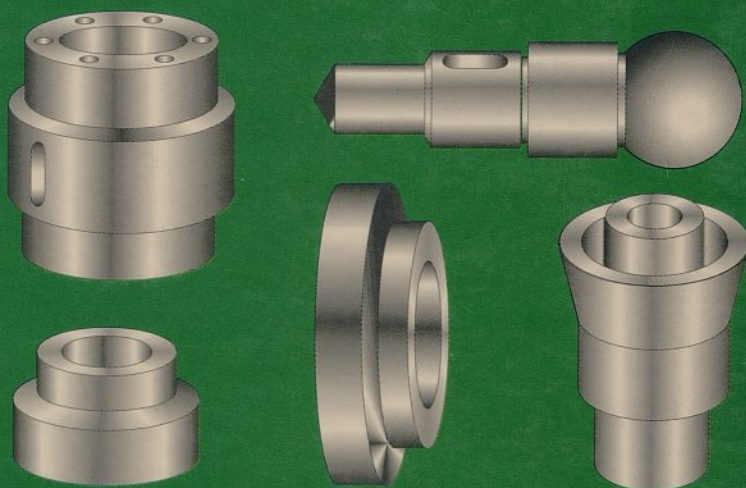


EFEKTYWNOŚĆ KSZTAŁTOWANIA SKRAWANIEM PRZEDMIOTÓW OSIOWOSYMETRYCZNYCH W ZINTEGROWANYM WYTWARZANIU

PIOTR CICHOSZ



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej

Piotr CICHOSZ

Effectiveness of the cutting-forming
of axially symmetric workpieces
in integrated manufacturing



Piotr Cichosz

**Efektywność
kształtowania skrawaniem
przedmiotów
osiowosymetrycznych
w zintegrowanym wytwarzaniu**



Recenzenci

Jan DARLEWSKI

Kazimierz WIECZOROWSKI

Redaktor naukowy

Bogusław DEMBIŃSKI

Opracowanie redakcyjne i korekta

Maria KOPEĆ

Biblioteka Główna i OINT
Politechniki Wrocławskiej



001799496

Projekt okładki

Piotr CICHOSZ



30 8247 L/1

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

ISSN 0867-5325

Nakład 150+55 egz. Ark. wyd. 16,5. Ark. druk. 12¹/₂. Papier offset. kl. III, 70 g, B1.
Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 342/98.

*efektywność skrawania,
zintegrowane wytwarzanie,
przedmioty osiowosymetryczne*

Piotr CICHOSZ*

EFEKTYWNOŚĆ KSZTAŁTOWANIA SKRAWANIEM PRZEDMIOTÓW OSIOWOSYMETRYCZNYCH W ZINTEGROWANYM WYTWARZANIU

Zanalizowano strukturę funkcji czasu i kosztów operacji obróbki skrawaniem przedmiotów osiowosymetrycznych dla różnych możliwości obróbkowych narzędzi i obrabiarek. Badania dotyczyły warunków współczesnych, a także tych, które będą mogły być zrealizowane dopiero w przyszłości. Pozwoliło to na określenie najsukuteczniejszych kierunków badań i poszukiwań możliwości zwiększania efektywności wytwarzania na tokarkach sterowanych numerycznie. Udowodniono, że funkcje czasu i kosztów operacji mogą mieć miejsca nieciągłości i nieoznaczoności. Zbadano charakter i wielkość tych nieciągłości, a także warunki, w których mogą one osiągać największe wartości, zakłócające przebieg funkcji celu. Opracowano funkcje celu, opisujące złożone warianty pracy narzędzi, a także uwzględniające specyficzny charakter wykonywania operacji w zintegrowanym wytwarzaniu. Wiele uwagi poświęcono narzędziom wielozadaniowym, których rola, w wytwarzaniu na obrabiarkach sterowanych numerycznie, jest coraz bardziej znacząca. Opracowano metodykę optymalizacji, pozwalającą na znacznie dokładniejsze wyznaczanie najkorzystniejszych warunków obróbki w porównaniu z dotychczasowymi metodami optymalizacyjnymi. Przeanalizowano przeszkody utrudniające zwiększanie efektywności obróbki przedmiotów osiowosymetrycznych.

* Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Wykaz ważniejszych oznaczeń

- a_p – głębokość skrawania, mm,
 a_s – przyspieszenie liniowe, m/s²,
 B_{ukw} – udział płytek, w których zostało wyeliminowanych, wskutek zużycia katastroficznego, n_{kw} krawędzi skrawających z całkowitej liczby płytek użytych do wykonania partii wyrobów, %,
- C_o – stała ze wzoru *Degenharda* na zużycie VB ,
 C_T – stała ze wzoru *Taylora*,
 d, D – średnica toczenia, mm,
 f – posuw, mm/obr,
 F_c – siła główna skrawania, N,
 K_{eo} – koszt eksploatacji obrabiarki (amortyzacja, remonty obrabiarki i jej wyposażenia, materiały pomocnicze, takie jak ciecz chłodząco-smarujące, smary, energia elektryczna, sprężone powietrze itp.), zł/h,
- K_j – koszt jednostkowy operacji, zł/szt,
 K_{Lm} – stawka godzinowa wynagrodzenia pracownika, zł/h,
 K_m – koszt pracy stanowiska roboczego (obrabiaarka, wyposażenie, hala, ogrzewanie, oświetlenie, remonty, amortyzacja itp.), zł/h,
- K_n – koszt narzędzia przeostrzalnego, zł,
 K_N – koszty narzędziowe odniesione do jednego okresu trwałości, zł,
 K_o – koszt oprawki narzędzia składanego, zł,
 K_{opNC} – koszty opracowania programu NC, zł,
 K_{opt} – koszty optymalizacji, zł,
 K_{opzl} – koszty opracowania zlecenia, zł,
 K_{os} – koszt przeostrzenia narzędzia, zł,
 K_p – koszt płytki wieloostrzowej, zł,
 K_{pb} – koszty prac biurowych związane z powtórzeniem zlecenia, zł,
 K_{pow} – koszty powtórzenia zlecenia, zł,
 K_{przyg} – koszty przygotowania zlecenia, zł,
 K_{pwpr} – koszty przygotowania zlecenia przypadające na wydział produkcyjny, zł,
 K_s – koszty użytkowania powierzchni zajmowanej przez stanowisko pracy (amortyzacja, remonty hali, oświetlenie, ogrzewanie, sprzątanie itp.), zł/h,
 K_{sz} – średni koszt operacji, z uwzględnieniem kosztów przygotowania i powtórzenia zlecenia, zł/szt,
- k_u – sumaryczny wskaźnik czasu uzupełniającego,
 K_{zl} – koszt złomu narzędzia, zł,
 L, l – długość drogi skrawania, mm,
 l_{op} – liczba jednocześnie obrabianych przedmiotów na jednej obrabiarence,
 l_p – liczba partii,
 L_{rd} – długość drogi ruchu jałowego, mm,
 l_{wr} – liczba wrzecion obrabiarki,
 n_{kp} – liczba krawędzi skrawających w płytce wieloostrzowej,
 n_{kw} – liczba krawędzi płytki wyeliminowana zużyciem katastroficznym,

n_n	– liczba narzędzi biorących udział w operacji,
n_{os}	– liczba możliwych przeostrzeń narzędzia,
n_{sz}	– liczba sztuk w partii wyrobów, szt.,
n_{szdn}	– liczba obrabianych przedmiotów, po której następuje diagnozowanie układu, szt.,
n_w	– liczba wymian ostrzy, na jaką przewidziana jest trwałość oprawki,
n_{wr}	– prędkość obrotowa wrzeciona, obr/min,
o	– liczba czynności pomocniczych wykonywanych podczas wytwarzania jednego przedmiotu,
O_s	– udział płytek przeostrzonych w całkowitej liczbie płytek użytych do wykonania zadania, %,
P_e	– moc efektywna na wrzecionie skrawania, kW,
P_s	– moc skrawania, kW,
$R_{()}$	– ograniczenia obszaru dopuszczalnych rozwiązań,
t	– czas skrawania, min,
t_{dn}	– czas diagnozowania, min,
t'_{dn}	– czas diagnozowania pokryty innymi czasami, min,
t_g	– czas główny, min,
t'_g	– czas główny pokryty innymi czasami, min,
t_{ok}	– czas określania korekcji, min,
t'_{ok}	– czas określania korekcji pokryty innymi czasami, min,
t_p	– czas pomocniczy, min,
t'_p	– czas pomocniczy pokryty innymi czasami, min,
t_{pNC}	– czas czynności pomocniczych wykonywanych automatycznie przez obrabiarkę, min,
t'_{pNC}	– czas czynności pomocniczych wykonywanych automatycznie przez obrabiarkę, pokryty innymi czasami, min,
t_{rd}	– czas ruchów dosuwowych, min,
t'_{rd}	– czas ruchów dosuwowych pokryty innymi czasami, min,
t_{wk}	– czas wprowadzania korekcji, min,
t'_{wk}	– czas wprowadzania korekcji pokryty innymi czasami, min,
t_{zn}	– czas zmiany stępionego narzędzia, min,
t'_{zn}	– czas zmiany stępionego narzędzia pokryty innymi czasami, min,
T_c	– trwałość ostrza narzędzia, min,
t_{ck}	– czas trwania cyklu, min,
T_{cR}	– trwałość resztkowa ostrza narzędzia, min.,
t_{ham}	– czas hamowania wrzeciona obrabiarki oraz suportów podczas wykonywania ruchów roboczych i szybkich, min lub s,
t_j	– czas jednostkowy operacji, min/szt.,
t_{moc}	– czas mocowania, zaciśnięcia szczęk, dosunięcia konika, jeśli jest on wywoływany z programu i wykonywany automatycznie, s,
t_{obg}	– czas zmiany pozycji głowicy narzędziowej, min lub s,
t_{poz}	– czas pozycjonowania głowicy narzędziowej, s,
t_{pz}	– czas przygotowawczo-zakończeniowy, min,

t_{roz}	– czas rozpędzania wrzeciona obrabiarki oraz suportów podczas wykonywania ruchów roboczych i szybkich, min lub s,
t_s	– całkowity czas skrawania, min,
t_{sz}	– czas wykonania operacji w partii wyrobów z uwzględnieniem czasów t_{pz} , min/szt.,
t_u	– czas uzupełniający, min,
t_{wczyt}	– czas wczytania i realizacji bloku, min,
t_{zm}	– czas zmiany prędkości obrotowej wrzeciona, min lub s,
V	– objętość materiału do zeskrwania, mm^3 ,
$VB_{(j)}$	– wskaźnik zużycia na powierzchni przyłożenia, mm,
VB_{zm}	– wskaźnik zużycia zmodyfikowanego na powierzchni przyłożenia, mm,
VB_{zmc}	– zużycie zmodyfikowane całkowite, mm,
v_c	– prędkość skrawania, m/min,
v_f	– prędkość posuwu, m/min,
ε_{ok}	– liczba określeń korekcji na obrabiarce podczas jednego okresu trwałości narzędzia,
ε_{wk}	– liczba wprowadzeń korekcji do układu sterowania obrabiarki podczas jednego okresu trwałości narzędzia,
λ_b	– współczynnik uwzględniający wzrost kosztów wytwarzania spowodowany powstawaniem braków,
λ_{kwb}	– współczynnik narzutów kosztów prac biurowych,
λ_{kwpr}	– współczynnik narzutów kosztów wydziału produkcyjnego,
λ_l	– współczynnik, który uwzględnia to, że skutek istnienia dobiegu i wybiegu narzędzia z materiału czas maszynowy obróbki nie pokrywa się z czasem rzeczywistym skrawania,
λ_{l_1}	– współczynnik uwzględniający zmniejszenie udziału kosztów wynagrodzenia pracownika w kosztach operacji w wyniku obsługi wielostanowiskowej,
λ_o	– współczynnik uwzględniający koszty napraw i konserwacji oprawki nożowej,
λ_{pwpr}	– współczynnik narzutów kosztów prac biurowych,
λ_T	– współczynnik niepełnego wykorzystania okresu trwałości narzędzia,
$\lambda_{v/B}$	– współczynnik uwzględniający wpływ przebiegu zużywania się ostrza na jego okres trwałości,
λ_{ws}	– współczynnik uwzględniający zmniejszenie wydajności w wyniku obsługi wielostanowiskowej,
λ_z	– współczynnik uwzględniający przerwy w pracy obrabiarki spowodowane zakłóceniami w procesie wytwarzania.

Indeksy

i	– i -te narzędzie,
j	– j -te przejście narzędzia.

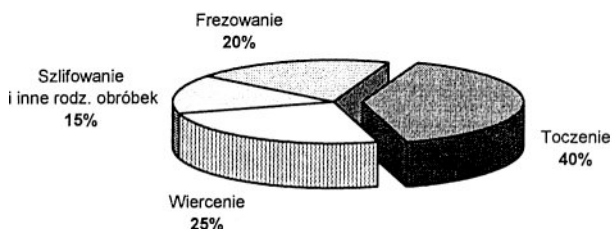
1. WPROWADZENIE

Wymagania rynku i ciągle rosnąca konkurencyjność sprawiają, że istnieje potrzeba szybkiego wdrażania nowych wyrobów dostosowanych do oczekiwań klientów. Intensywnie zwiększa się różnorodność produktów, skraca się natomiast czas ich moralnego starzenia się. Wszystko to sprawia, że nie tylko projektowanie wyrobu, ale także jego wytwarzanie, musi odbywać się w coraz krótszym czasie, co wymaga silnego wspomaganie komputerowego. Do takiego wytwarzania bardzo dobrze nadają się obrabiarki sterowane numerycznie (OSN), a ich rola i znaczenie są coraz większe. Dynamicznie rozszerzają się zarówno możliwości obróbkowe, jak i asortyment oferowanych obrabiarek tego typu. Łatwość automatyzacji prac na OSN-ach sprzyja bezobsługowemu całodobowemu wytwarzaniu, prowadzonemu także w dni wolne od pracy. Umożliwia to zwiększanie efektywności wytwarzania. Niezastąpiona jest także rola obrabiarek NC podczas elastycznego wytwarzania, które wymaga szybkiego przestawiania produkcji na różne wyroby.

Obróbka skrawaniem jest najbardziej rozpowszechnionym, spośród technik wytwarzania, sposobem kształtowania przedmiotów. Pochłania też największe nakłady finansowe. Dlatego istotne jest stosowanie, wszędzie tam gdzie to możliwe, optymalnych parametrów skrawania nie tylko lokalnie na wybranym stanowisku, ale przede wszystkim globalnie, w skali całego przedsiębiorstwa. Może to przynieść bardzo duże oszczędności.

Operacje obróbki przedmiotów osiowosymetrycznych należą do najczęściej występujących i stanowią około 40–50% wszystkich operacji obróbki skrawaniem [84, 265]. Również tokarki są w przemyśle najliczniej reprezentowaną grupą obrabiarek zarówno pod względem ich różnorodności, jak i liczebności występowania.

W obróbce skrawaniem udział poszczególnych procesów jest następujący (rys. 1.1):



Rys. 1.1. Udział toczenia w obróbce skrawaniem [265]

Fig. 1.1. Percentage of turning in all machining operations [265]

Na tokarkach NC, oprócz toczenia, wykonuje się także w mniejszym zakresie również inne rodzaje obróbek, takie jak wiercenie, frezowanie, a nawet szlifowanie. Także i to sprawia, że tokarki stanowią zdecydowanie najliczniejszą grupę wśród obrabiarek.

Efektywność wytwarzania, nawet zawężona do obróbki przedmiotów osiowosymetrycznych, jest pojęciem bardzo szerokim. Niniejsza praca dotyczy badań analitycznych skrawania. Jedynie tam, gdzie jest to konieczne i niezbędne, odnosi się do organizacji produkcji, a także do tych cech konstrukcyjnych i użytkowych obrabiarek, które mają związek z wydajnością i kosztami wytwarzania.

Barierami w zwiększaniu efektywności wytwarzania, w tym także wytwarzania na obrabiarkach sterowanych numerycznie, może być organizacja pracy i czynniki związane z motywacją w podejmowaniu odpowiednich decyzji. Może tak się stać, jeśli np. technolog zada sobie trud, żeby przeprowadzić procedury optymalizacyjne operacji, w wyniku których obniżone zostaną ogólne koszty wytwarzania lub zwiększona zostanie wydajność obróbki i skończy się to dla niego jedynie własną satysfakcją. Obarczać się go będzie natomiast odpowiedzialnością np. za spowodowane tym częściowe zwiększenie kosztów narzędziowych, wynikłe z częstszych wymian ostrzy podczas intensywniejszej eksploatacji narzędzi, które jednak nie oddziałuje zasadniczo na całkowite koszty wytwarzania. Może to być antymotywacyjne nie tylko dla szukania możliwości zwiększania efektywności wytwarzania, ale także stwarza przeszkody w stosowaniu procedur pozwalających wybierać efektywniejsze warianty technologii wytwarzania. Niestety taki stan dominuje jeszcze w wielu zakładach w Polsce. Dlatego ważne jest uwzględnianie możliwie szerokiego oddziaływania różnych czynników, żeby rodziło się jak najmniej wątpliwości, które mogłyby posłużyć za argumenty przeciwko zmianom warunków pracy i organizacji produkcji, a także stosowaniu procedur optymalizacyjnych. Te właśnie względy były przyczynkiem do opracowania odpowiednio reprezentatywnych funkcji czasu i kosztów wytwarzania.

Podstawowe zagadnienia, których dotyczy praca, koncentrują się na takich tematach, jak:

- ☐ Podjęcie próby stworzenia matematycznego opisu operacji wykonywanych na tokarkach sterowanych numerycznie, który obejmowałby różne rodzaje obrabiarek i charakterów pracy narzędzi, a także uwzględniał wiele czynników oddziałujących na czas i koszty wytwarzania.
- ☐ Wyjaśnienie przyczyn powstawania nieciągłości funkcji celu wywołanych uprzedzającą wymianą nie w pełni stępionych narzędzi, a także niemożnością lub nieopłacalnością wykorzystywania trwałości resztkowych, jakie pozostają narzędziom po wykonaniu ostatniego przedmiotu w partii wyrobów.
- ☐ Uwzględnienie w funkcjach czasu i kosztów operacji zakłóceń ciągłości funkcji,
- ☐ Opracowanie funkcji celu opisujących pracę narzędzi wielozadaniowych.
- ☐ Zaproponowanie metodyk optymalizacyjnych parametrów skrawania dla narzędzi klasycznych i wielozadaniowych oraz różnych wariantów ich użytkowania na OSN-ach, z możliwością uwzględniania wielu warunków i ograniczeń nieliniowych.
- ☐ Ocena przydatności obróbki z dużymi prędkościami skrawania w odniesieniu do toczenia, z uwzględnieniem takich zagadnień, jak właściwości dynamiczne napędów głównych i suportów.

- ❑ Analiza struktury funkcji czasu i kosztów operacji, uwzględniająca różne możliwości obróbkowe narzędzi i obrabiarek, które mogą być realizowane współcześnie, a także dla hipotetycznie przyjętych warunków, które będą mogły być zrealizowane w przyszłości.
- ❑ Próba określenia kierunków możliwie najskuteczniejszych oddziaływań, pozwalających zwiększać efektywność wytwarzania przedmiotów osiowosymetrycznych na tokarkach sterowanych numerycznie.

Uważa się, że w ponad 70% koszt wyrobu jest zdeterminowany już w fazie jego projektowania [186]. Do najważniejszych czynników należy zatem technologiczność konstrukcji wyrobu. Pozostałe 30% jego kosztów zależy od organizacji pracy, możliwości wytwórczych środków produkcji, a także od właściwie dobranych, najlepiej optymalnie, warunków obróbki. Wynika stąd konieczność dysponowania odpowiednio dokładnymi funkcjami celu, które pozwolą na szybką analizę różnych wariantów operacji technologicznych. Może to bowiem przyczynić się do zmniejszania kosztów wytwarzania, a tym samym do obniżenia ceny wyrobu lub zwiększenia zysków przedsiębiorstwa.

W pracy dokonano syntezy i znacznego rozszerzenia modeli matematycznych operacji wykonywanych na tokarkach sterowanych numerycznie. Metody te stały się przez to bardziej ogólne oraz lepiej opisujące rzeczywiste warunki i możliwe warianty pracy obrabiarek i narzędzi.

Funkcje celu, obejmujące wiele składników, mogą być także źródłem ważkich, ekonomicznie uzasadnionych argumentów podczas podejmowania decyzji o rozbudowie i doposażeniu stanowiska w układy zabezpieczające, nadzorujące i automatyzujące pracę, a także podczas zakupu nowych obrabiarek.

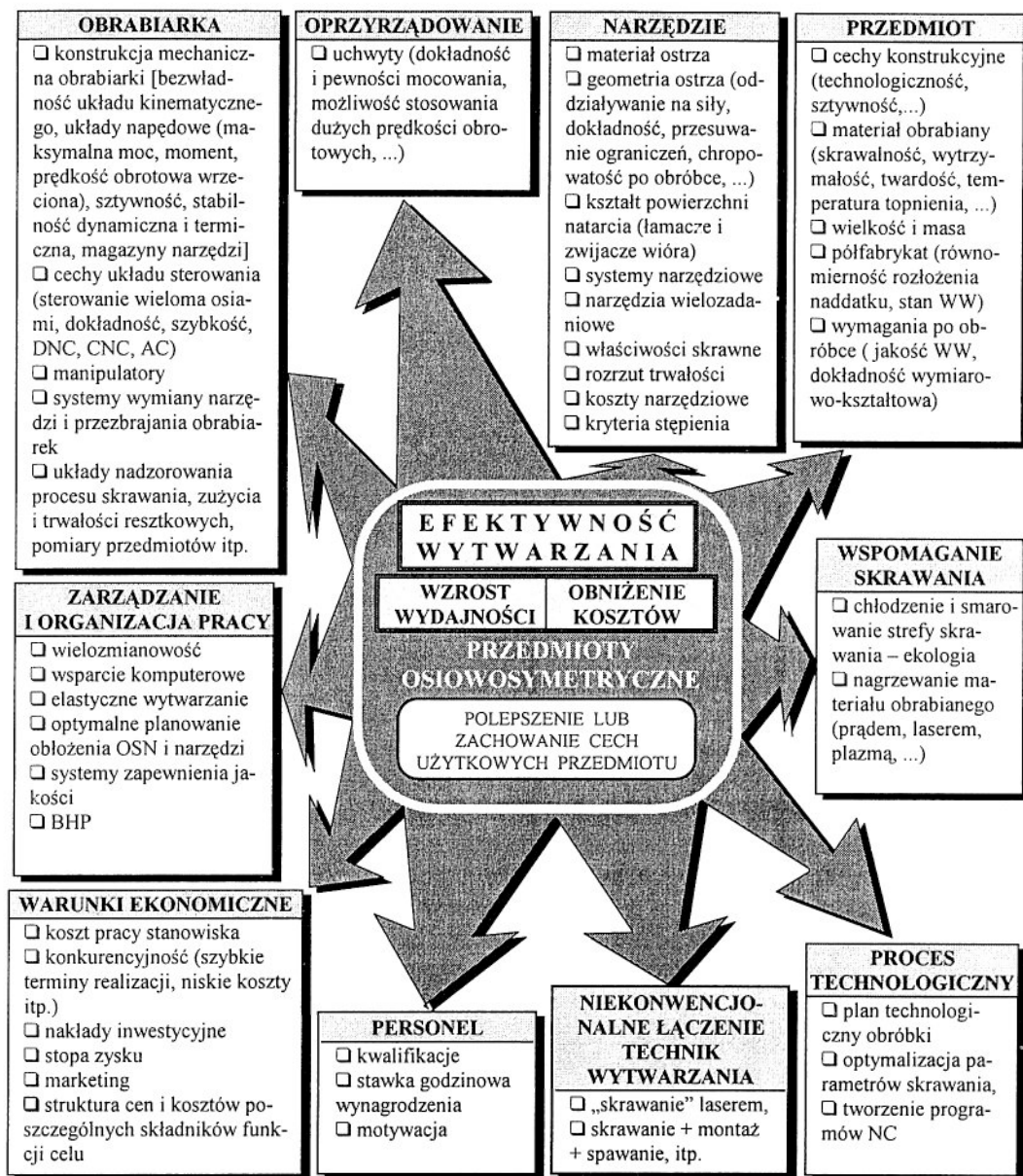
STAN ZAGADNIENIA

Od zarania dziejów obróbki skrawaniem po dzień dzisiejszy trwają usilne starania o zwiększanie jej efektywności. Działania te należy rozumieć jako dążenie do wzrostu wydajności skrawania i obniżenia kosztów obróbki, z polepszeniem bądź zachowaniem tych samych cech użytkowych obrobionych przedmiotów.

Merchant [186] uważa, że najistotniejszymi czynnikami, wpływającymi na wytwarzanie w XXI wieku, będzie: zanikanie doświadczalno-praktycznego podejścia do procesów produkcyjnych na rzecz zwiększenia podejścia naukowo-inżynierskiego, zwolnienie człowieka od rutynowych zajęć i wprowadzenie elastycznej automatyzacji, zmniejszenie zapotrzebowania na produkcję masową na rzecz wytwarzania w krótszych seriach wyrobów o większym stopniu zróżnicowania, zmniejszenie liczby operacji do minimum, optymalizację nie tylko poszczególnych operacji, ale całych procesów technologicznych, zwrócenie większej uwagi na technologiczność konstruowanych wyrobów, wyzwolenie potencjału tkwiącego w organizacji wytwarzania, powstaniu nowych metodologii alternatywnego wytwarzania wykorzystującego sztuczną inteligencję, systemowe podejście do wytwarzania zorientowane na człowieka i jego pracę w zespole.

Efektywność obróbki zależy od wielu czynników. Można je pogrupować i przyporządkować do takich elementów systemu wytwarzania, jak: obrabiarka, narzędzie, oprzyrządowanie, przedmiot obrabiany, organizacja pracy, uwarunkowania ekonomiczne, proces technologiczny, personel, ekologia itp. Bardziej szczegółowe zestawienie tych czynników oraz ich relacje z efektywnością wytwarzania na tokarkach sterowanych numerycznie przedstawiono na rys. 2.1. W obszarze tych wzajemnych związków, a nawet w odniesieniu do pojedynczych relacji, powstało wiele prac konstrukcyjnych i badawczych zarówno o charakterze czysto utylitarnym, jak i naukowym.

Bodaj największy wpływ na koszty i wydajność skrawania ma **obrabiarka**. Historia obrabiarek sterowanych numerycznie zaczyna się w roku 1952, kiedy firma Cincinnati wraz z MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) uruchomiła w USA pierwszą na świecie frezarkę OSN [215]. Po raz pierwszy frezarki NC zastosowano przemysłowo w zakładach U.S. Air Force w roku 1957 [131]. Dalszy znaczący postęp w rozwoju OSN-ów nastąpił na początku lat sześćdziesiątych (1964) wraz z wynalezieniem półprzewodników. Początkowo obrabiarki ze sterowaniem NC (*Numerical Control*) pracowały na tej zasadzie, że do interpolacji stosowano jednostki liczące, a bloki funkcyjne łączono w sposób stały za pomocą bardzo rozbudowanych magistrali w postaci łączy kablowych. Zwiększało to znacznie koszty układów sterowania. Stanowiły one wówczas niekiedy do 30–50% ceny całej obrabiarki.



Rys. 2.1. Wybrane czynniki oddziałujące na efektywność wytwarzania na tokarkach sterowanych numerycznie
Fig. 2.1. Factors influencing the manufacturing efficiency for NC lathes

W roku 1969 wprowadzono w USA sterowanie DNC (*Direct Numerical Control*). Przez pojęcie to rozumie się taki tryb pracy, w którym wiele obrabiarek (dawniej NC, a obecnie CNC) oraz inne maszyny i urządzenia wytwórcze, takie jak np. urządzenie do

ustawiania i mierzenia narzędzi, maszyny pomiarowe, roboty, manipulatory, urządzenia transportowe, są przyłączone do komputera nadrzędnego, który steruje całym systemem (gniazdem) wytwórczym. Dzięki bezpośredniej na drodze elektronicznej transmisji danych nie ma potrzeby stosowania takich nośników danych, jak taśmy perforowane, magnetyczne, dyskietki, a tym samym wymaganych dla nich urządzeń do ich zapisu i odczytu.

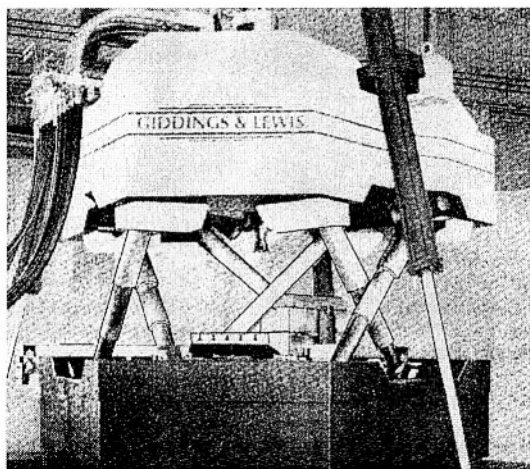
Zasadniczą cechą systemów DNC jest zarządzanie i rozdział, w odpowiednim czasie, informacji sterujących do wielu obrabiarek NC, przy czym funkcje układu sterowania numerycznego mogą być co prawda nadzorowane przez komputer, ale obecnie prawie wyłącznie wykonują je układy CNC obrabiarek.

Około 1972 roku zastosowano w sterowaniu komputery, tworząc nową generację układów sterowań CNC (*Computer Numerical Control*), co znacznie zmniejszyło koszty sterowań i zwiększyło jednocześnie ich możliwości.

Ponieważ obrabiarek z układami sterowania NC już się nie produkuje, więc zaczyna przyjmować się pogląd [151, 253], że nie jest uzasadnione używanie nazwy komputerowe sterowanie numeryczne i skrótu CNC, skoro wszystkie współczesne układy NC są CNC.

Kilkanaście lat temu pojawiło się wiele rozwiązań układów sterowań, służących do wewnętrznej optymalizacji parametrów skrawania AC (*Adaptive Control*). Około roku 1972 powstały wszystkie znane dla toczenia zasady i strategie sterowania adaptacyjnego dotyczące układów nadzorujących, optymalizujących, granicznych ACC (*Adaptive Control Constraints*) i ekstremalnych ACO (*Adaptive Control Optimization*), a także korekcyjnych, geometrycznych ACG [88, 108, 146, 201, 215, 221, 262]. Układy sterowania ACO nie wyszły nigdy poza stadium badań laboratoryjnych, a inne układy sterowania adaptacyjnego nie są już dzisiaj stosowane w obrabiarkach skrawających [215, 253]. Przyczyny takiego stanu omówiono w rozdz. 8.

Zaledwie przed kilku laty powstały obrabiarki określane jako „sześcionogi” (rys. 2.2). Ta nowa generacja obrabiarek, o całkowicie odmiennej konstrukcji od dotychczasowych rozwiązań, powstała w USA w firmie Giddings & Lewis [119, 194]. Pierwszą frezarkę tego typu zaprezentowano po raz pierwszy na wystawie IMTS '94. Zasada jej działania jest podobna do działania symulatorów lotniczych. Wrzeciennik z tradycyjnym układem napędu wrze-



Rys. 2.2. Obrabiarka typu sześcionóg (frezarka VARIAX)

Fig. 2.2. Hexapod-type machine-tool
(VARIAX milling machine)

ciona jest wsparty za pomocą sześciu teleskopowych nóg na płycie spełniającej rolę łoża i zarazem stołu. Komputer obrabiarki steruje, za pomocą serwonapędów, długością nóg w ten sposób, aby zrealizować odpowiednie przemieszczenia wrzeciennika względem

stołu. Wymaga to dość złożonego oprogramowania i szybkiego komputera, aby w czasie rzeczywistym realizować jednocześnie sterowanie w 8 osiach (6 nóg + 1 obrót wrzeciona wokół własnej osi + 1 skręt wrzeciona o kąt 90°). Wymaganą dokładność ruchów i pozycjonowania około $10\text{ }\mu\text{m}$ zapewniają laserowe układy pomiarowe drogi.

Obrabiarki typu sześcionogi mają 5–10 razy szybsze ruchy posuwowe niż obrabiarki tradycyjne i są od nich około 5-krotnie sztywniejsze. Kształtowanie zarysów może być realizowane z prędkością dochodzącą do 66 m/min , a pozycjonowanie może odbywać się w dowolnym kierunku. Ze względu na liczne zalety tej nowej generacji obrabiarek jest spodziewany ich dynamiczny rozwój w najbliższych latach [90, 119, 194].

Oprócz prac nad szybkim rozwojem układów sterowań, trwają także prace nad zwiększaniem: właściwości dynamicznych napędów głównych i posuwów, dokładności obróbki, stabilności pracy, stopnia automatyzacji, zakresów wielkości podlegających nadzorowi. Zwiększające się możliwości obliczeniowe komputerów i oprogramowań obsługujących obrabiarkę doprowadziły do tego, że współczesne tokarki sterowane numerycznie dysponują możliwościami takimi, jak [131, 151, 253, 255, 275, 289, 295]:

- od 2 do 7 sterowanych NC osi, a dla tokarek wielowrzecionowych do 30 osi
- 2×2 lub 3×2 niezależnie od siebie interpolowane osie dla obrabiarek wielosupportowych
- wrzeciono sterowane NC jako oś C
- dodatkowo sterowane NC osie dla robotów obsługujących obrabiarkę
- możliwość zachowania stałej prędkości skrawania, dostosowującej się automatycznie do zmieniającej się średnicy toczenia
- kompensacje przesunięcia zależne od średnicy narzędzia i promienia naroża ostrza
- kompensacyjne przesunięcia uwzględniające średnicę freza oraz długość narzędzi dla narzędzi napędzanych
- możliwe dowolne kolejne przyporządkowanie kilku wartości korekcji do jednego narzędzia
- możliwe jednoczesne przyporządkowywanie wielu wartości korekcyjnych do jednego narzędzia, np. promienia zaokrąglenia naroża i zużycia narzędzia
- możliwość automatycznego wczytywania korekcji do układów sterowania z nośników informacji umieszczonych na narzędziu lub z bazy danych
- możliwość przerywania skrawania i „odskoku” od obrabianego przedmiotu, a następnie ręcznego lub automatycznego powrotu do toru przerwane ruchu
- nadzorowanie pracy narzędzia i kontrola jego katastroficznego zużycia
- automatyczne sprzężenie zwrotne, od danych pomiarowych do wartości korekcyjnych
- możliwość nacinania gwintów, także wielokrotnych i ze zmiennym skokiem
- możliwość wizualizacji symulacji obróbki na ekranie monitora
- badanie możliwości wystąpienia kolizji
- pomocnicze osie NC, których działanie może trwać dłużej lub krócej niż czas działania bloku
- korekcja błędów systematycznych skoku śruby lub układu pomiarowego

- „forsowanie dynamiczne”, umożliwiające korekcję uchybu związanego z prędkością ruchu po torach krzywoliniowych
- „struktura kanałowa”, umożliwiająca jednoczesną realizację kilku niezależnych interpolacji
- możliwość integracji innych technik wytwarzania w obrębie jednej obrabiarki wyposażonej w odpowiednie do tego celu oprzyrządowanie, np. montażu, w tym spajania części itp.

Te bardzo duże możliwości układów sterowań numerycznych tokarek, w połączeniu z wielością ich rozwiązań konstrukcyjnych, odnoszących się do takich zagadnień, jak zwielokrotnienie liczby wrzecion i suportów, możliwości stosowania narzędzi napędzanych, magazynów narzędziowych, automatyzacji zasilania obrabiarki w przedmioty i narzędzia, możliwości stosowania w szerokim zakresie kontroli oraz nadzoru obrabiarki i procesu skrawania, zaowocowały powstaniem obrabiarek określanych jako centra tokarskie i autonomiczne stacje obróbkowe [20, 30, 61, 95, 118, 153, 206, 255, 287, 296].

