

Evaluation of the degree of fitting of a curvilinear hole and stub machined on a CNC milling center

Ocena stopnia dopasowania pary otwór–czop krzywoliniowy wytworzonej na frezarskim centrum obróbkowym

ANDRZEJ WERNER *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.12.108>

The method of evaluating the accuracy of fitting a curvilinear hole-stub pair is presented. The next stages of the process were presented, including: machining of elements, coordinate measurements of machined parts, analysis of measurement results. A method to improve the degree of fitting of the hole-stub pair is proposed.

KEYWORDS: curvilinear profile, hole, stub, milling, coordinate measurements

Przedstawiono metodę oceny dokładności dopasowania pary otwór–czop krzywoliniowy. Zaprezentowano kolejne etapy procesu obejmujące: obróbkę elementów, współrzędnościowe pomiary kontrolne i analizę wyników pomiarów. Zaproponowano metodę poprawy stopnia dopasowania pary otwór–czop.

SŁOWA KLUCZOWE: profil krzywoliniowy, otwór, czop, frezowanie, pomiary współrzędnościowe

Wprowadzenie

W produkcji oprzyrządowania i narzędzi stosowane jest często precyzyjne wytwarzanie wyrobów zawierających współpracujące ze sobą krzywoliniowe elementy geometryczne [1]. Właściwe dopasowanie pary otwór–czop istotnie wpływa na działanie takich mechanizmów jak wykrojniki do blach i matryce do form wtryskowych.

W przypadku profili krzywoliniowych ocena dokładności wytwarzania oraz luzów jest możliwa tylko z zastosowaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej. Pomiary kontrolne przeprowadza się na współrzędnościowych maszynach pomiarowych [2, 3] lub (co jest coraz bardziej popularne) na obrabiarkach CNC [4, 5]. Mankamentem pomiarów na współrzędnościowych maszynach pomiarowych jest konieczność zdjęcia przedmiotu obrabianego z obrabiarki. To wymusza odtworzenie jego układu współrzędnych na maszynie pomiarowej. Aby zminimalizować to źródło błędów, należy właściwie wykorzystać procedury oferowane przez oprogramowanie współrzędnościowych maszyn pomiarowych.

Pomiary wykonywane na obrabiarkach CNC bezpośrednio po obróbce przedmiotu nie wymagają zmiany ustawienia mierzonego obiektu [6]. Nie są więc obciążone błędami związanymi z ponownym definiowaniem układu współrzędnych przedmiotu. Wymagają one jednak dodatkowego wyposażenia obrabiarki w precyzyjne sondy pomiarowe oraz zainstalowania w sterowniku obrabiarki dodatkowych cykli pomiarowych.

W przypadku pomiarów obiektów krzywoliniowych przez współrzędnościowe maszyny pomiarowe nad obrabiarkami CNC są przede wszystkim większa precyzja oraz znacznie więcej opcji. Wyniki pomiarów współrzędnościowych są wykorzystywane do oceny stopnia

dopasowania otworów i współpracujących z nimi czopów. Jeżeli zachodzi taka potrzeba, na ich podstawie można przeprowadzić procedurę zwiększającą dokładność wytworzenia współpracujących elementów.

Zaproponowana w artykule procedura oceny stopnia dopasowania pary otwór–czop krzywoliniowy bazuje na pomiarach wykonanych na współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Na podstawie wyników pomiarów podjęto dodatkowe czynności mające na celu zwiększenie dokładności wytwarzania współpracujących elementów oraz osiągnięcie założonej szczeliny między elementami.

Ocena stopnia dopasowania otworu i czopa krzywoliniowego

Proponowana w artykule metoda oceny dokładności dopasowania otworu i czopa krzywoliniowego jest realizowana w następujących etapach:

- budowa nominalnego modelu geometrycznego profilu krzywoliniowego,
- przygotowanie programów obróbkowych wytwarzanych obiektów i ich obróbka na frezarce CNC,
- pomiary współrzędnościowe otworu i czopa, wyznaczenie zaobserwowanych odchyłek i ich składowych,
- wyznaczenie różnic zaobserwowanych odchyłek otworu i czopa w punktach pomiarowych,
- ocena stopnia dopasowania na podstawie rozkładu wyznaczonych różnic odchyłek oraz ich wartości minimalnej i maksymalnej.

