

Dr inż. Andrzej WERNER,  
dr hab. inż. Małgorzata PONIATOWSKA (Politechnika Białostocka):

## POPRAWA DOKŁADNOŚCI PROFILI KRZYWOLINIOWYCH OBRABIANYCH NA FREZARKACH CNC

### Streszczenie

Zaprezentowano metodykę poprawy dokładności frezowania profili krzywoliniowych polegającą na korekcji błędów obróbki. Korekcja jest przeprowadzana off-line przez wprowadzenie do nominalnego modelu CAD (i w konsekwencji do programu obróbkowego) poprawek kompensujących wpływy obróbki. Podstawą do przeprowadzenia korekcji są odchyłki powierzchni wyznaczone w pomiarach współrzędnościowych. Wartości odchyłek profilu po korekcji zawierały się w granicach  $\pm 0,0124$  do  $+0,0144$  mm.

**Słowa kluczowe:** profil krzywoliniowy, model CAD, frezowanie, odchyłka, korekcja programu obróbkowego

## IMPROVING ACCURACY OF CURVILINEAR PROFILES MACHINED ON CNC MILLING CENTRES

### Abstract

The paper presents a methodology of improving accuracy of curvilinear profiles obtained in the milling processes. The methodology consists in correction of machining errors. Such correction is performed off-line by introducing to nominal CAD model alterations compensating these influences. The basis for performing the correction are surface deviations determined during coordinate measurements. The values of deviations observed on the profile machined after the correction according to the methodology had been introduced, were within the range of  $(-0.0144 \div +0.0124)$  mm.

# **POPRAWA DOKŁADNOŚCI FREZOWANIA PROFILI KRZYWOLINIOWYCH OBRABIANYCH NA FREZARKACH CNC**

Andrzej WERNER <sup>1</sup>, Małgorzata PONIATOWSKA

## **1. WPROWADZENIE**

Osiągnięcie wymaganej dokładności powierzchni wymaga często przeprowadzenia kompensacji błędów obróbkowych. Jednym z przypadków stawiającym szereg wyzwań z tym związanych jest wytwarzanie na frezarskich centrach obróbkowych obiektów opisanych za pomocą złożonych profili krzywoliniowych. Stosowane są różne podejścia mające na celu podniesienie dokładności frezowanych elementów. W literaturze opisano metody kompensacji błędów geometryczno-ruchowych obrabiarzek uwzględniające ugięcie narzędzia w trakcie obróbki oraz metody wykorzystujące wyniki pomiarów współrzędnościowych w korekcji programów obróbkowych [1,2,3]. W ocenie dokładności zarysów krzywoliniowych najczęściej stosuje się sterowane numerycznie współrzędnościowe maszyny pomiarowe (WMP) ze względu na ich uniwersalność oraz wysoką dokładność.

Jedną z metod kompensacji błędów obróbkowych jest metoda „off-line”, w której dane do przeprowadzenia korekcji uzyskuje się na WMP. W artykule [4] zaproponowano i przetestowano schemat poprawy dokładności powierzchni kształtowych wykorzystujący pomiary „off-line”. Aby określić rozkład odchyłek dane pomiarowe były dopasowywane do profilu nominalnego obrabianej powierzchni. Następnie dokonano dekompozycji odchyłek na składową zdeterminowaną i losową, które skojarzono odpowiednio z falistością i chropowatością obrabianego profilu. Informacje te posłużyły do kompensacji falistości obrabianej powierzchni. Podobne podejście zastosowano w pracy [5]. Prezentowana w niej metodyka sprawdzona została na przykładzie płaskich profili krzywoliniowych opisanych za pomocą NURBS [6].

