

Poprawa dokładności dopasowania powierzchni zamykających formy wtryskowej

Improving accuracy of fitting of closing surfaces in an injection mold

MAŁGORZATA PONIATOWSKA
DAMIAN GROCH*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.11.167>

Prezentowano metodykę poprawy dokładności dopasowania współpracujących powierzchni swobodnego kształtu. Polega ona na wprowadzeniu poprawek do programu obróbkowego, a następnie na przeprowadzeniu obróbki korygującej jednej z powierzchni. Podstawą do wyznaczenia poprawek jest model CAD szczeliny.

SŁOWA KLUCZOWE: dokładność dopasowania, powierzchnie swobodnego kształtu, model CAD szczeliny, obróbka korygująca

The methodology for improving the accuracy of fitting the cooperating surfaces of the freeform is presented. It involves introducing corrections to the machining program and then performing the correcting machining of one of the surfaces. The basis for determining the corrections is the CAD model of the gap.

KEYWORDS: accuracy of fitting, freeform surfaces, CAD model of the gap, correcting machining

Obecnie wykorzystanie form wtryskowych jest jednym z głównych sposobów wytwarzania różnych produktów. W obróbce skomplikowanych powierzchni form i matryc powszechnie stosowana jest obróbka na wieloosiowych centrach obróbkowych. Oprócz jakości wyrobów obróbka formy musi zapewnić jej właściwe funkcjonowanie. Ważnym problemem w obróbce frezowaniem form wtryskowych jest uzyskanie odpowiedniej dokładności dopasowania powierzchni zamykających, które często mają swobodny kształt. Odchyłki powierzchni obrabianych od kształtu nominalnego powodują nieuszczelnienie połączenia i w efekcie – wyciek tworzywa.

W literaturze dotyczącej frezowania wieloosiowego powierzchni swobodnego kształtu wiele uwagi poświęca się poprawie dokładności obrabianej powierzchni. Jednym z podejść jest analiza i modelowanie źródeł błędów obróbkowych oraz ich wpływu na jakość wyrobu [1, 2]. Inne podejście polega na analizie odchyłek powierzchni po obróbce oraz na poprawie dokładności przez modyfikację programu obróbkowego. Jedną z metod jest wprowadzenie poprawek kompensujących na podstawie surowych danych pomiarowych [3].

Pomiary powierzchni swobodnego kształtu najczęściej przeprowadza się na sterowanych numerycznie współrzędnościowych maszynach pomiarowych (WMP), wyposażonych w stykowe głowice pomiarowe [4]. Wynikiem pomiaru jest zbiór punktów o określonym rozkładzie na powierzchni. Dla każdego punktu pomiarowego wyznacza się lokalną odchyłkę, czyli odległość punktu pomiarowego od modelu CAD w kierunku normalnym. Następnie model

nominalny CAD jest modyfikowany przez dodanie lokalnych odchyłek ze znakiem przeciwnym.

Dane pomiarowe zawierają informacje o zjawiskach zdeterminowanych i losowych, występujących na powierzchni w efekcie procesu obróbkowego, oraz szum pomiarowy [5, 6]. Ze względu na przestrzenną zmienność krzywizny przestrzennie zmienne są: rozkład sił skrawania i inne zjawiska towarzyszące obróbce. W efekcie taki sam charakter ma rozkład odchyłek. W celu oddzielenia niepożądanego składowego losowego z przestrzennych danych pomiarowych można zastosować analizę regresji i metody statystyki przestrzennej [6, 7].

Problem dokładności geometrycznej staje się bardziej złożony w przypadku skojarzenia dwóch powierzchni, zwłaszcza gdy wymagane jest ich szczelne dopasowanie. W połączeniu sumują się odchyłki obu powierzchni. Z takim zagadnieniem mamy do czynienia w przypadku powierzchni zamykających w formie wtryskowej.

