

Poprawa dokładności wytwarzania powierzchni swobodnych na frezarkach CNC

Improving the accuracy of free-form surface machining on CNC milling machines

ANDRZEJ WERNER *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.12.195>

W artykule przedstawiono metodę poprawy dokładności wytwarzania powierzchni swobodnych. Metoda polega na wykonaniu pomiarów współrzędnościowych wstępnie wytworzonego obiektu oraz na przebudowie jego nominalnego modelu geometrycznego w celu skompensowania występujących błędów obróbkowych.

SŁOWA KLUCZOWE: powierzchnia swobodna, pomiary współrzędnościowe, frezarka CNC, model CAD

This article presents a method of increasing the accuracy of the production of free-form surfaces. This method is based on the execution of coordinate measurements of the pre-treated object and reconstruction of its nominal geometric model in order to compensate existing machining errors.

KEYWORDS: free-form surface, coordinate measurements, CNC milling machine, CAD model

Obecnie obróbka przedmiotów zawierających geometrie krzywoliniowe jest stosowana w przemyśle do wytwarzania różnego rodzaju krzywek, wykrojników i elektrod do obróbki elektroerozyjnej. Produkcja tych elementów wymaga zachowania dużej dokładności.

Są różne podejścia do problemu poprawy dokładności wytwarzania [1, 2]. Jedno z nich zakłada wyznaczenie błędów geometrycznych obrabiarki CNC i wykorzystanie ich do korekcy programów obróbkowych. Wiąże się to z koniecznością przeprowadzenia serii testów obróbkowych i pomiarów kontrolnych, mających na celu wyznaczenie modeli opisujących rozkład błędów obrabiarki [3], które następnie są wykorzystywane do korygowania programów obróbkowych przed rozpoczęciem obróbki [4].

Zgodnie z innym podejściem analizuje się błędy, mające swe źródło w samym procesie obróbki i towarzyszących mu zjawiskach. Analiza literatury wskazuje, że w ramach tego podejścia opracowano wiele metod zwiększania dokładności wytwarzania. Jedną z nich jest projektowanie procesu obróbki, podczas której kontroluje się siły skrawania przez dostosowywanie takich parametrów, jak posuw lub szerokość warstwy skrawanej [5]. Rozwijane są adaptacyjne systemy kontrolne, korygujące położenie narzędzia w czasie rzeczywistym [6]. Inny sposób polega na modyfikacji ścieżki narzędzia na podstawie wyliczonego odkształcenia narzędzia [7].

W uniwersalnej metodzie poprawy dokładności wytwarzanych elementów wykorzystuje się pomiary współrzędnościowe. Korekta procesu obróbkowego odbywa się na podstawie wyników pomiarów wykonanych na obrabiarkę CNC [8] lub na współrzędnościowej maszynie pomiarowej [9]. Dane pomiarowe najczęściej porównuje się z nominalnymi modelami CAD obrabianych elementów, a następnie wyznacza się odchyłki obróbkowe, które służą do korekcy błędów wytwarzania.

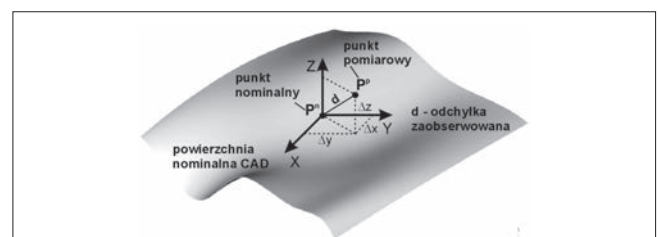
Metoda omawiana w artykule bazuje na pomiarach wykonywanych na maszynie współrzędnościowej. Korekta programów obróbkowych odbywa się pośrednio dzięki przebudowie nominalnego modelu CAD obiektu na skorygowany model geometryczny, z uwzględnieniem odchyłek zaobserwowanych po wstępnej obróbce przedmiotu. Dodatkowo autor zaproponował prostą procedurę filtracji danych pomiarowych, mającą na celu ograniczenie wpływu zjawisk losowych na końcowy efekt korekcji błędów obróbkowych.

