

Łukasz Czerech, Andrzej Werner <sup>1)</sup>

## KOREKCJA ODCHYLEK OBRÓBKOWYCH PROFILI KRZYWOLINIOWYCH WYTWARZANYCH NA FREZARKACH CNC

**Streszczenie:** Wytwarzanie elementów na obrabiarkach sterowanych numerycznie jest techniką bardzo prężnie rozwijającą się i wykorzystywaną do produkcji różnych komponentów w wielu gałęziach przemysłu. Produkowane współcześnie obrabiarki charakteryzują się konstrukcją umożliwiającą uzyskanie wysokiej dokładności geometrycznej maszyny. Niestety najlepiej skonstruowana i wykonana obrabiarka z powodu zmiennego środowiska pracy lub zużycia elementów współpracujących, często nie jest w stanie stać czoła wysokim wymaganiom dokładnościowym produkowanych elementów. W artykule zaprezentowana została metodyka *off-line* korekcji błędów obróbkowych. Opracowana metoda korekcji pozwala na wykonanie komponentów z większą dokładnością niż w przypadku tradycyjnego podejścia.

**Słowa kluczowe:** korekcja odchyłek, profil krzywoliniowy, CNC, CMM.

### WSTĘP

Obróbka skrawaniem elementów na obrabiarkach sterowanych numerycznie jest jedną z najczęściej stosowanych technik wytwarzania we współczesnych procesach produkcyjnych. Spowodowane jest to wyraźną tendencją do skracania czasów obróbki, możliwością wyeliminowania innych bardziej kosztownych i czasochłonnych operacji technologicznych, możliwością zwiększenia różnorodności produkowanych wyrobów oraz coraz bardziej znaczącą rolą elastycznego wytwarzania. W takich przypadkach skrawanie z pełnego materiału może okazać się bardziej opłacalne niż przygotowywanie półproduktów z użyciem kosztownych matryc, form czy kokili. W wielu przypadkach dzięki super wydajnym narzędziom z naniesionymi powłokami o zwiększonej odporności na ścieranie, obróbka wiórowa może zastąpić kosztowne i czasochłonne drążenie elektroerozyjne [14].

Wszystkie elementy wytwarzane na obrabiarkach sterowanych komputerowo są obciążone błędami obróbkowymi, które można podzielić na trzy grupy. Pierwszą największą grupę stanowią błędy geometryczne. Są one traktowane jako błędy obrabiarki, które występują nawet bez obciążenia termicznego i pochodzą w głównej mierze z niedoskonałości wykonania, niewystarczającej sztywności lub zużycia obrabiarki. Powiększają się one drastycznie wraz ze wzrostem zużycia obrabiarki. Okafor i Ertekin w swej pracy [5] dokładnie opisują przyczyny po-

---

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Zakład Inżynierii Produkcji.

wstawania tego rodzaju błędów. Drugą równie istotną grupę tworzą odchyłki wynikające z zakłóceń 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. Źródłami ciepła mogą być również: silniki, łożyska, systemy hydrauliczne, temperatura otoczenia, itp. Z tą grupą błędów najtrudniej jest sobie poradzić, ponieważ są one trudne do przewidzenia i oszacowania [13]. Odkształcenia cieplne odwzorowują się na przedmiocie obrabianym w postaci błędów wymiarowych i błędów kształtu. Temat oszacowania i korekcji odchyłek termicznych opisano szerzej w pracach [3, 7]. Kolejnym bardzo istotnym źródłem błędów jest sam proces obróbki i towarzyszące mu zjawiska. W głównej mierze są to siły działające na obrabiarkę i obrabiany przedmiot, które w dużym stopniu zależne są od ciężaru elementów roboczych maszyny i przedmiotu obrabianego, sił skrawania oraz siły bezwładności. Problem ten został dokładnie opracowany w pracy Raksiria i Parnichkuna [6].

