

Optimisation methods for programming CNC machine tools

Metody optymalizacji programowania obrabiarek CNC

ADAM ZALEWSKI
WIT GRZESIK
KRZYSZTOF JAROSZ*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2024.8-9.16>

This paper presents some important methods of optimisation of CNC programming which covers: algorithms of feed changes along the path of tool movement, the concept of feature-based recognition machining (FBM), numerical simulation (FEM/FEA), advanced virtual modelling of machining systems, real-time process simulations with the use of digital twins (DTs) and intelligent control strategies based on the STEP-NC standards. Select examples of practical industrial applications are overviewed and future development trends are discussed.

KEYWORDS: CNC machine tool, control program, feed optimisation, numerical simulation, virtual simulation, STEP-NC interface

W artykule przedstawiono ważne metody optymalizacji programowania obrabiarek CNC obejmujące: algorytmy zmiany posuwu wzdłuż trajektorii ruchu narzędzia, koncepcję rozpoznawania cech przedmiotu (FBM), symulację numeryczną MES, zaawansowane modelowanie wirtualne systemu obróbkowego, symulację procesu w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem techniki bliźniaka cyfrowego oraz inteligentne sterowanie na bazie interfejsu STEP-NC. Podano przykłady praktyczne stosowane w różnych pakietach CAD/CAM i omówiono kierunki dalszego rozwoju.

SŁOWA KLUCZOWE: obrabiarka CNC, program sterujący, optymalizacja posuwu, symulacja numeryczna, symulacja wirtualna, interfejs STEP-NC

Wprowadzenie

Kluczem do zrozumienia istoty zadań optymalizacyjnych w programowaniu obrabiarek CNC jest analiza prowadzonych w ostatniej dekadzie prac badawczo-rozwojowych i wdrożeniowych nad inteligentnymi obrabiarkami (IMT – *intelligent machine tool*). Ich głównym celem jest osiągnięcie zaawansowanego stopnia wirtualizacji modelowania i programowania oraz związanych z nim przetwarzania i analizy informacji wykorzystywanych do podejmowania decyzji w zakresie działań optymalizujących proces obróbki i monitorujących. To pierwsze zadanie optymalizacyjne dotyczy więc *stricte* programowania procesów obróbkowych prowadzonych na obrabiarkach CNC o różnym stopniu inteligencji.

Na rys. 1 – przedstawiającym przyszłościową strukturę inteligentnej obrabiarki, którą opracowali badacze japońscy już ok. 20 lat temu – widać, że najbardziej rozwinięte nie tylko w sensie doboru optymalnej trajektorii ruchu, ale także optymalnych warunków technologicznych, które z kolei decydują o wydajności i jakości procesu obróbki, jest sterowanie ruchem narzędzia. Na najwyższym poziomie usytuowano sterowanie adaptacyjne (AC) i nadzorowanie niezbędne do inteligentnego monitorowania procesu obróbki. Jego zadaniem jest wykrywanie bieżącego stanu obróbki niezależnie od warunków skrawania i rodzaju realizowanej operacji. Do tego konieczne jest opracowanie efektywnego sprzężenia zwrotnego w przepływie informacji odnośnie do uzyskanych wyników procesu (również na podstawie pomiarów obrabianej części) oraz ich ewaluacji.

Dodatkowym warunkiem funkcjonalności IMT jest wdrożenie strategii autonomicznego planowania procesu jako jednej z funkcji, co gwarantuje generowanie elastycznego i adaptacyjnego planu/programu obróbki (marszrutę technologiczną). To zadanie można zrealizować przez wprowadzenie kilku funkcji w zakresie planowania procesu i przetwarzania informacji, takich jak: planowanie operacyjne, dobór narzędzi skrawających, wyznaczenie parametrów skrawania i generowanie ścieżki ruchu narzędzia dla każdej operacji obróbki. W kontekście przetwarzania informacji bierze się pod uwagę wyniki analizy danych produktu i rozpoznawanie cech skrawania, które są przedmiotem koncepcji FBM (*feature-based machining*) [2].

Kluczowe techniki	Koncepcja	>>>> Potwierdzenie >>>>	Praktyka
Sterowanie ruchem	→	→	→
Sterowanie adaptacyjne	→	→	→
Sterowanie procesem i jakością	→	→	→
Monitorowanie	→	→	→
Inteligentne monitorowanie	→	→	→
Koncepcja otwartej architektury	→	→	→
Planowanie procesu	→	→	→
Planowanie operacji	→	→	→
Wykorzystanie <i>know-how</i>	→	→	→
Uczenie <i>know-how</i>	→	→	→
Komunikacja sieciowa	→	→	→
Obliczenia rozproszone	→	→	→

Fig. 1. Key techniques influencing the development of IMTs [1–3]
Rys. 1. Kluczowe techniki wpływające na rozwój IMT [1–3]

* Dr inż. Adam Zalewski – adam.zalewski@pw.edu.pl – Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska
Prof. dr hab. inż. Wit Grzesik – wit.grzesik@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3898-5119> – Opole, Polska
PhD Candidate Krzysztof Jarosz – Rochester Institute of Technology, USA

Kluczowe techniki zestawione w formie diagramu na rys. 1 omówiono w [3]. W koncepcji „obrabiarki 4.0” korzysta się z informacyjnych technologii wspomagających, takich jak: systemy cyberfizyczne (*cyber-physical systems*) oraz internet rzeczy (IoT – *Internet of Things*) [3, 7, 14], które zwiększają zdolność do gromadzenia informacji i wykorzystania ich w nowych warunkach procesu oraz operacjach obróbkowych.

W zaawansowanych, inteligentnych obrabiarkach stosuje się dwustopniowe przetwarzanie informacji. Obejmuje ono ścisłą współpracę obliczeń brzegowych (*edge computing*) i obliczeń w chmurze wirtualnej (*cloud computing*) – jako synonimy stosuje się także terminy: „przetwarzanie brzegowe” i „przetwarzanie w chmurze” [4]. W ten sposób tworzy się nową architekturę IMT oznaczoną akronimem IMT-ECC (*intelligent machine tool edge-cloud collaboration*), jak przedstawiono schematycznie na rys. 2. Cały system informacyjny w obrabiarence IMT-ECC składa się z trzech warstw: akwizycji danych, komunikacji sieciowej i modułu ECC.

Przykład praktycznej realizacji współpracy informacyjnej w obrabiarence CNC przedstawiono na rys. 2. Dane o stanie obrabiarki otrzymuje się z licznych wbudowanych sensorów, m.in.: przemieszczenia, wyłączników krańcowych, czujników prądu i napięcia. Dane zebrane przez te sensory są pozyskiwane ze sterownika CNC obrabiarki. Instaluje się dodatkowe sensory, m.in.: temperatury, AE, akcelerometry piezoelektryczne, które pozwalają na rozszerzenie informacji o stanie obrabiarki na podstawie przetwarzania danych. Z kolei do tego celu instaluje się platformy przetwarzania brzegowego (blisko obrabiarki) i (dalej) chmurowego. Dane są w tym samym czasie wstępnie przetwarzane na platformie obliczeń brzegowych typu EdgeX Foundry IoT i następnie transmitowane do platformy obliczeń w chmurze. Wyświetlanie zebranych danych odbywa się z użyciem interfejsu HMI.

Należy podkreślić, że w inteligentnej obrabiarence o architekturze IMT-ECC gromadzenie i przetwarzanie danych w chmurze ma optymalizować algorytmy modeli wirtualnych [3], podczas gdy przetwarzanie

brzegowe spełnia funkcję fuzji, wstępnego przetwarzania danych źródłowych i analizy przesyłanych danych o stanie obrabiarki jako odpowiedź w pętli sprzężenia zwrotnego w czasie rzeczywistym. W ten sposób inteligencja obrabiarki, a przez to również efektywność programowania, zwiększa się w rezultacie współpracy systemów ECC na poziomie danych, informacji i wiedzy.

Zasady optymalizacji posuwu w programach CAD/CAM

Obrabiarka CNC pracuje zgodnie z programem CNC. Parametry realizacji procesu opisane w programie CNC (takie jak posuw i prędkość obrotowa wrzeciona) mogą być zmieniane na podstawie sygnałów sprzężenia zwrotnego w trakcie pracy maszyny (np. sterowanie adaptacyjne) lub dostosowane do przewidywanych warunków obróbki na podstawie symulacji procesu w programie CAD/CAM i zapisane do programu CNC.

Procesy technologiczne wykonywane na obrabiarkach CNC obejmują różne etapy obróbki, dlatego w tworzeniu oprogramowania CAD/CAM może się pojawić konieczność modyfikacji parametrów konkretnych zabiegów, zmiany ich sekwencji i innych aspektów. W programie Mastercam taką rolę odgrywa narzędzie zwane Menadżerem operacji, które umożliwia m.in. edycję, dodawanie, usuwanie i kopiowanie etapów obróbki [2]. Ważną rolę odgrywa asocjatywność oprogramowania CAD/CAM, które umożliwia powiązanie geometrii z trajektoriami ruchu narzędzia w ten sposób, że w przypadku zmiany geometrii ścieżki narzędzia mogą się dopasować automatycznie lub być pod kontrolą użytkownika wprowadzającego zmiany geometrii obrabianej części. Zakres objęty współdziałaniem może dotyczyć geometrii 2D i 3D. Może zachodzić tylko wewnątrz programu CAD/CAM bądź dotyczyć geometrii importowanych z plików zewnętrznych. W tym ostatnim przypadku zmiana modelu części w oryginalnym pliku CAD może powodować w pliku CAD/CAM zmianę zarówno modelu części, jak i ścieżek narzędzia.



