

Filip Górski, Radosław Wichniarek ¹⁾

SYMULACJA PROCESÓW WYTWARZANIA PRZYROSTOWEGO Z WYKORZYSTANIEM ŚRODOWISKA WIRTUALNEGO

Streszczenie: Artykuł przedstawia innowacyjny algorytm symulacji procesów szybkiego przyrostowego wytwarzania prototypów z wykorzystaniem środowiska wirtualnej rzeczywistości na przykładzie technologii FDM (Fused Deposition Modeling). W ramach badań opisanych w artykule utworzono komputerowy algorytm symulacji wytwarzania modelu w technologii FDM – od modelu 3D stworzonego w systemie CAD, poprzez kod na maszynę CNC po środowisko wirtualne, w którym kod jest odczytywany i interpretowany. Efektem końcowym jest wirtualny model, którego struktura odpowiada strukturze fizycznego modelu wytworzonego w technologii FDM. Model ten może zostać wykorzystany do wizualizacji błędów objętości, sprawdzenia poprawności wygenerowanego kodu NC i prowadzenia testów w środowisku wirtualnym – m. in. do obliczeń wytrzymałościowych z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

Słowa kluczowe: szybkie wytwarzanie, wirtualna rzeczywistość, modelowanie uplastycznionym tworzywem.

WSTĘP

Szybkie prototypowanie (ang. Rapid Prototyping, w skrócie RP) i wytwarzanie wyrobów technikami przyrostowymi (ang. Additive Manufacturing, w skrócie AM) to grupa technologii umożliwiających wytworzenie fizycznego prototypu obiektu wyłącznie na podstawie modelu CAD 3D, bez konieczności przygotowywania jakiegokolwiek oprzyrządowania technologicznego. Techniki RP znalazły swoje stałe miejsce wśród innych, tradycyjnych technologii wytwarzania – są nieocenione, kiedy zachodzi potrzeba szybkiego wytworzenia fizycznego prototypu projektowanej części [1].

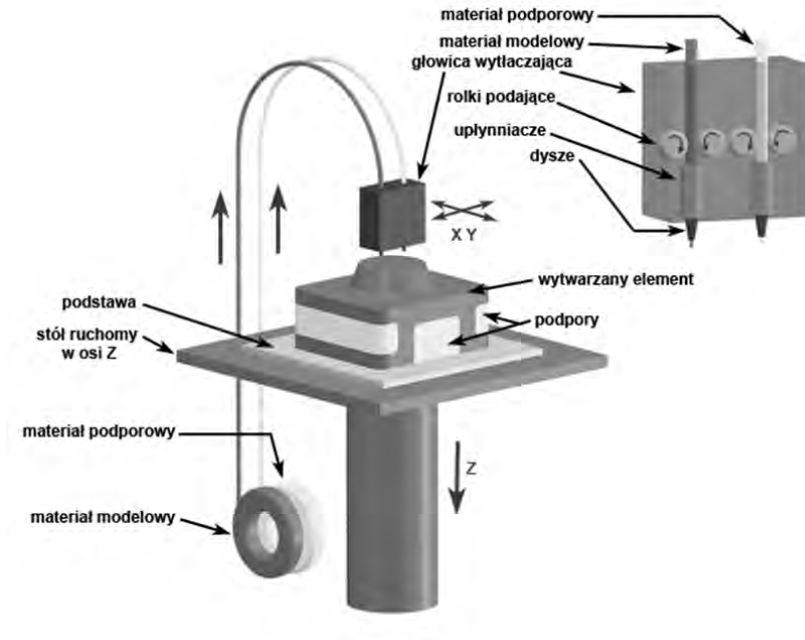
Przydatność modeli wytwarzanych z wykorzystaniem technik Rapid Prototyping jest bezpośrednio związana z dokładnością tych modeli. Dokładność jest z kolei determinowana przez błąd objętości – rozumiany jako różnica pomiędzy objętością zużytego do produkcji modelu materiału, a objętością nominalną obliczoną na podstawie komputerowej reprezentacji (modelu 3D) wyrobu [2]. Obliczenie ilości zużytego materiału i porównanie z danymi CAD jest standardową funkcją programów sterujących maszynami Rapid Prototyping, dzięki czemu możliwa jest optymalizacja parametrów procesu przed jego uruchomieniem.

