

Łukasz CZERECH¹

OCENA WPŁYWU NADDATKU DLA OBRÓBKI WYKOŃCZENIOWEJ ORAZ TOPOGRAFII POWIERZCHNI SWOBODNEJ NA WARTOŚĆ I LOKALIZACJĘ ODCHYLEK

Wzrastająca dokładność obróbki realizowanej na maszynach CNC powoduje, że coraz częściej powierzchnie obrobione tą techniką nie podlegają dalszej obróbce wykończeniowej i bezpośrednio rzutują na jakość końcową wyrobu. Osiągnięcie wysokiej dokładności geometrycznej wytwarzanych elementów jest problemem, z którym współcześnie spotykają się technolodzy i programiści CAD/CAM. Poniższy artykuł jest częścią pracy dotyczącej badania wybranych parametrów technologicznych obróbki skrawaniem na strukturę geometryczną powierzchni swobodnych wytwarzanych na obrabiarkach CNC. Przedstawiono wpływ wartości naddatku dla obróbki wykończeniowej oraz topografii powierzchni krzywoliniowych na wartość oraz lokalizację odchyłek kształtu.

1. WPROWADZENIE

Obróbka elementów ograniczonych powierzchniami krzywoliniowymi jest obecnie stosowana w przemyśle do wytwarzania różnego rodzaju krzywek, wykrojników, wstawek formujących do form wtryskowych, elektrod do obróbki elektroerozyjnej oraz innych specjalistycznych narzędzi. Przy produkcji tych obiektów konieczne jest zachowanie wysokiej dokładności. Ponieważ coraz częściej spotyka się elementy maszyn, których powierzchnie krzywoliniowe współpracują ze sobą, a więc muszą znaleźć się w 7, 8 klasie dokładności. Ponadto od części tych wymaga się również dużej powtarzalności wymiarów oraz wysokiej jakości technologicznej warstwy wierzchniej.

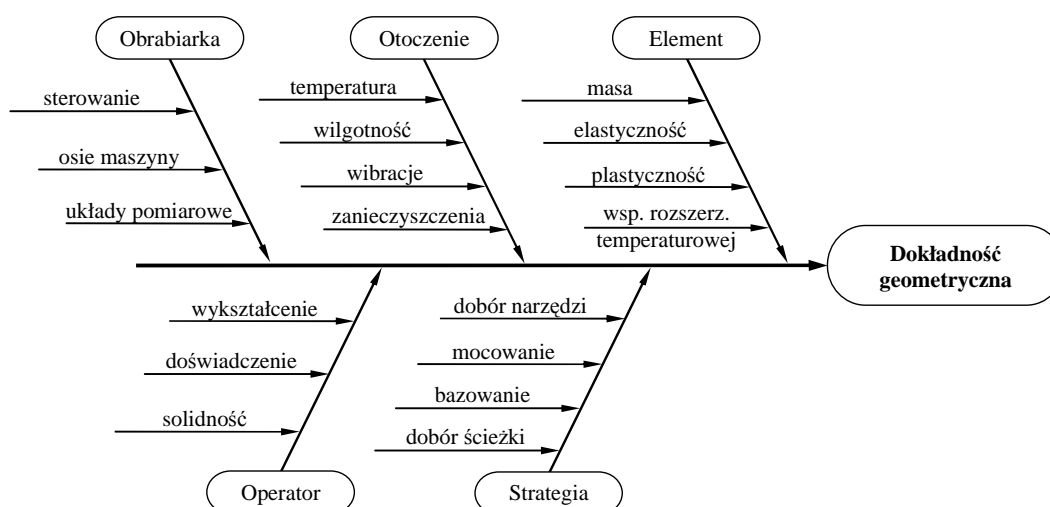
Wszystkie elementy wytwarzane na obrabiarkach sterowanych komputerowo są obarczone błędami obróbkowymi, które można pogrupować według różnych źródeł ich powstawania. Analiza literatury związanej z jakością obróbki CNC wskazuje, że opracowano wiele podejść mających na celu zmniejszenie odchyłek geometrycznych obrabianych powierzchni. Jednym z nich jest projektowanie procesu obróbki, w którym kontroluje się odpowiednie składowe siły skrawania poprzez dostosowywanie takich parametrów jak: prędkość skrawania, posuw lub szerokość warstwy skrawanej. Bardzo intensywnie rozwijane jest adaptacyjne sterowanie procesem obróbki w trybie on-line, korygujące wyżej wspomniane parametry w czasie rzeczywistym.

¹ Zakład Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka

Wysoka precyzja obrabiarek CNC, szybkość produkcji nowych narzędzi oraz elementów jest zdeterminowana przez obecny przemysł. Najlepiej zauważalne jest to w przemyśle samochodowym, ponieważ coraz częściej są tam stosowane techniki umożliwiające wyeliminowanie specjalistycznej obsługi lub ciągłego nadzorowania procesu produkcyjnego. Dlatego też opracowuje się specjalne oprogramowania oparte na sieciach neuronowych, które sterują pracą obrabiarek i umożliwiają adaptowanie się do aktualnego stanu w celu poprawy jakości wytwarzanych elementów. W pracy Lin i Tai [1] oraz Chen i Ling [2] dokładnie przedstawiono zastosowanie wyżej wspomnianych algorytmów do poprawy dokładności odwzorowania powierzchni formujących form wtryskowych.