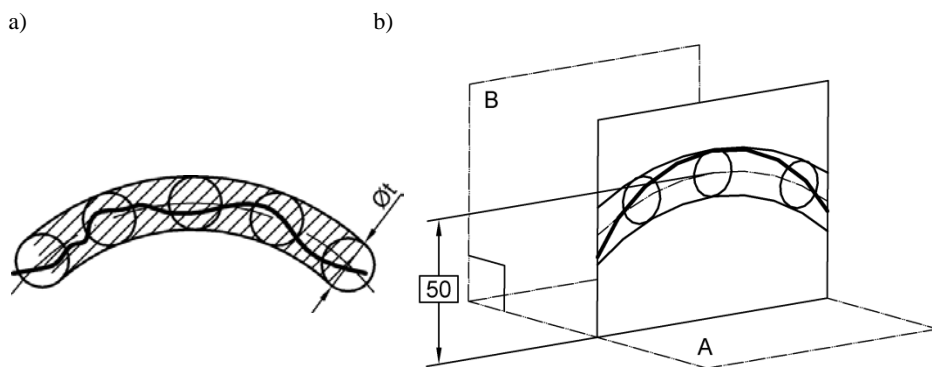
---

<sup>1</sup>Politechnika Białostocka, 15-351 Białystok, ul. Wiejska 45

Referat poświęcono metodyce, w której korekcja błędów frezowania profilu krzywoliniowego odbywa się na podstawie wyników pomiarów off-line. Metodyka wymaga integracji takich zagadnień jak systemy CAD/CAM oraz współrzędnościowa technika pomiarowa. Na podstawie danych otrzymanych w pomiarach wyznacza się poprawki kompensujące wpływy obróbki, a następnie koryguje ścieżkę narzędzia. W przypadku oceny odchyłek względem układu baz dużym wyzwaniem jest zapewnienie powtarzalności pozycjonowania przedmiotu podczas obu etapów obróbki.

## 2. OCENA DOKŁADNOŚCI ZARYSÓW

W ocenie dokładności istotne jest sprawdzenie, czy wyznaczona powierzchnia zawiera się w polu tolerancji odpowiednim dla badanej cechy. Pole tolerancji kształtu wyznaczonego zarysu jest zdefiniowane między dwiema liniami, będącymi obwiedniami położenia zbioru okręgów o średnicy  $t$ , przy czym wszystkie te okręgi leżą w jednej płaszczyźnie, a ich środki na zarysie nominalnym (rys. 1a). Inny przypadek pokazano na rys. 1b. Pole tolerancji ma analogiczną definicję jak na rys. 1a ale powierzchnia teoretyczna jest tu w określonym położeniu i kierunku względem elementu bazowego. W takim przypadku pole tolerancji kształtu obejmuje również odchyłki położenia i kierunku.



Rys. 1. Pole tolerancji kształtu zarysu:

a) bez elementu bazowego, b) względem elementu bazowego [7]

W pomiarach współrzędnościowych na bazie modelu CAD geometrię nominalną reprezentuje wirtualna powierzchnia modelu. Aby porównać otrzymane dyskretne dane pomiarowe z modelem CAD, należy umieścić je we wspólnym układzie współrzędnych. Wynik pomiaru w zasadniczy sposób zależy od sposobu zdefiniowania układu współrzędnych przedmiotu. Do oceny odchyłki kształtu bez elementu bazowe-

go należy zlokalizować układ współrzędnych poprzez dopasowanie danych pomiarowych do modelu CAD (uwzględniając przesunięcie i obrót). Ta procedura powoduje rozdzielenie odchyłek kształtu, położenia i kierunku. Jeśli wstępny układ współrzędnych przedmiotu zdefiniowano na elementach bazowych do oceny odchyłek położenia i kierunku, wówczas wartości tych odchyłek można określić z wartości parametrów dopasowania. Z procedurą dopasowania danych do modelu, z powodu natury danych, związana jest niepewność położenia profilu zaobserwowanego względem modelu, a tym samym względem pola tolerancji, z czego wynikają istotne problemy związane z oceną dokładności zarysów krzywoliniowych na bazie modelu CAD.