Koch, omawiając w pracy [135] tendencje rozwojowe obrabiarek, zwraca uwagę na ważną rolę niskiej ceny obrabiarki, która w dobie dużej konkurencji światowej jest decydującym kryterium jej sprzedawalności. Autor zwraca uwagę także na takie żądania stawiane współczesnym obrabiarkom, jak ich duża elastyczność, rozumiana jako zdolność łatwego dostosowywania się do różnych, często zmieniających się zadań obróbkowych. Elastyczność tę można osiągnąć dzięki modułowej budowie obrabiarek. Na aspekt ten wskazuje się także w pracach [93, 229].

Kolejnym ważnym czynnikiem, oddziałującym na efektywność wytwarzania, jest **narzędzie**, a w głównej mierze jego właściwości skrawne oraz cena. W danych warunkach obróbki materiał ostrza decyduje o jego odporności na zużycie i, w konsekwencji, o trwałości narzędzia. Materiały narzędziowe są ustawicznie doskonalone [2, 3, 23, 64, 66, 290, 303]. Ciągłe podstawowym materiałem na ostrza są **węglik spiekany**. Powstają kolejne ich generacje, o coraz drobniejszym ziarnie i korzystniejszych właściwościach użytkowych. Ich wytrzymałość na zginanie dorównuje już niejednokrotnie wytrzymałości stali szybko tnącej [36, 66]. Coraz popularniejsze stają się **cermety**, które przewyższają swoimi właściwościami węgliki spiekane w warunkach obróbki wykańczającej [192]. Rozwija się także bardzo dynamicznie grupa materiałów ceramicznych. Pierwotnie stosowano czystą ceramikę korundową Al_2O_3 bez żadnych dodatków. Mimo znacznej wytrzymałości na temperaturę i zużycie odznaczała się ona małą odpornością na szoki mechaniczne, termiczne oraz wyszczerbienia krawędzi. Zaczęto dodawać do jej składu dwutlenek cyrkonu ZrO_2 i wiskery SiC, które w znacznym stopniu ograniczyły wymienione wady [69]. Pojawiła się także ceramika na bazie **azotku krzemu** Si_3N_4 , **ceramika mieszana** z dodatkami węglików, a także **ceramika sialonowa** [15, 62, 144, 148, 290]. Do dyspozycji technologów są także super-twarde materiały narzędziowe, takie jak polikrystaliczny diament PKD i azotek boru PCBN.

Aby zwiększyć odporność ostrzy na zużycie powleka się je specjalnymi **powłokami**. Bywa, że liczba warstw w tych powłokach może dochodzić do kilkunastu. W ostatnich latach zaczęto stosować na pokrycia ostrzy narzędzi także diament syntetyczny [36, 62, 101].

Znaczny postęp w dziedzinie inżynierii materiałowej w odniesieniu do narzędzi sprawia, że zakresy stosowanych prędkości skrawania ciągle się zwiększają, a charakter tych

zmian jest z roku na rok coraz bardziej progresywny [290]. Pozwala to na intensyfikowanie wydajności, a także umożliwia obniżenie kosztów skrawania. Zalecenia odnośnie do doboru warunków skrawania są ustawicznie zmieniane.

Właściwości skrawne narzędzi są bodaj najczęściej poruszonym w literaturze zagadnieniem z dziedziny obróbki skrawaniem. Wiele prac dotyczy problematyki **zużycia i trwałości ostrzy** [22, 101, 140, 141, 264, 294], w tym prace własne autora [37, 39, 53, 167, 168, 169, 170, 173, 302].

Dużą część prac poświęcono modelom **matematycznym trwałości narzędzi**. Od czasu, kiedy *Taylor* sformułował w 1907 roku postać potęgową wzoru okresowej prędkości skrawania, powstało co najmniej kilkadziesiąt innych modeli określających tę zależność [58, 59, 101, 143, 155]. Jednak najpowszechniej stosowaną formułą jest rozszerzona postać podanego przez niego wzoru (2.2).

Przewidywanie zużywania się narzędzia w funkcji czasu, bądź też wyznaczanie jego trwałości, jest zjawiskiem złożonym nawet wówczas, gdy zakłada się stałe parametry skrawania w całym okresie jego pracy. W obróbce skrawaniem występują bardzo liczne przypadkowe zakłócenia [28, 29, 35, 44, 48, 50, 56, 101, 121, 137], które powodują, że trwałość ostrza jest zmienną losową. Rozrzuty trwałości opisywane bywają wieloma rozkładami statystycznymi, poczynając od rozkładu wykładniczego, gamma, normalnego, logarytm-normalnego, aż po najbardziej uniwersalny i jednocześnie złożony rozkład *Weibulla* [35, 83, 121, 281]. Ta duża różnorodność rozkładów statystycznych, stosowanych do opisu rozrzutów trwałości narzędzi, świadczy o tym, że samo zużywanie się ostrza i związana z nim trwałość są procesami stochastycznymi o trudnych do przewidzenia parametrach. Współczynniki zmienności $V(T_c) = S(T_c)/T_{c(sr)}$, wyrażające stosunek średniego odchylenia standardowego do trwałości średniej, mogą osiągać w skrajnych przypadkach wartości większe od jedności [121].

Przewidywanie zatem trwałości narzędzi jest bardzo trudne i może być obwarowane dużymi przedziałami ufności. Znaczne rozrzuty trwałości narzędzi powodują również zaskakująco małe okresy niezawodnej pracy narzędzia, wyznaczane dla dużych wartości współczynników prawdopodobieństwa [116].

Wpływ warunków z poprzednich etapów pracy, a dokładniej, wywołanych nimi kształtów śladów starć ostrzy, na zużycie w następnych, kolejnych okresach pracy narzędzia, komplikuje się jeszcze bardziej, gdy narzędzia te skrawają ze zmiennymi parametrami, co udowodniono w pracach *Kawalca* [126] *Szafarczyka* i *Jemielniaka* [114, 115].

Zużyciem narzędzia i prognozowaniem go w warunkach zmiennych parametrów skrawania zajmowało się wielu autorów [53, 68, 107, 168, 173, 291]. Na podstawie tych badań, a także prac własnych, można stwierdzić, że nie zachodzi prosta przemienność sumowania się zużyć ostrza wyznaczanych analitycznie

$$\begin{aligned} & \Delta VB(v_{c1}, f_1, a_{p1}) + \Delta VB(v_{c2}, f_2, a_{p2}) + \dots + \Delta VB(v_{cn}, f_n, a_{pn}) \\ & \neq \Delta VB(v_{cn}, f_n, a_{pn}) + \dots + \Delta VB(v_{c2}, f_2, a_{p2}) + \Delta VB(v_{c1}, f_1, a_{p1}). \end{aligned} \quad (2.1)$$

Na intensywność zużywania się ostrza wpływają także zmiany średnicy toczenia, zwłaszcza gdy skrawa się ostrzami ceramicznymi [53, 168, 173, 189]. Dlatego też precy-

zyjne określanie trwałości ostrza w funkcji parametrów skrawania, przy obecnym stanie wiedzy i bez długotrwałych badań statystycznych, jest bardzo trudne. Jednak potrzeba rozwiązania tego problemu skłoniła wielu badaczy do szukania rozwiązań nawet za cenę pewnych uproszczeń i niedokładności.

Najbardziej godna uwagi jest metoda pokonania tych trudności, zaproponowana przez *Jacobsa* [107]. Punktem wyjścia w niej jest rozszerzony wzór *Taylora*, określający okres trwałości ostrza, o postaci

$$T_c = \frac{C_T}{v_c^s f^{u_T} a_p^{e_T}} \quad (2.2)$$

oraz formuła *Degenharda* [67, 68] pozwalająca na przedstawienie zużycia ostrza w funkcji parametrów skrawania i czasu

$$VB = C_o v_c^b f^c a_p^d t^e. \quad (2.3)$$

Jeżeli do wzoru (2.3) wstawi się wartość zużycia dopuszczalnego VB_{dop} , to można go w prosty sposób przekształcić we wzór *Taylora*

$$T_c = \left(\frac{VB_{dop}}{C_o} \right)^{1/e} v_c^{-b/e} f^{-c/e} a_p^{-d/e} = \frac{C_T}{v_c^s f^{u_T} a_p^{e_T}}, \quad (2.4)$$

a ten z kolei przetransformować do postaci, jaką ma wzór (2.3), który definiuje teraz tzw. zużycie zmodyfikowane VB_{zm}

$$VB_{zm} = \left(\frac{VB}{C_o} \right)^{1/e} = v_c^{b/e} f^{c/e} a_p^{d/e} t = v_c^s f^{u_T} a_p^{e_T} t. \quad (2.5)$$

Porównując równania (2.4) i (2.5) można zauważyć, że dopuszczalne zużycie zmodyfikowane $VB_{zm(dop)}$ równe jest stałej ze wzoru *Taylora*

$$VB_{zm(dop)} = \left(\frac{VB_{dop}}{C_o} \right)^{1/e} = C_T. \quad (2.6)$$

Interesującą właściwością zużycia zmodyfikowanego, definiowanego wzorem (2.5), jest jego liniowa zależność od czasu skrawania t . Umożliwia to proste sumowanie poszczególnych zużyć cząstkowych i zastąpienie ich sumarycznym zużyciem VB_{zmc}

$$VB_{zmc} = \sum_{j=1}^m v_{c(j)}^s f_{(j)}^{u_T} a_{p(j)}^{e_T} t_{(j)}. \quad (2.7)$$

Ponieważ

$$\frac{C_T}{T_c} = \frac{VB_{zmc}}{t_s}, \quad (2.8)$$

więc trwałość ostrza w warunkach zmiennych parametrów skrawania można obliczyć z zależności

$$T_c = \frac{C_T t_s}{\sum_{j=1}^m v_{c(j)}^s f_{(j)}^{u_r} a_{p(j)}^{e_r} t_{(j)}}, \quad (2.9)$$

gdzie

$$t_j = \frac{L_{(j)}}{f_{(j)} n_{wr(j)}}, \quad t_s = \sum_{j=1}^m t_{(j)}. \quad (2.10)$$

Ten sposób określania trwałości ostrza, pracującego ze zmiennymi parametrami skrawania, został z powodzeniem wykorzystany w pracach [88, 156, 258, 291], jednakże przy milczącym założeniu braku oddziaływań na siebie zużyć cząstkowych, wywołanych zmiennymi parametrami skrawania.

W czasie prac nad zwiększaniem prędkości skrawania pojawiły się określenia **HSM** (*ang. High Speed Machining*) **obróbka z dużymi prędkościami skrawania** i **HSC** (*ang. High Speed Cutting*) **skrawanie z dużymi prędkościami**. Oznaczają one obróbkę lub skrawanie z prędkościami o rząd lub więcej większymi od dotychczas stosowanych [139]. Zdecydowana większość prac badawczych i wdrożeń z tej tematyki dotyczy jednak frezowania, które jest znacznie łatwiej zrealizować niż toczenie [124, 125, 160, 180, 232, 263].

Schulz i Moriwaki [231] zwracają uwagę na takie aspekty stosowania HSM, jak: możliwość zdecydowanego zwiększenia wydajności i dokładności obróbki, polepszenie jakości warstwy wierzchniej i zmniejszenie jej grubości, zwiększenie odporności na powstawanie drgań samowzbudnych, możliwość kształtowania przedmiotów cienkościennych. Przyczyny upowszechniania się HSM, głównie w przemyśle lotniczym, kosmicznym, a także samochodowym, upatruje Komanduri [139] w: chęci zwiększania wydajności i obniżania kosztów wytwarzania (co wynika z ciągłej dążności do poprawiania konkurencyjności), zdecydowanym polepszeniu się możliwości skrawnych materiałów narzędziowych, lepszym poznaniu procesu HSM, rozwoju wrzecion wysokoobrotowych. Agapiou [4], oprócz wielu zalet HSM, wymienia także wady i niedogodności stosowania tego sposobu obróbki. Należą do nich konieczność posiadania: wysokoobrotowych wrzecion dużej mocy i o dużej dynamice (przyspieszenia i opóźnienia) napędów głównych i posuwów, szybkiej interpolacji układu sterowania, suportów o małych masach, dynamicznie stabilnej konstrukcji obrabiarki itp. Ważnym argumentem przeciwko stosowaniu HSM jest zapewnienie bezpieczeństwa pracy [97, 98].

Narzędzia wielozadaniowe to takie narzędzia, które mogą być stosowane podczas wykonywania jednej operacji, do wielu odmian lub nawet rodzajów skrawania. Przykładem takiego narzędzia jest wiertłofrez, który w początkowej fazie pracuje jak wiertło, a następnie, bezpośrednio po wykonaniu otworu, nacina w nim gwint i spełnia wtedy rolę freza wielokrotnego. Innymi przykładami takich narzędzi mogą być „wiertłonoże”, a także klasyczne noże tokarskie specyficznie zastosowane, które pokazano na rys. 6.1.

Narzędzia do zastosowań wielozadaniowych są ostatnimi czasy bardzo intensywnie promowane przez wielu producentów. Jako najważniejszą zaletę tych narzędzi podaje się możliwość znacznego zwiększenia wydajności obróbki oraz ograniczenie liczby narzędzi koniecznej do wykonania operacji [36, 161].

Idea pracy narzędzi wielozadaniowych polega na tym, że do kolejnych obrabianych powierzchni stosuje się różne lub nawet te same fragmenty krawędzi skrawających. W zależności od specyfiki operacji lub zaplanowanej kolejności przejść i wcięć narzędzia obserwuje się różną intensywność zużywania się poszczególnych fragmentów krawędzi [74]. Rodzi się zatem problem racjonalnego zaplanowania sposobu zdejmowania nadkładu oraz doboru parametrów skrawania. Klasyczne metody oddzielnego określania warunków obróbki dla każdego z zadań mogą spowodować, że krawędzie mniej obciążone w operacji zużywać się będą mniej intensywnie. A ponieważ narzędzie musi być poddane regeneracji wtedy, kiedy dowolna z jego krawędzi zostanie stępiona, więc powstaje problem niepełnego wykorzystania krawędzi mniej zużytych. Zagadnienie to nie zostało do tej pory zadowalająco rozwiązane. Nie ma w literaturze danych i informacji dotyczących sposobu opracowania funkcji czasu i kosztów obróbki dla tego typu narzędzi. Nie są także znane przypadki zaproponowania metodyki pozwalającej na jednoczesny dobór parametrów skrawania dla narzędzia i jego wielu krawędzi, która by uwzględniała takie kryteria, jak minimalne koszty, maksymalna wydajność skrawania lub choćby tylko warunek osiągnięcia jednoczesnego stępienia wszystkich krawędzi po wykonaniu tej samej liczby operacji. Gwarantowałoby to przynajmniej pełne wykorzystanie możliwości skrawnych narzędzia.

Optymalizacja jako dziedzina nauki ma obszerną i bogatą bibliografię. Niektóre jej pozycje o podstawowym znaczeniu, np. *Findeisena*, *Szymanowskiego* i *Wierzbickiego* [78], *Polańskiego* [210], *Peeschela* i *Riedla* [205], *Nalimowa* i *Czernowa* [190], *Goranskiego* [85] *Jakobsa*, *Jakoba* i *Kochana* [107] liczą po kilkaset stron i nie ujmują nawet w pełni wszystkich tych jej aspektów, które mogłyby być odniesione do zagadnień technologicznych.

Metody optymalizacyjne można dzielić i omawiać na bardzo wiele sposobów. Do najczęściej stosowanych podstawowych kryteriów podziału zaliczyć można:

- optymalizację statyczną i dynamiczną
- optymalizację zewnętrzną i wewnętrzną
- optymalizację jednokryterialną i wielokryterialną
- optymalizację jednowymiarową i wielowymiarową, itp.

Te metody zaś można podzielić bardziej szczegółowo na takie, jak:

- gradientowe i bezgradientowe
- zdeterminowane i randomizowane
- sekwencyjne pojedyncze i wielokrotne
- kompletne i selekcyjne, itp.

Nie sposób przedstawić tu całość zagadnienia ze względu na jego obszerność. Optymalizację w odniesieniu do zagadnień technologicznych omówiono dość obszernie w pracy *Polańskiego* [210], a przeglądu metod zastosowanych w zagadnieniach optymalizacji parametrów skrawania dokonał *Wieczorowski* i *Pająk* [282], a także *Szwabowski* w monogra-

fii [258]. W niniejszej monografii optymalizacja przedstawiona zostanie tylko w zakresie, który dotyczy bezpośrednio zagadnień związanych z tematyką pracy.

Optymalizacja polega na wyborze takiego rozwiązania, dla którego wartość funkcji celu, będącej kryterium optymalizacji, osiąga wartość ekstremalną (minimalną lub maksymalną). Optymalizację można zatem określić jako postępowanie polegające na wyborze elementu z zadanego zbioru na podstawie relacji ustalających pewien porządek w tym zbiorze. Zbiór dopuszczalnych rozwiązań jest określany przez różne ograniczenia. Jest on podzbiorem przestrzeni decyzyjnych.

Jeśli operator przyporządkowuje każdemu elementowi ze zbioru dopuszczalnego jedną liczbę, to mówimy wtedy o zadaniu **optymalizacji**. Operator jest zwany funkcją celu (kryterium optymalizacji, wskaźnikiem jakości). Jeśli natomiast operator przyporządkowuje każdemu elementowi zbioru wiele liczb określających łącznie jakość procesu, to mówimy o zadaniu **polioptymalizacji** (wielokryterialności).

Zadanie polioptymalizacji nie jest tak proste jak zadanie optymalizacji jednokryterialnej, w którym definicja rozwiązania optymalnego jest jednoznacznie oczywista. Istnieje wiele możliwości relacji porządkujących wielowymiarową przestrzeń kryterialną. Najważniejsze znaczenie ma relacja sformułowana przez *Pareto* [205, 200, 247].

Jeśli w optymalizacji jednokryterialnej najczęściej stosowanymi funkcjami celu jest koszt K_j lub czas t_j trwania zabiegu lub operacji, to w optymalizacji wielokryterialnej jest to zazwyczaj kombinacja liniowa obu tych funkcji [250][251], np.:

$$w = \beta t_j + (1 - \beta)K_j, \quad 0 \leq \beta \leq 1. \quad (2.11)$$

Przyjęcie współczynnika wagowego β na określonym poziomie sprowadza zadanie dwukryterialne do jednokryterialnego. Pewną trudność w optymalizacji wielokryterialnej sprawia wybór wartości owego współczynnika. *Szwabowski* [258] proponuje, aby w pierwszym etapie wyznaczyć zbiór rozwiązań kompromisowych, w sensie *Pareto*, dla wartości β z przedziału od 0 do 1, a następnie w drugim etapie, na podstawie dodatkowych kryteriów różnego typu, np. kryterium rentowności, można podjąć decyzję o wielkości kompromisu między kryterium czasu i kosztów obróbki.

Polioptymalizacja jest ważnym zagadnieniem pozwalającym, podczas doboru parametrów skrawania i struktury całej operacji, uwzględniać wiele kryteriów i to z różnymi możliwymi kombinacjami wag.

Kryterium optymalizacyjne decyduje o funkcji celu. Do najczęściej stosowanych kryteriów optymalizacji należą minimalne koszty oraz minimalny czas obróbki lub równoważna mu maksymalna wydajność [25, 82, 106, 126, 137, 162, 199, 235, 240, 267, 268]. Znacznie rzadziej brane są pod uwagę takie kryteria, jak maksymalny zysk, stopa zysku kosztów względnych i stopa zysku czasu względnego [24, 107, 157] oraz minimalna cena jednostkowa [258]. W przypadku polioptymalizacji są to najczęściej kompromisowe kombinacje liniowe wymienionych kryteriów, z tym że w zdecydowanej większości kryteriami tymi są minimalny czas i koszty obróbki [19, 142].

Zeile i *Michelbach* [293] postulują tak dobierać warunki skrawania, aby trwałość narzędzia była wielokrotnością czasu obróbki, co prowadzić powinno do zwiększenia efektywności skrawania. Podane przez nich zależności odnoszą się jednak tylko do operacji jednozabiegowych.

Gebauer w swojej pracy doktorskiej [84] zwraca uwagę na **nieciągłość funkcji czasu i kosztów obróbki** w wierceniu głębokich otworów, która jest spowodowana niemożnością wykorzystania pełnych możliwości skrawnych narzędzi ze względu na to, że często trwałości reszkowe wiertel są krótsze niż długie czasy wiercenia otworów, co eliminuje je z dalszej obróbki. W związku z tym proponuje on zastąpienie w funkcjach celu, występującego tam stosunku T_c/t_s , liczbą rzeczywiście w pełni wykonanych otworów danym wiertłem $n_{sz}(T)$. Takie rozwiązanie jest daleko niezadowolające ze względu na niemożność przeprowadzenia optymalizacji lub choćby tylko takiego doboru parametrów skrawania, które pozwoliłyby na wykonanie jednym narzędziem całkowitej liczby operacji.

Problem nieciągłości funkcji pojawia się także w przypadku innych rodzajów obróbek, a szczególnie wyraźnie podczas toczenia na tokarkach sterowanych numerycznie, gdzie dość wyężone warunki pracy narzędzi powodują, że ich okresy trwałości są dość krótkie. Często zdarza się zatem, że nie w pełni zużyte narzędzie trzeba uprzedzająco wymienić na nowe, gdyż na tego typu obrabiarkach, podobnie jak podczas wiercenia głębokich otworów, również występują trudności z przerwaniem procesu skrawania w trakcie wykonywania zabiegu, aby wymienić narzędzie na nowe i rozpocząć obróbkę od tego samego miejsca. Pojawia się zatem problem uwzględnienia tych nieciągłości w zapisie matematycznym funkcji celu. Zagadnienie to nie zostało do tej pory rozwiązane.

W skrawaniu w większości przypadków ekstremum funkcji celu leży poza obszarem dopuszczalnych rozwiązań [35, 107]. W związku z tym **ograniczenia** są bardzo istotnym elementem optymalizacji, gdyż od dokładnej ich znajomości zależeć może właściwe wyznaczenie optymalnego stanu obiektu [28, 103, 104, 136].

Najczęściej spotykanymi ograniczeniami aktywnymi, tzn. takimi, na których zatrzymał się proces optymalizacji, a których usunięcie lub przesunięcie spowoduje polepszenie się stanu obiektu, są [105, 156, 258]: dopuszczalny moment i moc na wrzecionie, wymagana jakość i dokładność powierzchni po obróbce, zakres stabilnej pracy obrabiarki, podatność i wytrzymałość elementów układu OUPN, maksymalna prędkość obrotowa wrzeciona, niekorzystna postać wiórów.

Wymieniane są także inne ograniczenia, rzadziej występujące, do których zaliczyć można [1, 35, 107, 221, 235]:

- maksymalną wartość siły, jaką może przenieść mechanizm napędu posuwu
- maksymalną dopuszczalną głębokość skrawania, wynikającą z wartości naddatku lub wymiarów krawędzi skrawającej
- maksymalną dopuszczalną temperaturę skrawania związaną z możliwością wystąpienia nadmiernych odkształceń cieplnych i plastycznych elementów układu OUPN
- minimalną grubość warstwy skrawanej potrzebną do tego, aby mogło nastąpić oddzielanie materiału
- zakresy parametrów, dla których przestają obowiązywać funkcje trwałości ostrza narzędzia
- maksymalne dopuszczalne siły mocowania przedmiotu, zdeterminowane wytrzymałością przedmiotu lub pewnością mocowania uchwytu, konika i podtrzymki
- minimalny dopuszczalny stosunek a_p/f , wymagany ze względu na możliwość korzystnie przebiegającego procesu skrawania
- zadaną minimalną wydajność pracy stanowiska, rytm pracy linii produkcyjnej itp.

Ograniczenia te są wprowadzane do procedur optymalizacyjnych w postaci układu równań i nierówności. Spełnienie ich jest wymogiem prawidłowo wyznaczonego zestawu optymalnych parametrów skrawania. Dość ważna jest znajomość i możliwość dokładnego zapisu matematycznego funkcji określających ograniczenia, a także funkcji trwałości narzędzia. Bardzo często funkcje te są obarczone dużymi przedziałami ufności lub nawet nie są znane. Wówczas trzeba albo przyjmować większy margines bezpieczeństwa, albo wyznaczać je doświadczalnie [35, 42, 104].

Podczas rozwiązywania dużych zadań optymalizacyjnych i polioptymalizacyjnych należy dążyć do ich *dekompozycji* [253, 258, 288], bez której zadania takie byłyby trudne do zrealizowania i bardzo kosztowne. Naturalnym działaniem jest etapizacja podejmowania decyzji, wykorzystująca jego naturalną wielopoziomową hierarchiczną strukturę.

Patrząc na całe zadanie optymalizacyjne, jakim może być optymalny proces technologiczny wyrobu, trzeba się starać wyodrębnić te czynniki, które są związane tylko z poszczególnymi poziomami struktury procesu (przejściami, zabiegami, operacjami, narzędziami) i nie mają szczególnego wpływu na inne poziomy oraz te czynniki, które muszą być określone wspólnie dla całego procesu. W optymalizacji pierwsze z nich nazywa się czynnikami zmiennymi decyzyjnymi lokalnymi, drugie – zmiennymi decyzyjnymi koordynacyjnymi.

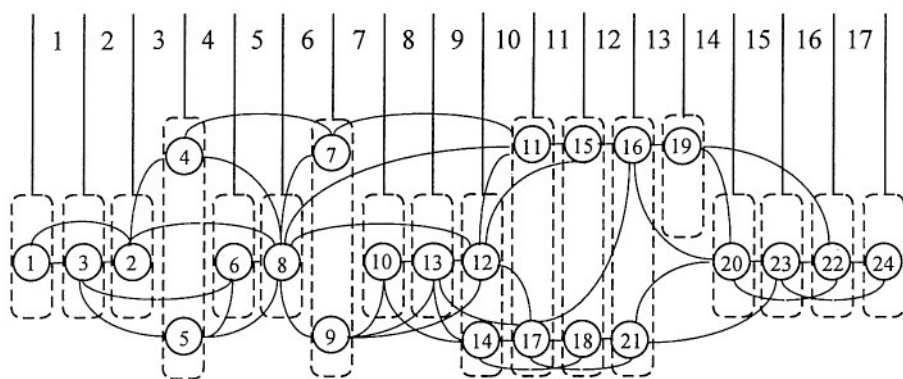
Na optymalizację operacji prowadzonych na tokarkach sterowanych numerycznie można spojrzeć globalnie, wybierając najkorzystniejszy wariant realizacji obróbki a lokalnie dobierając najkorzystniejsze parametry skrawania. W pierwszym przypadku mówi się o optymalizacji strukturalnej, w drugim o parametrycznej [245, 251].

Obszerne przeglądu metod projektowania, automatyzacji i optymalizacji procesów technologicznych dokonano w monografii Szadkowskiego [251]. Wydaje się, że do optymalizacji strukturalnej szczególnie przydatne są te metody, w których wykorzystuje się teorię grafów [107, 150, 209, 245, 250, 251, 304].

Z pewnym uproszczeniem teorię grafów, w odniesieniu do optymalizacji operacji skrawania, można przedstawić następująco: Podczas projektowania procesu technologicznego wyodrębnia się powierzchnie elementarne, które należy obrobić w określonych zabiegach. Pewna część zabiegów lub ich sekwencji może być wykonywana w różnej, czasami dowolnej, kolejności. Jednak znaczna ich część musi być realizowana jedna po drugiej, np. rozwiercanie po wierceniu. Nałożone ograniczenia co do następowania po sobie zabiegów Z stanowią pewną relację $R \in Z \times Z$. Na podstawie relacji R możliwa jest synteza grafu (sieci) i ustalenie najkorzystniejszego wariantu realizacji procesu technologicznego. Przykład grafu koordynacji zabiegów przedstawiono na rys. 2.3.

Wydaje się, że zastosowanie teorii grafów do optymalizacji procesów technologicznych ma największe znaczenie dla optymalizacji strukturalnej złożonych procesów, w których są stosowane obróbki wielonarzędziowe. Bardzo dobrze nadaje się ona do zastosowań w gniazdach bądź liniach produkcyjnych o dużej skali produkcji, pozwala bowiem oceniać i optymalizować całe procesy technologiczne lub znaczne ich fragmenty. W odniesieniu do operacji technologicznych o ograniczonej skali produkcji, wykonywanych na OSN-ach, pewnym utrudnieniem w stosowaniu tych metod może być konieczność drobiazgowego wariantowania i rozbijania operacji na zabiegi elementarne oraz określanie wszystkich relacji między nimi. Pamiętać również należy o tym, że zamiana

np. kolejności toczenia wzdłużnego z toczeniem czołowym powierzchni do siebie przylegających prowadzi do zmiany długości dróg skrawania w tych zabiegach. Podobnie będzie, jeśli zamieni się kolejność użycia wiertel o różnych średnicach podczas wykonywania otworu stopniowanego itp. Musi to wszystko znaleźć swoje odzwierciedlenie w kolejnych wariantach operacji.



Rys. 2.3. Graf koordynacji zabiegów [251]

Fig. 2.3. Process coordination graph [251]

Szwabowski w pracach [258, 260, 257] proponuje model matematyczny operacji, oparty na obróbce poszczególnych fragmentów zarysu powierzchni, w wielu zabiegach i przejściach. Następnie dekomponuje taką funkcję na składniki odnoszące się do obróbki jednego fragmentu powierzchni. Zakłada dalej, że optymalny stan całej operacji można określić wyznaczając optymalne parametry skrawania niezależnie dla poszczególnych fragmentów obrabianych powierzchni. Założenie to jednak będzie słuszne tylko dla tych przypadków, gdy każde z narzędzi będzie używane do obróbki tylko jednego fragmentu powierzchni (w jednym lub kilku zabiegach). Jeśli będzie inaczej, to parametry i czasy skrawania, używane do obróbki innych fragmentów powierzchni, będą także oddziaływać na funkcję trwałości ostrza narzędzia (patrz wzór (2.9)). Trwałość jest składnikiem tych części funkcji celu, które służą do uwzględniania czasu wymiany narzędzia i kosztów narzędziowych. Nie można rozdzielić trwałości „całkowitej” narzędzia na trwałości „częstkowe” przyporządkowane poszczególnym zabiegom. Aby optymalizacja oparta na tak zdekomponowanej części funkcji celu mogła być właściwie przeprowadzona, funkcja trwałości narzędzia w niej występująca powinna uwzględniać warunki obróbki innych fragmentów powierzchni obrabianych danym narzędziem. A to jest sprzeczne z założeniem o możliwości tak specyficznie przyjętej dekompozycji funkcji celu do zadań optymalizacyjnych, w których narzędzia są używane w zabiegach obróbki różnych powierzchni elementarnych.

Chcąc uprościć optymalizację przez rozdzielenie globalnej funkcji celu na mniejsze zadania, trzeba dokonać tego tak, aby funkcje częściowe obejmowały możliwie dużą liczbę

specyficznych wariantów pracy narzędzi. Korzystniej jest podzielić funkcję celu na takie części, które dotyczyłyby wszystkich zabiegów, jakie wykonują poszczególne narzędzia. Wówczas model cząstkowy operacji będzie nieco bardziej skomplikowany, ale będzie miał jednocześnie bardziej ogólny charakter.

Po wyborze modelu matematycznego kolejnym krokiem w rozwiązaniu zadań optymalizacyjnych jest przyjęcie odpowiedniej **procedury określania optymalnego stanu** obiektu.

Do najprostszych procedur należą **metody graficzne** [24, 25, 35, 88, 103, 217, 218, 258, 292], w których znalezienie rozwiązania polega zazwyczaj na odczytaniu z wykresów lub nomogramów takich wartości parametrów skrawania, dla których funkcja celu przyjmować może najkorzystniejsze wartości. Do zalet tych metod, oprócz prostoty, zaliczyć należy możliwość uwzględniania ograniczeń. Metody te były kiedyś bardzo uciążliwe ze względu na dużą pracochłonność budowania wykresów, które trzeba sporządzać od nowa w przypadku nawet drobnych zmian założeń lub warunków przeprowadzania operacji. Obecnie istnieje wiele programów komputerowych, które wadę tę eliminują, pozwalają bowiem błyskawicznie uaktualniać obliczenia i automatycznie sporządzać wykresy dwu- i trójwymiarowe. Metody graficzne mają jednak znaczne ograniczenia, jeśli wielowymiarowość zadania jest większa niż dwa. Ponadto w przypadku niektórych operacji wielozabiegowych funkcje celu są na tyle skomplikowane, że nie da się ich przedstawić w postaci graficznej.

Kolejną historycznie metodą rozwiązywania zagadnień optymalizacyjnych było **programowanie liniowe**. Jednym z pierwszych, który ją zastosował w wyznaczaniu optymalnych parametrów skrawania, był *Goranski* [85]. Podstawą tej metody jest przekształcenie funkcji celu do postaci równania liniowego, a wszystkich ograniczeń do nierówności liniowych, i rozwiązanie tak powstałego układu za pomocą programu komputerowego. Mimo dużej zalety, jaką była automatyzacja obliczeń, metoda ta nie przyjęła się w praktyce ze względu na duże niedokładności wynikające z uproszczeń, jakie były konieczne podczas sprowadzania modeli matematycznych do postaci liniowej. Programowaniem liniowym, w zastosowaniu do zagadnień optymalizacji warunków skrawania, zajmowali się autorzy prac [27, 91, 137, 246].

Wraz z rozwojem metod numerycznych, do opisu stanu obiektu i ograniczeń brzegowych zaczęto stosować **równania nieliniowe** [102, 105, 107, 136], co pozwoliło zwiększyć dokładność optymalizacji.

Chyba najpowszechniej stosowaną metodą szukania optymalnych parametrów skrawania było określanie ekstremum funkcji celu metodą przyrównywania do zera jej **pochodnych cząstkowych** po trwałości narzędzia [19, 24, 25, 29, 79, 105, 106, 143, 136, 218, 219]. Jest to sposób dość prosty, bo pozwala analitycznie wyznaczyć optymalną trwałość narzędzia. Niestety, od wartości optymalnej trwałości do optymalnych parametrów skrawania czasami droga jest daleka, a wynika to z następujących przyczyn:

Po pierwsze, określoną tą drogą trwałość optymalną, np. $T_{c(opt)} = 15$ min, można zrealizować z nieskończenie dużą liczbą zestawów parametrów skrawania. *Po drugie*, dla każdego zestawu zmiennych, spełniającego warunek $T_{c(opt)}$, funkcja celu może mieć inną wartość. *Po trzecie*, w warunkach rzeczywistych, a nie teoretycznych, miejsce optymalnych rozwiązań niemal zawsze znajduje się poza obszarem dopuszczalnych rozwiązań wyznaczonych przez ograniczenia [35, 42, 85, 102, 105, 106, 107]. Tak więc optymalny stan obiektu może

znajdować się nawet w dość znacznej odległości od miejsca, w którym przebiega linia trwałości optymalnej. Po czwarte, co stwierdzono w pracy [84] i co zostanie wykazane także w rozdz.4, funkcje czasu i kosztów nie we wszystkich przypadkach są funkcjami gładkimi, a to eliminuje tę metodę z procedur optymalizacyjnych. Tak więc, nie można powiedzieć, że wystarczającym warunkiem określenia optymalnego stanu obiektu jest wyznaczenie parametrów skrawania na podstawie $T_{c(opt)}$.

Możliwości współczesnych komputerów sprzyjają tym metodom rozwiązywania zagadnień optymalizacyjnych, które polegają na prostym **przeliczaniu wartości funkcji celu** w dużej liczbie punktów badanej przestrzeni i wybraniu tego z nich, dla którego otrzymano najkorzystniejszy stan obiektu. Można tu zastosować takie metody ograniczające konieczną liczbę obliczeń, jak: metody iteracyjne, relaksacyjne, proporcjonalne, losowe itp. [190, 208, 210, 217, 292].

Programowanie geometryczne bywa stosowane do rozwiązywania zagadnień optymalizacyjnych w skrawaniu [257, 258, 259]. Sprawdza się ono dobrze podczas optymalizacji wielokryterialnej, zwłaszcza gdy stosowane bywają kompromisy nieliniowe [205].

Przedstawione tu główne metody matematycznego rozwiązywania zadań optymalizacyjnych nie wyczerpują całości zagadnienia. Niemal każdą, z ogromnej liczby metod dochodzenia do optymalnego stanu, można zastosować do optymalizacji parametrów skrawania. Najczęściej w jednej procedurze lub programie komputerowym jest łączonych kilka, a nawet kilkanaście metod optymalizacyjnych [35].

