Analiza efektywności programowanych strategii frezowania złożonych kieszeni

Performance analysis of programmable machining strategies in milling operations of complex-shape pockets

MARIUSZ DEJA
JACEK EREMUS
MIECZYSŁAW SIEMIĄTKOWSKI*

DOI: https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.10.124
English version available on: www.mechanik.media.pl

Przedstawiono metodę doboru parametrów technologicznych w programowanych strategiach frezowania złożonych kieszeni z wykorzystaniem określonego zestawu narzędziowego. Przeanalizowano wpływ osiowej i promieniowej głębokości skrawania na czas maszynowy realizowanej operacji, co pozwoliło na dobór tych wartości pod kątem maksymalizacji efektywności czasowej wybranej sekwencji narzędziowej.
SŁOWA KLUCZOWE: komputerowo wspomagane projektowanie procesów, obiekty elementarne TOE, sekwencje narzędziowe, parametry obróbki

Presented is a selection method for determining the key process parameters for complex-shape pocket milling strategies ***using a definite tool set. The analysis concerning the influence*** *of both axial and radial depth of cut on machining operation time was carried out in order to enable the selection of their proper setting values, considering the maximum effectiveness* ***of selected tool sequence mostly in terms of time.***
KEYWORDS: CAPP, features, tool sequences, process parameters

Adekwatny dobór narzędzi i parametrów obróbki ma kluczowe znaczenie dla efektywności realizacji procesów obróbki mechanicznej. Złożoność zadania wydatnie wzrasta w przypadku planowania operacji wielozabiegowych, gdy analityczne określenie wymaganych parametrów optymalizujących wartość funkcji celu (minimalizacja czasu i kosztu obróbki) jest niewykonalne [7].

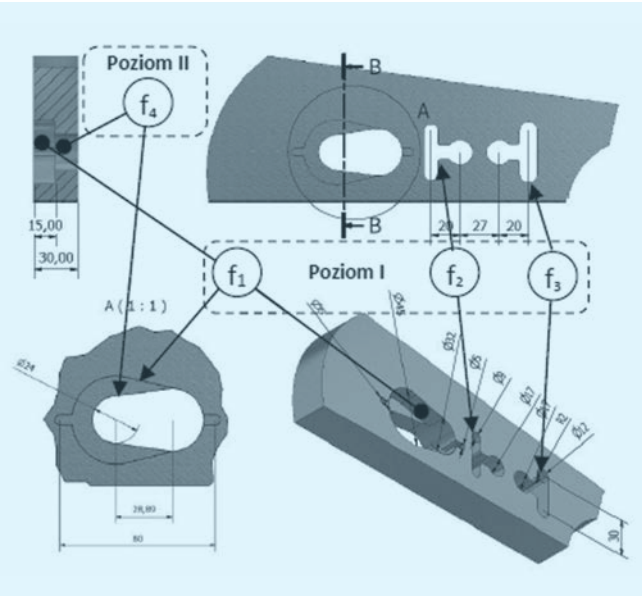
Usprawnienie działań nakierowanych na efektywne wytwarzanie wiąże się z możliwością wykorzystania stale rozwijanych technologii CAM [8–10]. Oferują one strategie obróbki elementów geometrii przedmiotu realizowalne z zastosowaniem różnych narzędzi na współczesnych obrabiarkach CNC o rozmaitych strukturach geometryczno-ruchowych. Ich atrybutem jest możliwość przeprowadzenia analizy symulacyjnej wielu porównywalnych strategii procesu obróbki (generowanych ścieżek kolejnych narzędzi w ramach ustalonych sekwencji ich użycia). Wspomagają wybór wariantu obróbki (w ramach jednej strategii spośród rozwiązań alternatywnych) zakładającego wykorzystanie określonych narzędzi z ustalonymi parametrami technologicznymi. Dotyczy to ustawień takich parametrów, jak osiowa i promieniowa głębokość skrawania, skutkujących najkrótszym czasem maszynowym wykonania planowanej operacji. Porównanie strategii i wariantów obróbki może być dokonywane według kryterium wydajnościowego lub kosztowego.

