

Radosław MOREK¹

SYMULACYJNA WERYFIKACJA PROGRAMU OBRÓBKI

Konkurencyjność wymaga innowacyjności w obniżaniu kosztów i zwiększaniu zdolności technologicznych zakładu. Symulacyjna weryfikacja programu obróbkowego polega na jego analizie w wirtualnym środowisku komputerowym z wykorzystaniem modeli obrabiarki, układu sterowania, oprzyrządowania technologicznego. Jej celem jest weryfikacja poprawności programu obróbkowego, a zatem minimalizowanie kosztów związanych z wdrożeniem procesu technologicznego. Opracowanie modeli geometrycznych nadal jest przedmiotem badań. Uwzględnienie dokładności geometrycznej obróbki, tolerancji wymiarów półfabrykatu, a także oddziaływań dynamicznych to złożony i wieloczynnikowy obszar naukowo-badawczy, który dotyczy szeroko rozumianego technologicznego przygotowania produkcji. Pomimo wielu problemów obróbka wirtualna stanowi aktualny obszar zainteresowania ze strony przemysłu ze względu na swoje zalety. W artykule omówiono wymagania jakie powinien spełniać model obrabiarki, przedmiotu i procesu obróbkowego. Scharakteryzowano też środowisko dla obróbki wirtualnej na przykładzie wybranych systemów CAM i CAE.

1. WPROWADZENIE

Innowacyjność obejmuje konstrukcje, technologie, w tym także informatyczne programy i systemy CAM/CAE/CAPP (rodzina CAx). Wzrastająca liczba wariantów konstrukcyjnych, skracanie czasu wejścia produktu na rynek, skracający się cykl życia produktu [4],[14] oraz względy ekonomiczne wskazujące na konieczność redukcji kosztów produkcji wymuszają optymalizowanie działań w zakresie technologicznego przygotowania produkcji oraz w samym procesie produkcyjnym. Nadrzędnym kryterium optymalizacji jest koszt, z którym silnie związane jest kryterium czasu. Stosowane są różne metody optymalizacji procesu technologicznego, począwszy od aspektu organizacyjnego, poprzez parametry obróbkowe, konstrukcje i materiały narzędziowe, konstrukcje maszyn technologicznych (w tym obrabiarek), strategie obróbki, jakościowe aspekty technologii, automatyzację, po kompleksowe systemy sterowania produkcją.

Optymalizowanie programów obróbkowych [3],[6-8],[10-13],[22-23],[26] stanowi integralną część większości programów CAM. Efektem technologicznego przygotowania produkcji ma być proces technologiczny gwarantujący jak najniższe

¹ Instytut Technik Wytwarzania na Wydziale Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej

koszty, z jednoczesnym spełnieniem stawianych wymagań dokładności geometrycznej obróbki i właściwości warstwy wierzchniej obrabianych powierzchni. Symulowanie procesów technologicznych, operacji i zabiegów technologicznych pozwala na ocenę poprawności programu obróbkowego oraz przewidywanie efektów obróbki. Symulacja programu obróbkowego w wirtualnym środowisku informatycznym, dla wybranej obrabiarki i układu sterowania, to obróbka wirtualna (*ang. Virtual Machining*). Różnorodność zakładów produkcyjnych powoduje, że zastosowanie rozwiązania CAX polega nie tylko na zakupie programu/systemu, ale także na dopasowaniu do indywidualnych potrzeb i wymagań danego odbiorcy. Wymagania i oczekiwania ze strony przemysłu można podzielić na dwa równoważne obszary. Jeden to wymagania wdrożeniowe w zakresie określenia przydatności danego rozwiązania. Drugi obszar to konkretne i ściśle określone wymagania związane z merytorycznym wykorzystaniem. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie wybranych wymagań ze strony przemysłu.

Tabela 1. Wymagania stawiane programom i systemom CAM przez zakłady przemysłowe
Table 1. Requirements put for programs and systems CAM by an industrial companies

Wymagania wdrożeniowe	Wymagania techniczne
<ul style="list-style-type: none"> • Koszt zakupu i wdrożenia. • Czy dany program/system jest już stosowany w innych zakładach z tej samej branży? • Jeżeli tak to jak jest oceniany? • Ocena dostawcy (profesjonalizm w udzielaniu informacji, obsługa i wsparcie techniczne). • Możliwość testowania wersji demonstracyjnej. • Szkolenia (w Polsce, za granicą, koszt). • Rekomendacje innych użytkowników. • Wsparcie po wdrożeniu. 	<ul style="list-style-type: none"> • Liczba funkcji (np. weryfikacja, optymalizacja, obsługa sond pomiarowych, budowanie wirtualnych obrabiarek), • Funkcjonalność użytkowa, w tym obsługa programu – interfejs użytkownika. • Symulacja obróbki z użyciem kodów NC. • Asocjatywność programu/systemu CAM z programem/systemem CAD. • Liczba obsługiwanych osi. • Modelowanie 3D, 2D. • Pełne wykrywanie kolizji narzędzia, oprzyrządowania technologicznego, przedmiotu obrabianego. • Zarządzanie przeszkodami. • Optymalizacja programów obróbkowych. • Symulacja 3D. • Symulacja kinematycznych ruchów obrabiarki. • Definiowanie dowolnych najazdów i odjazdów. • Projektowanie narzędzi. • Wsparcie podprogramów. • Synteza postprocesorów do obrabiarek. • Synteza modeli obrabiarek. • Obróbka HSC.