2. PRZYCZYNY POWSTAWANIA ODCHYLEK

Diagram Ishikawy pokazany na rys.1 obrazuje wybrane przyczyny powstawania odchyłek. Istotny wpływ na dokładność obrobionego przedmiotu mają czynniki wywołane samym procesem skrawania, jak np. odkształcenia cieplne i sprężyste niektórych elementów w łańcuchu kinematycznym, czy zmiana współczynnika tarcia na powierzchniach, po których przemieszczają się obciążone siłami skrawania zespoły robocze obrabiarki.



Rys. 1. Diagram Ishikawy obrazujący wybrane przyczyny powstawania odchyłek
Fig. 1. Ishikawa Diagram showing the selected causes of deviations

Dokładność obrabiarki jest uzależniona od takich parametrów jak: prostoliniowość i prostopadłość osi, błędy skoku śruby, luz zwrotny, błąd nawrotu, błąd nadażania, prostopadłość wrzeciona, rozdzielczość napędów i pozycjonowania, rozdzielczość interpolatora oraz powtarzalność pozycjonowania. Całkowity błąd pozycjonowania narzędzia jest sumą wszystkich wyżej wymienionych błędów.

Serwonapędy napędzające osie robocze obrabiarki pracują w tzw. zamkniętej pętli sterowania położeniem. Regulator w serwonapędzie nieustannie stara się tak sterować

silnikiem, aby błąd pozycji był minimalny. Serwonapęd nie jest w stanie zareagować na uchyb położenia natychmiast, potrzebuje na to tyle czasu ile wynosi okres próbkowania regulatora położenia. Znaczącą rolę przy pozycjonowaniu odgrywa interpolacja zaprogramowanej ścieżki. Interpolator to część systemu sterowania, który odpowiada za dostarczanie serwonapędowi informacji z jaką szybkością i do jakiej pozycji powinna dojechać każda oś. Najważniejszym zadaniem interpolatora jest taka synchronizacja ruchów wszystkich osi, aby trajektoria narzędzia była zgodna z programem technologicznym. W pracach [3-7] autorzy analizują przyczyny powstawania błędów pozycjonowania oraz opracowują metody ich korekcji.

Jedno z największych źródeł odchyłek kształtu stanowią błędy geometryczne. Są one traktowane jako błędy obrabiarki, które występują nawet bez obciążenia mechanicznego i spowodowane są w głównej mierze niedoskonałością wykonania, niewystarczającą sztywnością, pogorszeniem stanu technicznego obrabiarki lub wzajemnego dopasowania podzespołów obrabiarki podczas współpracy, a mianowicie ich prostopadłości i równoległości. Powiększają się one drastycznie wraz ze wzrostem zużycia obrabiarki. Okafor i Ertekin w swej pracy [8] oraz Raksiri i Parnichkun [9] dokładnie opisują przyczyny powstawania tego rodzaju błędów, natomiast w pracach [10-14] autorzy skupiają się na metodach ich kompensacji.

Niwelowanie drgań oraz wibracji jest również jednym z głównych aspektów utrzymania prawidłowych parametrów obróbki. Dobrze wytłumione drgania to gwarancja dużej jakości obróbki, żywotności napędów, a przede wszystkim zredukowanie zużycia stosowanych narzędzi. Obrabiarki CNC wyposażone są standardowo w wibroizolatory, redukujące możliwość wpadania w drgania. Ponadto stosowanie listew zębatych oraz serwosilników redukuje do minimum ryzyko powstawania wibracji pochodzących od układu napędowego maszyny. W pracach [15-19] omówiono dokładnie metody minimalizowania wpływu drgań i wibracji na strukturę geometryczną obrabianych powierzchni.

Kolejną przyczyną powstawania odchyłek geometrycznych może być nieodpowiedni dobór ścieżek narzędziowych dostępnych w bibliotekach oprogramowania CAD/CAM. Optymalny ich rozkład na obrabianym elemencie przysparza wielu kłopotów dla technologów i programistów opracowujących programy technologiczne. Jest to szczególnie zauważalne u początkujących specjalistów w tej dziedzinie ponieważ nie są oni w stanie jednoznacznie powiązać wielu parametrów odpowiedzialnych za jakość procesu obróbki. Aby odpowiednio zaprogramować ścieżkę narzędziową należy zwrócić uwagę na to, aby tor, po którym będzie przemieszczało się narzędzia płynnie zmieniał kierunki, ponieważ gwałtowne zatrzymania jednej osi i przyspieszenia drugiej wpływają bardzo niekorzystnie na dokładność wykonania oraz żywotność obrabiarki. Nie można również nadmiernie zagęszczać ścieżki ponieważ może to znacznie wydłużyć czas obróbki, a co za tym idzie zużycie narzędzia, zmianę chropowatości i zmniejszenie dokładności elementu. Ścieżka narzędziowa powinna być optymalnie rozłożona po normalnej do powierzchni lub wzdłuż tworzących, tak aby skok pozostawał stały na całej powierzchni.

Niekiedy bywa, że niemożliwe jest zrealizowanie wyżej wspomnianych warunków za pomocą jednej ścieżki obróbkowej i konieczna jest obróbka jednego elementu wieloma rodzajami strategii. W takim przypadku należy optymalnie rozłożyć naddatek w miejscu

łączenia się powierzchni, aby uniknąć podcięć. Tak więc rodzaj ścieżki należy weryfikować lokalnie, a nie globalnie. W pracy Schutzer, Helleno i Pereira [20] opisano jak dobór odpowiedniej strategii obróbki wpływa na jakość obrobionej powierzchni oraz jak duży ma to wpływ przy powierzchniach krzywoliniowych.