Metoda badań i przykład zastosowania

Optymalną sekwencję narzędziową i parametry technologiczne wielozabiegowej operacji frezowania złożonych kieszeni, realizowanej w zakresie pojedynczego ustawienia przedmiotu, wyznacza się najczęściej z wykorzystaniem systemów komputerowych klasy CAM wspomagających wytwarzanie [6, 10]. W pracy [1] do analizy ilościowej strategii obróbkowych wykorzystano system CAM, zakładając w procesie obróbki kieszeni 2,5D jako technologicznych obiektów elementarnych (TOE) $F = \{f_1, f_2, \ldots, f_m\}$ użycie narzędzi ze zbioru $T = \{t_1, t_2, \ldots, t_n\}$ o średnicach $d_1 > d_2 > \ldots d_n$, z uwzględnieniem ograniczenia kolejności zabiegów wynikającego z zagnieżdżania cech TOE [1–3, 5].

Na rys. 1. przedstawiono przykład części z analizowanego zbioru spektrum przedmiotowego złożonego z takich samych TOE jak w zadaniu badawczym w pracy [1], ale o innych wymiarach geometrycznych.

Analizowane sekwencje narzędziowe wyodrębniono ze wszystkich alternatywnych sekwencji realizujących obróbkę TOE f_1 (rys. 1), czyli technologicznego obiektu, dla którego mogą być zastosowane narzędzia z dostępnego



Rys. 1. Model obrabianej części z wymiarami geometrycznymi

* Dr hab. inż. Mariusz Deja (mdeja@pg.gda.pl), mgr inż. Jacek Eremus (jaceremu@student.pg.gda.pl) – Środowiskowe Studium Doktoranckie przy Politechnice Gdańskiej; dr inż. Mieczysław Siemiątkowski (msiemiat@pg.gda.pl) – Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej

zbioru narzędzi o liczności $n = 5$ (tabl. I), które zostały wykorzystane do obróbki całej kieszeni.

Na pierwszym etapie analizy wyznaczono z pomocą symulatora sterownika Heidenhain TNC-640 czasy maszynowe operacji T_{Mo}; zastosowano początkowe parametry technologiczne zawarte w tabl. I dla każdej alternatywnej sekwencji narzędziowej – tabl. II.

Przyjęto inną metodykę niż w pracy [1], wykorzystując aktualnie pracujące narzędzie do obróbki dostępnych TOE bez podziału na poziomy i obróbkę indywidualnych cech. W programowaniu obróbki zastosowano standardowe cykle frezarskie dostępne w sterowaniu Heidenhain TNC-640 (rys. 2). Obliczenia prowadzono z perspektywy wpływu wielkości geometrycznych na czas obróbki. W każdym przypadku założono stałą prędkość skrawania wynoszącą 120 m/min, co odpowiada obróbce stali węglowej C45. Posuw na ostrze przyjęto zgodnie z zaleceniami producenta narzędzi (tabl. I).

TABLICA I. Lista narzędzi i zastosowane w badaniach parametry technologiczne

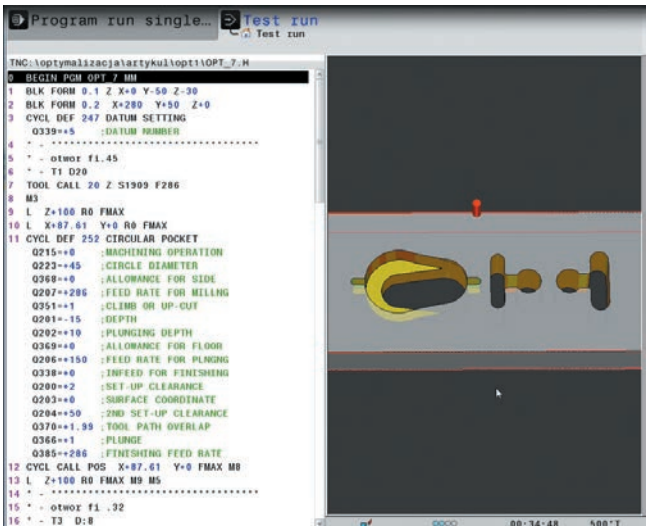
Nr narzędzia	Średnica narzędzia d, mm	Posuw na ostrze f_z, mm/ostrze	Prędkość skrawania v_c, m/min	Promieniowa głębokość skrawania a_e, mm	Osiowa głębokość skrawania a_p, mm	Liczba ostrzy
t_1	20	0,070	120	10	10	3
t_2	14	0,055	120	7	7	3
t_3	8	0,035	120	4	4	3
t_4	7	0,030	120	3,5	3,5	3
t_5	5	0,025	120	2,5	2,5	3

Uwaga: wyeliminowane ☐ i wybrane ☐ narzędzia do analizy efektywności programowanych strategii obróbkowych.

