



Dofinansowane przez Unię Europejską



Politechnika Świętokrzyska Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn

Kierunek studiów: mechanika i budowa maszyn

Michał Skrzyniarz

Materiały dydaktyczne do przedmiotu

ZAAWANSOWANE SYSTEMY CAM

opracowane w ramach realizacji Projektu "Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki" FERS.01.05-IP.08-0234/23

Kielce, 2025

Politechnika Świętokrzyska Kielce University of Technology

Projekt "Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki" nr FERS.01.05-IP.08-0234/23







Spis treści

1.	Wstęp	3
2.	Przygotowanie geometrii przed tworzeniem procesu technologicznego obróbki wirników	v 4
3.	Przygotowanie ścieżek obróbkowych	11
4.	Symulacja kodu NC	22
5.	Literatura	23



Utwór objęty licencją Creative Commons BY 4.0.

Licencja dostępna pod adresem: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/







Dofinansowane przez Unię Europejską



1. Wstęp

Obróbka wirników na obrabiarkach sterowanych numerycznie jest kluczowym elementem produkcji części stosowanych w zaawansowanych turbinach lotniczych, turbosprężarkach samochodowych oraz częściach silników elektrycznych. Wirniki, stanowiące fundamentalną część tych maszyn, odpowiadają za efektywność konwersji energii. Błędy w ich wykonaniu maja bezpośredni wpływ na efektywność pracy, poziom hałasu, bezpieczeństwo pracy maszyny oraz jej żywotność. Wirniki pracują przy bardzo wysokich prędkościach obrotowych w ekstremalnych warunkach przy wysokich temperaturach, ciśnieniu i dużych obciążeniach. Dokładność ich wykonania jest kluczowa dla poprawnego działania. Niewielkie odchylenia od założonego kształtu powodują niewyważenie elementu, co skutkuje wibracjami, hałasem oraz stratami energii układu. Obrabiarki sterowane numerycznie, dzięki wysokiej dokładności i powtarzalności pozycjonowania oraz możliwości modelowania ścieżek obróbkowych w programach CAM, minimalizują ryzyko błędów w geometrii. Symulacje 3D oraz weryfikacja ścieżek narzędziowych pozwalają wykryć błędy już na etapie projektowania procesu. Porównanie wirtualnej geometrii 3D z modelem rzeczywistym umożliwia optymalizację ścieżek narzędziowych i identyfikację fragmentów wymagających dopracowania, co zapewnia odpowiedni kształt i chropowatość powierzchni wirników, kluczowe dla ich funkcjonowania. Proces obróbki wirników obejmuje toczenie i frezowanie. Toczenie nadaje odpowiedni kształt powierzchniom obrotowym wirnika, a frezowanie formuje finalny kształt łopatek. Złożony kształt łopatek wymaga zastosowania 5-osiowej obróbki, umożliwiającej jednoczesne sterowanie ruchem maszyny w pięciu osiach. Precyzyjny dobór narzędzi i parametrów obróbkowych jest niezbędny do uzyskania pożądanej dokładności i chropowatości powierzchni. Wysokiej jakości narzędzia skrawające, odporne na zużycie i przegrzanie, są kluczowe. Proces musi być starannie monitorowany i kontrolowany pod kątem zgodności z wymaganiami technicznymi i jakościowymi. Optymalizacja parametrów, takich jak prędkość skrawania, posuw i głębokość skrawania, zwiększa wydajność procesu i minimalizuje koszty produkcji.







Dofinansowane przez Unię Europejską



2. Przygotowanie geometrii przed tworzeniem procesu technologicznego obróbki wirników

Proces technologiczny wytwarzania wirników jest skomplikowany i czasochłonny. Pierwszym krokiem jest przygotowanie geometrii 3D w programie CAM. Na potrzeby ćwiczenia gotowa geometria jest dostępna pod linkiem: https://box.pionier.net.pl/f/bd4691e6482b40dd9ffd/?dl=1.