Metoda poprawy dokładności wytwarzania

Proponowany przebieg procesu wytwarzania obiektu powierzchniowego z korekcją odchyłek obróbkowych obejmuje następujące etapy:

- budowę nominalnego modelu geometrycznego wytwarzanego obiektu powierzchniowego,
- stworzenie programów obróbkowych,
- obróbkę wstępną na frezarce CNC,
- pomiary współrzędnościowe obiektu,
- wyznaczenie zaobserwowanych odchyłek oraz ich składowych,
- wyznaczenie współrzędnych skorygowanych w punktach pomiarowych,
- przebudowę modelu geometrycznego obiektu,
- stworzenie skorygowanych programów obróbkowych i obróbkę obiektu,
- pomiary współrzędnościowe i ocenę poprawy dokładności wytwarzania obiektu powierzchniowego.

■ **Wyznaczanie współrzędnych skorygowanych w punktach pomiarowych.** Kontrolne pomiary współrzędnościowe płata powierzchni swobodnej o obrysie prostokątnym można przeprowadzić w przypadku dwukierunkowego, równomiernego rozkładu punktów pomiarowych. W ten sposób uzyskuje się siatkę $n \times m$ zaobserwowanych punktów. Do tego celu można wykorzystać procedury automatycznego skanowania powierzchni, np. UVScan lub Grid (system PC-DMIS). Aby oszacować dokładność wytwarzania, należy wyznaczyć odchyłki obróbkowe w punktach pomiarowych. Miarą wyznaczanych odchyłek są odległości pomiędzy punktami na powierzchni modelu CAD (powierzchni nominalnej) a odpowiadającymi im punktami, zaobserwowanymi podczas pomiarów kontrolnych na maszynie współrzędnościowej. Odchyłki są wyznaczone w kierunku normalnym do obrabianej powierzchni (rys. 1).



Rys. 1. Graficzna reprezentacja odchyłki obróbkowej

* Dr inż. Andrzej Werner (a.werner@pb.edu.pl) – Wydział Mechaniczny Politechniki Białostockiej

Pomiary współrzędnościowe dostarczają informacji o współrzędnych punktów nominalnych, zaobserwowanych odchyłkach obróbkowych oraz cosinusach kierunkowych w punktach pomiarowych. Na bazie tych danych można skorygować płat powierzchni, opisujący wytwarzany obiekt. W pierwszej kolejności wyznacza się składowe zaobserwowanych odchyłek obróbkowych w poszczególnych osiach układu współrzędnych. Do obliczeń wykorzystuje się następujące zależności:

$$\begin{aligned}\Delta x_{ij} &= d_{ij} \cdot \cos \alpha_{ij} \\ \Delta y_{ij} &= d_{ij} \cdot \cos \beta_{ij} \\ \Delta z_{ij} &= d_{ij} \cdot \cos \gamma_{ij}\end{aligned}\quad (1)$$

gdzie: Δx_{ij} , Δy_{ij} , Δz_{ij} – składowe zaobserwowanych odchyłek obróbkowych; d_{ij} – odchyłka zaobserwowana w punkcie pomiarowym; $\cos \alpha_{ij}$, $\cos \beta_{ij}$, $\cos \gamma_{ij}$ – cosinusy kierunkowe w punktach pomiarowych; i, j – współczynniki opisujące położenie zaobserwowanego punktu.

Wyznaczone składowe odchyłek obróbkowych umożliwiają obliczenie skorygowanych współrzędnych punktów. W przypadku gdy korekcja będzie przeprowadzana na surowych danych pomiarowych, skorygowane współrzędne zostaną wyznaczone z zależności:

$$\begin{aligned}x_{ij}^{cor} &= x_{ij}^{nom} - \Delta x_{ij} \\ y_{ij}^{cor} &= y_{ij}^{nom} - \Delta y_{ij} \\ z_{ij}^{cor} &= z_{ij}^{nom} - \Delta z_{ij}\end{aligned}\quad (2)$$

gdzie: x_{ij}^{cor} , y_{ij}^{cor} , z_{ij}^{cor} – skorygowane współrzędne płata powierzchni; x_{ij}^{nom} , y_{ij}^{nom} , z_{ij}^{nom} – współrzędne punktów na powierzchni nominalnej (modelu CAD).