Następnym równie istotnym parametrem wpływającym na proces tworzenia się odchyłek obróbkowych jest sztywność obrabiarki. Niestety nie ma obrabiarek nieskończenie sztywnych ponieważ nie ma nieskończenie sztywnych materiałów konstrukcyjnych - zawsze należy traktować priorytetowo problem sztywności. Większość profesjonalnych obrabiarek skrawających zbudowana jest na bazie solidnej monolitycznej, stalowej konstrukcji o budowie skrzyniowej zapewniającej maksymalną sztywność przy stosunkowo niewielkiej masie. Odpowiedzialne za sztywność podzespoły o skomplikowanych kształtach są odlewami żeliwnymi poddawanych odprężaniu i wyżarzaniu, a wszystkie elementy odpowiedzialne za dokładność są obrabiane na precyzyjnych centrach obróbkowych i szlifierkach CNC.

Proces obróbki i towarzyszące mu zjawiska także są istotnym źródłem powstawania odchyłek obróbkowych. W głównej mierze są to siły działające na obrabiarkę i obrabiany przedmiot, które zależne są od ciężaru elementów roboczych maszyny i przedmiotu obrabianego, sił skrawania oraz sił bezwładności. Problem ten został szerzej opisany w pracy [21]. Autorzy dokładnie opisują jak na siły skrawania wpływa geometria narzędzia i jak przekłada się to na jakość powierzchni. Natomiast Yaldiz i pozostali w pracy [22] prezentują jak wygląda urządzenie do pomiaru sił skrawania oraz jak przebiega proces optymalizacji obróbki z jego wykorzystaniem. W pracy [23] autorzy opracowali model matematyczny sił występujących podczas obróbki skrawaniem, a Tsai i Liao [19] implementują model przestrzenny sił skrawania do prognozowania i optymalizacji parametrów obróbki.

Kolejne źródło odchyłek stanowią te wynikające z odkształceń termicznych, które można podzielić na lokalne i wynikające ze środowiska pracy danej maszyny. Te pierwsze mogą pochodzić z tarcia powstającego w wyniku przemieszczeń współpracujących elementów, serwonapędów napędzających osie, innych przekładni oraz z samego procesu skrawania. To źródło odchyłek najciężiej jest wyeliminować, ponieważ są one trudne do przewidzenia i oszacowania. Zjawisko rozszerzalności termicznej znacząco wpływa na dokładność obróbki. Dla stali współczynnik ten wynosi 0,01mm/m na każdy stopień Celsjusza, w związku z tym przy skoku temperatury z 20 do 30°C, śruba napędowa może wydłużyć się o 0,1mm/m. Odkształcenia te są wywoływane rozszerzalnością cieplną materiałów konstrukcyjnych poddanych oddziaływaniu zmieniających się i zróżnicowanych pól temperatur.

Wielość źródeł ciepła i skomplikowany mechanizm jego przekazywania powoduje, że analityczne określenie temperatury poszczególnych elementów obrabiarki jest praktycznie niemożliwe. Szeroko natomiast są stosowane doświadczalne metody określania pól temperatur w obrabiarkach i wyznaczania odkształceń cieplnych. Jednak te metody są skomplikowane i pracochłonne, a uzyskane wyniki mają przybliżony charakter. Odkształcenia cieplne odwzorowują się na przedmiocie obrabianym w postaci błędów wymiarowych i błędów kształtu. Temat oszacowania i korekcji odchyłek termicznych opisano szerzej w pracach [24-26].

3. METODYKA I PRZEBIEG BADAŃ

Przeprowadzone badania miały na celu oszacowanie wpływu wartości naddatku dla obróbki wykończeniowej na proces tworzenia się odchyłek geometrycznych oraz w jakim stopniu topografia obrabianej powierzchni wpływa na ich lokalizację.

Jako obiekt analizy przyjęto wycinek matrycy tłoczniaka, służącego do wytwarzania kształtowych obudów wykorzystywanych do produkcji sprzętu rolniczego. Obiekt ten opisany został przy pomocy powierzchni krzywoliniowych techniką NURBS.

Podczas przeprowadzenia badania wykorzystano stanowisko badawcze w skład, którego wchodziły:

- a) komputer klasy PC, wyposażony w aplikację MasterCAM X4 MR2 wykorzystywaną do tworzenia oraz edycji powierzchniowych i bryłowych modeli geometrycznych obiektów oraz tworzenia programów technologicznych dla obrabiarek sterowanych numerycznie oraz aplikację Geomagic Qualify umożliwiającą sprawdzanie wytworzonych detali pod względem zgodności z danymi CAD;
- b) pionowe centrum obróbkowe sterowane numerycznie firmy AVIA VMC 650 ze sterowaniem Heidenhain iTNC530. Obrabiarka ta jest wykorzystywana do produkcji wykrojników, krępowników, form wtryskowych oraz dodatkowego osprzętu do wyżej wspomnianych narzędzi;
- c) współrzędnościowa maszyna pomiarowa Global Performance 07 07 05, sprzężona z komputerem klasy PC, który za pomocą oprogramowania PC-DIMS steruje pracą CMM.