TABLICA II. Zestawienie analizowanych sekwencji narzędzi do obróbki zbioru analizowanych cech technologicznych (TOE)

Sekwencja S_k	Czas* T_{Mo}, min	Kolejne narzędzia w k-tej sekwencji				
S_1	36,36	t_1	t_2	–	–	t_5
S_2	35,42	t_1	–	t_3	–	t_5
S_3	41,2	t_1	–	–	t_4	t_5
S_4	50,35	t_1	–	–	–	t_5
S_5	40,23	–	t_2	–	–	t_5
S_6	41,23	–	–	t_3	–	t_5
S_7	45,18	–	–	–	t_4	t_5
S_8	58,48	–	–	–	–	t_5

* Dla: $a_e = 0{,}5d$ oraz $a_p = 0{,}5d$.



Rys. 2. Symulacja obróbki z deklaracją cyklu frezowania kieszeni okrągłej w symulatorze sterownika Heidenhain TNC-640

Wyniki badań i ich ocena

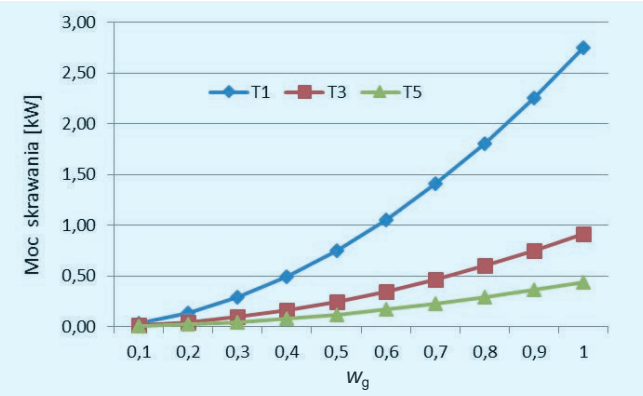
Moc obrabiarki jest jednym z podstawowych czynników ograniczających w projektowaniu procesu technologicznego na określone maszyny. Moc skrawania netto (kW) w analizowanym przypadku skrawania stali C45 o twardości 32 HRC wyznaczono według znanej formuły:

$$P_c = \frac{a_e a_p v_f k_c}{60 \cdot 10^6} \quad [\mathrm{kW}] \tag{1}$$

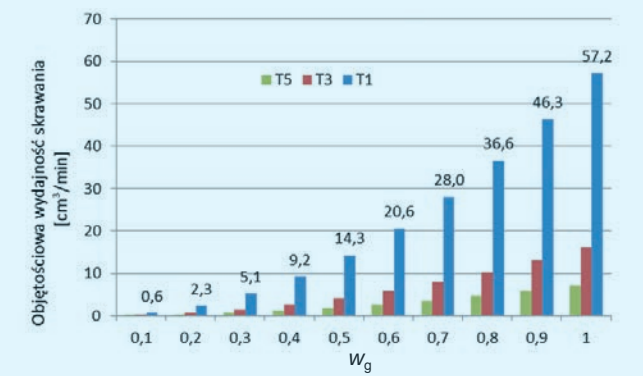
gdzie: a_p – osiowa głębokość skrawania w mm, a_e – promieniowa głębokość skrawania w mm, v_f – prędkość posuwu w mm/min, k_c – współczynnik materiałowy określający opór skrawania w N/mm^2.

Zgodnie z równaniem (1) zwiększanie głębokości skrawania i prędkości posuwu wiąże się ze wzrostem zapotrzebowania na moc (rys. 3) przy możliwości uzyskania dużej objętościowej wydajności skrawania (rys. 4) określonej równaniem:

$$Q_v = \frac{a_p a_e v_f}{1000} \quad [\mathrm{cm^3/min}] \tag{2}$$



Rys. 3. Efektywna moc skrawania dla kolejnych narzędzi z wybranej sekwencji S_2, dla różnych wartości głębokości skrawania promieniowej: $a_e = w_g \cdot d$ oraz osiowej $a_p = w_g \cdot (d/2)$