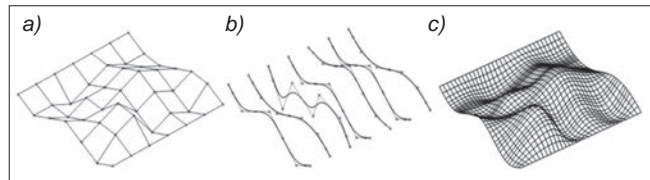
Zaprezentowane podejście jest najprostsze, lecz nie gwarantuje osiągnięcia najlepszego efektu końcowego. Z uwagi na złożoność procesu obróbkowego oraz pomiarowego zaobserwowane odchyłki mogą zawierać istotne efekty zjawisk losowych. Odchyłki mają bowiem dwie składowe: zdeterminowaną i losową. Wprowadzenie filtracji danych pomiarowych pozwala na zminimalizowanie wpływu odchyłek losowych na końcowy efekt korekcji odchyłek obróbkowych. Wzór (1) zmienia postać i składowe skorygowanych odchyłek są wyznaczone w następujący sposób:

$$\begin{aligned}\Delta x_{ij} &= d_{ij}^f \cdot \cos \alpha_{ij} \\ \Delta y_{ij} &= d_{ij}^f \cdot \cos \beta_{ij} \\ \Delta z_{ij} &= d_{ij}^f \cdot \cos \gamma_{ij}\end{aligned}\quad (3)$$

gdzie: d_{ij}^f – przefiltrowane składowe zaobserwowanych odchyłek obróbkowych.

Metod filtracji danych jest wiele. Kryterium wyboru optymalnej metody powinna być prostota jej stosowania. W dalszej części artykułu przedstawiono podejście zaczerpnięte z technik stosowanych w filtracji obrazów.

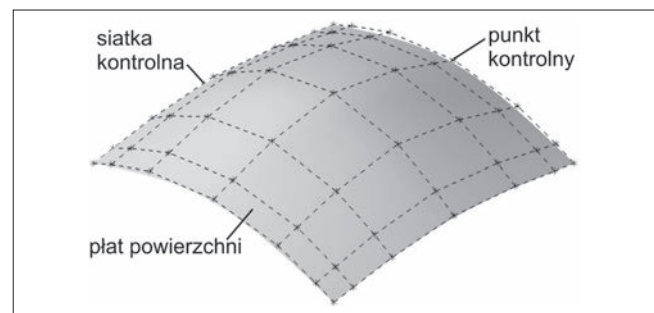
■ **Budowa skorygowanego płata powierzchni.** Wyznaczone skorygowane współrzędne służą do utworzenia zmodyfikowanego płata powierzchni. W jego budowie wykorzystuje się techniki inżynierii odwrotnej. Najpierw tworzy się siatkę skorygowanych punktów $n \times m$ (rys. 2a), a na niej interpoluje się serię krzywych (rys. 2b), na których w dalszej kolejności rozpinany jest płat powierzchni (rys. 2c). Tak zbudowany płat powierzchniowy kompensuje występujące odchyłki obróbkowe. Jest on niezbędny do modyfikacji programów obróbkowych.



Rys. 2. Budowa płata powierzchni: a) siatka punktów, b) seria krzywych, c) płat powierzchni

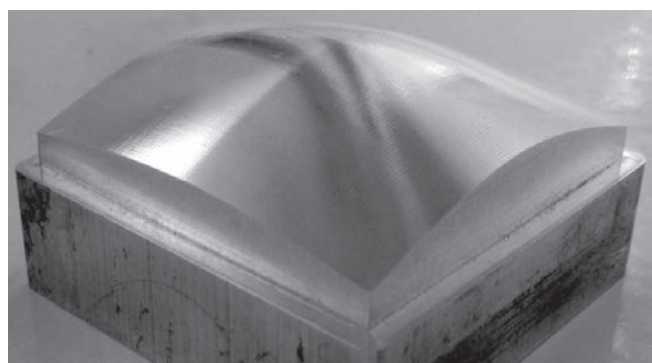
Eksperymentalna weryfikacja zaproponowanej metody poprawy dokładności wytwarzania

Metodę korekcji błędów obróbkowych zweryfikowano na przykładzie obiektu opisanego za pomocą płata powierzchni NURBS (rys. 3). Został on zbudowany na siatce kontrolnej, składającej się z 49 punktów kontrolnych. Stopień funkcji bazowych B-sklejanych w dwóch kierunkach parametryzacji uv płata powierzchni był równy 3. Model powierzchniowy był podstawą do przygotowania programów sterujących obróbką części oraz programów pomiarowych do kontroli dokładności wykonania.



