

APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Współrzędnościowa technika pomiarowa w kontroli dokładności wytwarzania powierzchni swobodnych

GRZEGORZ SKORULSKI, ANDRZEJ WERNER
POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY

STRESZCZENIE

W pracy pokazano na konkretnych przykładach, w jaki sposób wybór strategii obróbki wykańczającej może wpływać na jakość i dokładność wytwarzanych powierzchni swobodnych. Powierzchniom tym w technice stawiane są liczne wymagania, gdyż stanowią one (lub są powiązane) z innymi elementami części maszyn, głównie form i matryc. Analiza dokładności wytworzenia powierzchni na frezarskim centrum obróbkowym ze sterowaniem CNC została przeprowadzona na podstawie pomiarów na współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Otrzymane w wyniku pomiarów mapy powierzchni ze zdefiniowanymi błędami są z kolei podstawą do sformułowania wniosków odnośnie poprawy jakości wytwarzanych powierzchni. Wskazano również na rolę i zastosowanie współrzędnościowej techniki pomiarowej do wyżej zdefiniowanych zadań.

Coordinate measuring technique in controlling the accuracy of free-form surfaces

ABSTRACT

The accuracy of some free-form samples with respect to strategy of the machining has been discussed in this paper. The results are very usefull, because this kind of surfaces are very important in technique, especially with respect to moulds and dies. Moreover, the technological parameters and strategy of finishing cuts have significant influence on accuracy. The three samples have been produced by CNC machine center. The accuracy analysis of produced free-form surfaces was made using coordinate measuring machine (CMM). The diagrams or maps of errors, received from measurement, are simply provided to conclusions, which strategy of the finishing operation will be acceptable and how to increase the precision in real production. The significance of the coordinate measuring system in controlling the accuracy has been described as well.

1. WSTĘP

Krzywym i powierzchniom [1, 2] stosowanym w projektowaniu obiektów technicznych z wykorzystaniem systemów CAD, stawiane są następujące wymagania:

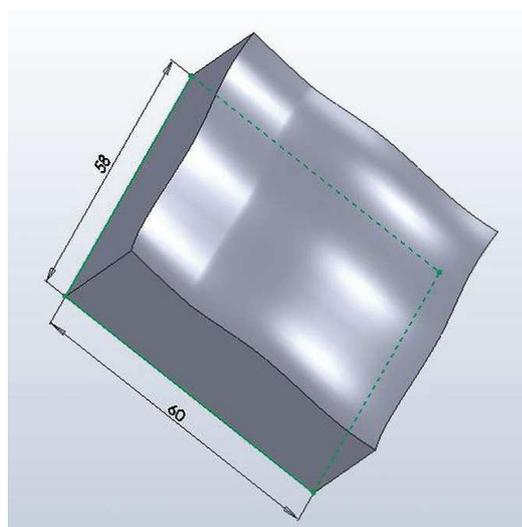
- powinny być wygodne w użyciu dla projektanta, tak aby dzięki nabytemu doświadczeniu mógł w szybki sposób utworzyć model geometryczny projektowanego produktu,
- powinny umożliwiać przeprowadzenie badania tworzego modelu jeszcze przed zbudowaniem prototypu,
- powinny dawać możliwość łatwego przetwarzania, co w znaczący sposób ogranicza ilość wprowadzanych systemów modelowania,
- geometria budowanych elementów nie powinna stanowić ograniczenia dla narzędzi stosowanych w precyzyjnej prezentacji obiektu, co zwiększa efektywność pracy i skraca czas pojawienia się produktu na rynku.

