



Korekcja błędów obróbki złożonych powierzchni kształtowych na frezarskich centrach obróbkowych

Andrzej Werner

Zakład Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka

Streszczenie: Artykuł poświęcony jest tematyce związanej z korekcją błędów obróbkowych powierzchni krzywoliniowych wytwarzanych na frezarkach CNC. Korekcja ta wykonywana jest obecnie dwiema metodami. Pierwsza z nich, zwana on-line, wymaga stałego korygowania toru narzędzia w trakcie obróbki. Podejście takie wymaga stosowania rozbudowanych układów sterowania adaptacyjnego. Druga metoda – off-line polega na korygowaniu programu sterującego obróbką poza obrabiarką (na podstawie wyników pomiarów kontrolnych). W artykule przedstawiona została propozycja metodyki korekcji błędów obróbki powierzchni techniką off-line (bez stałego bezpośredniego połączenia z obrabiarką CNC). Metoda ta bazuje na wykorzystaniu systemów CAD/CAM, frezarek sterowanych numerycznie oraz współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Proponowany w artykule sposób postępowania zweryfikowany został na przykładzie powierzchni krzywoliniowej opisanej techniką NURBS. Realizacja proponowanej metodyki korekcji błędów obróbkowych wykazała istotną poprawę dokładności wytworzonej powierzchni kształtowej.

Słowa kluczowe: obróbka, korekcja błędów, pomiary współrzędnościowe, CAD/CAM

1. Wprowadzenie

Do najważniejszych błędów występujących podczas procesu skrawania na obrabiarkach ze sterowaniem numerycznym zaliczamy błędy związane ze: sposobem odwzorowania przedmiotu obrabianego, ustaleniem i zamocowaniem przedmiotu obrabianego, rozszerzalnością termiczną materiałów konstrukcyjnych oraz sztywnością układu OUPN (obrabianka–uchwyt–przedmiot–narzędzie) [1]. Tak duża ilość występujących błędów systematycznych i przypadkowych spowodowała rozwój badań mających na celu eliminację części składowych błędów i otrzymanie obróbki przedmiotu o wysokiej dokładności. Rezultatem było opracowanie dwóch metod korekcji błędów obróbki przedmiotów na obrabiarkach sterowanych numerycznie. Pierwsza z nich (metoda off-

line) polega na pośredniej korekcji programu obróbkowego. Druga – metoda kompensacji błędów obróbkowych – to metoda on-line, charakteryzująca się bezpośrednią realizacją korekcji podczas obróbki przedmiotu.

Analiza literatury związanej z korekcją błędów obróbkowych wskazuje, że opracowano wiele sposobów umożliwiających zwiększenie dokładności wytwarzania. Jednym z nich jest projektowanie procesu obróbki, w którym kontrolowane są siły skrawania przez dostosowywanie takich parametrów, jak posuw lub szerokość warstwy skrawanej. Skutkuje to tym, że narzędzie nie ugina się poza określony, dopuszczalny limit [2]. Rozwijane jest adaptacyjne podejście kontrolne on-line korygujące położenie narzędzia w czasie rzeczywistym. Podejście to wymaga uzbrojenia obrabiarki w sensory do kontroli parametrów mających wpływ na dokładność obróbki (np. ugięcie narzędzia, błąd przemieszczenia zespołu wykonawczego obrabiarki itp.) [3].

Szeroko stosowane są metody off-line obejmujące aktualizację ścieżki narzędzia na podstawie znanego rozkładu błędów obróbkowych. Wymaga ona przeprowadzenia serii testów obróbkowych i pomiarów kontrolnych mających na celu wyznaczenie zmodyfikowanej ścieżki narzędzia [4, 5].