Planując pomiar współrzędnościowy należy odpowiednio dobrać parametry pomiaru – krok próbkowania powierzchni i średnicę końcówki pomiarowej, gdyż oba te parametry powodują filtrację geometryczno-mechaniczną nierówności, czyli decydują o zakresie informacji o nierównościach powierzchni reprezentowanych w danych pomiarowych. Podstawą doboru powinny być m.in. chropowatość powierzchni oraz wartość tolerancji kształtu [8].

### 3. METODYKA POPRAWY DOKŁADNOŚCI FREZOWANIA

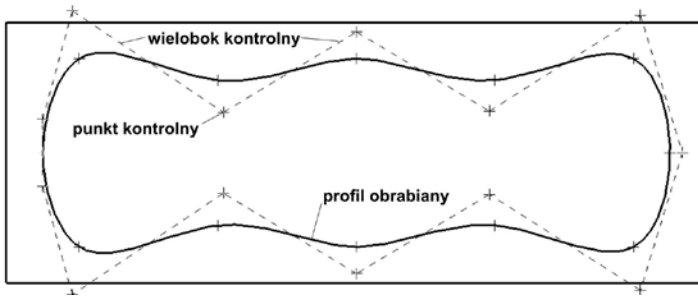
Założeniem metod off-line jest korekcja ścieżki narzędzia lub parametrów obróbki oparta na zaobserwowanym rozkładzie odchyłek powierzchni.

W pierwszym etapie zastosowanej metodyki opracowuje się model CAD obrabianego przedmiotu reprezentujący geometrię nominalną. Na jego podstawie generuje się program obróbkowy w środowisku CAD/CAM. Program ten realizowany jest na frezarce CNC, po czym przeprowadzane są pomiary obrobionej powierzchni. Pomiary wykonuje się na WMP, co wiąże się ze zdjęciem przedmiotu z obrabiarki, umieszczeniem go na maszynie, odpowiednim zamocowaniu i zdefiniowaniu jego układu współrzędnych, a następnie wygenerowaniem punktów pomiarowych na modelu CAD. W pomiarach otrzymuje się dane o lokalnych odchyłkach powierzchni, czyli odległościach punktów pomiarowych od odpowiadających im punktów na modelu nominalnym CAD. Dane te są podstawą do wyznaczenia wartości i rozkładu odchyłek. Jeśli wartości odchyłek mieszczą się w polu zgodności ze specyfikacją, a więc dokładność obróbki jest zgodna z założoną, korekcja programu nie jest konieczna. W przeciwnym wypadku należy wyznaczyć poprawki kompensujące wpływy obróbki (wartości odchyłek ze znakiem przeciwnym), na ich podstawie przebudować model geometryczny CAD, następnie wygenerować skorygowany program obróbkowy i ponownie zrealizować obróbkę. Ocenę dokładności powierzchni otrzymanej po korekcji programu obróbkowego przeprowadza się stosując opracowany wcześniej program pomiarowy.

Należy przypomnieć, że procedura pomiaru na WMP musi być zgodna ze specyfikacją geometryczną. Pomiary można wykonać w odniesieniu do układu baz, bądź bez odniesienia do układu baz, co opisano w rozdz. 2.

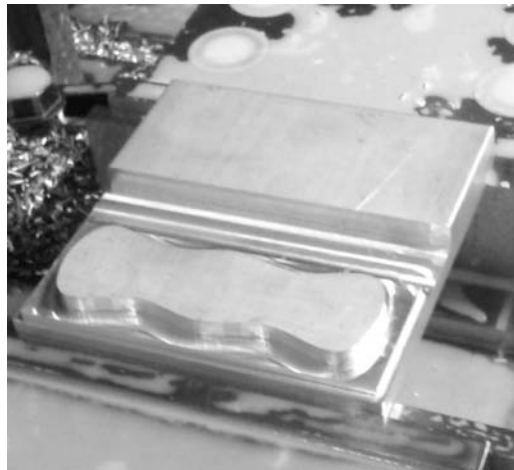
#### 4. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Metodę weryfikowano próbce wykonanej ze stopu aluminium PA6. Profil opisano krzywą NURBS trzeciego stopnia zbudowaną na wieloboku kontrolnym o piętnastu punktach kontrolnych (rys. 2). Długość krzywej wynosiła 213,64 mm.