W artykule zaproponowano metodykę korekty błędów obróbkowych współpracujących powierzchni swobodnego kształtu. Polega ona na poprawie dokładności ich dopasowania przez wprowadzenie poprawek kompensujących do programu obróbkowego jednej z powierzchni. Podstawą metodyki są modele CAD powierzchni rzeczywistych, wyznaczone na podstawie danych uzyskanych z pomiarów na WMP według regularnej siatki punktów. W procedurze wyznaczania modeli wykorzystuje się: analizę regresji, procedurę iteracyjną, modelowanie NURBS [8] oraz testy statystyki przestrzennej [9]. Gdy dysponuje się modelami, można przeprowadzić w oprogramowaniu CAD badania symulacyjne szczelności połączenia. Możliwe jest wtedy wyznaczenie przestrzennego modelu CAD szczeliny między powierzchniami i użycie tego modelu do wyznaczenia poprawek kompensujących w drugim etapie obróbki.

Opis metodyki

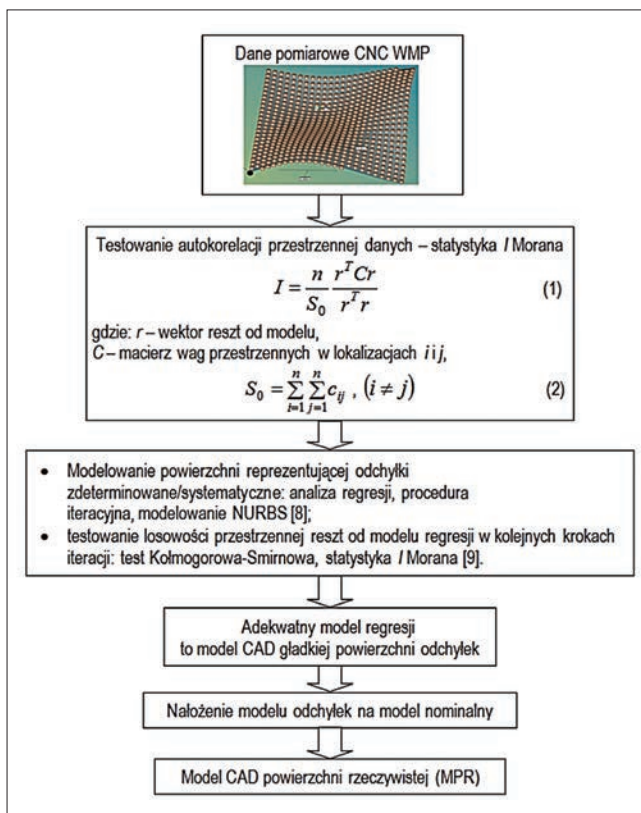
W proponowanej metodyce poprawy dokładności dopasowania dwóch powierzchni swobodnego kształtu stosuje się wyniki badań symulacyjnych szczelności połączenia. Niezbędne są modele CAD powierzchni rzeczywistych (MPR-y) wyznaczone na podstawie współrzędnościowych danych pomiarowych.

Aby uzyskać wirtualny model CAD szczeliny między skojarzonymi powierzchniami, należy wyznaczyć MPR-y obu powierzchni zamykających. Następnie należy zasymulować zamknięcie obu powierzchni w oprogramowaniu CAD. Tak określona wirtualna szczelina między modelami w reprezentacji CAD jest podstawą do wyznaczenia poprawek kompensujących błędy w procesie obróbkowym. Aby poprawić szczelność połączenia, wystarczy zastosować obróbkę korygującą tylko jednej z powierzchni zamykających.

* Dr hab. inż. Małgorzata Poniatowska (m.poniatowska@pb.edu.pl) – Katedra Inżynierii Materiałowej i Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Białostockiej; mgr inż. Damian Groch (groch.damian@gmail.com) – Binar Sp. z o. o., Białystok

■ **Akwizycja danych pomiarowych.** W celu uzyskania danych do przeprowadzenia procedury należy wykonać pomiary obu powierzchni na sterowanej WMP według regularnej siatki punktów oraz wyznaczyć wartości odchyłek punktów pomiarowych od modeli CAD. Należy więc: zlokalizować przedmiot i model CAD we wspólnym układzie współrzędnych, wygenerować nominalne punkty pomiarowe na modelu CAD, wykonać pomiar sterowany numerycznie oraz porównać wyznaczone punkty pomiarowe z odpowiadającymi im punktami na modelu CAD.