Koszt optymalizacji jest bardzo ważnym czynnikiem, który może decydować o powodzeniu wdrożenia optymalizacji w warunkach przemysłowych. Zbyt skomplikowane procedury optymalizacyjne, wymagające znacznej liczby danych i dużego nakładu pracy, mogą okazać się nie do przyjęcia, jeśli uzyskane efekty będą mniejsze niż poniesione nakłady. Jest to szczególnie ważne w odniesieniu do obrabiarek sterowanych numerycznie, na których wytwarzanie odbywa się zazwyczaj w krótkich seriach. W takich przypadkach koszt optymalizacji rozkłada się na małą liczbę wykonanych wyrobów i trzeba wówczas wnikliwiej sprawdzać, czy jest on przynajmniej rekompensowany zmniejszeniem kosztów wytwarzania, jakie uzyskano w wyniku przeprowadzonej optymalizacji. Bywa też odwrotnie, że mało skomplikowane procedury są chętnie stosowane w praktyce przemysłowej i bywają nadzwyczaj skuteczne. W latach sześćdziesiątych prosta metoda, wyznaczająca jedynie optymalną prędkość skrawania, odniosła ogromny sukces przyczyniając się do znacznego, około 30–60%, wzrostu wydajności i obniżenia kosztów wytwarzania w całym przemyśle maszynowym USA [29]. Podobnie w latach siedemdziesiątych w Niemczech w niektórych zakładach o wysokim poziomie technologii uzyskano zwiększenie efektywności wytwarzania o około 20% w wyniku stosowania optymalizacji parametrów skrawania [28]. O ważności problemów związanych z obróbką skrawaniem i optymalizacją parametrów skrawania może świadczyć informacja podana przez *Burmestera za Vedelhovenem* [28], że w USA powstaje rocznie 15 mln ton wiórów, na co wydaje się ponad 10 mld dolarów. Tak więc zwiększenie efektywności wytwarzania nawet o kilka procent może w skali globalnej przynieść bardzo duże korzyści ekonomiczne.

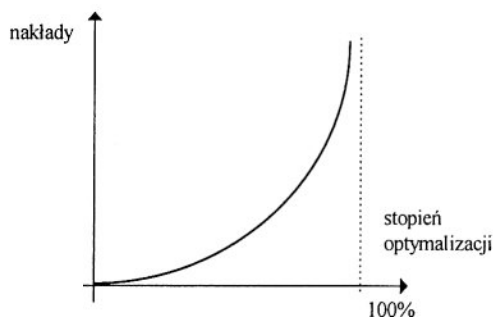
Błędne byłoby stwierdzenie *a priori*, że optymalizacja warunków obróbki na OSN-ach jest zazwyczaj nieuzasadniona z ekonomicznego punktu widzenia. Na to, że tak nie jest, składa się kilka powodów:

- wspomaganie komputerowe procedur optymalizacyjnych powoduje, że stają się one coraz łatwiejsze i prostsze w stosowaniu, a przez to i tańsze
- możliwe jest sprawdzenie, czy optymalizacja przyniosła korzystne rezultaty, jeśli w funkcji celu uwzględni się także koszty samej optymalizacji
- OSN-y zaczynają być stosowane w produkcji o coraz większej skali.

Jak wskazano, dość istotnym problemem podczas optymalizacji złożonych procesów jest przyjęcie odpowiedniego **stopnia optymalizacji**. Tendencja do ujęcia jak największej liczby optymalizowanych czynników i budowania coraz bardziej ogólnych i złożonych funkcji celów, a w niektórych przypadkach także wybór najkorzystniejszej (optymalnej) metody optymalizacji, może doprowadzić do tego, że przesłonięty zostanie główny cel tego procesu postępowania. Optymalizacja może stać się celem samym w sobie. W pracy [240] stwierdza się, że nakłady na koszty związane z optymalizacją procesów skrawania rosną coraz bardziej intensywnie w miarę zwiększania stopnia optymalizacji (rys. 2.4). W pracy [78] zwrócono natomiast uwagę, że nakłady pracy związane z określaniem stanu optymalnego obiektu rosną zazwyczaj z kwadratem lub sześciannym wymiarowości zadania. W zadaniach wielowymiarowych i złożonych procesach rozbić (dekompozycja) problemu na wiele problemów częściowych może zatem znacznie uprościć procedury optymalizacyjne i obniżyć nakłady pracy związane z wyznaczaniem optymalnego stanu obiektu. Niezbędne jest przy tym na ogół zastosowanie algorytmu nadrzędnego, aby wyznaczone rozwiązanie było optymalne także z globalnego punktu widzenia. Często w takich przypadkach algorytm ma charakter iteracyjny, co zastosowano również w pracach Szadkowskiego [251] i Szwabowskiego [258].

W **optymalizacji zewnętrznej**, w której nie występują elementy sterowania adaptacyjnego, funkcja celu dotycząca tylko czasu lub wydajności obróbki nie zmienia się, jeśli będzie uwzględniać się w niej sam proces optymalizacji. W funkcji kosztów operacji trzeba natomiast uwzględnić koszty czynności związanych z opty-

malizacją. Wydłużają one bowiem czas tworzenia programu NC, który jest składnikiem kosztów wytwarzania. Im bardziej skomplikowana procedura i liczba optymalizowanych czynników, tym bardziej pracochłonne staje się pisanie programu. Jak już wspomniano, w przypadku małych serii produkcyjnych koszty samej optymalizacji mogą być większe niż zyski powstające z jej zastosowania. Jednak w miarę zwiększania się skali produkcji optymalizacja może przynosić wymierne efekty ekonomiczne, gdyż takie same koszty jej przeprowadzenia rozkładają się równomiernie na coraz większą liczbę wykonywanych przedmiotów, a zysk, powstały w wyniku jej zastosowania, odnosi się odrębnie do każdego z tych przedmiotów.



Rys. 2.4. Nakłady kosztów w zależności od stopnia optymalizacji [242]

Fig. 2.4. Cost versus optimization degree [242]

Jeśli sama procedura optymalizacyjna jest przeprowadzona ze wspomaganie komputerowym, znacznie ułatwiającym i przyspieszającym ten proces, to jej stosowanie może być opłacalne już nawet dla krótkich serii produkcyjnych. Z pewnością w przyszłości, gdy CIM będzie codziennością, nic nie będzie stało na przeszkodzie, by w zasobach banku danych systemów informatycznych znalazły się również i te dane, które są niezbędne do przeprowadzania interakcyjnych, mniej lub bardziej zautomatyzowanych, procedur optymalizacyjnych [10, 12, 92].

W optymalizacji wewnętrznej, gdy procedury postępowania wymagają zbierania informacji, podejmowania decyzji, nawet jeśli dzieje się to bez udziału człowieka, to funkcje celu powinny uwzględniać także straty czasu i wzrost kosztów, spowodowane jej stosowaniem.

W obu rodzajach optymalizacji, zewnętrznej i wewnętrznej, o powodzeniu ich praktycznego wykorzystania decydować może takie wsparcie komputerowe, dzięki któremu stosowanie procedur optymalizacyjnych byłoby proste, łatwe i nie wymagało od użytkownika dużej wiedzy o specyficznym matematycznym ukierunkowaniu.

Aby proces skrawania był bardziej skuteczny, zwłaszcza gdy są obrabiane materiały o wyjątkowo złej skrawalności, mogą być stosowane następujące metody **wspomagania procesu oddzielania materiału**: nagrzewanie materiału w strefie styku z ostrzem za pomocą prądu elektrycznego [26, 279, 280], strumienia plazmy, wiązki światła laserowego [283, 296], a także wprowadzanie wysokociśnieniowej strugi cieczy w strefę skrawania lub drgań ultradźwiękowych [31, 32, 146, 214, 272, 283, 296].

Wspomaganie skrawania za pomocą płynów obróbkowych bywa coraz rzadziej stosowane wobec coraz bardziej restrykcyjnych przepisów o ochronie środowiska [12].

Wszędzie tam, gdzie to możliwe, propaguje się **obróbkę na sucho** lub z minimalnym chłodzeniem, jako mniej szkodliwą dla środowiska, a także tańszą wobec alternatywnego skrawania z tradycyjnym chłodzeniem, w którym są duże koszty utylizacji i neutralizacji płynów obróbkowych [123, 133, 158, 161, 179, 236].

Silne naciski proekologiczne sprawiły, że są prowadzone szerokie badania nad zmniejszaniem zużycia środków smarnych w obrabiarkach. Potrykus i inni [212, 213] postulują racjonalizację i modernizację metod oraz technik smarowania obrabiarek. Powinna ona polegać na zastąpieniu smarowania konwencjonalnego, zazwyczaj obfitego, smarowaniem minimalnym, z użyciem smarów plastycznych, technik powietrzno-olejowych lub natryskowych. Smarowanie minimalne nie tylko ogranicza ilość środków potrzebnych do zapewnienia dobrych właściwości trybologicznych, ale także zmniejsza nagrzewanie się węzłów łożyskowych i pozwala znacznie uprościć ich konstrukcję.

Weck w pracy [274] zwraca uwagę na problemy, jakie się pojawiają na drodze do budowania i eksploatacji „bezolejowych” (niem. *ölfrei*) obrabiarek. Oprócz różnych aspektów, związanych ze zdrowiem, jakością obróbki, ochroną środowiska itp., autor wskazuje na możliwości stosowania specjalnych materiałów i powłok na powierzchniach współpracujących, a także na korzystanie z technik ograniczonego smarowania lub na użycie mediów mniej szkodliwych dla otoczenia. Ponadto stosowanie przewodniczących i napędów śrubowych ogranicza smarowanie, a tym samym ilość zużytych środków smarnych.

Odształcenia cieplne obrabiarki i pozostałych elementów okładu OUPN, które się zwiększają w wyniku obróbki bez chłodzenia, mogą być rekompensowane odpowiednimi

korekcjami przesyłanymi do układu sterowania. Wartości tych korekcji mogą być określone na podstawie monitorowania stanu cieplnego obrabiarki i odpowiedniego programu komputerowego lub za pomocą odpowiednio „nauczonej” sieci neuronowej.

Analizując koszty stosowania i neutralizacji płynów obróbkowych w zakładach Mercedes-Benz [123] stwierdzono, że koszty z tym związane sięgają 16,9% kosztów wytwarzania linii produkcyjnej, podczas gdy np. udział kosztów narzędzi stanowi 7,5%, obrabiarek 39,3%, wynagrodzeń pracowników 8,8%.

Badanie **struktury funkcji czasu i kosztów wytwarzania**, poprzez rozdzielenie tych funkcji na poszczególne składniki, ma istotne znaczenie, pozwala bowiem na wyodrębnienie i uszeregowanie czynników wpływających na wartości tych funkcji, od najbardziej istotnych po najmniej ważne. Można także zorientować się o możliwościach i zakresie skutecznego oddziaływania na efektywność wytwarzania różnych działań organizacyjnych, wyposażenia technicznego, doboru narzędzi, oprzyrządowania, a także warunków obróbki.

Wielu autorów określało strukturę kosztów lub czasu operacji. W zależności od punktu widzenia uwypuklano te lub inne składniki analizowanych funkcji. *Viehweger* [269] i *Hammer* [87] zwracają uwagę na duże możliwości zwiększania efektywności wytwarzania w wyniku uruchomienia produkcji na drugiej i trzeciej zmianie, a także w dni wolne od pracy. Autorzy ci podają także, że koszty kapitałowe stanowiska pracy centrum obróbkowego rozkładają się w ten sposób, że na obrabiarkę przypada 43%, oprzyrządowanie 28%, a na narzędzia 29% kosztów całkowitych.

Bilansowano także składniki czasu pracy i przestoju obrabiarek, gniazd i wydziałów produkcyjnych w skali zmiany, doby, miesiąca i roku [178].

W pracach [8, 10, 27] zwracano uwagę na możliwe w przyszłości zwiększenie efektywności wytwarzania przez komputerowe wspomaganie czynności związanych z przygotowaniem produkcji. Dotyczyć to będzie skracania czasów programowania obrabiarek, doboru narzędzi i zalecanych parametrów skrawania, sporządzania dokumentacji, opracowywania harmonogramów obciążenia stanowisk pracy i pomocniczych środków produkcji itp. *Balbach* w pracy [8] analizuje składniki czasu przezbrajania obrabiarek i określa strukturę tego czasu. W pracach [16, 130] podaje się natomiast strukturę rocznego czasu obciążenia stanowiska pracy oraz składniki kosztów inwestycyjnych, ponoszonych w elastycznych systemach produkcyjnych.

Podsumowując stan zagadnienia można stwierdzić, że istnieje wiele istotnych, nie w pełni rozwiązanych, zagadnień związanych z efektywnością wytwarzania na obrabiarkach sterowanych numerycznie. Należą do nich **funkcje czasu i kosztów operacji**, uwzględniające specyficzny charakter pracy obrabiarek NC, szczególnie w odniesieniu do elastycznego wytwarzania, w którym często zmienia się zadania produkcyjne, odznaczające się małą liczbą wykonywanych wyrobów. Powoduje to trudności z wykorzystaniem pełnych możliwości skrawnych narzędzi. Ciągłe otwartym zagadnieniem jest także **metodyka optymalizacji parametrów skrawania**, umożliwiająca wykorzystanie rezerw, jakie tkwią w „zagospodarowaniu” okresów trwałości reszkowych, pozostających narzędziom po zakończeniu zadania produkcyjnego. Dotyczy to szczególnie narzędzi wielozadaniowych, coraz powszechniej stosowanych na tokarkach NC.

Kolejnym nie rozwiązany problem jest **analiza barier** na drodze do stosowania **obróbki z dużymi prędkościami skrawania**. Wydaje się, że ograniczeniami takimi w wyko-

rzystaniu HSM do toczenia mogą być właściwości dynamiczne napędów głównych i suportów.

Nie dokonano także do tej pory *kompleksowej analizy struktury funkcji czasu i kosztów operacji w skali całego zadania produkcyjnego*, przeprowadzonej ze względu na możliwość zwiększenia efektywności wytwarzania.

Ogólne czynniki wpływające na zwiększanie efektywności skrawania są dobrze znane. Przedstawiono je na rys. 2.1. Istotne jest natomiast określenie stopnia ich oddziaływania. Nie zawsze wiadomo, które z tych czynników mają największy wpływ na obniżenie kosztów lub na wzrost wydajności wytwarzania, a które z nich oddziałują w mniejszym stopniu lub mają wpływ zgoła marginalny. Mając rozeznanie co do ważności oddziaływań poszczególnych czynników na efektywność wytwarzania, można bardziej racjonalnie kierować środki finansowe na działania techniczne i organizacyjne w sferze bezpośredniego wytwarzania, jak również w sferze konstruowania obrabiarek, narzędzi i oprzyrządowania, aby przyniosły one najkorzystniejsze rezultaty. Jednocześnie można wyodrębnić te czynniki, które, mimo najintensywniejszych prac, o dużym wsparciu finansowym, nie dadzą spodziewanych wyników w postaci zwiększenia efektywności wytwarzania.

3. CEL I ZAKRES PRACY

Na podstawie przedstawionej analizy stanu zagadnienia i wynikających stąd możliwości określenia oryginalnych tematów badawczych sformułowano następujące cele i zakres pracy.

Cele główne pracy to:

- ❑ Określenie możliwości zmniejszania kosztów i zwiększania wydajności wytwarzania przedmiotów osiowosymetrycznych na tokarkach sterowanych numerycznie dla warunków współczesnych oraz dla warunków mogących pojawić się w przyszłości, a także wyznaczenie ograniczeń, jakie mogą się pojawić na drodze do zwiększania efektywności obróbki.
- ❑ Wyjaśnienie mechanizmu powstawania nieciągłości funkcji czasu i kosztów operacji, które mogą powstać w tych przypadkach, gdy:
 - wymiana narzędzi jest dokonywana nie w chwili, gdy osiągają one kryterium stopienia lecz uprzedzająco wtedy, gdy ich trwałości resztkowe są krótsze niż czas użycia ich w następnej operacji
 - nie można w pełni wykorzystać okresu trwałości ostatnich narzędzi, kończących zlecenie produkcyjne.
- ❑ Uwzględnienie tych nieciągłości w modelu matematycznym operacji tak, aby można było zwiększyć dokładność szacowania wartości funkcji celu i optymalizowanych parametrów skrawania.
- ❑ Opracowanie takiej metodyki doboru optymalnych parametrów skrawania dla narzędzi wielozadaniowych, aby w tych przypadkach, gdy jest to możliwe, warunki obróbki dla krawędzi mniej obciążonych były tak zwiększone, żeby zużycie wszystkich krawędzi następowało po wykonaniu tej samej liczby operacji. Powinno to zwiększyć stopień wykorzystania możliwości skrawnych narzędzi i wzrost efektywności wytwarzania.
- ❑ Analiza wpływu czasów hamowania i rozpędzania wrzeciona na efektywność wytwarzania w warunkach konwencjonalnych skrawania i dla obróbki z dużymi prędkościami skrawania (HSM). Badania wartości granicznej prędkości skrawania, powyżej której może zwiększać się czas wykonania i koszt operacji ze względu na znacząco rosnące czasy rozpędzania, hamowania i zmiany prędkości obrotowej wrzeciona

Cele pomocnicze to:

- ❑ Opracowanie funkcji celów uwzględniających możliwie dużo czynników oddziałujących na czas i koszty operacji.

- ☐ Opracowanie metodyki optymalizacji parametrów skrawania dla operacji wykonywanych na OSN-ach.
- ☐ Opracowanie programu komputerowego do automatycznej analizy programów NC w celu pozyskiwania z nich danych potrzebnych do optymalizacji parametrów skrawania.
- ☐ Zbadanie struktury funkcji czasu i kosztów operacji określanych jako wartości średnie dla całego zadania produkcyjnego.
- ☐ Określenie udziału i analiza oddziaływania poszczególnych czynników składowych funkcji celów na wartość czasu i kosztów operacji, a także na zmiany optymalnych parametrów skrawania i optymalnych trwałości.

Zakres pracy wynika bezpośrednio z konieczności realizacji nakreślonych zadań.

Opracowane funkcje celu dotyczyć będą czasu i kosztów obróbki dla różnych tokarek NC, poczynając od najprostszych tokarek jednowrzecionowych jednosuportowych po obrabiarki wielowrzecionowe i wielosuportowe, z uwzględnieniem szeregowej, równoległej i szeregowo-równoległej pracy narzędzi, a więc wszystkich możliwych wariantów pracy obrabiarek.

Procedury optymalizacyjne dotyczyć będą operacji z użyciem narzędzi zwykłych i wielozadaniowych.

Analiza struktury operacji oraz ocena możliwości zwiększenia efektywności wytwarzania na tokarkach NC dokonana zostanie, poczynając od typowych przeciętnych warunków występujących w dzisiejszych realiach polskiego przemysłu, poprzez wyteżone ale możliwe do spełnienia warunki pracy obrabiarek i narzędzi, aż po warunki, jakie mogą być zrealizowane dopiero w przyszłości.

Wydatność lub koszty wytwarzania na obrabiarkach można rozpatrywać w odniesieniu do różnego czasu pracy lub do różnej skali zadań na nich wykonywanych. Można bowiem oceniać efektywność wytwarzania w czasie całego okresu ich eksploatacji, w czasie całego roku, miesiąca, czy też w mniejszych jednostkach czasu pracy np. dnia, zmiany, godziny. W odniesieniu do zadań produkcyjnych można zajmować się wydajnością lub kosztami całego zlecenia, partii wyrobów, jednej operacji, zabiegu, a nawet przejścia narzędzia. W pracy będą analizowane czasy i koszty jednej operacji, określane jako wartości średnie dla całego zadania produkcyjnego.

Zakres pracy obejmuje w głównej mierze analizę zagadnień związanych ze skrawaniem i optymalizacją warunków obróbki na tokarkach NC. Jedynie tam gdzie jest to niezbędne, odnosi się to także do organizacji produkcji, a także do cech konstrukcyjnych i użytkowych obrabiarek, które mają bezpośredni związek z efektywnością wytwarzania.

Prace badawcze przedstawione w monografii dotyczą zintegrowanego wytwarzania przedmiotów osiowosymetrycznych oraz zagadnień optymalizacji warunków pracy obrabiarek sterowanych numerycznie. Można zatem stwierdzić, że treść pracy mieści się w obrębie dyscypliny nauki, jaką jest *budowa i eksploatacja maszyn*.

4. FUNKCJE CZASU I KOSZTÓW WYTWARZANIA NA RÓŻNYCH TYPACH TOKAREK NC

4.1. WPROWADZENIE

Budując modele matematyczne czasu i kosztów obróbki realizowanej na OSN-ach kierowano się takimi przesłankami, aby:

- modele te mogły być użyte jako funkcje celu podczas optymalizacji parametrów skrawania, a także optymalizacji całej struktury operacji
- można było na ich podstawie nie tylko wyznaczać optymalne parametry skrawania, ale także analizować wpływ różnorodnych czynników oddziałujących na te funkcje oraz na wartości optymalizowanych parametrów skrawania
- funkcje dały się zdekomponować, by ułatwiać przeprowadzenie procedur optymalizacyjnych
- funkcje odzwierciedlały budowę i właściwości programu NC
- w funkcjach były uwzględniane zasady organizacji pracy, kalkulacji czasów i kosztów wytwarzania, stosowane w praktyce przemysłowej.

Takie podejście do konstruowania funkcji czasu i kosztów obróbki pozwala na łatwiejsze zrozumienie przedstawianych zależności, a także umożliwia częściową lub pełną automatyzację czynności związanych ze żmudnym pozyskiwaniem danych, będących składnikami funkcji celu.

Przedstawione zależności powinny uwzględniać także różne stopnie automatyzacji wykonywania czynności na obrabiarce. Funkcje te powinny także być w miarę ogólne, a jednocześnie na tyle szczegółowe, by można było precyzyjnie wyliczać za ich pomocą badane zależności.

Ogólne zasady budowy funkcji czasu i kosztów w obróbce wielonarzędziowej są podawane w wielu pracach m.in. w [35, 107, 220]. I tak średni czas wykonania operacji w partii wyrobów był określany do tej pory ze znanej zależności

$$t_{sz} = \frac{t_{pz}}{n_{sz}} + \left(\Sigma t_p + \Sigma t_g + \Sigma \frac{\Sigma t_{zn}}{\frac{T_c}{t_s}} \right) (1 + k_u). \quad (4.1)$$

Jednak wzór ten nie uwzględnia takich specyficznych sytuacji, jakie występują szczególnie wtedy, gdy obróbka odbywa się na tokarkach sterowanych numerycznie. Omówiono to dokładniej w rozdziale 7.

Podczas realizacji obróbki na OSN-ach dąży się do tego, aby wymieniać lub regenerować narzędzia zużyte po zakończeniu całej operacji a nie w trakcie jej wykonywania. Szczególnie niekorzystne jest, gdy trzeba wymieniać narzędzie podczas wykonywania zabiegu (przejścia roboczego). Składa się na to kilka powodów:

- tylko nieliczne wersje najnowszych układów sterowań mają możliwość ręcznego bądź automatycznego wystartowania programu NC od miejsca, w którym został on wcześniej przerwany w trakcie realizacji ruchu roboczego, np. wskutek zużycia katastroficznego narzędzia; w innych układach sterowania można jedynie ręcznie powtórzyć cały program bądź uruchomić go od początku jakiegoś bloku
- wymiana narzędzia wymaga często określenia, lub choćby tylko skorygowania, wartości korekcji metodą przejść próbnych, co jest bardzo trudne, a nawet niejednokrotnie niemożliwe do wykonania podczas przerwanej operacji
- pogarsza to jakość obrobionej powierzchni w miejscu przerwania procesu
- wprowadzenie nowego narzędzia, o wymaganych innych korekcjach, do realizacji przerwanej operacji, jest potencjalnym źródłem błędów obróbki, a nawet powstawania braków.

Funkcje do określania czasu realizacji i kosztów operacji powinny zatem uwzględniać również to, że narzędzia są wymieniane po skończonej, całkowitej liczbie operacji, co powoduje, że nie zawsze takie narzędzie jest w pełni zużyte. Wzór (4.1) będzie zatem miał postać:

$$t_{sz} = \frac{t_{pz}}{n_{sz}} + \left(\Sigma t_p + \Sigma t_g + \Sigma \frac{\Sigma t_{zn,ok,wk}}{\left\{ \text{entier} \left[\frac{T_c}{t_s} \right] \right\} \vee \left\{ \frac{T_c}{t_s} \right\}} \right) (1 + k_u), \quad (4.2)$$

gdzie $\text{entier}[x]$ oznacza całkowitą część wyrażenia x .

We wzorze (4.2) suma czasów $\Sigma t_{zn,ok,wk}$ (wymiany narzędzi, określenia korekcji, wprowadzania korekcji) odnoszona jest opcjonalnie ($\vee$) albo do $\{\text{entier}[T_c/t_s]\}$, czyli całkowitej liczby operacji wykonywanych narzędziem albo do T_c/t_s , jeśli narzędzia są wymieniane w chwili stępienia, a więc wtedy, gdy wykorzystują one pełny okres trwałości.

Często eksploatacja OSN-ów może mieć ograniczony nadzór. W skrajnych przypadkach obrabiarka może pracować bezobsługowo, np. na drugiej i trzeciej zmianie. Wymaga to jednak drogich i skomplikowanych systemów zasilania w przedmioty, narzędzia, układów nadzorujących pracę, a także zazwyczaj sterowania DNC. Taka bezobsługowa praca obrabiarek nie jest jeszcze zbyt częstym zjawiskiem w praktyce przemysłowej. Najczęściej pracownik nadzoruje pracę jednej, dwóch lub kilku obrabiarek. Przezbraja on obrabiarki do nowych zadań, określa korekcje dla narzędzi oraz wymienia przedmioty po zakończeniu operacji. Jest oczywiste, że w takiej sytuacji wydajność pracy kilku obrabiarek obsługiwanych przez jednego pracownika będzie mniejsza niż wówczas, gdyby każdą obrabiarkę obsługiwał jeden pracownik. Wynika to ze zdarzającej się konieczności ingerencji operatora

w pracę kilku obrabiarek jednocześnie. To z kolei jest spowodowane niejednakową długością cykli obróbkowych poszczególnych obrabiarek, a także niemal losowym charakterem czasu, po którym należy wymieniać zużyte narzędzia, dokonywać zmiany korekcji, oraz po którym występują awarie itp. Funkcja czasu obróbki powinna zatem uwzględniać, wywołany takimi sytuacjami, spadek wydajności wytwarzania. W przedstawianych funkcjach czasu obróbki t_{sz} odbywa się to za pomocą współczynnika $\lambda_{ws} \geq 1$, przez który mnoży się czasy czynności pomocniczych wykonywanych przez operatora (patrz wzór (4.3) i dalsze). To zmniejszanie się wydajności jest oczywiście niekorzystne. Wzrastają przy tym także koszty wytwarzania wywołane dłuższymi przestojami. Te jednak są rekompensowane, a dokładniej, powinny być zrekompensowane, zmniejszeniem kosztów obsługi przypadających na jedną obrabiarkę. W prezentowanych zależnościach uwzględniane jest to współczynnikiem λ_L , przez który mnoży się godzinową stawkę operatora $K_{L,m}$ (patrz wzór (4.13) i dalsze). Gdy pracownik obsługuje jedną obrabiarkę, współczynnik $\lambda_L = 1$, gdy dwie $\lambda_L = 0,5$ itd.

Nieplanowe zakłócenia w pracy obrabiarki, w tym także awarie, zużycia katastroficzne narzędzia itp., uwzględniane są we wzorach za pomocą współczynnika λ_z (patrz wzór (4.3) i dalsze).

Podanie bardziej szczegółowych funkcji celów wymaga odniesienia ich do różnych warunków pracy narzędzi i obrabiarek.

Ogólny podział obróbki, ze względu na kolejność pracy narzędzi, wyróżnia **obróbkę szeregową, równoległą i szeregowo-równoległą**.

Na tokarkach sterowanych numerycznie najczęściej realizowana jest **obróbka szeregową**, podczas której narzędzia pracują pojedynczo, kolejno jedno po drugim, a często używa się tych samych narzędzi kilkakrotnie w czasie realizacji jednego programu lub na przemian kilku programów obróbkowych NC, jak to zdarza się np. podczas elastycznego wytwarzania.

Obróbki równoległej, w której czas pracy zespołu narzędzi jest równy czasowi pracy narzędzia najdłużej pracującego, w zasadzie nie spotyka się na obrabiarkach sterowanych numerycznie, choć teoretycznie jest to możliwe.

Obróbka szeregowo-równoległą, w której czas pracy zespołu narzędzi jest sumą czasu pracy poszczególnych grup narzędzi pracujących względem siebie w systemie równoległym bądź szeregowym, jest praktycznie możliwa jedynie na tokarkach NC wielosuportowych i wielowrzecionowych.

4.2. CZASY JEDNOSTKOWE WYTWARZANIA

Przedstawione zostaną średnie czasy jednostkowe wykonania operacji w partii wyrobów dla typowych tokarek NC i różnych możliwych wariantów ich pracy.

A. Tokarki NC jednowrzecionowe jednosuportowe kilkugłowicowe – stanowią klasyczny, najczęściej spotykany przykład **pracy szeregowej narzędzi**. **Czas wytworzenia jednej sztuki** przedmiotu na tego typu tokarkach wyliczyć można z zależności (4.3)

$$t_{sz} = \frac{t_{pz}}{n_{sz}} + \lambda_z \left[\lambda_{ws} \sum_{r=1}^o (t_{p(r)} - t'_{p(r)}) + \sum_{q=1}^s (t_{pNC(q)} - t'_{pNC(q)}) + \sum_{u=1}^w (t_{rd(u)} - t'_{rd(u)}) + \sum_{i=1}^n \frac{t_{dn(i)} - t'_{dn(i)}}{n_{szdn(i)}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{g(ij)} + \lambda_{ws} \sum_{i=1}^n \frac{t_{zn(i)} - t'_{zn(i)} + (t_{ok(i)} - t'_{ok(i)})\varepsilon_{ok(i)} + (t_{wk(i)} - t'_{wk(i)})\varepsilon_{wk(i)}}{\lambda_T \times \left\{ \text{entier} \frac{T_{c(i)}}{t_{s(i)}} \right\} \vee \left\{ \frac{T_{c(i)}}{t_{s(i)}} \right\}} \right] (1 + k_u). \quad (4.3)$$

B. Tokarki NC jednowrzecionowe wielosuportowe (najczęściej dwusuportowe) kulkugłowicowe – to przypadek bardziej ogólnych warunków pracy, który odpowiada obróbce **szeregowo-równoległej narzędzi**. Funkcja celu będzie musiała uwzględnić pokrywanie się czasów maszynowych pracy narzędzi pracujących równoległe $t'_{g(ij)}$. **Czas jednostkowy** określa wzór (4.4)

$$t_{sz} = \frac{t_{pz}}{n_{sz}} + \lambda_z \left[\lambda_{ws} \sum_{r=1}^o (t_{p(r)} - t'_{p(r)}) + \sum_{q=1}^s (t_{pNC(q)} - t'_{pNC(q)}) + \sum_{u=1}^w (t_{rd(u)} - t'_{rd(u)}) + \sum_{i=1}^n \frac{t_{dn(i)} - t'_{dn(i)}}{n_{szdn(i)}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (t_{g(ij)} - t'_{g(ij)}) + \lambda_{ws} \sum_{i=1}^n \frac{t_{zn(i)} - t'_{zn(i)} + (t_{ok(i)} - t'_{ok(i)})\varepsilon_{ok(i)} + (t_{wk(i)} - t'_{wk(i)})\varepsilon_{wk(i)}}{\lambda_T \times \left\{ \text{entier} \frac{T_{c(i)}}{t_{s(i)}} \right\} \vee \left\{ \frac{T_{c(i)}}{t_{s(i)}} \right\}} \right] (1 + k_u). \quad (4.4)$$

C. Tokarki NC dwuwrzecionowe wielosuportowe (najczęściej dwusuportowe) kulkugłowicowe (drugie wrzeciono jest wrzecionem przechwytyjącym i mimo dwóch wrzecion może być jednocześnie obrabiany tylko jeden przedmiot) – zazwyczaj narzędzia pracują **szeregowo** podobnie jak w punkcie A, wtedy t_{sz} określać można ze wzoru (4.3), lub rzadziej – gdy narzędzia pracują **szeregowo-równoległe**, podobnie jak w punkcie B, wówczas do obliczania t_{sz} można użyć ogólnego wzoru (4.4).

D. Tokarki NC z dwoma wrzecionami roboczymi i z niezależnymi suportami dla każdego z wrzecion. Obrabiarka taka jest praktycznie jak gdyby połączeniem dwóch tokarek jednowrzecionowych, z jednym, wieloosiowym systemem sterowania CNC. Na tego typu obrabiarkach wymiana przedmiotów odbywa się po zakończeniu programów obróbkowych obu przedmiotów mocowanych w uchwytach niezależnych wrzecion. Mogą tu wystąpić następujące przypadki wykonywania operacji:

1. W uchwytach obu wrzecion roboczych są jednostronnie obrabiane dwa odrębne przedmioty.

Wzór czasu obróbki będzie różnił się od poprzednich wzorów tym, że w czasie t_{sz} wykonane będą nie jeden lecz dwa przedmioty i że będzie musiał uwzględnić czas realizacji jednego, dłużej trwającego programu NC, z dwu programów równolegle wykonywanych. Czasy czynności pomocniczych wykonywane przez operatora, a także czasy wymian i określania korekcy poszczególnych narzędzi, muszą być jednak brane pod uwagę łącznie dla dwóch kompletów narzędzi służących do obróbki obu przedmiotów, gdyż czynności, których one dotyczą, nie są zazwyczaj wykonywane w czasie pokrytym.

$$t_{sz} = \frac{t_{pz}}{n_{sz1} + n_{sz2}} + \lambda_z \times \left[\lambda_{ws} \sum_{w=1}^{l_{op}} \sum_{r=1}^o (t_{p(wr)} - t'_{p(wr)}) + \max_{w \in l_{op}} \left\{ \sum_{q=1}^s (t_{pNC(q)} - t'_{pNC(q)}) + \sum_{u=1}^w (t_{rd(wu)} - t'_{rd(wu)}) \right\} + \sum_{i=1}^n \frac{t_{dn(wi)} - t'_{dn(wi)}}{n_{szdn(wi)}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{g(wij)} \right] (1 + k_u),$$

$$+ \lambda_{ws} \sum_{w=1}^W \sum_{i=1}^n \frac{t_{zn(wi)} - t'_{zn(wi)} + (t_{ok(wi)} - t'_{ok(wi)}) \varepsilon_{ok(i)} + (t_{wk(wi)} - t'_{wk(wi)}) \varepsilon_{wk(wi)}}{\lambda_T \times \left\{ \text{entier} \left[\frac{T_c(wi)}{t_s(wi)} \right] \right\} \vee \left\{ \left[\frac{T_c(wi)}{t_s(wi)} \right] \right\}}$$

(4.5)

gdzie $\max\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ oznacza maksymalną wartość elementu ze zbioru X_n .