¹ Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Instytut technologii Mechanicznej.

W przypadku nowej, prototypowej techniki Rapid Prototyping takie podejście jest niemożliwe – gdy urządzenie realizujące proces znajduje się w fazie projektowania, trudno mówić o programie sterującym umożliwiającym optymalizację procesu. Tymczasem konieczne są testy i próby, które umożliwią potwierdzenie poprawności przyjętych założeń i ustalenie granic zmienności parametrów procesu. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie środowiska wirtualnej rzeczywistości, które umożliwia utworzenie wirtualnej wersji procesu szybkiego wytwarzania i przeprowadzenie większości niezbędnych testów.

WYTWARZANIE PRZYROSTOWE W TECHNOLOGII FDM

Wykonywanie modeli w technologii FDM polega na warstwowym nakładaniu przez głowicę uplastycznionego materiału modelowego i podporowego, dostarczanego w postaci drutu. Urządzenie sterowane numerycznie nanosi na stół modelowy materiał bazowy i podporowy, według kolejnych poziomych przekrojów tworzonych na podstawie modelu 3D. Najczęściej wykorzystywanym materiałem budulcowym jest tworzywo ABS. Otrzymywane modele charakteryzują się dość dużą wytrzymałością i można je poddawać dalszej obróbce mechanicznej, kleić oraz ewentualnie malować nadając powierzchni żądaną jakość. Powstała część wiernie odwzorowuje wirtualny projekt i po usunięciu materiału podporowego praktycznie od razu gotowa jest do użycia.



Rys. 1. Technologia Fused Deposition Modeling

Fig. 1. Fused Deposition Modeling technology

Opisany w dalszej części wirtualny proces jest odwzorowaniem procesu wytwarzania w zmodyfikowanej technologii FDM (Fused Deposition Modeling), przedstawionej na rys. 1, której innowacyjność w stosunku do oryginalnej metody FDM polega na dodaniu dwóch dodatkowych skrętnych osi umożliwiających zmianę orientacji modelu w trakcie wytwarzania. Takie podejście, zwane wielokierunkowym wytwarzaniem prototypów umożliwia minimalizację, a w pewnych sytuacjach nawet wyeliminowanie konieczności stosowania materiału podporowego [3]. Ruch w dwóch osiach skrętnych będzie realizowany przez zastosowanie stołu obrotowego z kołyską.

PODSTAWOWE INFORMACJE O ŚRODOWISKU WIRTUALNYM

Wirtualna rzeczywistość (ang. Virtual Reality, w skrócie VR) to kompleksowe pojęcie, o szerokim polu rozumienia i interpretacji. W najogólniejszym rozumieniu jest to sztuczny, cyfrowy uniwersum utworzony z wykorzystaniem komputera, wyświetlany z użyciem trójwymiarowej grafiki komputerowej, pozwalający na interakcję z obiektami które się w nim znajdują. Ten sztuczny uniwersum ma za zadanie w jak największym stopniu odwzorowywać określony fragment świata rzeczywistego, musi więc zarówno odbierać, jak i wysyłać sygnały do użytkownika, który się w nim znajduje – musi być to pozwalające na interakcję środowisko, nie statyczna wizualizacja.

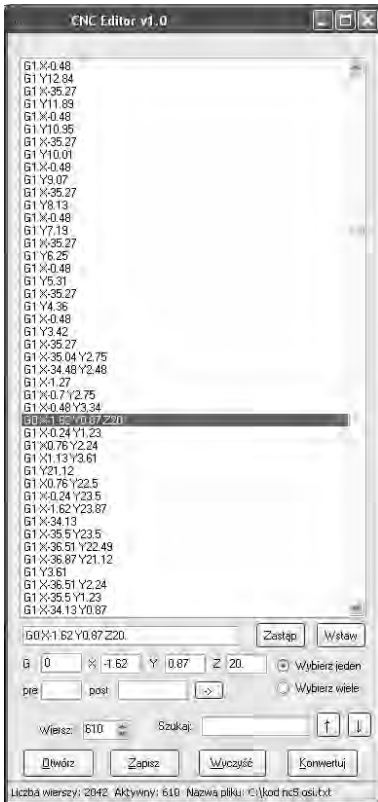
Do utworzenia wirtualnego procesu wytwarzania w 5-osiowej technologii FDM wykorzystano środowisko EON Studio. Jest to środowisko umożliwiające tworzenie interaktywnych aplikacji wirtualnej rzeczywistości z wykorzystaniem technik programowania wizualnego (nie jest wymagana zaawansowana znajomość języków programowania). Aplikacja powstaje na bazie zaimportowanego modelu CAD, który może być utworzony w dowolnym systemie CAD. Środowisko EON Studio pozwala na nadanie interaktywności zaimportowanemu modelowi, pozwala też na programowanie wzajemnych zachowań obiektów, zmianę cech wizualnych oraz utworzenie zaawansowanego interfejsu obsługi w celu utworzenia kompleksowej aplikacji wirtualnej rzeczywistości.