Wymagania wdrożeniowe mają na celu przeprowadzenie testów, praktyczne zweryfikowanie efektów działania programu/systemu w warunkach produkcyjnych poprzez zestawianie porównawcze i analizę efektywności oraz ocenę obsługi i wsparcia ze strony dostawcy.

Wymagania techniczne dotyczą bezpośrednio zagadnień technologicznego przygotowania produkcji. Określają szczegółowo zakres zastosowania programu/systemu. Rozwój zarówno samego zakładu, jak i technik wytwarzania wymaga, by CAx dla obróbki wirtualnej cechował się znaczną elastycznością.

2. OBRÓBKA WIRTUALNA

Obróbka wirtualna to komputerowa symulacja programu obróbkowego z wykorzystaniem modeli (rys. 1): półfabrykatu, obrabiarki, uchwytu obróbkowego, narzędzi.

Celami stosowania obróbki wirtualnej są:

- zmniejszenie kosztów wdrożenia procesu technologicznego,
- skrócenie czasu technologicznego przygotowania produkcji (zmniejszenie kosztów),
- optymalizacja programu obróbkowego,
- przewidywanie efektów obróbki.

Współczesny charakter produkcji to produkcja małoseryjna, jednostkowa, a zatem wymagająca elastyczności na etapie technologicznego przygotowania produkcji. Analiza procesów technologicznych ma charakter wieloczynnikowy i wymaga stosowania CAx ze względu na złożoność zagadnień, ilość danych i ich wzajemne korelacje.

Model wirtualnego stanowiska obróbkowego powinien jak najwierniej odzwierciedlać stan rzeczywisty. Symulacyjna analiza obróbki powinna zatem uwzględniać [4],[9-10],[12-13],[20], [25]:

- materiał obrabiany,
- materiał narzędziowy,
- geometrię ostrza,
- parametry obróbkowe,
- przebieg ścieżki narzędzia,
- obrabiarkę,
- układ sterowania,
- uchwyt obróbkowy.

Współczesne rozwiązania komercyjne, m.in. Mastercam, CATIA, SolidCAM, Esprit, NCSimul, NX CAM Express umożliwiają przeprowadzenie symulacji obróbki na poziomie modelu geometrycznego. Pozwala to na wstępne oszacowanie poprawności ścieżki narzędzia i analizę kolizyjności.

Model obrabiarki powinien spełniać wymagania zgodności w obszarze parametrów geometrycznych danej obrabiarki. Podobna kwestia dotyczy modelowania przedmiotu obrabianego, który powinien odzwierciedlać pod względem

geometrycznym rzeczywisty przedmiot obrabiany. Model procesu obróbkowego dotyczy parametrów obróbkowych, ścieżki narzędzia, a w konsekwencji związany jest także z kinematyką obrabiarki i układem sterowania. Model obrabiarki powinien jak najwierniej odzwierciedlać kinematykę danej obrabiarki.

Modelowanie polega na stosowaniu uproszczeń i założeń w celu umożliwienia przeprowadzenia symulacji komputerowej. Wymagania przemysłu lotniczego, samochodowego, energetycznego, a także elektronicznego wskazują na potrzebę uwzględniania zjawisk dynamicznych w modelowaniu procesu obróbkowego. Proces skrawania jest procesem złożonym, dla symulacji którego wykorzystanie wyłącznie zależności geometrycznych jest niewystarczające. Zjawiska dynamiczne m.in. drgania samowzbudne, naprężenia termiczne, pęd odgrywają współcześnie zasadniczą rolę w obróbce skrawaniem [1],[18],[21],[24]. Zjawiska dynamiczne i ich opis matematyczny to złożone zagadnienia, stanowiące ważny i aktualny obszar prac badawczo-rozwojowych.