Rys. 4. Porównanie objętościowej wydajności obróbki dla poszczególnych narzędzi z analizowanej sekwencji S_2, dla różnych nastaw promieniowej i osiowej głębokości skrawania $a_e = w_g \cdot d$ oraz osiowej głębokości skrawania $a_p = w_g \cdot (d/2)$

Zwiększanie wydajności skrawania jest jednak ograniczone zaleceniami producentów narzędzi, geometrią obrabianych elementów i strategią programowania obróbki, np. z wykorzystaniem programowanych cykli obróbkowych. Wyznaczone w symulatorze czasy maszynowe operacji pozwoliły na wybór sekwencji z minimalnym czasem obróbki wszystkich TOE. Sekwencja nr 2 została wybrana z wszystkich sekwencji (tabl. II) zgodnie z założeniem:

$$\min T_{Mo}(F), \text{ gdzie: } F = \bigcup_{i=1}^{4} f_i \quad (3)$$

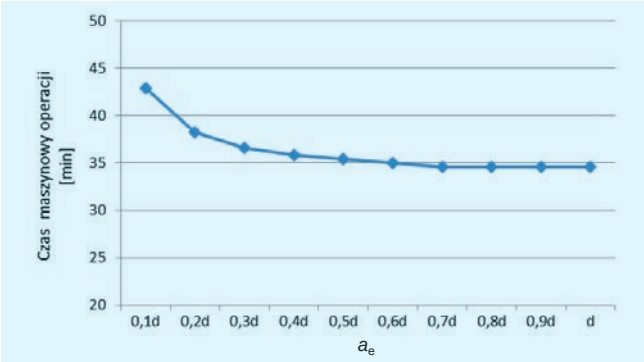
Analiza kolejnych zabiegów realizowanych narzędziami z sekwencji nr 2 pokazuje, że istnieje graniczna wartość promieniowej głębokości skrawania, po zwiększeniu której nie można skrócić czasu maszynowego (tabl. III). Jest to wprost związane z wielkościami geometrycznymi obrabianych obiektów TOE i średnicami zastosowanych narzędzi. Przy wymiarach TOE równych średnicom narzędzi nie można skrócić czasu maszynowego, co pokazano w tabl. III dla czasu zabiegu t_{M3} i narzędzia t_5.

TABLICA III. Wartości czasów maszynowych kolejnych zabiegów realizowanych narzędziami z wybranej sekwencji dla zmiennych wartości promieniowej głębokości skrawania a_e, przy ustalonej wartości a_p = 0,5*d*

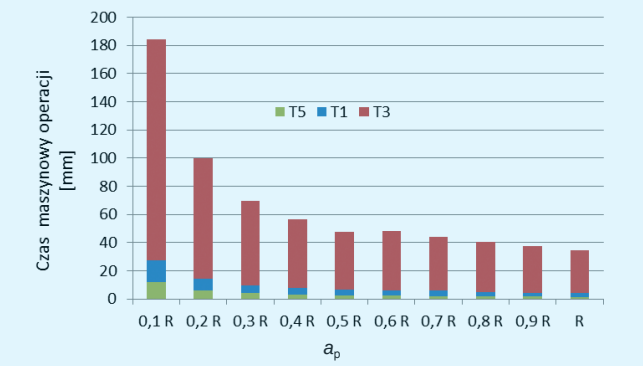
a_e	t_{M1} dla t_1, min	t_{M2} dla t_3, min	t_{M3} dla t_5, min
0,1*d*	3,21	38,15	1,51
0,2*d*	2,86	33,85	1,51
0,3*d*	2,86	32,24	1,51
0,4*d*	2,46	31,84	1,51
0,5*d*	2,46	31,45	1,51
0,6*d*	2,46	31,05	1,51
0,7*d*	2,46	30,65	1,51
0,8*d*	2,46	30,65	1,51
0,9*d*	2,46	30,65	1,51
d	2,46	30,65	1,51

Spośród technologicznych parametrów skrawania na okres trwałości najsilniej wpływa prędkość skrawania, a w najmniejszym stopniu – głębokość skrawania [7]. W odniesieniu do kryterium kosztowego zachodzi potrzeba wyznaczenia wartości okresu pracy narzędzia do wymiany, co można przeprowadzić z zastosowaniem programów komputerowych dostarczanych przez firmy narzędziowe.