Obróbka powierzchni swobodnych (głównie form i matryc) nie napotyka raczej na dzień dzisiejszy żadnych problemów [3]. Pozostaje standardem wykonanie jej w trzech lub więcej zabiegach (tym ostatnim jest najczęściej polerowanie, jeśli zachodzi taka potrzeba). Liczba zabiegów może ulec skróceniu dzięki wykorzystaniu technologii HSM (High Speed Machining) [4]. Technologia ta zapewni dobrą jakość i dokładność wytworzonej powierzchni oraz znacznie skraca czas samej obróbki poprzez zastosowanie dużych szybkości skrawania. Jest to z kolei możliwe dzięki niewielkim i równomiernym przekrojom warstwy skrawanej [5]. Nowoczesne materiały skrawające i małe przekroje warstwy skrawanej, przy jednoczesnym zastosowaniu dużych szybkości skrawania mogą wyeliminować konieczność polerowania, jeśli względy estetyczne finalnego wyrobu nie są priorytetem dla klienta końcowego. Projektując proces obróbki z wykorzystaniem maszyn CNC technolog ma zazwyczaj do dyspozycji oprogramowanie CAD/CAM. W zależności od zastosowanego systemu ma on dostęp do kilku a nawet kilkunastu różnych strategii obróbkowych, które może zastosować [6]. Najczęściej są to strategie: liniowa, kołowa, spiralna, ze stałym krokiem z, ołówkowa. Są też dostępne inne, ukierunkowane na bardziej specjalistyczną obróbkę. Kilkanaście strategii obróbkowych, dotyczących obróbki wykańczającej, dostępnych jest przy użyciu modułu HSM. Zatem wybór najlepszej, zapewniającej żadaną dokładność jest zagadnieniem skomplikowanym. Decyzja o wyborze jest trudna, ponieważ dostępna wizualizacja (symulacja) obróbki

nie zawsze jest w stanie jednoznacznie wskazać na pojawiające się błędy. Pomocą w tym przypadku może służyć współrzędnościowa technika pomiarowa. Jest to stosunkowo młoda dziedzina pomiarów wielkości geometrycznych. Obecnie przeżywa ona dynamiczny rozwój dzięki możliwości automatyzacji pomiarów, integracji z systemami CAD/CAM oraz zastosowania komputerowej analizy i archiwizacji wyników pomiarów. Współrzędnościowe maszyny pomiarowe znajdują zastosowanie zarówno w laboratoriach, jak i na halach produkcyjnych, zapewniając, przy stworzonym wcześniej programie pomiarowym, na szybkie uzyskanie wyników.

2. PROJEKT POWIERZCHNI SWOBODNEJ I SYMULACJA OBRÓBK

W celu analizy dokładności wytwarzania powierzchni swobodnych, z wykorzystaniem różnych strategii obróbki wykańczającej, zaprojektowano powierzchnię swobodną przedstawioną na Rysunku 1.