Modelowanie na potrzeby obróbki wirtualnej, jak i w innych dziedzinach, wiąże się z uproszczeniami. Uproszczenia i założenia pozwalają na podjęcie zagadnienia od strony matematycznej. Na rys.1 przedstawiono tzw. piramidę stopnia uszczegółowienia modelu na potrzeby obróbki wirtualnej. Opracowywane modele w środowisku obróbki wirtualnej są coraz bardziej uszczegóławiane. Uwzględniane są przede wszystkim czynniki dynamiczne, jak np. wpływ łożyskowania wrzeciona, drgania podczas obróbki itp.

Przyjmowane założenia nierzadko powodują, że dany model jest zasadny wyłącznie w określonych uwarunkowaniach, co wyklucza jego uniwersalne zastosowanie. Punkt PD (docelowy) to taki stan opisu modelu, iż odpowiada on w pełni stanowi rzeczywistemu. Osiągnięcie pełnej zgodności modelu z układem rzeczywistym nie jest możliwe. Powodem tego są trudności w uwzględnianiu zjawisk dynamicznych. Programy i systemy CAM można podzielić na takie, które:

- nie uwzględniają zjawisk dynamicznych,
- asocjatywne z innymi programami.



Rys. 1. Stopień szczegółowości modeli dla potrzeb obróbki wirtualnej. Modele uwzględniane w obróbce wirtualnej

Fig. 1. Degree of the accuracy of models for needs of virtual machining. Models including in virtual machining

Nie funkcjonuje jeden model wirtualnego środowiska obróbkowego pozwalający na skuteczną analizę różnych zabiegów technologicznych. Różne modele sprawdzają się, czy wydają się sprawdzać dla różnych rodzajów zabiegów obróbki skrawaniem. Nie istnieje program lub system CAM, który zapewnia pełną analizę dynamiczną, uwzględniającą wszystkie aspekty. Z tego powodu oraz ze względu na liczbę instalacji komercyjnych programów i systemów CAM rozwój programów asocjatywnych, (np. AdvantEdge FEM czy Production Module) jest kontynuowany [15-19]. Istnieją metody pozwalające na przewidywanie stanu warstwy wierzchniej powierzchni po obróbce [2-3]. Ich ograniczenie stanowi konieczność oddzielnego podejścia do każdego rodzaju obróbki skrawaniem.

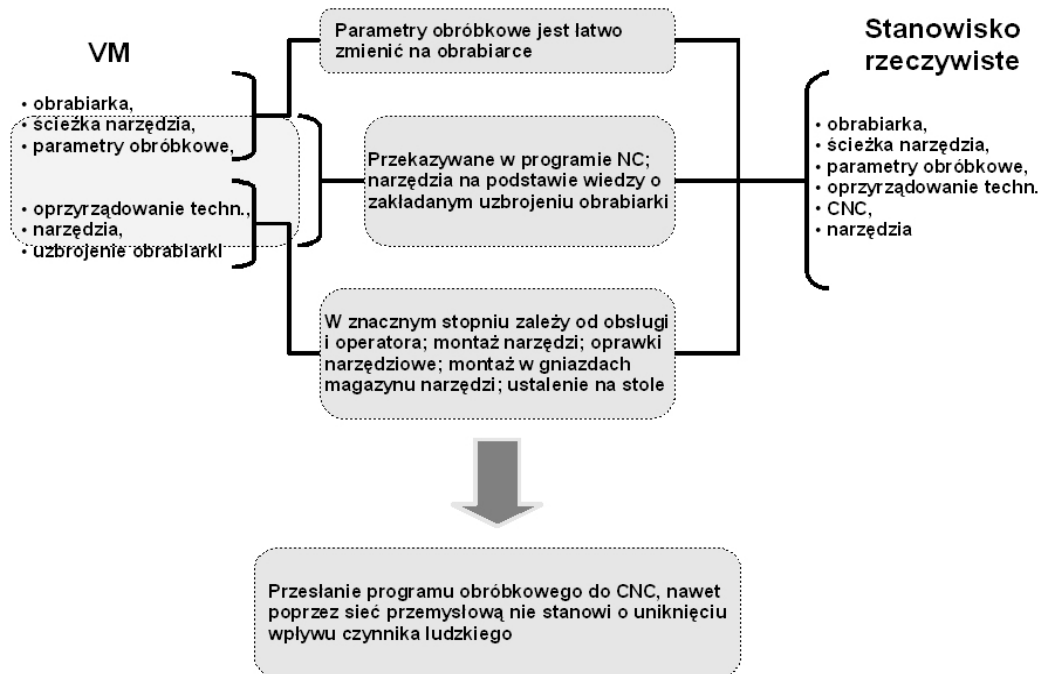
Innym rozwiązaniem, które pozwala na podwyższenie efektywności rozwiązań CAM są systemy dostarczane przez producenta wraz z obrabiarką np. ViMill. Pozwala to na pełny dostęp do danych obrabiarki. Proces doskonalenia zarówno konstrukcji obrabiarki i układu sterowania, a także samego systemu CAM następuje na zasadach współpracy. Dzięki temu produkt finalny cechuje się wysokim stopniem asocjatywności, co z kolei sprzyja efektywniejszej analizie symulacyjnej procesu obróbkowego [27]. W przypadku zadań technologicznych wymagających zastosowania większej liczby osi (4, 5 osi pełnych, nieindeksowanych) program/system CAM powinien umożliwiać symulację obróbki wraz z kinematyką obrabiarki. Optymalne rozwiązanie polega na przeprowadzeniu symulacji obróbki z użyciem pełnego modelu układu OUPN na podstawie kodów NC.

