

Adam ZALEWSKI<sup>1</sup>

## ZASTOSOWANIE TECHNIK AUTOMATYZACJI PROGRAMOWANIA W SYSTEMACH CAM DO OCENY EFEKTYWNOŚCI FREZOWANIA CNC

Jednym z istotnych kierunków rozwoju systemów CAM jest dążenie do automatyzacji opracowania programów obróbkowych. Oprócz Skrócenia czasu przygotowania technologii, można także uzyskać wiele wariantów alternatywnych procesów obróbkowych. Procesy te można porównać ze względu na różne kryteria takie jak np. czas realizacji procesu, koszt, zapotrzebowanie mocy, wymagane momenty skrawania, itd. – jeszcze na etapie projektowania. W artykule przedstawione zostaną zasady zastosowania systemów CAM i przykład analizy oceny efektywności kilku wariantów realizacji fragmentu procesu obróbkowego.

## APPLICATION OF AUTOMATION PROGRAMMING CAM SYSTEM TO ASSESS THE EFFECTIVENESS OF CNC MILLING

One of the important directions of development of CAM systems is the desire to automate the preparing of CNC programs. In addition to shorten the time of preparation technology, you can also get a lot of alternatives of machining processes. These processes can be compared due to different criteria such as: process execution time, cost, power consumption, required moments of cutting, etc. – still at the design stage. In this article, the principles of the use of CAM systems for such analysis and evaluation of the effectiveness of several variants of the implementation portion of the machining process are presented.

### 1. WSTĘP

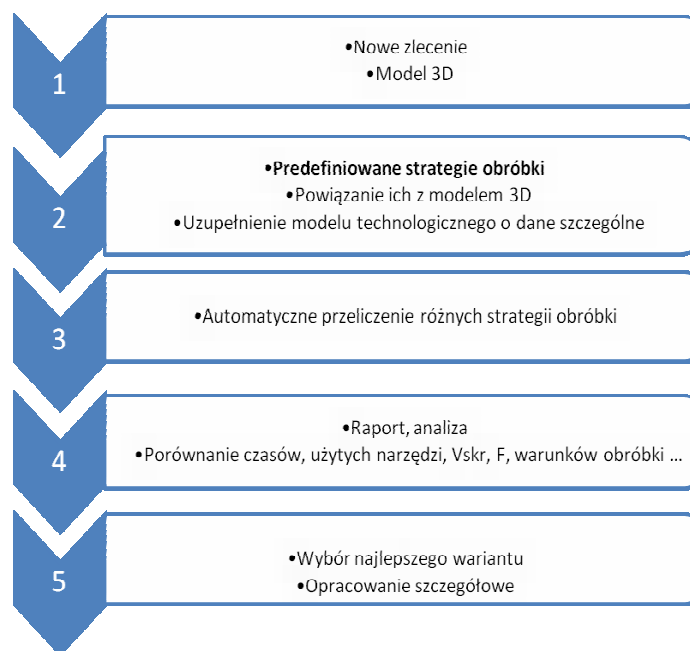
Rozwój narzędzi skrawających oraz rosnące możliwości obrabiarek CNC zasadniczo rozszerzają możliwości realizacji współczesnych procesów obróbkowych. W dążeniu do efektywnego wytwarzania nieustannie modernizowane systemy komputerowego wspomaganie wytwarzania (CAM) oferują kolejne strategie ruchu narzędzia względem przedmiotu obrabianego, które w powiązaniu z różnorodnymi narzędziami i obrabiarkami CNC zapewniają stabilne obciążenie narzędzia, wydają obróbkę, satysfakcjonujący okres pracy narzędzia do wymiany i odpowiednią jakość powierzchni obrobionej. Zwraca uwagę duża liczba dostępnych rozwiązań tego samego zadania technologicznego [1, 2, 3]. Projektując sposób obróbki technolog ma wiele możliwości zastosowania narzędzi o różnej średnicy, długości (wysięgu), składanych lub monolitycznych, różnej liczbie ostrzy, o różnej cenie, sposobie pracy, chłodzenia, czy wreszcie pracujących z różnymi parametrami skrawania. Które narzędzie wybrać? Jaka strategia pracy narzędzia będzie najlepsza? Jakie parametry skrawania dla wybranej strategii będą optymalne?