BUDOWA APLIKACJI REALIZUJĄCEJ WIRTUALNY PROCES FDM

Odwzorowanie procesu wytwarzania w technologii FDM w środowisku wirtualnym wymaga wykorzystania narzędzi związanych z dynamicznym tworzeniem geometrii. Zadaniem aplikacji realizującej wirtualny proces wytwarzania jest interpretacja dostarczonego, przygotowanego uprzednio kodu NC na maszynę do wytwarzania w technologii FDM i odwzorowanie na jego bazie procesu przyrostowego wytwarzania modelu.

Kod ten jest przygotowywany z wykorzystaniem aplikacji opartej na systemie CAD/CAM, na bazie modelu CAD wytwarzanego obiektu. Zawiera on głównie instrukcje związane z poruszaniem się narzędzia oraz obiektu. Kod przeznaczony

do wykorzystania w aplikacji wirtualnej rzeczywistości jest poddawany procesowi konwersji, w celu uproszczenia procedur związanych z jego późniejszym odczytem i interpretacją. Konwersja odbywa się w utworzonej specjalnie do tego celu aplikacji pomocniczej (rys. 2).



Rys. 2. Aplikacja do konwersji i edycji kodu NC

Fig. 2. Software application for converting and editing NC code

Gotowy kod NC w postaci pliku tekstowego można wczytać do aplikacji utworzonej w środowisku wirtualnym. Interpretacja kodu polega na przetłumaczeniu informacji związanych z kinematyką narzędzia oraz obiektu do postaci zrozumiałej przez węzły realizujące kinematykę w programie EON Studio.

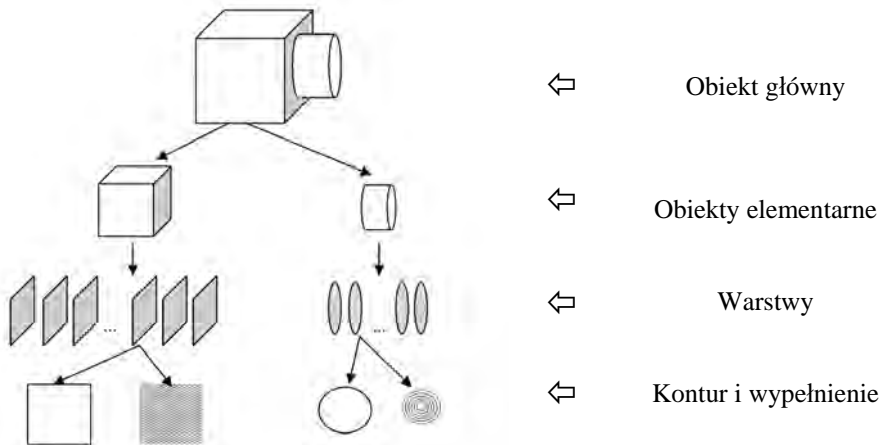
Odwzorowanie procesu nakładania materiału jest możliwe dzięki specjalnemu obiektowi dostępnemu w środowisku EON Studio – jest nim geometryczny prototyp walca (rys. 3) o łatwo definiowalnych parametrach (dostępny obiekt został lekko zmodyfikowany na potrzeby symulowanego procesu). Położenie nitki materiału pomiędzy dwoma położeniami narzędzia jest realizowane poprzez zamieszczenie tam wspomnianego prototypu geometrycznego, o odpowiednio zdefiniowanych parametrach (współrzędne punktu początkowego i końcowego, parametry przekroju oraz kolor). Jako że w procesie konwersji bazowego modelu CAD do kodu NC wszystkie krzywe zostają aproksymowane przez odpowiednią ilość odcinków prostych, nie pojawia się problem konieczności wizualizacji tych krzywych.