Fig. 2. Schematic representation of information collaboration in real IMT-ECC system (FBG – *fiber bragg grating*) [2, 8]

Rys. 2. Schemat współpracy informacyjnej w rzeczywistym systemie IMT-ECC (FBG – włóknowy sensor optyczny – *fiber bragg grating*) [2, 8]

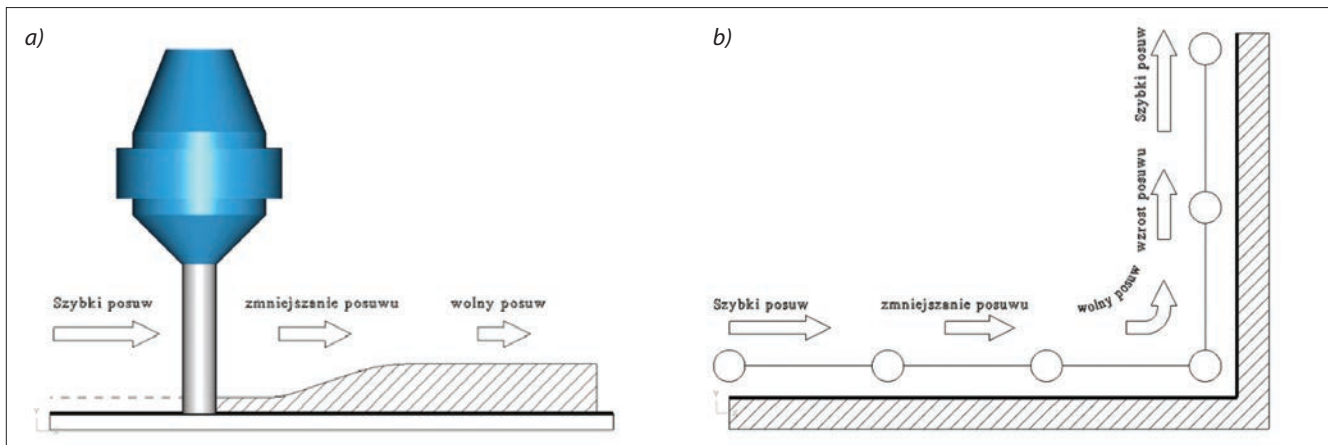


Fig. 3. Change of feed rate: a) in relation to the uncut chip thickness (UCT) and b) resulting from variable direction of the tool movement [2]
Rys. 3. Zmiana posuwu: a) w zależności od grubości warstwy skrawanej i b) związana ze zmianą kierunku ruchu narzędzia [2]

Każdy element toru ruchu narzędzia ma zaprogramowany posuw, ale dla ruchów pomocniczych może on wynikać z ustawień obrabiarki CNC. W czasie skrawania mogą się zmieniać warunki pracy narzędzia ze względu na aktualny przekrój warstwy skrawanej i kąt opasania narzędzia. Niektóre programy CAM, np. Vericut, ICAM czy iMachining, pozwalają w takich przypadkach na dostosowanie parametrów skrawania do kryterium stabilności obróbki [2].

Popularny w przemyśle program MasterCAM umożliwia optymalizację posuwu podczas skrawania zgrubnego oraz wykończeniowego dla frezowania w trzech osiach. Podczas obróbki zgrubnej optymalizacja oznacza zwiększenie posuwu tam, gdzie objętość usuwanego materiału w jednostce czasu (*material removal rate* – MRR) jest niewielka, oraz zmniejszenie go tam, gdzie wartość MRR jest duża [2]. W przypadku obróbki wykończeniowej objętość usuwanego materiału nie ma znaczenia i wtedy zmniejszenie lub zwiększenie posuwu wynika ze zmiany kierunku obróbki (często ma to miejsce podczas obróbki naroży kieszeni w formach i matrycach), co przedstawiono na rys. 3a i b.

Optymalizacja posuwu w programie MasterCAM może być nieefektywna podczas obróbki, która charakteryzuje się częstą zmianą kierunku ruchu narzędzia, np. podczas obróbki dynamicznej, HSM czy trochoidalnej. Wynika to z konstrukcji algorytmu two-

żenia ścieżek narzędzia – tak zaprojektowanego, aby generować ruch narzędzia przy wystarczająco stabilnych warunkach obciążenia, co eliminuje potrzebę dostosowywania posuwu.

Zmiana posuwu przy stałych prędkościach obrotowych frezu powoduje zmianę posuwu na ostrze. Gdy zachodzi potrzeba zachowania stałego posuwu na ostrze, należy wraz ze zmianą posuwu zmienić również prędkość obrotową narzędzia. Funkcjonalność taka jest wykorzystywana m.in. w programie ICAM [19]. Warto jednak zwrócić uwagę, że nie na każdej obrabiarce dynamiczna zmiana prędkości obrotowej wrzeczona będzie możliwa lub efektywna.

Inną ciekawą funkcjonalnością tego programu jest optymalizacja ruchów pomocniczych. Nie tylko zmienia ona prędkości przejazdów narzędzia w obszarach braku kontaktu narzędzia z materiałem obrabianym, skracając czas operacji, ale także automatycznie zmienia drogę ruchów pomocniczych w oparciu o wirtualny model obrabiarki, narzędzia, oprawki, przedmiotu obrabianego i przygotówki. Dzieje się to już na etapie przetwarzania pliku pośredniego (np. CL-Data) z programu CAD/CAM na program NC obrabiarki. Efektem jest optymalizacja ruchów pomocniczych na programowanej obrabiarce CNC oraz możliwość automatycznego ich dostosowania za pomocą tzw. inteligentnego postprocesora na układ kinematyczny nowej maszyny (rys. 4).

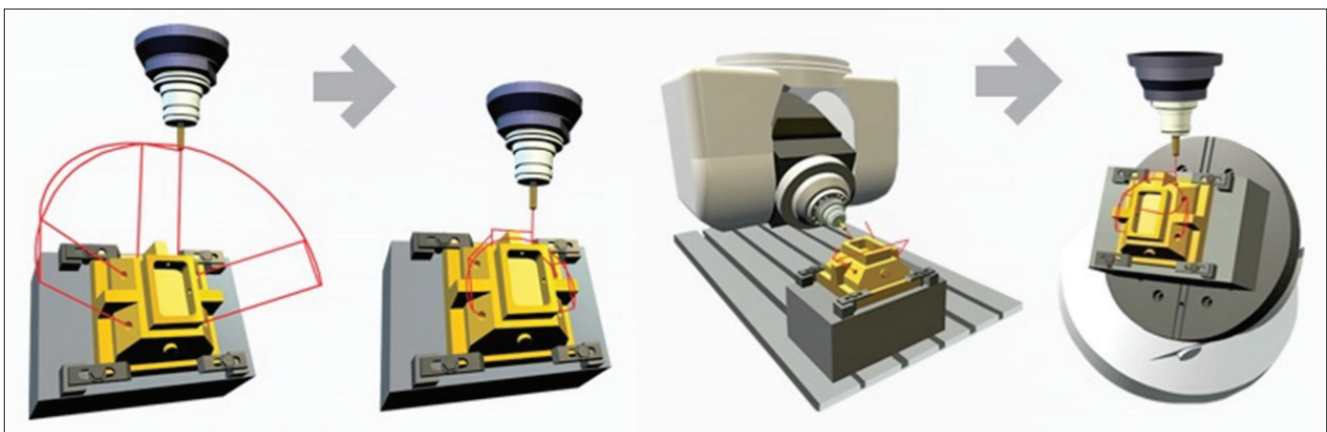


Fig. 4. Implementation of the same technological machining process on different machines after processing by ICAM VR Simulation, Adapted NC program

Rys. 4. Realizacja tego samego procesu technologicznego obróbki na różnych maszynach po przetworzeniu przez ICAM VR Simulation, Adapted NC program