2. W uchwytach obu wrzecion roboczych są wykonywane dwustronnie dwa odrębne przedmioty. Aby obrócić przedmiot do obróbki z drugiej strony, układ NC musi czekać aż zakończy się dłużej trwająca obróbka któregoś z przedmiotów. Można zatem potraktować ten przypadek jak dwie podwójne operacje przedstawione w punkcie D-1. Wzór do określania czasu t_{sz} , w którym zostaną obrobione z obu stron dwa przedmioty, będzie miał dwa członów $\max\{\dots\}$. Każdy z tych członów wybierze maksymalny czas z dwóch równolegle wykonywanych programów NC.

$$t_{sz} = \frac{t_{pz}}{n_{sz1} + n_{sz2}} + \lambda_z$$

$$\left[\lambda_{ws} \sum_{w=1}^{l_{op1}} \sum_{r=1}^o (t_{p(wr)} - t'_{p(wr)}) + \max_{w \in l_{op1}} \left\{ \sum_{q=1}^s (t_{pNC(wq)} - t'_{pNC(wq)}) + \sum_{u=1}^w (t_{rd(wu)} - t'_{rd(wu)}) \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{i=1}^n \frac{t_{dn(wi)} - t'_{dn(wi)}}{n_{szdn(wi)}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{g(wij)} \right\} \right] \\ \times \left[\lambda_{ws} \sum_{w=1}^{l_{op2}} \sum_{r=1}^o (t_{p(wr)} - t'_{p(wr)}) + \max_{w \in l_{op2}} \left\{ \sum_{q=1}^s (t_{pNC(wq)} - t'_{pNC(wq)}) + \sum_{u=1}^w (t_{rd(wu)} - t'_{rd(wu)}) \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{i=1}^n \frac{t_{dn(wi)} - t'_{dn(wi)}}{n_{szdn(wi)}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{g(wij)} \right\} \right] (1 + k_u) \\ + \lambda_{ws} \sum_{w=1}^{l_{op1}+l_{op2}} \sum_{i=1}^n \frac{t_{zn(wi)} - t'_{zn(wi)} + (t_{ok(wi)} - t'_{ok(wi)}) \mathcal{E}_{ok(i)} + (t_{wk(wi)} - t'_{wk(wi)}) \mathcal{E}_{wk(i)}}{\lambda_T \times \left\{ \text{entier} \left[\frac{T_c(wi)}{t_s(wi)} \right] \right\} \vee \left\{ \frac{T_c(wi)}{t_s(wi)} \right\}} \quad (4.6)$$

3. Obrabiany jest obustronnie jeden przedmiot, z tym że jedna jego strona wykonywana jest w jednym wrzecionie, a druga w drugim. Wytwarzane są zatem jednocześnie po dwa przedmioty, z tym, że każdy z nich z innej strony. Jedynie w chwili rozpoczynania obróbki pierwszego i kończenia ostatniego przedmiotu z zadanej partii wyrobów, jest wykonywany jeden przedmiot. To zmniejszenie wydajności podczas obróbki pierwszego i ostatniego przedmiotu uwzględnia zależność $(n_{sz}+1)/n_{sz}$. Wzór (4.7) wyraża **średni czas jednostkowy** obróbki obustronnej przedmiotu w partii n_{sz} wyrobów.

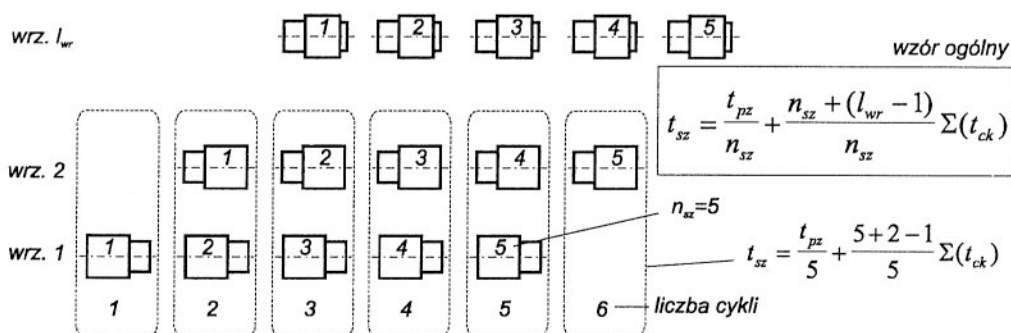
$$t_{sz} = \frac{t_{pz}}{n_{sz}} + \lambda_z \frac{n_{sz} + 1}{n_{sz}}$$

$$\left[\lambda_{ws} \sum_{w=1}^{l_{op}} \sum_{r=1}^o (t_{p(wr)} - t'_{p(wr)}) + \max_{w_1 \in l_{op}} \left\{ \sum_{q=1}^s (t_{pNC(wq)} - t'_{pNC(wq)}) + \sum_{u=1}^w (t_{rd(wu)} - t'_{rd(wu)}) \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{i=1}^n \frac{t_{dn(w_1i)} - t'_{dn(w_1i)}}{n_{szdn(w_1i)}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{g(w_1ij)} \right\} \right] \\ \times \left[\lambda_{ws} \sum_{w_{12}=1}^{l_{op}} \sum_{i=1}^n \frac{t_{zn(wi)} - t'_{zn(wi)} + (t_{ok(wi)} - t'_{ok(wi)}) \mathcal{E}_{ok(i)} + (t_{wk(wi)} - t'_{wk(wi)}) \mathcal{E}_{wk(i)}}{\lambda_T \times \left\{ \text{entier} \left[\frac{T_c(wi)}{t_s(wi)} \right] \right\} \vee \left\{ \frac{T_c(wi)}{t_s(wi)} \right\}} \right] (1 + k_u) \quad (4.7)$$

E. Tokarki NC z wieloma l_{wr} (więcej niż dwoma) roboczymi wrzecionami. Tokarki tego typu mogą pracować podobnie jak klasyczne automaty wielowrzecionowe ze sterowaniem krzywkowym. Wyróżnić tu można wiele sposobów pracy obrabiarki:

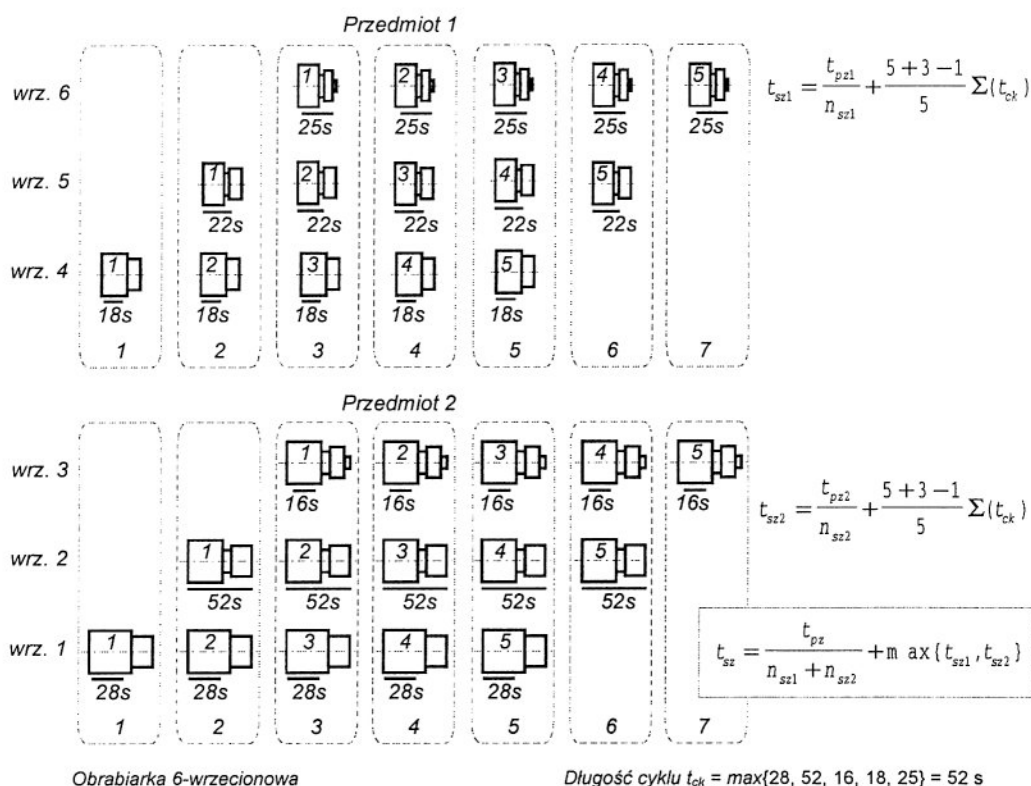
1. Najczęstszy przypadek to taki, gdy jedno wrzeciono służy do wymiany przedmiotu, a na pozostałych, z określonym cyklem roboczym, są wykonywane kolejno zabiegi na tym samym przedmiocie (rys. 4.1). Wówczas czas jednostkowy określić można z następującej zależności, w której człon $\max\{\dots\}$ wyznacza najdłuższą trwającą pracę cząstkowego programu NC obsługującego każde z wrzecion, czyli takt pracy obrabiarki.

$$t_{sz} = \frac{t_{pz}}{n_{sz}} + \lambda_z \frac{n_{sz} + l_{wr} - 1}{n_{sz}} \times \left[\lambda_{ws} \sum_{r=1}^o (t_{p(wr)} - t'_{p(wr)}) + l_{wr} \max_{w \in l_{op}} \left\{ \sum_{q=1}^s (t_{pNC(wq)} - t'_{pNC(wq)}) + \sum_{u=1}^w (t_{rd(wu)} - t'_{rd(wu)}) + \sum_{i=1}^n \frac{t_{dn(wi)} - t'_{dn(wi)}}{n_{szdn(wi)}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{g(wij)} \right\} + \lambda_{ws} \sum_{w=1}^{l_{op}} \sum_{i=1}^n \frac{t_{zn(wi)} - t'_{zn(wi)} + (t_{ok(wi)} - t'_{ok(wi)})\varepsilon_{ok(i)} + (t_{wk(wi)} - t'_{wk(wi)})\varepsilon_{wk(wi)}}{\lambda_T \times \left\{ \text{entier} \left[\frac{T_{c(wi)}}{t_{s(wi)}} \right] \right\} \vee \left\{ \frac{T_{c(wi)}}{t_{s(wi)}} \right\}} \right] (1 + k_u). \quad (4.8)$$



Rys. 4.1. Schemat wyjaśniający obliczanie średniego czasu t_g obróbki na obrabiarkie dwu- i l_{wr} -wrzecionowej

Fig. 4.1. Diagram illustrating the calculation of average time t_g of parallel machining on two-spindle and l_{wr} -spindle machine-tool



Rys. 4.2. Schemat wyjaśniający obliczanie średniego czasu t_g obróbki równoległej np. dwóch przedmiotów na obrabiarkie 6-wrzecionowej

Fig. 4.2. Diagram illustrating the calculation of average time t_g of parallel machining of e.g. two workpieces on 6-spindle machine-tool

2. Na obrabiarkie jest wykonywanych kilka różnych przedmiotów (w szczególnym przypadku takich samych). Dwa (czasem więcej wrzecion) służą do zamocowania przedmiotów, po czym obrabiarka obrabia je w kolejnych cyklach (rys. 4.2). Jest to zatem sytuacja analogiczna do tej, w której połączono by dwie lub więcej tokarek wielowrzecionowych (o takiej pracy jak w punkcie E-1), i które mają jeden wymuszony wspólny takt. W czasie t_{sz} obróbowanych będzie tyle przedmiotów, ile potoków przedmiotów realizowanych jest na obrabiarkie. Czas obróbki maszynowej limitowany będzie najdłużej trwającym cyklem obróbkowym któregoś z potoków. Wzór do określania średniego czasu wykonania tych kilku różnych przedmiotów przedstawiono zależnością (4.9)

$$\begin{aligned}
t_{sz} = & \frac{t_{pz}}{\sum_p n_{sz(p)}} + \lambda_{sz} \max_{p \in P} \left\{ \frac{n_{sz(p)} + l_{wr(p)} - 1}{n_{sz(p)}} \right\} \\
& \times \left[\lambda_{ws} \sum_{r=1}^o (t_{p(wr)} - t'_{p(wr)}) + l_{wr} \max_{w \in l_{op}} \left\{ \begin{aligned} & \sum_{q=1}^s (t_{pNC(wq)} - t'_{pNC(wq)}) \\ & + \sum_{u=1}^w (t_{rd(wu)} - t'_{rd(wu)}) \\ & + \sum_{i=1}^n \frac{t_{dn(wi)} - t'_{dn(wi)}}{n_{szdn(wi)}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{g(wij)} \end{aligned} \right\} \right. \\
& \left. + \lambda_{ws} \sum_{w=1}^{l_{op}} \sum_{i=1}^n \frac{t_{zn(wi)} - t'_{zn(wi)} + (t_{ok(wi)} - t'_{ok(wi)}) \varepsilon_{ok(i)} + (t_{wk(wi)} - t'_{wk(wi)}) \varepsilon_{wk(wi)}}{\lambda_T \times \left\{ \text{entier} \left[\frac{T_c(wi)}{t_s(wi)} \right] \right\} \vee \left\{ \frac{T_c(wi)}{t_s(wi)} \right\}} \right] (1 + k_u).
\end{aligned} \tag{4.9}$$

4.3. KOSZTY JEDNOSTKOWE WYTWARZANIA

Koszty wytwarzania K_{sz} i koszty jednostkowe K_j określa się dla wszystkich rozpatrywanych przypadków z tych samych wzorów (4.10)–(4.14), niezależnie od rodzaju obrabiarki i wariantu pracy narzędzi. Jedynie występujący w nich średni czas wykonania operacji t_{sz} należy wyznaczyć z odpowiedniej, dla danego rodzaju pracy, zależności.

Koszt wytworzenia jednej sztuki K_{sz} w produkcji (w której liczba wyrobów w partii wynosi n_{sz} , a liczba partii l_p) określa się ze wzoru

$$K_{sz} = \frac{K_{przg}}{l_p n_{sz}} + \frac{K_{pow}}{n_{sz}} + \lambda_b K_j, \tag{4.10}$$

gdzie koszt przygotowania zlecenia

$$K_{przg} = (K_{opzl} + K_{opNC} + K_{opt}) \lambda_{kwb} + K_{pwpr} \lambda_{kwpr}, \tag{4.11}$$

koszt powtórzenia zlecenia

$$K_{pow} = \sum_{w=1}^c K_{pb(w)} \lambda_{kwb(w)} + \sum_{z=1}^d K_{pwpr(z)} \lambda_{kwpr(z)}, \tag{4.12}$$

koszt jednostkowy

$$K_j = \frac{K_m + \lambda_L K_{Lm}}{60} t_{sz} + \sum_{i=1}^k \frac{K_{N(i)}}{\lambda_T \times \left\{ \text{entier} \left[\frac{T_{c(i)}}{t_{s(i)}} \right] \right\} \vee \left\{ \frac{T_{c(i)}}{t_{s(i)}} \right\}}, \quad (4.13)$$

koszt pracy stanowiska roboczego

$$K_m = K_o + K_s. \quad (4.14)$$

Koszt eksploatacji obrabiarki K_o składa się z kosztów amortyzacji oraz remontów obrabiarki i jej wyposażenia, kosztów materiałów pomocniczych, takich jak płyny obróbkowe, smary, kosztów energii elektrycznej i sprężonego powietrza.

W koszty użytkowania powierzchni zajmowanej przez stanowisko pracy K_s wlicza się koszty amortyzacji i remontów hali, koszty oświetlenia, ogrzewania, sprzątania itp.

Lewa część wzoru (4.13) to koszty wynikające z obciążenia czasem t_{sz} stanowiska pracy K_m i obsługi $\lambda_L K_{Lm}$. Są one odniesione do jednej sztuki. Prawa część zależności (4.13) wyraża koszty narzędziowe $K_{N(i)}$, przypadające na jeden okres trwałości ostrza i -tego narzędzia, odniesione do liczby przedmiotów obrobionych w ciągu tego okresu trwałości.

Wzór ten jest prawdziwy wówczas, gdy potrafi się wykorzystać trwałości resztkowe, które pozostają narzędziom po wykonaniu ostatniego przedmiotu w partii wyrobów. Obecnie trwają prace w wielu ośrodkach naukowych, głównie niemieckich, nad takimi wspartymi komputerowo systemami zarządzania narzędziami, które pozwoliłyby rejestrować trwałość resztkową narzędzia nie tylko w obrębie obrabiarki, lecz także poza nią, np. z użyciem magnetycznych nośników informacji wędrujących razem z narzędziem lub z wykorzystaniem baz danych [10, 12]. Aby z takiej możliwości można było skorzystać, wymagana jest pełna identyfikacja każdego narzędzia znajdującego się w systemie produkcyjnym, w tym również w magazynie narzędziowym wydziałowym (wypożyczalni). Jednak taka pełna identyfikacja rzadko kiedy jest technicznie i ekonomicznie uzasadniona, a niekiedy praktycznie bardzo trudna do zrealizowania, np. dla narzędzi o małych rozmiarach, płytek wieloostrzowych itp. Obecnie uzasadnione jest wykorzystywanie trwałości resztkowej narzędzia po jego wyprowadzeniu z obrabiarki wówczas, gdy koszt jednego okresu trwałości jest bardzo duży. Występuje to zazwyczaj w przypadku wieloostrzowych głowic frezowych. W toczeniu dotyczy to może, niemal wyłącznie, narzędzi z ostrzami supertwardymi.

W zdecydowanej większości zakładów produkcyjnych wypożyczalnie narzędzi funkcjonują w ten sposób, że narzędziom przywraca się pełne właściwości skrawne przed ich ponownym wypożyczeniem. Dla takich przypadków określanie kosztów wytwarzania ze wzoru (4.13) jest nieprawidłowe. Wyjaśnić to może prosty przykład. Jeśli narzędziem można obrobić np. $T_c/t_s = 40$ przedmiotów, a ich liczba w partii wynosi $n_{sz} = 50$ szt., to do wykonania pierwszych 40 przedmiotów koszty narzędziowe liczone są prawidłowo ze wzoru (4.13), czyli $K_{N(i)}/40$. Jednak podczas wykonania pozostałych 10 przedmiotów udział kosztów narzędziowych należałoby odnieść do 10 sztuk, czyli $K_{N(i)}/10$, a nie tak jak poprzednio, do 40 przedmiotów. Ta nieścisłość może prowadzić do znaczących błędów wtedy, gdy udziały kosztów narzędziowych w ogólnych kosztach wytwarzania są duże.

Ponieważ obrabiarki NC są używane na ogół do wytwarzania niewielkich serii, szczególnie wtedy, gdy pracują w elastycznych systemach produkcyjnych, więc trzeba zbudować funkcję kosztów tak, aby uwzględniała ona również i takie sytuacje, jak opisana, czyli niepełnego wykorzystywania okresów trwałości narzędzi. Jeśli się tego nie zrobi, może to prowadzić do złego szacowania kosztów wytwarzania, a także do nieprawidłowych wyników optymalizacji parametrów skrawania. Nieścisłość, o której była mowa, została wyeliminowana w kolejnej **funkcji kosztów jednostkowych wytwarzania**,

$$K_j = \frac{K_m + \lambda_L K_{Lm}}{60} t_{sz} + \sum_{i=1}^k \frac{K_{N(i)}}{\lambda_T n_{sz}} \left\{ \text{entier}^{(+1)} \left[\frac{n_{sz}}{\left\{ \text{entier} \left[\frac{T_{c(i)}}{t_{s(i)}} \right] \right\} \vee \left\{ \frac{T_{c(i)}}{t_{s(i)}} \right\}} \right] \right\}, \quad (4.15)$$

która w swoim prawym członie ujmuje koszty narzędziowe dla całej partii wyrobów, a następnie odnosi je do jednego przedmiotu. Wyrażenie zawarte w dużym nawiasie $\{ \}$ określa liczbę narzędzi konieczną do wykonania całej partii wyrobów, a ściślej liczbę okresów trwałości, zaokrągloną do pełnej wartości. Funkcja $\text{entier}^{(+1)}[X]$ zaokrągla „w górę” do liczby całkowitej wartość wyrażenia X (np. $\text{entier}^{(+1)}[3,4] = 4$, ale dla liczby całkowitej zachowuje jej wartość $\text{entier}^{(+1)}[3] = 3$).

Ta bardziej ogólna i dokładniejsza funkcja kosztów, niż dotychczas stosowana, ma jeszcze jedną zaletę, a mianowicie taką, że jeśli użyje się jej jako funkcji celu, to w wyniku prawidłowo przeprowadzonej optymalizacji powinien nastąpić taki dobór parametrów skrawania, żeby straty wynikłe z niepełnego wykorzystania okresu trwałości ostatnich siostrzanych narzędzi były jak najmniejsze. Wyjaśnia to następujący przykład, w którym do wykonania zadania potrzebne jest np. 1,25 narzędzia: Praktycznie oznacza to konieczność użycia 2 narzędzi. Korzystniej będzie zatem tak zwiększyć parametry skrawania, żeby oba narzędzia po wykonaniu zadania osiągnęły kryterium stępienia. Wówczas koszty narzędziowe pozostaną takie same, a skróci się czas obróbki i zmniejszą się koszty wytwarzania.

Występujące we wzorach (4.13) i (4.14) koszty narzędziowe $K_{N(i)}$ można obliczyć z zależności (4.16), która obejmuje najbardziej typowe i najczęściej spotykane przypadki. Lewa część tej zależności, ujęta w nawiasie okrągłym, dotyczy tych przypadków, gdy skrawanie odbywa się narzędziami z płytkami wymiennymi nie podlegającymi ostrzeniu. Środkowa część odnosi się do narzędzi przeostrzalnych. Prawa część wzoru dotyczy innych możliwych kombinacji zużywania się i przywracania właściwości skrawnych ostrzom narzędzi składanych takich, jak: ewentualne ostrzenie stępionych płytek wieloostrzowych, zmniejszenie kosztów spowodowane ponownym użyciem zregenerowanych ostrzy, zwiększenie kosztów, gdy wystąpią takie warunki pracy, podczas których płytki pękają i eliminują część nie wykorzystanych naroży płytki z dalszej eksploatacji, a nawet zmniejszenie kosztów w wyniku odsprzedaży po cenie złomu stępionych płytek. Szerzej i dokładniej problem ten omówiono w pracy [51].

Wzór określający **koszty narzędziowe** $K_{N(i)}$ ma postać:

$$K_{N(i)} = \left(\frac{\lambda_o K_{o(i)}}{n_{w(i)}} + \frac{K_{p(i)}}{n_{kp(i)}} \right) \sqrt{ \left(\frac{K_{n(i)}}{n_{os(i)} + 1} + K_{os(i)} \right) } \cdot \sqrt{ \frac{\lambda_o K_{o(i)}}{n_{w(i)}} + \frac{(100 - O_{s(i)})(K_{p(i)} - K_{z(i)}) + O_{s(i)} K_{os(i)}}{\sum_{n_{kw(i)}=0}^{n_{kp(i)}-1} B_{nkw(i)} (n_{kp(i)} - n_{kw(i)})} } \quad (4.16)$$

4.4. TRWAŁOŚĆ OSTRZA NARZĘDZIA W ZMIENNYCH WARUNKACH SKRAWANIA

Występująca w funkcjach celu trwałość ostrza narzędzia powinna uwzględniać występowanie zmiennych parametrów skrawania, z jakimi najczęściej pracują narzędzia na OSN-ach. Problem ten szczegółowo przedstawiono w rozdz. 2 podczas wyprowadzania wzoru określającego trwałość (2.9). Wspomniano tam o pewnych uproszczeniach dotyczących pominięcia wpływu geometrycznego kształtu śladów starć, powstałych podczas zużycia się ostrza we wcześniejszych okresach pracy narzędzia, na późniejsze jego zużywanie oraz okres trwałości.

Pewną próbę uwzględnienia tego zjawiska podaje *Szwabowski* [258]. Wprowadza on do licznika wzoru określającego trwałość ostrza (4.17) współczynnik λ_{VB} , który uwzględnia wpływ dotychczasowych warunków pracy na dalsze zużywanie się ostrza. Jednak, jak do tej pory, nie podano jakie wartości czy też zależności należałoby temu współczynnikowi przypisywać dla różnych warunków skrawania i pracy narzędzi. W niniejszej pracy proponowano również uwzględnienie tego zjawiska za pomocą współczynnika λ_{VB} , zdając sobie sprawę z jego niedoskonałości. Jest to jednak, jak dotychczas, najrozsądniej postawione rozwiązanie tego zagadnienia. Jeśli nie ma informacji odnośnie do tego, jaką formułę powinien mieć ten współczynnik, to należy zamiast niego wstawić wartość 1. Jeśli natomiast pojawią się w przyszłości takie dane, to można je będzie wykorzystać we wzorze trwałości narzędzia.

Zatem ogólny, rozszerzony wzór *Taylora*, określający trwałość i -tego narzędzia pracującego ze zmiennymi parametrami skrawania, ma postać

$$T_{c(i)} = \frac{C_{T(i)} t_{s(i)} \lambda_{VB(i)}}{\sum_{j=1}^m v_{c(ij)}^{s(i)} f_{(ij)}^{u_{r(i)}} a_{p(ij)}^{e_{r(i)}} \lambda_{l(ij)} t_{g(ij)}}, \quad (4.17)$$

a występującą w nim sumę efektywnych czasów skrawania $t_{s(i)}$ i -tego narzędzia oraz czasu maszynowego w j -tym przejściu $t_{g(ij)}$ można obliczyć ze wzorów:

$$t_{s(i)} = \lambda_{l(i)} \sum_{j=1}^m t_{g(ij)}, \quad (4.18)$$

$$t_{g(ij)} = \left(\frac{L_{(ij)}}{f_{(ij)} n_{wr(ij)}} \vee \frac{L_{(ij)}}{1000 v_{f(ij)}} \right) = \left(\frac{\pi d_{(ij)} L_{(ij)}}{1000 f_{(ij)} v_{c(ij)}} \vee \frac{L_{(ij)}}{1000 v_{f(ij)}} \right),$$

$$v_{c(ij)} = \frac{\pi d_{(ij)} n_{wr(ij)}}{1000} \rightarrow n_{wr(ij)} = \frac{1000 v_{c(ij)}}{\pi d_{(ij)}}. \quad (4.19)$$

Współczynnik λ_l występujący we wzorach (4.17) i (4.18) uwzględnia to, że skutek istnienia dobiegu i wybiegu narzędzia z materiału czas maszynowy obróbki nie pokrywa się z czasem rzeczywistym skrawania. Dokładne określenie rzeczywistej drogi skrawania jest zazwyczaj trudne, ponieważ zależy ona od losowego rozłożenia wymiarów nadadków półfabrykatu, błędów zamocowania, a także od arbitralnie przyjętych przez technologa wielkości dobiegów i wybiegów narzędzia. Gdyby nawet zastosować układy nadzorowania do dokładnego określania czasów rozpoczęcia i zakończenia skrawania określonymi narzędziami, co pozwoliłoby na wyznaczenie indywidualnej, rzeczywistej drogi skrawania, to nie można byłoby wykorzystać takich informacji do optymalizacji parametrów skrawania, gdyż uzyskuje się je po zakończeniu zabiegu, który ma być optymalizowany.

4.5. PORÓWNANIE FUNKCJI CZASU I KOSZTÓW JEDNOSTKOWYCH WYTWARZANIA

W tej części pracy porównano wpływ zmiennych (parametry skrawania v_c , f , i a_p) na funkcje czasu t_{sz} i kosztów jednostkowych K_j . Wykazano, że obie te funkcje wobec parametrów skrawania mają taką samą postać matematyczną, a różnią się tylko stałymi. Analizę ograniczono do niezbędnego minimum. Porównano jedynie wybrane wzory określające czas (4.3) i koszty jednostkowe wytwarzania (4.13). Ponieważ inne zależności są podobne do wzorów (4.3) i (4.13), a różnią się od nich jedynie stałymi lub dodatkowymi, podobnymi członami, oznacza to więc, że też są tego samego rodzaju.

Aby dokonać porównania obu funkcji, przeprowadzamy następujące rozumowanie. Do wzoru (4.13) podstawiamy zależność (4.20), a potem wzór (4.3) z wstawionymi do niego wcześniej równaniami (4.21) i (4.22). Otrzymamy zależność (4.23):

$$\Sigma K = \frac{K_m + \lambda_L K_{Lm}}{60}, \quad (4.20)$$

$$\Sigma t_p = \lambda_{ws} \sum_{r=1}^o (t_{p(r)} - t'_{p(r)}) + \sum_{q=1}^s (t_{pNC(q)} - t'_{pNC(q)}) + \sum_{u=1}^w (t_{rd(u)} - t'_{rd(u)}) + \sum_{i=1}^n \frac{t_{dn(i)} - t'_{dn(i)}}{n_{szdn(i)}}, \quad (4.21)$$

$$\Sigma t_w = t_{zn(i)} - t'_{zn(i)} + (t_{ok(i)} - t'_{ok(i)})\varepsilon_{ok(i)} + (t_{wk(i)} - t'_{wk(i)})\varepsilon_{wk(i)} \quad (4.22)$$

$$K_j = \Sigma K \left\{ \frac{t_{pz}}{n_{sz}} + \lambda_z \left[\Sigma t_p + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{g(ij)} + \lambda_{ws} \sum_{i=1}^n \frac{\Sigma t_w}{\lambda_T \times \left\{ \text{entier} \left[\frac{T_{c(i)}}{t_{s(i)}} \right] \right\} \vee \left\{ \frac{T_{c(i)}}{t_{s(i)}} \right\}} \right] \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^n \frac{K_{N(i)}}{\lambda_T \times \left\{ \text{entier} \left[\frac{T_{c(i)}}{t_{s(i)}} \right] \right\} \vee \left\{ \frac{T_{c(i)}}{t_{s(i)}} \right\}} \right\}. \quad (4.23)$$

Następnie mnożymy przez λ_z wyrażenia znajdujące się w nawiasie kwadratowym we wzorze (4.23). Ponieważ dwie ostatnie sumy tego wzoru są sterowane tym samym parametrem (i), więc można stojące pod nimi wyrażenia włączyć pod jeden znak sumy, tak jak to uczyniono we wzorze (4.24)

$$K_j = \Sigma K \left\{ \frac{t_{pz}}{n_{sz}} + \lambda_z \Sigma t_p + \lambda_z \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{g(ij)} + \lambda_z \lambda_{ws} \sum_{i=1}^n \frac{\Sigma t_w + \frac{K_{N(i)}}{\lambda_z}}{\lambda_T \times \left\{ \text{entier} \left[\frac{T_{c(i)}}{t_{s(i)}} \right] \right\} \vee \left\{ \frac{T_{c(i)}}{t_{s(i)}} \right\}} \right\}. \quad (4.24)$$

Jeśli tak otrzymany wzór (4.24) porównamy ze wzorem (4.3), to widać, że na obie te zależności w taki sam sposób oddziałują zmienne $t_{g(ij)}$, $t_{s(i)}$ i trwałość $T_{c(i)}$. A ponieważ zmienne te są funkcjami parametrów skrawania i wyznacza się je z tych samych zależności (4.17 do 4.19), więc można uznać, że porównywane funkcje czasu i kosztów w ten sam sposób zależą do zmiennych v_c, f, a_p . Jest to dość istotne stwierdzenie ze względu na procedury i metodyki optymalizacyjne. Niektóre z nich są bowiem wrażliwe na takie właściwości funkcji, jak np. unimodalność, wypukłość, nieciągłość itp. Dlatego dobraną i przetestowaną procedurę optymalizacyjną z użyciem jednej funkcji celu, np. czasu t_{sz} , można z powodzeniem, bez większych kłopotów, użyć do optymalizacji drugiej funkcji, w tym przypadku K_j . Ponadto mamy pewność, że funkcje te, wykorzystane jako składniki sumy ważonej funkcji celu, w procedurach optymalizacji wielokryterialnej, np. według metody *Pareto*, również tak samo będą się zachowywały, jak każda z omawianych wcześniej funkcji.

Od powyższego stwierdzenia, mówiącego o takiej samej budowie matematycznej funkcji czasu i kosztów wytwarzania, istnieje wyjątek. Odnosi się on do takiej sytuacji, w której koszty wytwarzania uwzględniają dodatkowe koszty niepełnego wykorzystania okresu trwałości ostatniego z narzędzi kończącego partię wyrobów – patrz wzór (4.15). W takim

przypadku funkcja kosztów ma w swoim drugim członie dodatkową funkcję entier⁽⁺¹⁾[...], której nie ma funkcja czasu obróbki.

4.6. NIECIĄGŁOŚĆ FUNKCJI CZASU I KOSZTÓW WYTWARZANIA

Graficzne przedstawienie przykładowych funkcji (4.3) i (4.13) zobrazowano na rys. 4.3 i rys. 4.4. Funkcje te są ciągłe (gładkie) wówczas, gdy wyznacza się je dla takich sytuacji, w których narzędzia są wymieniane w chwili osiągnięcia przez nie kryterium stopienia nawet wtedy, kiedy wymaga to przerwania zabiegu. Kształt tych funkcji jest niemal identyczny. Są one jedynie przesunięte w płaszczyźnie $v_c - f$ i mają inne wartości i jednostki.

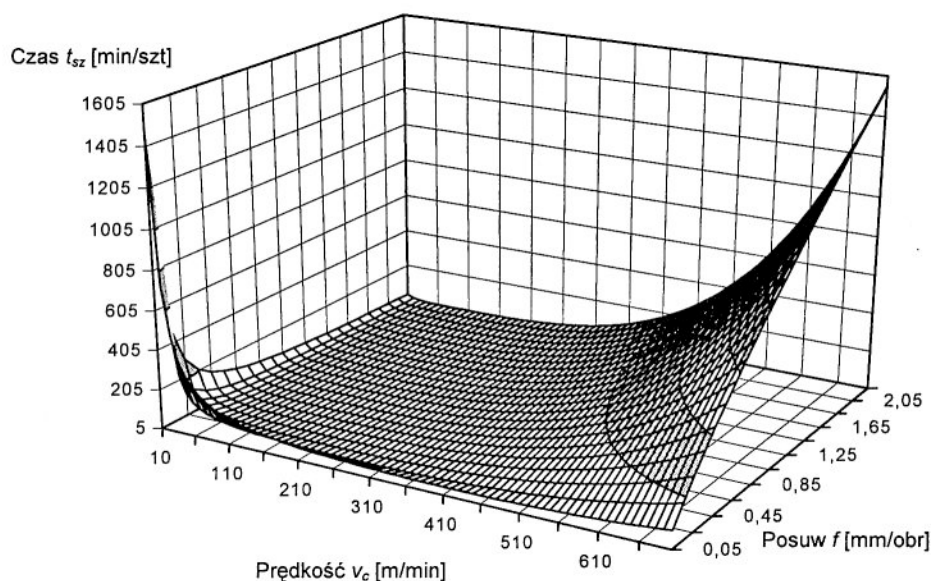
Jeśli jednak – jak to występuje najczęściej – narzędzie wymienia się nie podczas wykonywania operacji, lecz przed zakończeniem lub po jej zakończeniu, to funkcje czasu i kosztów operacji dla takich przypadków (liczone, tak jak poprzednio, jako wartości średnie dla partii wyrobów) mają nieciągłości w miejscach, w których przebiegają linie całkowitej wartości stosunku T_c/t_s . Obraz nieciągłości tak wyznaczanych funkcji t_{sz} i K_j , przedstawiono na rys. 4.5 i 4.6

Nieciągłości funkcji t_{sz} i K_j są wywołane istnieniem w nich członów dzielonych przez schodkowe funkcje entier $[T_c/t_s]$. Charakter zmian takiego członu o jednostkowej wartości w zależności od liczby operacji wykonanych w ciągu okresu trwałości narzędzia (T_c/t_s), przedstawiono na rys. 4.7. Na rysunku tym naniesiono dodatkowo linią przerywaną jak zmieniłby się taki człon, gdyby dzielono go nie przez ową schodkową funkcję ale przez T_c/t_s , tak jak w klasycznym wzorze.