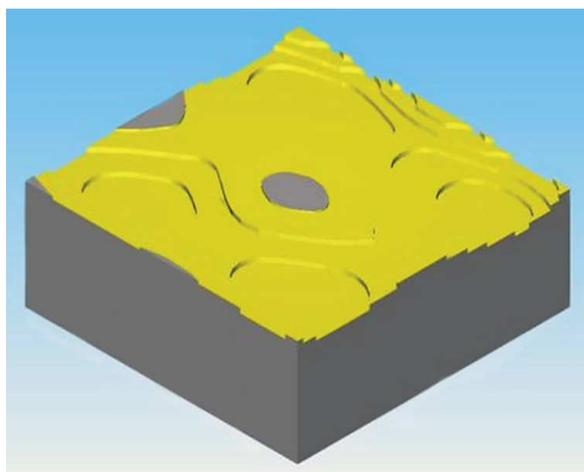


Rysunek 1. Model geometryczny powierzchni swobodnej

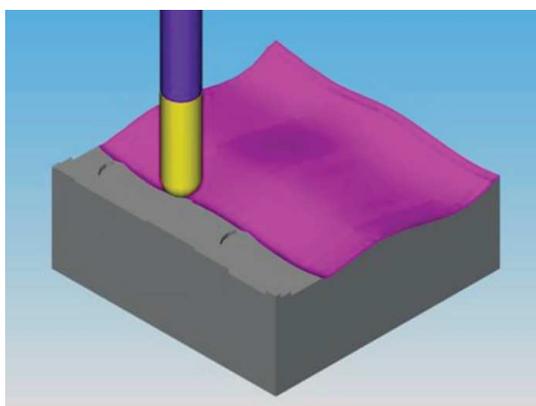
Wymiary gabarytowe materiału tzw. przygotówki wynosiły 60x58 mm. Wysokość przygotówki – 28 mm. Powierzchnia została wygenerowana w programie SolidWorks za pomocą narzędzia: wyciągnięcie po profilach. Kształt powierzchni został tak dobrany, aby narzędzia zastosowane w obróbce mogły bez problemu usunąć zaplanowany naddatek obróbkowy. Dotyczyło to w szczególności obróbki wykańczającej, za którą był odpowiedzialny dwuostrzowy frez kulowy pełnowęglkowy o średnicy 6 mm. Następnym krokiem było zaplanowanie zabiegów obróbkowych oraz mocowania przedmiotu obrabianego. Jako przyrząd mocujący wybrano imadło maszynowe. Obróbka składała się z trzech zabiegów:

1. obróbka zgrubna frezem walcowo-czołowym o średnicy 10 mm,
2. obróbka kształtująca – frezem kulowym o średnicy 8 mm,
3. obróbka wykańczająca – frezem kulowym o średnicy 6 mm.

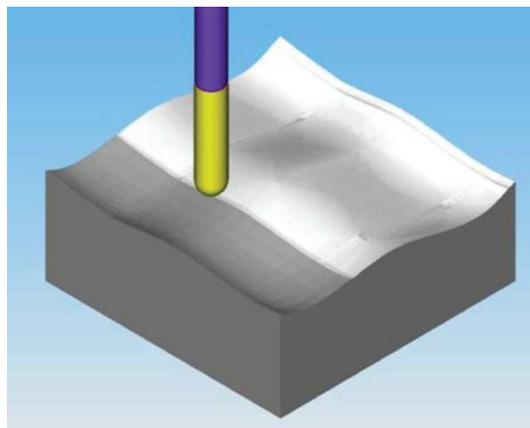
Obróbkę kształtującą zaplanowano tak, aby na powierzchni obrabianej pozostał równomierny naddatek. Umożliwia to stabilną pracę narzędzia podczas obróbki wykańczającej. Do wygenerowania programu obróbkowego wykorzystano oprogramowanie SolidCam. Symulację procesu obróbki pokazano na Rysunkach 2÷6. Rysunek 2 pokazuje efekt obróbki zgrubnej. Na Rysunku 3 pokazano symulację obróbki kształtującej. Kolejne Rysunki, tj. 4, 5, 6 pokazują strategie obróbkowe poddane analizie w niniejszej pracy. Są to: obróbka liniowa (Rys. 4), obróbka spiralna (Rys. 5) oraz obróbka po tworzących (Rys. 6). Tworzące zostały zdefiniowane z zewnętrznego zarysu powierzchni.



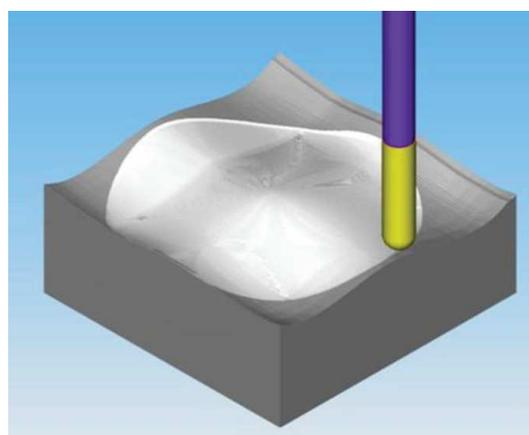
Rysunek 2. Symulacja obróbki zgrubnej (głębokość warstwy skrawanej: 1 mm, naddatek: 0,5 mm)