Rys. 2. Krzywa NURBS wraz z łamaną kontrolną

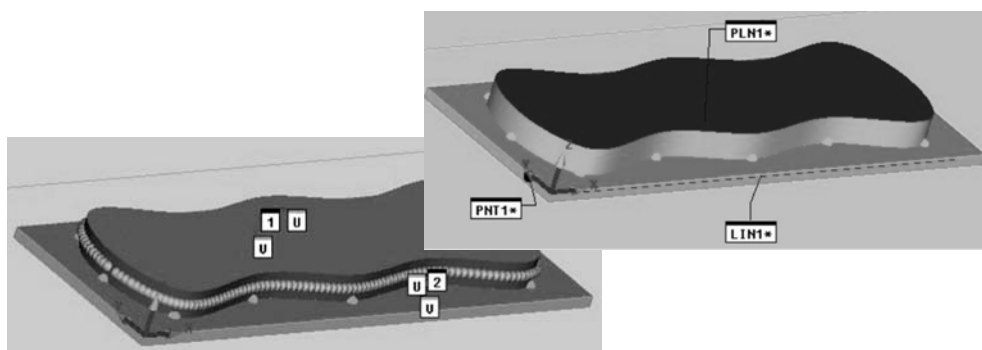
Obróbkę przeprowadzono na frezarskim centrum obróbkowym VMC-1020S/A OMNIS. Próbkę zamocowano w precyzyjnym imadle. Powierzchni bazowe do były każdorazowo obrabiane, aby zminimalizować różnice w pozycjonowaniu podczas obróbki i pomiarów. Zastosowano frez walcowo-czołowy o średnicy 12 mm, prędkość obrotową 5000 obr/min oraz posuw 500 mm/min. Obrobiony przedmiot pokazano na rys. 3.



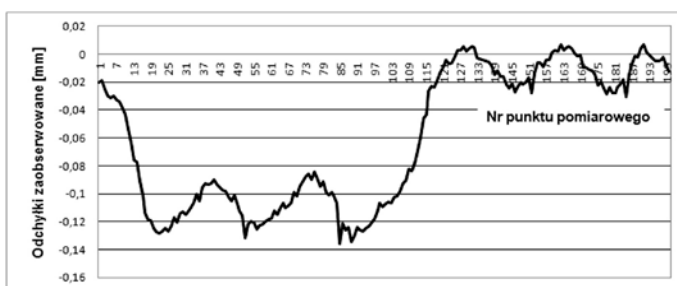
Rys. 3. Obrobiony przedmiot

#### 4.1. AKWIZYCJA DANYCH POMIAROWYCH

Pomiary przeprowadzono na WMP GLOBAL Performance z głowicą SP25M (oprogramowanie PC DMIS,  $MPE_E=1,5+L/333 \mu\text{m}$ ). Zastosowano trzpień pomiarowy 20 mm z końcówką  $d = 2 \text{ mm}$ . W opcji *UV Scan*, zmierzono współrzędne 200 równomiernie rozmieszczonych punktów pomiarowych, odległość między punktami pomiarowymi wynosiła w przybliżeniu 1 mm. Pomiary wykonano względem układu baz – rozkład punktów pomiarowych oraz elementy geometryczne bazowe przedstawiono na rys. 4. Wartości odchyłek prezentuje wykres na rys. 5.



Rys. 4. Rozkład punktów pomiarowych w programie PC DMIS



Rys. 5. Wartości odchyłek profilu po obróbce wstępnej

Analiza wykresu (rys. 5) wskazuje, że rozkład odchyłek jest nierównomierny – na jednej połowie profilu sięgają one do  $-0,1356 \text{ mm}$ , a więc bardzo dużo jak na ten rodzaj obróbki z wykorzystaniem obrabiarki CNC, natomiast pomiędzy 120. a 200. punktem pomiarowym maksymalna wartość odchyłek to  $+0,0307 \text{ mm}$ . W tym przypadku nie jest możliwe uzyskanie mniejszych odchyłek przez regulację tzw. offsetu narzędzia czy zmianę parametrów obróbkowych. W tej sytuacji jedyną możliwą metodą uzyskania mniejszych odchyłek jest korekcja programu obróbkowego z wykorzystaniem profilu skorygowanego.