Przeprowadzenie symulacji programu obróbkowego wymaga jego opracowania. Obecnie konieczne jest także opracowanie właściwego postprocesora, który generuje kod NC dla wskazanej obrabiarki, z danym układem sterowania, na podstawie danych z CAM. Postprocesor jest jednym z elementów w łańcuchu przesyłu danych. Programy obróbkowe w formie kodów NC w wyniku niedoskonałości samego postprocesora mogą odbiegać od programu obróbkowego w programie/systemie CAM. Stąd wymagane jest by symulacyjna weryfikacja programu obróbkowego wykorzystywała kody NC, jako te, które są kierowane bezpośrednio do układu sterowania obrabiarki CNC. Komplet modeli oraz postprocesor umożliwiają przeprowadzenie symulacji programu obróbkowego i ocenę jego poprawności.

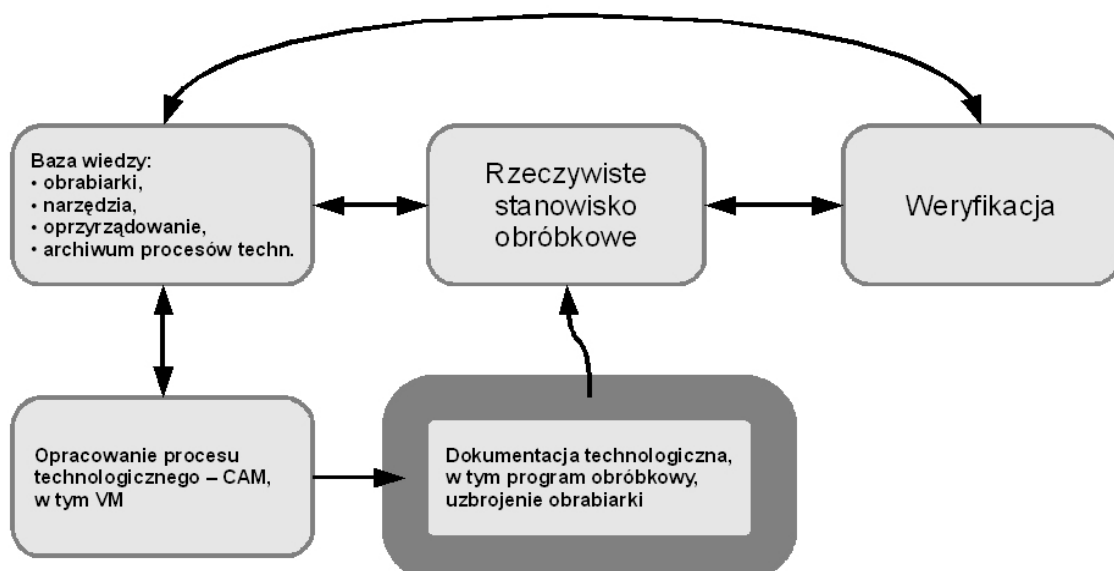
Obróbki szybkościowe (*ang. HSM – High Speed Machining*) i pokrewne, optymalizacja programów obróbkowych to źródła modyfikacji parametrów obróbkowych. Konsekwencją jest konieczność analizy procesu skrawania na coraz to dokładniejszym i szczegółowym poziomie. Podwyższanie parametrów obróbkowych wymaga analizy stabilności obróbki w kontekście zjawisk dynamicznych np. drgań samowzbudnych. Obecnie tego typu prace mają przede wszystkim charakter badawczy i nie funkcjonują w komercyjnych programach i systemach CAM.

Inną, równie istotną kwestią, jest osiągnięcie zgodności modeli w obróbce wirtualnej z rzeczywistym stanowiskiem obróbkowym. Rzeczywiste ustawienia narzędzi muszą odpowiadać tym zastosowanym w obróbce wirtualnej w symulacji obróbki, nie tylko z powodu np. analizy i zaleceń w celu uniknięcia drgań samowzbudnych, ale także ze względu na uniknięcie kolizji oprawki narzędziowej z przedmiotem obrabianym, elementami obrabiarki i oprzyrządowania

technologicznego. Wymusza to na operatorach/ustawiaczach szczególną dyscyplinę. Może to pośrednio prowadzić do wydłużenia czasu przygotowawczo-zakończeniowego. Na rys. 2 przedstawiono zagrożenia danych w ich obiegu w ramach obróbki wirtualnej (rys. 3).