Osobnym zagadnieniem w procesie kompensacji błędów obróbki jest odtworzenie pomiarowego układu współrzędnych po przeniesieniu przedmiotu z obrabiarki CNC na współrzędnościową maszynę pomiarową. Często dochodzi w tym przypadku do zniekształcenia wyników pomiarów. Próbą rozwiązania tego problemu jest propozycja wykonywania pomiarów współrzędnościowych bezpośrednio na obrabiarence po zakończeniu procesu obróbki [6]. Zwiększenie dokładności pomiarów wymaga tym przypadku wyznaczenia parametrów określających dokładność geometryczno-ruchową obrabiarki celem wyznaczenia macierzy kompensacji. Konieczne jest również wyposażenie obrabiarki w specjalistyczny system umożliwiający wykonanie bardziej złożonych pomiarów współrzędnościowych. Metoda ta jest efektywna w przypadku obróbki profili 2D z wykorzystaniem freza walcowo-czołowego.

Innym podejściem jest metodyka modyfikacji ścieżki narzędzia na podstawie wyliczonego ugięcia narzędzia. Ugięcie jest wyznaczane przez przetwarzanie opracowanych modeli symulacyjnych procesu [7]. Modele te uwzględniają przy kompensacji ścieżki narzędzia deformacje narzędzia, oprawki narzędziowej i wrzeciona na skutek działania sił skrawania.

Aplikacja strategii kompensacji ścieżki narzędzia rozwinięta została w redukcji błędów wytwarzanej powierzchni podczas obróbki kieszeni [8]. Wykazano, że niejednostajne zmiany błędów obrabianej powierzchni w obróbce kieszeni prostokątnej mogą być efektywnie zmniejszone przy użyciu proponowanej metodyki kompensacji uwzględniającej właściwy rozkład naddatków obróbkowych.

Osobnym zagadnieniem jest redukcja błędów obróbki elementów cienkościennych. Prace skupiają się głównie na redukcji ugięcia przedmiotu obrabianego [9]. Jednym z rozwiązań tego problemu jest propozycja wieloetapowego frezowania obiektów cienkościennych. Ograniczenie błędów obróbkowych osiągane jest przez odpowiednie usunięcie naddatku obróbkowego wieloma przejściami narzędzia [10]. Odbywa się to jednak kosztem znacznego wydłużenia czasu obróbki.

Analiza dostępnej literatury dotyczącej prezentowanej w artykule tematyki wskazuje, że stosunkowo często opisywane metody kompensacji błędów wywarzania dotyczą przedmiotów o prostej geometrii. W związku z tym, w pracy przedstawiony został sposób postępowania przy korekcji błędów obróbki metodą off-line w zastosowaniu do obiektów opisanych przy pomocy powierzchni swobodnych o skomplikowanych kształtach przestrzennych obrabianymi frezami z kulistą końcówką.

2. Korekcja błędów obróbki złożonych powierzchni kształtowych

2.1. Metoda korekcji błędów obróbkowych

Proponowana w artykule metoda korekcji błędów obróbkowych (rys. 1) jest metodą off-line. W metodzie tej w pierwszej kolejności tworzony jest model geometryczny wytwarzanego obiektu. Jest to model nominalny, dokładnie odwzorowujący kształt i wymiary przedmiotu. Model ten jest podstawą do utworzenia w systemie CAD/CAM programów sterujących obróbką na centrum frezarskim. W dalszej kolejności, po odpowiednim uzbrojeniu obrabiarki, realizowana jest obróbka części. Po wykonaniu obróbki przeprowadza się współrzędnościowe pomiary kontrolne wytworzonego obiektu.

Na podstawie wyników pomiarów kontrolnych określone są odchyłki zaobserwowane celem wyznaczenia dokładności obróbki. W dalszej kolejności porównywane są zaobserwowane odchyłki z wymaganą dokładnością wykonania. Jeżeli dokładność obróbki spełnia oczekiwania – proces wytwarzania jest zakończony. W przypadku kiedy uzyskana dokładność nie jest zadowalająca, przy-