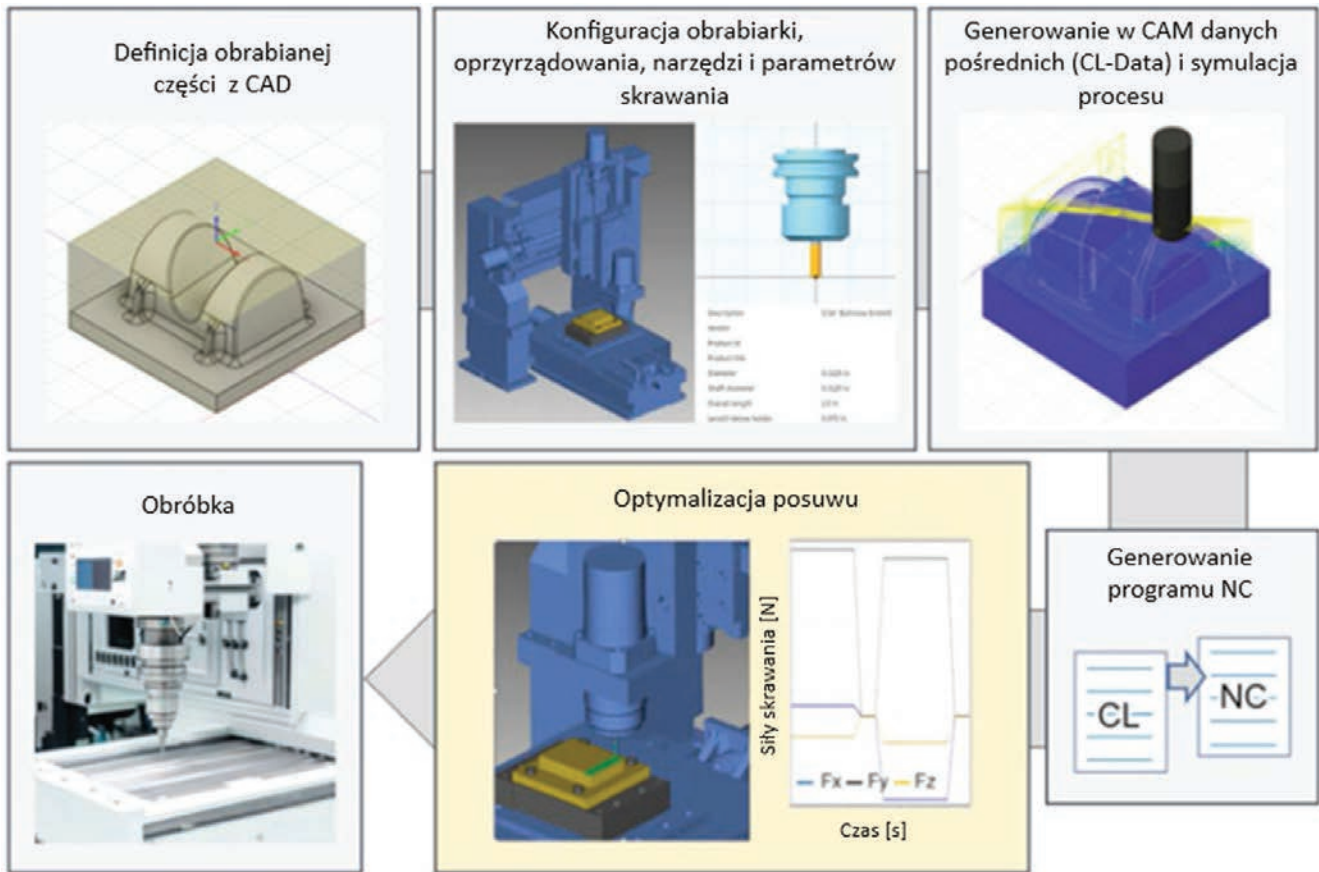


Fig. 5. Schematic diagram of process planning for CNC cutting process [4]

Rys. 5. Schemat planowania procesu skrawania na obrabiarkę CNC [4]

Na rys. 5 przedstawiono schemat planowania procesu stosowanego obecnie w obróbce CNC. Cykl planowania obejmuje: definiowanie obrabianego zarysu na podstawie danych z systemu CAD, dobór oprzyrządowania narzędziowego i technologicznego oraz warunków obróbki, generowanie danych geometrycznych w formacie CL-Data w połączeniu z symulacją ścieżki narzędzia, a następnie generowanie odpowiednich G-kodów. Należy dodać, że oprogramowanie CAM umożliwia automatyczną optymalizację posuwu zapisanego w postaci G-kodów przez post-processing dostępny w specjalizowanych modułach, np. Production Module w pakiecie Advant Edge firmy Third Wave Systems, VERICUT firmy CGTech czy MACHpro firmy MAL Inc. [4]. W rezultacie przebiegi maksymalnych/średnich wartości składowych sił skrawania (F_z , F_y , F_x) bądź momentu skrawania pozostają wygładzone, bez wartości pikowych. W dodatku optymalizacja posuwu jest niezależna od innych funkcji wysokiego poziomu dostępnych w systemie CAM i zwykle nie towarzyszy jej interakcja.

Interesującym kierunkiem rozwiązania problemu optymalizacji jest podejście zastosowane w programie IMachining [2]. Wykorzystuje ono rozpoznawanie cech geometrycznych modelu 3D (podobnie jak wiele współczesnych strategii obróbki 3D), ale cechą wyróżniającą jego działanie jest automatyczne dostosowanie parametrów skrawania. Program automatyzuje przygotowanie pojedynczych zabiegów 2D lub 3D obróbki wstępnej, kształtującej lub wykończeniowej dla części bryłowych i używa zaktualizowanego modelu przygotówki z poprzednich zabiegów lub operacji, dzięki czemu wykrywa obszary wymagające obróbki.

Na rys. 6 przedstawiono parametry wejściowe wykorzystywane przez Kreator Technologii. Po wskazaniu danych modelu obrabianego i wyborze narzędzia Kreator Technologii automatycznie dobiera parametry skrawania, takie jak: posuw, prędkość skrawania (równoważne obroty wrzeciona), osiowa głębokość skrawania, kąt opasania oraz grubość warstwy skrawanej (wióra), z możliwością ich ręcznej modyfikacji (która nie jest jednak zalecana). Wartości tych parametrów są obliczane na podstawie: właściwości mechanicznych materiału, ograniczeń technicznych obrabiarki CNC (obrotów wrzeciona, mocy, maksymalnych posuwów i sztywności), modelu części obrabianej, przygotówki oraz właściwości narzędzia.

Współczesne systemy CAM wykorzystują różne techniki wspierające automatyzację projektowania procesów obróbki w oparciu o automatyczne rozpoznawanie cech przedmiotu (*feature-based recognition*



Fig. 6. Groups of input data using in so-called Technology Creator in IMachining program [2]

Rys. 6. Grupy danych wykorzystywanych przez tzw. Kreator Technologii w programie IMachining [2]

machining – FBM). Ma to ogromne znaczenie, jeśli produkcja jest zróżnicowana i wymaga zaprogramowania dużej liczby przypadków w krótkim czasie. W programie Mastercam 2024 PL dostępne są funkcje FBM Wiercenie i FBM Frezowanie. Przykładowo: zabieg wiercenia otworów może być zdefiniowany na podstawie wyboru osi otworu i kierunku ruchu posuwowego narzędzia (w obróbce trzyosiowej jest to kierunek pionowy osi Z). Jednak ustawienia te mogą być oparte na ceście geometrycznej bryły, która pozwala jednocześnie np. na zidentyfikowanie głębokości wiercenia oraz analizę kolizyjności ruchów.

Rozpoznawanie cech geometrycznych przedmiotu z zastosowaniem funkcji FBM Frezowanie opiera się na szczegółowej analizie trójwymiarowego modelu bryłowego. Na podstawie danych dotyczących przygotówki funkcja ta pozwala na opracowanie kompleksowego planu obróbki frezowaniem. Proces obróbki jest podzielony na etapy: wstępny, kształtujący i wykończeniowy, z możliwością sterowania naddatkami obróbkowymi między poszczególnymi zabiegami. Program posługuje się wybranymi strategiami obróbki 2.5D (frezowanie 3-osiowe) i dlatego ma zastosowanie do prostych modeli 3D (Mastercam 2024). Proces jest projektowany w sposób automatyczny, który nawiązuje do strategii obróbki elementów cienkościennych. Obszar obróbki jest podzielony na strefy,

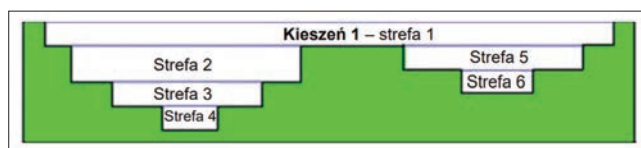


Fig. 7. Division of machining zones in the application of function FBM milling [2]

Rys. 7. Podział stref obróbki w przypadku zastosowania funkcji FBM Frezowanie [2]

które są odniesione do położenia kolejnych płaskich elementów części w płaszczyźnie XY. W przypadku złożonych, silnie zagnieżdżonych kieszeni funkcja FBM Frezowanie tworzy osobną strefę dla każdej głębokości jak na rys. 7.