Eksperyment został przeprowadzony według następującego algorytmu:

1. przygotowanie modelu geometrycznego w środowisku CAD,
2. utworzenie programów technologicznych z wykorzystaniem ścieżek narzędziowych dostępnych w oprogramowaniu CAM,
3. obróbka elementów na trzyosiowym pionowym centrum frezarskim sterowanym numerycznie,
4. zaimportowanie badanej powierzchni do oprogramowania PC-DIMS sterującego pracą współrzędnościowej maszyny pomiarowej,
5. utworzenie programu pomiarowego do analizy dokładności geometrycznej powierzchni swobodnej,
6. pomiar wytworzonych elementów,
7. obróbka i analiza wyników pomiarów.

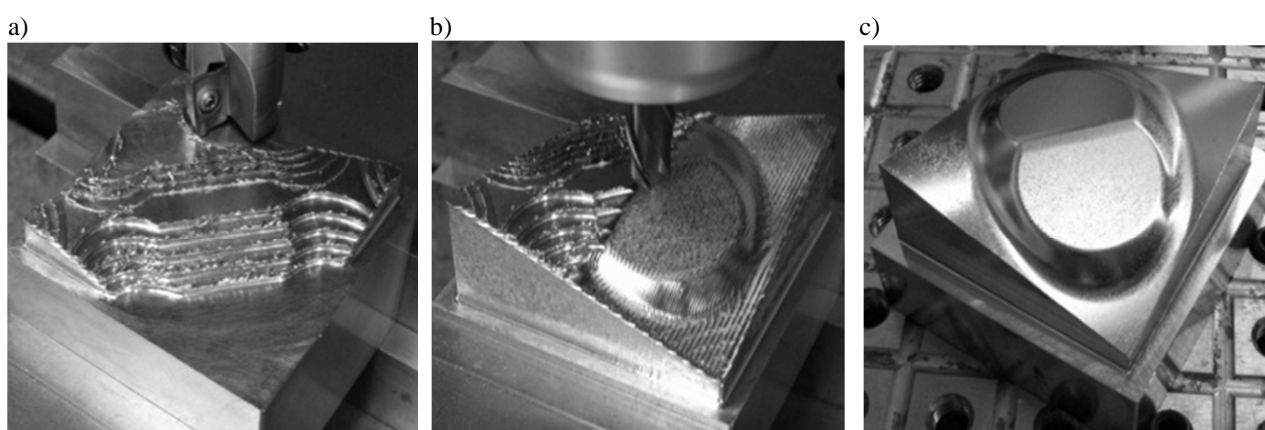
Postępując według założonego algorytmu w pierwszej kolejności utworzono model geometryczny obiektu ograniczonego powierzchniami krzywoliniowymi. Zrealizowano to w module „Design” dostępnym w środowisku MasterCAM X4. Dzięki bardzo rozbudowanemu modelowi geometrycznemu, dostępna ilość opisów powierzchni swobodnych umożliwiła bezproblemowe zamodelowanie badanego obiektu.

Do wytworzenia próbek wykorzystano materiał X38CrMoV5 (1.2343, WCL). Jest to stal stopowa narzędziowa stosowana na narzędzia do obróbki plastycznej na gorąco i do budowy form odlewniczych narażonych na bardzo wysokie temperatury w czasie pracy. Jest ona w głównej mierze wykorzystywana do wytwarzania matryc kuźniczych, wstawek form wtryskowych itp. Przygotówki zostały poddane procesowi ulepszania cieplnego w wyniku,

którego uzyskano twardość na poziomie 42-44HRC. W procesie tłoczenia elementów, odchyłki kształtu powierzchni swobodnych mogą powodować lokalne spiętrzenia naprężeń wywołanych złym dopasowaniem matrycy ze stemplem kształtującym. W przetwórstwie tworzyw sztucznych dokładność geometryczna powierzchni swobodnych jest również bardzo istotnym zagadnieniem. Współcześnie wytwarzane produkty konsumenckie, elementy wyposażenia samochodów oraz innych pojazdów zawierają powierzchnie, których tworzące są krzywymi. Niejednokrotnie determinuje to konieczność stosowania również krzywoliniowych powierzchni podziału. Z racji tego, iż tworzą one zamknięcie wokół wybrania formującego muszą one być bardzo dokładnie dopasowane do siebie, aby nie dochodziło do wydostawania się wtlaczanego tworzywa poza "gniazdo" formujące.

Kolejnym krokiem po przygotowaniu obiektu i doborze materiału na próbki było zaprogramowanie ścieżek narzędziowych oraz wytworzenie elementu. Proces obróbki płata powierzchni swobodnej (rys. 2) polegał na przeprowadzeniu czterech operacji technologicznych:

- obróbka zgrubna (kształtująca) - została wykonana za pomocą ścieżki HSM „obróbka rdzenia” dostępnej w bibliotece ścieżek oprogramowania MasterCAM X4 głowicą frezową dwuostrzową z wymiennymi płytkami firmy ISCAR o średnicy $\varnothing 25\text{mm}$ i promieniu zaokrąglenia naroża $r = 0,8\text{mm}$;
- obróbka pół-wykończeniowa (wyrównująca naddatek) - została zrealizowana przy użyciu ścieżki równoległej dwuostrzowym kulistym frezem palcowym, pełno-węglkowym o średnicy $\varnothing 12\text{mm}$ firmy HHW;
- obróbka wykończeniowa - przeprowadzona została z wykorzystaniem ścieżki równoległej dwuostrzowym kulistym frezem palcowym, pełno-węglkowym o średnicy $\varnothing 6\text{mm}$ firmy TIZ IMPLEMENTS;
- obróbka baz ustawczych – frezowanie z pomocą ścieżki 2D konturu zewnętrznego $60\text{mm} \times 60\text{mm}$ na głębokość 25mm frezem walcowo-czołowym sześciostrzowym, pełno-węglkowym o średnicy $\varnothing 12\text{mm}$ firmy HHW.