stępuje się do korekcji błędów obróbkowych. Korekcja ta wymaga przebudowy nominalnego modelu geometrycznego na model korygujący występujące błędy obróbkowe, powtórnego utworzenia programów sterujących obróbką i powtórzenia obróbki. W przebudowie modelu geometrycznego wykorzystuje się dane zawarte w programie pomiarowym części, sterującym współrzędnościową maszyną pomiarową. W programie tym zawarte są informacje o punktach nominalnych znajdujących się na modelu geometrycznym części oraz o korespondujących z nimi punktami zaobserwowanymi. Na podstawie tych informacji wyznaczane są składowe odchyłki zaobserwowanych w osiach X, Y i Z. Składowe te wykorzystywane są w przebudowie modelu geometrycznego obiektu. Sposób wyznaczania składowych odchyłek i przebudowa modelu geometrycznego opisany został w dalszej części artykułu. Skorygowany model geometryczny obiektu wykorzystuje się do powtórnego utworzenia programów obróbkowych. Po ich uzyskaniu powtarza się obróbkę części i współrzędnościowe pomiary kontrolne. Jeżeli po powtórzeniu obróbki uzyskana dokładność jest nadal niezadowalająca, proces korekcji można powtórzyć ponownie. Należy zwrócić uwagę, że w kontrolnych pomiarach współrzędnościowych odchyłki obróbkowe określane są zawsze w odniesieniu do początkowego – nominalnego modelu geometrycznego obiektu.



Rys. 1. Metoda off-line korekcji błędów obróbkowych
Fig. 1. Method of off-line of machining error correction

2.2. Wyznaczanie odchyłek obróbkowych i przebudowa modelu geometrycznego

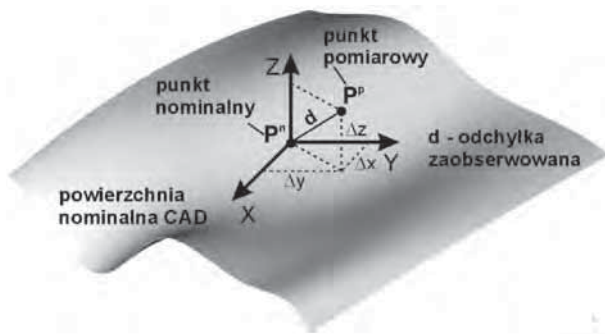
Kontrolne pomiary współrzędnościowe płata powierzchni swobodnej o obrysie prostokątnym przeprowadzić można przy równomiernym rozkładzie punktów pomiarowych. Uzyskuje się w ten sposób siatkę $n \times m$ punktów zaobserwowanych. Wykorzystać można w tym celu procedury skanowania powierzchni typu UVScan lub Grid (system PC-DMIS). Liczba punktów pomiarowych dopasowywana jest do stopnia skomplikowania kształtu przedmiotu.

W celu oszacowania dokładności wykonania powierzchni swobodnej opisującej wytwarzany obiekt należy wyznaczyć odchyłki obróbkowe w punktach pomiarowych. Miarą wyznaczanych odchyłek są odległości między punktami znajdującymi się na powierzchni modelu CAD (powierzchnia nominalna) a odpowiadają-

cymi im punktami zaobserwowanymi w wyniku pomiarów kontrolnych na maszynie współrzędnościowej. Odchyłki wyznaczone są w kierunku normalnym do obrabianej powierzchni (rys. 2).

Danymi wyjściowymi do określenia tych odległości oraz ich składowych są informacje zawarte w programie sterującym maszyną pomiarową. Po przeprowadzeniu pomiarów program zawiera informacje o współrzędnych punktów nominalnych i zaobserwowanych w trakcie pomiaru oraz o zaobserwowanych odchyłkach obróbkowych (rys. 3).