W tym opracowaniu przedstawiono kolejne etapy niezbędne do uzyskania odpowiedniej geometrii wirnika oraz najważniejsze wyzwania związane z programowaniem ścieżek obróbkowych. Przede wszystkim należy przygotować geometrie przygotówki. W przykładowym procesie technologicznym jako przygotówkę wybrano bryłę po procesie toczenia. Ze względu na prostotę przygotowania ścieżek obróbkowych, ich szczegółowy opis nie został uwzględniony w opracowaniu. Proces toczenia przygotówki obejmuje etapy takie jak: toczenie czoła, toczenie zgrubne profilu oraz toczenie wykończeniowe profilu. Następnie plik z geometria przygotówki należy wczytać do oprogramowania. Za pomoca funkcji przemieszczania komponentów bryła przedmiotu obrabianego oraz przygotówki powinna zostać odpowiednio spozycjonowana. Kluczowe jest dokładne umieszczenie przygotówki względem obrabianego przedmiotu, co zapewnia poprawność dalszych etapów procesu. Przed przystąpieniem do tworzenia procesu obróbki, konieczne jest również wczytanie geometrii imadła oraz maszyny. Geometrie imadła należy wczytać w ten sam sposób co geometrie przygotówki, a następnie precyzyjnie spozycjonować. Właściwe ustawienie imadła ma kluczowe znaczenie dla stabilności i dokładności obróbki. Podczas programowania ścieżek obróbkowych pojawiają się różne wyzwania wpływające na końcowy efekt procesu. Należy wymienić m.in.: dobór odpowiednich narzędzi skrawających, optymalizację parametrów skrawania oraz unikanie kolizji narzędzi z obrabianym przedmiotem i komponentami maszyny. Każdy z tych czynników musi być starannie przemyślany i zaplanowany, aby osiągnąć pożądane wyniki obróbki. Przedstawione kroki i wyzwania stanowią podstawę skutecznych procesów technologicznych prowadzących do uzyskania odpowiedniej geometrii wirnika. Poprawna realizacja każdego etapu jest kluczowa dla osiągnięcia wysokiej jakości i precyzji wytwarzanych komponentów. Geometria imadła powinna być wczytana i spozycjonowana zgodnie z rysunkiem 1. W opracowaniu wykorzystano mechaniczne imadło precyzyjne Hilma SCS 120, które charakteryzuje się wysoką dokładnością i powtarzalnością mocowania. Jest ono przeznaczone do precyzyjnej







Dofinansowane przez Unię Europejską



obróbki w centrach obróbczych 5-osiowych, a jego konstrukcja pozwala na mocowanie małych przedmiotów obrabianych, co jest szczególnie istotne przy obróbce precyzyjnej.

[Tekst alternatywny. Imadło maszynowe przedstawione w izometrycznym widoku 3D. Kolorami oznaczono różne elementy imadła: żółty - podstawa, brązowy - elementy mocujące, czerwony - szczęki. W centralnej części, oznaczonej jasnym szarym kolorem, znajduje się zamocowana geometria przedmiotu obrabianego, otoczona geometrią przygotówki zamocowanej w imadle.]



Rys. 1. Sposób zamocowania przygotówki i przedmiotu obrabianego w imadle maszynowy

Imadło ustawiono tak, aby część obrabiana i przygotówka znalazły się w jego środku. Po przygotowaniu imadła i części, należy załadować geometrię maszyny z biblioteki. Aby załadować model 3D maszyny, należy przełączyć się w tryb wytwarzania i w zakładce widok obrabiarki wczytać maszynę. Następnie pozycjonowano maszynę tak, by imadło było w centralnej części stołu obrabiarki. Do obróbki wybrano maszynę Hermle B300, 5-osiową frezarkę o sztywnej konstrukcji, z ruchami narzędzia w osiach X, Y, Z do 30 m/min oraz kątowych A (-110° do 110°) i C (0° do 360°). Maszyna Hermle B300 jest dostępna w Laboratorium Obrabiarek

Strona **5** z **23**







Dofinansowane przez Unię Europejską



Sterowanych Numerycznie na Politechnice Świętokrzyskiej. W razie braku dostępu do jej modelu można użyć maszyny o podobnej kinematyce. System chłodzenia narzędzi zapewnia chłodzenie zalewowe i przez oprawkę z ciśnieniem 40 bar, co skutecznie usuwa wióry ze strefy obróbki. Opcję tę można wykorzystać podczas projektowania procesu obróbki. Na rysunku nr 2 przedstawiono widok obrabiarki z zamocowaną w imadle przygotówką.

