

Adam ZALEWSKI¹

DOBÓR PARAMETRÓW SKRAWANIA TEJ SAMEJ CZĘŚCI DLA RÓŻNYCH STRATEGII OBRÓBKI

Streszczenie

Programowanie obrabiarek CNC za pomocą programów CAM umożliwia szybkie projektowanie różnych wariantów obróbki tej samej części. Wybór najlepszego rozwiązania wymaga porównania wyników obróbki na etapie symulacji procesu. Czas symulowanej obróbki jest jednym z najważniejszych kryteriów wyboru. Aby uzyskać wiarygodne wyniki symulacji czasu obróbki, trzeba ustawić parametry obróbki zbliżone do rzeczywistej realizacji na maszynie. W artykule zaproponowano modyfikację danych katalogowych doboru parametrów skrawania w oparciu o wcześniej realizowaną obróbkę.

THE CUTTING PARAMETERS SELECTION OF THE SAME PART MACHINING FOR DIFFERENT STRATEGIES

Abstract

CNC machines programming based on CAM programs make possible fast preparing different strategies machining for the same part. A choice of the best way needs simulation processes comparison. The simulation of machining needs suitable cutting parameters defined. In the article modification of standard cutting parameters concerning to previous machining is proposed.

1. WSTĘP

Współczesne systemy komputerowo wspomaganego wytwarzania (CAM) są rozwijane już od wielu lat. Trwała ich obecność na rynku projektowania technologii wytwarzania świadczy o prawidłowych metodach programowania obrabiarek sterowanych numerycznie, ponieważ są one na bieżąco weryfikowane w zakładach produkcyjnych. Można zaryzykować stwierdzenie, że zaawansowane programy CAM stanowią swoistą bazę wiedzy nowoczesnego wytwarzania. To już nie tylko możliwość pracy z bazami danych narzędzi, czy poprawna jakość toru narzędzia świadczą o wartości programu. Liczy się wiedza i praktyka ukryta często pod postacią parametrów i opcji programu. To dopiero wiedza i doświadczenie technologa pozwalają spośród wielu możliwości wybrać właściwą funkcję, której zastosowanie zredukuje znacząco czas obróbki.

Wydaje się, że od kilku lat twórcy programów CAM dążą w rozwoju programu w dwóch kierunkach:

¹ Zakład Automatykacji Obrabiarek i Obróbki Skrawaniem, Instytut Technik Wytwarzania Politechniki Warszawskiej, ul. Narbutta 86, 02-524 Warszawa, Tel. 501 145 457

Pierwszy kierunek zakłada jak największą automatyzację przy opracowywaniu technologii obróbki na obrabiarki CNC. Na podstawie kształtu modelu program CAM automatycznie dobiera narzędzia, parametry obróbki i tory narzędzi. W przypadku prostych kształtów czy obróbki otworów, efekty są dobre (np. Mastercam FBM firmy CNC Software inc., czy Prodrill firmy Moldplus). Można powiedzieć jednak, że narzędzia te - budzące nadzieje młodych technologów i obawy doświadczonych programistów (przed dewaluacją wartości ich wiedzy), nie są jeszcze doskonałe dla bardziej złożonych modeli. Opracowany w ten sposób zestaw operacji (zabiegów) technologicznych jest przygotowany na bazie wiedzy producenta programu, który zakłada przeciętne możliwości narzędzi, opravek i obrabiarek. Rozpoznawanie kształtów w oparciu o geometrię 3D modelu (powierzchnie, bryły, czy tzw. Features - całości albo cechy), niesie jeszcze sporo do zyczenia. Bo o ile np. pojedyncze wypsy w kieszeni łatwo jest zlokalizować, to analiza projektu złożonego z kilkuset lub kilku tysięcy powierzchni (lub ścian brył) jest zadaniem bardzo trudnym. Uzyskany w ten sposób program jest zwykle wolny od kolizji, ale daleki od optymalnego (dłuższy czas obróbki, mniejsza trwałość narzędzi).

Drugi kierunek badań polega na dostarczeniu technologowi programu CAM, który będzie w stanie zrealizować obróbkę w taki sposób, jak to podpowiada jego wyobrażenia i doświadczenie zawodowe. Rozbudowywany jest szeroki wachlarz funkcji i strategii obróbkowych z których technolog wybiera stosownie do realizowanego zadania. Charakterystyczna dla obu przypadków jest też możliwość użycia bibliotek procesów technologicznych, które pozwalają na „nałożenie” na nowy model własnych, opracowanych wcześniej dla technologicznie podobnego modelu procedur wraz z dobranymi narzędziami, strategiami ruchu narzędzia, parametrami obróbki.

Wraz ze zmieniającą się ofertą materiałów narzędziowych oraz rosnącymi parametrami dynamicznymi obrabiarek CNC, dotychczas realizowane procesy obróbkowe mogą być zastępowane nowymi, bardziej wydajnymi, tańszymi rozwiązaniami.

Szeroka „automatyzacja” programowania obrabiarek CNC umożliwia szybkie opracowywanie wielu wariantów obróbki tej samej części. Często różnią się one znacznie pod względem teoretycznego czasu realizacji na warsztacie (rys. 1). Teoretyczny czas przebiegu obróbki wyznaczany jest w programie CAM (w trybie off-line) na podstawie długości toru i prędkości różnych faz ruchu narzędzia. Aby taka analiza była możliwie wiarygodna, parametry ruchu muszą być określone dość dokładnie.