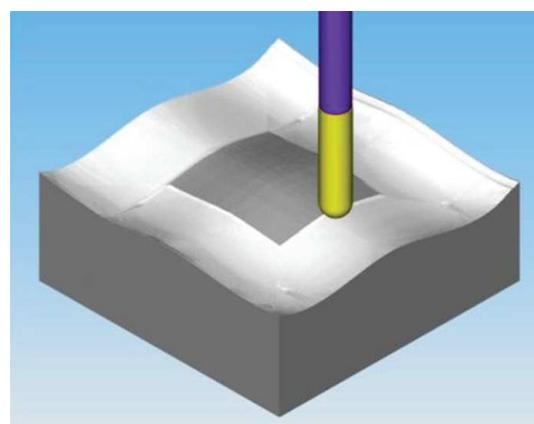
Rysunek 3. Symulacja obróbki kształtującej (naddatek: 0,2 mm)



Rysunek 4. Symulacja obróbki wykańczającej (strategia liniowa)



Rysunek 5. Symulacja obróbki wykańczającej (strategia spiralna)



Rysunek 6. Symulacja obróbki wykańczającej (strategia po tworzących)

3. WYKONANIE POWIERZCHNI SWOBODNEJ

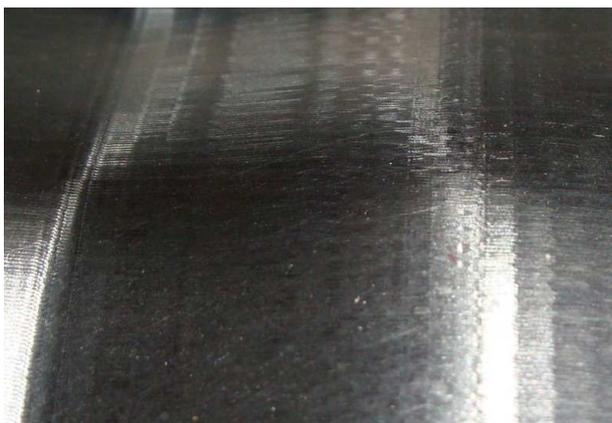
Powierzchnie zostały wykonane na frezarskim centrum obróbkowym ze sterowaniem CNC. Dla zaplanowanych, wyszczególnionych w punkcie 2 zabiegów obróbkowych dobrano następujące parametry, zestawione w Tabeli 1.

Tabela 1. Parametry obróbki

Nazwa zabiegu	Narzędzie	Parametry obróbki
obróbka zgrubna	frez walcowo-czołowy o średnicy 10 mm	n = 3000 obr/min f = 450 mm/min
obróbka półwykańczająca	frez kulowy o średnicy 8 mm	n = 2500 obr/min f = 350 mm/min
obróbka wykańczająca	frez kulowy o średnicy 6 mm	n = 7000 obr/min f = 300 mm/min

W strategiach obróbki wykańczającej zaplanowano jednakową szerokość warstwy skrawanej, wynoszącą 0,1 mm. Jest to jednocześnie odległość między dwoma sąsiednimi ścieżkami narzędzia.

Wyniki obróbki pokazano na Rysunkach 7÷9. Prezentują one wygląd powierzchni w powiększeniu, po obróbce różnymi strategiami, zgodnie z opisem w poprzednich punktach niniejszego artykułu.