[Tekst alternatywny. Trójwymiarowy model maszyny CNC Hermle B300. Na środku stołu zamontowane jest imadło z obrabianym elementem. Widoczny jest korpus maszyny w jasnoszarym kolorze, a imadło wyróżnia się żółtymi i czerwonymi elementami. Na obrazie zaznaczone są osie XYZ maszyny oraz układ współrzędnych.]





Aby zdefiniować punkt zerowy przedmiotu obrabianego, w widoku geometrii zakładki nawigator operacji ustawiono układ tak, by punkt zerowy (X=0, Y=0, Z=0) znajdował się na górnej ściance przedmiotu. Dla symulacji obróbki i generowania kodu NC ważne jest, aby kierunki osi X i Y pokrywały się z układem obrabiarki. Następnie zdefiniowano części, przygotówki i obiekty chronione, zaznaczając wszystkie elementy imadła, co pozwoli wykrywać potencjalne kolizje z całą jego geometrią (rys. 3.).

Strona 6 z 23







Dofinansowane przez Unię Europejską



[Tekst alternatywny. Okno dialogowe "Półfabrykat" w programie CAM, prezentujące opcję "Wyświetl" w zakładce "Geometria" dla "Określ część", "Określ przygotówkę" oraz "Określ obiekty chronione". W dolnej części okna parametr "Odsunięcie części" ustawiony jest na zero. W zakładce "Opis" przypisano parametr "Workpiece". Po prawej stronie znajduje się trójwymiarowy model obrabianego elementu umieszczonego w imadle, z widocznymi osiami XYZ. Imadło wyróżnione jest kolorem czerwonym, obrabiany element kolorem złotym, a półfabrykat przedstawiono jako przezroczysty jasnoczerwony model.]



Rys. 3. Określenie geometrii

Aby rozpocząć obróbkę wirników, zdefiniowano dodatkową geometrię wirnika. Z zakładki "utwórz geometrię" wybrano typ geometrii "mill_multi_blade". Wskazano elementy wirnika w zakładce geometrii obróbki wielu łopatek. Na rys. 4 pokazano odpowiednie części wirnika.

[Tekst alternatywny. Na zdjęciu znajduje się okno dialogowe oprogramowania NX do wskazania geometrii obróbki wielu łopatek. W zakładce "Oś części" przypisano parametr "+ZM", a w zakładce "Geometria" zdefiniowano części wirnika: "Określ piastę", "Określ bandaż", "Określ łopatkę", "Określ zaokrąglenie łopatki" oraz "Określ rozdzielacze łopatek". Panel sterowania po lewej stronie umożliwia definiowanie geometrii komponentów wirnika, które są oznaczone czerwonymi strzałkami wskazującymi na odpowiednie elementy w trójwymiarowym modelu wirnika po Strona 7 z 23







Dofinansowane przez Unię Europejską



prawej stronie. W oknie dialogowym w zakładce "Zmiana położenia" parametr "Całkowita liczba łopatek" ma przypisaną wartość "4".]





Definicja piasty odnosi się do całości wirnika i w tym miejscu zaznaczona powinna być cała ścianka wirnika (kolor morski). Geometria bandaża powinna być zaznaczona tylko dla jednej łopatki (kolor pomarańczowy). Przy geometrii łopatki (kolor niebieski) należy zaznaczyć wszystkie ścianki boczne łopatki wraz z promieniem zaokrąglenia przy przejściu. Następnie wskazuje się zaokrąglenie łopatki (kolor zielony). Ostatnią geometrią do zaznaczenia jest geometria rozdzielacza łopatek, obejmująca ścianki boczne oraz ścianki zaokrąglenia. Szczegóły dotyczące wyboru tej geometrii ukazano na rys. 5. Definicja geometrii skupiona jest na jednej łopatce, co ułatwia pracę. Definiowanie części geometrii na różnych łopatkach powoduje błędy i uniemożliwia wygenerowanie poprawnej ścieżki obróbkowej. Definicja odnosi się tylko do jednej łopatki, gdyż w kolejnym parametrze definiujemy całkowitą liczbę łopatek, w tym przypadku są to cztery łopatki. To znacząco upraszcza pracę, szczególnie przy większych ilościach łopatek.





Rzeczpospolita Dofinansowane przez Polska Unię Europejską



[Tekst alternatywny. Interfejs oprogramowania NX do projektowania rozdzielaczy łopatek wirnika z modelem 3D. Panel "Geometria rozdzielacza łopatek" umożliwia wybór ścianek bocznych i zaokrągleń, definiując obszar widoczny na modelu 3D. Czerwone strzałki wskazują, które ścianki zaznaczyć.]