Innym podejściem do projektowania procesu obróbki jest analiza cech geometrycznych modelu części gotowej za pomocą sztucznej inteligencji (AI). Przykładem może być program CAM Assist pracujący w środowisku Fusion 360 firmy Autodesk [20]. W oparciu o efektywne strategie obróbki skrawaniem budowany jest kompletny proces, co skraca czas programowania. Oferując prosty interfejs użytkownika, na bazie typowych danych związanych z narzędziami i materiałem obrabianym, automatycznie generuje proces obróbki na konkretną obrabiarkę CNC i proponuje parametry skrawania. W tym przypadku rozpoznawanie kształtów przypisywanych do cech

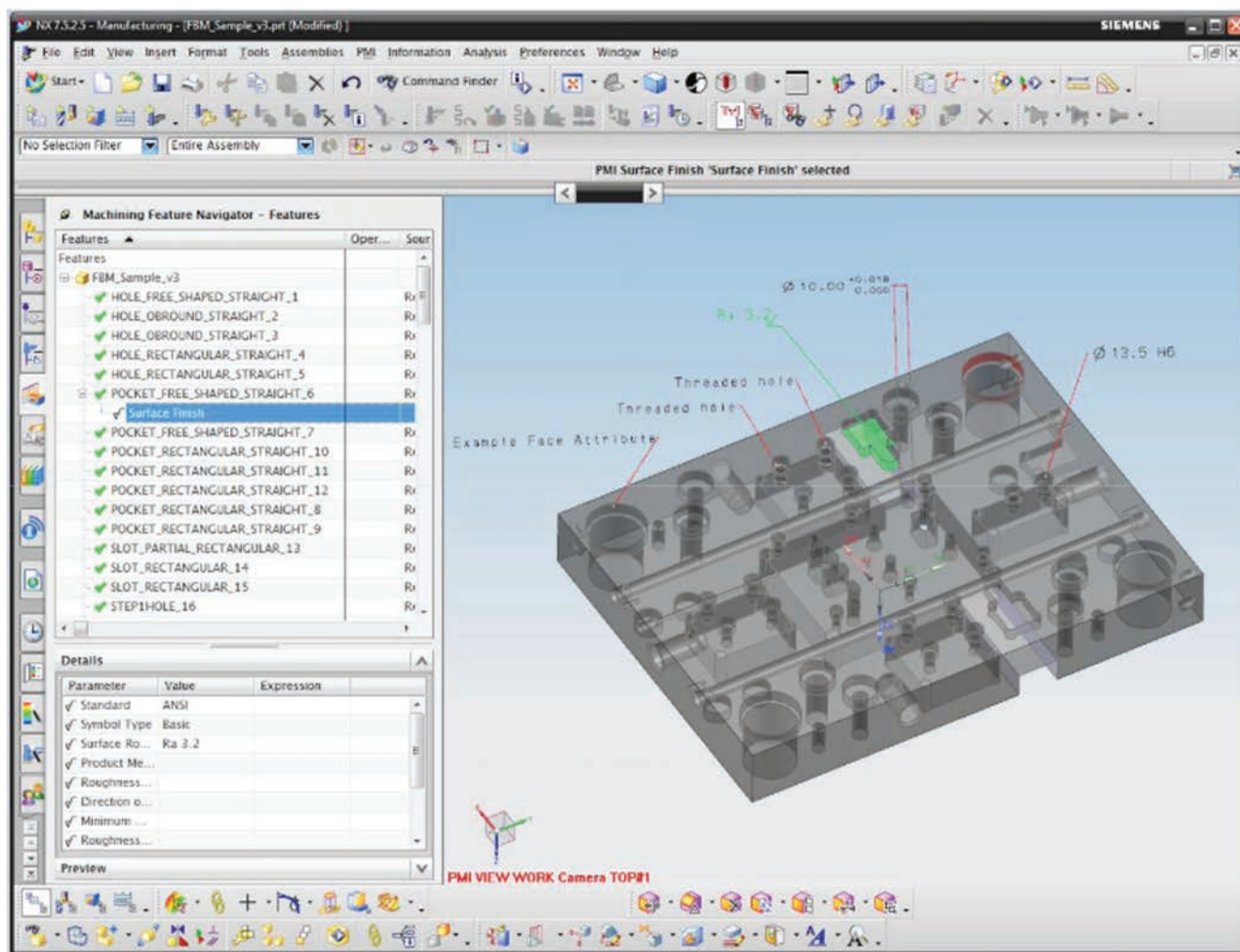


Fig. 8. Recognition of geometrical features of the workpiece (mold bases) in NX CAM program [6]

Rys. 8. Rozpoznawanie cech geometrycznych przedmiotu (płyty formy) w programie NXCAM [6]

technologicznych (którym przypisywane są dalej odpowiednie zabiegi obróbki) odbywa się na zasadzie nauczania AI, co daje szansę np. na minimalną liczbę wymian narzędzi czy korzystniejszy podział stref obróbki.

W programie NX CAM firmy Siemens PLM Software funkcje FBM dotyczą toczenia, frezowania (płaszczyzn, wgłębnego wnek, gwintów i otworów) i wycinania drutowego WEDM [6]. Dla zdefiniowanej geometrii przedmiotu (okno dialogowe na rys. 8) program automatycznie rozpoznaje i grupuje cechy geometryczne z opcją uczenia według zapotrzebowania użytkownika (*feature teaching*), kreuje niezbędne operacje obróbkowe, ustala parametry skrawania, generuje ścieżki narzędzia i przeprowadza symulacje weryfikacyjne. Możliwe jest tolerowanie wymiarowe i znakowanie chropowatości powierzchni oparte na odczytaniu danych przez program NX PMI (*Product and Manufacturing Information*) oraz korzystanie z bazy wiedzy o skrawaniu (MKE – *Machining Knowledge Editor*). Najważniejsze zastosowanie programu dotyczy części pryzmatycznych 2.5D. W przykładzie płyty formy wtryskowej pokazanej na rys. 8 rozpoznano 115 charakterystycznych cech geometrycznych, co w rezultacie spowodowało zaprogramowanie 84 operacji obróbkowych.

Optymalizacja z uwzględnieniem dynamiki i kinematyki procesu

Omówione sposoby zmiany posuwu nie uwzględniają w planowaniu ścieżki narzędzia właściwości dynamicznych obrabiarki i zmian procesu w czasie (*time-dependent processes* – TDPs) i z tego względu mogą niekorzystnie wpłynąć na właściwości obrabianej powierzchni [2, 4, 5]. Konieczne staje się więc lokalne korygowanie ścieżki narzędzia i zaplanowanie odpowiedniej zmiany wartości posuwu. Problem ten dotyczy zwłaszcza generowania ścieżek ruchu narzędzia dla powierzchni złożonych z nieregularnych śladów. Zagadnienie klasyfikacji ścieżek ruchu narzędzia i ich dopasowania do skanowanych powierzchni opisano w [4].

Na rys. 9 przedstawiono schemat planowania procesu w zmiennych warunkach w czasie (TDP) ze zdefiniowaniem wymaganej topografii powierzchni i wskaźników celu, takich jak wydajność objętościowa oraz odchylenia i zmiany w stosunku do topografii wyjściowej. Można to w zasadzie osiągnąć po analizie danych w systemie CAD przed procesem i po nim lub na podstawie korekcji kształtu po bezpośrednich pomiarach 3D powierzchni.

Kolejny krok obejmuje dobór warunków procesu oraz prognozę wskaźnika PIF (*Process Influence Function*), a w następstwie wygenerowanie danych