Rysunek 7. Strategia liniowa – widok wytworzonej powierzchni



Rysunek 8. Strategia spiralna – widok wytworzonej powierzchni



Rysunek 9. Strategia po tworzących – widok wytworzonej powierzchni (widoczne ślady obróbki wynikające z nagłych zmian kierunku ruchu narzędzia przy jednoczesnych zmianach wartości posuwu)

4. OCENA DOKŁADNOŚCI WYKONANIA OBIEKTÓW POWIERZCHNIOWYCH

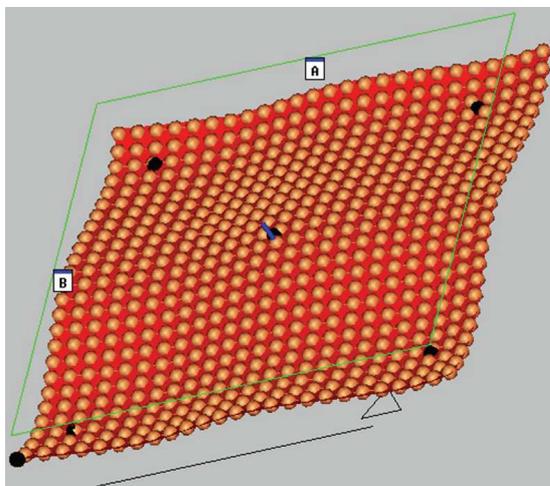
Wytworzone obiekty poddane zostały pomiarom kontrolnym na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Global Performance 07 07 05 (Rys. 10) z wykorzystaniem oprogramowania PC DMIS CAD++4.3. DEA GLOBAL Performance to maszyna przystosowana do obsługi technologii multi-sensor. Jest najlepszym narzędziem dla użytkowników potrzebujących przeprowadzić różnorodne pomiary metrologiczne na jednej, wszechstronnej i dokładnej maszynie CMM. Maszyna może zostać wyposażona zarówno w głowice stykowe jak i analogowe głowice skanujące. Pomiary wykonane zostały z wykorzystaniem stykowej sondy pomiarowej SP25M Renishaw wyposażonej w trzpień pomiarowy z końcówką o średnicy 4 mm. Przed pomiarami głowica pomiarowa została zmontowana i poddana procedurze kalibracji. W dalszej kolejności zdefiniowane zostało położenie mierzonego elementu w przestrzeni pomiarowej maszyny. W trybie sterowania ręcznego wskazane zostały punkty charakterystyczne obiektu. Na tej podstawie utworzone zostały odpowiednio skoja-



Rysunek 10. Współrzędnościowa maszyna pomiarowa Global Performance

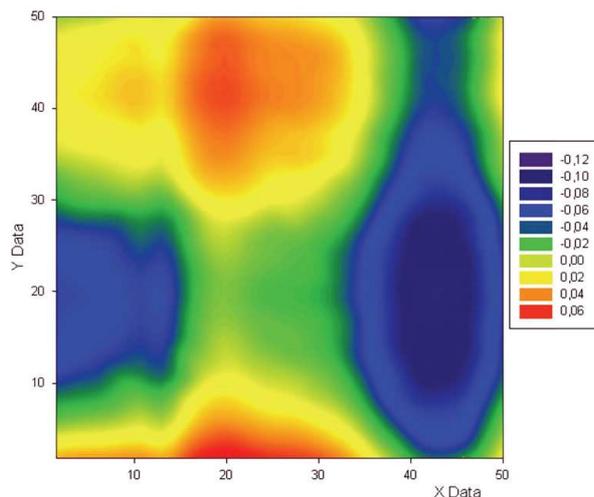
rzne elementy geometryczne i zdefiniowany został układ współrzędnych mierzonego przedmiotu. W programowaniu procedur pomiarowych wykorzystany został model geometryczny obiektu utworzony w systemie SolidWorks. Po zapisaniu w formacie IGES został on zaimportowany do systemu PC-DMIS. W pomiarach wykorzystano technikę skanowania powierzchni zwaną „grid scan”. Efektem zastosowania była równomierna siatka (25x25) punktów pomiarowych, przedstawiona na Rysunku 11.