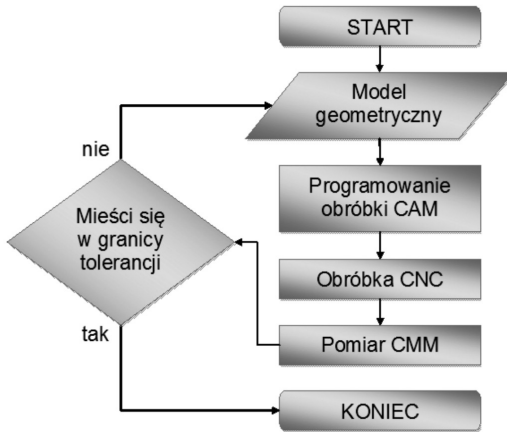
Tak duża ilość występujących błędów obróbkowych spowodowała rozwój badań mających na celu eliminację części składowych błędów i otrzymanie przedmiotu o wysokiej dokładności geometrycznej. Rezultatem tych badań było opracowanie dwóch metod korekcji błędów obróbki przedmiotów na obrabiarkach sterowanych numerycznie. Pierwsza z nich metoda *off-line* polega na pośredniej korekcji programu obróbkowego [8]. Druga metoda kompensacji błędów obróbkowych to metoda *on-line*, charakteryzująca się bezpośrednim przeprowadzeniem korekcji w trakcie trwania obróbki przedmiotu [8, 12].

## METODYKA KOREKCJI ODCHYLEK OBRÓBKOWYCH

Proponowana w artykule metodyka korekcji zaobserwowanych odchyłek obróbkowych jest metodyką *off-line*. Bazuje ona na modyfikacji nominalnego modelu geometrycznego CAD wytwarzanego obiektu na podstawie przeprowadzonych współrzędnościowych pomiarów kontrolnych (rys. 1).

W metodyce tej nominalny model geometryczny wytwarzanego obiektu wykorzystywany jest w pierwszej kolejności do utworzenia programu obróbkowego części w systemie CAM. W następnym kroku obiekt wytwarzany jest na frezarskim centrum obróbkowym. Po jego wytworzeniu przeprowadzane są pomiary kontrolne na współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Wyniki pomiarów dostarczają informacji o wartościach i rozkładzie zaobserwowanych odchyłek obróbkowych. Na podstawie tych informacji osoba realizująca proces wytwórczy części podejmuje dalsze decyzje. Jeżeli wartości odchyłek zaobserwowanych mieszczą się w przyjętej tolerancji proces jest zakończony. Jeżeli dokładność wytworzenia obiektu nie jest zadawalająca przystępuje się do korekcji błędów obróbki. W pierwszym kroku modyfikuje się model geometryczny obiektu. Wykorzystuje się w tym celu informacje o odchyłkach zaobserwo-

wanych zawartych w wynikach pomiarów współrzędnościowych. W kolejnym kroku na bazie zmodyfikowanego modelu geometrycznego tworzony jest skorygowany program obróbkowy i przeprowadzana jest powtórna obróbka przedmiotu. W dalszej kolejności powtarza się pomiary współrzędnościowe wytworzonego obiektu. Jeżeli odchyłki zaobserwowane w dalszym ciągu są zbyt duże całą procedurę można powtórzyć ponownie lub należy zweryfikować czy dana obrabiarka i środowisko pracy umożliwia uzyskanie pożądanej dokładności.

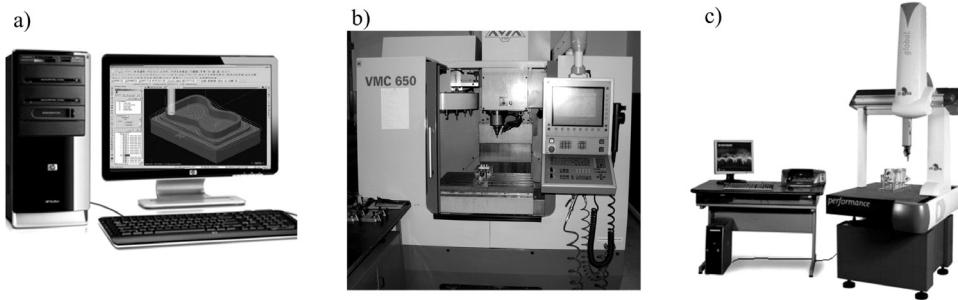


**Rys. 1.** Algorytm korekcji odchyłek obróbkowych.  
**Fig. 1.** Algorithm of machining deviations correction.

## Stanowisko badawcze

Do przeprowadzenia badania skuteczności metody kompensacji odchyłek obróbkowych wykorzystano stanowisko badawcze w skład, którego wchodziły:

- komputer klasy PC (rys. 2a), wyposażony w aplikację CAD/CAM wykorzystywaną do tworzenia modeli geometrycznych obiektów oraz tworzenia programów obróbkowych (w badaniach wykorzystano system MasterCAM X4 MU3);
- pionowe centrum obróbkowe (rys. 2b) sterowane numerycznie firmy AVIA VMC650 ze sterowaniem Heidenhain iTNC530 (dokładność i powtarzalność pozycjonowania zadeklarowana przez producenta to  $\pm 0,005\text{mm}$ ). Obrabiarka ta jest wykorzystywana do produkcji wykrojników, krępowników, form wtryskowych oraz dodatkowego osprzętu do wyżej wspomnianych narzędzi w zakładzie produkującym precyzyjne narzędzia. Jej łączny czas wykonywania programów technologicznych na fabrycznych podzespołach w trakcie przeprowadzania badania to 9000h, a łączny czas pracy obrabiarki to 17200h;
- współrzędnościowa maszyna pomiarowa Global Performance 07 07 05 (rys. 2c). Jest ona sprzężona z komputerem klasy PC, który za pomocą oprogramowania PC-DIMS zainstalowanego na platformie MS Windows XP PRO x84 steruje pracą CMM.



**Rys. 2.** Stanowisko badawcze: a) komputer z oprogramowaniem CAD/CAM, b) frezarskie centrum obróbkowe, c) współrzędnościowa maszyna pomiarowa.

**Fig. 2.** The test stand: a) PC computer with CAD/CAM software, b) CNC milling centre, c) CMM.

### Realizacja procesu korekcji odchyłek obróbkowych

W pierwszej kolejności utworzono model obiektu zawierający geometrie krzywoliniowe. Zamodelowanie elementu polegało na utworzeniu dwóch krzywych NURBS, a następnie wyciągnięciu ich na odległość 10mm za pomocą powierzchni prostokreśłych. Kolejną operacją było rozciągnięcie powierzchni czołowej pomiędzy krzywymi oraz dobudowanie prostokątnej części ułatwiającej bazowanie elementu na współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Ostatnią operacją było zamodelowanie podstawy. Tak przygotowany model wykorzystano do programowania ścieżek narzędziowych. Następnym krokiem po zamodelowaniu elementu było dobranie gatunku materiału oraz rozmiarów przygotówki, narzędzi obróbkowych i środowiska pracy.

Narzędzie wykańczające wszystkie powierzchnie biorące udział w pomiarze i bazowaniu elementu wykonano trzostrzowym frezem toroidalnym o średnicy  $\varnothing 8\text{mm}$  i promieniu zaokrąglenia naroża 0,5mm (Rys. 3). Tolerancja zaprogramowanej ścieżki obróbkowej wynosiła 0,015mm, w celu uzyskania lepszej jakości geometrycznej warstwy wierzchniej zastosowano filtrowanie łuków. Podczas obróbki oprócz filtrowania ścieżek w środowisku MasterCAM zastosowano optymalizację konturu w obrabiarce, które jest realizowane w sterowniku Heidenhain iTNC530 za pomocą cyklu 32 „Tolerancja”.

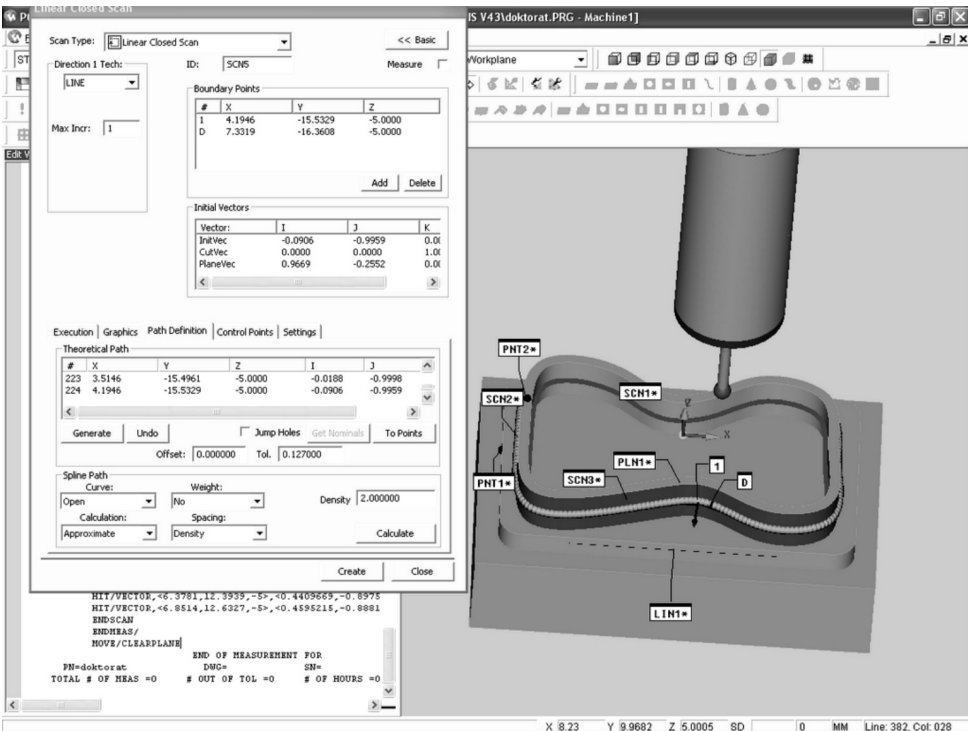
Kolejnym krokiem po obróbce CNC był pomiar wytworzonych elementów na współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Ustalanie elementu na współrzędnościowej maszynie pomiarowej można podzielić na następujące operacje:

- określenie kąta pochylenia między płaszczyzną XY elementu obrobionego, a płaszczyzną XY maszyny,
- ustalenie początku układu współrzędnych zamocowanego elementu,
- określenie kąta zawartego między osią X maszyny i osią X elementu,
- ustalenie górnej granicznej powierzchni elementu,
- dokładne dopasowanie układu współrzędnych w trybie automatycznym.



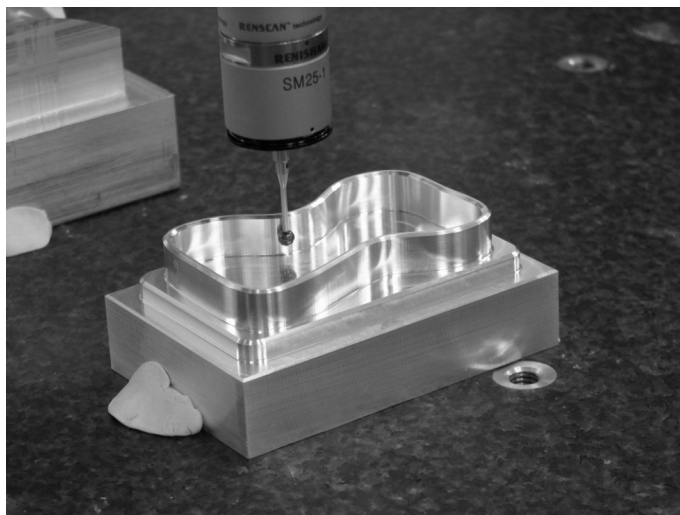
Rys. 3. Obróbka elementu na centrum obróbkowym  
Fig. 3. Part machining on milling center

Pomiar przedmiotu wykonano w trybie skanowania „linear closed” (rys. 4). Jako optymalną ilość punktów wybrano 113 punktów dla konturu zewnętrznego i 106 dla konturu wewnętrznego. Uzyskano w ten sposób krok próbkowania równy 2mm.



Rys. 4. Okno skanowania „linear closed”  
Fig. 4. “Linear closed” scan window

Wynikiem pomiaru elementów wstępnych był cyfrowy odpowiednik modelu geometrycznego obciążonego odchyłkami wykonania. Otrzymane dane zaimportowano do arkusza kalkulacyjnego, gdzie odseparowano odchyłki zaobserwowane od wartości nominalnych elementu. Gdy wartości odchyłek wykonania w poszczególnych punktach była już znana zmodyfikowano nominalny model geometryczny.



