

## „Sterowanie jakością modeli w technologiach szybkiego prototypowania poprzez kontrole błędów objętości”

### Radosław Wichniarek

Stypendysta projektu pt. „Wsparcie stypendialne dla doktorantów na kierunkach uznanych za strategiczne z punktu widzenia rozwoju Wielkopolski”, Poddziałanie 8.2.2 Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki

Moja praca doktorska jest związana z przyrostowymi technikami wytwarzania (ang. *Additive Manufacturing Technologies* - AMT), nazywanymi również w literaturze procesami generatywnymi. Dzięki ich zastosowaniu można otrzymywać rzeczywiste, trójwymiarowe modele, prototypy, a także niektóre, gotowe do użycia części lub kompletne wyroby. Istnieje wiele różnych metod i odmian AMT, jedną z najczęściej rozpowszechnionych i wykorzystywanych jest modelowanie uplastycznionym tworzywem sztucznym (ang. *Fused Deposition Modelling* - FDM). Wszystkie opracowane metody pozwalają, w różnym stopniu, na skracanie fazy projektowej w cyklu życia wyrobu oraz ograniczenie kosztów z nią związanych. Dodatkowo, dzięki przyśpieszeniu prac rozwojowych nad wyrobem, może on szybciej trafić na rynek, co wymiennie zwiększa konkurencyjność przedsiębiorstwa stosującego AMT. Głównym celem mojej pracy jest zbadanie i wyznaczenie wpływu różnych parametrów procesu FDM na tak zwane błędy objętości (ang. *volume errors*), które są nieodłączną cechą modeli warstwowych wytwarzanych przyrostowo. Dzięki tym informacjom możliwe będzie bardziej efektywne korzystanie z zalet oferowanych przez będącą przedmiotem badań metodę AMT.

Wspomniane błędy objętości mają z reguły niekorzystny wpływ na właściwości wytrzymałościowe otrzymywanych modeli, ich dokładność wymiarowo-kształtową oraz niektóre właściwości fizyczne. Obecność błędów objętości może dyskwalifikować dany model z użycia w określonym charakterze (np. prototypu funkcjonalnego, który nie przenosi zakładanych obciążeń) lub sprawić, że konieczne będą dodatkowe prace wykańczające (ang. *post-processing*), po zastosowaniu których wykorzystanie technik przyrostowych może być ekonomicznie nieopłacalne. Z drugiej strony wykonanie modelu, zawierającego

akceptowalny poziom błędów objętości, bezpośrednio z procesu FDM może okazać się nieopłacalne tak ze względów ekonomicznych, jak i czasowych. Możliwość uzyskania takiej informacji przed rozpoczęciem procesu produkcyjnego jest krytyczna z punktu widzenia tak odbiorcy, jak i dostawcy.

Dzięki prowadzonym badaniom udało się dowieść, że samo minimalizowanie błędów objętości (związanych z wybranym czynnikiem) jest często metodą nieskuteczną lub nieopłacalną, ponieważ znaczną rolę odgrywa także miejsce, forma oraz suma bezwzględnych wartości objętości błędów cząstkowych. Zaproponowałem zatem autorski sposób klasyfikowania błędów objętości w modelach otrzymywanych metodą uplastyczniania tworzywa sztucznego. Część z nich jest charakterystyczna dla metody FDM, inne są wspólne dla wszystkich metod przyrostowych, dlatego z bezpośrednich wyników mojej pracy naukowej będzie można korzystać wyłącznie w przypadku planowania procesów technologicznych na maszynach FDM. Jednakże sama metodologia postępowania przy wyznaczaniu wpływu parametrów procesu na błędy objętości jest właściwa dla ogółu metod ATM. Największa zbieżność wyników będzie występowała dla wszystkich przyrostowych technik wytwarzania, które (tak jak FDM) polegają na warstwowym przyroście modelu z liniowym wypełnieniem w obrębie danej warstwy.