W efekcie przeprowadzonych pomiarów określone zostały odchyłki obróbkowe dla poszczególnych obiektów, wykonanych przy zastosowaniu różnych strategii obróbkowych. Odchyłki określone zostały jako odległość punktu teoretycznego, leżącego na modelu geometrycznym wytworzonej powierzchni (wartości nominalne) od korespondującego z nim punktu zaobserwowanego w trakcie pomiarów.

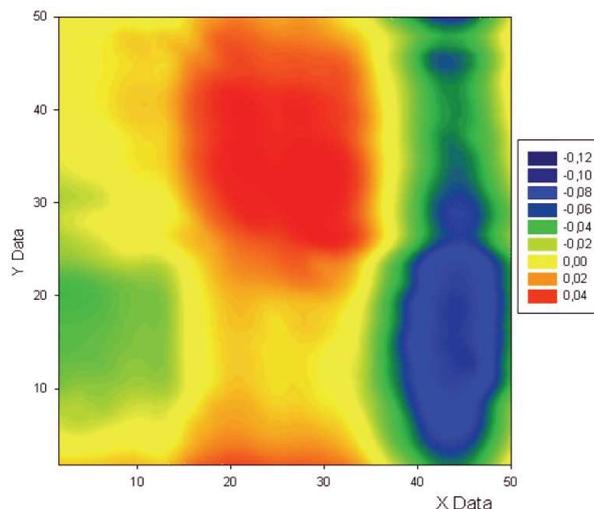


Rysunek 11. Rozkład punktów pomiarowych uzyskany w wyniku zastosowania procedury pomiarowej „grid scan”

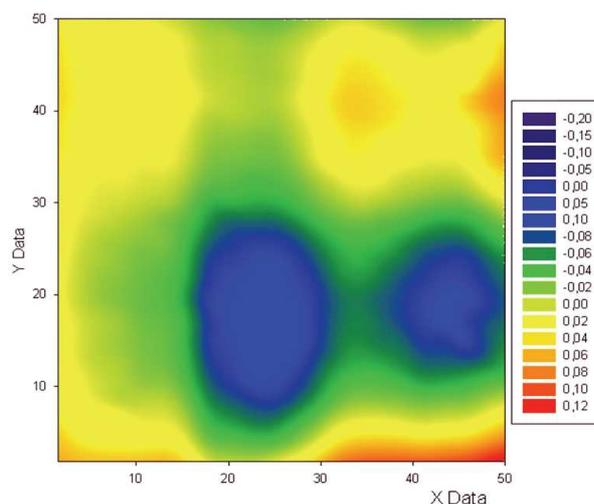
Rozkłady odchyłek obróbkowych dla poszczególnych strategii obróbkowych przedstawione zostały na Rysunkach 12÷14.



Rysunek 12. Rozkład odchyłek obróbkowych dla liniowej strategii obróbkowej



Rysunek 13. Rozkład odchyłek obróbkowych dla spiralnej strategii obróbkowej



Rysunek 14. Rozkład odchyłek obróbkowych dla strategii obróbkowej po tworzących

Należy zwrócić uwagę na fakt, że uzyskane rozkłady różnią się w zależności od przyjętej strategii obróbki powierzchni. Najbardziej zbliżone do siebie są zarówno pod względem wartości jak i rozkładu odchyłek strategii liniowa i spiralna. Zakresy odchyłek obróbkowych dla poszczególnych przypadków kształtowały się następująco:

- strategia liniowa: $-0,122 \div +0,073$ mm,
- strategia spiralna: $-0,138 \div +0,055$ mm,
- strategia po tworzących: $-0,231 \div +0,137$ mm.