Rys. 2. Zagrożenia danych w obróbce wirtualnej
Fig. 2. Threats of data in virtual processing



Rys. 3. Uogólniony schemat przepływu informacji na etapie technologicznego przygotowania produkcji z wykorzystaniem środowiska obróbki wirtualnej
Fig. 3. Generalized scheme of the flow of information on the stage of technological preparing the production with the application with using virtual machining

Istnieje możliwość częściowego zastosowania analizy dynamicznej poprzez wsparcie w doborze parametrów obróbkowych w obszarze obróbki stabilnej. Konieczne jest jednak zebranie charakterystyk dynamicznych obrabiarki z konkretnym narzędziem w ściśle ustalonej konfiguracji. Zatem tego typu działania należałoby powtarzać dla każdej, nawet z pozoru bez znaczenia, zmiany w konfiguracji narzędzia (np. zmiana długości frezu mierzona od oprawki).

Określanie charakterystyk dynamicznych obrabiarki należy do działań wieloczynnikowych i niekoniecznie zapewniających powtarzalność wyników [1],[18] [21],[24]. Czas pracy obrabiarki, warunki termiczne pracy obrabiarki, posadowienie obrabiarki, czynniki zewnętrzne (np. bliskość linii tramwajowej), stan techniczny samej obrabiarki – to tylko część czynników wpływających na jej właściwości dynamiczne. Wdrożenie zaleceń w zakresie modyfikacji parametrów obróbkowych w kontekście stabilności obróbki może być również utrudnione (np. tolerancja wartości prędkości obrotowej napędu głównego).

3. ŚRODOWISKO CAM DLA OBRÓBKI WIRTUALNEJ

Podczas roboczych spotkań partnerów przemysłowych i przedstawicieli Politechniki Warszawskiej wymieniane były następujące programy/systemy CAM [28-30]: NC SIMUL, VERICUT, IMS.

NC SIMUL umożliwia przeprowadzanie analizy programu NC (struktura programu, zmienne, wywołania makr). Na bieżąco uzupełniane są dane dotyczące układów sterowania CNC. Możliwe jest wprowadzanie zmian bezpośrednio w kodzie programu NC. Dostępne są wszystkie rodzaje obróbki skrawaniem, których efekt można analizować na pełnym modelu półfabrykatu. Program oferuje pełną analizę kolizji i przeszkód. NC SIMUL umożliwia użytkownikowi przeprowadzenie analizy geometrycznej obrobionego przedmiotu wraz z porównaniem z modelem CAD komponentu (2D, 3D).

VERICUT – CNC umożliwia przeprowadzenie analiz symulacyjnych obrabiarki, optymalizację prędkości frezowania, weryfikację programu obróbkowego. VERICUT akceptuje kody G oraz formaty CAM. W programie VERICUT wyróżnia się 15 różnego rodzaju modułów tematycznych.

IMS to rodzina programów/modułów umożliwiająca przeprowadzenie symulacji obróbki. Funkcjonalność programów rodziny IMS jest bardzo zbliżona do VERICUT i NC SIMUL. Zaletą IMS jest program IMS Post służący do syntezy postprocesorów oraz asocjatywność z CATIA V5. W tabeli 2 przedstawiono zestawienie programów CAM weryfikowanych na potrzeby partnerów przemysłowych.

Program VERICUT uzyskał najlepszą rekomendację. To program weryfikujący, optymalizujący i symulujący pracę obrabiarki CNC. Ponadto optymalizuje programy NC skracając czas i dając wyższą jakość obrabianej powierzchni. VERICUT symuluje wszystkie rodzaje obrabiarek CNC (m.in. producentów: Mazak, Matsuura, Hermle, DMG, DIXI, Mori Seiki i Chiron). Jest programem samodzielnym, ale może być

zintegrowany z systemami typu CAM takimi jak CATIA V5, Unigraphics, PTC, MasterCAM i EdgeCAM.

Programy CAM są uzupełniane programami CAE (ang. Computer Aided Engineering). Dzięki asocjatywności takie programy współpracują z programami i systemami CAM. AdvantEdge FEM (ang. Finite Element Method) jest programem z rodziny CAE (ang. Computer Aided Engineering) dla optymalizacji obróbki metali i ich stopów. Oprogramowanie to przeznaczone jest inżynierów, technologów, konstruktorów narzędzi skrawających w celu modelowania procesów obróbkowych dla układu narzędzie-przedmiot obrabiany, umożliwiając ich optymalizację.