■ **Procedura modelowania CAD powierzchni rzeczywistych.** W omawianej metodyce na danych pomiarowych modeluje się powierzchnie regresji z wykorzystaniem procedury iteracyjnej, modelowania NURBS i statystyki przestrzennej/Morana. Wyznaczone gładkie powierzchnie regresji stanowią najbardziej prawdopodobne reprezentacje odchyłek wyznaczonych w pomiarach. Przez nałożenie tych modeli na modele nominalne CAD otrzymuje się modele powierzchni rzeczywistych. Procedurę wyznaczania MPR-ów powierzchni zamykających przedstawiono na rys. 1.

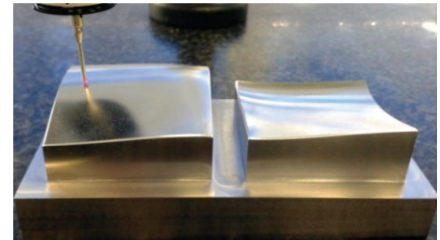


Rys. 1. Schemat procedury wyznaczania MPR-ów

■ **Wyznaczanie poprawek kompensujących szczelinę.** Na podstawie MPR-ów obu powierzchni można w oprogramowaniu CAD zasymulować ich zamknięcie, dosuwając odwrócony model jednej powierzchni do modelu drugiej powierzchni w kierunku osi Z, z wyłączeniem pozostałych pięciu stopni swobody. Efektem symulacji jest wirtualny model CAD szczeliny między powierzchniami. Na jego bazie wyznacza się w punktach pomiarowych poprawki kompensujące sumę błędów obróbkowych obu powierzchni. Na kolejnym etapie należy zmodyfikować model nominalny CAD jednej z powierzchni, dodając wyznaczone poprawki, oraz wygenerować na jego podstawie skorygowaną ścieżkę narzędzia do ponownej obróbki.

Badania eksperymentalne

Metodę weryfikowano na powierzchniach swobodnych próbek o wymiarach podstawy 50×50 mm, wykonanych ze stali WCLV (rys. 2). Obróbkę przeprowadzono na frezarskim centrum obróbkowym. Zastosowano frez kulisty o średnicy 6 mm, prędkość obrotową 8000 obr/min, posuw 800 mm/min, obróbkę dwustronną w płaszczyźnie XY.

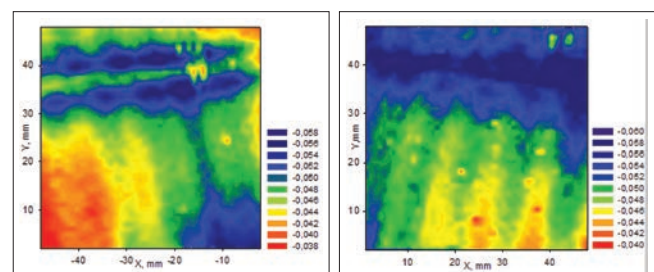


Rys. 2. Widok próbek

■ **Pomiary na WMP.** Pomiary przeprowadzono na WMP GLOBAL Performance 070705 z głowicą SP25M (oprogramowanie PC DMIS, $MPE_E = 1,5 + L/333 \mu\text{m}$). Zastosowano trzpień pomiarowy 20 mm z końcówką $d = 1$ mm i zmierzono 2500 punktów pomiarowych według regularnej siatki $u \times v$ (50 wierszy \times 50 kolumn). Otrzymało odchyłki o rozkładach wartości zaprezentowanych na rys. 3; wartości odchyłek zamieszczono w tabl. I.

TABLICA I. Wartości zaobserwowanych odchyłek

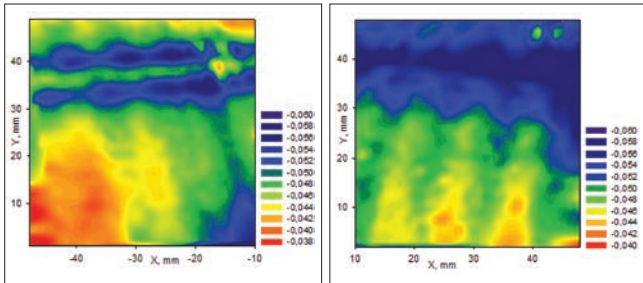
	Powierzchnia lewa	Powierzchnia prawa
Odchyłka średnia, mm	-0,0482	-0,0516
Odchyłka minimalna, mm	-0,0589	-0,0596
Odchyłka maksymalna, mm	-0,0381	-0,0395
Maks – Min , mm	0,0208	0,0201