Tor ruchu narzędzia jest związany z kształtem przedmiotu obrabianego (PO), jednak praktyka stosowania programów CAM do programowania obróbki frezowaniem pokazuje, że tor narzędzia może być bardzo różny, w odniesieniu do tego samego kształtu PO. Mówimy wtedy o różnych strategiach obróbki tego samego kształtu. W każdym razie tor ruchu dla danej strategii obróbki jest wyznaczany dość jednoznacznie i stanowi precyzyjny element opisu teoretycznego czasu obróbki.

Gorzej jest z wyznaczeniem właściwej prędkości posuwu narzędzia.

Analizując różne warianty obróbki tym samym narzędziem i parametrami obróbki (prędkość posuwu, prędkość obrotowa narzędzia przy frezowaniu) zauważymy, że narzędzie pracuje w różnych warunkach (zmienny posuw na ostrze, a_e , a_p), a to oznacza, że ustalone wcześniej parametry posuwu i prędkości obrotowej mogłyby być zmienione, aby daną strategię zbliżyć do warunków optymalnych.

DOBÓR PARAMETRÓW SKRAWANIA TEJ SAMEJ CZĘŚCI DLA RÓŻNYCH STRATEGII OBRÓBKII



Rys. 1 Porównanie czasu realizacji różnych strategii obróbki zgrubnej tej samej części typu matryca, tym samym narzędziem, z takimi samymi parametrami obróbki. [1]

Sprawa komplikuje się jeszcze bardziej, kiedy będziemy rozważali zastosowanie różnych strategii obróbki różnymi narzędziami. Oczywiście jest zastosowanie różnych parametrów obróbki dla frezu o średnicy 10 mm i głowicy frezarskiej o średnicy 50 mm.

Prawidłowy dobór parametrów obróbki jest w tym przypadku kluczowy. Chodzi tu o parametry skrawania, które jeszcze w fazie analizy porównawczej (off-line), przed próbami na maszynie, pozwolą na wytypowanie najlepszych strategii obróbki.

Tradycyjny dobór parametrów skrawania polega na wykorzystaniu katalogu narzędzi lub odpowiedniego programu komputerowego i pracę według schematu [6]:

- Określenie rodzaju obróbki
- Określenie materiału obrabianego
- Wybór frezu do danej operacji
- Wybór płytki
- Określenie wartości początkowych
- Wartości te należy zoptymalizować zależnie od możliwości obrabiarki i warunków obróbki.

W tym znanym podejściu obawy budzi ostatni punkt, ponieważ „optymalizacja wartości” wymaga:

- dużej wiedzy i doświadczenia odniesionego do posiadanego parku maszyn i narzędzi
- przeprowadzenia prób skrawania do weryfikacji dobranych wstępnie parametrów skrawania.

O ile wiedza i doświadczenie pracownika nie podlega tutaj dyskusji, o tyle oczywiście jest, że próby skrawania będą kłopotliwe, jeżeli w obszarze rozważań znajdzie się wiele strategii obróbki różnymi narzędziami. Dobór parametrów „katalogowych” w odniesieniu do prób skrawania może dawać wyniki różniące się o kilkadziesiąt procent. Tak duży błąd

oszacowania parametrów skrawania na etapie porównania efektywności różnych strategii obróbki tej samej części jest istotnym ograniczeniem.

Porównując w trybie off-line (w trybie symulacji obróbki) czasy przebiegu zabiegów obróbkowych dla różnych strategii trudno porównywać warianty różniące się czasem realizacji o kilkanaście lub kilkadziesiąt procent, kiedy możliwość doświadczalnej korekcji posuwu w stosunku do wartości katalogowych również może wynieść kilkadziesiąt procent.

W trakcie wstępnego ustalania parametrów skrawania dla frezowania wykorzystywane są znane zależności ([2], [3], [4]) określające prędkość skrawania v_c [m/min], wydajność objętościową Q [cm³/min], posuw na ostrze f_z [mm/z], prędkość posuwu v_f [mm/min], obroty narzędzia n [obr/min], moc skrawania P_c [kW], moment skrawania M [Nm], średnią grubość warstwy skrawanej h_m [mm], nominalne pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej c , siły skrawania, opór właściwy skrawania, zależność trwałości ostrza od prędkości skrawania (wzór Taylora)... We wzorach tych pojawiają się stałe zależne od warunków obróbki, na tym etapie są więc zakładane teoretycznie.

Wyznaczone w sposób katalogowy parametry skrawania nie uwzględniają w pełni elementów mających wpływ na rzeczywisty przebieg obróbki takich, jak np. :

- Sztywność statyczna i dynamiczna maszyny
- Rodzaj materiału (ściśle) przedmiotu obrabianego, jego sztywność i ukształtowanie względem występowania sił skrawania i mocowania
- Sztywność narzędzia (jego wysięg, rodzaj mocowania, rodzaj chłodzenia, zmienne warunki obróbki)
- Drgania

Ustalone wstępnie parametry skrawania mogą być następnie zoptymalizowane doświadczalnie dowolną metodą, np. opisaną w [4], gdzie zaproponowano algorytm korekty prędkości skrawania z uwzględnieniem rzeczywistych wartości okresów trwałości ostrza uzyskanych w lokalnym środowisku obróbki.