W artykule opisano rozwijaną metodę symulacyjną służącą do porównywania wielu sposobów obróbki tej samej części. Podejście takie można zaliczyć do metod numerycznych. Ograniczając analizę do konkretnego przypadku, dyskusję sprowadza się do skończonej liczby rozwiązań o charakterze dyskretnym. Wyniki obliczeń cząstkowych zależą od:

- rodzaju narzędzi (w tym przypadku frezów),
- parametrów skrawania (które weryfikowane doświadczalnie i powtórnie stosowane w podobnych okolicznościach, pośrednio uwzględniają warunki pracy,
- algorytmów programów CAM służących do opracowania toru ruchu narzędzia na podstawie deklarowanych parametrów skrawania.

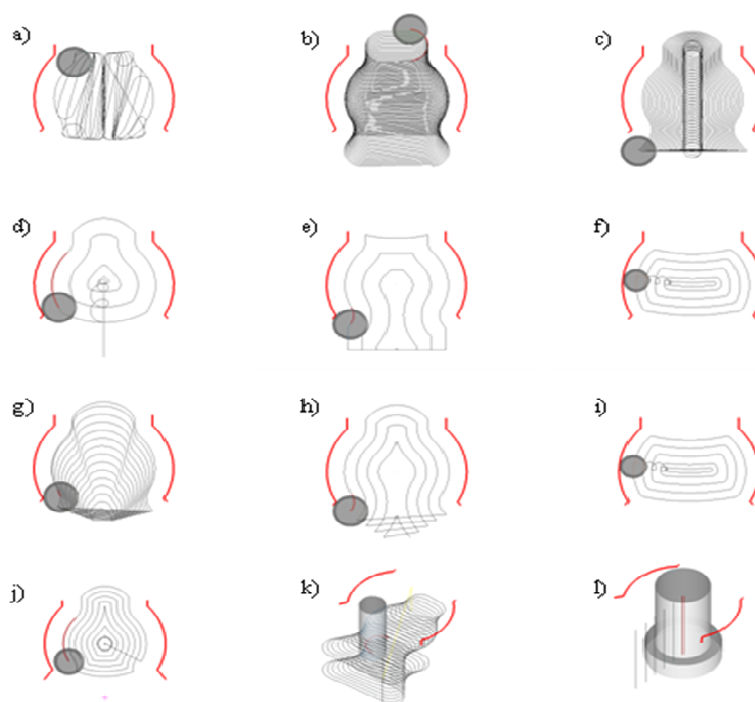
W pracy wykorzystywany jest parametryczny zapis technologii obróbki do tworzenia „predefiniowanych” technologii CAM (tzw. szablonów). Raz opracowaną i sprawdzoną technologię można w ten sposób „nałożyć” na kolejny model przedmiotu obrabianego. Zapis taki pozwala też na automatyczne zaprojektowanie wielu przypadków ścieżek narzędzia (**strategii obróbki**) oraz różnych parametrów skrawania (**wariantów**, w ramach tych samych strategii) obróbki tej samej części [1].

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Instytut Technik Wytwarzania, Zakład Automatykacji, Obrabiarek i Obróbki Skrawaniem; ul. Narbutta 86, 02-524 Warszawa, a.zalewski@wip.pw.edu.pl



Rys. 1. Algorytm pracy w oparciu o predefiniowane strategie obróbki [9]

Po otrzymaniu nowego zlecenia i analizie modelu 3D (**krok 1**), następuje wyszukanie technologicznie podobnego przypadku we wcześniejszych opracowaniach CAM. **Krok 2** polega na powiązaniu istniejących predefiniowanych strategii (i wariantów) z nowym modelem, i dostosowaniu ich do indywidualnych, szczególnych wymagań zlecenia oraz możliwości technicznych na warsztacie. W **kroku 3** następuje automatyczne przeliczenie najpierw różnych strategii obróbki, a potem różnych wariantów w ramach wybranych strategii. Raporty w formie wykresów w **kroku 4** pozwalają na wybór rozwiązania do opracowania szczegółowego (tworzenie listy wymagań, dokumentacji warsztatowej, programów NC) w **kroku 5**.