Rys. 3. Mapy zaobserwowanych odchyłek

■ **Wyznaczenie poprawek.** Na odchyłkach otrzymanych z pomiarów modelowano powierzchnie regresji zgodnie ze schematem na rys. 1. W procedurze iteracyjnej w kolejnych krokach zmieniano liczbę punktów kontrolnych powierzchni NURBS w obu kierunkach (dla kolejnych stopni powierzchni 2 i 3), testując w każdym kroku reszty r od modeli. Za adekwatny przyjmowano model regresji o najmniejszej liczbie punktów kontrolnych i najniższych stopniach powierzchni w kierunkach u i v [10], dla których reszty od modelu spełniały kryteria normalności rozkładu oraz losowości przestrzennej. Adekwatny model regresji otrzymano dla liczby punktów kontrolnych 31×31 i stopni powierzchni 3×3 lewej (wypukłej) powierzchni oraz 29×29 prawej (wklęsłej) powierzchni. W modelowaniu powierzchni wykorzystano oprogramowanie Mastercam X4 i Rhinoceros 3.0. Mapy odchyłek wyznaczonych z modeli pokazano na rys. 4, a charakterystyki statystyczne odchyłek zamieszczono w tabl. II. Modele odchyłek nałożono na modele nominalne CAD – tak otrzymano MPR-y obu powierzchni. W badaniach symulacyjnych uzyskano przestrzenny model CAD szczeliny między powierzchniami.

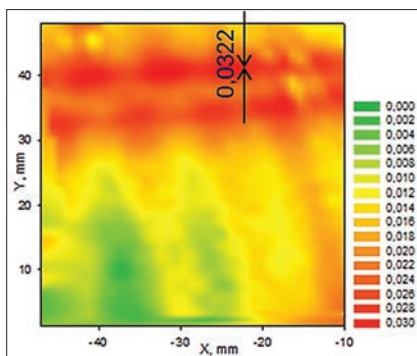
Mapę szerokości modelu szczeliny zaprezentowano na rys. 5, a wymiary szczeliny podano w tabl. II. W punktach pomiarowych wyznaczono poprawki kompensujące sumę błędów obróbkowych jako odwrótności lokalnych szerokości szczeliny. Otrzymane poprawki dodano do modelu nominalnego CAD lewej (wypukłej) powierzchni, a następnie wygenerowano program sterujący do obróbki korygującej.



Rys. 4. Mapy odchyłek wyznaczonych z modelu

TABLICA II. Wartości odchyłek wyznaczonych z modelu

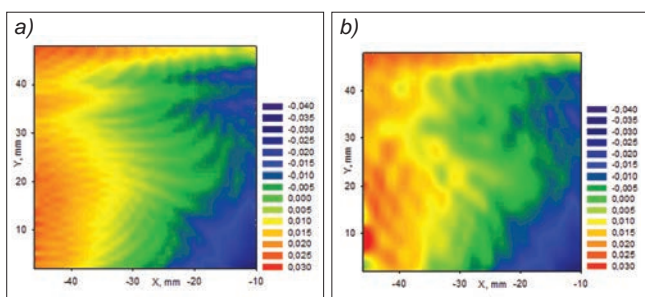
	Powierzchnia lewa	Powierzchnia prawa	Szczelina
Odchyłka średnia, mm	-0,0482	-0,0517	0,0162
Odchyłka minimalna, mm	-0,0585	-0,0591	0,0000
Odchyłka maksymalna, mm	-0,0389	-0,0433	0,0322
Maks – Min , mm	0,0196	0,0158	



Rys. 5. Mapa szerokości modelu szczeliny przed korekcją

■ **Ocena dokładności dopasowania powierzchni po korekcji.** Po obróbce korygującej wykonano pomiary poprawionej powierzchni. Na podstawie otrzymanych odchyłek wyznaczono ich model CAD (według rys. 1). Adekwatny model regresji uzyskano dla liczby punktów kontrolnych 28×32 i stopni powierzchni 3×3 . Wyniki pomiarów i modelowania zamieszczono w tabl. III, a na rys. 6 pokazano mapy odchyłek zaobserwowanych i wyznaczonych z modelu. Na bazie danych pomiarowych wyznaczono MPR-y, a następnie model szczeliny (rys. 7).