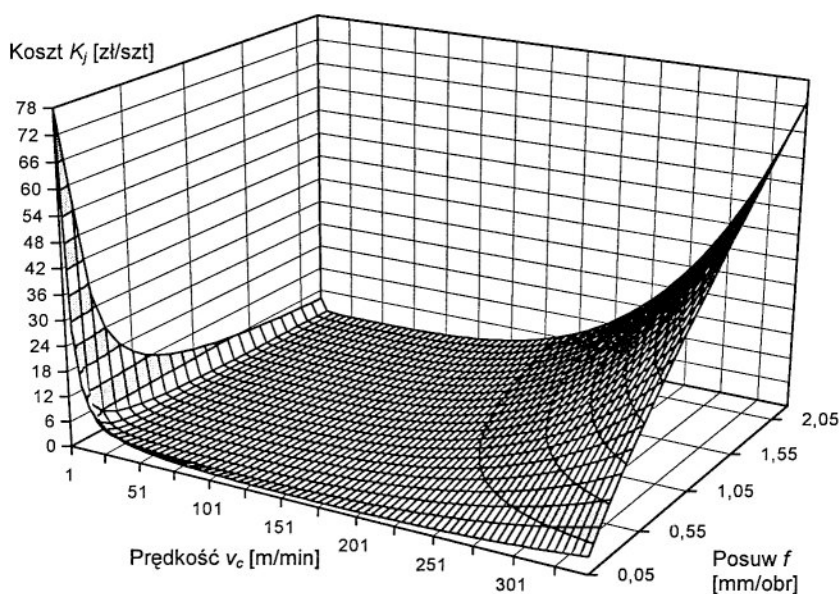
Największe „uskoki”, a zarazem odchylenia między obu funkcjami, występują dla małych wartości stosunku T_c/t_s , czyli dla małej liczby operacji wykonywanych w ciągu okresu trwałości narzędzia. W skrajnym przedziale, dla $1 < T_c/t_s < 2$, funkcja $1/\text{entier}[T_c/t_s]$ ma stałą wartość równą 1. Gdy wartość stosunku T_c/t_s zbliża się do 2, wówczas funkcja zamiast zdążać do wartości 0,5, jak w tradycyjnej funkcji, w dalszym ciągu utrzymuje się na poziomie 1. Tak więc, jeśli oblicza się wartości funkcji czasu lub kosztów wytwarzania z klasycznych wzorów, a narzędzia są wymieniane wtedy, gdy okres trwałości resztkowej jest mniejszy niż czas wykonania następnej operacji, to można popełnić dość znaczne błędy, gdyż te człony funkcji, o których była mowa, mogą mieć w rzeczywistości wartości większe nawet o 100%. Należy także pamiętać, że funkcja t_{sz} ma jeden człon z przebiegiem schodkowym, a funkcja K_j dwa takie człony (ten pierwotny jest zawarty w funkcji t_{sz} , która jest składnikiem funkcji K_j).

W miarę zwiększania się liczby przedmiotów, wykonywanych w jednym okresie trwałości, wartość zakłóceń i związanych z tym uskoków funkcji maleje. Dla $T_c/t_s = 50$ zakłócenia wynoszą już tylko 2%, a gdy $T_c/t_s > 100$, niedokładności w określaniu funkcji tradycyjnymi wzorami są mniejsze niż 1%.

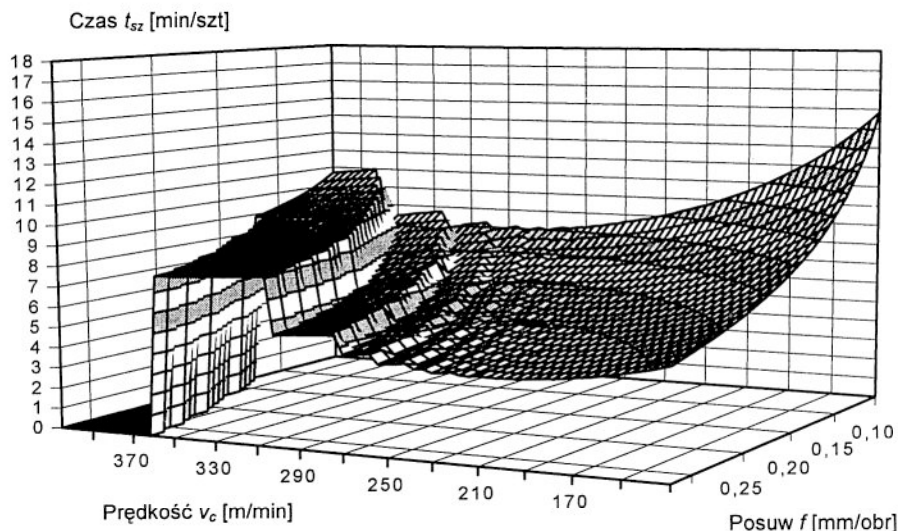
W jakim stopniu wspomniane nieciągłości funkcji mogą wpływać na wartość całej funkcji, a nie tylko jej poszczególnych członów, omówiono w dalszej części monografii podczas rozpatrywania procentowych udziałów poszczególnych składników badanych funkcji.



Rys. 4.3. Przebieg funkcji czasu wykonania operacji dla szerokiego zakresu zmian parametrów skrawania
 Fig. 4.3. Form of operation-time function for a wide range of variations in cutting parameters

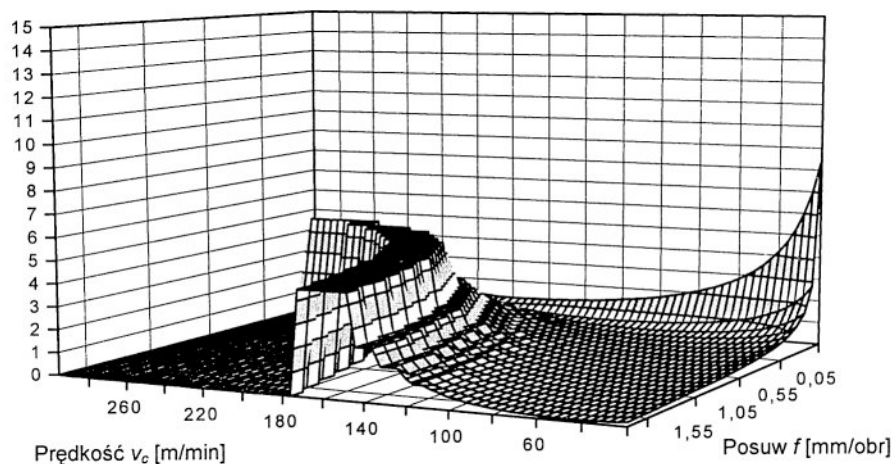


Rys. 4.4. Przebieg funkcji kosztów wykonania operacji dla szerokiego zakresu zmian parametrów skrawania
 Fig. 4.4. Form of operation-cost function for a wide range of variations in cutting parameters

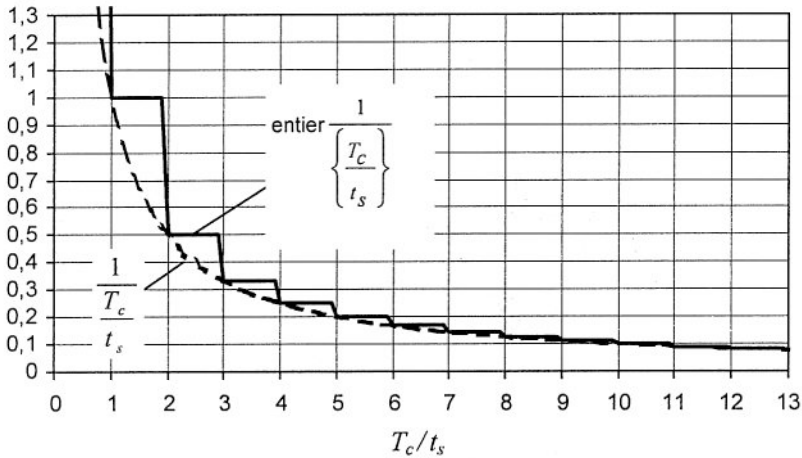


Rys. 4.5. Nieciągłości funkcji czasu wykonania operacji spowodowane koniecznością wymiany nie w pełni zużytego narzędzia, np. gdy okres trwałości reszkowej jest krótszy niż czas użycia narzędzia w kolejnej operacji
 Fig. 4.5. Discontinuities of operation time function due to the necessity of changing a not fully worn tool, e.g. when residual tool lifetime is shorter than the tool's application time in next operation

Koszt K_f [zł/szt]



Rys. 4.6. Nieciągłości funkcji kosztów wykonania operacji spowodowane koniecznością wymiany nie w pełni zużytego narzędzia, np. gdy okres trwałości reszkowej jest krótszy niż czas użycia narzędzia w kolejnej operacji
 Fig. 4.6. Discontinuities of operation cost function due to the necessity of changing a not fully worn tool, e.g. when residual tool lifetime is shorter than the tool's application time in next operation



Rys. 4.7. Porównanie funkcji $1/(T_c/t_s)$ i $1/\text{entier}\{T_c/t_s\}$
 Fig. 4.7. Comparison of function $1/(T_c/t_s)$ and $1/\text{entier}\{T_c/t_s\}$

Kolejną nieciągłość funkcji celu, tym razem już tylko funkcji kosztów określanych wzorem (4.15), wywołuje jej człon przedstawiony tu oddzielnie zależnością (4.25):

$$\frac{K_{N(i)}}{\lambda_T n_{sz}} \left\{ \text{entier}^{(+1)} \left[\frac{n_{sz}}{\left\{ \text{entier} \left[\frac{T_{c(i)}}{t_{s(i)}} \right] \right\} \vee \left\{ \frac{T_{c(i)}}{t_{s(i)}} \right\}} \right] \right\}. \quad (4.25)$$

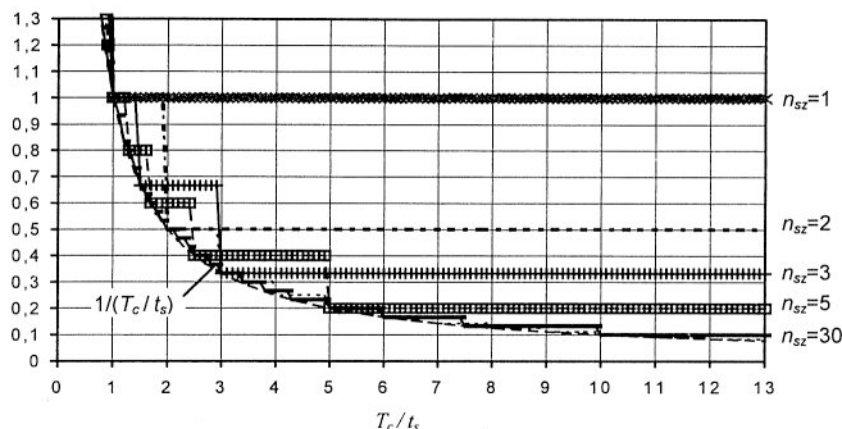
Człon ten jest także funkcją schodkową i to, w niektórych przypadkach, nawet podwójnie. Przypomnijmy, że funkcją $\text{entier}^{(+1)}[\dots]$ uwzględnia się sytuację, w której ostatnie z narzędzi siostrzanych (w skrajnym przypadku jedno) nie zostało w pełni zużyte po wykonaniu ostatniego z przedmiotów w partii wyrobów, a pozostałego okresu trwałości resztkowej nie opłaca się, lub nie potrafi się, spożytkować w innym zadaniu obróbkowym.

Przebieg uskoków członu (4.25) funkcji (4.15) w alternatywnej jego wersji, gdy w mianowniku występuje $\text{entier}[T_c/t_s]$, przedstawiono na rys. 4.8.

Również i na tym wykresie naniesiono linią przerywaną jak zmieniałby się ten człon funkcji kosztów, gdyby określać go z tradycyjnego wzoru $\{1/(T_c/t_s)\}$. Jak widać z zależności przedstawionych na rys. 4.8, największy wpływ na zakłócenia funkcji kosztów ma liczba sztuk w partii wyrobów. I tak, jeśli jest wykonywany, np. awaryjnie, tylko jeden przedmiot ($n_{sz} = 1$), to wartość jednostkowa składnika kosztów narzędziowych $K_{N(i)}$ będzie utrzymywała się na stałym poziomie równym 1, niezależnie od liczby operacji możliwych do wykonania w okresie trwałości T_c/t_s . Zakłócenie to będzie zwiększało się zatem wraz ze zwiększaniem się liczby przedmiotów obrabianych przez narzędzie w ciągu okresu trwałości

ści. Dla wartości $T_c/t_s = 2$ udział jednostkowy kosztów $K_{N(i)}$ będzie wynosił nie 0,5 ale 1, czyli będzie większy o 100%, a dla $T_c/t_s = 10$ udział ten będzie miał wartość nie 0,1, lecz w dalszym ciągu jeden 1, czyli wzrośnie aż o 1000%. Jest to całkiem zrozumiałe, jeśli bowiem wykonuje się tylko jeden przedmiot narzędziem, które może obrobić ich znacznie więcej (tutaj np. 10), to koszty jednego okresu trwałości $K_{N(i)}$ pozostają takie same, i są odnoszone one tylko do jednego przedmiotu, a nie do $T_c/t_s = 10$ przedmiotów. W takiej sytuacji można mówić o bardzo nieracjonalnym wykorzystaniu narzędzia.

Entier $\{n_{sz}/\text{entier}[T_c/t_s]\}/n_{sz}$



Rys. 4.8. Nieciągłość członu funkcji kosztów wywołana niewykorzystaniem trwałości resztkowej ostatniego z narzędzi siostrzanych, kończącego wykonywanie operacji ostatniego przedmiotu w partii wyrobów

Fig. 4.8. Discontinuity of the cost function component resulting from residual lifetime not having been fully used up for the last of twin tools that finishes execution of operation on the last workpiece in a batch

Zastosowanie w procedurze optymalizacyjnej zależności (4.15) spowoduje dla rozpatrywanego przykładu, jeśli pozwolą na to ograniczenia, takie zwiększenie parametrów skrawania, żeby narzędzie zużyło się po wykonaniu zadania. Pozwolić to może na znaczne zmniejszenie kosztów wytwarzania i na jednocześnie zwiększenie wydajności obróbki.

Jak wynika z zależności prezentowanych na rys. 4.8, a także z analiz numerycznych, udział kosztów wywołanych niewykorzystaniem okresu trwałości resztkowej ostatnich z narzędzi siostrzanych (takich samych koniecznych do wykonania zadania obróbkowego), w koszcie operacji maleje w miarę zwiększania się liczby przedmiotów w partii wyrobów n_{sz} , gdyż rozkłada się na coraz większą liczbę przedmiotów. I tak, jeśli $n_{sz} > 50$ sztuk, to analizowany przez nas człon funkcji kosztów przybiera wartości niemal zbliżone do tych określanych z zależności (4.13) i to niezależnie od opcjonalnego jej wariantu, występującego w mianowniku jako $\text{entier}[T_c/t_s] \vee [T_c/t_s]$. Jednak nawet dla bardzo dużych partii wyrobów mogą występować znaczne błędy w określaniu kosztów wytwarzania wtedy, gdy narzędzia wymienia się uprzedzająco z powodu niewystarczającej trwałości resztkowej. Błędy te wynikają z przyczyn, o których już wcześniej wspomniano, że w zależności (4.15) występować mogą dwie funkcje schodkowe $\text{entier}^{(+1)}$ i entier . Zatem, jeśli taki przypadek nastąpi, to w zależności tej występują dwie linie nieciągłości. Obie przebiegają w układzie

współrzędnych $v_c - f$ w miejscach, w których znajdują się linie całkowitych wartości stosunków T_c/t_s i $n_{sz}/(T_c/t_s)$. Linie „uskoków” funkcji kosztów, wywołane obu przyczynami, przebiegają w płaszczyźnie $v_c - f$ niemal równolegle do siebie.

Na rysunkach 4.5 i 4.6 widać z lewej strony wykresów obszar, w którym po kolejnej nieciągłości funkcje przybierają wartości nieokreślone. Nieokreśloność funkcji powstaje w wyniku tego, że pewne człony funkcji czasu i kosztów wytwarzania są dzielone przez $\text{entier}[T_c/t_s]$, która przyjmuje wartości równe zero dla $T_c/t_s < 1$. Oznacza to, że okres trwałości jest tak krótki, lub sumaryczny czas skrawania danym narzędziem w operacji tak długi, że nie można wykonać nawet jednego przedmiotu.

Na podstawie analizy oraz obserwacji przedstawionych na rysunkach kształtów funkcji czasu i kosztów wytwarzania można stwierdzić, że wszystkie te funkcje nie są funkcjami wypukłymi, a część z nich ma nieciągłości. Eliminuje to wiele procedur optymalizacyjnych wrażliwych na te właściwości.

Jak wykazały przedstawione rozważania, zaproponowane funkcje celu lepiej przybliżają do rzeczywistości szacowanie kosztów i czasów wykonania operacji. Potwierdzone to zostanie także w kolejnych rozdziałach, w których zostanie wyliczony procentowy udział poszczególnych składników funkcji celu, w tym także wzrost dokładności funkcji celu.

Uskoki funkcji celów, powstające w miejscach ich nieciągłości, zawsze pogarszają efektywność wytwarzania, tzn. zwiększają czas i koszty wytwarzania. Dlatego powinno się dążyć do tego, aby wpływ ich był jak najmniejszy. Takimi działaniami mogą być próby wykorzystania trwałości reszkowych narzędzi wszędzie tam, gdzie jest to możliwe i uzasadnione. Prowadzić to będzie bowiem zawsze do wyeliminowania lub zmniejszenia uskoków funkcji. Jednak wykorzystywanie za wszelką cenę trwałości reszkowych narzędzi może prowadzić do takiego zwiększenia kosztów (nadzorowanie, przesyłanie, gromadzenie i przetwarzanie informacji itp.), że nie zostanie to zrekompensowane możliwością określenia korzystniejszego stanu obiektu w wyniku swobodniejszego przemieszczania się w przestrzeni czynnikowej. Zwłaszcza, że właściwie przeprowadzona optymalizacja parametrów skrawania powinna pozwalać na wybór najkorzystniejszego stanu obiektu, który znajduje się zazwyczaj w „bruździe” w pobliżu linii nieciągłości, a więc w miejscu, gdzie niekorzystne „uskoki” funkcji mają najmniejsze wartości.

5. OPTYMALIZACJA PARAMETRÓW SKRAWANIA

Pierwszym etapem budowy modelu matematycznego całego zadania optymalizacyjnego jest jego matematyczne sformułowanie, a następnym określenie jego właściwości strukturalnych, umożliwiających podział na zbiór mniejszych, powiązanych ze sobą, zadań lokalnych. Kolejnym krokiem jest dobór koncepcji i metod optymalizacji dla poszczególnych zadań.

W stosowaniu procedur optymalizacyjnych nie ma znaczenia czy jest stosowana funkcja czasu, czy kosztów obróbki, czy też ich kombinacja liniowa, określona wzorem (2.11), co wykazano w rozdz. 4 podczas omawiania tych funkcji. Mają one bowiem taką samą postać matematyczną względem zmiennych parametrów skrawania. Ze względu na główny cel pracy, jakim jest analiza możliwości zwiększania efektywności wytwarzania na tokarkach NC, nie jest istotne czy bada się problem jedno- czy wielokryterialnie. Jeśli bowiem potrafi się wskazać odrębnie możliwość zwiększania wydajności i obniżenia kosztów, to wnioski wyciągnięte na tej podstawie będą takie same jak po dokonaniu analizy na podstawie funkcji wielokryterialnych z zastosowaniem całej gamy współczynników wagowych. Odpadnie też problem, jaki występuje podczas stosowania polioptymalizacji, którym jest racjonalne uzasadnienie wyboru owych współczynników wagowych dla poszczególnych kryteriów. Ponadto, aby dokonywać szerokich analiz wielokryterialnych, należy uwzględnić także skrajne wartości przedziału, w jakich jest zawarty współczynnik β ze wzoru (2.11), a mianowicie liczby 0 i 1. A przecież dla tych wartości zadanie wielokryterialne staje się zadaniem jednokryterialnym. Z tego powodu, że w dalszych rozważaniach w tej pracy wyłączono z analiz polioptymalizację. Zagadnieniu temu poświęcono dużo uwagi w wielu pracach, a w ostatnich latach szczególnie wnikliwie przedstawiono je m.in. w monografiach Szadkowskiego [251] i Szwabowskiego [258].

5.1. METODYKA OPTYMALIZACJI PARAMETRÓW SKRAWANIA

Proponując metodykę optymalizacyjną, trzeba przedstawić funkcję celu, podać sposób uwzględniania ograniczeń nakładanych na obszar dopuszczalnych rozwiązań, a także wybrać procedurę określania optymalnego stanu obiektu i ewentualnie podać zasady dekompozycji zadania optymalizacyjnego, jeśli taka występuje.

5.1.1. FUNKCJE CELU

Funkcja celu ma odzwierciedlać kryterium optymalizacji. Przyjęto, że kryteriami tymi będą najkrótszy czas wykonania operacji i najmniejsze koszty wytwarzania. Jako funkcje celów można zastosować zależności określające wskaźniki ekonomiczne, które przedstawiono w rozdz. 4. Funkcje czasu t_{sz} i kosztów K_j (patrz np. wzory (4.3) i (4.15)) zawierają również składniki niezależne od optymalizowanych parametrów skrawania i w związku z tym można by je pominąć w funkcjach celu. Jednak uwzględnianie ich nie spowalnia za-

uważalnie procedur obliczeniowych, a stwarza tak korzystną sytuację, że w kolejnych krokach procedury optymalizacyjnej, a także po jej zakończeniu, są podawane realne, rzeczywiste wartości czasów i kosztów wykonania operacji, co może mieć znaczenie np. dla bieżącego porównywania różnych operacji czy wariantów procesu technologicznego.

Analizując przedstawione w poprzednim rozdziale funkcje do określania czasu i kosztów wykonania operacji łatwo zauważyć, że składają się one z kilku sum. Jak już wspomniano, ze względu na proces optymalizacyjny najistotniejsze są te człony, które zależą od parametrów skrawania, a więc dla czasu obróbki będą to sumy czasów maszynowych, jakie wykonują i -te narzędzia w i -tych przejściach $\Sigma t_{g(ij)}$ oraz sumy czasów związanych z wymianą, określaniem korekcy, diagnozowaniem i -tych narzędzi, odniesione do jednej operacji $\Sigma(\Sigma t_{zn}/(T_c/t_s))$. W przypadku funkcji kosztów dochodzą jeszcze człony z kosztami „jednego okresu trwałości” $K_{M(i)}$ i -tych narzędzi, odniesione także do jednej operacji. Ponieważ są to funkcje addytywne względem poszczególnych narzędzi, więc można rozpisać je na kolejne elementarne składniki związane z i -tymi narzędziami. Dlatego można niezależnie od siebie optymalizować parametry skrawania dla poszczególnych narzędzi, a optymalne parametry dla poszczególnych narzędzi będą również optymalne dla całej operacji. Taka dekompozycja funkcji czasu i kosztów wytwarzania operacji na funkcje cząstkowe, odnoszące się do poszczególnych narzędzi, pozwala na znaczne uproszczenie procedury optymalizacji.

Często podczas wytwarzania na OSN-ach dla tego samego narzędzia, w różnych zabiegach, występują różne ograniczenia. I tak, dla przejść kształtujących i wykańczających, ograniczenia co do wymaganej chropowatości po obróbce zazwyczaj różnią się między sobą. Wygodnie byłoby więc dokonać dalszej dekompozycji funkcji celu na poszczególne zabiegi. Jednak nie jest to możliwe, ponieważ warunki pracy w poszczególnych zabiegach oddziałują na globalną trwałość ostrza, która determinuje, ile operacji można wykonać danym narzędziem, zanim zostanie ono stępione.

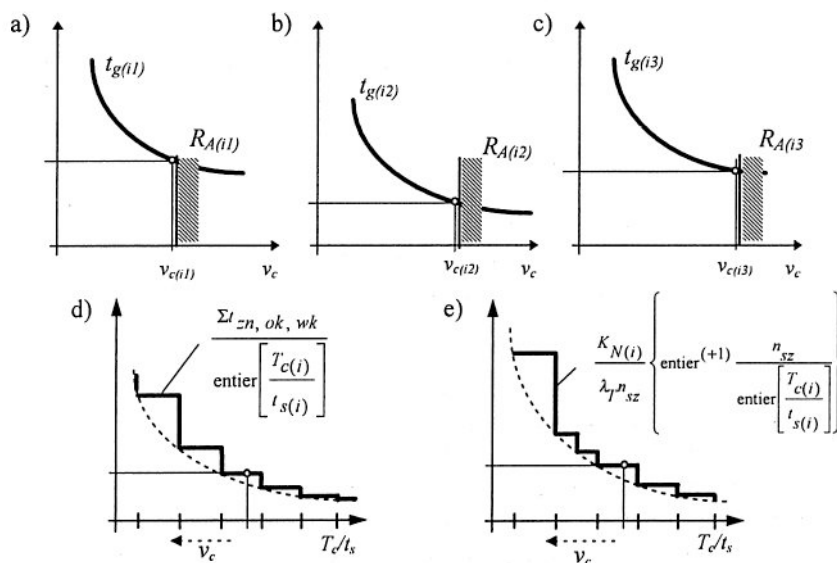
Tak więc po zdekomponowaniu funkcji czasu i kosztów wytwarzania, tak aby stały się one funkcjami celu, można zauważyć, że budowa ich uprościła się o człony odpowiedzialne za sumowanie czasów pracy wszystkich narzędzi. Zadanie optymalizacyjne stanie się podobne do sytuacji, w której dokonujemy wielu oddzielnych optymalizacji dla obróbek jednonarzędziowych, jedno- lub wielozabiegowych. Przykładowo, dla obróbki z szeregową pracą narzędzi, wzór (4.3) określający czas operacji będzie miał postać

$$t_{sz(i)} = \frac{t_{pz}}{n_n n_{sz}} + \lambda_z \left[\frac{\lambda_{ws} \sum_{r=1}^o (t_{p(r)} - t'_{p(r)})}{n_n} + \frac{\sum_{q=1}^s (t_{pNC(q)} - t'_{pNC(q)})}{n_n} + \sum_{u=1}^w (t_{rd(iu)} - t'_{rd(iu)}) \right] + \frac{t_{dn(i)} - t'_{dn(i)}}{n_{szdn(i)}} + \sum_{j=1}^m t_{g(ij)} + \lambda_{ws} \frac{t_{zn(i)} - t'_{zn(i)} + (t_{ok(i)} - t'_{ok(i)})\epsilon_{ok(i)} + (t_{wk(i)} - t'_{wk(i)})\epsilon_{wk(i)}}{\lambda_T \times \left\{ \text{entier} \frac{T_{c(i)}}{t_{s(i)}} \right\} \vee \left\{ \frac{T_{c(i)}}{t_{s(i)}} \right\}} \right] (1 + k_u), \quad (5.1)$$

a wzór (4.15) określający koszty jednostkowe wytwarzania przekształci się w zależność

$$K_{j(i)} = \frac{K_m + \lambda_L K_{Lm}}{60} t_{sz(i)} + \frac{K_{N(i)}}{\lambda_T n_{sz}} \left\{ \text{entier}^{(+1)} \left[\frac{n_{sz}}{\left\{ \text{entier} \left[\frac{T_{c(i)}}{t_{s(i)}} \right] \right\} \vee \left\{ \frac{T_{c(i)}}{t_{s(i)}} \right\}} \right] \right\}. \quad (5.2)$$

Wzór (5.1), w porównaniu ze wzorem (4.3), został zmieniony dodatkowo w ten sposób, że czasy przygotowawczo-zakończeniowe i pomocnicze podzielono przez liczbę narzędzi n_n wykorzystywanych w operacji. Oznacza to, że we wzorze tym całkowity czas operacji został odniesiony do jednego narzędzia. Aby określić rzeczywisty czas całej operacji, wystarczy zsumować czasy pracy poszczególnych narzędzi. Podobnie będzie z kosztami jednostkowymi operacji. Chcąc użyć jako funkcji celu innych funkcji t_{sz} i K_j , przynależnych różnym innym wariantom pracy narzędzi i rozwiązaniom konstrukcyjnym obrabiarek, które zaprezentowano w rozdz. 4, należałoby funkcje te przekształcić analogicznie jak we wzorach (5.1) i (5.2).



Rys. 5.1. Składniki funkcji czasu i kosztów wytwarzania dla operacji 3-zabiegowej
Fig. 5.1. Components of manufacturing time/cost function for three-process machining

Funkcje celu da się graficznie przedstawić w tym przypadku, gdy narzędzie wykonuje jeden zabieg w kilku przejściach, a więc wtedy, gdy są one w miarę proste (rys. 4.3–4.6). Dla operacji wielozabiegowej przedstawienie graficzne takich funkcji na jednym wykresie staje się niemożliwe ze względu na wielowymiarowość zadania. Próbę zobrazowania budowy i składników funkcji celu dla operacji 3-zabiegowej, po uproszcze-

niu zadania w taki sposób, aby funkcje celu zależały tylko od prędkości skrawania, przedstawiono na rys. 5.1.

Czas t_{sz} wykonania operacji 3-zabiegowej, oprócz stałych niezależnych związanych z czasami t_{pz} , t_p , t_{rd} , t_{dm} , będzie się składał z sumy czasów maszynowych (rys. 5.1a–c) oraz czasów $t_{zn,ok,wb}$ odniesionych do całkowitej liczby przedmiotów obrobionych w okresie trwałości narzędzia (rys. 5.1d).

Koszt jednostkowy K_j (wzór (5.2)) składa się z kosztów stanowiska roboczego i wynagrodzenia pracownika, obciążonych czasem t_{sz} , oraz kosztów jednego okresu trwałości, odniesionego do całkowitej liczby narzędzi zaokrąglonej „w górę” (rys. 5.1e), potrzebnych do wykonania całej partii wyrobów n_{sz} .

Dla każdego z zabiegów może być dobrana inna prędkość skrawania, np. ze względu na możliwość wystąpienia różnych ograniczeń aktywnych $R_{A(ij)}$. Utrudnia to nie tylko graficzne przedstawienie funkcji $t_{sz} = f(v_c)$, ale także przeprowadzanie procedur optymalizacyjnych. Zadanie to jeszcze bardziej się komplikuje, gdy uwzględną się większą liczbę zmiennych, gdyż każda ze zmiennych, w poszczególnych zabiegach, występować może na różnych poziomach.

5.1.2. OGRANICZENIA

Jak już wielokrotnie wspomniano, ekstremum funkcji zarówno kosztów, jak i czasu obróbki, leży zazwyczaj poza obszarem dopuszczalnych rozwiązań. Dlatego też rola ograniczeń jest jednym z kluczowych zagadnień podczas wyznaczania optymalnych parametrów skrawania.

Do najczęstszych ograniczeń, na których zatrzymuje się proces optymalizacyjny, należą w przypadku **obróbki zgrubnej i kształtującej**:

R_{pe} – dopuszczalna moc efektywna na wrzecionie,

R_{wib} – zakres stabilnej pracy obrabiarki,

R_{VBk} – możliwość zużycia katastroficznego narzędzia w trudnych warunkach, np. w przypadku skrawania przerywanego lub wad powierzchniowych półfabrykatu,

R_w – niekorzystna postać wiórów,

R_{el} – podatność i wytrzymałość elementów układu OUPN,

a ponadto, w przypadku **obróbki wykańczającej**:

R_{ww} – jakość warstwy wierzchniej przedmiotu,

R_{dokl} – dokładność wymiarowo-kształtowa po obróbce,

R_{nwr} – maksymalna prędkość obrotowa wrzeciona itp.

Dodatkowo do ograniczeń, jakie powinna spełnić procedura optymalizacyjna, dodać można:

R_{nn} – maksymalną liczbę narzędzi „siostrzanych”, której można użyć do wykonania partii wyrobów.

To ostatnie ograniczenie może być podyktowane stanem zapasów w wydziałowym magazynie narzędzi lub ograniczoną liczbą miejsc w magazynie narzędziowym obrabiarki, a obróbka odbywa się bezobsługowo lub z ograniczonym nadzorem.

Te i inne ograniczenia oraz warunki powinny być zapisane w postaci matematycznej, by procedury optymalizacyjne mogły je uwzględnić.

5.1.3. PROCEDURA OPTIMALIZACYJNA

Do niedawna wybór i określenie procedury optymalizacyjnej były zadaniami dość złożonymi i skomplikowanymi, a ponadto wymagały najczęściej samodzielnego pisania programów komputerowych, by sama optymalizacja mogła być efektywniej i sprawniej przeprowadzana [35, 85, 107, 258]. Obecnie dużą pomocą są gotowe, komercyjne, optymalizacyjne programy komputerowe, opracowywane profesjonalnie przez duże zespoły informatyków. Trzeba tylko umiejętnie, w zależności od potrzeb, wybrać najbardziej przydatny z programów i sprawdzić jego skuteczność w tych warunkach, w jakich ma on być stosowany.

Uwzględniając wszystkie uwarunkowania i założenia, które przedstawiono w p. 5.1.1 i 5.1.2, a także funkcje celu i możliwe do wystąpienia ograniczenia, zdecydowano się na napisanie własnego programu optymalizacyjnego, wykorzystując do tego celu program SOLVER firmy Microsoft, który współpracuje z programem EXCEL7.0 tej samej firmy. Programy te działają niezwykle efektywnie korzystając z wielu znanych procedur optymalizacyjnych, łącząc je w całość lub wykorzystując opcjonalnie, zależnie od specyfiki zadania optymalizacyjnego. Do metod tych należą między innymi metody: nieliniowe, mnożników Lagrange'a, gradientów sprzężonych, pochodnych centralnych i brzegowych, proporcjonalne, iteracyjne, a także metody losowe. Napisany program działa dość skutecznie nawet w przypadku niewypukłych funkcji celu, a ponadto może uwzględniać do stu ograniczeń nieliniowych.

Można w nim, oprócz ograniczeń zewnętrznych, wyznaczających obszar dopuszczalnych rozwiązań, wprowadzać **dodatkowe warunki „wewnętrzne”**, które powinny być bezpośrednio lub pośrednio spełnione przez wyznaczane optymalne parametry skrawania. Może to być np. wspomniana maksymalna liczba narzędzi siostrzanych użytych w zadaniu produkcyjnym, założona z góry (co najmniej lub równa) liczba przedmiotów wykonanych w okresie trwałości, określona trwałość narzędzia, skończona całkowita liczba narzędzi potrzebna do wykonania dowolnej, sprecyzowanej liczby przedmiotów itp.

Program optymalizacyjny umożliwia śledzenie kolejnych kroków iteracyjnych, dla których podaje wartości optymalizowanych parametrów i odpowiadającą im wartość funkcji celu. Jest bardzo łatwy w obsłudze, a pracując w środowisku Windows pod programem EXCEL, pozwala na stosowanie wszystkich ułatwień i udogodnień, jakie te oprogramowania oferują.

Tworząc procedurę optymalizacyjną, konstruowano ją w ten sposób, aby można było dla każdego z zabiegów wykonywanych danym narzędziem przyjąć takie same bądź inne ograniczenia i warunki, a także zakładać ograniczenia globalne, obowiązujące dla całej operacji, którymi mogą być, np. moc efektywna na wrzecionie, maksymalna prędkość obrotowa wrzeciona itp.

Pewną wątpliwość może budzić optymalizacja z użyciem funkcji celów, w których są zawarte funkcje entier i entier⁽⁺¹⁾. Występują one wtedy, kiedy teoretyczna liczba narzędzi koniecznych do wykonania partii wyrobów przekroczy nieznacznie wartość liczby całkowitej i wyniesie np. 5,001. Wówczas na podstawie procedury obliczeniowej, korzystającej np. ze wzoru (5.2), można wyliczyć konieczną liczbę narzędzi 6 i określić dla niej koszty. W praktyce, ze względu na przyjmowane marginesy bezpieczeństwa dla ograniczeń brzegowych, można by uznać, że wystarczy użyć tylko 5 narzędzi, gdyż ryzyko powstania braku jest w takim przypadku niewielkie. W programie optymalizacyjnym uwzględniono taką

sytuację poprzez możliwość ustawiania dowolnej dokładności zaokrąglania do liczby całkowitej wartości obu funkcji (entier i entier⁽⁺¹⁾). W prowadzonych w tej pracy badaniach optymalizacyjnych dokładność tę przyjęto na poziomie 5%.

Z procedury optymalizacyjnej wyłączono jeden z parametrów skrawania, a mianowicie głębokość, kierując się takimi samymi przesłankami, jakie można spotkać w większości prac z tej tematyki, w tym również w wielu pracach własnych autora. Do przesłanek tych należą następujące przypadki:

- spośród parametrów skrawania głębokość wpływa najsilniej na wydajność, a w bardzo niewielkim stopniu oddziałuje na trwałość narzędzia, i w związku z tym należy dobierać ją jako największą z możliwych w danych warunkach
- głębokość skrawania najczęściej jest zdeterminowana w obróbce zgrubnej wielkością nadatku oraz mocą dopuszczalną na wrzecionie, wytrzymałością i wymiarami ostrza, a w obróbce wykańczającej małą wartością przyjmowanego nadatku, co wynika z konieczności zmniejszenia siły odporowej skrawania, decydującej o odkształceniach układu OUPN, a tym samym o dokładności skrawania
- wyłączenie głębokości skrawania w znacznym stopniu upraszcza procedury optymalizacyjne, zmniejsza bowiem wielowymiarowość zadania, co jest ważnym argumentem ze względu na to, że funkcje celu są dość złożone i odznaczają się nieciągłościami i obszarami nieoznaczoności.