Zaproponowana, autorska klasyfikacja błędów objętości rozgranicza je na dwa główne rodzaje: błędy zewnętrzne oraz błędy wewnętrzne. Błędy z pierwszej grupy to między innymi błąd: konwersji, schodkowości, podziału na warstwy, odrzucenia warstw skrajnych, nieciągłości procesu wytłaczania (tak zwany błąd „zrywania nici”) oraz różne błędy zaokrąglenia. Mają one zdecydowany wpływ na dokładność wymiarowo-kształtową modelu oraz wskaźniki ekonomiczne procesu. Znaczna część wymienionych błędów pierwszego rodzaju oraz czynników je powodujących została już dosyć dobrze opisana w literaturze naukowej, jednakże bez wykazania wzajemnych korelacji i z marginalnym potraktowaniem aspektu ekonomiczności procesu technologicznego. Natomiast wewnętrzne błędy objętości nie zostały dotychczas należycie rozpoznane i dlatego główny wysiłek moich prac będzie skupiał się właśnie na nich.

Wewnętrzny błąd objętości wynika ze sposobu (nazywanego strategią wypełniania) w jaki nakładany jest materiał w danej warstwie modelu. Jego wielkość i umiejscowienie ma duży wpływ na właściwości wytrzymałościowe modelu, ilość zużytego materiału budulcowego oraz czas procesu wytwarzania metodą FDM. Uogólniając można przyjąć, że zwiększenie wartości bezwzględnej błędu wewnętrznej objętości pogarsza właściwości wytrzymałościowe, jednakże skraca czas nakładania materiału oraz jego ilość w modelu przez co proces jest szybszy oraz tańszy. Występowanie błędu może być pożądane w

sytuacji dla której liczy się czas, a model ma spełniać jedynie funkcje wizualne. W skrajnych przypadkach możemy mówić z jednej strony o modelu w postaci skorupy, którego błąd objętości wewnętrzny dąży do wartości maksymalnej, z drugiej zaś o modelu z „litym” rdzeniem, którego błąd objętości wynosi zero.

Zaprojektowany program moich badań przewiduje wytworzenie identycznych geometrycznie próbek (modeli) na stanowisku badawczym, działającym zgodnie z metodą FDM, dla których zmieniać będzie się strategia wypełnienia warstwy. Dzięki wykonanemu oprogramowaniu do generacji kodów sterujących maszyną, możliwe będzie matematyczne wyliczenie wewnętrznego błędu objętości w danej warstwie i jego umiejscowienia, a uzyskane wyniki będą mogły być porównane z tymi otrzymanymi z pomiarów bezpośrednio na wytworzonej próbce. Dodatkowo próbki zostaną poddane pomiarom pozwalającym ustalić ich właściwości wytrzymałościowe. Łącząc te dane oraz informacje o czasie trwania procesu technologicznego i ilości zużytego materiału budulcowego możliwe będzie wyznaczenie ogólnej funkcji wskazującej na relacje między strategią wypełnienia warstwy, a wskaźnikami technicznymi i ekonomicznymi procesu FDM.

Wymagania techniczno-ekonomiczne stawiane procesowi technologicznemu FDM można podzielić na cztery główne kryteria: właściwości mechaniczne wyrobu, dokładność odwzorowania geometrycznego wyrobu względem wejściowej reprezentacji cyfrowej, czas konieczny na wytworzenie (wliczając w to czas operacji wykańczających) oraz całkowity koszt wykonania. Jak łatwo się przekonać pewne kryteria są sobie przeciwstawne, to znaczy, że polepszając jakość modelu w odniesieniu do jednego kryterium pogorszymy ją względem innego. Przeprowadzone doświadczenia oraz wiedza uzyskana z analizy literaturowej pozwolą na określenie wpływu różnych parametrów procesu technologicznego na wymienione wcześniej kryteria oraz ich wzajemnych korelacji. Informacje te ułatwią i umożliwią lepsze planowanie procesów w metodzie FDM tak, aby otrzymywane przy jej pomocy modele jak najbardziej spełniały oczekiwania użytkownika – rozumiane jako wybrane według określonej kolejności (lub systemu wagowego) kryteria.