Rys. 5. Definicja geometrii rozdzielacza łopatek

Przed kolejnymi krokami upewniono się, że geometrie w nawigatorze operacji są w odpowiedniej kolejności. Kluczowe jest, aby geometria "MCS_MILL" była nadrzędna, "WORKPIECE" podrzędna względem "MCS_MILL", a "MULTI_BLADE_GEOM" podrzędna wobec "WORKPIECE". Taka konfiguracja zapewnia automatyczny wybór wszystkich geometrii nadrzędnych przy wyborze "MULTI_BLADE_GEOM". Umożliwia to jednoczesną analizę przedmiotu obrabianego, obiektów chronionych, przygotówki i układu współrzędnych podczas tworzenia ścieżek obróbkowych (rys. 6.).

[Tekst alternatywny. Na obrazie przedstawiono drzewko nawigacyjne oprogramowania CAD/CAM, które służy do zarządzania geometrią i konfiguracją operacji obróbki. Drzewko składa się z następujących elementów: "GEOMETRY", "Nieużywane elementy", "MCS_MILL", "WORKPIECE", "MULTI_BLADE_GEOM".









Wszystkie geometrie są ze sobą połączone nadrzędnie za pomocą szarej przerywanej kropkowanej linii w kolejności wymienionej powyżej.]



Rys. 6. Definicja zależności geometrii









Dofinansowane przez Unię Europejską



3. Przygotowanie ścieżek obróbkowych

Tworzenie ścieżek obróbkowych jest kluczowe dla zapewnienia dokładności wymiarowo-kształtowej obrabianych przedmiotów. Staranne zaplanowanie i zaprogramowanie ścieżek wpływa na jakość końcowego produktu, zwłaszcza w przypadku skomplikowanych kształtów i wysokich wymagań tolerancyjnych. Aby wygenerować ścieżkę zgrubną, należy najpierw określić narzędzie. Możliwe są dwa podejścia technologiczne: obróbka zgrubna za pomocą frezu trzpieniowego monolitycznego lub frezu kulowego. W zależności od kształtu przedmiotu, jego wirnika oraz ilości materiału do usunięcia, w przypadku dużych wirników zaleca się stosowanie frezów trzpieniowych lub walcowo-czołowych wykonanych z węglików spiekanych. Możliwa jest również obróbka przy użyciu frezów kulowych. W niniejszym przykładzie proces zostanie przeprowadzony przy użyciu frezu kulowego. Na potrzeby opracowania pierwszej ścieżki zgrubnej należy utworzyć narzędzie lub wybrać je z biblioteki dostępnych narzędzi. Do obróbki zgrubnej zostanie zastosowany frez kulowy o średnicy 4 mm. W celu przygotowania ścieżki obróbkowej należy utworzyć operację i w zakładce typ wybrać "mill multi blade". Jako operację należy wybrać "obróbka zgrubna wirnika". Kolejnym krokiem jest zdefiniowanie narzędzi i geometrii. Należy wybrać zdefiniowane narzędzie (frez kulowy 4 mm) oraz geometrię "MULTI BLADE GEOM".

[Tekst alternatywny. Na obrazie widoczny jest zrzut ekranu interfejsu oprogramowania do obróbki zgrubnej wirnika. Po lewej stronie znajduje się panel ustawień procesu "Obróbka zgrubna wirnika - [IMPELLER ROUGH]". Panel zawiera sekcje takie jak: "Prognoza", "Bazowy", "Geometria", "Osie i pominięcia", "Posuwy i obroty", "Strategia", "Ruchy pomocnicze", "Pominiecia", "Metoda i tolerancja", "Kontrola narzędzia, przejścia", "Opcje". Widoczne są opcje konfiguracji głębokości skrawania w zakładce "opcje głębokości". Po prawej stronie okna dialogowego ustawiono kolejno: "Typ głębokości" jako "Interpolacja od bandaża", "Głębokość skrawania" – "Stała", "Odległość" – "30.0000" – "% średnicy narzędzia", "Typ zakresu" – "Automatycznie", "Początek globalny %" – "0.0000", "Koniec globalny %" - "100.0000", "Niekompletne poziomy" - "Wyjdź i ostrzeż". W zakładce "Podgląd" po lewej stronie zaznaczone jest okienko przy opcji "Podgląd". W zakładce "Ustawienia wzoru" określono parametry: "Szyk skrawania" – "Zygzak i wyjdź", "Kierunek obróbki" – "Współbieżny", "Szerokość" – "Stała", "Odległość maksymalna" – "20.0000" "%Średnicy narzędzia". Poniżej znajdują się 4 ikony graficzne w kształcie kwadratów do zarządzania operacją. Na dole okna znajdują się dwa przyciski: po lewej "OK" i po Strona 11 z 23