Rys. 3. Model powierzchniowy opisujący wytwarzany obiekt

Przedmiot wykonano z aluminium PA6 (rys. 4). Po obróbce kształtującej na obrabianej powierzchni pozostawiono naddatek o grubości 0,3 mm. Do jego usunięcia wykorzystano frez kulisty o średnicy 6 mm, przeznaczony do obróbki aluminium. Zaprogramowano równoległe przejścia narzędzia z odstępem 0,2 mm. Obróbkę wykończeniową zrealizowano przy obrotach wrzeciona 7500 obr/min oraz posuwie 300 mm/min.

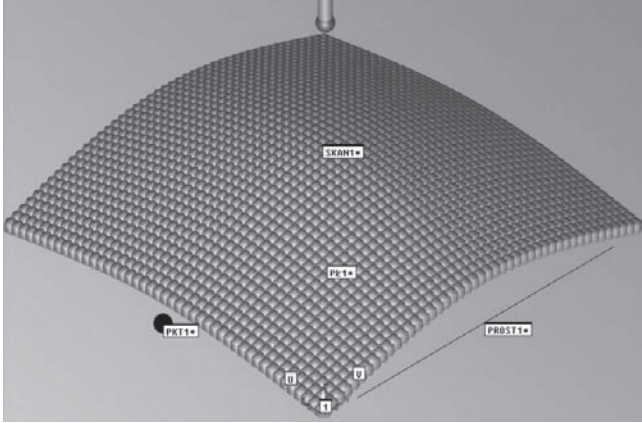


Rys. 4. Wytworzony obiekt

Po zakończeniu etapu wytwarzania badany obiekt poddano pomiarom kontrolnym na maszynie pomiarowej Global Performance firmy Hexagon Metrology (oprogramowanie PC-DMIS, $MPE_E = 1,5 + L/333$ [μm]), głowica pomiarowa Renishaw SP25M, trzpień pomiarowy o długości 20 mm z kulistą końcówką o średnicy 2 mm). W pomiarach wykorzystano procedurę automatycznego skanowania powierzchni UVscan, dostępną w systemie

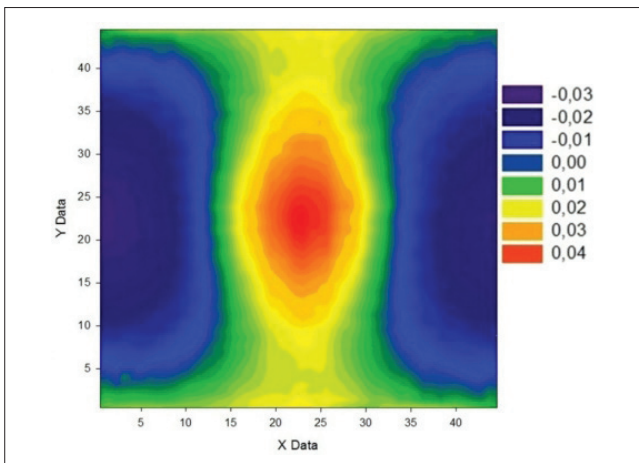
PC-DMIS. Ta procedura umożliwia uzyskanie równomiernego rozkładu punktów pomiarowych.

Ostatecznie pomiary kontrolne zaprogramowano dla siatki 45×45 punktów pomiarowych (odległość między punktami 1 mm). Rozkład punktów pomiarowych na mierzzonej powierzchni przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Rozkład punktów pomiarowych

Dzięki pomiarom uzyskano informacje dotyczące 2025 zaobserwowanych odchyłek. Mapę odchyłek przestrzennych przedstawiono na rys. 6 – wszystkie odchyłki zawierały się w przedziale (-0,030; +0,045) mm.