Interpretacja kodu realizującego ruch narzędzia oraz obiektu jest oparta na jego specyficznych cechach, wśród których podstawową jest hierarchiczność, co przedstawiono na rys. 4. Model CAD wytwarzany w pięcioosiowej technice FDM można podzielić na obiekty elementarne (każdy z nich jest wytwarzany przy innej orientacji osi skrętnych A i C), te z kolei można podzielić na warstwy (pojedyncza warstwa jest wytwarzana tylko i wyłącznie przez ruchy narzędzia w osiach X i Y, stół z obiektem wytwarzanym pozostaje nieruchomy). Warstwy można dodatkowo podzielić na kontur oraz wypełnienie.



Rys. 3. Prototyp walca – model nitki materiału w środowisku wirtualnym
Fig. 3. Cylinder prototype – model of thread of material in virtual environment

Każda zmiana w poziomie hierarchii (przejście między kolejnymi obiektami, warstwami czy konturami) ma swoje odzwierciedlenie w kodzie, gdyż jest związana ze specyficznymi ruchami w określonych osiach. Miejsce w którym rozpoczyna się kod odpowiedzialny za kolejny obiekt elementarny jest oznaczone komendą przemieszczenia obiektu w osi A i C – ruch w tych dodatkowych osiach nie występuje w obrębie jednego obiektu elementarnego. Podobnie wygląda sytuacja na niższym poziomie hierarchii – komenda realizująca ruch stołu roboczego w osi Z oznacza przejście do kolejnej warstwy, ruch w osi Z nie występuje bowiem w obrębie pojedynczej warstwy. Wykorzystanie tej hierarchii pozwala zarówno na kontrolę poprawności kodu, jak i na zbudowanie wirtualnego prototypu o uporządkowanej strukturze.



Rys. 4. Hierarchiczna struktura obiektu wytwarzanego w technice FDM w pięciu osiach
Fig. 4. Hierarchical structure of object manufactured using five-axial FDM technology

Proces wczytania i interpretacji kodu obejmuje następujące etapy:

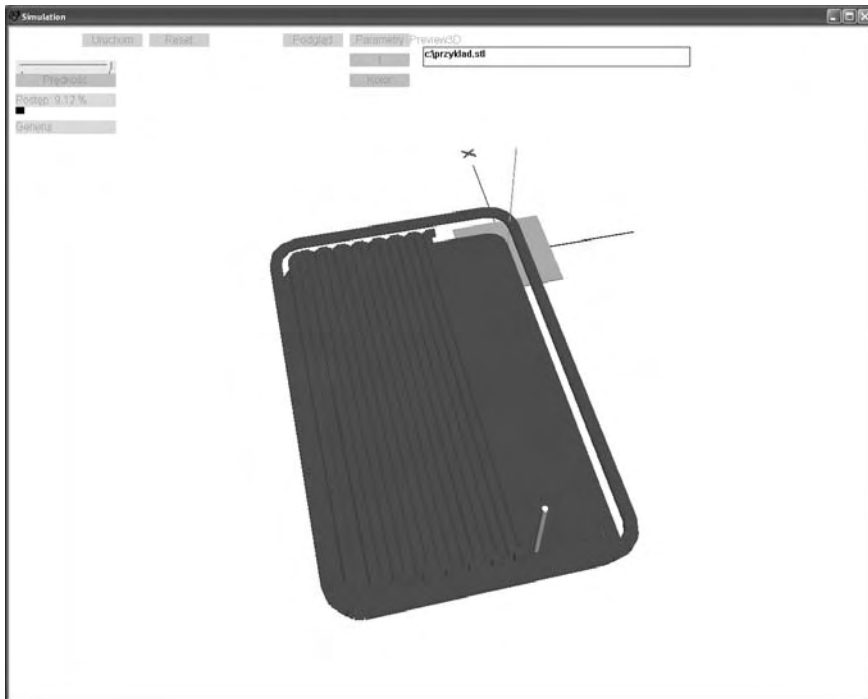
1. Podanie nazwy pliku z kodem oraz ścieżki dostępu do niego przez użytkownika.
2. Sprawdzenie istnienia i poprawności pliku.
3. Wczytanie pojedynczej linii z pliku, podział linii na wyrazy, interpretacja pierwszego wyrazu w celu identyfikacji komendy (ruch roboczy, ruch jałowy w osi Z – następna warstwa lub ruch jałowy w czwartej i piątej osi – następny obiekt elementarny).
4. Utworzenie wektora położenia dla narzędzia na podstawie pozostałych wyrazów zawierających współrzędne w odpowiednich osiach. Zgodnie z zasadami przyjętymi w standaryzowanym kodzie NC (tzw. G-kodzie), jeśli komenda zawiera informacje tylko o części osi, dla pozostałych przyjmowane są współrzędne z poprzedniej komendy. Dodanie wektora położenia do tablicy danych o ruchu narzędzia.
5. W przypadku przejścia do kolejnej warstwy lub obiektu - oznaczenie tego faktu poprzez zapisanie wartości w odpowiedniej tablicy.
6. Powtórzenie punktów 3-5 aż do osiągnięcia końca pliku.