Rys. 2. Przykłady różnych strategii frezowania kieszeni otwartej (a-trochoidalna głęboka, c-trochoidalne+blend, d-kieszeniowe HSM, e-kieszeń otwarta, f-kieszeniowe2, g-blend1, h-konturowa, i-dynamiczne2, j- kieszeniowe2, k-trochoidalna płytką, l-wgłębna)

Większość nowoczesnych programów CAM oferuje strategię obróbki odpowiednio do wykonania praktycznie każdej części [4]. W zależności od zastosowanych algorytmów obliczenia ścieżki w różnych programach CAM, kształt toru ruchu narzędzia może być inny. W tym przypadku nie chodzi o wybór lepszego programu CAM, ale o porównanie strategii w ramach konkretnego zbioru rozwiązań. Prowadząc analizy w oparciu o ten sam program CAM, symulacja pozwala na użycie najlepszego podejścia spośród dostępnych w tym przypadku. Przykłady różnych strategii ruchu narzędzia do frezowania zgrubnego otwartej kieszeni zaprezentowano na rysunku 2.

Z kolei dla tej samej strategii obróbki, tor ruchu narzędzia ma podobny kształt. W symulacjach kolejnych **wariantów obróbki** (w ramach jednej strategii) rozpatruje się zastosowanie narzędzi tego samego typu, ale o różnych średnicach  $D_f$ , z dobranymi w każdym przypadku parametrami takimi jak: promieniowa głębokość skrawania  $a_e$  i osiowa głębokość skrawania  $a_p$  [1]. W rezultacie usunięcie tej samej objętości materiału w każdym przypadku wymaga innej drogi (długości toru) narzędzia i zastosowania często innej prędkości posuwu  $V_f$ .

Trudno jest w praktyce zrealizować stałą przekrój warstwy skrawanej w każdej chwili, zwłaszcza przy obróbce skomplikowanego kształtu części. Aby uzyskać stałą wydajność objętościową obróbki, można zastosować regulowanie prędkości posuwu  $V_f$  [5, 6, 7]. Zmiana prędkości posuwu może dotyczyć też tych faz pracy narzędzia, w których zmienia się znacząco kierunek ruchu (np. naroża, małe łuki). Jest to związane z kolei z wymaganiami dokładności geometrycznej ruchu serwomechanizmów obrabiarki i jej możliwościami dynamicznymi. Całkowity tor ruchu narzędzia obejmuje szereg faz pracy narzędzia, w których nie osiągnęło ono założonych parametrów skrawania (np. dojazdy, odjazdy, krótkie przejścia przy granicy materiału). Droga i prędkość ruchu narzędzia są dostosowywane do lokalnych wymagań obróbki. Biorąc pod uwagę tak wiele możliwości zmiany drogi (toru ruchu) narzędzia i jego prędkości posuwu, trudno w sposób analityczny wyznaczyć rzeczywisty czas obróbki. Kompleksową taką analizę umożliwia symulacja obróbki w systemie CAM jeszcze na etapie projektowania procesu.

Analogicznie projektując proces obróbki części geometrycznie i technologicznie podobnej, można uzyskać zupełnie inne rozwiązanie, ponieważ np. w odniesieniu do wzorcowego procesu zmieni się liczba przejść narzędzia przy usuwaniu danej objętości materiału związana z bieżącymi parametrami  $a_e$  i  $a_p$ . Optymalnym rozwiązaniem może więc być zastosowanie zupełnie innych narzędzi i zmiana strategii obróbki. Pełna taka analiza bez efektywnego wykorzystania nowoczesnych programów CAM, wspomaganych technikami baz wiedzy nie wydaje się łatwa do uzyskania (jeśli jest w ogóle możliwa).

Rodzaj narzędzia związany jest z kształtem i wymiarami obrabianej części, wymaganiami odnośnie dokładności i jakości powierzchni. Wybór narzędzia ograniczają możliwości maszyny, rodzaj mocowania oraz cena. Zakres opisanych dalej analiz można ograniczyć tylko do posiadanych narzędzi, lub sprawdzić, czy zakup nowego będzie dobrym przedsięwzięciem.