Rys. 6. Mapa zaobserwowanych odchyłek obróbkowych

Podsumowanie pomiarów współrzędnościowych obróbkowej powierzchni zawarto w tabl. I. Uzyskana dokładność była stosunkowo dobra, a jednocześnie pozostawiała margines do zastosowania proponowanej w artykule metody poprawy końcowych efektów obróbki.

TABLICA I. Wyniki wstępnych pomiarów współrzędnościowych – zaobserwowane odchyłki

Maksymalna odchyłka ujemna, mm	-0,030
Maksymalna odchyłka dodatnia, mm	0,045
Wartość średnia, mm	0,0021
Odchylenie standardowe, mm	0,0173

■ **Filtracja danych pomiarowych.** W artykule zaproponowano adaptację filtrów stosowanych do przetwarzania obrazów [10]. Zastosowanie filtrów do przetwarzania danych pomiarowych oznacza, że przy obliczaniu nowej wartości punktu bierze się pod uwagę wartości punktów z jego otoczenia. Każdy punkt pomiarowy z otoczenia ma

swoją wagę, którą wnosi do obliczeń. Te wagi są zapisywane w postaci maski. Typowe rozmiary masek to: 3×3, 5×5 oraz 7×7. Zasada filtracji danych na podstawie filtru o masce 3×3 jest następująca:

$f_{-1,-1}$	$f_{0,-1}$	$f_{1,-1}$
$f_{-1,0}$	$f_{0,0}$	$f_{1,0}$
$f_{-1,1}$	$f_{0,1}$	$f_{1,1}$

Odchyłki zaobserwowane w punktach pomiarowych mają formę siatki składającej się z n kolumn i m wierszy. Nową wartość składową punktu $d_{i,j}$ o współrzędnych (i, j) obliczono według następującej procedury. Najpierw wyznaczono sumę ważoną składowej punktu i wszystkich sąsiadów, zgodnie z wagami wskazanymi przez maskę filtru:

$$d'_{ij} = f_{-1,-1} \cdot d_{i-1,j-1} + f_{0,-1} \cdot d_{i,j-1} + f_{1,-1} \cdot d_{i+1,j-1} + f_{-1,0} \cdot d_{i-1,j} + f_{0,0} \cdot d_{i,j} + f_{1,0} \cdot d_{i+1,j} + f_{-1,1} \cdot d_{i-1,j+1} + f_{0,1} \cdot d_{i,j+1} + f_{1,1} \cdot d_{i+1,j+1} \quad (4)$$

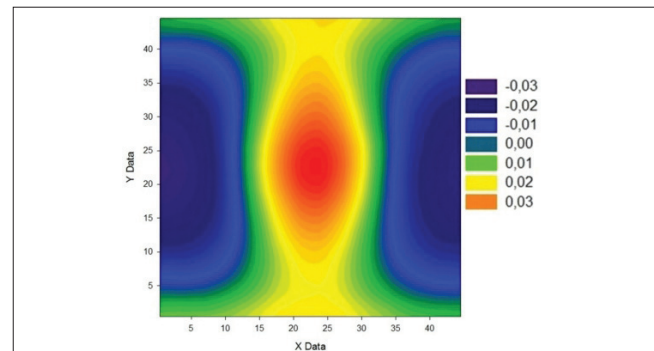
Ten wynik dzieli się przez sumę wszystkich wag maski (jeżeli jest ona różna od 0):

$$d_{ij}^f = d'_{ij} : (f_{-1,-1} + f_{0,-1} + f_{1,-1} + f_{-1,0} + f_{0,0} + f_{1,0} + f_{-1,1} + f_{0,1} + f_{1,1}) \quad (5)$$

Dzięki normalizacji wartości składowej zaobserwowanej odchyłki obróbkowej uzyskuje się gładziwy rozkład odchyłek i minimalizuje się wpływ składowych losowych na końcowy wynik korekcji błędów obróbkowych. W celu przetestowania proponowanej w artykule procedury wykorzystano maskę 5×5. Z uwagi na równomierny rozkład punktów pomiarowych przyjęto, że wpływ wszystkich punktów otaczających przetwarzaną odchyłkę jest jednaki (wszystkie wagi są równe 1).