Końcowym efektem wczytania kodu są tablice zawierające dane o kolejnych położeniach narzędzia. W oryginalnym procesie FDM narzędzie (którym jest głowica nakładająca materiał) porusza się wyłącznie w osiach X i Y. Ruch w pozostałych osiach (przesuw w osi Z, obrót w osiach A i C, czyli wokół osi X i Z) jest wykonywany przez wytwarzany obiekt. Celem uproszczenia w utworzonej aplikacji wszystkie ruchy są wykonywane przez narzędzie. Rozwiązanie to zapewnia identyczny z rzeczywistym efekt wtedy, gdy wartości przemieszczeń w osiach przypisanych w rzeczywistości do obiektu będą miały przeciwne znaki – przeliczenie to jest realizowane w momencie przesyłania informacji o pojedynczym ruchu do węzła odpowiedzialnego za kinematykę narzędzia.

Po wczytaniu kodu możliwe jest rozpoczęcie jego realizacji, czyli właściwe uruchomienie wirtualnego procesu wytwarzania w technice FDM (rys. 5). Proces jest realizowany w następujących krokach:

1. Wyzerowanie licznika informującego o numerze porządkowym realizowanego ruchu.
2. Pobranie informacji z tablicy przemieszczeń utworzonej przy interpretacji kodu. Indeks pobranej informacji (położenie w tablicy) jest równy wartości licznika zerowanego w pierwszym kroku.
3. Pobranie informacji z tablicy obiektów oraz z tablicy warstw. Na tej podstawie następuje określenie czy w wykonanym ruchu nastąpi położenie nitki materiału, czy też nie. Miejsce przejścia (indeks) do następnego obiektu/warstwy zostaje odnotowane.
4. Przesłanie wektora przemieszczenia do węzła realizującego kinematykę, ruch narzędzia.

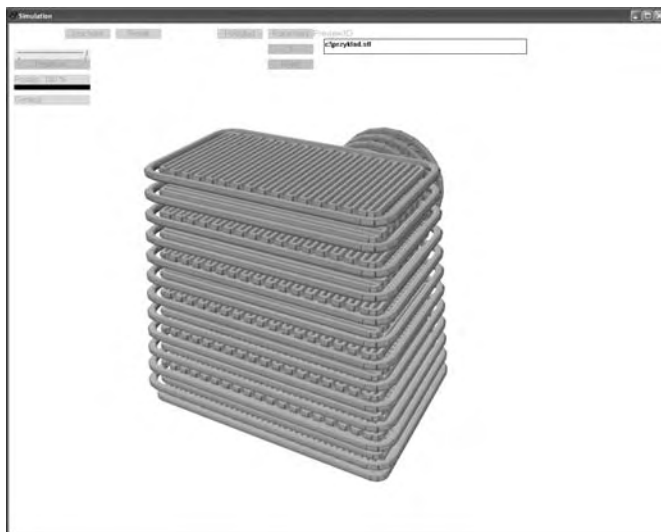
5. W przypadku ruchu z nakładaniem materiału – przesłanie informacji o poprzednim oraz bieżącym położeniu głowicy narzędzia do obiektu reprezentującego nitkę materiału (prototyp geometryczny w postaci walca).
6. Po wykonaniu ruchu – automatyczna inkrementacja licznika. Powtórzenie kroków 2-5 w pętli do końca tablicy przemieszczeń.