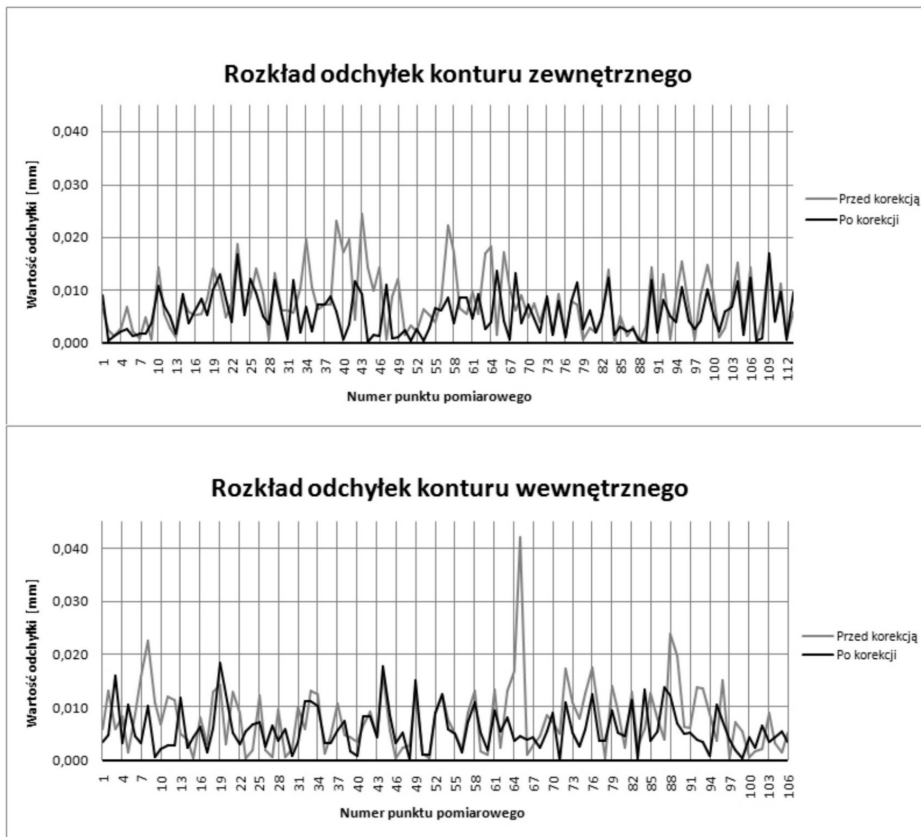
**Rys. 5.** Pomiar elementu na współrzędnościowej maszynie pomiarowej  
**Fig. 5.** Part measurement on the coordinate measuring machine

Następną operacją jaką wykonano było wytworzenie elementu na bazie skorygowanego modelu geometrycznego. Proces obróbki na centrum obróbkowym sterowanym numerycznie został przeprowadzony z takimi samymi parametrami obróbkowymi i technologicznymi oraz w takim samym środowisku pracy. Po obróbce ponownie przeprowadzono pomiar na maszynie współrzędnościowej (rys. 5) z takimi samymi parametrami i według takiego samego algorytmu.

## ZESTAWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Rozkłady zaobserwowanych odchyłek obróbkowych przedstawione zostały na rys. 6. Jak widać na powyższych wykresach, największa wartość odchyłki dla konturu zewnętrznego przed korekcją to 0,0245mm, a dla konturu wewnętrznego 0,0421mm. Wartość średniej odchyłki przed korekcją dla konturu zewnętrznego wyniosła 0,0078mm, a dla wewnętrznego 0,0079mm. Natomiast po korekcji modelu geometrycznego wartości odchyłek zmalały dokładniej odwzorowując zamodelowany element i wyniosły: dla konturu zewnętrznego największa wartość odchyłki to 0,0171mm, a dla wewnętrznego konturu to 0,0185mm. W tabeli 1 dokonano zestawienia uzyskanych wyników. Wartość średniej odchyłki po ko-

rekcji dla konturu zewnętrznego wyniosła 0,0056mm, a dla wewnętrznego 0,0059mm.



**Rys. 6.** Bezwzględne wartości odchyłek przed i po korekcji modelu geometrycznego  
**Fig. 6.** Absolute values of deviations before and after the correction of a geometric model

Tabela 1. Zestawienie wyników pomiarów

Table 1. Results summary

	Przed korekcją		Po korekcji		$\Delta$	
	Zew. [ $\mu\text{m}$ ]	Wew. [ $\mu\text{m}$ ]	Zew. [ $\mu\text{m}$ ]	Wew. [ $\mu\text{m}$ ]	Zew. [ $\mu\text{m}$ ]	Wew. [ $\mu\text{m}$ ]
Max	24,5	42,1	17,1	18,5	7,4	23,6
Śre	7,8	7,9	5,6	5,9	2,2	2,0

## PODSUMOWANIE

Wyniki przedstawione w tabeli 1 wskazują, że wykorzystanie współrzędnościowej techniki pomiarowej pozwalana oszacowywać i zminimalizować odchyłki obróbkowe w modelach wykonanych na obrabiarkach sterowanych nu-

merycznie.