Efekt filtracji danych, tj. zmodyfikowaną mapę odchyłek obróbkowych, przedstawiono na rys. 7. W porównaniu z mapą odchyłek surowych (rys. 6) nastąpiło znaczące wygładzenie warstwic reprezentujących poszczególne poziomy odchyłek. Jest to rezultat minimalizacji wpływu składowych losowych, generowanych w trakcie procesu obróbkowego i pomiarowego.

W tabl. II zamieszczono wartości liczbowe, które ilustrują zmianę odchyłek surowych po zastosowaniu filtracji danych. Można zaobserwować zmianę maksymalnych wartości odchyłek: składowe odfiltrowane zawierają się w przedziale (-0,002; 0,006), a ich rozrzut względem wartości średniej (odchylenie standardowe) jest nieznaczny.



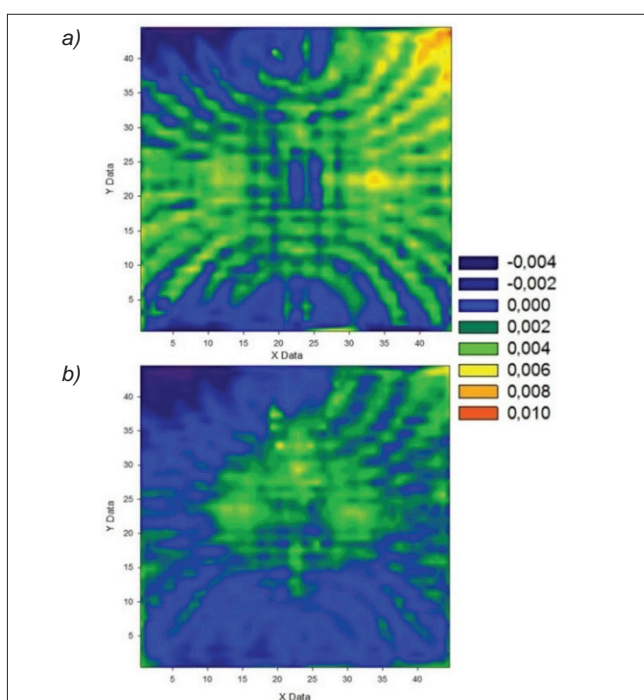
Rys. 7. Efekt filtracji zaobserwowanych odchyłek obróbkowych – zmodyfikowana mapa odchyłek

TABLICA II. Wyniki filtracji zaobserwowanych odchyłek obróbki

	Odchyłki surowe	Odchyłki skorygowane	Składowe odfiltrowane
Maksymalna odchyłka ujemna, mm	-0,030	-0,028	-0,002
Maksymalna odchyłka dodatnia, mm	0,045	0,040	0,006
Wartość średnia, mm	0,0021	0,0021	-2,1E-05
Odchylenie standardowe, mm	0,0173	0,0168	0,0009

■ **Poprawa dokładności wytwarzania obiektu powierzchniowego.** Zgodnie z opisaną wcześniej procedurą przystąpiono do budowy dwóch skorygowanych modeli geometrycznych wytwarzanego obiektu. Przebudowy pierwszego modelu dokonano na bazie surowych wyników pomiarów współrzędnościowych, natomiast w drugim przypadku wykorzystano przefiltrowane odchyłki obróbkowe. Na początkowym etapie procesu korekcji z programu pomiarowego wydzielono współrzędne nominalne oraz zaobserwowane współrzędne 2025 punktów pomiarowych. Posługując się równaniami (1), (2) i (3), wyznaczono dwa zestawy współrzędnych skorygowanych (przed filtracją i po filtracji danych pomiarowych). Na ich podstawie w systemie MASTERCAM zbudowano dwa skorygowane modele geometryczne wytwarzanej powierzchni. Dla każdego z nich na siatce punktów utworzono serię 45 krzywych interpolowanych. W kolejnej fazie na serii otrzymanych krzywych rozpięto płaty powierzchni.

Bazując na skorygowanych modelach geometrycznych, powtórnie utworzono programy obróbkowe. Wykorzystano do tego te same narzędzia i parametry, jakie przyjęto we wstępnej obróbce obiektu. Powtórnie wytworzone dwa płaty powierzchni poddano pomiarom współrzędnościowym. Mapy uzyskanych odchyłek obróbkowych przedstawiono na rys. 8. W tabl. III zestawiono zaś wartości liczbowe, będące efektem przeprowadzonej korekcji odchyłek obróbkowych. Należy stwierdzić, że w obu przypadkach osiągnięto istotną poprawę dokładności wytwarzania.