Jak już wspomniano, we wzorach umożliwiających wyznaczenie parametrów obróbki występują stałe, które są zależne od warunków obróbki. Prawidłowe oszacowanie ich wartości wymaga prób obróbki w warunkach produkcyjnych. Próby takie są nieuniknione, ale należy zminimalizować zakres ich stosowania ze względu na:

- Straty związane z okresem przerwy w produkcji na danej obrabiarki CNC
- Niebezpieczeństwo uszkodzenia maszyny, narzędzia i oprzyrządowania
- Stres dla obsługi, stratę czasu pracy operatora CNC i projektanta CAM

W produkcji seryjnej dobór parametrów obróbkowych zajmuje dużo czasu. W zależności od sytuacji satysfakcjonującą wydajność obróbki w stosunku do jakości i kosztów można osiągnąć w ciągu kilku godzin prób skrawania. Znane są też przykłady, kiedy próby na warsztacie zajmowały kilka tygodni, po których parametry jednego zabiegu wydajnej obróbki korpusu uznano za optymalny.

Te najlepsze warunki obróbki będą właściwe na maszynie, na której były robione doświadczenia, konkretnym narzędziem i jego zamocowaniem, w danych warunkach mocowania i określonego ukształtowania przedmiotu obrabianego. Zatem opracowanie prób maszynowych na innej maszynie i w innych warunkach obróbki może doprowadzić do pozyskania innych parametrów obróbki, które nie będą sprawdzały się na warsztacie.

DOBÓR PARAMETRÓW SKRAWANIA TEJ SAMEJ CZĘŚCI DLA RÓŻNYCH STRATEGII OBRÓBK

Ze względu na wpływ wielu czynników na określenie parametrów skrawania, trudność w łatwym i szybkim, teoretycznym oszacowaniu off-line dostatecznie wiarygodnych parametrów obróbkowych do porównania różnych strategii obróbki różnymi narzędziami, zaproponowano następujące podejście.

2. DOBÓR PARAMETRÓW SKRAWANIA DLA RÓŻNYCH WERSJI ZABIEGU OBRÓBKOWEGO

Zamiast wykonywania dodatkowych prób skrawania, zaproponowano analizę dotychczas realizowanych zabiegów obróbkowych do wyznaczenia dodatkowych kryteriów doboru parametrów obróbkowych. Wykonywana wcześniej technologia na konkretnej obrabiarce CNC, konkretnym narzędziem i w ustalonych warunkach, oparta jest na próbach maszynowych. Została zaakceptowana pod względem jakości obróbki, czasu realizacji i kosztów. Wykorzystuje parametry obrabiarek CNC i narzędzi we właściwym albo zaakceptowanym stopniu. Zastosowane parametry skrawania sprawdziły się w odniesieniu do geometrii konkretnego narzędzia w danym zabiegu obróbkowym.

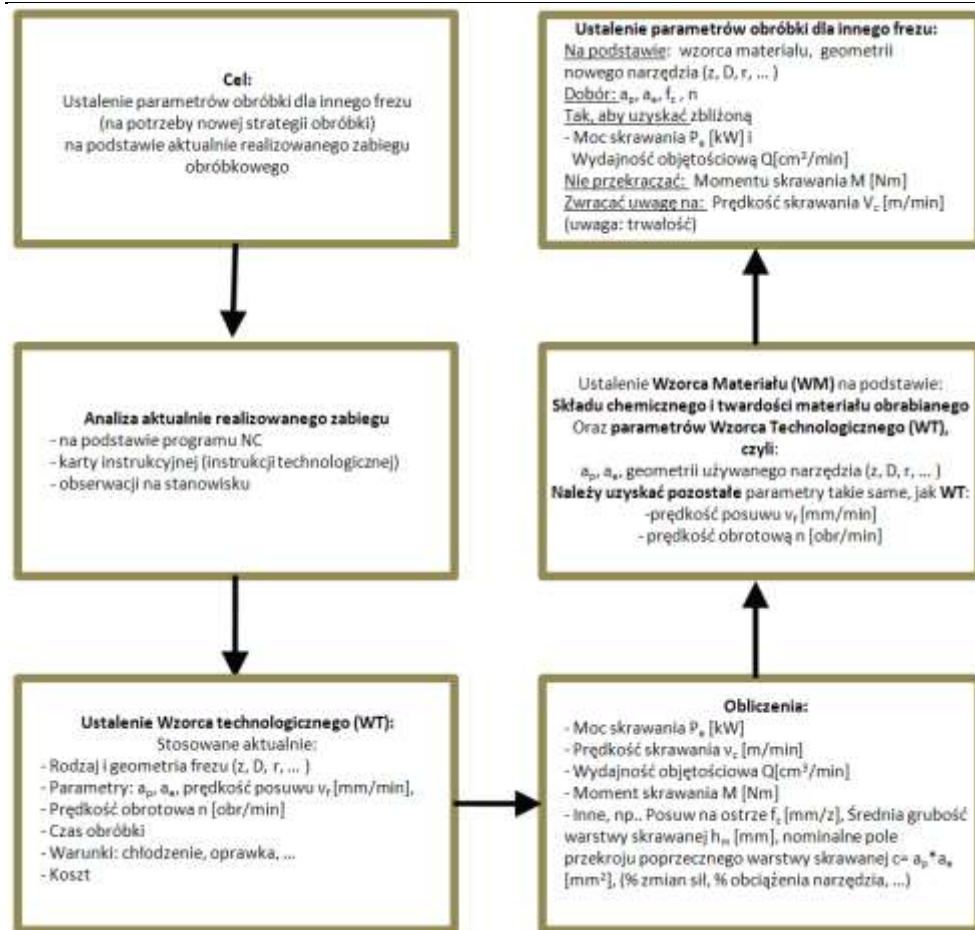
Na podstawie tych wielkości można oszacować, niejako „w drugą stronę”, parametry, które są zależne od konkretnych warunków obróbki. Dane te wykorzystane zostaną do doboru nowych parametrów skrawania.