Dysponując tymi informacjami, przystępuje się do realizacji korekcy płata powierzchni opisującego kształt obiektu. W pierwszej kolejności wyznacza się w poszczególnych osiach układu współrzędnych składowe zaobserwowanych odchyłek obróbkowych. Do obliczeń wykorzystuje się następujące zależności:

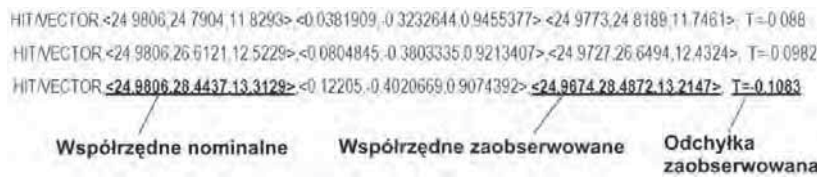


Rys. 2. Graficzna reprezentacja odchyłki obróbkowej
Fig. 2. Graphical representation of the machining deviation

$$\begin{aligned} \Delta x_{ij} &= x_{ij}^p - x_{ij}^n \\ \Delta y_{ij} &= y_{ij}^p - y_{ij}^n \\ \Delta z_{ij} &= z_{ij}^p - z_{ij}^n \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

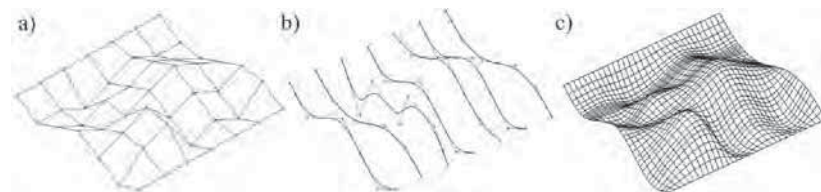
- $x_{ij}^p, y_{ij}^p, z_{ij}^p$ – współrzędne kolejnych punktów zaobserwowanych,
- $x_{ij}^n, y_{ij}^n, z_{ij}^n$ – współrzędne punktów na powierzchni nominalnej,
- x_{ij}, y_{ij}, z_{ij} – składowe odchyłek obróbkowych,
- i, j – współczynniki opisujące położenie punktu zaobserwowanego.



Rys. 3. Fragment programu sterującego współrzędnościową maszyną pomiarową (PC-DMIS)
Fig. 3. A part of the CMM control program (PC-DMIS)

Dysponując wyznaczonymi składowymi przystępuje się do tworzenia nowego modelu geometrycznego obiektu. W pierwszej kolejności wyznaczone zostały nowe skorygowane współrzędne punktów wg zależności:

$$\begin{aligned} x_{ij}^{kor} &= x_{ij}^n & x_{ij} \\ y_{ij}^{kor} &= y_{ij}^n & y_{ij} \\ z_{ij}^{kor} &= z_{ij}^n & z_{ij} \end{aligned} \quad (2)$$



Rys. 4. Budowa płata powierzchni: a) siatka punktów, b) seria krzywych, c) płat powierzchni
Fig. 4. Construction of the surface patch: a) grid points, b) a series of curves, c) surface patch

Wyznaczone nowe współrzędne punktów posłużą do utworzenia skorygowanego płata powierzchni. Zawiera on informacje o występujących błędach wytwarzania. W tworzeniu płata powierzchni wykorzystuje się techniki interpolacji. W pierwszej kolejności tworzona jest siatka punktów skorygowanych $n \times m$ (rys. 4a). Następnie na siatce tej tworzy się serię krzywych (rys. 4b), na których w dalszej kolejności rozpinany jest płat powierzchni (rys. 4c).

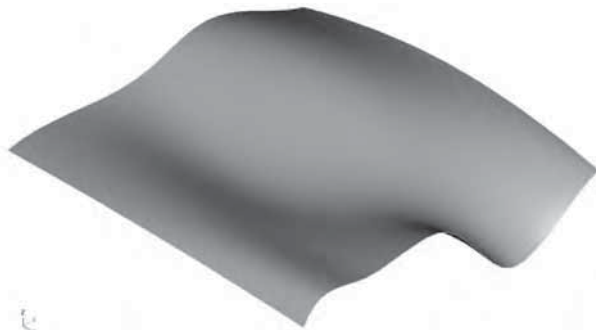
3. Praktyczna realizacja korekcji błędów obróbki złożonych powierzchni kształtowych

Metodyka korekcji błędów obróbkowych obiektu przestrzennego zrealizowana została dla części opisanej przy pomocy płata powierzchni swobodnej (rys. 5).