Rys. 8. Mapy odchyłek po korekcji: a) surowych danych pomiarowych, b) przefiltrowanych danych pomiarowych

TABLICA III. Zestawienie wyników poprawy dokładności wytwarzania

	Odchyłki surowe	Korekcja 1 – odchyłki surowe	Korekcja 2 – odchyłki przefiltrowane
Maksymalna odchyłka ujemna, mm	-0,030	-0,005	-0,004
Maksymalna odchyłka dodatnia, mm	0,045	0,009	0,007
Wartość średnia, mm	0,0022	0,0023	0,0013
Odchylenie standardowe, mm	0,0173	0,0018	0,0014

Podsumowanie

Zastosowanie metody przedstawionej w niniejszym artykule przyniosło znaczącą poprawę dokładności wytwarzania powierzchni swobodnej, co potwierdzają wyniki zamieszczone w tabl. III. W obu przypadkach korekcji stwierdzono wyraźny spadek maksymalnych zaobserwowanych odchyłek obróbkowych. Dzięki filtracji danych pomiarowych uzyskano poprawę wyniku końcowego – zaobserwowane maksymalne odchyłki obróbkowe są w tym przypadku najmniejsze; również odchylenie standardowe odchyłek i ich średnia wskazują na dodatkowy, pozytywny efekt. Wytworzona powierzchnia wykazuje największe podobieństwo do nominalnego modelu CAD. Filtracja danych pomiarowych pozwala na zredukowanie wpływu składowych losowych zaobserwowanych odchyłek obróbkowych na proces poprawy dokładności wytwarzania.

Korekcja błędów wytwarzania według przedstawionej metody jest stosunkowo prosta. Bazuje na typowym sprzęcie i oprogramowaniu wykorzystywanym w przedsiębiorstwach (systemach CAD/CAM, obrabiarkach CNC, współrzędnościowych maszynach pomiarowych). Korekcja błędów obróbkowych jest dodatkowo ułatwiona dzięki powiązaniu parametrycznych danych technologicznych i geometrycznych we współczesnych systemach CAD/CAM – w ten sposób raz opracowane dane technologiczne nie wymagają powtórnej wprowadzania do systemu. W rezultacie po przebudowie modelu geometrycznego przedmiotu następuje automatyczna przebudowa ścieżki narzędzia.

LITERATURA

- Ramesh R., Mannan M.A., Poo A.N. "Error compensation in machine tools – a review. Part I: Geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 40 (2000): s. 1235–1256.
- Ramesh R., Mannan M.A., Poo A.N. "Error compensation in machine tools – a review. Part II: Thermal errors". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 40 (2000): s. 1257–1284.
- Zhengchun Du, Shujie Zhang, Maisheng Hong. "Development of a multi-step measuring method for motion accuracy of NC machine tools based on cross grid encoder". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 50 (2010): s. 270–280.
- Mehrdad V.N., Mohsen H., Behrooz A. "Tool path accuracy enhancement through geometrical error compensation". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 51 (2011): s. 471–482.
- 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): s. 1523–1530.
- Yang M.Y., Choi J.G. "A tool deflection compensation system for end milling accuracy improvement". *ASME J. Manuf. Sci. Eng.* 120 (1998): s. 222–229.
- Landon Y., Segonds S., Mousseigne M., Lagarrigue P. "Correction of milling tool paths by tool positioning defect compensation". *IMechE Part B J. Eng. Manuf.* 217 (2003): s. 1063–1073.
- Cho M.W., Seo T.I., Kwon H.D. "Integrated error compensation method using OMM system for profile milling operations". *Journal of Materials Processing Technology*. 136 (2003): s. 88–99.
- Poniatowska M., Werner A. "Fitting spatial models of geometric deviations of free-form surfaces determined in coordinate measurements". *Metrol. Meas. Syst.* 17, 4 (2010): s. 599–610.
- Kawasaki T., Jayaraman P.K., Shida K., Zheng J., Maekawa T. "An image processing approach to feature-preserving B-spline surface fairing". *Computer-Aided Design*. 99 (2018): s. 1–10.