Różnice te wynikają przede wszystkim z faktu, że w przypadku obrabianych powierzchni zastosowano obróbkę sterowaną w 3 osiach. Podstawowym ograniczeniem tego rodzaju obróbki jest stałe położenie osi narzędzia w przestrzeni roboczej obrabiarki. W tym przypadku oś ta była prostopadła do płaszczyzny mocowania przedmiotu obrabianego. W efekcie, z uwagi na różne kierunki przemieszczeń narzędzia w trakcie poszczególnych rodzajów obróbki różne było również położenie punktu skrawającego na zarysie freza kulistego. Konsekwencją tego były różne chwilowe wartości promienia narzędzia. Miało to wpływ na zmianę szybkości skrawania w zależności od kształtu powierzchni obrabianej oraz kierunku przemieszczenia narzędzia. Różne strategie obróbkowe skutkowały również tym, że zmienny był przekrój warstwy skrawanej. Fakt ten w połączeniu z wspomnianymi różnymi kierunkami przemieszczeń narzędzia miał niewątpliwie wpływ na wartości i kierunki sił skrawania, występujących podczas frezowania powierzchni kształtowych. W konsekwencji czynniki te miały wpływ na to, że w końcowym rezultacie przy obróbce tej samej powierzchni różnymi strategiami uzyskano różne rozkłady odchyłek obróbkowych. Innym niekorzystnym czynnikiem występującym we wszystkich prezentowanych przypadkach jest fakt,

że powierzchnia opisana za pomocą funkcji parametrycznych trzeciego stopnia w rzeczywistości obrabiana jest z wykorzystaniem interpolacji liniowej. Nie jest zachowana w tym przypadku właściwa ciągłość geometryczna toru narzędzia co skutkuje wahaniami prędkości posuwu w trakcie obróbki.

5. PODSUMOWANIE

Na podstawie przedstawionych wyników obróbki oraz przeprowadzonych pomiarów dokładności wytworzenia powierzchni swobodnej można stwierdzić, że wybór strategii obróbkowej, zwłaszcza dla obróbki wykańczającej, ma zasadniczy wpływ na uzyskiwaną dokładność wytworzenia. W przypadku gdy najważniejszym kryterium jest dokładność obróbki należy dobrać strategię, które gwarantują zachowanie właściwej stabilności procesu skrawania i uzyskania możliwie małych odchyłek obróbkowych. W prezentowanych przypadkach są to strategię: liniowa i spiralna. W sytuacjach gdy dokładność nie jest najważniejszym kryterium, można uwzględnić wygląd powierzchni po obróbce. Niekiedy ze względów estetycznych wskazane jest zastosowanie strategii obróbkowych, które nie gwarantują uzyskania wysokiej dokładności wytwarzania (np. wytwarzanie pewnej odmiany form do produkcji wyrobów szklanych). W przypadkach tych ważniejszy jest wygląd powierzchni oraz tekstura, jaką tworzą ślady po przejściach narzędzia. Sytuacja taka występuje często w przypadku obróbki z zastosowaniem strategii po tworzących.

W celu poprawy jakości, a tym samym niwelacji błędów obróbki, należy stosować takie strategię, które umożliwiają pracę z możliwie stałym posuwem narzędzia skrawającego.

LITERATURA

- [1] Piegl L, Tiller W: The NURBS Book, 2nd ed. Springer-Verlag, New York, USA, 1977.
- [2] Surazhsky T., Elber G.: Matching free-form surfaces, Computers and Graphics, vol. 25, issue: 1, 2001, pp. 3-12.
- [3] Choi Young-Keun, Banerjee A.: Tool path generation and tolerance analysis for free-form surfaces, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 47, issue: 3-4, 2007, pp. 689-696.
- [4] Schmitz T., Davies M., Dutterer B., Ziegert J.: The application of high-speed CNC machining to prototype production, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 41, 2001, pp. 1209-1228.
- [5] Toh C.K.: Design, evaluation and optimisation of cutter path strategies when high speed machining hardened mould and die materials, Materials & Design, vol. 26, issue 6, 2005, pp: 517-533.
- [6] Tao Chen, Peiqing Ye: A tool path generation strategy for sculptured surfaces machining, Journal of Materials Processing Technology, vol. 127, issue 3, 2002, pp. 369-373.