Pomimo wyłączenia głębokości skrawania z kręgu optymalizowanych parametrów, zaproponowana metodyka pozwala na dokonanie analizy wpływu na czas i koszty wytwarzania, większej niż to konieczne, liczby przejść narzędzia w poszczególnych zabiegach. Zrobić to można przez niezależne określanie optymalnych parametrów skrawania dla różnej liczby przejść narzędzia i wybór najkorzystniejszego wariantu. Z teoretycznego punktu widzenia nie jest to zbyt skomplikowane, wariantów takich jest bowiem zazwyczaj niewiele, gdyż odnoszą się one np. do jednego, dwóch lub co najwyżej kilku przejść obróbkowych. Aby jednak sprawdzić te warianty w praktycznych warunkach, należałoby napisać za każdym razem nowe programy NC, aby wiedzieć na ile zmieniają się inne stałe, które nie mają bezpośredniego związku z parametrami skrawania, ale oddziałują na wartość funkcji celu. Do stałych tych mogą należeć np. czasy zmienionych lub dodatkowych: „jałowych” powrotnych przejść narzędzia, ruchów dosuwowych, rozpędzania się i hamowania wrzecion oraz czynności pomocniczych.

Jak wspomniano, zużywanie się ostrza skrawającego może podlegać działaniom procesów stochastycznych. Uwzględnienie probabilistycznego charakteru trwałości narzędzia w modelach matematycznych operacji jest dość proste i zostało już metodycznie rozwiązane, na co zwrócono uwagę w rozdz. 2. W przyjętej w pracy procedurze optymalizacyjnej uwzględniono jednak deterministyczny model trwałości narzędzia. Kierowano się następującymi przesłankami:

Warunkiem stosowania probabilistycznego modelu operacji jest znajomość funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa okresu trwałości ostrza w konkretnych, zazwyczaj bardzo złożonych, warunkach pracy narzędzi na OSN-ach. Parametrów rozkładu funkcji gęstości nie można przewidzieć w sposób teoretyczny. Aby je określić, trzeba albo przeprowadzić laboratoryjnie badania doświadczalne w warunkach możliwie maksymalnie zbliżonych do produkcyjnych, lub korzystniej, zbierać wyniki badań bezpośrednio w wa-

runkach przemysłowych. Badania takie, aby mogły odznaczać się odpowiednio dużą wiarygodnością, muszą obejmować dość długie okresy pracy narzędzi, a ponadto muszą być ciągle uwiarygodniane z powodu, możliwej do wystąpienia w czasie, zmiany skrawalności półwyrobów oraz właściwości skrawanych narzędzi. Prowadzenie zatem takich badań, mających na celu stosowanie bardziej dokładnych, probabilistycznych modeli funkcji celu, może mieć uzasadnienie jedynie w produkcji wielkoseryjnej i masowej. Tokarki NC, których praca ta dotyczy, są wykorzystywane na ogół w produkcji o znacznie mniejszej skali, dla której w wielu przypadkach czas trwania zlecenia produkcyjnego byłby niewystarczający do wyestymowania parametrów rozkładu funkcji gęstości.

Pewnym przybliżeniem funkcji celów (wzory (4.3) i dalsze) do modeli probabilistycznych jest zastosowanie w nich współczynnika λ_T , przez który mnoży się występujący w nich okres trwałości narzędzia T_c . Ten swoisty „współczynnik bezpieczeństwa”, mniejszy od jedności, uwzględnia możliwość szybszego zużycia się narzędzia niż to wynika z przeciętnych warunków obróbki.

5.1.4. WSPOMAGANA KOMPUTEROWO ANALIZA PROGRAMÓW NC W CELU POZYSKIWANIA DANYCH DO OPTYMALIZACJI

Podczas planowania zadań obróbkowych na obrabiarkach sterowanych numerycznie występują trudności z określeniem rzeczywistego czasu pracy poszczególnych narzędzi skrawających. Często te same narzędzia skrawają wielokrotnie podczas realizacji jednego programu obróbkowego i to na ogół ze zmiennymi parametrami skrawania. Uniemożliwia to szybkie określenie okresu trwałości narzędzia, a także trwałości resztkowej, jaka narzędziu pozostaje do dyspozycji po wykonaniu jednego wyrobu lub określonej ich liczby.

Niektóre układy sterowania mają co prawda moduł programowy do zliczania sumarycznego czasu pracy poszczególnych narzędzi, ale nie potrafi on określić, w jakich okresach i z jakimi parametrami narzędzia pracowały.

Coraz częściej pisanie programów NC odbywa się z silnym wspomaganie komputerowym, a nawet jest tworzone na podstawie rysunku przedmiotu niemal bez udziału człowieka. W takich wypadkach analiza programu NC, mająca na celu wyszukiwanie danych potrzebnych do wyliczania funkcji celu, może nastroić kłopoty, jeśli nie jest wykonywana automatycznie za pomocą jakiegoś innego programu wspierającego, lecz odbywa się manualnie.

Biorąc pod uwagę przedstawione utrudnienia w pozyskiwaniu danych, szczególnie tych, które są niezbędne w stosowaniu optymalizacji parametrów skrawania, starano się niektóre z tych niedogodności przezwyciężyć lub przynajmniej uczynić je mniej dokuczliwymi. Dlatego też opracowano program komputerowy CEZET, który pozwala na automatyczną analizę programów NC w celu pozyskania informacji dotyczących czasów pracy i parametrów skrawania, z jakimi pracują poszczególne narzędzia skrawające. Po wprowadzeniu dodatkowo do programu CEZET zależności funkcyjnej zużycia ostrza od parametrów skrawania, i czasu pracy ($VB = f(v_c, f, a_p, t)$) możliwe jest wyznaczenie nie tylko czasu pracy ostrza, lecz także stopnia jego zużycia i trwałości resztkowej narzędzia.

Wyznaczanie czasu pracy i zużycia narzędzi pracujących na OSN-ach

Działanie programu NC sterującego pracą obrabiarek numerycznych polega na realizacji kolejnych zadań zawartych w blokach. Struktura programu, znaczenie liter i cyfr są określone w normie ISO/R 1058–1969.

Blok danych składa się z wielu słów, rozpoczynających się od znaku adresowego. Znaków oznaczonych literami może być 29.

Program NC może zawierać następujące instrukcje [131, 151, 215]:

1. **Instrukcje geometryczne**, za pomocą których są sterowane ruchy narzędzia lub przedmiotu. Reprezentują je adresy X,Y,Z,A,B,C,W, ... Cyfry występujące po nich oznaczają przemieszczenia lub współrzędne w określonych osiach, np. X 200 oznacza przemieszczenie w kierunku osi x o wartość 200 mm lub współrzędną $X = 200$ mm.
2. **Instrukcje technologiczne**, dotyczące prędkości posuwu (adres F), prędkości obrotowej (adres S) i numeru narzędzia (adres T), np. F 210 oznaczać może prędkość posuwu 210 mm/min, S 100 prędkość obrotową wrzeciona 1000 obr/min, T 01 numer narzędzia lub pozycji głowicy, w której jest ono zamocowane itp.
3. **Instrukcje pomocnicze i przygotowawcze** dotyczą około 35 instrukcji geometrycznych (G00–G99), np. G00 oznacza przesuw szybki.
4. **Instrukcje pomocnicze** dotyczą około 23 czynności technologicznych (M00–M67), np. M 03 oznacza włączenie prawych obrotów wrzeciona.
5. **Instrukcje aktywacji korekcji narzędzi (D)**.
6. **Instrukcje aktywacji cykli obróbkowych i podprogramów**, itp.

Znaki adresowe, funkcje przygotowawcze i pomocnicze mogą występować i powtarzać się wielokrotnie w jednym programie. Systemy NC i CNC, wytwarzane przez różnych producentów, mają swoje specyficzne cechy i w chwili obecnej nie są w pełni znormalizowane. Niemniej jednak zdecydowana większość układów sterowań obrabiarek oznacza podstawowe funkcje w ten sam sposób. Odnosi się to przede wszystkim do tych funkcji, których realizacja dotyczy parametrów, dróg skrawania, a także wywołań narzędzi. Ułatwia to w dużym stopniu zbudowanie w miarę uniwersalnego programu służącego do analizy programów NC i pozyskiwania z nich niektórych danych, związanych z pracą narzędzi.

W jednym programie NC może występować duża liczba narzędzi wielokrotnie używanych i to ze zmiennymi parametrami i drogami skrawania. Stosowane bywają także krzywoliniowe tory ruchu narzędzi, określane za pomocą funkcji do interpolacji liniowej i kołowej. Wszystko to sprawia, że pozyskiwanie danych dotyczących pracy poszczególnych narzędzi, nie automatyczne, lecz manualne, jest zbyt uciążliwe, by mogło być praktycznie stosowane. Dlatego też wydało się celowe napisanie programu do automatycznego pozyskiwania tego typu danych.

Jak już wspomniano, dużą trudnością w analizie programu NC jest odróżnienie i oddzielenie drogi dobiegu oraz wybiegu narzędzia od drogi rzeczywistego ruchu roboczego. Podczas analizy programu NC nie ma bowiem możliwości określenia, w którym momencie narzędzie wchodzi i wychodzi z materiału. W napisanym programie CEZET, służącym do analizy programów NC, rozwiązano ten problem sposobem opisanym w p. 4.4 za pomocą współczynnika $\lambda_i < 1$, zmniejszającego rzeczywistą drogę skrawania. Wartość współczynnika należy określić na podstawie rysunku i danych o półfabrykacie. Jeśli przykładowo, są

toczone wzdłużnie długie wały, a półfabrykaty są bardzo dokładnie wykonane, to współczynnik λ_i przyjmować powinien wartości bliskie jedności. Jeśli natomiast są toczone przedmioty krótkie, z występującą dużą liczbą przejęć roboczych, z każdorazowym dobiegiem i wybiegiem narzędzia, to współczynnik λ_i powinien mieć wartość wyraźnie mniejszą od jedności. Obecnie wartość współczynnika λ_i określa się arbitralnie, kierując się posiadaną wiedzą i doświadczeniem. Na podstawie dotychczas przeprowadzanych analiz teoretycznych i monitorowania przebiegu procesów skrawania można stwierdzić, że współczynnik ten jest najczęściej zawarty w przedziale liczbowym 0,8–0,97.

Dokładne określenie wartości współczynnika λ_i jest możliwe tylko w czasie rzeczywistym podczas monitorowania procesu skrawania. Jednak takie rozwiązanie, pomijając odpowiednie oprogramowanie, wymaga układów nadzorujących proces skrawania. Ponadto nie nadaje się ono do wcześniejszych analiz i prognozowania zachowania się narzędzi w celu pozyskiwania danych potrzebnych np. do określenia koniecznej liczby narzędzi do wykonania zadania obróbkowego lub określenia strategii podczas uprzedzającej wymiany narzędzi.

W przyszłości możliwe będzie uniknięcie pewnej subiektywności w określaniu współczynnika λ_i . Jego wartości można będzie wyznaczyć za pomocą technik wspomaganie komputerowego CAD/CAM, po przeanalizowaniu rysunku przedmiotu, uwzględnieniu klasy dokładności wykonania półfabrykatu, a także uwzględnieniu preferencji programów wspierających tworzenie programów NC, dotyczących wyznaczania kierunku toru i liczby przejęć narzędzia podczas zdejmowania nadkładu obróbkowego itp.

W prostszej wersji automatycznego określania wartości współczynnika λ_i można posłużyć się stosunkiem liczby wcięć narzędzia do długości drogi jego przemieszczania się. Dla małej wartości tego stosunku liczbowego, świadczącego o niewielkiej liczbie dobiegów i wybiegów narzędzia lub długiej drodze skrawania, współczynnik λ_i przyjmowałby wartości bliskie jedności. W miarę zwiększania się wartości tego stosunku liczbowego, współczynnik λ_i zmniejszałby swoją wartość o wielkość określoną na podstawie wcześniejszych badań analityczno-doświadczalnych.

Program CEZET rozpoznaje sposób programowania przesuwów narzędzia, czy jest on „absolutny” czy „przyrostowy”, i dostosowuje właściwą procedurę określania drogi przemieszczeń poszczególnych narzędzi. Również automatycznie jest określany rodzaj posuwu „minutowego” bądź „na obrót”, a także odmiany deklarowania łuków „za pomocą współrzędnych środka koła” lub „promienia łuku”.

Program CEZET, przeglądając program NC, śledzi poszczególne etapy pracy narzędzi, określa dla nich drogi skrawania w poszczególnych blokach, a na podstawie prędkości obrotowej wrzeciona, wartości posuwów i wyznaczonej średnicy toczenia oblicza prędkość i czas skrawania.

Po uruchomieniu programu CEZET należy wprowadzić współczynniki ze wzoru określającego trwałość, wartość współczynnika λ_i oraz zainicjować analizę wybranego programu NC.

Program umożliwia sporządzanie listy narzędzi użytych w analizowanym programie NC, wraz z przyporządkowanymi im wartościami posuwów, prędkościami obrotowymi wrzecion, drogami skrawania L , zużyciem zmodyfikowanym VB_{zm} i czasami pracy t , (patrz tab. 5.1). W oddzielnym zestawieniu jest podana lista narzędzi z przyporządkowa-

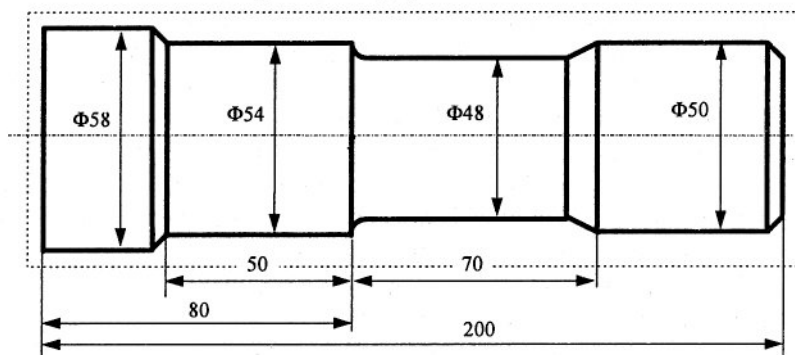
nymi im całkowitymi zużyciami zmodyfikowanymi VB_{zmc} , całkowitymi czasami skrawania t_s , trwałościami reszkowymi narzędzi T_{CR} i trwałościami T_c .

Trwałość reszkową wyznacza się przy założeniu, że narzędzie będzie używane podczas realizacji tego samego programu NC.

Program CEZET został napisany w języku Turbo Pascal z wykorzystaniem biblioteki Turbo Vision, i przedstawiony bliżej w pracy [52]. Stanowi on interakcyjny system okienkowy, wyposażony w system pomocy ułatwiający posługiwanie się programem.

Przykład analizy programu NC

Program CEZET został przetestowany na kilkunastu programach NC obróbki dość złożonych przedmiotów, z użyciem wielu narzędzi i zdał w pełni egzamin. Ze względu na oszczędność miejsca, przedstawiony zostanie tu jedynie przykład analizy krótkiego programu NC do obróbki mało skomplikowanego przedmiotu.



Rys. 5.2. Rysunek wałka, którego program obróbkowy NC został poddany analizie programem CEZET

Fig. 5.2. Shaft drawing for which NC program was analysed using CEZET program

Na rysunku 5.2 przedstawiono wałek, obrabiany na tokarce sterowanej numerycznie z układem sterowania SINUMERIK 810T, za pomocą programu NC „30K.sz”. Do obróbki użyto narzędzi z ostrzami z węgla S30S, a półfabrykatem był wałek o średnicy 60 mm, wykonany ze stali 55 w stanie surowym.

Uproszczony zapis instrukcji programu „30K.sz”

260	210	
N005		M43G90G96G54
N010 G92		
N015		T1 D1
N020 G0 X61 Z200		
N025 G1 X1		F0.4 S710 M4
N030 G0 X58 Z201		
N035 G1 X58 Z30		
N040 G0 X59 Z201		
N045 X56		
N050 G1 X56 Z30		

N055 G0 X57 Z201					
N060 X54					
N065 G1 X54 Z80					
N070 G1 X55 Z201					
N075 X52					
N080 G1 X52 Z80					
N085 G0 X260 Z210				M5	
N090	T2 D2 S900		M4		G95
N095 G0 X48 Z201					
N100 G1 X52 Z197		F0.3			
N105 G0 X50 Z201					
N110 G1 X50 Z150					
N115 X48 Z146.54					
N120 X48 Z82					
N125 G2 X50 Z80		F0.2			
N130 G1 X54 Z80		F0.3			
N135 X54 Z30					
N140 X58 Z27.69					
N145 G0 X260 Z210				M5	
N150 G0 X260 Z210					
N155	T1 D1 S710		M3		G95
N160 G0 X61 Z200					
N165 G1 X1		F0.4			
N170 G58 Z201					
N175 G1 X58 Z170					
N180 G0 X260 Z210				M5	
N185				M2	

Przyjęto następujące dane:

Wzór określający trwałość ostrza, dla kryterium stępienia $VB_{Bdop} = 0,7$ mm, ma następującą postać [291]:

$$T_c = \frac{6,11 \cdot 10^{11}}{v_c^{5,72} f^{3,73} a_p^{1,12}} \quad (5.3)$$

Współczynnik uwzględniający dobieg i wybieg narzędzia przyjęto jednakowy dla wszystkich narzędzi $\lambda_t = 0,95$.

Po dokonanej analizie programu NC otrzymano wyniki, które zebrano w tab. 5.1.

Podsumowując można stwierdzić, że program CEZET, służący do analizy programów NC, pozwala dla poszczególnych narzędzi, uczestniczących w operacji:

- określać trwałości resztkowe
- wyliczać „zużycie zmodyfikowane”
- wyspecyfikować i przyporządkować im czasy pracy oraz parametry skrawania, z jakimi one pracują.

Opracowany program do obliczania czasu pracy i trwałości reszkowych narzędzi na podstawie programu NC może być szczególnie przydatny w elastycznych systemach produkcyjnych. Istnieją tam zazwyczaj różne strategie wymiany narzędzi. Wymagają one danych, których manualne wyszukiwanie jest bardzo pracochłonne. Program CEZET może ułatwiać także planowanie wymaganej liczby narzędzi do wykonania określonej partii wyrobów, a także może być przydatny, piszącemu program NC, w doborze właściwych, w tym także optymalnych, parametrów skrawania. Umożliwia on takie dobieranie parametrów skrawania, aby poszczególne wyroby i cała ich partia zostały wykonane z użyciem całkowitej liczby narzędzi. Ma to szczególne znaczenie podczas skrawania dużych przedmiotów z dużą ilością naddatku, którą należy usunąć.

Tabela 5.1. Wyniki komputerowej analizy programu NC „30K.sz” za pomocą programu CEZET
Table 5.1. Results of computer analysis of NC program „30K.sz” by means of CEZET program

Obliczenia wykonano dla zbioru: 30K.SZ			

Narzędzie T1			
F 0.40	S710	L = 645.00 VBzm = 63259313639.0000	t = 2.27

Narzędzie T2			
F 0.30	S900	L = 125.19 VBzm = 9224296696.2000	t = 0,46
F 0.20	S900	L = 3.14 VBzm = 76666432.5320	t = 0,02
F 0.30	S900	L = 58.62 VBzm = 7681334294.0000	t = 0,22

Narzędzie T1			
F 0.40	S710	L = 92.00 VBzm=4299621947.8000	t = 0,32

Narzędzie T1: VBmzc = 67558935587.0000 ts = 2.60 TR = 20.87 Tc = 23,47			
Narzędzie T2: VBmzc = 16982297423.0000 ts = 0.70 TR = 24.42 Tc = 25,12			
OZNACZENIA w Tabeli:			
F	– posuw w mm/obr,		
S	– prędkość obrotowa w obr/min,		
L	– droga skrawania w mm,		
VBzm	– zużycie zmodyfikowane,		
VBzmc	– całkowite zużycie zmodyfikowane,		
t	– cząstkowy czas pracy ostrza w min,		
ts	– całkowity czas pracy ostrza w min,		
TcR	– okres trwałości reszkowej (Tc–ts) w min ,		
Tc	– okres trwałości ostrza w min.		

5.2. PRZYKŁAD OPTYMALIZACJI PARAMETRÓW SKRAWANIA

Do procedury optymalizacyjnej wprowadzono funkcje celu (5.1) i (5.2) wraz z kilkoma ich wersjami, a także funkcję trwałości narzędzia określoną równaniem (4.17) oraz ograniczenia brzegowe zdefiniowane niżej podanymi wzorami. Przed uruchomieniem procedury optymalizacyjnej należy pamiętać, aby w miarę potrzeby, uaktualnić stałe występujące we wzorach. Jeśli się tego nie zrobi, to program domyślnie pamięta ostatnio używane dane. Istnieje też możliwość łatwego dodawania nowych ograniczeń lub rezygnowania z wcześniej wprowadzonych. Podczas optymalizacji należy wybrać opcjonalnie odpowiedni wariant obróbki i strategii wymiany narzędzi.

A oto ograniczenia wprowadzone do programu:

Ograniczenie I – maksymalna chropowatość powierzchni R_{Ra} po obróbce [171]

$$R_{Ra(ij)} \geq 49,802 v_{c(ij)}^{-0,179} f_{(ij)}^{1,587} a_p^{0,0415} r_e^{-0,463}. \quad (5.4)$$

Ograniczenie II – maksymalna moc efektywna na wrzecionie R_{Pe} [35, 167]

$$R_{Pe} \geq 0,05368 v_{c(ij)}^{1-0,1} f_{(ij)}^{0,725} a_p^{0,849} r_e^{0,101} (1 + VB_c). \quad (5.5)$$

Ograniczenie III – maksymalna siła odporowa skrawania R_{Fp} uwarunkowana podatnością i wytrzymałością układu OUPN [35, 167]

$$R_{Fp(ij)} \geq 1986 v_{c(ij)}^{-0,174} f_{(ij)}^{0,591} a_p^{0,469} r_e^{0,0,406} (1 + 0,476 VB_c). \quad (5.6)$$

Ograniczenie IV – maksymalna prędkość obrotowa wrzeciona R_{nwr} uwarunkowana możliwościami obrabiarki, uchwyty, przedmiotu

$$R_{nwr(ij)} \geq \frac{1000 v_c}{\pi d}. \quad (5.7)$$

Ograniczenie V – maksymalna prędkość skrawania $R_{vc(max)}$ uwarunkowana możliwościami skrawnymi narzędzia.

Ograniczenie VI – minimalna prędkość skrawania $R_{vc(min)}$ uwarunkowana możliwościami skrawnymi narzędzia i zakresem obowiązywania funkcji trwałości.

Ograniczenie VII – maksymalny posuw $R_{ff(max)}$ uwarunkowany możliwościami skrawnymi narzędzia i zakresem obowiązywania funkcji trwałości.

Ograniczenie VIII – minimalny posuw $R_{ff(min)}$ uwarunkowany możliwościami oddzielania materiału i zakresem obowiązywania funkcji trwałości narzędzia.

Kryterium optymalizacji były minimalne koszty wytwarzania. Przyjęto, że zużyte narzędzia wymienia się uprzedzająco po wykonaniu operacji, jeśli ich trwałości resztkowe nie zezwalają na wykonanie całej następnej operacji. Założono też, że do średniego kosztu operacji należy wliczyć koszt wszystkich narzędzi, łącznie z tymi nie w pełni zużytymi, które kończą ostatni przedmiot w partii wyrobów. Nałożono też różne ograniczenia w każdym z zabiegów. Jest to więc najbardziej skomplikowany przypadek metodologiczny, z jakim można się spotkać, a funkcja celu ma podwójny pęk linii nieciągłości.

Optymalizacji parametrów skrawania dla narzędzia w obróbce 3-zabiegowej dokonano dla następujących danych:

stałe występujące w funkcji czasu ($t_{pz} = 120$ min, $n_n = 6$ szt., $n_{sz} = 60$ szt., $\lambda_z = 0,9$, $\lambda_{ws} = 1,25$, $t_{p(r)} = 3$ min, $t'_{p(r)} = 2$ min, $t_{pNC(q)} = 0,1$ min, $t_{rd(iu)} = 0,12$ min, $t_{zr(i)} = 2$ min, $t_{ok(i)} = 2$ min, $\varepsilon_{ok(i)} = 1$, $t_{wk(i)} = 0,05$ min, $\varepsilon_{wk(i)} = 3$, $\lambda_T = 0,9$, $k_u = 0,08$), $V/B_c = 0,3$ mm, $r_e = 0,8$ mm;
 stałe występujące w funkcjach kosztów: $K_m = 30$ zł/h, $K_{Lm} = 8,4$ zł/h, $\lambda_L = 0,5$, $K_o = 35$ zł, $\lambda_o = 1,05$, $n_{w(i)} = 300$, $K_p = 10$ zł, $n_{kp} = 8$, $K_{opzl} = 20$ zł, $K_{opNC} = 200$ zł, $K_{opt} = 30$ zł, $\lambda_{kwb} = 1,6$, $K_{pwpr} = 420$ zł, $\lambda_{kwpr} = 3,5$, $K_{pb(w)} = 4$ zł, $K_{pwpr(z)} = 20$ zł, $l_p = 20$;
 współczynniki ze wzoru określającego trwałość ostrza narzędzia T_c ($C_T = 1,60E+12$, $s = 5,05$, $u_T = 1,8$, $e_T = 0,59$, $\lambda_{VB} = 1$, $\lambda_t = 0,95$).

Pozostałe dane, w tym wartości liczbowe ograniczeń, razem z wynikami optymalizacji, przedstawiono w tab. 5.2.

Tabela 5.2. Przykładowe wyniki optymalizacji z użyciem programu SOLVER
 Table 5.2. Examples of optimization results obtained by means of SOLVER program

Wyniki optymalizacji parametrów skrawania v_c i f					
Kryterium optymalizacji – minimum kosztów					
zabiegi →			$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
Średnica toczenia	d	[mm]	300	80	100
Długość toczenia	L	[mm]	800	50	300
Głębokość skrawania	a_p	[mm]	5	3	1
Ograniczenia					
Chropowatość	R_a	[μ m]	5	2,5	1,25
Moc efektywna na wrzecionie	P_e	[kW]	22	22	22
Max. siła odporowa skrawania	F_p	[N]	2000	2000	2000
Max. obroty wrzeciona obrabiarki	n_{wr}	[obr/min]	2200	2200	2200
Max. prędkość skr. ze względu na T_c	v_c	[m/min]	450	450	450
Min. prędkość skr. ze względu na T_c	v_c	[m/min]	10	10	10
Max. posuw ze względu na T_c	f	[mm/obr]	0,45	0,45	0,45
Min. posuw ze względu na T_c	f	[mm/obr]	0,05	0,05	0,05
Optymalizowane parametry					
Prędkość skrawania	v_c	[m/min]	134,82	202,27	210,22
Posuw	f	[mm/obr]	0,342	0,243	0,160
Czas główny	t_g	[min]	16,3401	0,2555	2,79715
Czas sumaryczny skrawania	t_s	[min]	18,42314		
Funkcja celu					
Koszt jednostkowy	K_i/n_n	[zł/szt]	0,70707		
Czas operacji	t_{sz}/n_n	[min/szt]	20,92		
Trwałość narzędzia	T_c	[min]	73,69		
Liczba operacji w okresie trwałości	T_c/t_s		4,00		
Koszt całkowity operacji	K_{sz}	[zł/szt]	6,31		
Koszt odniesiony do jednego narzędzia	K_{sz}/n_n	[zł/szt]	1,05		
Teoretyczna liczba narzędzi konieczna do wykonania zadania produkcyjnego			15,00		
Rzeczywista liczba narzędzi konieczna do wykonania zadania produkcyjnego			15,00		
Wszystkie ograniczenia zostały spełnione!					

Z danych w tabeli 5.2 wynika, że po przeprowadzeniu procedury optymalizacyjnej uzyskano takie rozwiązanie, w którym spełniono ograniczenia, a parametry skrawania pozwalają w pełni wykorzystać możliwości skrawne wszystkich użytych narzędzi, gdyż w okresie trwałości narzędzia wykonuje się całkowitą liczbę 4 operacji, a jednocześnie do wykonania całej partii wyrobów potrzebna jest także całkowita liczba 15 narzędzi.

Jeśli parametry skrawania są tak dobrane, jak w przedstawianym przykładzie, czyli, że trwałości resztkowe narzędzi po ich użyciu wynoszą zero, to odpada jednocześnie problem śledzenia i nadzorowania trwałości resztkowych narzędzi w systemie produkcyjnym w celu ich pełniejszego wykorzystania. Może to być kolejnym przyczynkiem do uproszczenia struktur zarządzania narzędziami i obniżania kosztów wytwarzania.

Zdekomponowanie funkcji czasu i kosztów wytwarzania w taki sposób, że powstałe cząstkowe funkcje celu odnoszą się do poszczególnych narzędzi, ma dodatkowo tę zaletę, że pozwala optymalizować operację częściowo nawet wtedy, gdy pełnej optymalizacji nie można przeprowadzić, np. ze względu na brak danych odnośnie do jednego lub kilku narzędzi stosowanych w operacji.

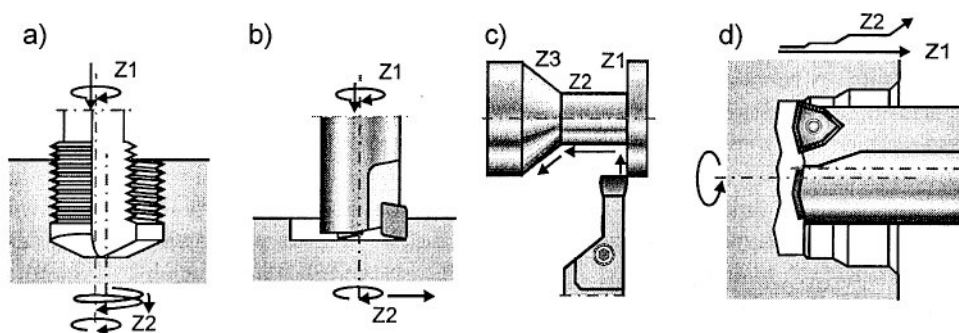
Spośród czynników występujących w badanych funkcjach celu można wyodrębnić takie, od których zależy tylko poziom wartości funkcji, a nie zależą wartości optymalne parametrów skrawania. Są to: czasy przygotowawczo-zakończeniowe, pomocnicze i uzupełniające, czasy diagnozowania, czasy ruchów jałowych i czynności pomocniczych wykonywanych automatycznie, koszt przygotowania i powtórzenia zlecenia, a także, jeśli funkcja nie ma nieciągłości, długość, średnica toczenia oraz liczba sztuk w partii wyrobów.

Drugą grupę tworzą te czynniki, które nie tylko wpływają na wartość funkcji celu, ale również na optymalne parametry skrawania. Należą do nich: właściwości skrawne ostrza, czasy wymiany narzędzia, czasy określania i wprowadzania korekcy, koszt pracy stanowiska i wynagrodzenie pracownika, koszt narzędzia, właściwości dynamiczne układów napędu głównego i posuwowego. Jeśli funkcja celu ma nieciągłości, należą do nich także długość i średnica toczenia oraz liczba sztuk w partii wyrobów.

Wartości optymalnych parametrów skrawania, określanych ze względu na kryterium minimalnych kosztów wytwarzania, nie zależą od wartości poszczególnych składników kosztów występujących w funkcjach celu lecz od wzajemnych proporcji między nimi. Jeśli zatem wszystkie składniki kosztów wzrosną proporcjonalnie np. o 50 lub 100%, to również podobnie wzrosną koszty wytwarzania, ale optymalne parametry skrawania nie zmienią swoich wartości. Z budowy omawianych funkcji celu wynika także, że jeśli zmieni się struktura składników kosztów, ale w taki sposób, że nie zmieniają się proporcje między dwoma grupami kosztów ($K_m + K_{Lm}$) i ($K_o + K_p + K_n + K_{os}$), to również optymalne wartości parametrów skrawania nie zmienią się. Można zatem stwierdzić, że przeprowadzona analiza funkcji celu oraz wyciągnięte na tej podstawie wnioski i spostrzeżenia będą obowiązywać niezależnie od przyjętej jednostki waluty, stopnia inflacji, a także – w dużej mierze – okresu wnioskowania, jeśli tylko nie zmienią się proporcje między tymi dwoma grupami składników kosztów.

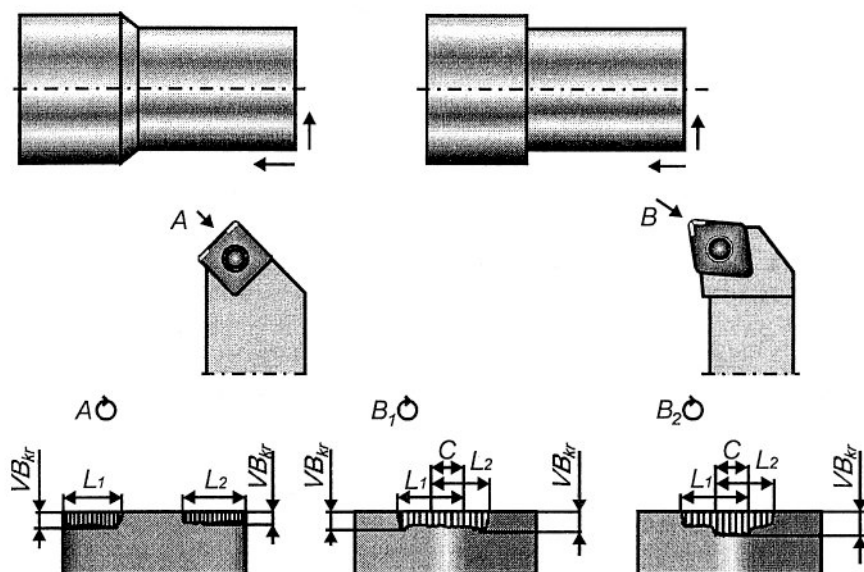
6. NARZĘDZIA WIELOZADANIOWE

Przez pojęcia narzędzia wielozadaniowe należy rozumieć takie narzędzia, które mogą być stosowane do wielu odmian lub nawet rodzajów skrawania. Pojęcia „wielozadaniowości” nie należy zatem utożsamiać z możliwością użycia narzędzia w obróbce wielozabiegowej. Przykłady zastosowań tego typu narzędzi pokazano na rys. 6.1. Wiertłofrez (rys. 6.1a) może być wykorzystywany jako wiertło do wykonywania otworu, a następnie, po nadaniu mu ruchu względnego, planetarnego wokół osi otworu, może służyć jako frez wielokrotny (grzebieniuowy) do frezowania gwintu. Inny wiertłofrez (rys. 6.1b) może być użyty do wiercenia otworu, a następnie frezowania rowka. Nawet nóż tokarski przecinak (wcinak) – rys. 6.1c może służyć do przecinania, toczenia wzdłużnego, skośnego, a także kształtowego. Podobnie klasyczne wiertło składane (rys. 6.1d) może być użyte jako narzędzie wielozadaniowe, jeśli po wywierceniu otworu na tokarce sterowanej numerycznie przesunięta zostanie jego oś względem osi obrotu przedmiotu. Zacznie ono wówczas pełnić rolę wytaczaka obrabiając powierzchnię wewnętrzną otworu, a czasami może być nawet zastosowane do obróbki powierzchni czołowych i zewnętrznych. Analogicznie można użyć do toczenia poprzecznego i wzdłużnego narzędzi pokazanych na rys. 6.2.



Rys. 6.1. Przykłady narzędzi wielozadaniowych
Fig. 6.1. Examples of multipurpose tools

Coraz częstsze stosowanie narzędzi wielozadaniowych jest spowodowane dążeniem do zmniejszenia liczby narzędzi potrzebnych do wykonania jednej operacji lub też zwiększenia możliwości kształtowania powierzchni przedmiotu obrabianego za pomocą tej samej liczby narzędzi. Ma to szczególne znaczenie w przypadku użycia takich obrabiarek, jak tokarki i wiertarki, w których imaki lub głowice narzędziowe mają zazwyczaj dość ograniczoną liczbę gniazd narzędziowych.