Wykorzystanie dotychczas parametrów realizowanych zabiegów obróbkowych nie wymaga dodatkowych nakładów i choćby z tego powodu wydaje się bardzo korzystne. Zaproponowano następujący schemat (rys. 2), a w dalszej części opisano poszczególne kroki postępowania.

Pierwszym krokiem jest pozyskanie rzeczywistych, dotychczas realizowanych parametrów obróbki danym narzędziem. Można je uzyskać z karty instrukcyjnej zabiegu (instrukcji technologicznej). Bardzo często jednak zawarte tam informacje opisują wielkości teoretyczne, które w trakcie realizacji zabiegu są zmienne (np. v_f , a_e , a_p), dlatego istotne znaczenie może mieć szczegółowa analiza programu NC realizowanej obróbki. Ważne są szczególnie fragmenty obróbki z największym obciążeniem narzędzia i maszyny. Zaprogramowane parametry skrawania mogą różnić się od rzeczywistości realizowanych na maszynie, ponieważ pewnych modyfikacji posuwu może dokonywać układ sterowania obrabiarki CNC (np. zwalnianie na narożach), lub operator obrabiarki, który ma możliwość ingerencji w przebieg obróbki za pośrednictwem pulpitu sterowania. Dlatego obserwacja realizowanego procesu obróbki bezpośrednio na stanowisku wytwórczym może okazać się istotna.

Gromadzone są następujące dane o aktualnym zabiegu obróbkowym:

- Rodzaj i geometria frezu (liczba ostrzy z , średnica D , promień naroża r)
- Parametry: głębokość skrawania a_p [mm], szerokość skrawania a_e [mm], prędkość posuwu v_f [mm/min],
- Prędkość obrotowa n [obr/min]
- Czas obróbki
- Warunki: chłodzenie, oprawka, ...
- Koszt



Rys. 2 Algorytm doboru parametrów obróbki dla nowego narzędzia

Pozwoli to na zdefiniowanie tzw. **wzorca technologicznego** (WT), zawierającego maksymalne (lub przyjęte jako odniesienie) parametry skrawania rzeczywistego, zweryfikowanego praktycznie zabiegu obróbkowego.

Na podstawie wzorca technologicznego obliczane są następnie wielkości związane z dotychczas realizowanym zabiegiem:

- Moc skrawania P_e [kW]
- Prędkość skrawania v_c [m/min]
- Wydajność objętościowa Q [cm³/min]
- Moment skrawania M [Nm]
- Inne, np. Średnia grubość warstwy skrawanej h_m [mm], nominalne pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej $c = a_p \cdot a_e$ [mm²], (% zmian sił, % obciążenia narzędzia, ...)

Wygodne jest w tym miejscu posługiwanie się programami do doboru parametrów obróbkowych dostarczonymi przez producentów narzędzi skrawających. Wielkości

DOBÓR PARAMETRÓW SKRAWANIA TEJ SAMEJ CZĘŚCI DLA RÓŻNYCH STRATEGII OBRÓBK

obliczane przez takie programy odniesione są do założonej, teoretycznej definicji materiału obrabianego. Parametry materiału obrabianego określone są w odniesieniu do jego szacunkowego składu chemicznego i twardości.

Porównując rzeczywiste parametry skrawania (v_f , n , a_p , a_e) odniesione do definicji materiału obrabianego (odpowiadającej teoretycznie jego składowi chemicznemu i twardości) często okazuje się, że są one inne, niż wynikające z programu obliczeniowego (ponieważ, jak zaznaczono wcześniej, zostały one dostosowane do rzeczywistych warunków obróbki).

Wzorzec technologiczny posłuży więc do wyznaczenia kolejnej wielkości pomocniczej, tzw. **wzorca materiału** (WM). Materiału, który obliczeniowo będzie odpowiadał parametrom realizowanego zabiegu i będzie zgodny z algorytmami obliczeniowymi doboru parametrów skrawania danym narzędziem. Zmiana rodzaju teoretycznego materiału obrabianego umożliwi ustawienie programie obliczeniowym parametrów obróbki zbliżonych do rzeczywistych. Inaczej mówiąc: dla parametrów z WT (z , D , r , a_p , a_e , prędkość posuwu v_f [mm/min], n [obr/min]) dobieramy z biblioteki taki materiał, dla którego pozostałe wielkości (P_e [kW], v_c [m/min], Q [cm³/min], M [Nm]) będą zbliżone do wyznaczonych dla wzorca technologicznego.

Wzorzec materiału (WM) w czasie analizy porównawczej konkretnego zabiegu obróbkowego jest wartością stałą i uwzględnia w danej sytuacji (w pewnym zakresie) problemy sztywności, drgań, trwałości, kosztów, ... Opiera się na parametrach obróbki ustawionych doświadczalnie i sprawdzonych. Można założyć zdaniem autora, że w sposób uwikłany zawiera parametry, które są zależne od konkretnych warunków obróbki.

Obróbka tego samego detalu w innym zabiegu obróbkowym może wymagać innego wzorca materiału. Przykładowo, obróbka kieszeni w dolnej części korpusu podczas frezowania w trzech osiach będzie charakteryzowała się prawdopodobnie większą sztywnością, niż obróbka kieszeni w górnej części ażurowego korpusu, dalej od elementów mocujących. Z punktu widzenia „katalogowego” doboru parametrów skrawania, oba przypadki są takie same, a korektę parametrów uzyskuje się doświadczalnie. Zastosowanie w obu przypadkach różnych wzorców materiału ułatwi automatyczną korekcję parametrów obróbki.