#### 4.2. WYZNACZENIE PROFILU SKORYGOWANEGO

Z programu pomiarowego wydzielono i przeniesiono do arkusza kalkulacyjnego współrzędne nominalnych punktów pomiarowych, cosinusy kierunkowe oraz wartości odchyłek zaobserwowanych. Na podstawie danych z pomiarów obliczono składowe odchyłek zaobserwowanych w każdej z osi układu współrzędnych. Skorzystano z zależności:

$$\begin{aligned} T_{ix} &= T_i \cdot \cos \beta_i \\ T_{iy} &= T_i \cdot \cos \alpha_i \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

$i$  – numer punktu pomiarowego,

$T_i$  – wartość odchyłki zaobserwowanej w punkcie pomiarowym,

$T_{ix}, T_{iy}$  – składowe odchyłki zaobserwowane,

$\cos \alpha_i, \cos \beta_i$  – cosinusy kierunkowe w punkcie pomiarowym.

Składowe odchyłek posłużyły do wyznaczenia współrzędnych punktów skorygowanych. Obliczono je, korzystając ze wzoru:

$$\begin{aligned} x_i^{kor} &= x_i^{nom} - T_{ix} \\ y_i^{kor} &= y_i^{nom} - T_{iy} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

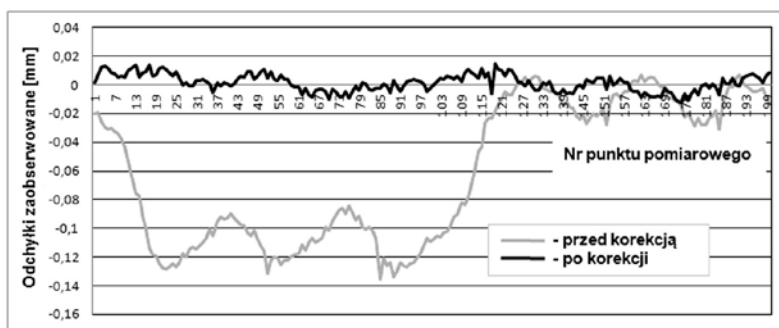
$x_i^{nom}, y_i^{nom}$  – współrzędne punktów nominalnych,

$x_i^{kor}, y_i^{kor}$  – współrzędne punktów skorygowanych.

Uzyskane współrzędne posłużyły do wyznaczenia profilu skorygowanego. W tym celu wprowadzono nowe współrzędne do programu MasterCAM, po czym interpolowano przez nie nową krzywą NURBS. Wygenerowano skorygowany program obróbkowy korzystając z poprzednio wprowadzonych parametrów obróbki, zamieniwszy jedynie profil nominalny na profil skorygowany, a następnie przeprowadzono obróbkę.

#### 4.3. OCENA DOKŁADNOŚCI POWIERZCHNI PO KOREKCJI

W ocenie dokładności powierzchni zastosowano tę sama procedurę pomiaru, co po obróbce wstępnej. Wyniki pomiarów pokazano na rys. 6. Dla porównania zamieszczono również wykres odchyłek przed korekcją. W tab. 1 porównano wartości odchyłek z uwzględnieniem ich znaku oraz średnich arytmetycznych odchyłek przed i po korekcji. Dla profilu skorygowanego oceniono odchyłkę kształtu zarówno w odniesieniu do układu baz, jak również po dopasowaniu danych do modelu CAD, czyli po oddzieleniu odchyłek kierunku i położenia (patrz rozdz. 2)