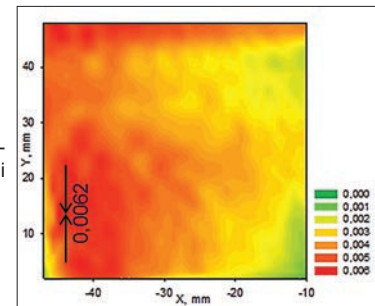
Jak można zauważyć, szerokość modelu szczeliny między powierzchniami po zastosowaniu obróbki korygującej zmalała o ok. 80% (tabl. II i III).



Rys. 6. Mapy odchyłek po korekcji: a) zaobserwowanych, b) wyznaczonych z modelu

TABLICA III. Wyniki pomiarów i modelowania odchyłek powierzchni lewej (wypukłej) po korekcji

	Odchyłka zaobserwowana	Odchyłka wyznaczona z modelu	Szczelina
Odchyłka średnia, mm	0,0005	0,0007	0,0035
Odchyłka minimalna, mm	-0,0369	-0,0394	0,0000
Odchyłka maksymalna, mm	+0,0337	+0,0331	0,0062
Maks – Min , mm	0,0706	0,0725	



Rys. 7. Mapa szerokości modelu szczeliny po korekcji

Podsumowanie

Zaprezentowana metodyka poprawy dokładności dopasowania dwóch powierzchni swobodnego kształtu znajduje zastosowanie w obróbce frezowaniem powierzchni zamkniętych form wtryskowych. Poprawki kompensujące szerokość szczeliny między powierzchniami wyznacza się na podstawie badań symulacyjnych w programach CAD. Poprawki wyznaczone z modelu CAD szczeliny wprowadza się do programu sterującego obróbką jednej z powierzchni, a następnie przeprowadza się ponowną obróbkę. Podstawą badań są modele powierzchniowe NURBS, reprezentujące rzeczywiste powierzchnie, które wyznacza się na podstawie danych pomiarowych z maszyny współrzędnościowej. Zaletą tej metodyki w stosunku do korekcji błędów obu powierzchni jest zmniejszenie pracochłonności wykonania, gdyż na drugim etapie przeprowadza się obróbkę tylko jednej z powierzchni. Badania symulacyjne i doświadczalne potwierdziły zwiększenie dokładności dopasowania o 80%. Po zastosowaniu korekcji szerokość modelu szczeliny zmniejszyła się z 0,0322 do 0,0062 mm.

Badania zrealizowano w ramach pracy S/WM/2/2017 i sfinansowano ze środków na naukę MNiSW.

Autorzy dziękują firmie Binar Sp. z o.o. Zakład Produkcji Narzędzi w Białymstoku za pomoc w wykonaniu próbek do badań.

LITERATURA

- Jia Z., Ma J., Song D., Wang F., Liu W. "A review of contouring-error reduction method in multi-axis CNC machining". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 125 (2018): s. 34–54.
- Uhlmann E., Abackerli A.J., Schutzer K., Lepikson H.A., Helleno A.L., Papa M.C.O., del Conte E.G., Mewis J. "Simulation and analysis of error impact on freeform surface milling". *International Journal of Advanced Manufacturing and Technology*. 70 (2014): s. 607–620.
- Werner A., Poniatowska M. "Error correction in complex-shape objects processing with numerical control milling machine". *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*. 25, 2 (2005): s. 89–95.
- Stadek J.A. "Coordinate Metrology: Accuracy of Systems and Measurements". Springer-Verlag, 2016.
- Colosimo B.M., Moroni G., Petro S. "A tolerance interval based criterion for optimizing discrete point sampling strategies". *Precision Engineering*. 34 (2010): s. 745–754.
- Chena Y., Gao J., Deng H., Zhenga D., Chena X., Kelly R. "Spatial statistical analysis and compensation of machining errors for complex surface". *Precision Engineering*. 37 (2013): s. 203–212.
- Poniatowska M. "Free-form surface machining error compensation applying 3D CAD machining pattern model". *Computer-Aided Design*. 62 (2015): s. 227–235.
- Piegl L., Tiller W. "The NURBS book". 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1997.
- Upton G.J.G., Fingleton B. "Spatial data analysis by example". Vol. 1. New York: John Wiley & Sons, 1985.