Skład chemiczny i twardość materiału deklarowana we wzorcu materiału nie muszą odpowiadać stanowi faktycznemu (zwłaszcza twardość), ponieważ parametry stosowanej obróbki są skorygowane doświadczalnie w stosunku do wyznaczonych za pomocą obliczeń. Dlatego wzorzec materiału może mieć obliczeniowo np. znacznie większą twardość od faktycznego materiału obrabianego.

W praktyce, dla wybranego rodzaju materiału obrabianego (skład chemiczny i twardość) ustawiane były stosowane parametry a_p , a_e i D (średnica i promień naroża narzędzia), następnie dobierany był posuw na ostrze f_z [mm/z] tak, aby uzyskać prędkość posuwu v_f [mm/min] i obroty narzędzia n [obr/min] zbliżone do realizowanych w produkcji. Jeżeli nie udało się uzyskać wymaganych parametrów, to zmieniano rodzaj materiału lub jego twardość.

Wzorzec materiału posłuży z kolei do wyznaczenia parametrów obróbki innym narzędziem za pomocą tych samych programów do doboru parametrów obróbki przygotowanych przez dostawców narzędzi.

Takie rozwiązanie uwzględnia w tym momencie warunki obróbki jak i geometrię narzędzia (wzorcowego – podczas wyznaczania wzorca technologicznego, jak i

dobieranego – definiowanego w programie obliczeniowym w odniesieniu do wzorca materiału).

Założenia proponowanego podejścia:

- Parametry skrawania nowym narzędziem te mają być dostatecznie wiarygodne do porównania i wyboru właściwej (jednej lub kilku) strategii obróbki.
- Po zawężeniu pola poszukiwań i wytypowaniu jednej lub kilku strategii obróbki, koryguje się parametry obróbki za pomocą próba na maszynie.

3. PRZYKŁAD ANALIZY

Zidentyfikowano problem czasochłonności obróbki seryjnej w korpusie kilku otwartych z obu stron kieszeni.

- **krok 1:** ustalenie Wzorca Technologicznego na podstawie dotychczasowego procesu technologicznego (Tabela 1).

Tab. 1 Parametry wzorca technologicznego

Lp	Parametr	Wartość
1	nazwa części	(określony przez partnera projektu)
2	Materiał:	(określony przez partnera projektu)
3	Narzędzie:	GLOWICA FREZARSKA Coro mill R390 D40 R1.6 (SANDVIK) R390-040C4-1M - fi40 z płytką R390-11T316E-PM 1025
4	Obrabiarka:	(określona przez partnera projektu)
5	Czas obróbki:	7 min 20 sek.
6	WZORZEC TECHNOLOGICZNY	$a_e=40\text{mm}, a_p=2.8\text{mm}, v_f=480\text{mm/min}, n=1050\text{obr/min},$
7	Prędkość skrawania [m/min]:	131

- **krok 2:** Dane z wzorca technologicznego umożliwiły ustalenie wzorca materiału (Tabela 2) dla tego zabiegu obróbkowego: zastosowane przy ustaleniu (w tym przypadku dane obliczeniowe w programie doboru parametrów obróbki wynosiły $D=40\text{mm}, v_f=473\text{mm/min}, n=1074\text{obr/min}, a_p=2.8\text{mm}, a_e=40\text{mm}$)

Tab. 2 Parametry wzorca materiału

Lp	Parametr	Wartość
1	Posuw na ostrze f_z	0,11
2	max grubość wióra (hex)	0,11
3	średnia grubość wióra (hm)	0,07
4	Moc skrawania P_e [kW]:	3.4
5	Prędkość skrawania v_c [m/min]:	135
6	Wydajność objętościowa Q [cm ³ /min]	53
7	Moment obrotowy M_c [Nm]	31
8	Siła skrawania średnia [N]	1550
9	Pole przekroju $c= a_p \cdot a_e$ [mm ²],	112
10	Opór skrawania [Siła/przekrój]	13.83
11	Wzorzec Materiału	z katalogu Sandvik: Stal stopowa/AISI/SAE-9310-B330/1025

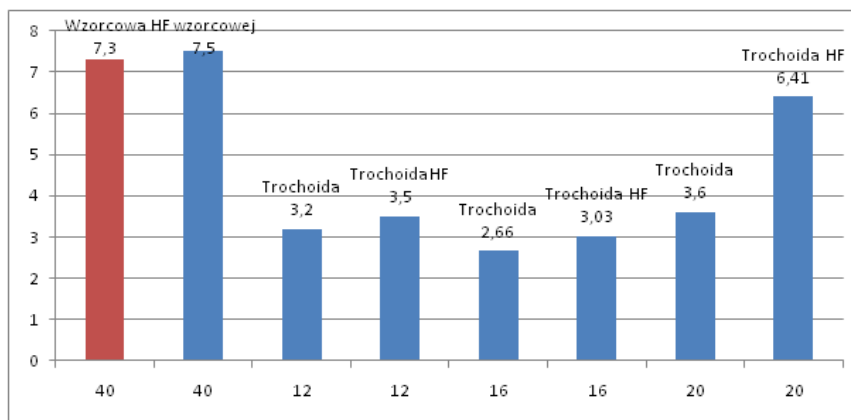
DOBÓR PARAMETRÓW SKRAWANIA TEJ SAMEJ CZĘŚCI DLA RÓŻNYCH STRATEGII OBRÓBKII

- **krok 3:** W oparciu o Wzorzec Materiału i parametry z pozycji od 1 do 10 dobrano parametry obróbki za pomocą programu do doboru parametrów skrawania dostarczonego przez dostawcę narzędzi dla frezów serii Sandvik CoroMill Plura o średnicach 12, 16 i 20 mm. Kolejne doświadczenia (rys. 3) dotyczyły symulacji:

- obróbki wzorcowej (dotychczas realizowanej, do wyznaczenia wzorca technologicznego)
- obróbki wzorcowej z optymalizacją posuwu (high feed - HF)
- wariantów obróbki trochoidalnej [5] frezami o średnicach 12, 16 i 20 mm

Tab. 3 Parametry skrawania obliczone dla różnych wariantów strategii obróbki wzorcowej i trochoidalnej. Pierwsza kolumna pokazuje numer analizy, kolejne wiersze odpowiadają kolejnym wariantom obróbki dla różnych frezów o średnicach 40mm (nr 1 obróbka wzorcową), 12, 16 i 20 mm.

Lp	D [mm]	z	a _e [mm]	a _p [mm]	n [obr/min]	f _z [mm]	v _f [mm/min]	P [kW]	Q [cm ³ /min]
1	40	4	40	2.8	1050	0.110	480	3.4	53
2	40	4	40	2.8	1050	0.110	480	3.4	53
3	12	4	3.5	24	3740	0.042	628	3.2	53
4	12	4	4	20	3262	0.046	605	2.8	48
5	16	4	2.5	24	3933	0.058	582	3.0	55
6	16	4	4.5	32	1648	0.038	377	3.4	54
7	20	4	2.2	24	3676	0.045	993	3.4	52
8	20	4	2.2	24	3676	0.045	993	3.4	52



Rys. 3 Porównanie czasu obróbki kieszeni strategią wzorcową (pierwszy wyróżniony słupek) i wariantów obróbki trochoidalnej z wykorzystaniem optymalizacji posuwu (HF). Oś pionowa oznacza czas w minutach. Pozioma oś obrazuje zastosowanie narzędzi o różnych średnicach i różnymi strategiami.

Zastosowanie optymalizacji posuwu zwiększało czas obróbki średnio o ok. 0.3 min lub więcej (ostatni przypadek). Widoczne są wyraźne możliwości skrócenia czasu wykonania

kieszeni za pomocą strategii trochoidalnej. Najmniejszy czas osiągnięto dla frezu o średnicy 16mm co jest związane z parametrami obróbki (tab. 3), ale również z kształtem toru ruchu narzędzia (np. konieczność uzyskania minimalnych promieni wycofania narzędzia, które dla tej średnicy narzędzia i geometrii kształtu obrabianego okazały się najkorzystniejsze). Obciążenie narzędzia i obrabiarki powinno być (zdaniem autora) na porównywalnym poziomie, jak w stosowanej obróbce wzorcowej. Optymalizacja posuwu wydłuża nieznacznie czas obróbki, ale może okazać się korzystna z punktu widzenia np. odprowadzenia wiórów.

Tabela 4 Parametry skrawania obliczone dla różnych wariantów strategii obróbki kieszeni. Pierwsza kolumna pokazuje numer analizy, druga kolumna przedstawia kolejne warianty obróbki dla frezów o średnicy 12, 16 i 20 mm.

lp	wariant	D [mm]	a_e [mm]	a_p [mm]	Czas [min]	Czas (cienka ściana) [min]	n [obr/min]	V_f [min/min]	f_z [mm]	V [m/min]	$a_p * a_e$ [mm ²]	Q [mm ³ /min]
1	1	12	12	3	4,436	8,283	3501	1534	0,073	132	36	55224
2	2	12	10	3,7	4,057	7,421	4737	1453	0,077	179	37	53761
3	3	12	8	4	3,528	6,146	5063	1722	0,085	191	32	55104
4	4	12	6	3,5	3,263	5,365	4549	2537	0,093	172	21	53277
5	5	12	4,4	4,4	2,881	4,401	4795	2819	0,098	181	19,4	54576
6	6	12	3	5,5	2,683	3,741	5114	3320	0,108	193	16,5	54780
7	1	16	16	9	7,384	14,162	2568	300	0,029	129	144	43200
8	2	16	16	4,5	5,595	10,686	2383	728	0,076	120	72	52416
9	3	16	12	5	4,44	8,193	2773	912	0,082	139	60	54720
10	4	16	8	5	3,767	6,584	3540	1273	0,09	178	40	50920
11	5	16	6	6	3,241	5,305	3729	1421	0,095	187	36	51156
12	6	16	4	4	2,752	4,055	6525	3341	0,128	328	16	53456
13	1	20	20	5	5,824	11,171	1947	503	0,065	122	100	50300
14	2	20	20	3,5	5,557	10,64	2018	823	0,102	127	70	57610
15	3	20	16	3,5	4,583	8,983	2636	1044	0,099	166	56	58464
16	4	20	12	3,5	3,756	7,217	2882	1385	0,12	181	42	58170
17	5	20	12	5	4,164	8,013	2781	891	0,08	175	60	53460
18	6	20	10	5,7	3,791	6,9	2880	953	0,083	181	57	54321
19	7	20	7	7	3,088	5,267	3076	1102	0,09	193	49	53998
20	8	20	4	3,7	2,455	3,587	3912	3834	0,245	246	14,8	56743