Parametry skrawania stanowią bardzo istotny element analizy. Zależą one od wielu czynników. Wyznaczone teoretycznie są weryfikowane doświadczalnie. Szczególnie wartości promieniowej głębokości skrawania  $a_e$ , osiowej głębokości skrawania  $a_p$  oraz prędkości posuwu  $V_f$ , będą miały wpływ na wynik analizy. Warunki pracy narzędzia znacząco zawężają obszar zastosowania parametrów skrawania. W tym przypadku są one opisane parametrycznie, tzn. na podstawie wcześniej realizowanych obróbek na różnych obrabiarkach (OUPN), wprowadza się ograniczenia możliwości ich efektywnego wykorzystania. Są one wyrażone liczbowo lub pośrednio są ograniczone parametrami takimi jak np. maksymalne obroty wrzeciona, maksymalna moc, maksymalny moment obrotowy, itd. Można też wprowadzić współczynniki ułatwiające ocenę za względu na możliwość występowania drgań czy ugięcia elementów cienkościennych lub narzędzia. Pozwala to na prowadzenie symulacji w odniesieniu do warunków możliwie zbliżonych do rzeczywistych i wybór najlepszego rozwiązania dla danych warunków technicznych.

Porównanie strategii i wariantów obróbki tej samej części może być oparte o różne kryteria takie jak np.:

- czas obróbki,
- koszt obróbki (koszt narzędzi, zużycie energii, koszt maszynowy, koszt zużycia środków produkcji, itd.)
- jakość powierzchni po obróbce (np. zmiany w materiale obrabianym na skutek procesu skrawania, wielkość i kształt pozostawionego naddatku),
- charakter procesu skrawania (postać wióra, sposób odprowadzenia wióra, sposób chłodzenia, wpływ zużycia lub uszkodzenia narzędzia, stabilność procesu, odporność na zakłócenia, wpływ sztywności OUPN i drgań, itd.),
- koszt inwestycji w środki produkcji (zakup nowych narzędzi, oprzyrządowania, wyposażenia obrabiarek CNC itd.).

Wytypowanie optymalnej strategii – i w ramach niej – najlepszego wariantu realizacji zabiegu obróbki wybranej części w oparciu o wszystkie wymienione kryteria nie jest łatwe [1, 15]. Tym bardziej, że w niektórych przypadkach może brakować dostatecznych danych, aby te kryteria skutecznie analizować. Zaproponowano zatem następujące kroki postępowania:

- oszacowanie niezbędnych wartości na poziomie wystarczającym do prowadzenia analiz teoretycznych,

- przeanalizowanie z zastosowaniem metod symulacyjnych (CAM) wszystkich wytypowanych przypadków,
- opracowanie raportów porównujących poszczególne rozwiązania i wybór potencjalnie najlepszego ze względu na przyjęte kryteria.

## 2. PRZYKŁAD ANALIZY

Celem badań było skrócenie fragmentu procesu obróbki części produkowanej seryjnie przynajmniej o 20%. Szukano alternatywnego rozwiązania dla konkretnego przypadku realizacji zabiegu frezowania zgrubnego otwartej kieszeni. Analizie poddano obróbkę otwartej kieszeni o wymiarach około 40×60×45mm (uproszczony zarys kieszeni – rys. 3) wykonywaną seryjnie w stali o właściwościach zbliżonych do stali stopowej SAE-9310-HB330 (ok. 35HRC). Zadanie polegało na usunięciu około 111 cm<sup>3</sup> materiału w najkrótszym czasie (i spełnieniu warunków podanych wyżej). Opisane doświadczenia przeprowadzono na obrabiarce 3 osiowej DMC-104V ( $P_{max}=20kW$ ,  $M_{max}=100Nm$ ,  $n_{max}=12000obr/min$ ) z układem sterowania Siemens 840.

Zastosowanie koncepcji automatycznego porównania predefiniowanych technologii doprowadziło do stworzenia prototypu narzędzia analitycznego w środowisku Catia v5 oraz równolegle w Mastercam X6, którego zasadę pracy przedstawiono na rysunku 1. Analiza objęła około 200 konkretnych przypadków (strategie wraz z wariantami) obróbki tej samej kieszeni różnymi narzędziami [1, 9] (rys. 2). W badaniach na warsztacie skoncentrowano się na tych, które byłyby potencjalnie najciekawsze dla partnera przemysłowego tego projektu oraz dawały szansę weryfikacji teoretycznych założeń. W artykule opisano zastosowanie jednej strategii obróbki trochoidalnej głębokiej (rys. 2b), realizowanej tym samym narzędziem, w pięciu wariantach parametrów skrawania (tab. 1).