Rys. 5. Wizualizacja wirtualnego procesu FDM
Fig. 5. Visualization of virtual FDM process

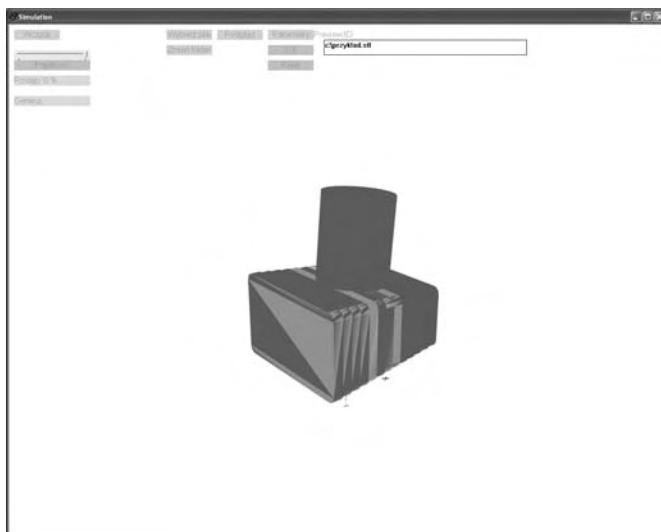
Proces jest realizowany w ciągłej pętli, jego zatrzymanie jest możliwe z wykorzystaniem przycisku „Reset” będącego elementem interfejsu obsługi. Postęp w realizacji procesu jest podawany procentowo oraz wizualizowany (pasek postępu). Jeżeli nie ma potrzeby wizualizacji całego procesu, można ją wyłączyć korzystając z przycisku „Podgląd”. Wyłączenie wizualizacji przyspiesza proces generowania wirtualnego modelu, jednakże nie pozwala śledzić przebiegu procesu na bieżąco.

Końcowym efektem realizacji wirtualnego procesu jest gotowy prototyp (rys. 6). Zapisanie informacji o przejściu między warstwami oraz obiektami umożliwia selektywną wizualizację pojedynczych obiektów elementarnych lub warstw. Aplikacja umożliwia zapisanie informacji o aktualnym stanie wszystkich obiektów symulujących nitki materiału, w celu późniejszego szybszego odtworzenia wizualizacji obiektu.



Rys. 6. Prototyp utworzony w wyniku wirtualnego procesu FDM
Fig. 6. Prototype manufactured using virtual FDM process

Aplikacja zawiera funkcje umożliwiające weryfikację modelu – pozwala na obliczenie objętości zużytego materiału (obliczana jest objętość wszystkich użytych nitek materiału), a także na weryfikację wizualną – podgląd oryginalnego modelu zapisanego w formacie STL (jest to standardowy format pliku wymiany danych CAD dla technologii Rapid Prototyping).



Rys. 7. Podgląd geometrii CAD w środowisku wirtualnym
Fig. 7. Preview of CAD geometry in virtual environment

WNIOSKI

Stworzona w środowisku wirtualnym aplikacja odwzorowująca proces FDM w pięciu osiach pozwala na sprawdzenie poprawności wygenerowanego kodu, zidentyfikowanie i ocenę błędów objętości modelu, a także ocenę cech wizualnych modelu. Pomiar czasu wykonania modelu oraz ocena jego jakości wizualnej i błędów objętości przy różnych parametrach procesu umożliwią wyznaczenie optymalnego zakresu tych parametrów.

Zastosowany w prezentowanej aplikacji sposób odwzorowania procesu FDM nie jest jednak wolny od wad. Głównym problemem jest wysokie zapotrzebowanie na moc obliczeniową, ze względu na dużą liczbę obiektów geometrycznych (nitek materiału). Zapotrzebowanie to można częściowo zmniejszyć, realizując wizualizację tylko w zakresie konturów warstw (powstanie wtedy tylko zewnętrzna „skorupa” modelu), lecz wtedy wyłączona zostaje możliwość obliczenia objętości gotowego modelu, a co za tym idzie identyfikacja zarówno całkowitego błędu objętości, jak i błędów szczegółowych.