Rys. 2. Proces obróbki powierzchni swobodnej: a) obróbka zgrubna, b) obróbka pół-wykończeniowa, c) element po obróbce wykończeniowej baz ustawczych oraz płata analizowanej powierzchni

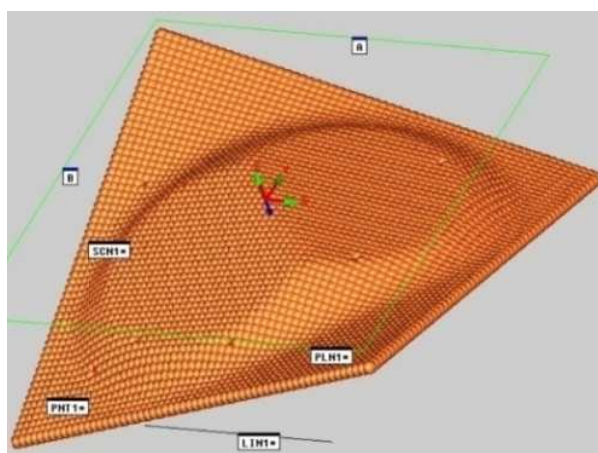
Fig. 2. Process of freeform surface machining: a) rough machining, b) semi-finish machining, c) part after finishing treatment of bases and analyzed surface

Aby wyeliminować wpływ zużycia narzędzi na stan technologicznej warstwy wierzchniej i nierównomierny rozkład naddatku, wszystkie operacje technologiczne wykonano nowymi kompletami narzędzi w jednym zamocowaniu. Natomiast, aby zminimalizować wpływ odkształceń termicznych, obróbkę badanych powierzchni przeprowadzano z odpowiednimi odstępami czasu.

W tabeli 1 zestawiano pozostałe parametry dotyczące: obrabiarki, narzędzia, materiału wykorzystanego na próbki i dodatkowych parametrów obróbki oraz ścieżki narzędziowej.

Tabela 1. Parametry obróbki
Table 1. Machining parameters

Obrabiarka	
Producent/ model	FOP AVIA S.A. / VMC 650
Sterowanie	Heidenhain iTNC 530
Czas pracy / czas wykonywania programów	21385 h / 11591 h
Narzędzie (wykończeniowe)	
Materiał	Węglik spiekany
Geometria	Frez palcowy kulisty
Średnica	Ø 6 mm
Ilość ostrzy	2
Przedmiot obrabiany	
Materiał	X38CrMoV5 (WCL)
Twardość	42-44 HRC
Parametry obróbki	
Prędkość skrawania	150 m/min
Posuw roboczy	0,06 mm/ost
Środek chłodzący	Sprężone powietrze
Parametry ścieżki	
Rodzaj ścieżki	Obróbka równoległa do osi X
Szerokość skrawania	0,05 mm
Głębokość skrawania	0,3 – 1,05 mm