Zarys nominalny profilu otworu i czopa krzywoliniowego opisano krzywą NURBS (rys. 1). Krzywa została zbudowana na wieloboku kontrolnym składającym się z 11 wierzchołków. Stopień funkcji bazowych B-sklejanych $n = 3$.

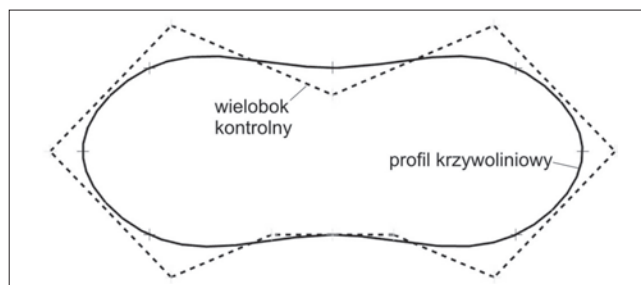


Fig. 1. Nominal contour of the hole and curvilinear stub
Rys. 1. Zarys nominalny otworu i czopa krzywoliniowego

W systemie MasterCAM zbudowano model CAD obiektów oraz przygotowano programy sterujące obróbką. Obróbkę wykończeniową przeprowadzono frezem walcowo-czołowym ze stali szybko tnącej o średnicy $\varnothing 10$ mm (trzy ostrza). Przyjęto następujące parametry obróbki wykończeniowej:

* Dr inż. Andrzej Werner, a.werner@pb.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-3768-5395> – Katedra Inżynierii Materiałowej i Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, Białystok, Polska

- posuw – 300 mm/min (0,02 mm/ząb),
 - szybkość skrawania – 157 m/min,
 - obroty wrzeciona – 5000 obr/min,
 - naddatek 0,3 mm,
 - offset między otworem a czopem na poziomie 0,05 mm.
- Elementy (rys. 2) wykonane ze stopu aluminium PA6 (2017A).

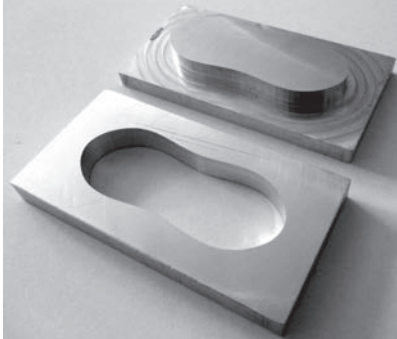


Fig. 2. The hole and curvilinear stub produced
Rys. 2. Wytworzone otwór i czop krzywoliniowy

Po zakończeniu etapu wytwarzania obrabione obiekty poddano pomiarom kontrolnym. Przeprowadzono je na maszynie pomiarowej Global Performance firmy Hexagon Metrology (oprogramowanie PC-DMIS, $MPEE = 1,5 + L/333$ [mm], głowica pomiarowa Renishaw SP25M, trzpień pomiarowy o długości 20 mm z kulistą końcówką o średnicy $\varnothing 2$ mm). Wykorzystano procedurę automatycznego skanowania dostępną w systemie PC-DMIS. Procedura „Skan liniowy zamknięty” (rys. 3) wymaga wskazania punktu początkowego skanowania i drugiego punktu określającego kierunek skanowania. Definiuje się również maksymalną odległość między punktami pomiarowymi (w tym przypadku 1 mm). W przygotowaniu tej procedury wykorzystano nominalny model powierzchniowy wytworzonych elementów.

Na podstawie podanych informacji system automatycznie generuje nominalne współrzędne punktów pomiarowych i wektory dojazdu końcówki pomiarowej skierowane prostopadle do mierzonego profilu. W pomiarze czopa i otworu uzyskano identyczny rozkład 143 punktów pomiarowych (rys. 4).