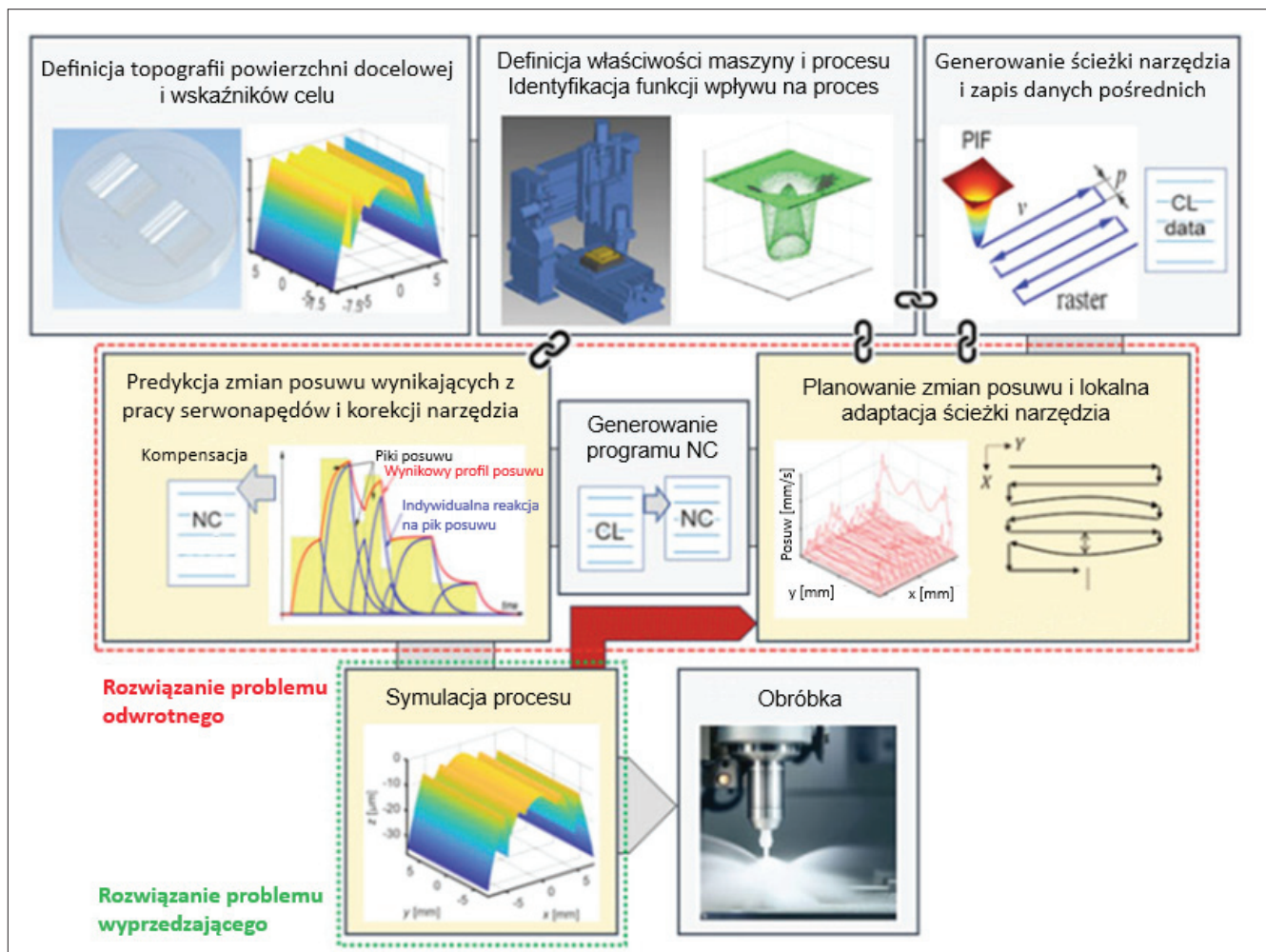


Fig. 9. Schematic diagram of process planning for CNC cutting process according to TDP strategy [4]
Rys. 9. Schemat planowania procesu skrawania na obrabiarkie CNC według strategii TDP [4]

w formacie CL-Data i wstępną definicję całej ścieżki narzędzia. Te czynności można przeprowadzić w komercyjnym systemie CAM.

Zatem posuw reprezentowany przez czas trwania odpowiedzi w serwo-systemie (*dwell time*) jest optymalizowany w trybie post-procesingu, ale implikacje (uwikłania) są inne niż w skrawaniu. Wynika to z faktu, że wskaźnik KPI (*Key Performance Indicator*) w skrawaniu odnosi się do siły skrawania (czyli ma charakter pośredni), natomiast w przypadku zastosowania strategii TDP dotyczy topografii powierzchni (kształtu czy samej chropowatości) czyli bezpośredniego skutku procesu. Ponieważ optymalizacja posuwu jest osiągana przez dekonwolucję (oddzielanie szumu, „odpłatanie” sygnału w celu odfiltrowania zakłóceń od zarejestrowanych danych i uzyskania niezakłóconych danych dynamiki) modelowanego TDP, jej wyniki zależą silnie od warunków procesu i kształtu ścieżki narzędzia. Choć te interakcje komplikują proces planowania obróbki, to jednak uzyskuje się adaptację lokalnej ścieżki w celu usprawnienia zdolności sterowania procesem w powiązaniu ze sterowaniem posuwem.

W dostępnym obecnie oprogramowaniu zarówno dynamika napędów posuwu, jak i interpolatorów obrabiarki CNC, które powodują zniekształcenie odpowiedzi sygnału, nie są uwzględniane, ale ich identyfikacja/prognoza może się przyczynić do kompensacji G-kodów i uzyskania rezultatu bliższego do wymaganego przez rozwiązanie problemu odwrotnego (*inverse problem*). W dodatku uwzględnienie dynamiki zwiększa dokładność symulacji, tj. rozwiązanie problemu wyprzedzającego/współbieżnego (*forward problem*).

Współczesne systemy CAD/CAM mają wbudowane moduły symulacji kinematycznej obrabiarki z wizualizacją usuwania materiału obrabianego oraz uproszczonym wychwytywaniem kolizji narzędzia i przedmiotu obrabianego/uchwyty obróbkowego. W przypadku symulacji kinematyki obróbki przedstawionej na rys. 10 przedmiot obrabiany składa się z elementów przestrzennych tzw. voxelów, które są suk-

cesywnie usuwane w miarę postępu obróbki. W czasie symulacji rejestrowane są zmiany położenia sterowanych osi wynikające z usuwania voxelów, które są przekazywane do modelu symulacyjnego kinematyki obrabiarki i na tej podstawie wyznaczany jest nowy punkt centralny narzędzia (*tool center point – TCP*). TCP jest następnie wykorzystywany w symulacji usuwania materiału z przedmiotu do określania nowych wartości siły skrawania i zmiany parametrów skrawania. W module symulacyjnym prognozuje się bieżący stan statyczny, dynamiczny i cieplny obrabiarki.

Zgodnie z koncepcją przedstawioną na rys. 10 symulacja pracy obrabiarki odbywa się ze sprzężeniem zwrotnym z jednostką fizyczną, gdzie kontroler CNC przekazuje dane o pozycjach osi maszyny, a inne sygnały z czujników są przesyłane do odpowiednich modułów symulacyjnych. Informacje te są używane do obliczeń w czasie rzeczywistym, co pozwala dostosować parametry obróbki oraz ruchy narzędzia do warunków skrawania. Po dokonaniu odpowiednich korekt ostateczne wynikowe pozycje osi, a także skorygowane wartości parametrów obróbki są przekazywane z powrotem do rzeczywistej jednostki sterującej CNC [5]. Zaletą symulacji prowadzonej równoległe z obróbką jest predykcja warunków procesu oraz korygowanie parametrów pracy maszyny przed spodziewanym przekroczeniem wartości granicznych.

Optimalizacja z zastosowaniem symulacji numerycznej i wirtualnej

Wybrane komercyjne pakiety oprogramowania umożliwiają bardziej zaawansowaną symulację, włącznie z wirtualnym odwzorowaniem całości obrabiarki, symulacją usuwania materiału obrabianego i zaawansowanym wykrywaniem kolizji [1, 3, 5]. Dlatego badania nad symulacją obróbki koncentrują się obecnie na symulacji procesu w czasie rzeczywistym i połączeniu wirtualnych modeli obrabiarek, modułów symulacyjnych oraz sprzężeniu z danymi z czujników zainstalowanych na fizycznej obrabiarkie.

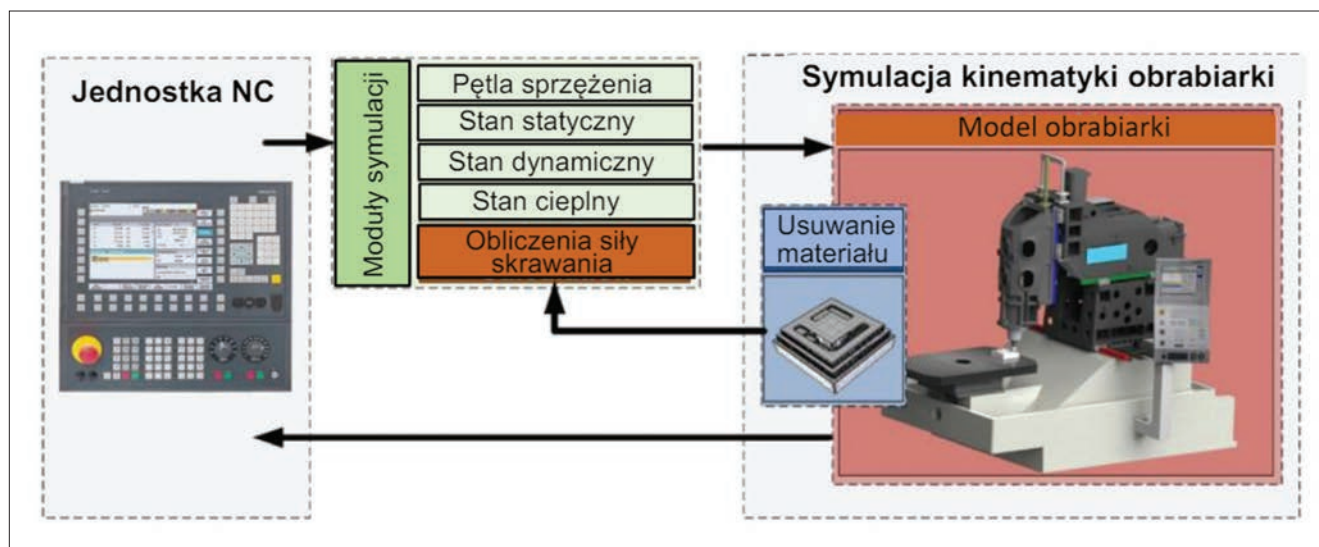


Fig. 10. Scheme of real-time machining simulation [2, 3, 5]

Rys. 10. Schemat symulacji obróbki w czasie rzeczywistym [2, 3, 5]