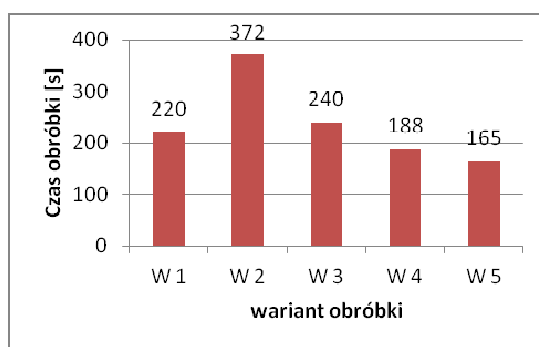
Tab. 1. Przykład parametrów skrawania dla frezu R216.35-16045-AK50N 1620 PKWiU 25.73.40.0 [7, 8, 9, 10] dla poszczególnych wariantów

Wariant	$a_e$ [mm]	$a_p$ [mm]	n [obr/min]	$v_f$ [mm/min]	$f_z$ [mm/ostrze]	P [kW]	$Q_v$ [cm <sup>3</sup> /min]	$v_c$ [m/min]	$M_c$ [Nm]	T [s]
W1	1,6	47,98	4158	1518	0,073	8,5	117	209	19	220
W2	0,8	47,98	5013	2507	0,100	7,0	96	252	13	372
W3	1,0	47,98	5013	2507	0,1	8,6	120	252	16	240
W4	1,0	47,98	5352	3024	0,113	10	145	269	18	188
W5	1,25	47,98	5013	2406	0,096	10	144	252	19	165

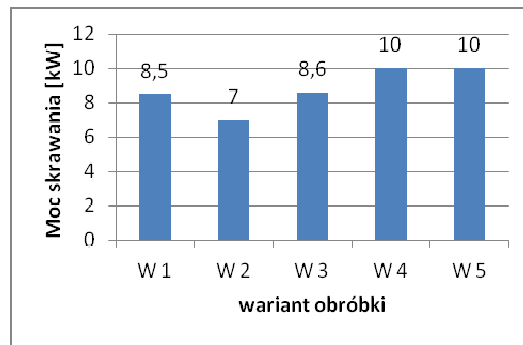
Doboru parametrów skrawania dokonano w oparciu o dane katalogowe narzędzi [6, 8, 10] odniesione do rodzaju materiału obrabianego, które były modyfikowane próbami skrawania [9]. Każdy z analizowanych przypadków był poprawny technicznie, a różnice w czasie realizacji zabiegu wynikały głównie z różnej długości drogi ruchu narzędzia i prędkości posuwu.

Kształt ścieżki narzędzia był za każdym razem zbliżony (wynikało to z tej samej strategii), ale długość ścieżki narzędzia (droga) różniła się ze względu na różne parametry  $a_e$ , a to powodowało zmienną liczbę przejść narzędzia w odniesieniu do kształtu i wymiarów przedmiotu obrabianego [5]. Założona prędkość posuwu  $V_f$  poddawana była niewielkim, lokalnym zmianom ze względu na fazę ruchu narzędzia (dojścia, odejścia), ale bez wymogu zachowania stałej objętości skrawania.

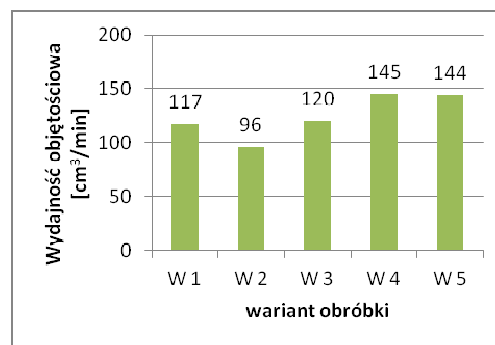
Analiza danych symulacji procesów w programie CAM [9] oraz programami wspomagającymi dobór parametrów skrawania [10] pozwala na porównanie wariantów obróbki ze względu na różne kryteria.