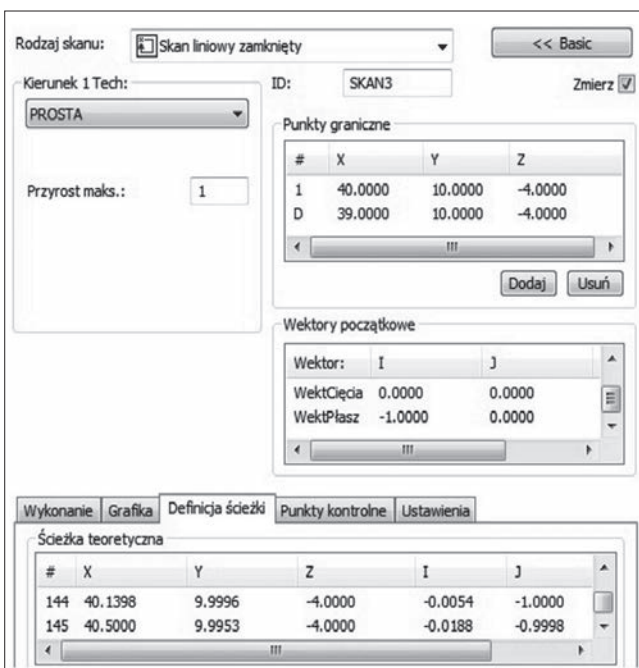


Fig. 3. Closed linear scan window
Rys. 3. Okno skanowania liniowego zamkniętego

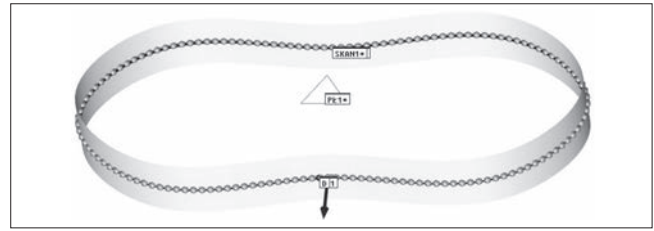


Fig. 4. Distribution of measuring points
Rys. 4. Rozkład punktów pomiarowych

W wyniku przeprowadzonych pomiarów współrzędnościowych uzyskano dwa zestawy odchyłek zaobserwowanych. Odchyłki te wyznaczono w tych samych współrzędnych nominalnych zarysu opisującego czop i otwór. Wyniki pomiarów współrzędnościowych zestawiono w tabl. I. Zarówno w przypadku otworu, jak i czopa nie uzyskano oczekiwanej dokładności obróbki.

W punktach pomiarowych wyznaczono dodatkowo różnice odchyłek zaobserwowanych dla otworu i czopa (tabl. II). Zawierają one informacje o lokalnej odległości między konturami (szczelinie).

Na rys. 5 przedstawiono rozkłady zaobserwowanych odchyłek czopa i otworu (odchyłki przedstawiono w skali 20:1 w stosunku do konturu nominalnego). Ilustrują one również rozkład szczeliny między dwoma elementami.

TABLE I. Coordinate measurement results

TABLICA I. Wyniki pomiarów współrzędnościowych

	Czop	Otwór
Odchyłka maksymalna [mm]	-0,080	0,103
Odchyłka minimalna [mm]	-0,018	-0,014
Odchylenie standardowe [mm]	0,0135	0,0297
Średnia [mm]	-0,058	0,062

TABLE II. Designated distances between contours

TABLICA II. Wyznaczone odległości między konturami

Odległość maksymalna [mm]	0,167
Odległość minimalna [mm]	0,046
Odchylenie standardowe [mm]	0,026
Średnia [mm]	0,120

Największa wartość zaobserwowanego przesunięcia konturów to 0,167 mm, najmniejsza to 0,046 mm. Wartość maksymalna ponad trzykrotnie przekracza założoną w na wstępie wartość offsetu konturów. Zastrzeżenia budzi również szeroki zakres zmienności szczeliny między elementami.

Z uwagi na to, że efekty obróbki profili krzywoliniowych nie spełniły wymagań, przeprowadzono procedurę zwiększenia dokładności wytwarzania. Miała ona na celu zwiększenie dokładności obróbki samych profili i uzyskanie odpowiedniej szczeliny między wytworzonymi konturami.