Rys. 6.2. Warianty oddziaływania warunków skrawania w różnych zabiegach na zużywanie się krawędzi skrawających narzędzi wielozadaniowych

Fig. 6.2. Ways in which cutting conditions in various processes influence the wear of cutting edges in multi-purpose tools

Mniejsza liczba narzędzi koniecznych do wykonania zadania obróbkowego, która wynika z zastosowania narzędzi wielozadaniowych, przyczynia się do:

- możliwości zmniejszenia kosztów narzędziowych
- krótszego czasu przygotowania zestawu narzędzi (pobranie części składowych narzędzi z magazynu, montaż, ustawianie, mierzenie, określanie korekcy, transport itp.)
- krótszego czasu przezbierania obrabiarki i wprowadzania korekcy do jej układu sterowania
- możliwości skrócenia czasów związanych z mniejszą liczbą zmian pozycji głowicy narzędziowej podczas wykonywania operacji (odjazdu narzędzia od przedmiotu na bezpieczną odległość, zmiany pozycji głowicy narzędziowej, pozycjonowanie głowicy, dojazd do przedmiotu), itp.

Zwiększone możliwości obróbkowe narzędzi wielozadaniowych, w porównaniu z narzędziami jednozadaniowymi, mogą przyczynić się natomiast do:

- zmniejszenia koniecznej liczby operacji
- wzrostu wydajności i obniżenia kosztów obróbki
- zwiększenia możliwości kształtowania powierzchni na obrabiarce, którą można uzbroić tylko w określoną liczbę narzędzi.

Może się bowiem zdarzyć tak, że dzięki użyciu narzędzi wielozadaniowych, zamiast oddzielnych operacji prowadzonych na dwóch obrabiarce, można tak powiększyć i skoncentrować liczbę zabiegów na jednej obrabiarce, że stanie się możliwe obrobienie przedmiotu podczas jednej operacji.

6.1. ZUŻYCIE OSTRZY NARZĘDZI WIELOZADANIOWYCH

Poszczególne krawędzie skrawające narzędzi wielozadaniowych mogą się zużywać z różną intensywnością [74]. Wynika to z dwóch zasadniczych powodów. Pierwszym z nich jest występowanie różnych warunków skrawania na poszczególnych krawędziach, tak jak np. w wiertłofrezie (rys. 6.1b), w którym na płycie zewnętrznej prędkość skrawania jest znacznie większa niż na płycie wewnętrznej. Drugi powód to różnice w procentowym udziale czasu skrawania poszczególnych krawędzi w sumarycznym czasie pracy całego narzędzia. I tak przykładowo, według pracy [74] podczas wykonywania rowka o określonej głębokości i długości, z użyciem wiertłofreza, stosunek czasu pracy krawędzi płytki wewnętrznej do czasu pracy krawędzi płytki zewnętrznej wynosił 7,3% do 92,7%. Podobnie działać się będzie w innych rodzajach narzędzi wielozadaniowych, np. w wiertłofrezach do wiercenia i gwintowania otworu, nożach tokarskich pracujących dwoma krawędziami itp.

Narzędzie wielozadaniowe musi być wymienione na nowe lub muszą być mu przywrócone właściwości skrawne, jeśli któraś z dowolnych jego krawędzi osiągnie lub przekroczy kryterium stępienia, i to niezależnie od tego, w jakim stopniu są zużyte pozostałe ostrza skrawające.

Podczas doboru lub optymalizacji warunków skrawania narzędziami wielozadaniowymi można wyodrębnić odmienne oddziaływania warunków skrawania podczas różnych zabiegów i ich wpływ na zużycie poszczególnych fragmentów krawędzi skrawających (rys. 6.2).

Pierwszy wariant najprostszy (rys. 6.2 widok A), to taki, w którym warunki skrawania podczas wykonywania każdego z zadań oddziałują na zużycie tylko tej jednej krawędzi ostrza, która to zadanie wykonuje (np. L_1 lub L_2).

Drugi wariant (rys. 6.2 widok B_1) przedstawia sytuację, w której warunki pracy jednego zabiegu oddziałują nie tylko na krawędź główną, która w nim uczestniczy, lecz także wpływają na zużywanie się fragmentów innych krawędzi, które stają się krawędziami głównymi w innych zadaniach. Jednak wariant ten odnosi się tylko do takich przypadków, w których zużycie wspólnie używanych części ostrza (strefa C) w różnych zadaniach nie jest dominujące i nie osiąga kryterium stępienia przed innymi fragmentami ostrza.

Trzeci wariant (rys. 6.2 widok B_2) dotyczy sytuacji przedstawionej w wariantcie drugim, z tym że obejmuje on takie przypadki, w których zużycie wspólnie używanej części krawędzi skrawającej (strefa C) jest dominujące i decyduje o uznaniu całego narzędzia za stępione.

6.2. CZAS OBRÓBK I NARZĘDZIAMI WIELOZADANIOWYMI

Czas obróbki dla narzędzi jednozadaniowych i pracy szeregowej określa się ze wzoru (4.3) lub ze wzoru (4.2), który jest jego bardziej uproszczonym zapisem. Wzór (4.2) dla narzędzia dwuzadaniowego (zadanie 1 i 2) ma postać

$$t_{sz} = \frac{t_{pz}}{n_{sz}} + \left(\Sigma t_s + \Sigma t_g + \frac{\Sigma t_{zn,ok,wk}}{\min \left\{ \left[\left[\text{entier} \left(\frac{T_{c1}}{t_{s1}} \right) \right] \vee \left(\frac{T_{c1}}{t_{s1}} \right) \right\}, \left[\left[\text{entier} \left(\frac{T_{c2}}{t_{s2}} \right) \right] \vee \left(\frac{T_{c2}}{t_{s2}} \right) \right] \right\}} \right) (1 + k_u). \quad (6.1)$$

Równanie to w członie $\min\{\dots\}$ uwzględnia sytuację z rys. 6.2 (widok A lub B₁), w której narzędzie trzeba wymienić na nowe lub zregenerować w chwili, gdy któraś z dowolnych jego krawędzi, wykonująca zadanie 1 lub 2, osiągnie jako pierwsza kryterium stępienia. Mówiąc inaczej, jeśli np. krawędzią 1 można obrobić $(T_{c1}/t_{s(1)}) = 10$ przedmiotów, a krawędzią 2–30 przedmiotów, to narzędzie i tak trzeba wymienić po 10 operacjach.

Przypomnijmy, że elementy wzoru (6.1), zawarte w nawiasach $\{\dots\}$ wybierają opcjonalnie liczbę rzeczywistą operacji wykonanych w ciągu okresu trwałości T_c/t_s lub całkowitą część tej liczby $\text{entier}(T_c/t_s)$.

Po uogólnieniu zależności (6.1), tak aby uwzględniała ona **czas operacji**, w której kilka narzędzi wielozadaniowych bierze udział w dowolnej liczbie zabiegów, otrzyma się następującą postać równania

$$t_{sz} = \frac{t_{pz}}{n_{sz}} + \lambda_z \left[\begin{aligned} & \lambda_{ws} \sum_{r=1}^o (t_{p(r)} - t'_{p(r)}) + \sum_{q=1}^s (t_{pNC(q)} - t'_{pNC(q)}) + \sum_{u=1}^w (t_{rd(u)} - t'_{rd(u)}) \\ & + \sum_{i=1}^n \frac{t_{dn(i)} - t'_{dn(i)}}{n_{szdn(i)}} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m t_{g(ij)} \\ & + \lambda_{ws} \sum_{i=1}^n \frac{[t_{zn(i)} - t'_{zn(i)} + (t_{ok(i)} - t'_{ok(i)})\epsilon_{ok(i)} + (t_{wk(i)} - t'_{wk(i)})\epsilon_{wk(i)}]}{\lambda_{T(i)} \min_{z \in Z} \left\{ \text{entier} \left[\frac{T_{c(iz)}}{t_{s(iz)}} \right] \vee \left[\frac{T_{c(iz)}}{t_{s(iz)}} \right] \right\}} \end{aligned} \right] (1 + k_u). \quad (6.2)$$

Równanie to jest uniwersalną formułą i może być stosowane nie tylko do wyznaczania czasu operacji dla narzędzi wielozadaniowych, ale także w przypadku użycia narzędzi jednozadaniowych lub grupy narzędzi obu rodzajów. Jeśli bowiem i -te narzędzie jest narzędziem jednozadaniowym, to zbiór Z zawiera tylko jeden element, a operator $\min\{\dots\}$ nie ma z czego wybierać i wzór (6.2) określa takie wartości funkcji czasu operacji jak zależność (4.3), którą stosuje się do narzędzi jednozadaniowych.

6.3. KOSZTY WYTWARZANIA NARZĘDZIAMI WIELOZADANIOWYMI

Koszty wytworzenia jednej sztuki K_{sz} , koszty przygotowania K_{przyg} i koszty powtórzenia zlecenia K_{pow} , jeżeli stosuje się narzędzia wielozadaniowe, można określać ze wzorów (4.10)–(4.12).

Natomiast **koszty jednostkowe** K_j wyznacza się z wzoru (6.3), a występujący w nim czas jednostkowy t_{sz} z zależności (6.2). Wzór ten odnosi się do takiej sytuacji, w której można wykorzystywać trwałość resztkową narzędzia w innym zadaniu obróbkowym:

$$K_j = \frac{K_m + \lambda_L K_{Lm}}{60} t_{sz} + \sum_{i=1}^n \frac{K_{N(i)}}{\lambda_{T(i)} \min_{z \in Z} \left\{ \text{entier} \left[\frac{T_{c(iz)}}{t_{s(iz)}} \right] \vee \left[\frac{T_{c(iz)}}{t_{s(iz)}} \right] \right\}}. \quad (6.3)$$

Najczęściej jednak narzędziu, nawet ze znaczną trwałością resztkową, przed jego przekazaniem do ponownego zastosowania, przywraca się pełne możliwości skrawne. Przypadek taki odnosi się szczególnie do narzędzi wielozadaniowych, dla których przecież bardzo trudno jest przewidzieć wariant ich przyszłego zastosowania. Tak więc, ze względu na niepełne wykorzystanie okresu trwałości ostatniego z narzędzi biorących udział w wykonaniu całego zadania obróbkowego, średnie koszty narzędziowe $K_{N(i)}$ będą większe. W takich przypadkach **koszt jednostkowy** należy określać z zależności (6.4), analogicznej do zależności (4.15)

$$K_j = \frac{K_m + \lambda_L K_{Lm}}{60} t_{sz} + \sum_{i=1}^k \frac{K_{N(i)}}{\lambda_{T(i)} n_{sz}} \left\{ \text{entier}^{(+1)} \left[\frac{n_{sz}}{\min_{z \in Z} \left\{ \text{entier} \left[\frac{T_{c(iz)}}{t_{s(iz)}} \right] \right\} \vee \left\{ \frac{T_{c(iz)}}{t_{s(iz)}} \right\}} \right] \right\}. \quad (6.4)$$

Należy pamiętać, że koszty $K_{N(i)}$ (jednego okresu trwałości) w przypadku narzędzi wielozadaniowych odnoszą się do całego narzędzia, czyli innymi słowy, do wszystkich jego krawędzi biorących udział w skrawaniu. I tak, jeśli jest to narzędzie i przypadek jego wykorzystania przedstawiony na rys. 6.3, to należy $K_{N(i)}$ określić jako koszt odpowiadający dwu a nie jednej krawędzi płytki wielostrzałowej.

6.4. ZAŁOŻENIA OPTYMALIZACJI PARAMETRÓW SKRAWANIA

Koncepcja optymalizacji parametrów skrawania, dla narzędzi zużywających się według wariantów drugiego i trzeciego, przedstawionych na rys. 6.2 w widokach A i B₁, jest taka sama. Polega ona na określaniu optymalnych parametrów skrawania dla krawędzi najbardziej obciążonych, a dla pozostałych krawędzi należy tak zwiększać wydajność obróbki, aby osiągały one kryterium stopienia w tym samym czasie co krawędzie z optymalnymi parametrami skrawania.

Dla trzeciego wariantu używania się krawędzi, przedstawionego na rys. 6.2 w widoku B₂, należy dobierać lub optymalizować parametry skrawania dla całego narzędzia i dla poszczególnych zabiegów, tak jak gdyby narzędzie pracowało tylko wspólną częścią krawędzi skrawającej. Wynika to z niemożności rozdzielenia, w tym wariantcie pracy, wzajemnego oddziaływania warunków skrawania poszczególnych krawędzi na zużycie wspólnego fragmentu ostrza (strefa C).

Takie postępowanie w doborze optymalnych parametrów obróbki jest uzasadnione wówczas, gdy nie można regenerować poszczególnych krawędzi skrawających niezależnie. Natomiast w przypadku wiertłofreza (rys. 6.1b) lub wiertła (rys. 6.1d), w których można wymieniać płytki oddzielnie, można pokusić się o taką organizację pracy, by wymieniać tylko tę płytkę, która zużyła się pierwsza. Jeśli ktoś uznałby za zasadne optymalizowanie harmonogramu wymian poszczególnych ostrzy w tego typu narzędziach, to można wykorzystać tu metodykę uprzedzającej grupowej wymiany narzędzi, stosowaną w liniach produkcyjnych lub automatach, którą dokładnie opisano w pracach [73, 109]. Metodykę tę łatwo zaadaptować do narzędzi wielozadaniowych, gdyż w takiej roli, w jakiej występują tam narzędzia, tu występować będą poszczególne krawędzie (płytki) jednego narzędzia. Jednak w obecnym stanie wiedzy i wspomagania komputerowego wytwarzania wydaje się, że nakłady czasu i kosztów, związane z optymalizacją doboru harmonogramów wymian poszczególnych ostrzy w narzędziach wielozadaniowych, będą znacznie przekraczać efekty ekonomiczne uzyskane w wyniku samej optymalizacji. Wynikać to będzie z następujących przyczyn:

- Dla narzędzi wielozadaniowych, niezależnie od tego czy wymieniane są w nich wszystkie krawędzie czy też tylko jedna, są podejmowane takie same działania w postaci przerwania procesu wytwarzania i wymiany zużytych płytek lub całego narzędzia, z częstym, koniecznym przy tej okazji, określaniem korekcy na obrabiarkę lub poza nią. Tak więc czas przerwy produkcyjnej z tym związany jest taki sam w obu przypadkach.

- Udział kosztów wszystkich narzędzi (jedno- i wielozadaniowych) w całkowitym koszcie operacji wynosi zazwyczaj kilka procent. Nawet dość znaczne zmniejszenie kosztów eksploatacji jednego lub kilku narzędzi, wobec nie zmienionych kosztów użytkowania pozostałych narzędzi, nie może znacząco wpłynąć na obniżenie kosztów wytwarzania. Zwiększą się natomiast koszty związane z utrzymaniem i aktualizacją zasobów informatycznych w bazach danych narzędziowych. Wobec stosowania OSN-ów do wytwarzania w produkcji o dość ograniczonej skali, a zwłaszcza w ESP (elastycznych systemach produkcyjnych), gdzie z zasady następują ciągłe zmiany zadań i ich priorytetów, działania mające na celu optymalizowanie harmonogramów wymian poszczególnych ostrzy narzędzi wielozadaniowych z pewnością nie przyczynią się do zwiększenia efektywności wytwarzania.

- Zużywanie się narzędzi jest procesem stochastycznym, co powoduje, że okresy trwałości ostrzy odznaczają się dość znacznymi rozrzutami. Prowadzenie w takich warunkach racjonalnej optymalizacji harmonogramów wymian ostrzy wymagałoby ciągłego śledzenia parametrów rozkładów statystycznych trwałości poszczególnych krawędzi narzędzi wielozadaniowych. A to jest w warunkach produkcyjnych zbyt uciążliwe i kosztowne wobec spodziewanych, nieznaczących efektów ekonomicznych.

Tak więc, najkorzystniejszych rezultatów należy oczekiwać po takiej optymalizacji parametrów skrawania dla narzędzi wielozadaniowych, po której można zwiększyć wydaj-

ność skrawania tymi krawędziami, które są mniej obciążone w danej operacji, a które pracują niezależnie od siebie. Przyniesie to bowiem zawsze zwiększenie wydajności i zmniejszenie kosztów wytwarzania, gdyż koszty narzędziowe i koszty wymiany narzędzia są takie same, zarówno wówczas, gdy wymienia się ostrza stępione całkowicie, jak i tylko częściowo.

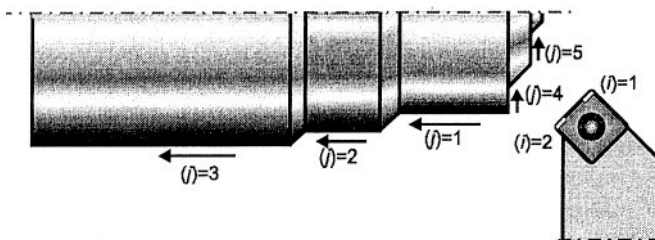
Wyjątek od tej zasady jest wówczas, gdy narzędzie skrawające jest regenerowane nie przez wymianę płytek skrawających lecz przez ostrzenie, a liczba możliwych przeostrzeń poszczególnych krawędzi może się znacznie różnić między sobą. Można wówczas próbować określać minimalne koszty eksploatacji narzędzia w całym okresie jego eksploatacji, zwanym żywotnością narzędzia. Taki przypadek mógłby wystąpić np. w wiertłofrezie pokazanym na rys. 6.1a. Jednak konstruktorzy tego typu narzędzi, spodziewając się tego, że np. wspomniany wiertłofrez zazwyczaj znacznie dłużej wierci niż frezuje, przewidują odpowiednio duży zapas na ostrzenie tej części ostrza, które pracuje jako wiertło, tak aby możliwa była w przybliżeniu taka sama liczba przeostrzeń tych fragmentów narzędzia, które pracują jako wiertło i jako frez.

6.5. PRZYKŁAD OPTIMALIZACJI PARAMETRÓW SKRAWANIA

Optimalizacja parametrów skrawania narzędzia wielozadaniowego przedstawiona zostanie na prostym przykładzie obróbki, który pokazano na rys.6.3. Przykład ten ujmuje wszystkie charakterystyczne przypadki, jakie może spotkać narzędzie tego typu. Są nimi co najmniej dwa zadania z kilkoma zabiegami:

zadanie 1 – toczenie wzdłużne narożem (i) = 1 w zabiegach (j) = 1, 2, 3,

zadanie 2 – toczenie poprzeczne narożem (i) = 2 w zabiegach (j) = 4 i 5.



Rys. 6.3. Schematyczne przedstawienie obróbki narzędziem wielozadaniowym, poddanej procedurze optymalizacyjnej; (i) oznacza numer krawędzi przeznaczonej do jednego zadania, a (j) numer zabiegu

Fig. 6.3. Schematic representation of machining with a multi-purpose tool subjected to optimization procedure; (i) denotes number of edge allotted for one job, (j) denotes number of process

Jako funkcji celu użyto wzoru (6.4), określającego koszt jednostkowy w wersji, która uwzględnia zwiększanie kosztu operacji o koszty nie wykorzystanych w pełni narzędzi. Występujący w tym wzorze czas t_{sz} określano ze wzoru (6.2).

Również i w tym przypadku do napisania procedury optymalizacyjnej wykorzystano program SOLVER. W ten sam sposób, jak poprzednio dla narzędzi jednozadaniowych, wprowadzono funkcje celu oraz ograniczenia brzegowe, by umożliwić nakładanie ograniczeń globalnych na całą operację lub odrębnie dla każdej krawędzi i każdego z zabiegów. Wyniki optymalizacji przedstawiono w tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Wyniki optymalizacji parametrów skrawania dla narzędzia wielozadaniowego, opartej na funkcji celu określonej wzorem (6.4)

Table 6.1. Results of cutting parameter optimization for a multi-purpose tool carried out based on the aim function described by formula (6.4)

Wyniki optymalizacji parametrów skrawania v_c i f Kryterium optymalizacji $\rightarrow$ minimum kosztów						
zabiegi $\rightarrow$		zadanie $i = 1$			zadanie $i = 2$	
		$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$
$i = 1 \rightarrow d;$		80	90	100	80	70
$i = 2 \rightarrow d_{max}$						
$i = 1 \rightarrow L;$		40	20	100	70	60
$i = 2 \rightarrow d_{min}$						
Głębokość skrawania a_p [mm]		5	3	1	3	1
Ograniczenia						
Chropowatość	R_a [mm]	5	2,5	1,25	2,5	1,25
Moc efektywna na wrzecionie	P_e [kW]	22	22	22	22	22
Max. siła odporowa skrawania	F_p [N]	2000	2000	2000	2000	2000
Max. obroty wrzeciona obrabiarki	n_{wr} [obr/min]	3500	3500	3500	3500	3500
Max. prędkość skr. z uwagi na T_c	v_c [m/min]	450	450	450	450	450
Min. prędkość skr. z uwagi na T_c	v_c [m/min]	10	10	10	10	10
Max. posuw z uwagi na T_c	f [mm/obr]	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Min. posuw z uwagi na T_c	f [mm/obr]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Optymalizowane parametry						
Prędkość skrawania	v_c [m/min]	152,30	212,00	284,48	240,00	297,20
Posuw	f [mm/obr]	0,386	0,259	0,170	0,263	0,174
Czas główny	t_g [min]	0,171	0,103	0,649	0,279	0,255
Czas sumaryczny skrawania	t_s [min]	0,877			0,507	
Funkcja celu						
Koszt jednostkowy	K_j [zł/szt.]	1,4242				
Czas operacji	t_{sz} [min/szt.]	2,3647				
Trwałość krawędzi skrawającej	$T_{c(f)}$ [min]	17,55			10,14	
Liczba operacji w okresie trwałości	T_c/t_s	20,01			20,01	
Teoretyczna liczba krawędzi konieczna do wykonania zlecenia		2,99			2,99	
Rzeczywista liczba narzędzi konieczna do wykonania zlecenia		3,00				
Wszystkie ograniczenia spełnione !						

Optymalizacji dokonano na podstawie tych samych danych i założeń, których użyto w przykładzie optymalizacyjnym w p. 5.2. Dodano jedynie dodatkowe dwa zabiegi dla drugiej krawędzi.

W wyniku realizacji procedury optymalizacyjnej tak wyznaczono parametry skrawania, że obie krawędzie narzędzia zużywają się po wykonaniu takiej samej liczby (20,01) operacji. Całą partię ($n_{sz} = 60$ szt.) wyrobów można wykonać używając 2,99 narzędzia. W rzeczywistości po zaokrągleniu w górę do całkowitej liczby daje to 3 narzędzia. A więc narzędzie wymienia się w chwili, gdy obie krawędzie są prawie w 100% stępione. Osiągnięto to

dzięki zwiększeniu parametrów skrawania dla krawędzi mniej obciążonej, w tym przypadku użytej w zadaniu 2. Trwałość dla tej krawędzi wynosi $T_{c(2)} = 10,14$ min. Dla krawędzi użytej w zadaniu 1 trwałość była większa o około 70% i miała wartość $T_{c(1)} = 17,55$ min. Lepszą wydajność obróbki dla krawędzi 2 uzyskano głównie przez zwiększenie prędkości skrawania, gdyż znaczące zwiększanie posuwu jest niemożliwe ze względu na ograniczenie chropowatości, które okazało się aktywne dla wszystkich zabiegów realizowanych w obu zadaniach. Gdyby inne ograniczenia okazały się aktywne, np. dopuszczalna moc efektywna na wrzecionie, maksymalna prędkość obrotowa wrzeciona itp., wówczas zwiększyłby się posuw, co dałoby jeszcze korzystniejsze skutki ekonomiczne niż zwiększenie się prędkości skrawania. Wynika to ze znanej zależności, że na chwilową wydajność obróbki zwiększanie prędkości i posuwu oddziałuje tak samo, ale na zużycie ostrza znacznie większy wpływ ma prędkość skrawania.

Jak już wcześniej wspomniano, trwałość narzędzia jest zmienną losową. Wartość rzeczywista trwałości narzędzia może okazać się krótsza niż określona z funkcji trwałości. W takich przypadkach istnieje niebezpieczeństwo przekroczenia ograniczeń, np. takich jak nadmierne pogorszenie się dokładności wymiarowo-kształtowej, jakości powierzchni, można też obawiać się skutków zużycia katastroficznego. Wówczas należy przyjmować mniejsze wartości współczynnika wykorzystania okresu trwałości $\lambda_{T(i)}$, występującego we wzorach (6.2)–(6.4). Współczynnik ten przybliża w jakimś stopniu okres trwałości narzędzia do okresu jego niezawodnej pracy.

Przedstawiona metodyka optymalizacji parametrów skrawania dla narzędzi wielozadaniowych, oparta na zaproponowanej formule funkcji celu i programie SOLVER, pozwala w taki sposób wyznaczyć optymalny stan obiektu, bez nakładania dodatkowych ograniczeń zewnętrznych (w postaci np. wymogu krotności), że są wykorzystane całkowicie możliwości skrawne narzędzi. Oznacza to, że narzędzia po wykonaniu zadania obróbkowego są w pełni stępione. W tych przypadkach zatem, gdy nie ma możliwości wykorzystania trwałości reszkowych narzędzi w innych zadaniach obróbkowych, co dla narzędzi wielozadaniowych jest niemal regułą, procedura optymalizacyjna pozwala na zmniejszanie kosztów wytwarzania. Gdy zaś istnieje racjonalne uzasadnienie wykorzystywania trwałości reszkowych narzędzi, można również optymalizować parametry skrawania, korzystając wtedy z odpowiedniego wariantu wzoru (6.2).

Porównajmy wyniki tak przeprowadzonej optymalizacji ze skutkami optymalizacji parametrów skrawania przeprowadzonej metodą tradycyjną, w której określa się warunki obróbki dla obu krawędzi narzędzia niezależnie od siebie. Wyniki takiej optymalizacji, przeprowadzonej dla takich samych danych jak w poprzednim przykładzie, przedstawiono w tab. 6.2.

W tym przypadku w wyniku realizacji procedury optymalizacyjnej wyznaczono optymalny stan obiektu w tych miejscach, w których niekorzystne uskoki funkcji celu są najmniejsze, a więc w pobliżu których przebiegają linie całkowitych wartości T_c/t_s . Ponieważ jednak parametry skrawania są wyznaczone niezależnie dla każdej z krawędzi, więc dla krawędzi 1 było to miejsce dla wartości T_c/t_s nieco mniejszych niż 2, a dla krawędzi 2 miejsce dla T_c/t_s nieco mniejszego niż 3. Mimo to i tak trzeba użyć do wykonania partii wyrobów po trzy krawędzie, co powoduje zwiększenie o około 4% kosztów wytwarzania określonych metodą tradycyjną. Jak wynika z wcześniejszych analiz kształtów funkcji ce-

łów i powstawania ich nieciągłości, uskoki funkcji, w wyniku niewykorzystania okresu trwałości ostatniego z narzędzi kończącego partię wyrobów, mogą być bardziej znaczące niż w badanym tu przykładzie. Wnioski tam wyciągnięte można odnieść także do krawędzi mniej obciążonej w narzędziu wielozadaniowym.

Tabela 6.2. Wyniki optymalizacji parametrów skrawania dla narzędzia wielozadaniowego, przeprowadzonej metodą tradycyjną oddzielnie dla każdej z krawędzi
Table 6.2. Results of cutting parameter optimization for a multi-purpose tool carried out by the traditional method separately of each edge

Wyniki optymalizacji parametrów skrawania v_c i f Kryterium optymalizacji → minimum kosztów						
zabiegi →	zadanie $i = 1$			zadanie $i = 2$		
	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$	
$i = 1 \rightarrow d$; $i = 2 \rightarrow d_{max}$	80	90	100	80	70	
$i = 1 \rightarrow L$; $i = 2 \rightarrow d_{min}$	40	20	100	70	60	
Głębokość skrawania a_p [mm]	5	3	1	3	1	
Ograniczenia						
Chropowatość R_a [mm]	5	2,5	1,25	2,5	1,25	
Moc efektywna na wrzecionie P_e [kW]	22	22	22	22	22	
Max. siła odporowa skrawania F_p [N]	2000	2000	2000	2000	2000	
Max. obroty wrzeciona obrabiarki n_{wr} [obr/min]	3500	3500	3500	3500	3500	
Max. prędkość skr. z uwagi na T_c v_c [m/min]	450	450	450	450	450	
Min. prędkość skr. z uwagi na T_c v_c [m/min]	10	10	10	10	10	
Max. posuw z uwagi na T_c f [mm/obr]	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	
Min. posuw z uwagi na T_c f [mm/obr]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Optymalizowane parametry						
Prędkość skrawania v_c [m/min]	159,11	204,00	259,91	245,00	289,00	
Posuw f [mm/obr]	0,387	0,258	0,171	0,260	0,171	
Czas główny t_g [min]	0,173	0,107	0,732	0,276	0,267	
Czas sumaryczny skrawania t_s [min]	0,962			0,516		
Funkcja celu						
Koszt jednostkowy K_j [zł/szt]	1,4787					
Czas operacji t_{sz} [min/szt]	2,4610					
Trwałość krawędzi skrawającej $T_{c(f)}$ [min]	28,56			10,33		
Liczba operacji w okresie trwałości T_c/t_s	30,02			20,04		
Teoretyczna liczba krawędzi konieczna do wykonania zlecenia	1,99			2,994		
Rzeczywista liczba narzędzi konieczna do wykonania zlecenia	3,00					
Wszystkie ograniczenia spełnione!						

Zaproponowana metodyka optymalizacji parametrów skrawania dla narzędzi wielozadaniowych, w porównaniu z metodyką tradycyjną, odznacza się następującymi właściwościami:

- pozwala na wyznaczenie bardziej korzystnego stanu obiektu,
- parametry skrawania dla poszczególnych krawędzi są tak dobierane, że można w pełni wykorzystać ich możliwości obróbkowe,
- przedstawione funkcje celu pozwalają na uwzględnianie stosowanych w praktyce procedur wymiany zużytych narzędzi, takich jak: uprzedzająca wymiana narzędzia, gdy jego trwałość resztkowa jest mniejsza niż czas jego użycia w następnym zadaniu obróbkowym, wykorzystywanie lub niewykorzystywanie trwałości resztkowych, które pozostają narzędziom po wykonaniu pewnej liczby operacji lub całej partii wyrobów, co przyczynia się do dokładniejszego wyznaczenia wartości czasu i kosztów operacji.

Zaproponowana metodyka pozwala ponadto na optymalizację parametrów skrawania w operacji wielozabiegowej, z możliwością przyjmowania różnych ograniczeń dla poszczególnych zabiegów w każdym z zadań, co jest często stosowane w pracy narzędzi używanych na OSN-ach.

Zaproponowana procedura i możliwości programu SOLVER umożliwiają optymalizację parametrów skrawania również z takimi warunkami ograniczającymi, jak:

- wykonanie zadania określoną liczbą narzędzi siostrzanych
- założenie wzajemnej krotności liczby operacji obrobionych poszczególnymi krawędziami, np. można postawić taki warunek, aby krawędź mniej obciążona zużywała się po 1,2,3, ...-krotnie większej liczbie obrobionych przedmiotów niż krawędź bardziej obciążona, co może mieć znaczenie w takich przypadkach, gdy występują wyraźne różnice w drogach skrawania w poszczególnych zadaniach i da się regenerować ostrza niezależnie od siebie.

W świetle przedstawionych wyników badań analitycznych można uznać, że w tych przypadkach, gdy jest to możliwe, parametry skrawania dla krawędzi mniej obciążonych narzędzi wielozadaniowych powinny być tak zwiększone, aby zużycie wszystkich krawędzi następowało po wykonaniu tej samej liczby przedmiotów, co zwiększyłoby efektywność wytwarzania.

7. EFEKTYWNOŚĆ OBRÓBKI NA TOKARKACH NC I MOŻLIWOŚCI JEJ ZWIĘKSZANIA

7.1. ZAŁOŻENIA ANALIZY FUNKCJI CELÓW

Aby analiza funkcji czasu i kosztów wytwarzania nie dotyczyła wybranej, wąskiej grupy obrabianych przedmiotów, narzędzi i obrabiarek NC, lecz mogła mieć ogólny charakter, dokonano następujących ustaleń i założeń:

□ Do prowadzenia analiz wzięto pod uwagę klasyczne funkcje, które nie mają nieciągłości ani miejsc nieoznaczoności spowodowanych niewykorzystywaniem trwałości reszkowych narzędzi, gdyż badania analityczne miały na celu określenie wzajemnych zależności i proporcji składników dla przeciętnych warunków spotykanych w praktyce przemysłowej. Poddanie analizie funkcji mających nieciągłości i miejsca nieoznaczoności nie wywołałoby zmian jakościowych we wnioskach, a spowodowałoby konieczność ciągłego odnoszenia się do sytuacji i miejsc, w których porównywano wartości funkcji oraz do zakłóceń występujących w tych miejscach, które mogłyby być raz znaczne a drugi raz pomijalnie małe.

□ Przeanalizowano programy NC do obróbki wybranych typowych przedmiotów, by na tej podstawie określić przeciętne proporcje udziału poszczególnych składników w badanych funkcjach celu. Proporcje te będą stanowiły punkt odniesienia podczas analiz.

□ Jest oczywiste, że zwiększanie efektywności wytwarzania można dokonywać przez zwiększanie wszystkich trzech parametrów skrawania: prędkości, posuwu i głębokości. Jednak spośród nich analizowano jedynie wpływ prędkości skrawania, ponieważ zwiększanie posuwu, jak do tej pory, mimo braku technicznych przeszkód, jest ograniczane pogarszającą się jakością warstwy wierzchniej i wymaganą dokładnością wymiarowo-kształtową obróbki. Spowodowane jest to silnym odwzorowywaniem się naroża ostrza na powierzchni obrabianego przedmiotu, przypominającym toczenie gwintu, a także występowaniem bardzo dużych sił skrawania, które wraz z nierównomiernym naddatkiem i różną podatnością układu OUPN w całej przestrzeni roboczej obrabiarki wywołują trudne do przewidzenia i skompensowania odkształcenia, a co za tym idzie, także znaczne błędy toczenia. Ponadto wydajne skrawanie z dużą prędkością i dużym posuwem wymusza stosowanie bardzo szybkich przemieszczeń suportów narzędziowych o znacznych masach. Pogarsza to warunki pracy obrabiarek w chwili włączania i wyłączania układów napędowych posuwów, co z kolei pogłębia niekorzystne dynamiczne zjawiska, obniżające jakość obróbki.

□ Kolejny parametr obróbki – głębokość skrawania – jest zdeterminowana naddatkiem przewidzianym dla określonego rodzaju obróbki (zgrubnej, kształtującej i wykańczającej).

Z tego powodu, a także ze względu na zauważalną tendencję do zmniejszania się naddatków obróbkowych, w badaniach nie uwzględniono również i tego parametru skrawania.

□ Postanowiono w prowadzonej analizie nie brać pod uwagę ograniczeń obszaru dopuszczalnych rozwiązań szczególnie tam, gdzie wyznaczać się będzie optymalne parametry skrawania, by nie krępować poszukiwań kierunków zwiększania efektywności wytwarzania. Zwracać się będzie natomiast uwagę na możliwość ich występowania wszędzie tam, gdzie rzutować to może na zwiększanie wydajności lub obniżanie kosztów obróbki.

□ Uniezależniono się od odmian i liczby narzędzi biorących udział w realizacji programów obróbkowych. Dokonano tego podobnie jak w metodyce optymalizacyjnej – przez zdekomponowanie funkcji czasu i kosztów wytwarzania tak, by wyodrębnić z nich te niezależne człony, które dotyczą pracy poszczególnych narzędzi. Inne człony tych funkcji, które nie są związane bezpośrednio z czasem maszynowym obróbki lub kosztami narzędziowymi, takie jak np. t_{pz} , t_p , t_{pNC} , K_{przyg} , K_{pow} itp., odniesione zostały do jednego narzędzia biorącego udział z zadaniu obróbkowym. Występują one w tak zdekomponowanych funkcjach celu, jako wartości średnie. Chcąc obliczyć całkowite czasy lub koszty operacji należy zsumować odpowiednio czasy lub koszty obróbki poszczególnymi narzędziami.