Tabela 2. Programy CAM preferowane przez przemysł
Table 2. The CAM programmes preferred by industry

Wymagania weryfikacyjne:	Vericut	NCSimul	IMS
Stosowane w korporacjach lotniczych w Polsce	+		
Rekomendacje użytkowników	+	+	
Modelowanie 3D, 2D	+	+	+
Pełne wykrywanie kolizji narzędzia, oprzyrządowania technologicznego, przedmiotu obrabianego	+	+	+
Optymalizacja programów obróbkowych	+	+	
Symulacja 3D	+	+	+
Symulacja kinematycznych ruchów obrabiarki	+	+	+
Projektowanie narzędzi	+	+	+
Synteza postprocesorów do obrabiarek			+
Synteza modeli obrabiarek	+	+	+
Obróbka HSC	bd.	bd.	bd.
Asocjatywność z CATIA v5 R20	+		+
Analiza wymiarowa (geometryczna) przedmiotu obrabianego	+	+	+
Weryfikacja programów obróbkowych	+	+	+
Symulacja zastosowania sondy pomiarowej	+	+	
Wykorzystanie kodów NC w symulacji obróbki	+	+	+

Kryteria optymalizacji mogą być różne:

- wydłużenie okresu trwałości narzędzia,
- zwiększenie wydajności obróbki (HPM),
- zmniejszenie liczby obróbek wstępnych na etapie wdrożenia produkcji i testowania programów obróbkowych,
- skrócenie czasu potrzebnego na technologiczne przygotowanie produkcji.

AdvantEdge FEM [15-19] pozwala na symulacyjną analizę zjawisk termicznych naprężeń oraz formowania się wiórów w celu przewidywania przebiegu zużywania się narzędzia oraz efektów obróbki. Użytkownik może we własnym zakresie opisać narzędzie, zarówno standardowe jak i specjalne. Biblioteka materiałów obrabianych posiada ponad 130 różnych pozycji i jest nadal rozwijana. W tym obszarze użytkownik również może wprowadzać nowe materiały do bazy danych.

Do danych wyjściowych zalicza się wykresy: sił, momentu, mocy, temperatury, naprężeń oraz odkształcenie (ugięcie) narzędzia podczas obróbki.

Production Module [15-19] jest programem do optymalizacji programów obróbkowych (NC) integrującym:

- modele budowane w oparciu o właściwości fizyczne materiałów,
- CAD/CAM (dane wejściowe),
- geometrię narzędzia,
- geometrię przedmiotu obrabianego,
- właściwości dynamiczne obrabiarki.

Program współpracuje asocjatywnie z takimi programami i systemami jak: MetalMAX™, VERICUT®, NX®, CATIA®, ESPRIT®.

Optymalizacja programu obróbkowego skutkuje zmienionymi parametrami obróbkowymi (posuwami oraz prędkościami). Obróbka danych uwzględnia siły skrawania, termikę procesu, moc wrzeczona (napędu głównego), załączenie narzędzia, analizę stabilności, odchylenie, odkształcenie. Uwzględniana jest korelacja pomiędzy obciążeniem obróbki i pozycją narzędzia wobec ścieżki narzędzia.

Production Module wykorzystuje efekty obliczeń MES w ramach AdvantEdge FEM w celu określenia rozkładu sił wzdłuż ścieżki narzędzia. Program ten służy przede wszystkim do optymalizacji programów obróbkowych NC poprzez modyfikację posuwu wzdłuż ścieżki narzędzia, z zachowaniem stałej wartości siły skrawania. Program ten może przewidywać odkształcenia przedmiotu obrabianego i odchylenia narzędzia. Możliwe jest przeprowadzenie optymalizacji danego zadania technologicznego dla różnych zadeklarowanych ścieżek narzędzia, a następnie ich porównanie. Jednak Production Module nie jest programem symulacyjnym. W toku przeprowadzanych optymalizacji nie są uwzględniane modele wirtualne obrabiarek, uchwytów, oprawek narzędziowych - w konsekwencji nie można przeprowadzić analizy kolizyjności.

Program CAM ViMill [27] jest przykładem CAM dostarczanym wraz z obrabiarką przez jednego, tego samego, wytwórcę obrabiarek do obróbki wykańczającej. Takie podejście cechuje się wysokim stopniem integracji układu sterowania i zastosowanej konstrukcji. Program jest przeznaczony do opracowania programu obróbkowego i przeprowadzania jego pełnej symulacji obróbki w trybie off-line, przed rzeczywistym uruchomieniem. Możliwa jest pełna geometryczna analiza kolizyjności. Weryfikacji podlega każdy etap obróbki, w tym także cykle obróbkowe. Integracja ViMill z układami sterowania Fidia CNC pozwala na ujednorodnienie danych i wykorzystywanie danych zgromadzonych co do formy, architektury danych oraz wartości w układzie sterowania obrabiarki. Pozwala to na porównanie danych (narzędzi, parametrów obróbkowych, korekcji) ze zgromadzonymi

w rzeczywistym układzie sterowania, a przede wszystkim dopasowanie modelu UOPN w ViMill do realnego stanowiska obróbkowego.