Dofinansowane przez Unię Europejską



prawej "Anuluj". Po prawej stronie rysunku widoczna jest wizualizacja ścieżki narzędziowej wirnika, na którym nałożone są ścieżki narzędzia przedstawione jako zielone, niebieskie i jasnoniebieskie linie, wskazujące trajektorię ruchu narzędzia skrawającego. Widoczna jest także osie układu współrzędnych XC, YC i ZC w prawym górnym rogu.]





Po otwarciu okna dialogowego należy ustawić kluczowe parametry obróbki. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe parametry oraz wygenerowaną dla nich ścieżkę obróbkową. Najważniejsze parametry, na które należy zwrócić uwagę, to głębokość skrawania oraz odległość definiująca szerokość skrawania, czyli odstęp pomiędzy kolejnymi ścieżkami skrawającymi na tym samym poziomie obróbki. Należy pamiętać o parametrach technologicznych narzędzia, takich jak prędkość skrawania i posuw, zależnych od rodzaju i producenta narzędzia. Zaleca się stosowanie zaleceń producenta dla konkretnych narzędzi oraz korzystanie z narzędzi wykonanych z węglików spiekanych dla przyspieszenia procesu. W obróbce zgrubnej ustalono naddatki na obróbkę wykończeniową, np. 0,5 mm. Ścieżka obróbkowa powinna być zweryfikowana pod kątem kolizji przed generowaniem kolejnych ścieżek. Ważne jest aktywowanie opcji "sprawdź kolizje IPW" oraz "sprawdź narzędzie i oprawkę" podczas weryfikacji.



Dofinansowane przez Unię Europejską



[Tekst alternatywny. Rysunek okna programu do wizualizacji ścieżki narzędzia. Po lewej stronie znajduje się panel ustawień z opcjami takimi jak: numer narzędzia ("G010/29245-12.850-26-417"), tryb wyświetlania ("Dynamiczny 3D"), "widok narzędzia" – "narzędzie", "ścieżki narzędzia" – "Brak", "liczba ruchów" – "10", "dokładność IPW" – "średnia" oraz różne opcje wyświetlania i animacji. Poniżej zaznaczone są dwa kwadratowe okienka odpowiedzialne za opcje kolejno od góry: "Sprawdź kolizję IPW" oraz "Sprawdź narzędzie i oprawkę". Na dole widoczne są przyciski "OK" i "Anuluj". Nad nimi znajdują się ikony do zarządzania symulacją z paskiem prędkości. Po prawej stronie okna znajduje się trójwymiarowa wizualizacja wyniku frezowania wirnika. Obrabiana bryła jest jasnoniebieska. Widoczne są także osie współrzędnych (ZM, ZC, YM) oraz przyciski do sterowania animacją.]



Rys. 8. Weryfikacja ścieżki narzędziowej

Wizualizacja ta przedstawia w formie graficznej usunięty materiał oraz wyświetla regiony, w których należy jeszcze usunąć materiał w celu uzyskania odpowiedniej geometrii. Aby upewnić się, że ścieżka obróbkowa nie zawiera ruchów kolizyjnych narzędzia z przygotówką, można sprawdzić położenie narzędzia w każdym pojedynczym położeniu przez naciśnięcie klawisza myszy na ścieżkę. Wówczas pojawi się aktualne położenie narzędzia względem przedmiotu oraz uchwytu, co pozwala sprawdzić, czy zachowana odległość jest bezpieczna. Na rys. 9 przedstawiono przykładową weryfikację za pomocą tej metody.