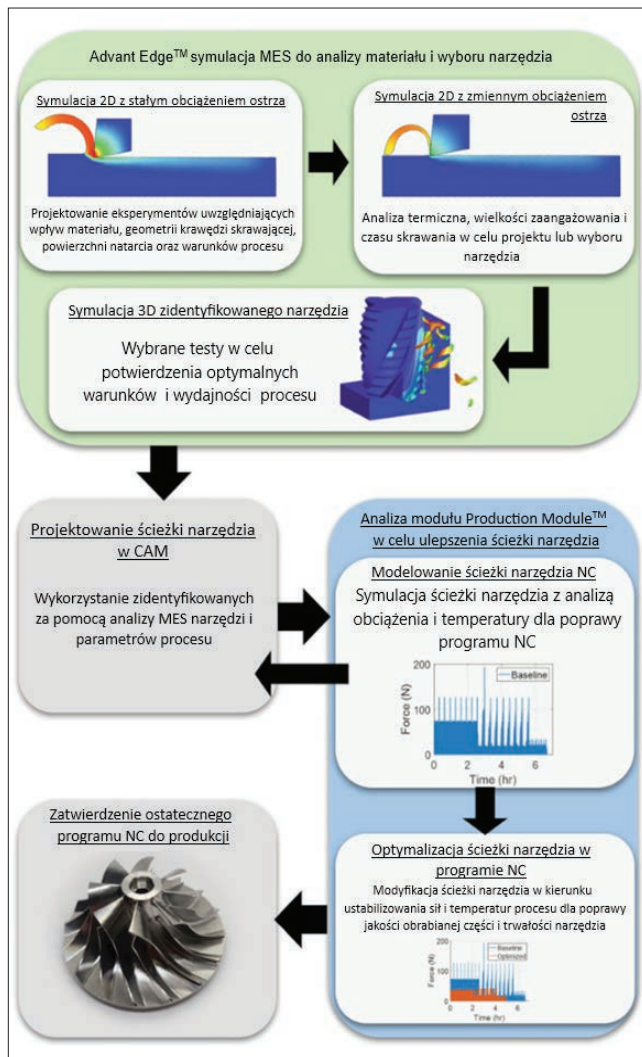


Fig. 11. Flow chart describing optimization run of NC tool path in Production Module™ Advant Edge simulation program [9]

Rys. 11. Diagram przedstawiający przebieg optymalizacji ścieżki narzędzia w module Production Module™ programu Advant Edge [9]

W symulacji procesu w czasie rzeczywistym kluczowe są trzy główne obszary:

- prognozowanie warunków skrawania (składowych siły skrawania, rozkładu temperatury, obciążenia ostrza narzędzia skrawającego itd.),

- wizualizacja usuwania materiału obrabianego,
- wirtualne modelowanie kinematyki i dynamiki obrabiarki CNC.

Na rys. 11 przedstawiono schematycznie podejście bazujące na symulacji numerycznej MES (FEM/FEA). W pierwszej fazie przeprowadza się rutynowe symulacje 2D FEA (*finite element approach*) procesu ze stałym i zmiennym obciążeniem ostrza/wióra w celu sprawdzenia zachowania się materiału i doboru narzędzia. W drugiej fazie przeprowadza się kompletną symulację 3D dla wybranego narzędzia i parametrów skrawania w celu weryfikacji warunków wyznaczonych we wcześniejszej symulacji 2D. Sparometryzowane dane odnośnie do narzędzia są importowane do modelu STEP (*Standard for the Exchange of Product Data*). Ponieważ parametry skrawania zostały wybrane, możliwe jest programowanie ścieżki narzędzia w systemie CAM z wykorzystaniem specjalistycznego modułu Production Module.

Z zebranych doświadczeń [9] wynika, że selekcja narzędzi i parametrów skrawania na bazie modelowania metodą FEA umożliwia projektowanie doskonalszych programów CAM. Dodatkowo można lepiej ocenić aktualną ścieżkę narzędzia w kontekście obciążenia ostrza, mocy wrzeciona i temperatury skrawania.

W modelowaniu wirtualnym realizowana jest zwrotna wymiana informacji między środowiskiem (bliźniakiem) cyfrowym i fizycznym – zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 12 [2, 3]. Dotyczy ona kinematyki i dynamiki obrabiarki CNC oraz bieżących warunków procesu, czyli czynników, które mają wpływ na realizację programu sterującego.

Na rys. 13 przedstawiono inną koncepcję cyfrowego bliźniaka (*digital twin – DT*) do monitorowania procesu skrawania i sterowania nim z warstwą pośrednią usprawniającą wymianę danych między środowiskiem wirtualnym i fizycznym. DT składa się ze środowiska cyfrowego, które jest repliką środowiska fizycznego połączonego interfejsem z oprogramowaniem pośredniczącym, ułatwiającym łączność, a także gromadzenie i transfer danych, informacji oraz wiedzy.

Podobnie jak w przypadku przedstawionym na rys. 10, modele CAD dla przedmiotu, uchwytu i narzędzi

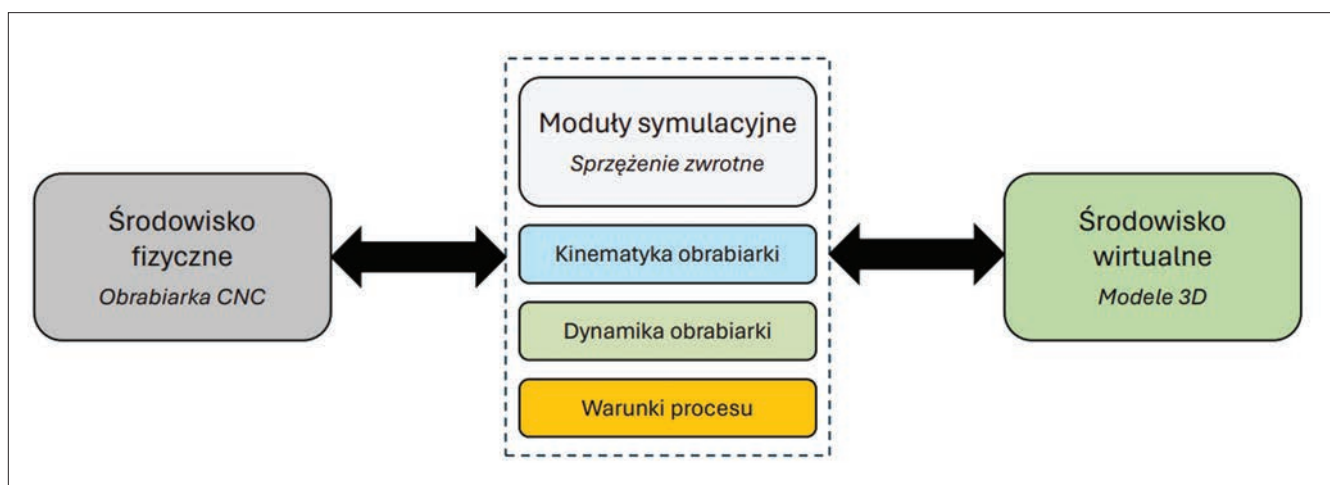


Fig. 12. Concept of a modified real-time simulation of CNC machine tools [2, 3]

Rys. 12. Koncepcja zmodyfikowanej symulacji obrabiarki CNC w czasie rzeczywistym [2, 3]