Podsumowując, ViMill umożliwia:

- weryfikację ścieżki narzędzia,
- szybką symulację obróbki,
- ręczne wprowadzanie danych co pozwala na dopasowanie modelu do warunków rzeczywistych,
- weryfikację - wstępne przewidywanie efektów obróbki.

4. WNIOSKI

1. Dokładność geometryczna to obecnie nadal podstawowy obszar weryfikacyjny programu obróbkowego. Rozwój technologiczny wymusza uwzględnianie oddziaływań dynamicznych i tym samym postęp w ich modelowaniu.
2. Ze względu na złożoność zjawisk oddziaływań dynamicznych, w tym drgań, trudno przewidywać opracowanie kompleksowego i zunifikowanego podejścia do analizy dynamiki w ramach CAM i CAE.
3. Symulacja programu obróbkowego powinna być przeprowadzana z wykorzystaniem kodów NC (postprocesor odwrotny). Stosowanie pośrednich metod podwyższa prawdopodobieństwo wystąpienia przekłamań i obniża pewność efektów symulacji. Samo wykorzystanie kodów NC nie zapewnia jednak pewności efektów symulacji.
4. Model procesu obróbkowego dotyczy parametrów obróbkowych, ścieżki narzędzia, a więc związany jest także z kinematyką obrabiarki i układem sterowania. Model obrabiarki powinien jak najwierniej odzwierciedlać kinematykę danej obrabiarki.
5. Ważną kwestią jest korelacja między modelami wirtualnymi a rzeczywistym stanowiskiem obróbkowym. Rzeczywiste ustawienia narzędzi muszą odpowiadać tym zastosowanym w obróbce wirtualnej (analiza kolizyjności, stabilność obróbki, uzbrojenie obrabiarki). Usystematyzowanie, ujęcie czynności przygotowawczo-zakończeniowych w ramy proceduralne wydaje się koniecznością. Wdrożenie środowiska obróbki wirtualnej i jej efektywne wykorzystanie zależy od: zapewnienia korelacji między modelami w środowisku wirtualnym a rzeczywistym UOPN.
6. Programy CAM wykorzystujące wybrane zjawiska dynamiczne w procesie skrawania do analizy poprawności programu obróbkowego należą do mniejszości. Stanowią dodatki, uzupełniają się nawzajem.
7. Kierunki i obszary rozwoju obróbki wirtualnej to [12]: opracowywanie poszczególnych modeli w środowisku wirtualnym (zależności geometryczne, matematyka), narzędzia informatyczne, oddziaływania dynamiczne, wizualizacja, rzeczywistość wirtualna, przewidywanie efektów obróbki (dokładność, warstwa wierzchnia).

Badania realizowane w ramach projektu celowego 6 ZR8 2009 C/07200 „Opracowanie i wdrożenie systemu projektowania technologii obróbki ubytkowej komponentów silników turbinowych z zastosowaniem wspomaganie komputerowego” zrealizowanego wraz z Wytwórnią Sprzętu Komunikacyjnego „PZL-Rzeszów”