Metoda kompensacji odchyłek jest skutecznym narzędziem, które umożliwia wykonywanie elementów z wysoką precyzją. Pozwala ona zarówno na zminimalizowanie odchyłek dla konturów wewnętrznych (matryc), gdzie kąć opasania narzędzia materiałem obrabianym jest znacznie większy niż w przypadku konturów zewnętrznych (stempli). W przypadku produkcji wysoko precyzyjnych wykrojników metoda ta pozwoli na uzyskanie jednakowego luzu tnącego na całej długości wykrawanego konturu. Jest to bardzo istotne ze względów zarówno estetycznych jak i wymiarowych. W przypadku form do tworzywo sztucznych pozwoli to na dokładne dopasowanie kształtowych wstawek formujących do gniazd w których zostaną osadzone i pozwolą na szczelne zamknięcie przestrzeni wypełnianej przez tworzywo powierzchni.

Jak widać na zestawieniu wyników znacząco zniwelowane zostały maksymalne wartości odchyłek bo aż o 0,0236mm. Tak duża niedokładność mogła by powodować lokalne zatarcia na współpracujących powierzchniach lub uniemożliwiłoby dopasowanie do siebie dwóch współpracujących elementów. Metoda kompensacji odchyłek obróbkowych pozwoliła na szybkie i skuteczne skorygowanie różnic między modelem nominalnym, a wytworzonym za pomocą obróbki CNC.

## PIŚMIENNICTWO

1. Chen J. S., Ling C. C.: Improving the machine accuracy through machine tool metrology and error correction. *Advanced manufacturing technology* 11, 1996, str. 198-205.
2. 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. *Journal of Materials Processing Technology* 76, 1998, str. 42–48.
3. Li S., Zhang Y., Zhang G.: A study of pre-compensation for thermal errors of NC machine tools. *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 37, No. 12, 1997, str. 1715-1719.
4. Lo C.C., Hsiao C.Y.: A method of tool path compensation for repeated machining process, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 38, 1998, 205–213.
5. Okafor A.C., Ertekin M.: Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40, 2000, str. 1199–1213.
6. Raksiri C., Parnichkun M.: Geometric and force errors compensation in a 3-axis CNC milling machine. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44, 2004, str. 1283–1291.
7. Ramesh R., Mannan M. A., Poo A.N.: Error compensation in machine tools. Part II: Thermal errors. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40, 2000, str. 1257–1284.
8. Ryu S.H., Chu C.N.: The form error reduction in side wall machining using successive down and up milling, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 45, 2005, 1523–1530.
9. Werner A., Poniatowska M.: Zastosowanie współrzędnościowej techniki pomiarowej i systemów CAD/CAM w wyznaczaniu błędów obróbki powierzchni o złożonych



- kształtach. Przegląd Mechaniczny 6, 2004, str. 30–33.
10. Werner A., Poniatowska M.: Determining errors in complex surfaces machining with the use of CNC machine tools. Komisja budowy maszyn PAN 26/2, 2006, str. 211–217.
  11. Yaldiz S., Unsacar F., Saglam H., Isik H.: Design, development and testing of a four-component milling dynamometer for the measurement of cutting force and torque. Mechanical Systems and Signal Processing 21, 2007, str. 1499–1511.
  12. 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.
  13. Yuan J., Ni J.: The real-time error compensation technique for CNC machining systems. Mechatronics 8, 1998, str. 359–380.
  14. Cichosz P.: Narzędzia skrawające. WNT, 2006.
  15. Ratajczyk E.: Współrzędnościowa technika pomiarowa. Politechnika Warszawska, 2005.
  16. Instrukcja obsługi oprogramowania PC-DIMS.

## **CORRECTION OF THE MACHINING DEVIATIONS OF THE CURVILINEAR PROFILES PRODUCED ON THE CNC MILLING MACHINES**

### **Summary**

The manufacture of components on numerically controlled machines is very rapidly developing technique and it is used for production of various components in many industrial sectors. Currently produced machine tools are characterized by construction that allow to achieve high geometrical accuracy. Unfortunately, best designed and constructed machine tool in addition to the variable work environment or wear of associated components, is unable to face the above-mentioned requirements. In this paper was presented off-line correction of machining errors methodology. The elaborated correction method allows to part manufacture with greater accuracy than in traditional approaches.

**Keywords:** deviations correction, curvilinear profile, CNC, CMM.