DOBÓR PARAMETRÓW SKRAWANIA TEJ SAMEJ CZĘŚCI DLA RÓŻNYCH STRATEGII OBRÓBKII

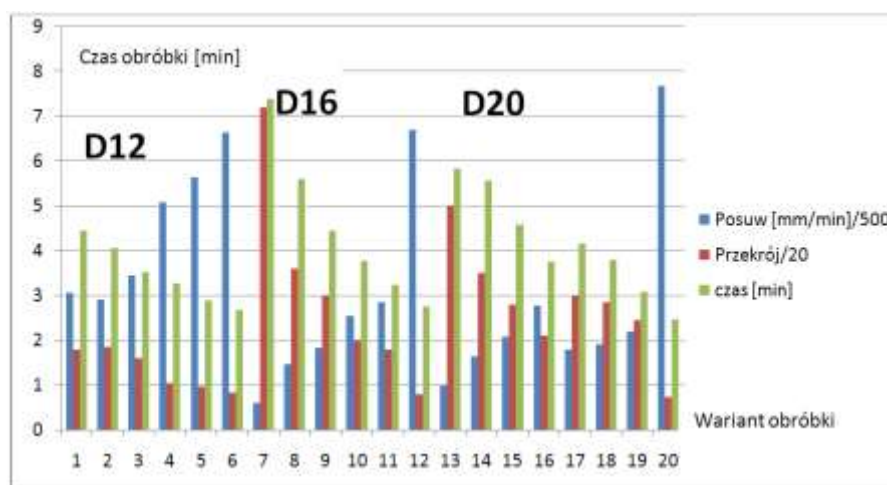
Zaproponowano także zastosowanie innych strategii obróbki kieszeni stosując różne narzędzia i warianty parametrów obróbkowych określonych zgodnie z opisanymi wcześniej zasadami (na podstawie tego samego wzorca materiału, tab. 4).

Parametry skrawania w pewnym sensie równoważne w każdym przypadku pod względem warunków obróbki, ale dla każdego z wariantów inna jest droga narzędzia i jego prędkość posuwu. Stąd różny czas szacowanej (symulowanej obróbki). Pojawiła się redukcja czasu obróbki w przypadku zmniejszania szerokości a_e i zwiększania głębokości a_p (lepiej widoczne na rys. 4).

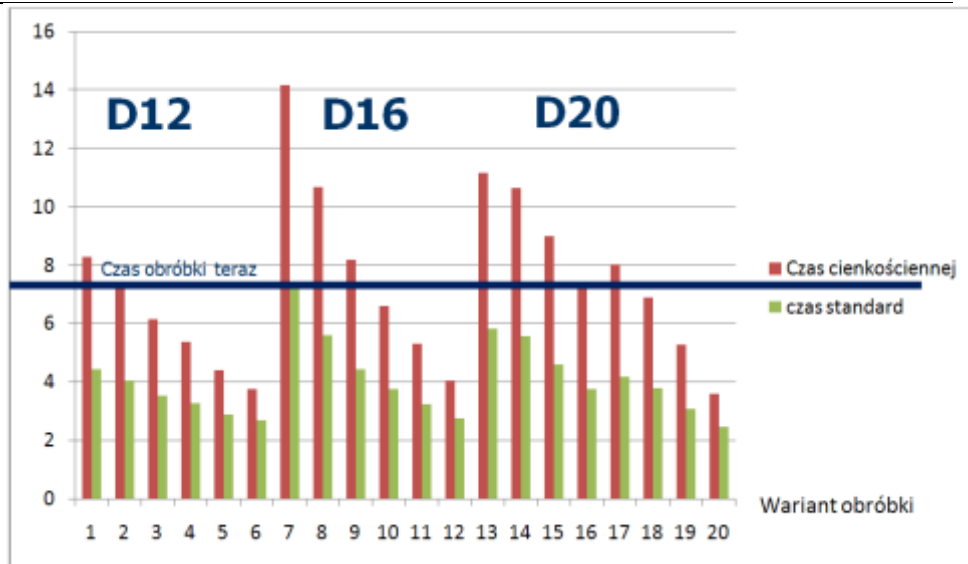
Warto zwrócić uwagę, że prowadzone wcześniej przez autora badania dla regularnych kształtów obrabianych kieszeni, wykazywały najkrótszy czas obróbki dla przekroju warstwy skrawanej ($a_p \cdot a_e$) zbliżonej kształtem do kwadratu (np. wariant 5 tab. 4). Tutaj lepszy wynik przypadł przypadkiem (np. wariant 6): $a_p = 5.5\text{mm}$, $a_e = 3\text{mm}$. Świadczy to o wpływie kształtu obrabianej części na czas obróbki danym wariantem.

Poniżej przytoczono przykłady porównujące symulowane zabiegi obróbkowe.

Rys. 4 przedstawia zestawienie zmian nominalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej (jako $a_p \cdot a_e$) w zależności od prędkości posuwu. Można również zaobserwować teoretyczny czas obróbki dla każdej strategii. Widać wyraźnie, że dla każdego zastosowanego narzędzia szacunkowy czas obróbki maleje, jeśli zmniejszy się wartość iloczynu $a_p \cdot a_e$ i zwiększy posuw. Dodatkową korzyścią będzie zmniejszenie sił skrawania. Problemem może się jednak okazać wzrost prędkości skrawania i posuwu na ostrze.