Rzeczpospolita Dofinansowane przez

Unię Europejską

[Tekst alternatywny. Rysunek 3D przedstawia proces frezowania zgrubnego. Narzędzie tnące w szarym i złotym kolorze jest umieszczone w uchwycie narzędziowym (kolor jasnobrązowy) nad obrabianym elementem. Element jest pokazany w odcieniach niebieskiego i złotego. Ścieżka narzędzia jest oznaczona przerywanymi liniami w kolorach niebieskim, jasnoniebieskim i zielonym. Element jest zamocowany w czerwonym uchwycie z widocznymi zaciskami. W pobliżu elementu znajdują się osie współrzędnych oznaczone ZM, ZC i YM, wskazujące trójwymiarową przestrzeń.]



Rys. 9. Weryfikacja położenia narzędzia

W tym przypadku położenie i odchylenie narzędzia względem imadła jest bezpieczne. Do weryfikacji wybrano ścieżkę narzędziową blisko imadła. Aby upewnić się, że ścieżka nie powoduje kolizji wrzeciona obrabiarki z imadłem lub wrzeciona ze stołem obrabiarki, należy przeprowadzić symulację. Na tym etapie można zweryfikować położenie wrzeciona maszyny na każdym etapie ścieżki obróbkowej i wykryć potencjalne kolizje.

[Tekst alternatywny. Trójwymiarowy obraz ilustruje proces obróbki mechanicznej. W centralnej części znajduje się imadło maszynowe, złożone z brył w kolorach czerwonym, żółtym oraz brązowym, a także okrągły element w kolorze błękitnym. Nad tym elementem, po lewej stronie, zamontowane jest narzędzie, widoczne z wrzecionem oraz mocowaniem, które są w kolorze szarym. Całość umieszczona







Dofinansowane przez Unię Europejską



jest na tle stołu maszyny, również oznaczonego kolorem szarym. Widoczne są osie współrzędnych ZM, YM oraz XM.]



Rys. 10. Symulacja obrabiarki

Po weryfikacji ścieżki obróbki dla jednej łopatki można generować ścieżki dla pozostałych. Aby uniknąć dokładnego analizowania każdej ścieżki, można przekształcić istniejącą ścieżkę obróbkową. Wybrano ścieżkę, którą należy powielić, a następnie za pomocą opcji "obiekt" i "przekształć" aktywowano funkcję przekształcania ścieżek obróbkowych. W tym przypadku wybrano obrót wokół punktu maszynowego układu współrzędnych, dzieląc zakres 360 stopni na cztery części i tworząc trzy kopie. Wynik pokazany jest na rys. 11.

[Tekst alternatywny. Ekran programu do przekształcenia ścieżki narzędziowej. Po lewej stronie widnieje okno dialogowe zatytułowane "Przekształcenia". Wybrano typ przekształcenia "Obróć wokół punktu". Ustawione parametry to: "Metoda kąta" – "Określ", "kąt" – "360.0000", "podział odległości kąta" – "4" oraz "liczba niepowiązanych kopii" - "3". Po prawej stronie ekranu znajduje się trójwymiarowy model turbiny, widoczny z góry w perspektywie. Kolorowe ścieżki (zielone, niebieskie i jasnoniebieskie) są umiejscowione w centralnej części. Widoczne są osie współrzędnych (ZC, YC, XC) w centrum wirnika. Elementy imadła maszynowego zaznaczone są na czerwono.]

Strona 15 z 23





Rys. 11. Ścieżki obróbkowe po operacji przekształcenia

Tworzenie kolejnych ścieżek obróbkowych w ten sposób minimalizuje ryzyko kolizji, ponieważ operacja ta kopiuje już sprawdzoną ścieżkę pod względem kolizji. Kolejne ścieżki obróbkowe będą tworzone w identyczny sposób. Po operacji frezowania zgubnego przystąpiono do obróbki wykończeniowej łopatki wirnika. Do tej operacji użyto tego samego frezu, przy czym głębokość skrawania ustalono na poziomie 10% średnicy narzędzia. Wynik generowania ścieżki narzędziowej dla frezowania wykończeniowego łopatki przedstawiono na rysunku 12.