Praktyczna realizacja procesu korekcji błędów wymagała zastosowania stanowiska, w skład którego wchodziły:

- centrum frezarskie OMIS 1020 z układem sterowania iTNC530 HEIDENHAIN,
- współrzędnościowa maszyna pomiarowa Global Performance (Hexagon Metrology) z oprogramowaniem PC-DMIS,
- system CAD/CAM – Mastercam.

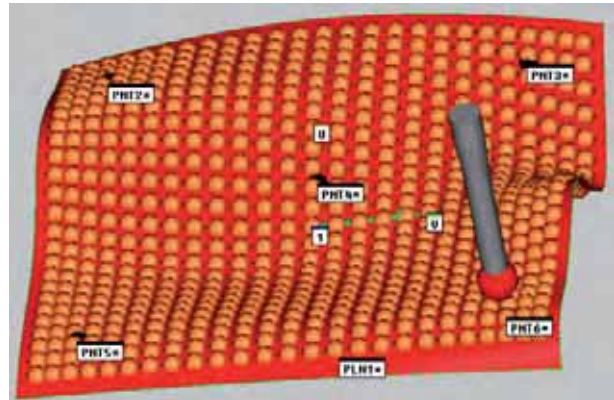
W pierwszej kolejności sporządzono model geometryczny wytwarzanego obiektu w systemie CAD/CAM (rys. 5). Model ten był podstawą do przygotowania programów sterujących obróbką części oraz programów pomiarowych służących do kontroli dokładności wykonania. Program sterujący centrum frezarskim obejmował obróbkę zgrubną, kształtującą i wykańczającą. Po obróbce kształtującej na powierzchni obrabianej pozostawiony został naddatek o grubości 0,3 mm. Do usunięcia tego naddatku wykorzystany został frez kulisty o średnicy 6 mm wykonany z węgla spiekane go pokrytego powłoką TiAlN. Zaprogramowane zostały równoległe przejścia narzędzia z odstępem 0,2 mm. Obróbka wykańczająca



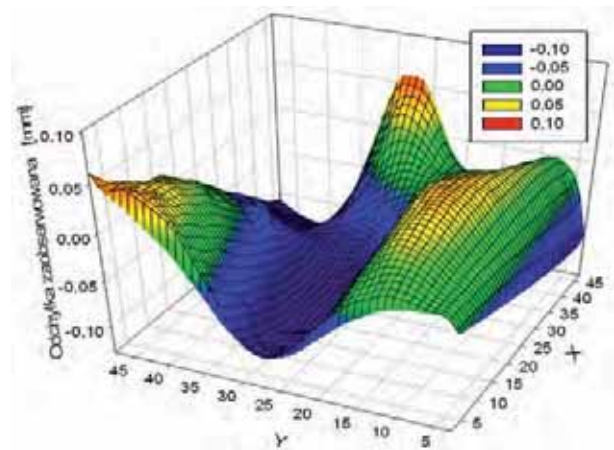
Rys. 5. Model powierzchniowy opisujący wytwarzany obiekt
Fig. 5. Surface model of the produced object



Rys. 6. Wytworzony obiekt
Fig. 6. The produced object



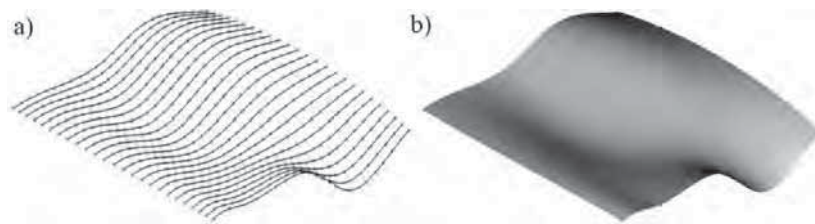
Rys. 7. Rozkład punktów pomiarowych
Fig. 7. Distribution of measuring points



Rys. 8. Rozkład odchyłek zaobserwowanych po obróbce
Fig. 8. Distribution of the observed deviations after machining

zrealizowana została przy obrotach wrzeciona równych 7500 obr/min oraz posuwie 300 mm/min. Przedmiot wytworzony został z aluminium PA6 (rys. 6). Wytworzona powierzchnia zawierała się wewnątrz kwadratu o długości boków 50 mm.