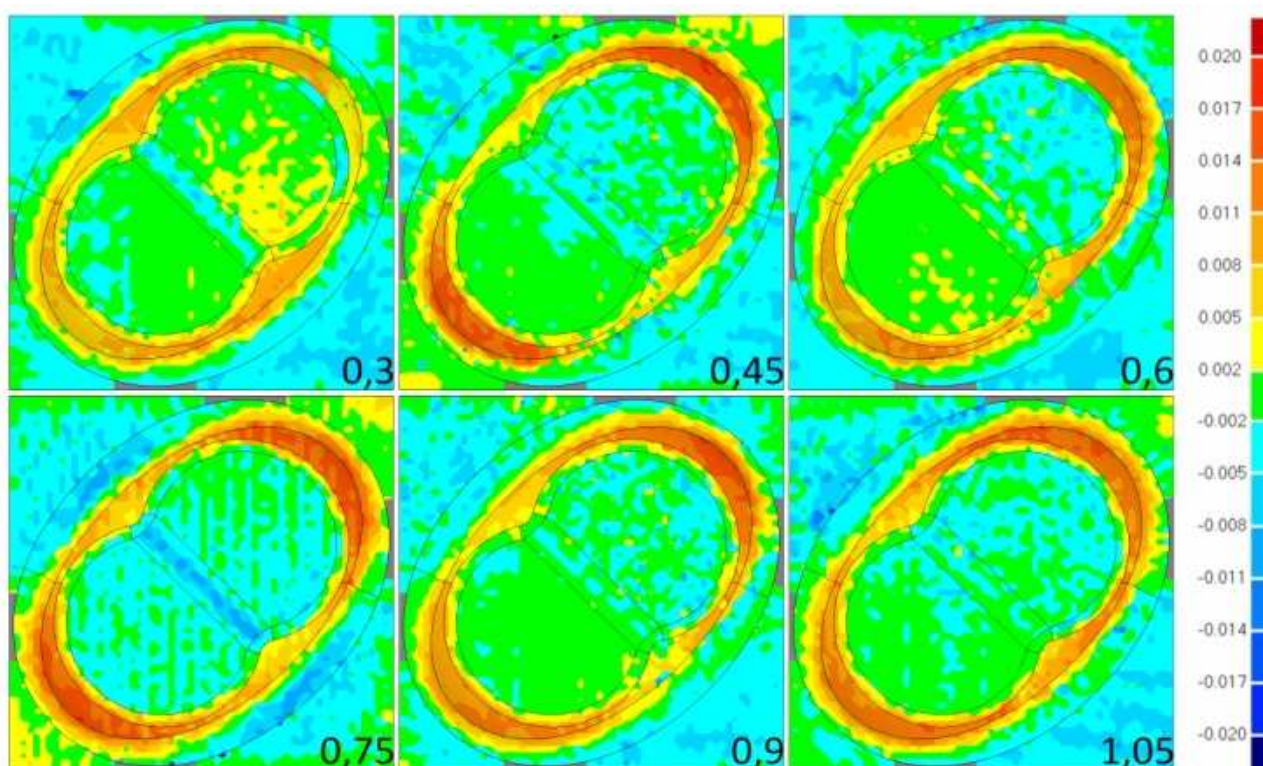


Rys. 3. Rozkład punktów pomiarowych
Fig. 3. Distribution of measurement points

Po wytworzeniu wszystkich próbek przystąpiono do pomiarów na współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Wykorzystano w tym celu automatyczną procedurę skanowania powierzchni „grid” dostępną w oprogramowaniu sterującym maszyną pomiarową. Generuje ona chmurę punktów pomiarowych równomiernie rozłożonych na zaimportowanym modelu. Przyjęto rozkład punktów z krokiem próbkowania 1mm, został on określony po przeanalizowaniu topografii powierzchni oraz średnicy końcówki trzpienia pomiarowego. Dzięki wykorzystaniu takiej konfiguracji uzyskano 3600 punktów pomiarowych, ilość ta była wystarczająca aby dokonać szczegółowej analizy wpływu wartości naddatku na wartość oraz lokalizację odchyłek geometrycznych powierzchni swobodnych. Na rysunku 3 przedstawiony jest płat powierzchni poddawanej analizie wraz z rozłożoną na nim chmurą punktów.

4. ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

Po przeprowadzeniu pomiarów wytworzonych próbek i przetworzeniu wyników zaimportowano je do oprogramowania Geomagic Qualify. W wyniku porównania modelu rzeczywistego reprezentowanego przez chmurę punktów pomiarowych z nominalnym modelem geometrycznym otrzymano mapy rozkładu odchyłek, które przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Graficzna prezentacja rozkładu odchyłek
Fig. 4. Graphic presentation of deviations distributions

Jak widać na graficznej prezentacji wyników pomiaru największe ujemne wartości odchyłek zlokalizowane są na obwodzie wypukłości w części centralnej obiektu. Podstawową przyczyną takiego stanu rzeczy może być wzrost kąta opasania narzędzia przez skrawany materiał oraz zmiana kierunku obróbki. Zjawisko to może być zdeterminowane niedostateczną sztywnością obrabiarki do tak dynamicznej obróbki lub też może informować o pogarszającym się stanie technicznym maszyny.

Największe dodatnie odchyłki występują w miejscach gdzie kąt opasania narzędzia był minimalny oraz w miejscach styku narzędzia z powierzchnią wzdłuż jej normalnej. W takim przypadku może dochodzić do zaniku skrawania i pojawienia się zjawiska nagniatania materiału obrabianego, wywołanego minimalną prędkością skrawania przy osi obrotu narzędzia.

Tabela. 2. Zestawienie wyników pomiaru
Table. 2. Summary of measurement results

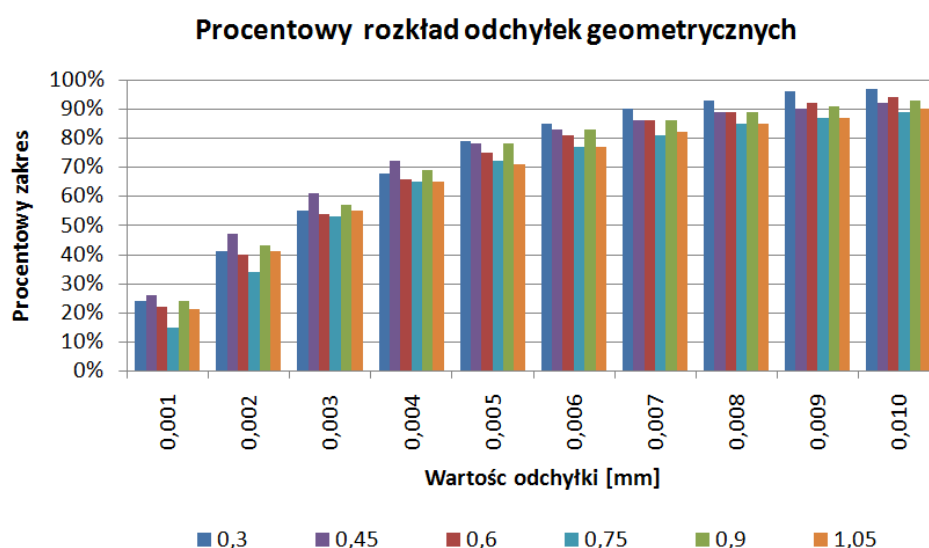
Parametr statystyczny	Wartość naddatku	Wynik
Mediana	0,45	0,00219
	0,9	0,00249
	1,05	0,00260
	0,3	0,00264
	0,6	0,00273
	0,75	0,00285
Maksymalne ujemnie	0,9	-0,01605
	0,3	-0,01667
	0,45	-0,01852
	1,05	-0,02053
	0,75	-0,02116
	0,6	-0,04656
Maksymalne dodatnie	0,45	0,01469
	0,9	0,01711
	1,05	0,01783
	0,75	0,01801
	0,6	0,01936
	0,3	0,02563