[Tekst alternatywny. Trójwymiarowy obraz przedstawia ścieżkę narzędziową. W centrum znajduje się szary wirnik turbiny umieszczony w czerwonym uchwycie. Po lewej stronie nad wirnikiem jest narzędzie do obróbki oznaczone kolorami szarym i złotym. Jasnobrązowy odcień przedstawia uchwyt narzędziowy. Od narzędzia do wirnika biegnie przerywana niebieska linia wskazująca ścieżkę narzędziową. Na powierzchni wirnika widoczne są zielone i jasnoniebieskie ścieżki. W prawym górnym rogu znajdują się osie współrzędnych. W lewym dolnym rogu widać schematyczny sześcian z osiami współrzędnych.]





Rys. 12. Ścieżka obróbkowa wykończeniowa dla łopatki

Najpierw wykonano przekształcenie, zachowując te same parametry jak dla obróbki zgrubnej. Następnie, obróbka wykończeniowa rozdzielacza wirnika została przeprowadzona przez wybór rozdzielacza łopatek w zakładce geometrii. Zmiana ta umożliwiła dostosowanie geometrii do obróbki. Na rysunku 13 pokazano wynik generowania ścieżki obróbkowej dla rozdzielacza łopatek.

[Tekst alternatywny. Trójwymiarowy obraz przedstawia ścieżkę narzędziową. W centrum znajduje się szary wirnik turbiny, umieszczony w czerwonym uchwycie. Przerywana niebieska linia symbolizuje ścieżkę narzędziową. Na powierzchni wirnika widoczne są kolorowe ścieżki w kolorze zielonym i jasnoniebieskim. W centrum znajdują się osie współrzędnych.]



Strona 17 z 23



Politechnika Świętokrzyska Projekt "Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki" Kielce University of Technology nr FERS.01.05-IP.08-0234/23 Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita I Polska

Dofinansowane przez Unię Europejską



Rys. 13. Ścieżka obróbkowe wykończeniowa rozdzielacza Następną operacją jest wykończenie piasty wirnika. Wynik tej operacji został przedstawiony na rys. 14. Początkowo zaproponowano ścieżkę z dużą liczbą przejazdów poza materiałem (rys. 14a). Ze względu na dużą ilość przejazdów poza materiałem, zmieniono szyk skrawania, aby ograniczyć ich ilość. W rezultacie osiągnięto ścieżkę obróbkową przedstawioną na rys. 14b.

[Tekst alternatywny. Po lewej stronie znajduje się trójwymiarowy obraz przedstawiający ścieżkę narzędziową. W centrum widoczny jest szary wirnik turbiny, umieszczony w czerwonym uchwycie. Przerywana niebieska linia wskazuje ścieżkę narzędziową. Na powierzchni wirnika zaznaczone są zielone i różowe ścieżki narzędziowe. W centrum znajdują się osie współrzędnych. Po prawej stronie znajduje się trójwymiarowy obraz ścieżki narzędziowej. W centrum ponownie znajduje się szary wirnik turbiny zamocowany w czerwonym uchwycie. Nad wirnikiem, po lewej stronie, znajduje się narzędzie obróbcze oznaczone kolorami szarym i złotym. Jasnobrązowy kolor oznacza uchwyt narzędziowy. Przerywana niebieska linia od narzędzia do wirnika symbolizuje ścieżkę narzędziową. Ścieżki narzędziowe na powierzchni wirnika są koloru jasnoniebieskiego. W centrum znajdują się osie współrzędnych.]



Rys. 14. Ścieżka obróbkowa wykończeniowa piasty wirnika

Strona 18 z 23







a Dofinansowane przez Unię Europejską



Do obróbki pozostały zaokrąglenia między łopatkami a piastą wirnika. Użyto freza kulowego o średnicy 2 mm, we wcześniejszych operacjach użyto narzędzia o średnicy 4 mm. Ważna jest liczba ścieżek na piaście i łopatce, ponieważ wpływa to na jakość wykończenia promienia (rys. 15). Proces wykończenia promienia rozdzielacza łopatek został zaprogramowany identycznie jak wcześniejsza operacja, co widać na rys. 16.

[Tekst alternatywny. Trójwymiarowy obraz przedstawia ścieżkę narzędziową. W centrum widoczny jest szary wirnik turbiny umieszczony w czerwonym uchwycie. Przerywana niebieska linia oznacza ścieżkę narzędziową. Na powierzchni wirnika widoczne są kolorowe ścieżki w kolorze zielonym i jasnoniebieskim. W tle widoczne są osie współrzędnych.]