Po zakończeniu etapu wytwarzania badany obiekt poddany został pomiarom kontrolnym. Zastosowana została w tym celu współrzędnościowa maszyna pomiarowa Global Performance firmy Hexagon Metrology. Urządzenie uzbrojone zostało w sondę pomiarową SP25M z trzpieniem pomiarowym z kulistą końcówką o średnicy 4 mm. Z uwagi na to, że kształt wytwarzanego przedmiotu opisany został płatem powierzchni NURBS stopnia trzeciego, wytworzona powierzchnia nie wykazywała gwałtownych zmian kształtu. Pozwoliło to na wykorzystanie jednej z procedur automatycznego skanowania powierzchni dostępnych w systemie PC-DMIS. Procedura ta, zwana *Grid*, umożliwia uzyskanie równomiernego rozkładu punktów pomiarowych. Ostatecznie pomiary kontrolne zaprogramowane zostały dla siatki 25 × 25 punktów pomiarowych. Rozkład punktów pomiarowych na mierzonej powierzchni przedstawiony został na rys. 7.



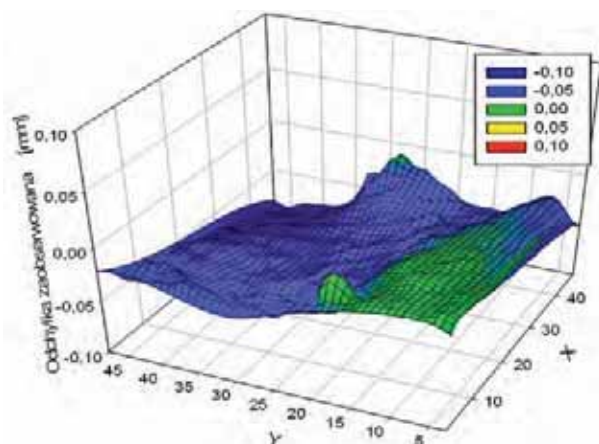
Rys. 9. Tworzenie skorygowanego modelu geometrycznego obiektu: a) punkty skorygowane i seria krzywych, b) płat powierzchni skorygowanej

Fig. 9. Creating of the corrected geometric model of the object: a) the adjusted points and a series of curves, b) surface patch

W wyniku przeprowadzonych pomiarów uzyskano informacje dotyczące 625 zaobserwowanych odchyłek, których rozkład został przedstawiony na rys. 8. Wszystkie wyznaczone odchyłki zawierały się w przedziale $(-0,13; 0,0756)$ mm. Uwzględniając uzyskane wartości odchyłek obróbkowych, podjęto decyzję o przeprowadzeniu procesu korekty błędów obróbkowych.

Zgodnie z procedurą opisaną w poprzednim punkcie artykułu, przystąpiono do budowy skorygowanego modelu geometrycznego części. W pierwszej kolejności z programu pomiarowego wydzielono współrzędne nominalne oraz współrzędne zaobserwowane 625 punktów pomiarowych. Posługując się równaniami (1) i (2) dla każdego punktu wyznaczono współrzędne skorygowane. Na ich podstawie w systemie MASTERCAM utworzony został skorygowany model geometryczny wytwarzanej powierzchni. Na wstępie na siatce punktów utworzono serię 25 krzywych interpolujących (rys. 9a). W kolejnym kroku na serii otrzymanych krzywych utworzony został płat powierzchni (rys. 9b).