W tabeli 2 zestawiono statystyczne porównanie wyników pomiaru. Pogrupowano je pod względem rodzaju odchyłek zaobserwowanych, aby najlepiej zobrazować jak wartość naddatku dla obróbki wykończeniowej wpływa na dokładność odwzorowania obrabianej powierzchni.

Analizując relację pomiędzy wartością materiału pozostawionego dla obróbki wykończeniowej, a wynikiem pomiaru można stwierdzić, iż najmniej korzystne warunki obróbki dla użytego narzędzia zaistniały przy wartościach 0,6 – 0,75mm. Natomiast przy minimalnym nadadtku zaobserwowano znaczny wzrost maksymalnych dodatnich wartości odchyłki.

Obserwując wyniki w grupie maksymalnych ujemnych odchyłek można zauważyć, iż pomiędzy skrajnymi wartościami nadadtku, jest różnica rzędu 0,031mm. Tak duże odchylenia od wartości średniej mogą powodować spiętrzenia naprężeń współpracujących elementów w miejscach ich występowania.

Wykres na rysunku 5 obrazuje jaki procent punktów pomiarowych mieści się w założonej maksymalnej wartości odchyłki. Można zauważyć, iż próbki o najmniejszej wartości nadadtku mają największy udział procentowy dla większości wartości odchyłek i najdokładniej odwzorowują powierzchnię swobodną.



Rys. 5. Procentowy rozkład odchyłek geometrycznych płata powierzchni swobodnej
 Fig. 5. Percentage distribution of geometric deviations of freeform surface

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Analizując parametry statystyczne oraz mapy rozkładu odchyłek można stwierdzić, że wartość nadadtku pozostawionego dla obróbki wykończeniowej powierzchni swobodnych obrabianych na centrach sterowanych numerycznie jest istotnym parametrem. Determinuje on zjawisko tworzenia się wióra i decyduje o przebiegu samego procesu skrawania, a więc bezpośrednio rzutuje na jakość końcową wyrobu.

Po przeanalizowaniu wyników stwierdzono, iż najmniej korzystny jest zakres 0,6 – 0,75mm wartości nadadtku dla narzędzia o wyżej wspomnianej stereometrii ostrza. Minimalna wartości nadadtku (0,3mm) powoduje wzrost udziału procentowego punktów, dla których nie jest przekroczona założona wartość odchyłki, a zarazem wpływa korzystnie

na eliminację podcięć w miejscach, gdzie kąt opasania narzędzia się zwiększa. Niekorzystnym zjawiskiem przy niewielkich wartościach naddatku może być występowanie zjawiska zerowej prędkości skrawania w pobliżu osi obrotu kulistego freza palcowego, zwłaszcza w przypadku gdy narzędzie przemieszcza się po normalnej do obrabianej powierzchni.

Reasumując, duża wartość naddatku dla obróbki wykończeniowej powierzchni swobodnych może powodować wzrost podcięć, a niewielka jego wartość może prowadzić do lokalnego nagniatania materiału przez narzędzie. Powyższe informacje mogą być bardzo istotne przy projektowaniu procesu technologicznego dla elementów ograniczonych powierzchniami swobodnymi lub zestawów powierzchni o złożonej topologii.

Prace wykonano w ramach projektu współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego. Serdeczne podziękowania dla Zakładu Produkcji Narzędzi "BIANAR" Sp. z o. o. za pomoc w realizacji projektu.