[Tekst alternatywny. Trójwymiarowy obraz przedstawia ścieżkę narzędziową. W centrum znajduje się szary wirnik turbiny zamocowany w czerwonym uchwycie. Przerywana niebieska linia ilustruje ścieżkę narzędziową. Na powierzchni wirnika widoczne są kolorowe ścieżki w odcieniach zieleni i jasnoniebieskiego.]



Rys. 16. Ścieżka obróbkowa wykończeniowa promienia rozdzielacza

Aby zweryfikować poprawność wszystkich ścieżek obróbkowych, wykonano weryfikację operacji. Po wybraniu ostatniej operacji oraz części obrabianej i aktywacji funkcji analizuj, tworzony jest model 3D aktualnej geometrii. Porównuje się go z geometrią docelową, umożliwiając sprawdzenie odchylenia w dowolnym punkcie. Generowana jest również mapa kolorów przedstawiająca naddatki obróbkowe do usunięcia. Na rys. 17 pokazano porównanie modelu rzeczywistego z teoretycznym. Maksymalny naddatek obróbkowy wynoszący 6 mm znajduje się na dnie wirnika i powinien zostać usunięty w kolejnych operacjach. Ta część służyła do mocowania wirnika w imadle maszynowym. Pozostałe fragmenty oznaczone są kolorem żółtym i pomarańczowym, mieszcząc się w założonym przedziale dokładności wykonania. Dokładniejsze odwzorowanie geometrii zwiększyłoby gęstość ścieżek obróbkowych, co wydłużyłoby czas obróbki.

[Tekst alternatywny. Trójwymiarowy model wirnika w kolorze żółtym, widoczny z góry w perspektywie. Model składa się z okrągłej, płaskiej podstawy oraz rozmieszczonych promieniście łopatek. W centrum widoczne są osie współrzędnych. Po prawej stronie obrazu znajduje się skala kolorów z wartościami numerycznymi od -0.04792 do 6.000. Kolory skali przechodzą od ciemnego fioletu u góry, przez niebieski, zielony, żółty, do jasnego pomarańczu na dole.]





Rys. 17. Model 3D będący efektem zaprogramowanych ścieżek obróbkowych



Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita D Polska

Dofinansowane przez Unię Europejską



4. Symulacja kodu NC

Po załadowaniu geometrii maszyny, przed przystąpieniem do symulacji kodu maszyny, należy wykonać kilka istotnych kroków. Symulacja kodu maszyny umożliwia dodatkową weryfikację rzeczywistego działania maszyny. W tym celu, z poziomu definicji maszyny, należy dodać pary kolizyjne do analizy. Istnieją trzy podstawowe metody symulacji kodu NC wraz z maszyną: symulacja oparta na ścieżce narzędzia, symulacja oparta na kodzie obrabiarki oraz symulacja programu zewnętrznego.

Symulacja oparta na ścieżce narzędzia odbywa się na danych pośrednich, uzyskanych bezpośrednio z wygenerowanej ścieżki narzędzia, względem układu współrzędnych zdefiniowanego w danym punkcie. W tej symulacji maszyna wraz z narzędziem porusza się po wygenerowanej ścieżce narzędzia, nie uwzględniając przejazdów pomiędzy operacjami, zdefiniowanych ruchów specjalnych oraz zdarzeń użytkownika, które wpływają na przeliczenia matematyczne ścieżki [1]. Symulacja oparta na kodzie obrabiarki jest przeprowadzana na rzeczywistym kodzie wygenerowanym przez odpowiedni postprocesor dla danego sterowania. Podczas uruchomienia tej symulacji, postprocessor przelicza dane pośrednie ścieżki i generuje wartości odpowiadające danemu sterowaniu [1]. Symulacja programu zewnętrznego pozwala na wczytywanie dowolnego pliku z odpowiednim rozszerzeniem zawierającym kod NC. Aby wczytać taki plik, należy wybrać opcję "Symulacja programu zewnętrznego", a następnie wskazać odpowiedni plik. Po wczytaniu pliku, w oknie symulacji pojawia się kod NC zawarty w pliku [1].

Strona 22 z 23







Dofinansowane przez Unię Europejską



5. Literatura

1. <u>https://www.camdivision.pl/pl/blog/symulacja-kodu-nc-rodzaje-symulacji-kdu</u> (dostępny 28.02.2025)

Strona 23 z 23