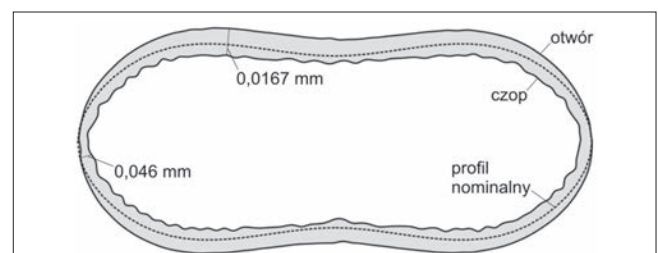


Fig. 5. Distribution of machining deviations of the stub and the hole
Rys. 5. Rozkład zaobserwowanych odchyłek obróbkowych czopa i otworu

Poprawa dokładności wytwarzania otworu i czopa krzywoliniowego

Zastosowana metoda podnoszenia dokładności wytwarzania profili krzywoliniowych [7] jest realizowana w następujących etapach:

- pomiary współrzędnościowe wytworzonego obiektu, wyznaczenie zaobserwowanych odchyłek i ich składowych,
- wyznaczenie współrzędnych skorygowanych profilu w punktach pomiarowych,
- przebudowa nominalnego modelu geometrycznego wytwarzanego profilu, tworzenie skorygowanych programów obróbkowych i obróbka przedmiotu,
- pomiary współrzędnościowe i ocena poprawy dokładności wytwarzania profilu krzywoliniowego.

Podstawowym elementem proponowanej metody jest proces przebudowy modelu geometrycznego wytwarzanego obiektu. Rozpoczyna się on od realizacji współrzędnościowych pomiarów kontrolnych wstępnie obrabianego profilu. Wyniki pomiarów zawierają informacje o zaobserwowanych odchyłkach obróbkowych. Miarami wyznaczanych odchyłek są odległości pomiędzy punktami znajdującymi się na profilu (modelu nominalnym CAD) a odpowiadającymi im punktami zaobserwowanymi w wyniku pomiarów.

Po przeprowadzeniu pomiarów współrzędnościowych przystąpiono do budowy dwóch skorygowanych modeli geometrycznych wytwarzanego profilu (czopa i otworu). Na początkowym etapie procesu korekcji z programu pomiarowego wydzielono współrzędne nominalne oraz współrzędne zaobserwowane 143 punktów pomiarowych. Na ich podstawie wyznaczono dwa zestawy współrzędnych skorygowanych. Następnie w systemie MASTERCAM utworzono dwie skorygowane krzywe opisujące wytwarzany profil. Krzywe te kompensowały odchyłki obróbkowe i wykorzystano je do powtórnego wygenerowania programów obróbkowych. Założono przy tym, że maksymalne przesunięcie konturu czopa względem otworu nie powinno być większe niż 0,05 mm.

Po powtarznej obróbce elementów ponownie przeprowadzono pomiary współrzędnościowe. Analiza ich wyników wykazała znaczną poprawę dokładności wytworzenia profili krzywoliniowych. Podstawowe informacje o wynikach pomiarów zawarto w tabl. III. Wynika z nich, że maksymalna odchyłka przy obróbce otworu zmniejszyła się ponad pięciokrotnie. W przypadku czopa odchyłka ta zmniejszyła się ponad dwukrotnie.

W tabeli IV zebrano podstawowe dane dotyczące wyznaczonych różnic zaobserwowanych odchyłek czopa i otworu w punktach pomiarowych. Informują one o lokal-

TABLE III. Results of repeated coordinate measurements
TABLICA III. Wyniki powtórnych pomiarów współrzędnościowych

	Czop	Otwór
Odchyłka maksymalna [mm]	-0,035	0,018
Odchyłka minimalna [mm]	-0,007	-0,0007
Odchylenie standardowe [mm]	0,0064	0,0032
Średnia [mm]	-0,0177	0,007

TABLE IV. Determined distances between contours after profile correction
TABLICA IV. Wyznaczone odległości między konturami po korekcie profili