Czas maszynowy operacji przy ustalonej wartości osiowej głębokości skrawania a_p = 0,5*d* skraca się znacząco przy początkowym wzroście promieniowej głębokości skrawania (rys. 5), a następnie osiąga graniczną wartość stałą dla a_e = 0,7*d*. Wartość ta została przyjęta do analizy czasu maszynowego operacji dla zmiennych wartości osiowej głębokości skrawania a_p, badanej w zakresie od 0,1·(*d*/2) do *d*/2. Podobnie jak dla a_e, geometria TOE determinuje czas operacji (rys. 6). Wzrost głębokości do wartości a_p = 0,5*R* prowadzi do znacznego skrócenia czasu maszynowego, przy niewielkich zmianach czasu trwania operacji powyżej tej głębokości.



Rys. 5. Czas maszynowy operacji przy różnych nastawach głębokości a_e dla ustalonej wartości a_p = 0,5*d*



Rys. 6. Czas maszynowy operacji dla różnych wartości osiowej głębokości skrawania a_p dla parametru głębokości a_e = 0,7*d*

Podsumowanie

Zaprezentowana metoda planowania wielozabiegowej operacji obróbki zespołu powierzchni złożonych kieszeni pozwala na zracjonalizowany dobór ustawień takich parametrów technologicznych procesu, jak: głębokość osiowa i promieniowa, w ramach ustalonej sekwencji narzędzi pochodzących z – w praktyce przemysłowej zwykle ograniczonego – zasobu narzędziowego.

Analiza kolejnych zabiegów wybranej sekwencji narzędziowej pokazuje, że istnieje graniczna wartość głębokości skrawania, po przekroczeniu której nie można skrócić czasu maszynowego, co jest wprost związane z wielkościami geometrycznymi obrabianych obiektów TOE i średnicami zastosowanych narzędzi. Dalsze analizy mogą być prowadzone w kierunku wyznaczenia tych wartości dla sparametryzowanych modeli o różnych wymiarach elementów bez przeprowadzenia symulacji obróbki, lecz wymagających zastosowania metod sztucznej inteligencji oraz technik wnioskowania algorytmicznego [4].

Określenie kosztów obróbki wymaga wyznaczenia okresu trwałości ostrza oraz uwzględnienia czasów zmiany narzędzia, kosztów amortyzacji narzędzi oraz kosztów użytkowania obrabiarki.

LITERATURA

1. Bocheński T., Deja M., Siemiątkowski M.S. „Projektowanie strategii frezowania złożonych kieszeni w komponentach mechanicznych". *Mechanik*. 89, 10 (2016): s. 1496–1497.
2. Chlebus E., Krot K., Kuliberda M. „Planowanie procesów technologicznych obróbki z zastosowaniem systemu ekspertowego". *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*. 31, 4 (2011): s. 115–123.
3. Deja M., Siemiątkowski M.S. „Feature-based generation of machining process plans for optimised parts manufacture". *Journal of Intelligent Manufacturing*. 24, 4 (2013): s. 831–846.
4. Gupta A.K., Chandna P., Tandon P. „Optimization of machining parameters and tool selection in 2.5D milling using genetic algorithm". *International Journal of Innovative Technology & Creative Engineering*. 1, 8 (2011): s. 21–27.
5. Liu X., Li Y., Wang L. „Combining dynamic machining feature with function blocks for adaptive machining". *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 1, 2 (2016): s. 828–841.
6. Makhe A., Frank M.C. „Polygon subdivision for pocket machining process planning". *Computers & Industrial Engineering*. 58, (2010): s. 709–716.
7. Olszak W. „*Obróbka skrawaniem*". Warszawa: WNT, 2008.
8. Skoczylas L., Skoczylas K. „Wpływ głębokości skrawania na czas maszynowy frezowania kieszeni kwadratowej". *Mechanik*. 89, 8–9 (2016): s. 1162–1163.
9. Xu T., Chen Z., Li J., Yan X. „Automatic tool path generation from structuralized machining process integrated with CAD/CAPP/CAM system". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 80 (2015): s. 1097–1111.
10. Zalewski A. „Zastosowanie technik automatyzacji programowania w systemach CAM do oceny efektywności frezowania CNC". *Mechanik*. 88, 3 (2015): s. 36–43.