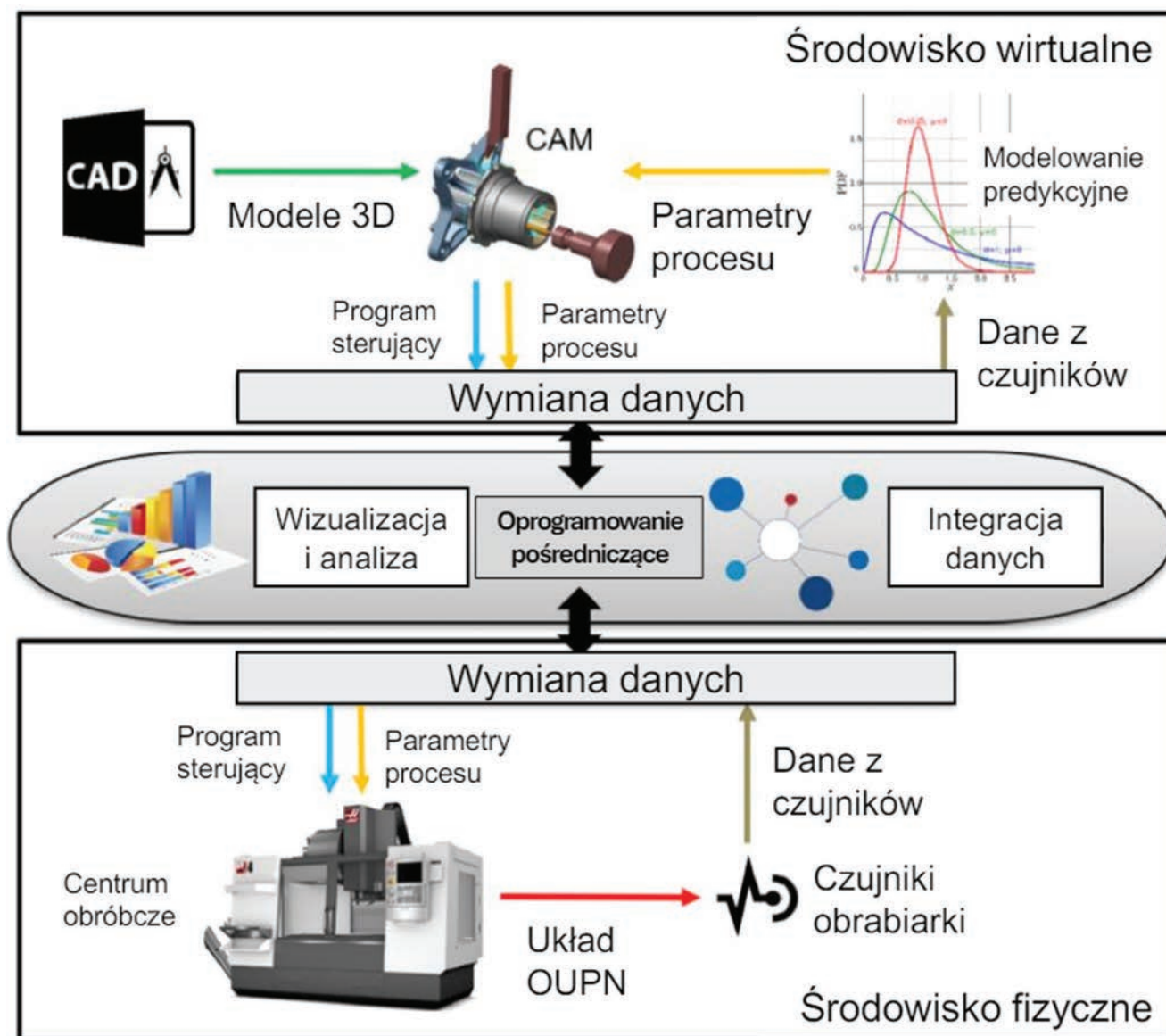


Fig. 13. A digital twin concept for process monitoring and control in chatter-free machining [10, 11]

Rys. 13. Koncepcja cyfrowego bliźniaka do monitorowania procesu obróbki wolnego od drgań samowzbudnych i sterowania nim [10, 11]

są wykorzystane w pakiecie CAD/CAM do identyfikacji trajektorii ruchu narzędzia dla wyselekcjonowanych parametrów skrawania. Parametry skrawania dobiera się na podstawie informacji o narzędziu i materiale obrabianym albo na podstawie fizycznych modeli predykcyjnych [10, 11]. Działania te są wspierane przez dane pozyskiwane z sensorów w celu zwiększenia wydajności procesu (MRR) i podniesienia jakości powierzchni. Dane uzyskane z pomiarów składowych sił są wykorzystane do predykcji parametrów zapewniających prowadzenie procesu bez drgań samowzbudnych (*chatter-free proces*). Model został wbudowany w cyfrowego bliźniaka dla systemu sterowania procesem.

Przykładem komercyjnego zastosowania koncepcji cyfrowego bliźniaka w programowaniu obrabiarek CNC są pakiety oprogramowania Create MyVirtual Machine i Run My Virtual Machine do wirtualnego sterowania cyfrowego Sinumerik One oferowane przez firmę Siemens [13]. W 2023 r. „natywny” system sterowania Sinumerik One był testowany w kontekście tworzenia i użytkowania cyfrowego bliźniaka

na 5-osiowej obrabiarence szkoleniowej SLV EDU firmy SolidVision [13]. W rezultacie operator obrabiarki dysponuje jej pełnym odwzorowaniem wirtualnym na komputerze klasy PC w postaci cyfrowego bliźniaka, tak jak na rys. 14.

Integralność programowa jest zapewniona na etapie prototypowania, uruchamiania, programowania i serwisowania obrabiarki oraz we współpracy z systemami wspomaganiami CAD-CAM-CNC. Cyfrowy bliźniak jest w takich przypadkach tworzony w środowisku Create MyVirtual Machine. Możliwa jest także konfiguracja wirtualna części systemu CNC, sterowników PLC i interfejsu HMI oraz części mechanicznej obrabiarki. Poziom wirtualnego odwzorowania obrabiarki dochodzi do 99%. W rezultacie zastosowania DT skraca się czas wdrożenia nowej obrabiarki w produkcji do 30% i czas jej uruchomienia do 50%. Działania te korespondują w pełni z wdrażaniem w polskim przemyśle strategii przemysłu 4.0.

W przypadku realizacji zadań operatora ważna jest możliwość symulacji oceny ryzyka kolizji i pomiarów przedmiotu z uwzględnieniem przesunięcia punktu

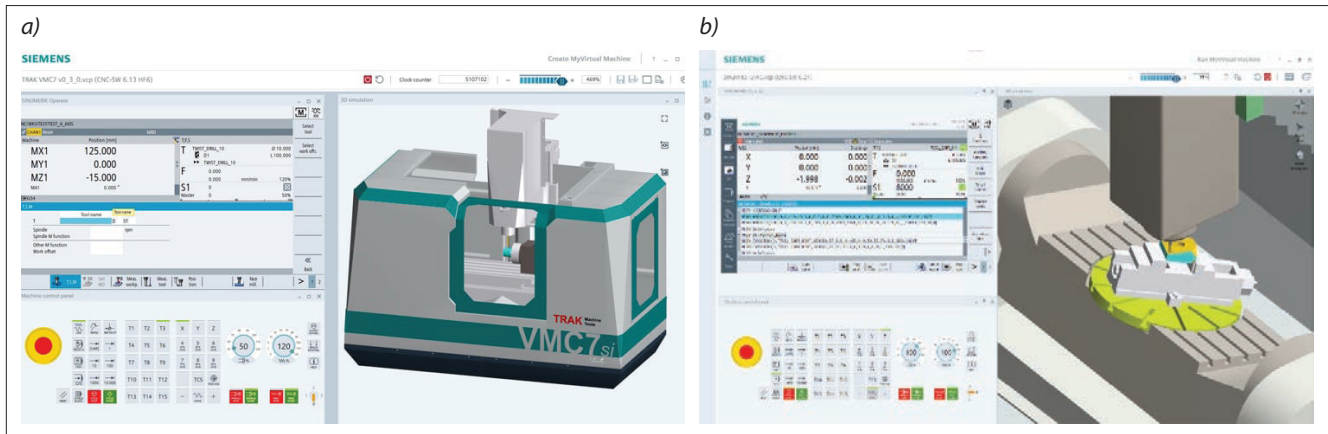


Fig. 14. Virtual representation of a CNC machine tool (a) and an example of an integrated virtual model of a titling rotary including machining simulations (b) [9]

Rys. 14. Odzworowanie wirtualne obrabiarki (a) oraz przykład wirtualnego modelu stołu obrotowo-uchylnego i obróbki przedmiotu (b) [9]

zerowego. Z kolei dzięki zastosowaniu oprogramowania Run MyVirtual Machine programowanie, przygotowanie produkcji i nauczanie obsługi może w znaczący sposób zastąpić zadania realizowane na rzeczywistej 5-osiowej maszynie.

Optymalizacja z zastosowaniem interfejsu STEP-NC

Do dziś obowiązującym standardem opisu programów sterujących na obrabiarki CNC jest format G-kodów uregulowany przez normę ISO [ISO 6983-1:2009]. Systemy CAM wykorzystują własny sposób opisu zabiegu technologicznego, a następnie transformują go do postaci ścieżki narzędzia (zapisanej najczęściej w postaci CL-Data). Każdy producent oprogramowania CAD/CAM/CNC ma własny format cyfrowego modelu wyrobu. Jednak to m.in. STEP (ISO 10303-11:1994) jest formatem uniwersalnym, który pozwala przenosić geometrię wyrobów pomiędzy różnymi systemami CAD. W przypadku opisu procesów technologicznych obróbki podobne możliwości oferuje od lat rozwijany standard STEP-NC (ISO 14649-1:2003).

Standard STEP-NC został pierwotnie opracowany jako model wymiany danych pomiędzy systemami CAD/CAM a maszynami CNC. W przeciwieństwie do ISO 6983 opisuje raczej zabiegi obróbki skrawaniem niż ruchy obrabiarki, używając obiektowo zorientowanego podejścia [18]. Jego zastosowanie może się również wiązać z bezpośrednim wykorzystaniem w sterowaniu obrabiarki CNC.

Rola interfejsu STEP-NC jest zasadniczo skoncentrowana na realizacji inteligentnego sterowania, co powoduje, że obrabiarka/sterowniki CNC podlegają działaniom inteligentnym, np. optymalizacji obróbki. Przykładem może być autonomiczny STEP-podporządkowany CNC (*ASNC-autonomous STEP-compliant CNC*), w którym dane zapisane w formacie ISO 14649 są konwertowane na format ASNC i następnie przetwarzane na graf sekwencji procesu (*PSG – proces sequence graph*) [2, 3, 14]. Zastosowanie uniwersalnego języka znaczników XML (ISO 10303 AP28) ułatwia transfer danych w e-wytwarzaniu (*e-manufacturing*). Model danych umożliwia umiejscowienie, ekstrakcję/wybranie i archiwizację ścieżek narzędzia w for-

macie XML (*extensive markup language*). Tworzy się zestaw instrukcji do formatowania tekstów w sposób czytelny dla maszyn. Programy STEP-NC są tworzone przez moduł wprowadzania danych (XML DATA INPUT) i interpretator danych (INTERPRETER) na podstawie dostarczanych plików CAD.