Odległość maksymalna [mm]	0,044
Odległość minimalna [mm]	0,010
Odchylenie standardowe [mm]	0,006
Średnia [mm]	0,024

nej szerokości szczeliny między dwoma elementami. Wyniki wskazują, że maksymalna wielkość odsunięcia konturów zmniejszyła się z 0,167 mm do 0,044 mm. Średnia wielkość szczeliny między otworem a czopem zmniejszyła się z 0,120 mm do 0,024 mm. Wyniki te wskazują, że osiągnięto znacznie większy stopień dopasowania dwóch konturów krzywoliniowych.

Graficzny rozkład zaobserwowanych odchyłek po obróbce korekcyjnej oraz związany z tym rozkład szczeliny między elementami przedstawiono na rys. 6. Cienką linią zaznaczono wyniki uzyskane przed korekcją.

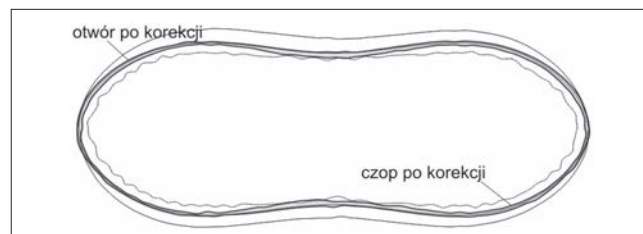


Fig. 6. Distribution of observed machining deviations of the stub and hole – after correction of machining deviations

Rys. 6. Rozkład zaobserwowanych odchyłek obróbkowych czopa i otworu – po korekcji odchyłek obróbkowych

Podsumowanie

Przedstawiony w artykule sposób postępowania umożliwia ocenę stopnia dopasowania czopa i otworu o zarysie krzywoliniowym. Niezbędne jest w tym przypadku przeprowadzenie pomiarów współrzędnościowych.

Informacje o zaobserwowanych odchyłkach dwóch profili dostarczają wiedzy o lokalnej wielkości szczeliny oraz jej rozkładzie na całej długości profilu. Zakres zmienności szczeliny i jej rozkład umożliwiają ocenę osiągniętego stopnia dopasowania współpracujących profili. Ma to duży wpływ na właściwe funkcjonowanie takich elementów, jak wykrojniki do blach lub elementy zamykające matryc do form wtryskowych. W przypadku nieosiągnięcia właściwej dokładności dopasowania konturów można zastosować metodę zwiększenia dokładności obróbki konturów otworu i czopa. Jak wykazano, metoda przedstawiona w artykule znacząco podniosła dokładność wytworzenia obu profili. Umożliwiła również osiągnięcie szczeliny o mniejszej wielkości i bardziej równomiernym rozkładzie.

LITERATURA

- [1] 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): 88–99, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00943-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00943-3).
- [2] Chua C.H., Huang W.N., Hsu Y.Y. "Machining accuracy improvement in five-axis flank milling of ruled surfaces". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 48 (2008): 914–921, <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2007.10.023>.
- [3] Poniatowska M., Werner A. "Fitting spatial models of geometric deviations of free-form surfaces determined in coordinate measurements". *Metrology and Measurement Systems*. 17, 4 (2010): 599–610, 10.2478/v10178-010-0049-x.
- [4] Bera T.C., Desai K.A., Rao P.V.M. "Error compensation in flexible end milling of tubular geometries". *Journal of Materials Processing Technology*. 211 (2011): 24–34, <https://doi.org/10.1016/j.jmatproc.2010.08.013>.
- [5] Chen Y. et al. "Spatial statistical analysis and compensation of machining errors for complex surfaces". *Precision Engineering*. 37 (2013): 203–212, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.08.003>.
- [6] Cho M.W. et al. "Integrated machining error compensation method using OMM data and modified PNN algorithm". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 46 (2006): 1417–1427, <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2005.10.002>.
- [7] Werner A. "Korekcja odchyłek obróbkowych profili 2D opisanych krzywymi NURBS". *Mechanik*. 8/9 (2018): 716–718, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.8-9.113>.