LITERATURA

- [1] LIN J., TAI C., 1999, *Accuracy optimization for mould surface profile milling*, *Advanced Manufacturing Technology*, 15, 15–25.
- [2] CHEN J., LING C., 1996, *Improving the machine accuracy through machine tool metrology and error correction*, *Advanced Manufacturing Technology*, 11, 198–205.
- [3] CHENG Y., CHIN J., 2003, *Machining contour errors as ensembles of cutting, feeding and machine structure effects*, *Machine Tools & Manufacture*, 43, 1001–1014.
- [4] FINES J., AGAH A., 2008, *Machine tool positioning error compensation using artificial neural networks*, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21, 1013–1026.
- [5] KONG L., CHEUNG C., TO S., LEE W., DU J., ZHANG Z., 2008, *A kinematics and experimental analysis of form error compensation in ultra-precision machining*, *Machine Tools & Manufacture*, 48, 1408–1419.
- [6] QIU H., LI Y-B., LI Y., 2001, *A new method and device for motion accuracy measurement of NC machine tools. Part 2: Device error identification and trajectory measurement of general planar motions*, *Machine Tools & Manufacture* 41, 535–554.
- [7] YEH S., SU H., 2009, *Implementation of online NURBS curve fitting process on CNC machines*, *Advanced Manufacturing Technology*, 40, 531–540.
- [8] OKAFOR A., ERTEKIN M., 2000, *Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics*, *Machine Tools & Manufacture*, 40, 1199–1213.
- [9] RAKSIRI C., PARNICHKUN M., 2004, *Geometric and force errors compensation in a 3-axis CNC milling machine*, *Machine Tools & Manufacture*, 44, 1283–1291.
- [10] CABALLERO-RUIZ A., RUIZ-HUERTA L., BAIDYK T., KUSSUL E., 2007, *Geometrical error analysis of a CNC micro-machine tool*, *Mechatronics*, 17, 231–243.
- [11] LEI W., SUNG M., 2008, *NURBS-based fast geometric error compensation for CNC machine tools*, *Machine Tools & Manufacture*, 48, 307–319.
- [12] SCHWENKE H., KNAPP W., HAITJEMA H., WECKENMANN A., SCHMITT R., DELBRESSINE F., 2008, *Geometric error measurement and compensation of machines*, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57, 660–675.
- [13] UDDIN M., IBARAKI S., MATSUBARA A., MATSUSHITA T., 2009, *Prediction and compensation of machining geometric errors of five-axis machining centers with kinematic errors*, *Precision Engineering*, 33, 194–201.
- [14] TUREK P., MODRZYCKI W., JĘDRZEJEWSKI J., 2010, *Analiza metod kompensacji błędów obrabiarek*, *Inżynieria Maszyn*, 15, 130–149.
- [15] COLAK O., KURBANOGLU C., KAYACAN M., 2007, *Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods*, *Materials and Design*, 28, 657–666.

- [16] GOKKAYA H., NALBANT M., 2007, *The effects of cutting tool geometry and processing parameters on the surface roughness of AISI 1030 steel*, *Materials and Design*, 28, 717–721.
- [17] JANG D., CHOI Y., KIM H., HSIAO A., 1996, *Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an on line roughness measuring technique in hard turning*, *Machine Tools & Manufacture*, 36/4, 453–464.
- [18] PRAKASVUDHISARN C., KUNNAPAPDEELERT S., YENRADEE P., 2009, *Optimal cutting condition determination for desired surface roughness in end milling*, *Advanced Manufacturing Technology*, 41, 440–451.
- [19] TSAI C., LIAO Y., 2008, *Prediction of cutting forces in ball-end milling by means of geometric analysis*, *Materials Processing Technology*, 205, 24–33.
- [20] SCHUTZER K., HELLENO A., PEREIRA S., 2006, *The influence of the manufacturing strategy on the production of molds and dies*, *Materials Processing Technology*, 179, 172–177.
- [21] UMBRELLO D., AMBROGIO G., FILICE L., SHIVPURI R., 2008, *A hybrid finite element method–artificial neural network approach for predicting residual stresses and the optimal cutting conditions during hard turning of AISI 52100 bearing steel*, *Materials and Design*, 29, 873–883.
- [22] YALDIZ S., UNSACAR F., SAGLAM H., ISIK H., 2007, *Design, development and testing of a four-component milling dynamo-meter for the measurement of cutting force and torque*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21, 1499–1511.
- [23] LI X., NEE A., WONG Y., ZHENG H., 1999, *Theoretical modeling and simulation of milling forces*, *Materials Processing Technology*, 89-90, 266–272.
- [24] LI S., ZHANG Y., ZHANG G., 1997, *A study of pre-compensation for thermal errors of NC machine tools*, *Machine Tools and Manufacture*, 37/12, 1715–1719.
- [25] RAMESH R., MANNAN M., POO A., 2000, *Error compensation in machine tools - a review. Part II: thermal errors*, *Machine Tools & Manufacture*, 40, 1257–1284.
- [26] YANG M., LEE J., 1998, *Measurement and prediction of thermal errors of a CNC machining center using two spherical balls*, *Materials Processing Technology*, 75, 180–189.
- [27] TUREK P., KWAŚNY W., JEĐRZEJEWSKI J., 2010, *Zaawansowane metody identyfikacji błędów obrabiarek*, *Inżynieria Maszyn*, 15, 7-37.
- [28] CZERECH Ł., WERNER A., 2011, *Korekcja odchyłek obróbkowych profili krzywoliniowych wytwarzanych na frezarkach CNC*, *Postępy Nauki i Techniki*, 5/6, 104-112.
- [29] GRZESIK W., 1998, *Podstawy skrawania materiałów metalowych*, WNT, Warszawa.

IMPACT EVALUATION OF STOCK LEFT FOR FINISHING MACHINING AND FREEFORM SURFACE TOPOLOGY ON VALUE AND DISTRIBUTION OF DEVIATION

Increasing machining accuracy realized on CNC machines causes that the more frequently surfaces machined with this technique are not subject to further finishing processing and directly impinge on the final quality of the product. Achieving either geometric accuracy established by the constructor and the repeatability is the problem that modern technologists and CAD/CAM programmers have to faced with. This article is part of the research work of influence of selected machining parameters on geometric structure of the freeform surfaces machined on CNC machine tool. In this paper was presented influence of stock left for finish machining and surface topology on value and the distribution of shape deviations for freeform surfaces.