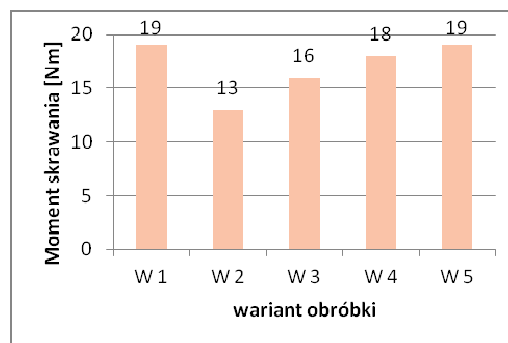
Rys. 3. Porównanie czasu obróbki podczas obróbki trochoidalnej dla 5 wariantów



Rys. 4. Porównanie mocy skrawania dla 5 wariantów obróbki trochoidalnej



Rys. 5. Porównanie maksymalnej wydajności objętościowej skrawania podczas obróbki trochoidalnej dla 5 wariantów



Rys. 6. Porównanie momentu skrawania podczas obróbki trochoidalnej dla 5 wariantów

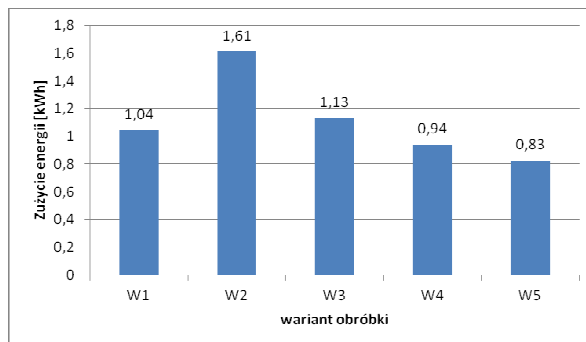
Obróbka trochoidalna (rys. 2b) charakteryzuje się ruchami skrawania i ruchami powrotnymi, w tym przypadku maksymalna wydajność objętościowa (rys. 5) odnosi się tylko do ruchów skrawania. Średnia wydajność objętościowa skrawania dotyczyłaby całej objętości usuwanego materiału w stosunku do czasu obróbki.

Opracowano wiele modeli oceny zużycia energii w procesie skrawania. Przykładowe podejścia można znaleźć np. [11, 12, 13, 14]. W tym przypadku zastosowano uproszczony model obliczenia zużycia mocy (energii) do realizacji operacji  $E_{op}$ :

$$E_{op} = P_{const} \cdot (T_{skr} + T_{poz}) + P_{skr} \cdot T_{skr} + P_{poz} \cdot T_{poz} \quad (1)$$

gdzie:  $P_{const}$  (kW) jest stałym składnikiem mocy niezależnym od stanu ruchu (szacowanym tutaj na poziomie 5,5 kW na podstawie [12]),  $T_1$  jest czasem cyklu bez skrawania,  $P_{skr}$  – średnia moc skrawania (wrzeczono) + szacowany wpływ serwonapędów (17% z 20 kW = 3,5 kW [12]),  $T_{skr}$  – czas skrawania,  $P_{poz}$  – średnia moc napędów wykorzystywana do ruchów pozycjonowania (na poziomie 5 kW),  $T_{poz}$  – czas pozycjonowania (ruchy powrotne, dojazdy, itp.).

Potwierdzają się spostrzeżenia zawarte w [11] dotyczące zmniejszania się zapotrzebowania energii w miarę skracania czasu realizacji zabiegu mimo wyższej mocy, momentu skrawania czy wydajności objętościowej (W5).

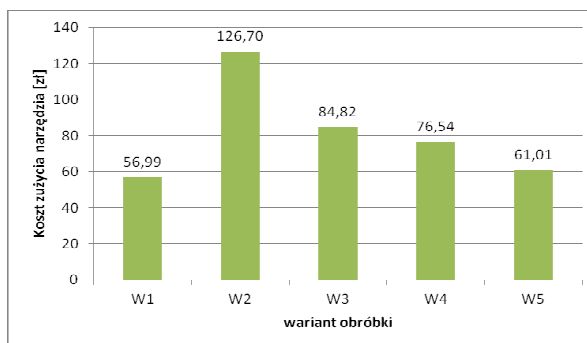


Rys. 7. Porównanie szacowanego zużycia energii dla różnych wariantów realizacji zabiegu.

Do porównania efektywności różnych strategii obróbki zastosowano również prostą analizę ekonomiczną, opartą o koszt zużycia narzędzi.

$$K = K_n \cdot \frac{T_s}{T_{s \max}} \quad (2)$$

gdzie:  $K_n$  - koszt narzędzia [zł];  $T_s$  – teoretyczny czas skrawania [min] narzędzia w trakcie obróbki wybraną strategią i wariantem realizacji zabiegu  $w_i$ , wyznaczona z symulacji procesów obróbkowych w CAM;  $T_{s \max}$  – teoretyczny, maksymalny czas pracy narzędzia [min] do zużycia dla danych warunków obróbki wybraną strategią i wariantem realizacji zabiegu  $w_i$ , wyliczona na podstawie algorytmów dostawcy narzędzi (w oparciu o wybrane parametry skrawania) [9].