Rys. 6. Wartości odchyłek profilu po korekcji programu

Tab. 1. Parametry statystyczne odchyłek po korekcji

mm	Odchyłki przed korekcją	Odchyłki po korekcji Dane względem baz	Odchyłki po korekcji Dane po dopasowaniu do modelu CAD
Średnia arytmetyczna	-0,0607	+0,0014	0,0014
Min./Max.	-0,1356/+0,0073	-0,0124/+0,0144	-0,0098/0,0130
Wysokość profilu	0,1429	0,0268	0,0228
Odchyłka kształtu	0,2712	0,0288	0,0196

Analiza wykresu (rys. 6) wskazuje, że wartość bezwzględna największej odchyłki przed korekcją to 0,1356 mm, natomiast po korekcji to 0,0144 mm. Oznacza to, że wartości odchyłek kształtu wynoszą odpowiednio 0,2712 mm oraz 0,0288 mm. Osiągnięto więc redukcję odchyłek o ok. 90%. Ponadto można zaobserwować, że po korekcji rozkład odchyłek profilu jest równomierny. Po oddzieleniu odchyłek położenia i kierunku odchyłka kształtu profilu wynosiła 0,0098 mm, odchyłki położenia względem baz w kierunkach  $x$  i  $y$  (rys. 5) wynosiły odpowiednio 0,0023mm oraz 0,0083 mm.

## 5. WNIOSKI

W referacie przedstawiono procedurę poprawy dokładności frezowania profili krzywoliniowych polegającą na wyznaczeniu poprawek kompensujących na podstawie wyników pomiarów a WMP, modyfikacji nominalnego modelu CAD, następnie korekcji programu obróbkowego oraz ponownej obróbce na podstawie zmodyfikowanego modelu CAD. Umożliwia ona kompensację błędów obróbki różnego pochodzenia. Ingerencja w program obróbkowy umożliwia trwale wprowadzenie poprawy dokładności do obróbki konkretnego detalu, bez względu na wielkość serii. Sam proces korekcji można przeprowadzać kilkakrotnie, aż do uzyskania pożądanej dokładności



wymiarowo-kształtowej. Skuteczność wybranej metody korekcji potwierdza analiza wyników pomiarów.

Wyniki weryfikacji doświadczalnej wskazały znaczną redukcję odchyłki kształtu profilu, z wartości 0,2712 mm na 0,0288 mm, czyli o ok. 90%. Takie wyniki były możliwe dzięki wielkiej staranności w pozycjonowaniu próbek podczas obróbki i pomiarów.

#### LITERATURA

- [1] CHOI J.P., MIN B.K., LEE S.J., *Reduction of machining errors of a three-axis machine tool by on-machine measurement and error compensation system*. W: Journal of Materials Processing Technology, vol. 155–156, 2004, pp. 2056–2064.
- [2] CHO M.-W., KIM G.-H., SEO T.-I., HONG Y.-C., CHENG H., *Integrated machining error compensation method using OMM data and modified PNN algorithm*. W: International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 46, 2006, pp.1417–1427.
- [3] CHEN Y., GAO J., DENG H., ZHENG D., CHENA X, KELLY R., *Spatial statistical analysis and compensation of machining errors for complex surfaces*. W: Precision Engineering, vol. 37, 2013, pp. 203– 212.
- [4] YANG B.D., MENQ C.H., *Compensation for form error of end-milled sculptured surfaces using discrete measurement data*. W: International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 33, Issue 5, 1993, pp. 725-740.
- [5] LECHNIAK Z., WERNER A., SKALSKI K., KĘDZIOR K., *Methodology of off-line software compensation for errors in the machining process on the CNC machine tool*. W: Journal of Materials Processing Technology, vol. 76, 1998, pp. 42–48.
- [6] PIEGL L., TILLER W., *The NURBS book*, 2nd ed. New York, Springer-Verlag, 1997.
- [7] PN-EN ISO 1101:2006. *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Tolerancje geometryczne: Tolerancje kształtu, kierunku, położenia i bicia*.
- [8] PONIATOWSKA M., *Pomiary współrzędnościowe i analiza odchyłek geometrycznych powierzchni swobodnych*. Monografia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2012.