30° (wzgl. osi X) dla kolejnych warstw,
4. **Koło wieńcowe:** obwiedniowa, **satelita:** co 45° (wzgl. osi X) dla kolejnych warstw,
5. **Koło wieńcowe:** obwiedniowa, **satelita:** co 15° (wzgl. osi X) dla kolejnych warstw.

a)



b)



c)



Rys. 4. Sposób nakładania polimeru przez głowicę: a) ścieżki nakładane pod kątem do wybranej osi płaszczyzny modelowej na przykładzie zużytego koła zębatego, b) wizualizacja ścieżki nakładanej pod kątem 90° do osi X dla pojedynczej warstwy modelu, c) przykład ścieżki obwodniowej – quasi-równoległej prowadzonej do obu brzegów modelu

2.2. Wyniki badań

Koła zębate zostały poddane oględzinom po każdej wymianie. Charakterystyczne dla zużycia obu kół było spiłowanie zębów widoczne na rysunku poniżej (rys. 5). Natomiast w zależności od sposobu układania polimeru dla kolejnych par kół współpracujących, zmieniał się czas pracy linii automatyzacji – wytrzymałość kół zębatach. Wyniki zestawiono w tabeli 2.



Rys. 5. Sposób zużycia kół zębatach zamontowanych w maszynie [5]

Tabela 2. Dane tabelaryczne obrazujące wyniki i czasy testów. Stan licznika określa liczbę wykonanych wkładek do bezpieczników topikowych

<i>Lp. (numeracja par kół)</i>	<i>Data założenia przekładni</i>	<i>Stan licznika</i>	<i>Data zdjęcia przekładni</i>	<i>Stan licznika</i>	<i>Wykonane wkładki</i>
		<i>szt.</i>		<i>szt.</i>	<i>szt.</i>
1	14-02-2013	1982859	27-05-2013	2234154	251295
2	27-05-2013	2234154	20-11-2013	2635112	400958
3	20-11-2013	2635112	20-01-2014	2774299	139187
4	20-01-2014	2774299	13-05-2014	3131769	357470
5	13-05-2014	3131769	25-08-2014	3422840	291071

Wyniki badań pokazują, że zautomatyzowana linia produkcyjna wykonała najwięcej cykli wykonania wkładek do bezpieczników topikowych dla pary kół nr 2, tj. koło wieńcowe: ścieżka obwiedniowa, satelita: co 60° (wzgl. osi X) dla kolejnych warstw. Na drugim miejscu znajduje się para koła wieńcowe: ścieżka obwiedniowa, satelita: co 45° (wzgl. Osi X) dla kolejnych warstw. Na wykresie przedstawionym poniżej zobrazowano wyniki badań.



Rys. 6. Wykres obrazuje awaryjność kół zębatach linii produkcyjnej w postaci zależności liczby miesięcy bezawaryjnej pracy od typu zamontowanej pary kół zębatach

3. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono aplikację i testy części drukowanych z materiału ULTEM 9085 z zastosowaniem technologii FDM. Praca udowadnia, że technologie wytwarzania przyrostowego przeznaczone są nie tylko do produkcji modeli i prototypów, ale przy odpowiednich nastawach maszyn, w połączeniu z odpowiednimi materiałami mogą służyć do produkcji części maszyn. W wyniku przeprowadzonych badań wytypowano parametry procesu FDM oraz zaproponowano konfigurację kół zębatach, których zamontowanie w maszynie gwarantuje m.in. pięciomiesięczny okres bezawaryjnej pracy linii. W prezentowanym przypadku, w zestawieniu z problemami i kosztami wykonania kół zębatach tradycyjnymi metodami zaproponowane: sposób wytwarzania (technologia FDM), parametry procesu oraz materiał wydają się optymalne.

LITERATURA

- [1] Cader M., Budzik G., Zboiński M.: *Technologie wytwarzania przyrostowego w praktyce*, Mechanik, nr 8-9/2013.
- [2] Cader M., Trojnecki M., Budzik G.: *Wytwarzanie wysokowytrzymałych części dla robotów mobilnych, z zastosowaniem technologii FDM*, Mechanik, nr 7/2013.
- [3] Cader M., Jastrzębska A., Pakieła Z.: *Analiza wpływu orientacji modelu w komorze roboczej na wytrzymałość w procesie FDM*, Mechanik, nr 7/2012,
- [4] <http://www.stratasys.com/materials/fdm/ultem-9085>
- [5] Pilat Z., Grabiński M., Kopacz W., Olczak J., Syrczyński A.: *Urządzenie do montażu wkładek bezpiecznikowych*, Pomiar Automatyka Robotyka, nr 2/2011.
- [6] Cader M., Trojnecki M.: *Projektowanie konstrukcji mechanicznej robota o zmiennej konfiguracji Cameleon z przeznaczeniem do wytworzenia w technologii FDM*, Mechanik, nr 7/2012,

- [7] Cader M., Uszyńska M.: *Analiza zależności czasu budowania modeli od zmian parametrów wytwarzania w technologii FDM*, Mechanik, nr 2/2012,
- [8] Cader M., Trojnacki M.: *Analiza możliwości zastosowania technologii przyrostowych do wytwarzania elementów konstrukcji robotów mobilnych*, Pomiary, Automatyka, Robotyka, nr 2/2013.