Rys. 8. Porównanie szacowanych kosztów zużycia narzędzia dla różnych wariantów realizacji zabiegu

Praktyczne sprawdzenie na warsztacie wytypowanych wariantów obróbki wykazało możliwość znacznego przekroczenia założonych parametrów: mocy skrawania i wydajności objętościowej (które początkowo wynosiły odpowiednio 3,4 kW i 54 cm<sup>3</sup>/min). W omawianych przypadkach obrabiarka pracowała prawidłowo w całym zakresie, a zarejestrowane obciążenie wrzeciona nie przekraczało możliwości obrabiarki i obróbka przebiegała stabilnie. Narzędzia w trakcie opisanych prób nie uległy widocznemu zużyciu, a proces skrawania przebiegał bez zastrzeżeń. W ocenie obserwatorów najkorzystniejszym rozwiązaniem był wariant W5. Obróbka przebiegała stabilnie, cicho i najkrócej spośród rozpatrywanych przypadków.

W stosunku do parametrów wyjściowych realizacji zabiegu obróbkowego osiągnięto:

- redukcję całkowitego czasu obróbki jednej kieszeni o około 56 %,
- podczas analizy różnych wariantów obróbki tą samą strategią miała miejsce nawet trzykrotne zwiększenie mocy skrawania (od 3,4 kW do 10 kW) w stosunku do pierwotnie stosowanej; obróbka przebiegała prawidłowo,
- wydajność objętościowa skrawania była dla nawet trzykrotnie wyższa ( $Q=145,0$  [cm<sup>3</sup>/min]), niż wyjściowa (wzorcowa  $Q=53,0$  [cm<sup>3</sup>/min]), przy zachowaniu stabilności obróbki,
- Prędkość skrawania  $V_c=252$  m/min (wzrost prawie o 100 %) była uznana za najlepszą dla obróbki trochoidalnej z intensywnym chłodzeniem powietrzem.

### 3. PODSUMOWANIE

Zaproponowana metodyka pozwala na szybkie porównanie bardzo wielu możliwych rozwiązań konkretnego zadania obróbkowego (czy procesu technologicznego) w odniesieniu do konkretnych warunków w zakładzie. Prowadzone analizy pokazują, jak duży potencjał może kryć się w porównaniu alternatywnych technologii wykonania tego samego zabiegu frezowania na obrabiarkach CNC.

Warto podkreślić, że praktyczny charakter proponowanego podejścia wynika z krótkiego czasu otrzymania raportów (liczonych nawet w setkach wykresów) na temat potencjalnych efektów zastosowania poszczególnych rozwiązań i łatwego porównania różnych technologicznie metod obróbki frezowaniem, ze względu na różne kryteria. Sposób analizy poszczególnych kryteriów może być zmieniany i dostosowany do wymagań konkretnego zakładu produkcyjnego. Im bardziej złożony i zróżnicowany jest proces technologiczny, tym trudniej jest odpowiedzieć na pytanie, które strategie czy warianty obróbki będą najlepsze w podsumowaniu całości? Predefiniowane wzorce technologiczne wykorzystują „lokalny” stan wiedzy, kryteria dostosowane do potrzeb przedsiębiorstwa i jego możliwości technicznych aby za pomocą symulacji i porównania wielu rozwiązań, w ciągu minut lub kilku godzin odpowiedzieć na pytanie, co wybrać?

Prowadzone analizy off-line odnoszą się do indywidualnie zdefiniowanych, konkretnych obrabiarek i ich oprzyrządowania. Można więc (już na etapie symulacji) uwzględnić w pewnym zakresie możliwości dynamiczne stanowiska obróbkowego (parametry maszyny, oraz opisane w postaci współczynników dodatkowe warunki techniczne, takie jak niezalecane prędkości obrotowe, optymalne średnice czy maksymalny wysięg narzędzi ze względu na możliwość wystąpienia drgań). Opis charakterystyki dynamicznej OUPN może być systematycznie rozwijany na podstawie obserwacji przebiegu kolejnych zadań obróbkowych. Można w tym zakresie skorzystać również z dodatkowych analiz np. modalnych, które pozwolą na wyznaczenie zbioru charakterystyk FRF (frequency response function), dla reprezentatywnych narzędzi i miejsc obróbki. Na ich podstawie w symulacjach różnych strategii i wariantów obróbki będą stosowane najbardziej prawdopodobne parametry skrawania (np. ograniczające możliwość wpływu drgań samowzbudnych).