Rys. 4 Porównanie czasu obróbki dla wszystkich analizowanych wariantów strategii obróbki kieszeni dla kolejnych frezów o średnicy 12mm (wariant 1-6), 16mm (wariant 7-12) i 20mm (wariant 13-20). Wielkości przekroju warstwy skrawanej (jako $a_p \cdot a_e$) i prędkości posuwu zostały przeskalowane dla lepszego zobrazowania zagadnienia.



Rys. 5 Porównanie obróbki frezowaniem trzema narzędziami dla strategii kieszeń otwarta standard i dla strategii kieszeń otwarta z dodanymi przejściami dla elementów cienkościennych (stały posuw) - dla kolejnych frezów o średnicy 12mm (wariant 1-6), 16mm (wariant 7-12) i 20mm (wariant 13-20). Pozioma, niebieska linia prezentuje poziom czasu obróbki wzorcowej.

Rys. 5 pokazuje porównanie obróbki frezowaniem trzema narzędziami dla strategii kieszeń otwarta standard i dla strategii kieszeń otwarta z dodanymi przejściami dla elementów cienkościennych (stały posuw) - dla kolejnych frezów o średnicy 12mm (wariant 1-6), 16mm (wariant 7-12) i 20mm (wariant 13-20). W przypadku złej jakości powierzchni na skutek wydajnej obróbki zgrubnej, lub wprowadzenia zbyt dużych naprężeń w warstwę wierzchnią części, można zastosować strategię obróbki elementów cienkościennych. Wydłuży to czas obróbki ze względu na dodatkowe przejścia narzędzia, ale może ostatecznie okazać się interesującą alternatywą.

4. WNIOSKI

Proponowane podejście przewidziane jest do wykorzystania podczas wariantowania różnych strategii obróbki zgrubnej. W założeniu ma pomóc w uwzględnianiu możliwości obrabiarki i narzędzia w konkretnych warunkach wytwarzania. Wysoki detal, cienkie ściany, zmiany grubości korpusu wymuszają modyfikację parametrów skrawania. Wzorec materiału w połączeniu z wzorcem technologicznym dla tych warunków zawężają pole poszukiwania optymalnych parametrów skrawania dla innego narzędzia, co na etapie symulacji off-line jest elementem bardzo istotnym.

Istnieją możliwości rejestracji mocy skrawania na obrabiarkę CNC (pomiar mocy na wrzecionie lub wyposażenie maszyny w dodatkowe czujniki), ale wymaga to ewentualnie dodatkowych nakładów finansowych i konieczności pozyskania tych danych z warsztatu.

DOBÓR PARAMETRÓW SKRAWANIA TEJ SAMEJ CZĘŚCI DLA RÓŻNYCH STRATEGII OBRÓBK

W proponowanym podejściu, przy pewnym doświadczeniu w analizie programu NC (i pomijalnym wpływie operatora i automatycznej redukcji posuwu), niezbędne wielkości można wyznaczyć w trybie off-line (analizy teoretycznej).

Automatyczne porównanie takiej samej strategii ruchu narzędzia ale różnych wariantów użytych parametrów a_p , a_e , n , v_c pokazuje znaczny rozrzut wyników symulacji. Widoczne są różnice w czasie obróbki rzędu 60% (np. rys. 3 – porównanie symulacji obróbki z optymalizacją posuwu głowicą o średnicy 40 mm i frezowania trochoidalnego frezem Sandvik Plura o średnicy 16 mm). Obciążenie narzędzia i obrabiarki powinno być w obu przypadkach na porównywalnym poziomie (dobór parametrów skrawania oparty był na zasadzie zastosowania wzorca materiału). Ta analiza porównawcza wydaje się więc bardziej dokładna, niż przykład przytoczony na rys. 1.

Wiele przypadków (rys. 3 i rys. 5) ma symulowany czas obróbki znacząco krótszy od czasu obróbki wzorcowej, dlatego najkorzystniejsze z nich przewidziane są do dalszych analiz (analiza kosztów, próby maszynowe).

Proponowane podejście nie uwzględnia zjawisk dynamicznych, takich jak wielkości przyspieszenia i zmian przyspieszenia („szarpnięć”). Warto jednak zauważyć, że kształt toru narzędzia jest tak projektowany w CAM, aby te negatywne zjawiska minimalizować.

Dobierając parametry skrawania trzeba brać pod uwagę ograniczenia prędkości skrawania, możliwość wystąpienia drgań (zmiana częstotliwości wymuszeń pochodzących od sił skrawania) oraz problem usuwania wiórów. Zróżnicowanie parametrów skrawania może mieć wpływ na trwałość narzędzia, na stabilność obróbki oraz jakość powierzchni obrobionej (naprężenia w materiale obrabianym po obróbce skrawaniem).

Prowadzone analizy pokazały łatwość pracy z wzorcami technologicznymi i wzorcami materiałów. Projekt w którym wykorzystuje się zaproponowaną metodę doboru parametrów obróbki jest w trakcie realizacji. Próby maszynowe przewidziane są do końca roku.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Zalewski A.: *Droga narzędzia podczas frezowania na obrabiarkach CNC*, Mechanik 4s. 4/2006
- [2] Sandvik: *Poradnik obróbki skrawaniem*, 2011
- [3] K. Jemielniak. : *Obróbka Skrawaniem*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 1998
- [4] Przybylski L. *Strategia doboru warunków obróbki współczesnymi narzędziami*, PK, 2000],
- [5] Zalewski A. *Obróbka trochoidalna na frezarkach CNC*, Mechanik 2s. 4/2007
- [6] Sandvik, *katalog narzędzi obrotowych. Frezowanie*, 2011