LITERATURA

- [1] AGAPIOU J. S. A., 2005, *Methodology to Measure Joint Stiffness Parameters for Toolholder-Spindle Interfaces*, Journal of Manufacturing Systems, 24/1, 13-20.
- [2] AL-AHMARI A. M. A., 2007, *Predictive machinability models for a selected hard material in turning operations*, Journal of Materials Processing Technology, 190, 305-311.
- [3] BAEK D. K., KO T. J., KIM H. S., 2001, *Optimization of feed rate in a face milling operation using a surface roughness model*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41, 451-462
- [4] BOYLE I., RONG Y., BROWN D. C., 2011, *A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 27, 1-12.
- [5] *Futur Vision Innovation Realisation*, 2007, Research and Development at the Production Technology Center, Berlin.
- [6] DAVIM J. P., ANTONIO C. A. C., 2001, *Optimization of cutting conditions in machining of aluminium matrix composites using a numerical and experimental model*, Journal of Materials Processing Technology, 112, 78-82.
- [7] DONG J. Y., FERRERA P. M., STORI J. A., 2007, *Feed-rate optimization with jerk constraints for generating minimum-time trajectories*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47, 1941-1955.
- [8] FENG H. Y., SU N., 2000, *Integrated tool path and feed rate optimization for the finishing machining of 3D plane surfaces*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40, 1557-1572.
- [9] GAOLIANG P., GONDONG W., WENJIAN L., HAIQUAN Y., 2010, *A desktop virtual reality-based interactive modular fixture configuration design system*, Computer-Aided Design, 42, 432-444.
- [10] GARUD S., MARUSICH T., USUI S., ZAMORANO L., MALUSICH K., 2009, *Improved Titanium Machining: Modeling and Analysis of 5-Axis Tool Paths via Physics-Based Methods*, SAE International.
- [11] KRAJNIK P., KOPAČ J., 2004, *Modern machining of die and mold tools*, Journal of Materials Processing Technology, 543-552
- [12] KADIR A. A., XU X., HÄMMERLE E., 2010, *Virtual machine tools and virtual machining – A technological review*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.
- [13] LI J.G., ZHAO H., YAO Y. X., LIU C. Q., 2008, *Off-line optimization on NC machining based on virtual machining*, International Journal of Advanced Manufacturing and Technology, 36, 908-917.
- [14] IMAI M., KAZEIN G., 2006, *Zdroworozsądkowe, niskokosztowe podejście do zarządzania*, MT Biznes Sp. z o.o.
- [15] MARUSICH T. D., ASKARI E., *Modeling Residual Stress and Workpiece Quality in Machined Surfaces*, Third Wave Systems.
- [16] MARUSICH T. D., STEPHENSON D. A., USUI S., LANKALAPALLI S., *Modeling Capabilities for Part Distortion Management for Machined Components*, Third Wave Systems.
- [17] MARUSICH T. D., 2001, *Effects of Friction and Cutting Speed on Cutting Force*, Third Wave Systems.
- [18] MARUSICH T. D., USUI S., LANKALAPALLI S., SAINI N., ZAMORANO L., GREVSTAD A., 2006, *Residual Stress Prediction for Part Distortion Modeling*, Third Wave Systems, SAE International.
- [19] MARUSICH T. D., USUI S., MA J., STEPHENSON D. A., *Finite Element Modeling of Drilling Processes with Solid and Indexable Tooling in Metals and Stack-ups*, Third Wave Systems.
- [20] PENG G., CHEN G., WU C., XIN H., JIANG Y., 2011, *Applying RBR and CBR to develop a VR based integrated system for machining fixture design*, Expert Systems with Applications, 38, 26-38.
- [21] PITTALÀ G. M., MONNO M., 2011, *A new approach to the prediction of temperature of the workpiece of face milling operations of Ti-6Al-4V*, Applied Thermal Engineering, 31, 173-180.
- [22] SEREMAK A., 2007, *TrueMill – optymalne wykorzystanie możliwości CNC*, Design News, 3, 22, 38-39.
- [23] TIMAR S. D., FAROUKI R. T., 2007, *Time-optimal traversal of curved paths by Cartesian CNC machines under both constant and speed-dependent axis acceleration bounds*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 23, 517-532.

- [24] ZHANG G. P., HUANG Y. M., SHI W. H., FU W. P., 2003, *Predicting dynamic behaviours of a whole machine tool structure based on computer-aided engineering*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43, 699–706.
- [25] ZHANG X., TSANG W. M., MORI M., YAMAZAKI K., 2010, *Automatic 3D model reconstruction of cutting tools from a single camera*, Computers in Industry, 61, 711-726.
- [26] ZALEWSKI A., 2005, *Wybrane zagadnienia CAM – optymalizacja posuwów w obróbce skrawaniem*, seminarium naukowe ITM w dn. 07.04.2005.
- [27] Fidia, ViMill - materiały handlowe, 2011.
- [28] Materiały handlowe NCSimul, 2011.
- [29] Materiały handlowe Vericut, 2011.
- [30] Materiały handlowe IMS, 2011.

VERIFICATION THROUGH THE SIMULATION OF THE MACHINING PROGRAM

The competitiveness requires the innovation in the cost cutting and increasing technological fit nesses of the plant. Verification through the simulation machining program consists in his analysis in the virtual computing environment with the use of models of machine tool, control system, technological equipment. A verification of the correctness of the machining program, that is minimizing costs associated with implementing the technological process are a purpose. Designing geometric models up in our times still is the subject of the research. Taking into account the accuracy of geometrical machining, the tolerance of dimensions of the semi-finished product, as well as dynamic influences is complicated and multifactorial research area which is regarding widely understood technological preparing the production. A complementary CAx environment which enables full geometrical and dynamic analysis of technological operation does not exist. Commercial answers are being used the CAM and CAE programs supplementing them. in spite of many problems virtual machining (VM) constitutes the current area of interest on the part of the industry on account of its advantages. The paper presents the requirements which should meet a machine tool, workpiece and machining process. Moreover the environment for virtual machining has been characterized, on example of selected CAM and CAE systems.