Podkreśla to tym samym możliwość uwzględniania w analizach rzeczywistych, technicznych uwarunkowań warsztatu przy budowie bazy wiedzy opartej o mechanizm predefiniowanych technologii. Dlatego prowadzone są prace związane z modelem systemu eksperckiego wspomagającego pracę zespołu technologicznego przygotowania produkcji z uwzględnieniem specyfiki konkretnego zakładu, działu wytwarzania czy wreszcie pojedynczej maszyny. Jedną z funkcji takiego systemu jest znajdowanie najlepszego rozwiązania (w krótkim czasie) obróbki skrawaniem do zastosowania w konkretnych warunkach. Będzie to miało istotne znaczenie zarówno podczas projektowania procesów, jak i przygotowywania ofert dla kooperantów.

### 4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Zalewski A.: *Skracanie czasu obróbki na frezarkach CNC na podstawie okresowej analizy warunków skrawania*, Inżynieria Maszyn, R. 17, z. 2, 2012.
- [2] Toh C.K.: *Tool life and tool wear during high-speed rough milling using alternative cutter path strategies*, 2003, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture September 1, 2003 217: 1295-1304.
- [3] Msaddek B., Bouaziz Z., Dessein G., Baili M., 2011, *Optimization of pocket machining strategy in HSM*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Manuscript Number: IJAMT7891.
- [4] Zalewski A.: *Efektywne wytwarzanie dzięki optymalnej strategii obróbki HSM*, Projektowanie i konstrukcje inżynierskie nr. 3(03) grudzień 2007 str. 23-26.
- [5] Zalewski A., 2006, *Droga narzędzia podczas frezowania na obrabiarkach CNC*, Mechanik 4s. 4/2006.
- [6] Przybylski L.: *Strategia doboru warunków obróbki współczesnymi narzędziami, Toczenie – Wiercenie – Frezowanie*, Politechnika Krakowska, Podręcznik, Kraków 2000.
- [7] Zalewski A., 2012, *Dobór parametrów skrawania tej samej części dla różnych strategii obróbki*. referat wygłoszony na II-iej Konferencji Naukowej nt.: Obrabiarki Sterowane Numerycznie i Programowanie Operacji w Technikach Wytwarzania Radom – Jedlnia Letnisko, 23 – 25 listopada 2011 r. Artykuł publikowany w Mechaniku 01/2012.
- [8] Sandvik: *Katalog narzędzi obrotowych. Frezowanie*, 2011.
- [9] Zalewski A.: *Zastosowanie mechanizmu efektywnego stosowania predefiniowanych strategii obróbki w środowisku Catia*, Sprawozdanie za realizacji projektu CAx, punkt 2.3, 12.2011, ITM WIP Politechnika Warszawska.
- [10] Sandvik: *program Plura Guide 9.2*.
- [11] Liangji Xu: *Machining Process Optimization for Minimum Product Lifecycle Energy Consumption*, The Boeing Company 2010. P.O. Box 3707 MC 5A-08, Seattle, WA 98124-2207, USA.
- [12] Grzesik W., *Podstawy projektowania i optymalizacji ekologicznych procesów obróbki skrawaniem*, Mechanik 3/2013.

- [13] Diaz N., Ninomiya K., Noble J., Dornfeld D., *Environmental impact characterization of milling and implications for potential energy savings in industry*, 5th CIRP Conference on High Performance Cutting, Procedia CIRP 1, 2012, 535-540.
- [14] Mori M., Fujishima M., Inamasu Y., Oda Y., *A study on energy efficiency improvement for machine tools*, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 60 (2011), p. 145÷148.
- [15] Zalewski A, Sobieski S.: *Zastosowanie metody wag unormowanych do wyboru najlepszej strategii i wariantu obróbki zgrubnej frezowaniem*. MECHANIK 8-9/2014. Materiały VIII KONFERENCJI SZKOŁY OBRÓBKI SKRAWANIEM MIĘDZYDROJE – SZCZECIN 17–19.09.2014.