Bazując na skorygowanym modelu geometrycznym części, powtórnie utworzono programy sterujące wytwarzaniem. Zastosowano tu te same narzędzia i wartości parametrów, jakie przyjęto podczas poprzedniej obróbki obiektu. Wygenerowane poprawione programy obrób-



Rys. 10. Rozkład odchyłek zaobserwowanych po realizacji procesu korekty błędów obróbkowych

Fig. 10. Distribution of the observed deviations after the process of machining error correctio

kowe posłużyły do wykonania nowego obiektu. Obiekt ten poddany został pomiarom kontrolnym. Posłużono się przy tym utworzonym wcześniej programem pomiarowym. Wykres prezentujący wyniki pomiarów przedstawiony został na rys. 10. W pierwszej kolejności należy zwrócić uwagę na jego bardziej „spłaszczoną” charakterystykę w porównaniu z wykresem z rys. 8.

Po analizie uzyskanych wyników pomiarów kontrolnych okazało się, że odchyłki zaobserwowane po przeprowadzeniu korekty błędów obróbkowych zawierały się w przedziale $(-0,0872; 0,0021)$ mm. W porównaniu z poprzednio uzyskanymi wynikami nastąpił znaczny wzrost dokładności wytworzenia obiektu.

4. Podsumowanie

Realizacja zaprezentowanej w artykule metody korekty błędów obróbkowych umożliwiła znaczące podniesienie dokładności wykonania obiektu, którego kształt opisany został płatem powierzchni swobodnej. W tab. 1 przedstawione zostały odchyłki obróbkowe wyznaczone przed i po przeprowadzeniu procesu korekty błędów.

Tab. 1. Zaobserwowane odchyłki obróbkowe

Tab. 1. The observed machining deviations

Odchyłki zaobserwowane	Przed korekcją	Po korekcyi
Max. ujemna	-0,13	-0,0872
Max. dodatnia	0,0756	0,0021
Średnia bezwzględnych wartości odchyłek dla 625 punktów pomiarowych	0,04923	0,03619

Prezentowane wyniki wykazują wyraźny spadek maksymalnych zaobserwowanych odchyłek obróbkowych. Średnie bezwzględne wartości odchyłek obróbkowych wyznaczone dla wszystkich punktów pomiarowych przed i po korekcją wyraźnie zmniejszyły swoje wartości. Dodatkowym efektem przeprowadzonej korekty błędów obróbkowych widocznym po porównaniu wykresów (rys. 8 i 10) jest „spłaszczenie” rozkładu zaobserwowanych odchyłek. Uzyskany został w ten sposób mniejszy rozrzut występujących błędów obróbkowych.

Realizacja prezentowanej metodyki korekty błędów wytwarzania jest stosunkowo prosta. Nie wymaga dodatkowych inwestycji, ponieważ bazuje na typowym wyposażeniu działów produkcyjnych firm (systemy CAD/CAM, obrabiarki CNC, współrzędnościowe maszyny pomiarowe).

Dodatkową zaletą jest tu fakt, że nowoczesne systemy CAD/CAM wiążą parametrycznie generowaną ścieżkę narzędzia z geometrią wytwarzanego obiektu. Oznacza to, że raz opracowane dane technologiczne nie wymagają powtórnego wprowadzania do systemu. W konsekwencji, po przebudowie modelu geometrycznego przedmiotu następuje automatyczna przebudowa ścieżki narzędzia. Nadmienić należy, że w przypadku przeprowadzania całego procesu korekcji błędów obróbkowych na tym samym przedmiocie, konieczne jest przeprowadzenie dokładnej obróbki wstępnej (przed korekcją) z zachowaniem równomiernie rozłożonego naddatku obróbkowego. Naddatek ten umożliwi kontynuowanie korekcji błędów obróbkowych w przypadku, gdy podczas obróbki wstępnej usunięta zostanie zbyt duża ilość materiału.