Na rys. 15 przedstawiono koncepcję samouczącego się systemu opartego na STEP-NC, funkcjonującego w pętli zamkniętej. Wykorzystuje on informacje wysokiego poziomu, w tym dane o warunkach procesu obróbki i wyniki kontroli przeprowadzanej w trybie *on-line* i *real-time*. Interpretator STEP-NC dopasowuje parametry technologiczne obróbki na wieloosiowej obrabiarkę CNC do wiedzy o modelu obrabianego przedmiotu i przygotówki oraz o procesie i do stanu obrabiarki oraz narzędzia. Na tej podstawie generowany jest zdalnie plan obróbki i ścieżki narzędzia. Z drugiej strony sensory wbudowane w układ sprzężenia zwrotnego dostarczają aktualnej wiedzy o przebiegu procesu obróbki i na tej podstawie ustalane są optymalne parametry technologiczne z użyciem algorytmu sterowania adaptacyjnego. Po skompletowaniu kroku roboczego obróbki są one weryfikowane na podstawie kontroli w trybie *on-line* wymaganych tolerancji

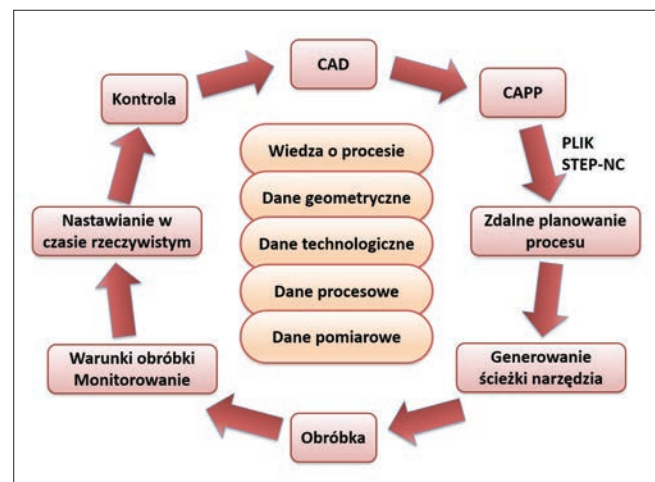


Fig. 15. An example of a closed-loop self-learning STEP-NC machining system [3, 14]

Rys. 15. STEP-NC system obróbkowy w pętli zamkniętej i samouczący się [3, 14]

wymiarowych [11]. Na bazie platformy STEP-NC może być rozwijana koncepcja zrównoważonego wytwarzania sprowadzająca się do tworzenia oszczędnego energetycznie środowiska wytwórczego oraz inteligentnego wytwarzania, które wymaga wprowadzenia inteligentnych sterowników na poziomie przemysłowym [3, 15, 16].

Podsumowanie

W działaniach technologicznych związanych z programowaniem nowoczesnych, obecnie już w dużym stopniu inteligentnych obrabiarek CNC należy podejmować kroki dotyczące ich optymalizacji, która powoduje właściwy dobór ścieżki narzędzia i parametrów obróbki. Na kryteria optymalizacji wybiera się progowe wartości składowych sił skrawania jako kryterium pośrednie lub wymagany stan topografii powierzchni obrobionej jako kryterium bezpośrednie.

Inżynierowie-programiści mogą korzystać z wielu funkcji dostępnych w komercyjnych programach CAD/CAM, np. automatyzacji zmiany posuwu zależnie od konfiguracji przedmiotu i zmiany warunków procesu w czasie czy rozpoznawania charakterystycznych cech przedmiotu i grupowania zabiegów toczenia, wiercenia i frezowania. Bardziej zaawansowane metody opierają się na współbieżnej symulacji procesu metodami numerycznymi lub tworzeniu całościowych modeli wirtualnych, tzw. cyfrowych bliźniaków.

Rozwojowym zagadnieniem jest funkcjonalny interfejs STEP-NC czy docelowo platforma informacyjna, która usprawnia obliczenia prowadzące do włączenia w proces programowania, w trybie adaptacyjnym, wiedzy o bieżącej kinematyce i dynamice obrabiarki CNC. Nie bez znaczenia są prace badawcze prowadzące do wzbogacania wiedzy praktycznej i rozwoju zdolności wytwórczych obrabiarek CNC, z czego mogą korzystać mniej doświadczeni operatorzy tych maszyn [17].

LITERATURA

- [1] Moriwaki T., Shirase K. "Intelligent machine tools: Current status and future direction". *International Journal of Manufacturing Technology and Management*. 9, 3/4 (2006): 204–218, <https://www.researchgate.net/publication/220572721>.
- [2] Zalewski A., Grzesik W. (red.), Deja M., Jarosz K., Ruszaj A. „Podstawy programowania i funkcjonowania obrabiarek CNC. Procesy ubytkowe, przyrostowe i hybrydowe”. Warszawa: PWN (2024).
- [3] Jarosz K., Grzesik W. "Development of techniques improving functional and programming abilities of intelligent CNC machine tools/Rozwój technik wspomagania funkcjonowania i programowania inteligentnych obrabiarek CNC. *Mechanik*. 7 (2024): 6–12, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2024.7.12>.
- [4] Yamato S., Sencer B., Beaucamp A. *Tool path planning and feed scheduling for time dependent processes*. Tolio T. (red.). "CIRP novel topics in production engineering". Lecture Notes in Mechanical Engineering. 1 (2024): 185–231, https://doi.org/10.1007/978-3-031-54034-9_3.
- [5] Witt M., Schumann M., Klimant P. "Real-time machine simulation using cutting force calculation based on a voxel material removal model". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 105 (2019): 2321–2328, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04418-2>.
- [6] van't Erve T. "NX CAM Feature-Based Machining (FBM) Introduction". NX CAM Development.
- [7] „Obróbka, planowanie części i generowanie NC z wykorzystaniem PMI”, www.cador.pl/inzynieria-w-praktyce/nx-pmi-w-cam/ (dostęp: lipiec 2024).
- [8] Lou P., Liu S., Hu J., Li R., Xia Z., Yan J. "Intelligent machine tool based on edge-cloud collaboration". *IEEE Access* (2020): <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3012829>.
- [9] Roth T., Heigel J., Marusich K., Thimm B. "Leveraging Transients and Material Properties to Improve Machining Material Removal". Tolio T. (red.). *CIRP Novel Topics in Production Engineering*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 1 (2024), https://doi.org/10.1007/978-3-031-54034-9_3.
- [10] Afazov S., Scrimieri D. "Chatter model for enabling a digital twin in machining". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 110 (2020): 2439–2444.
- [11] Grzesik W. "Digital Twin in manufacturing. Part II. Case studies in removal and additive machining processes/Cyfrowy bliźniak w procesach wytwórczych. Część II. Przykłady zastosowań w skrawaniu i obróbce przyrostowej". *Mechanik*. 2 (2023): s. 6–14, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2023.2.4>.
- [12] Jarosz K., Özel T. "Machine learning approaches towards digital twin development for machining systems". *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*. 15, 2–3 (2022): 127–148, <https://doi.org/10.1504/IJMMS.2022.124922>.
- [13] „SINUMERIK – Inteligentne rozwiązania dla obrabiarek”, www.siemens.pl/sinumerik (dostęp: lipiec 2024).
- [14] Jeon B., Yoon J.S., Um J., Suh S.H. "The architecture development of Industry 4.0 compliant smart machine tool system (SMTS)". *Journal of Intelligent Manufacturing*. 31, 8 (2020): 1837–1859.
- [15] "STEP/STEP-NC as a Solution for Data Interoperability in the CAx Chain", <https://ukdiss.com/examples/step-step-nc-data-interoperability-cax-chain.php> (dostęp: lipiec 2024).
- [16] Zhang Y., Yu X., Sun J., Zhang Y., Xu X., Gong Y. "Intelligent STEP-NC-compliant setup planning method". *Journal of Manufacturing Systems*. 62 (2022): 62–75, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.11.002>.
- [17] Jarosz K., Chen Y.-T., Liu R. "Investigating the differences in human behavior between conventional machining and CNC machining for future workforce development: A case study". *Journal of Manufacturing Processes*. 96 (2023): 176–192, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.04.037>.
- [18] Habel J. „Cyfrowa reprezentacja procesu technologicznego obróbki na podstawie rozszerzonego standardu STEP-NC w kontekście Przemysłu 4.0”. Knosala R. (red.): „Inżynieria zarządzania: cyfryzacja produkcji. Aktualności badawcze 3”. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, ISBN 978-83-208-2456-8 (2021).
- [19] ICAM, <https://www.icam.com> (informacje o programach firmy ICAM – postprocesory, symulacja i optymalizacja parametrów procesu obróbki skrawaniem na obrabiarkach CNC) (dostęp: lipiec 2024).
- [20] <https://www.cloudnc.com/cam-assist/fusion-360> (informacje o programie CAM Assist firmy CloudNC) (dostęp: lipiec 2024).