Dane o budowie modelu (położenia i kształt poszczególnych nitek materiału) można wyeksportować w postaci wektorów do pliku tekstowego do późniejszego wykorzystania. Dodatkowym zastosowaniem tej funkcjonalności jest możliwość zbudowania na podstawie tych danych typowego modelu CAD. Taki model odzwierciedlający sposób wytworzenia może zostać następnie wykorzystany, na przykład w symulacjach wytrzymałościowych z wykorzystaniem oprogramowania z grupy CAE.

MOŻLIWOŚCI ROZWOJU

Dalszym etapem rozwoju jest wprowadzenie do zbudowanej aplikacji wirtualnego modelu maszyny realizującej ten proces. Powstała wirtualna maszyna, oprócz dotychczasowych funkcjonalności, umożliwi również testowanie kinematyki, wzajemnych kolizji elementów czy ocenę ergonomii i łatwości obsługi.

Wirtualny proces można rozbudować poprzez wprowadzenie symulacji praw i zjawisk fizycznych (np. skurcz materiału i wypaczenia modelu spowodowane temperaturą). Środowisko wirtualne umożliwia implementację bardziej zaawansowanych zachowań obiektów i materiałów. Niestety, stworzenie pełnego modelu uwzględniającego dynamikę i zjawiska związane z temperaturą jest bardzo pracochłonne i dodatkowo zwiększa zapotrzebowanie na moc obliczeniową.

Środowisko wirtualne może też zostać wykorzystane do symulacji innych procesów niż FDM – dostępny jest szereg narzędzi (układy cząsteczkowe, dynamiczne tworzenie siatek przestrzennych, symulacja zachowania płynów), które mogą zostać wykorzystane do zbudowania funkcjonalnych modeli procesów takich jak 3D Printing czy SLS.

PODSUMOWANIE

Zastosowanie środowiska wirtualnego do symulacji procesów wytwarzania przyrostowego jest możliwe i pozwala osiągnąć konkretne korzyści – nie ma konieczności budowania prototypu maszyny w celu sprawdzenia poprawności przyjętych założeń, co pozwala na zaoszczędzenie czasu i środków. Wirtualną symulację można dalej rozbudować poprzez wprowadzenie symulacji zjawisk fizycznych. Dzięki zastosowaniu wirtualnego procesu, możliwe jest wyeliminowanie wielu błędnych założeń i dobranie optymalnych parametrów już na wczesnym etapie projektowania. Empiryczne testowanie procesu i budowa prototypu maszyny technologicznej jest oczywiście etapem koniecznym, lecz dzięki zastosowaniu wirtualnej rzeczywistości można go przesunąć w czasie, redukując w ten sposób poniesione koszty.

PIŚMIENNICTWO

1. Górski F., Kuczko W., Wichniarek R., Dudziak A., Kowalski M., Zawadzki P.: Choosing optimal rapid manufacturing process for thin-walled products using expert algorithm, *Journal of Industrial Engineering and Management*, Vol 3, No 2 (2010).
2. Weiss E., Pająk E., Kowalski M., Wichniarek R., Zawadzki P., Dudziak A., Paszkiewicz R., Górski F.: Accuracy of parts manufactured by rapid prototyping technology, *Annals and Proceedings of DAAAM International*, 2010.
3. Yang Y., Fuh J.Y., Loh H.T., Wong Y.S., 2003, Multi-orientational deposition to minimize support in the layered manufacturing process. *Journal of Manufacturing Systems*, vol.22, no 2: 116-129.

SIMULATION OF ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES USING VIRTUAL REALITY ENVIRONMENT

Summary:

The paper presents an innovative algorithm for simulation of additive manufacturing processes using virtual reality environment, on example of Fused Deposition Modeling technology. Research shown in the paper included creating a computer algorithm for simulating manufacturing of model using FDM technology – starting with 3D CAD model, through code for numerically controlled machine, ending with virtual environment, where code is loaded and interpreted. End result is the virtual model, with internal structure resembling structure of real, physical model manufactured in FDM technology. This model can be used for visualization of volume errors, checking correctness of the NC code and for further tests in virtual environment – among other things for material strength calculations using finite elements method.

Keywords: rapid prototyping, virtual reality, fused deposition modeling.