W prezentowanym artykule analizie poddane zostały sumaryczne błędy obróbkowe. Opisywana metoda zweryfikowana została na pięciu różnych płatach powierzchni. We wszystkich przypadkach osiągnięto poprawę dokładności wytwarzania. W dalszych badaniach zaproponowane zostaną metody analizy umożliwiającej podział odchyłek zaobserwowanych na odchyłki zdeterminowane i losowe. Badania wykonywane będą z wykorzystaniem analizy statystycznej błędów obróbki dla co najmniej pięciu powtórzonych zabiegach obróbkowych. Pozwoli to na podniesienie efektywności realizacji procesu korekcji błędów wytwarzania.

Bibliografia

1. Raksiri C., Parnichkun M., *Geometric and force errors compensation in a 3-axis CNC milling machine*, "International Journal of Machine Tools & Manufacture", 44/2004, 1283–1291.
2. Ryu S.H., Chu C.N., *The form error reduction in side wall machining using successive down and up milling*, "International Journal of Machine Tools & Manufacture", 45/2005, 1523–1530.
3. Yang M.Y., Choi J.G., *A tool deflection compensation system for end milling accuracy improvement*, "ASME J. Manuf. Sci. Eng.", 120/1998, 222–229.
4. Lechniak Z., Werner A., Skalski K., Kędzior K., *Methodology of the Off-line Software Compensation for Errors in the Machining Process on the CNC Machine Tool*, "Journal of Material Processing Technology", 73/1998, 42–48.
5. Lo C.C., Hsiao C.Y., *A method of tool path compensation for repeated machining process*, "International Journal of Machine Tools & Manufacture", 38/1998, 205–213.
6. Cho M.W., Kim G.H., Seo T., Hong Y.C., Cheng H.H., *Integrated machining error compensation method using OMM data and modified PNN algorithm*, "International Journal of Machine Tools & Manufacture", 46/2006, 1417–1427.
7. Landon Y., Segonds S., Mousseigne M., Lagarrigue P., *Correction of milling tool paths by tool posi-*

tioning defect compensation, "Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: "Journal of Engineering Manufacture", 217/2003, 1063–1073.

8. Law K.M.Y., Geddam A., *Error compensation in the end milling of pockets: a methodology*, "J. Mater. Process. Technol." 139/2003, 21–27.
9. Ratchev S., Liu S., Becker A.A., *Error compensation strategy in milling flexible thin walled parts*, "J. Mater. Process. Technol." 162–163/2005, 673–681.
10. Chen W., Xue J., Tang D., Chen H., Qu S., *Deformation prediction and error compensation in multilayer milling processes for thin-walled parts*, "International Journal of Machine Tools & Manufacture", 49/2009, 859–864. ■

Error correction in processing complex-shape surfaces on machining centres

Abstract: The present paper is devoted to the issues connected with correcting errors in processing curvilinear surfaces produced with the use of CNC milling machines. At present, such a correction is performed with two methods. The first of them, called an on-line method, requires constant correcting of the tool path during processing. In this approach, it is necessary to apply sophisticated adaptive control systems. In the second, off-line method, correcting the programme which controls the processing is performed outside the machine tool (on the basis of the control measurement results). The paper presents a suggestion of a methodology for correcting surface processing errors using the off-line technique (without a constant direct connection to a CNC milling machine). The suggested methodology is based on using CAD/CAM systems, numerically controlled milling machines, and coordinate measuring machines. The suggested procedure was verified on the example of a curvilinear surface described with the NURBS method. Implementing the suggested methodology of correcting processing errors resulted in a significant improvement in the accuracy of the produced shape surface.

Keywords: processing, error correction, coordinate measurement, CAD/CAM

Artykuł recenzowany, nadesłany 19.06.2013, przyjęty do druku 23.07.2013.

dr inż. Andrzej Werner

Zatrudniony jest na stanowisku adiunkta w Zakładzie Inżynierii Produkcji na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej. Zajmuje się problematyką związaną z: obrabiarkami sterowanymi numerycznie, inżynierią odwrotną, szybkim prototypowaniem oraz korekcją błędów wytwarzania obiektów opisanych powierzchniami swobodnymi.

e-mail: a.werner@pb.edu.pl