□ Mając określone przeciętne proporcje składników badanych funkcji, odniesione do jednego narzędzia, można przeprowadzać dowolne dalsze analizy, biorąc pod uwagę tylko jedno „uśrednione” narzędzie. Wyciągnięte na tej podstawie wnioski i spostrzeżenia można uznać za tak samo prawdziwe jak te, które uzyskano na podstawie bardziej złożonych i skomplikowanych analiz uwzględniających obróbkę wieloma różnorodnymi narzędziami. Takie podejście ułatwia znacznie prowadzenie rozumowania, ale nie upraszcza samego zagadnienia. Przykładowo, jeśli weźmie się pod uwagę tylko jedno narzędzie, to analiza wpływu zwiększania się kosztów narzędziowych na zmiany optymalnej prędkości skrawania nie nastrocza żadnych kłopotów. Taka analiza staje się natomiast bardzo złożona i mało czytelna, jeśli chce się dokonać tego samego, ale z uwzględnieniem całej operacji z użyciem kilku lub też kilkunastu narzędzi, z których każde ma inną cenę, inne zadanie do wykonania i ma skrawać z różnymi parametrami.

7.1.1. ANALIZA PROGRAMU NC I JEJ WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA

Biorąc pod uwagę powyższe założenia przeanalizowano obróbkę kilku typowych przedmiotów [77, 159, 197]. Były to krótkie wałki, tuleje i tarcze. Przedmioty i programy do ich obróbki wzięto z zastosowań przemysłowych. Dane dotyczące czasów pomocniczych, przygotowawczo-zakończeniowych, wymiany narzędzi, określania korekcji itp., a także składniki funkcji kosztów, przyjęto na podstawie sondaży przeprowadzonych w kilku wybranych przedsiębiorstwach Dolnego Śląska.

Sposób, w jaki przeprowadzono analizy, przedstawiono na przykładzie obróbki pokrywy pokazanej na rys. 7.1. Program NC do realizacji obróbki tego przedmiotu przedstawiono w tab. 7.1. Tabela ta jest jednocześnie arkuszem kalkulacyjnym napisanym w programie EXCEL 7.0 i służy do obliczania: czasów obróbki dla poszczególnych przejść, czasów ruchów jałowych, czasów wykonywania czynności pomocniczych realizowanych według programu NC oraz trwałości narzędzi użytych w operacji.

Tabela zasadnicza (tab. 7.1) składa się z 19 kolumn podzielonych na 4 grupy. Liczba wierszy zależy od długości analizowanego programu NC. W lewym górnym rogu tabeli znajduje się oznaczenie programu (numer) oraz nazwa obrabiarki i układu sterowania. Te ostatnie informacje są istotne, ponieważ czas realizacji tego samego programu przez różne obrabiarki (różne systemy sterowania) jest różny. Wynika to z różnic w:

- wartościach posuwów szybkich, możliwych do zrealizowania w poszczególnych osiach
- czasie rozpędzania i hamowania wrzecion
- czasie pozycjonowania wrzecion i suportów
- czasie obrotu głowicy narzędziowej itp.

W tabeli pomocniczej zamieszczono wartości korekcji, użytych podczas realizacji programu, a także położenia głowic narzędziowych I1 i I2 względem układu współrzędnych obrabiarki.

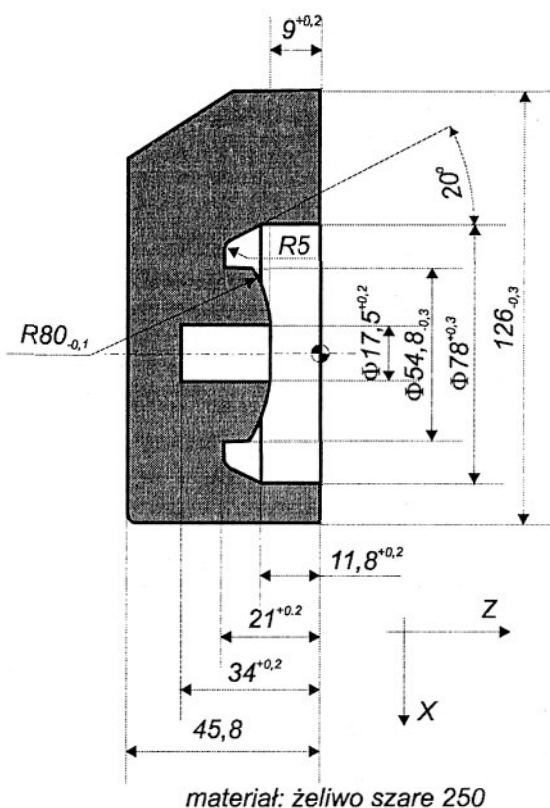
Poszczególne kolumny tabeli arkusza kalkulacyjnego to:

□ **Program NC** – zawiera program NC zapisany w postaci alfanumerycznej.

□ **Czas wykonania pomocniczych instrukcji technologicznych**, z których wyodrębniono:

- Czas t_{obg} zmiany pozycji głowicy narzędziowej (po wywołaniu jej w programie NC) składa się z czasów odblokowania i zablokowania głowicy oraz czasu obrotu głowicy o n położen. Należy uwzględnić tu sposób, w jaki głowica osiąga zadane położenie. Obrót jej może następować albo zawsze w jedną stronę, albo po najkrótszej drodze (możliwość obrotu w obie strony). W analizowanym przypadku realizacji obróbki na obrabiarce SPT 16N-C czas obrotu głowicy o jedną pozycję wynosi $t_{obg} = 1,5$ s.

- Czas rozpędzania i hamowania $t_{roz+ham}$ wrzeciona obrabiarki oraz suportów podczas wykonywania ruchów roboczych i szybkich. Przyspieszenie głowicy narzędziowej dla analizowanej obrabiarki jest takie same w osi x i z i wynosi $0,5 \text{ m/s}^2$. Dla ruchów szybkich (G00) czas ten wynosi 0,4 s, dla ruchów roboczych natomiast, ze względu na znikomy procentowy jego udział, został pominięty.



materiał: żeliwo szare 250

Rys. 7.1. Przedmiot obrabiany na tokarce SPT 16N-C z wykorzystaniem programu obróbkowego POKRYWA CYLINDRA

Fig. 7.1. Workpiece machined on SPT 16N-C lathe using the machining program POKRYWA CYLINDRA

Tabela 7.1. Przykład arkusza kalkulacyjnego do obliczania
Table 7.1. Example of spreadsheet for the calculation

Przedmiot obrabiany – pokrywa cylindra								Czas wykonania pomocniczych instrukcji technologicznych.		
Program NC								t_{zm} s	$t_{roz}+t_{ham}$ s	t_{poz} s
N10	G0		G40 G54		G90 G95	T11	M03 S350M39		4,06	
N20	G43	X	73,00	Z	0,40		D1		0,40	0,15
N30	G1	X	38,00	Z	0,40		F60			0,15
N40	G0	X	38,00	Z	200,00				0,40	0,15
N50		X	120,00	Z	200,00				0,40	0,15
N60	G0		G55 G95			T01	M03 S350M39	1,50		
N70	G43	X	-32	Z	3,00		D2		0,40	0,15
N80	G1	X	-32,75	Z	3,00		F250			0,15
N90		X	-32,75	Z	-14,00		F450			0,15
N100		X	-32,75	Z	-20,50		F30			0,15
N110	G0	X	-32,75	Z	3,70				0,40	0,15
N120		X	-38,80	Z	3,70		D3		0,40	0,15
N130	G1	X	-38,80	Z	-11,94		F50			0,15
N140		X	-36,70	Z	-17,70		F40			0,15
N150	G3	X	-32,85	Z	-20,40	I 3,85	K 1,40			0,15
N160	G0	X	-32,85	Z	3,00				0,40	0,15
N170		X	-32,85	Z	150,00				0,40	0,15
N180	G0		G55		G90 G95	T02	M03 S500M39	1,50		
N190	G43	X	-32,85	Z	3,00		D4		0,40	0,15
N200	G1	X	-10,50	Z	3,00		F500			0,15
N210		X	-10,50	Z	-7,00		F500			0,15
N220		X	-22,00	Z	-12,00		F40			0,15
N230		X	-32,85	Z	-18,00		F40			0,15
N240		X	-32,85	Z	-19,04		F350			0,15
N250	G2	X	-14,85	Z	-8,79	I 28,55	K -29,20			0,15
N260	G1	X	-32,85	Z	-8,79		F500			0,15
N270		X	-32,85	Z	-19,74		F350			0,15
N280	G2	X	-14,80	Z	-9,31	I 28,55	K -28,50			0,15
N290	G0	X	-14,80	Z	200,00				0,40	0,15
N300	G0		G55		G95	T03	M03 S25M39	1,50		
N310	G43	X	0,00	Z	3,00		D6		0,40	0,15
N320	G1	X	0,00	Z	-10,00		F300			0,15
N330		X	0,00	Z	-33,70		F120			0,15
N340	G0	X	0,00	Z	150,00				0,40	0,15
N350	G40	X	-160,00	Z	150,00		M5		0,44	0,15
N360			T11					1,50		
N370			M30							

czasu obróbki przedmiotu na podstawie programu NC
of workpiece machining time based on NC program

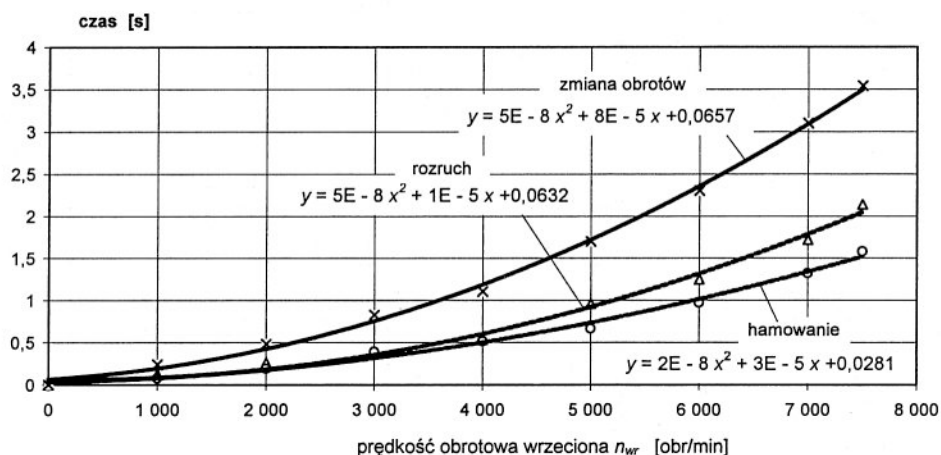
Dane pozyskane z programu NC									Dane wyliczone			
dX mm	dZ mm	a_p mm	n_{wr} obr/min	v_c m/min	f mm/obr	v_f mm/min	D mm	Nr narz.	L mm	t_g s	t_{rd} s	t_{pNC} s
			350					10				4,06
44,00	149,60		350			6000,0		10	149,60		2,05	
35,00	0,00	3,00	350	83,52	0,06		76,00	10	35,00	100,1		
0,00	-199,60		350			6000,0		10	199,60		2,55	
-82,00	0,00		350			6000,0		10	82,00		1,37	
			350					1				1,50
-127,40	-197,20		350			6000,0		1	197,20		2,52	
0,75	0,00	0,75	350	71,98	0,25		65,50	1	0,75	0,66		
0,00	17,00	0,75	350	71,98	0,45		65,50	1	17,00	6,63		
0,00	6,50	0,75	350	71,98	0,03		65,50	1	6,50	37,29		
0,00	-24,20		350			6000,0		1	24,20		0,79	
6,05	0,00		350			6000,0		1	6,05		0,61	
0,00	15,64	1,05	350	85,28	0,05		77,60	1	15,64	53,77		
-2,10	5,76	1,05	350	80,67	0,04		73,41	1	6,13	26,42		
-3,85	2,70	1,05	350	72,20	0,04		65,70	1	4,71	20,32		
0,00	-23,40		350			6000,0		1	23,40		0,78	
0,00	-147,00		350			6000,0		1	147,00		2,02	
			500					2				1,50
4,10	-146,30		500			6000,0		2	146,30		2,01	
-22,35	0,00	3,00	500	32,97	0,50		21,00	2	22,35	5,51		
0,00	10,00	3,00	500	32,97	0,50		21,00	2	10,00	2,55		
11,50	5,00	2,00	500	69,08	0,04		44,00	2	12,54	37,77		
10,85	6,00	2,00	500	103,15	0,04		65,70	2	12,40	37,35		
0,00	1,04	2,00	500	103,15	0,35		65,70	2	1,04	0,51		
-18,00	-10,25	2,00	500	46,63	0,35		29,70	2	20,88	7,31		
18,00	0,00	2,00	500	103,15	0,50		65,70	2	18,00	4,47		
0,00	10,95	3,00	500	103,15	0,35		65,70	2	10,95	3,90		
-18,05	-10,43	0,50	500	46,47	0,05		29,60	2	21,02	50,59		
0,00	-209,31		500			6000,0		2	209,31		2,64	
			250					3				1,50
14,80	-117,10		250			6000,0		3	117,10		1,72	
0,00	13,00	8,75	250	13,74	0,30		17,50	3	13,00	10,55		
0,00	23,70	8,75	250	13,74	0,12		17,50	3	23,70	47,55		
0,00	-183,70		250			6000,0		3	183,70		2,39	
160,00	0,00		250			6000,0		3	160,00		2,19	
								11				1,50
								11				

Tabela korekcji

Nr	X	Z
D1	-3,00	0,00
D2	0,60	-0,20
D4	4,10	0,70
D6	0,00	79,90
I1	120,00	0,00
I2	-160,00	0,00

Na początku programu obróbkowego układ sterowania sprawdza wszystkie systemy oraz wykonuje instrukcje zawarte w pierwszym wierszu programu. Najczęściej dotyczą one: zmiany układu współrzędnych, rodzaju przyjętego układu współrzędnych, jednostek, w jakich jest określany posuw itp. Dla pierwszego wiersza programu czas ten określono doświadczalnie. Jego wartość wyniosła 4,06 s.

Czas rozruchu i hamowania $t_{roz+ham}$ wrzeciona obrabiarki jest wbrew pozorom dość trudno wyliczyć analitycznie ze względu na brak wielu danych dotyczących właściwości dynamicznych i bezwładnościowych poszczególnych elementów układu napędowego wrzeciona obrabiarki, w tym samego silnika. Ponieważ czasy te mogą mieć istotne znaczenie podczas analiz, w których będzie badany numerycznie wpływ dużych prędkości skrawania (wymagających bardzo dużych wartości prędkości obrotowych wrzecion) zdecydowano, aby czasy te określić z funkcji uzyskanych na podstawie badań doświadczalnych. Chcąc mieć dane dla możliwie szerokiego zakresu zmian prędkości obrotowych wrzecion, wybrano tokarkę NC V200 firmy INDEX, która ma elektrowrzeciono o maksymalnych obrotach ± 7500 obr/min.



Rys. 7.2. Czas rozruchu, hamowania i zmiany kierunku obrotów wrzeciona tokarki V200 INDEX obciążonej przedmiotem o momencie bezwładności $J = 0,0148 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

Fig. 7.2. Spindle acceleration, breaking, and rotation-reversal time for V200 INDEX lathe loaded with a workpiece having moment of inertia $J = 0,0148 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

Badania wykonano w następujący sposób: W uchwycie wrzeciona zamocowano przedmiot o maksymalnej dopuszczalnej masie dla tej obrabiarki i dla uchwytu. Jego moment bezwładności wynosił $J = 0,0148 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. Następnie rozpędzano, hamowano i zmieniano kierunek obrotów wrzeciona dla następujących prędkości obrotowych: 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 6000, 7000 i 7500 obr/min. Czasy realizacji badanych funkcji mierzono

za pomocą czujnika indukcyjnego i oscyloskopu TEKTRONIC 2230 sprzężonego z ploterem GRAPHICS PLOTTER 2319. Wyniki z przeprowadzonych pomiarów (jako wartości średnie z trzech powtórzeń) wraz z obliczonymi, metodą najmniejszych kwadratów, funkcjami je opisującymi, przedstawiono na rys. 7.2. W ten sposób wyznaczone funkcje użyto do określania czasów rozpędzania i hamowania wrzecion.

Obrabiarka, na której obrabiano przedmiot analizowany w tym przykładzie, nie miała elektrowrzeciona jak tokarka V200 INDEX i jej charakterystyka dynamiczna napędu była zdecydowanie gorsza. Jednak dla stosowanych w programie małych wartości prędkości obrotowych wrzecion, mieszczących się w przedziale 250–500 obr/min, błędy w wyznaczaniu czasów rozruchu i hamowania i zmiany obrotów były pomijalnie małe.

- Czas pozycjonowania t_{poz} głowicy narzędziowej (suportu) po wykonaniu ruchu przyjęto z tab. 1 zamieszczonej w pracy [131] na s. 190. Wynosił on średnio 0,15 s.

- Czas t_{moc} mocowania, zaciśnięcia szczęk, dosunięcia konika, jeśli jest on wywoływany z programu i wykonywany automatycznie. W rozpatrywanym przykładzie ma on wartość równą zero, gdyż wykonywany jest ręcznie przez operatora i objęty jest czasem pomocniczym $t_{p(r)}$.

□ **Czas wczytania i realizacji bloku t_{wczytb}** – zależy od układu sterowania, jego mocy obliczeniowej i sposobu przygotowania bloków do realizacji. Do tego składnika czasu zaliczyć należy również czas związany z realizacją instrukcji G04 (zwłoka czasowa). Czas wczytania jednego cyklu wynosi około 50–100 ms. Obrabiarki wyposażone w nowoczesne systemy sterowania najczęściej analizują i przetwarzają wyprzedzająco kilka bloków.

Ponieważ czynności te są realizowane w czasie pokrytym, przeto nie ma potrzeby uwzględniania ich w arkuszu kalkulacyjnym. Gdy program NC składa się z cykli, które są generowane przez obrabiarkę, wówczas czas ten należy uwzględnić.

□ **Dane pozyskane z programu NC** – w skład tej grupy czynników wchodzi następujące dane:

- Przesunięcie dX oblicza się ze wzorów:
– dla aktywnego G90 (programowanie bezwzględne)

$$dX = X_j - X_{j-1} \quad (7.1)$$

- dla aktywnego G91 (programowanie przyrostowe):

$$dX = X_j \quad (7.2)$$

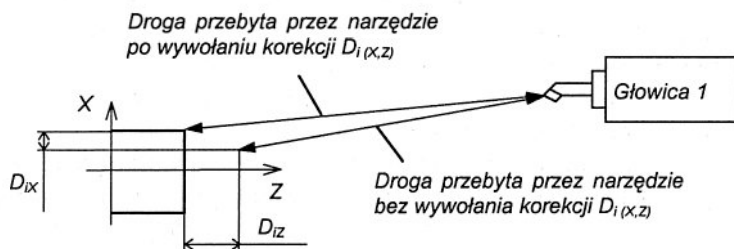
- Przesunięcie dZ oblicza się ze wzorów
– dla aktywnego G90 (programowanie bezwzględne)

$$dZ = Z_j - Z_{j-1} \quad (7.3)$$

- dla aktywnego G91 (programowanie przyrostowe)

$$dZ = Z_j \quad (7.4)$$

Podczas obliczania przesunięcia zarówno w osi x , jak i z należy pamiętać, że każde narzędzie ma swoje wartości korekcji w poszczególnych osiach. Wywołanie ich spowoduje zmianę przebytej przez narzędzie drogi (rys. 7.3).



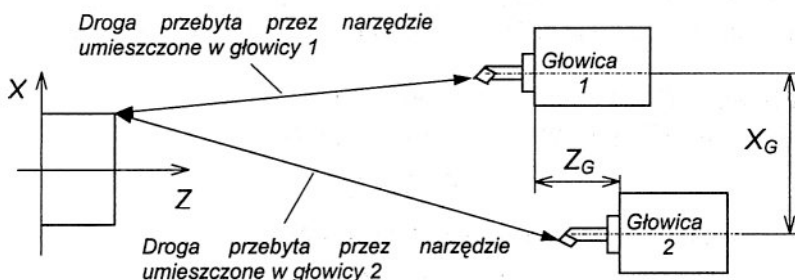
Rys. 7.3. Zmiana drogi przebytej przez narzędzie po wywołaniu korekcji
Fig. 7.3. Variation in tool trajectory after calling the correction

Dlatego po wywołaniu korekcji narzędzia ($D_{I(X,Z)}$) przemieszczenie w osiach x i z oblicza się ze wzorów (dla aktywnego G90 – programowanie współrzędnościowe)

$$dX = X_j - X_{j-1} + D_{IX}, \quad (7.5)$$

$$dZ = Z_j - Z_{j-1} + D_{IZ}. \quad (7.6)$$

Gdy obrabiarka ma więcej niż jedną głowicę narzędziową, należy pamiętać o tym, że po wywołaniu narzędzia z głowicy 2 droga przez nie przebyta jest inna niż narzędzia wywołanego z głowicy 1.



Rys. 7.4. Zmiana drogi przebytej przez narzędzia po ich wywołaniu z różnych głowic
Fig. 7.4. Variation in trajectory of tools after having been called from various heads

Do obliczenia przemieszczenia narzędzia, wywołanego z innej głowicy, konieczna jest znajomość wartości X_G i Z_G położenia głowic względem siebie lub położenie głowic w układzie współrzędnych obrabiarki. Po wywołaniu narzędzia z innej głowicy przemieszczenie w osiach x i z oblicza się ze wzorów (gdy obrabiarka ma 2 głowice i dla aktywnego G90 – programowanie współrzędnościowe):

$$dX = X_j - X_{j-1} \pm X_G, \quad (7.7)$$

$$dZ = Z_j - Z_{j-1} \pm Z. \quad (7.8)$$

Znak „+” występuje wówczas, gdy najpierw pracowała głowica 2, a następnie 1, znak „-” natomiast wtedy, gdy kolejność jest odwrotna (1 → 2). Dla obrabiarki SPT 16N-C odległości te wynoszą: $X_G = 0$ mm, $Z_G = 280$ mm.

• Głębokość skrawania a_p jest obliczana na podstawie: rysunku surówki, rysunku elementu po obróbce i programu NC.

• Prędkość obrotowa $n_{wr(ij)}$ wrzeczona może być stała lub zmienna w trakcie realizacji bloku. Gdy aktywna jest instrukcja G96 (stała prędkość skrawania), wtedy prędkość obrotowa zależy od stałej prędkości skrawania, średnicy toczenia i ograniczeń ($R_{nwr(max)}$ i $R_{nwr(min)}$).

• Prędkość skrawania $v_{c(ij)}$ oblicza się ze wzoru

$$v_c = \frac{\pi D n_{wr}}{1000}. \quad (7.9)$$

• Posuw $f_{(ij)}$ wywołujący funkcją G95,

• Posuw minutowy $v_{f(ij)}$ wywołujący funkcją G94. Dla ruchu szybkiego (G00) wartość posuwu jest wielkością stałą, zależną od obrabiarki i układu sterowania. Dla obrabiarki SPT 16N-C wartość posuwu szybkiego jest taka sama w osiach x oraz z, i wynosi 6000 mm/min.

• Średnica obróbki $D_{(ij)}$

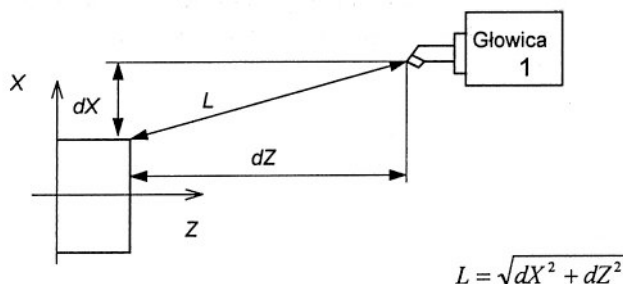
$$D = 2X_{jmax}. \quad (7.10)$$

• Numer Nr narz. aktualnie pracującego narzędzia (numer pozycji głowicy).

□ **Dane wyliczone** odnoszą się do następujących wielkości:

• Droga $L_{(ij)}$ przebyta przez narzędzie podczas j -tego przejścia. W zależności od rodzaju ruchu wzory określające przemieszczenie przybierają następującą postać:

– dla ruchów prostoliniowych (instrukcje G00 i G01) (rys. 7.5)

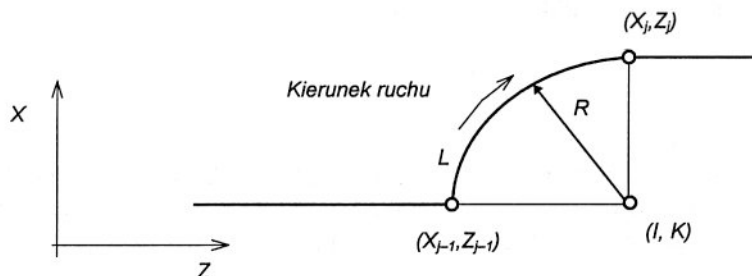


Rys. 7.5. Dane do obliczenia przemieszczeń realizowanych za pomocą instrukcji G00 i G01
Fig. 7.5. Data for calculation of displacement carried out by means of instructions G00 and G01

– dla interpolacji kołowej realizowanej instrukcjami G02 i G03:

◇ gdy dany jest środek łuku o współrzędnych (I, K) oraz współrzędne początku i końca łuku (rys. 7.6)

$$L = \pi \sqrt{(X_j - I)^2 + (Z_j - K)^2} \arccos \frac{2[(X_j - I)^2 + (Z_j - K)^2] - (X_j - X_{j-1})^2 - (Z_j - Z_{j-1})^2}{2[(X_j - I)^2 + (Z_j - K)^2]}. \quad (7.11)$$



Rys. 7.6. Dane do obliczenia długości łuku podczas realizacji instrukcji G02 i G03
Fig. 7.6. Data for calculation of arc length when performing instructions G02 and G03

◇ gdy dany jest promień łuku R i współrzędne początku oraz końca łuku

$$L = \pi R \arccos \frac{2R - (X_j - X_{j-1})^2 - (Z_j - Z_{j-1})^2}{2R}. \quad (7.12)$$

- Czas maszynowy $t_{g(ij)}$ jest to czas wykonania bloku, podczas którego następuje obróbka przedmiotu. W zależności od zadeklarowanego posuwu (G95 – mm/obr czy G94 – mm/min), jest on obliczany z zależności
 - dla posuwu $f_{(ij)}$ w mm/obr:

$$t_{g(ij)} = \frac{L_{(ij)}}{f_{(ij)} n_{wr(ij)}}. \quad (7.13)$$

– dla posuwu $v_{f(ij)}$ w mm/min:

$$t_{g(ij)} = \frac{L_{(ij)}}{v_{f(ij)}}. \quad (7.14)$$

- Czas ruchu jałowego $t_{rd(i)}$ (szybkiego), realizowanego instrukcją G00, określa się ze wzoru:

$$t_{rd} = t_{roz} + t_g + t_{ham} + t_{poz}. \quad (7.15)$$

Mogą wystąpić dwa przypadki realizacji ruchów jałowych, które rzutować będą na sposób obliczania czasów t_{rd} . Pierwszy z nich to taki, w którym droga zamierzonego przemieszczenia suportu $L_{(rd)}$ jest zbyt krótka na to, aby możliwe było osiągnięcie maksymalnej prędkości suportu $v_{f(max)}$ ze względu na czas konieczny do jego rozpędzania i zahamowania. W takim przypadku przy założeniu, że rozruch i hamowanie odbywają się z taką samą wartością bezwzględną przyspieszenia, czas ruchu jałowego można określić ze wzoru

$$t_{rd} = t_{roz} + t_{ham} + t_{poz}, \quad (7.16)$$

a czas rozruchu i hamowania suportów t_{roz} i t_{ham} można wyznaczyć z zależności określającej drogę w ruchu jednostajnie przyspieszonym:

$$\frac{L_{(rd)}}{2} = \frac{60 \times 60 \times 1000 a_s t_{roz, ham}^2}{2} \rightarrow t_{roz} = t_{ham} = \sqrt{\frac{L_{(rd)}}{3600000 a_s}}, \quad (7.17)$$

po podstawieniu do (7.16) otrzyma się

$$t_{rd} = 2 \sqrt{\frac{L_{(rd)}}{3600000 a_s}} + t_{poz}. \quad (7.18)$$

W drugim przypadku, ogólnym, droga przemieszczenia się suportu jest wystarczająca na to, aby osiągnął on maksymalną prędkość $v_{f(max)}$. Wówczas, opierając się na podstawowych wzorach obowiązujących dla ruchów jednostajnego i jednostajnie przyspieszonego, można wyliczyć poszczególne składniki wzoru określającego czas t_{rd} . Czas rozruchu i hamowania suportu przedstawia wzór

$$t_{roz} = t_{ham} = \frac{v_f}{3600 a_s}, \quad (7.19)$$

a czas przemieszczania się suportu ruchem jednostajnym z maksymalną prędkością zależności

$$t_g = \frac{\frac{L_{(rd)}}{1000} - \frac{v_f^2}{3600 a_s}}{v_f}. \quad (7.20)$$

Końcowy wzór określający czas ruchu jałowego przybierze zatem postać

$$t_{rd} = \frac{v_f}{1800 a_s} + \frac{\frac{L_{(rd)}}{1000} - \frac{v_f^2}{3600 a_s}}{v_f} + t_{poz}. \quad (7.21)$$

- Czas $t_{pNC(q)}$ q -tej funkcji pomocniczej realizowanej według programu NC. Na czas ten składają się czasy: rozruchu i hamowania wrzeciona, obrotu głowicy narzędziowej (wywołania nowego narzędzia), mocowania przedmiotów (jeśli jest to realizowane programowo), wczytania i realizacji bloku oraz instrukcja zwłoki czasowej G04. Można to zapisać za pomocą wzoru

$$t_{pNC} = t_{obg} + t_{roz+ham} + t_{moc} + t_{wczytb} \quad (7.22)$$

- Trwałość T_{eff} i -tego narzędzia dla zmiennych parametrów obróbki jest obliczana ze wzoru (2.8).

Tabela 7.2. Narastający czas realizacji poszczególnych bloków programu NC Pokrywa cylindra, zmierzonych i obliczonych analitycznie

Table 7.2. Increasing realization time of individual blocks in NC program Pokrywa cylindra, both measured and calculated analytically

Nr wiersza programu NC	Wartość zmierzona		Wartość średnia	Wartość obliczona	Różnica
	t_l	t_2	t_{sr}	t_l	$dt = t_{sr} - t_l$
	min, s		s		
N10	0,03	0,04	3,50	4,00	-0,50
N20	0,04	0,05	4,50	6,05	-1,55
N30	1,46	1,45	105,50	106,20	-0,70
N40	1,48	1,48	108,00	108,74	-0,74
N50	1,50	1,50	110,00	110,11	-0,11
N60	1,51	1,51	111,00	111,61	-0,61
N70	1,52	1,52	112,00	114,13	-2,13
N80	1,54	1,55	114,50	114,80	-0,30
N90	1,59	1,59	119,00	121,42	-2,42
N100	2,37	2,38	157,50	158,72	-1,22
N110	2,38	2,39	158,50	159,51	-1,01
N120	2,39	2,40	159,50	160,12	-0,62
N130	3,32	3,33	212,50	213,89	-1,39
N140	4,00	3,58	239,00	240,31	-1,31
N150	4,21	4,21	261,00	260,64	0,36
N160	4,22	4,22	262,00	261,42	0,58
N170	4,24	4,24	264,00	263,44	0,56
N180	4,26	4,27	266,50	264,94	1,56
N190	4,28	4,29	268,50	266,95	1,55
N200	4,34	4,35	274,50	272,47	2,03
N210	4,38	4,35	276,50	275,02	1,48
N220	5,14	5,13	313,50	312,79	0,71
N230	5,52	5,52	352,00	350,13	1,87
N240	5,53	5,53	353,00	350,64	2,36
N250	5,58	5,58	358,00	357,95	0,05
N260	6,00	6,00	360,00	362,42	-2,42
N270	6,05	6,05	365,00	366,32	-132
N280	6,55	6,54	414,50	416,92	-2,42
N290	6,58	6,57	417,50	419,56	-2,06
N300	7,00	7,01	420,50	421,06	-0,56
N310	7,02	7,03	422,50	422,78	-0,28
N320	7,13	7,14	433,50	433,33	0,17
N330	7,59	7,59	479,00	480,88	-1,88
N340	8,01	8,01	481,00	483,27	-2,27
N350	8,03	8,03	483,00	485,42	-1,42
N360	8,05	8,05	485,00	486,92	-1,92
N370	8,07	8,07	487,00	486,92	0,08

Analizując przedstawiony program NC obróbki przedmiotu Pokrywa cylindra wyliczono narastająco czasy realizacji poszczególnych bloków tego programu. Dane te zamieszczono w tab. 7.1 w kolumnach Dane wyliczone. Kolejnym krokiem była weryfikacja tak określonych danych z czasami rzeczywistymi, zmierzonymi podczas realizacji programu obróbkowego. Wyniki tej weryfikacji zamieszczono w tab. 7.2.

Porównanie obliczonych i zmierzonych czasów realizacji bloków wskazuje na dość dużą ich zgodność. Największa różnica między nimi wynosi $-2,42$ s, co stanowi około 0,5% czasu trwania całego programu. Uznano, że taka dokładność szacowania jest wystarczająca.

Z obszernych badań statystycznych, dotyczących wielkości i stosunku długości do średnicy L/D przedmiotów obrabianych na tokarkach, zamieszczonych w pracach [77, 132, 176, 177, 197, 198], a także z analizy tego zagadnienia dokonanego w pracy [159] wynika, że najczęściej, bo w około 45%, przypadków obrabia się przedmioty, których średnica mieści się w przedziale 50–200 mm. Przedmioty o proporcji $L/D < 3$ stanowią około 74% całej populacji. Tak więc najbardziej typowym sposobem obróbki jest toczenie krótkich wałków, tulei lub tarcz nie wymagających mocowania kłem konika. Według prac [77, 176, 177] tego typu sposób mocowania stanowił około 70–74% wszystkich przypadków.

Analizując programy NC, służące do obróbek różnych przedmiotów, w tym także dane przedstawione w tab. 7.1, stwierdzono że średnio, w jednej operacji, w odniesieniu do jednego narzędzia:

- liczba pozycjonowań suportów narzędziowych = 8
- liczba zmian obrotów wrzeciona = 1
- czasy ruchów jałowych (dosuwowych) $t_{rd}/n_n = 9$ s (0,15 min)
- czasy czynności pomocniczych wykonywanych przez obrabiarkę $\Sigma t_{pNC}/n_n = 2,4$ s (0,04 min)
- czas określania korekcji (na obrabiarce metodą próbnych przejazdów) $t_{ok} = 10$ min
- liczba określeń korekcji (na obrabiarce metodą próbnych przejazdów) w ciągu jednego okresu trwałości $\varepsilon_{ok} = 1$
- liczba wprowadzeń korekcji $\varepsilon_{wk} = 3$
- czas jednego wprowadzenia korekcji $t_{wk} = 30$ s (0,5 min)
- stosunek długości drogi ruchów jałowych do drogi ruchów roboczych wynosił 7:1
- stosunek czasów ruchów jałowych do czasu maszynowego $t_{rd}/t_g = 1/20$.

Ustalenia te stanowią będą punkt wyjścia do określenia proporcji danych przyjętych w analizowanych funkcjach celu, które – przypomnijmy – dotyczyć będą czasu i kosztów wytwarzania jednym „uśrednionym” narzędziem. Od danych, z tak przyjętego punktu odniesienia, będą robione kolejno odstępstwa polegające na zmianach tych składników funkcji, których wpływ na efektywność wytwarzania będzie aktualnie badany.

7.2. OPTYMALIZACJA STRUKTURY OPERACJI

Proces technologiczny składa się z wielu działań (operacji, ustawień, zabiegów, przejazdów) przetwarzających półwyrób w gotową część. Będąc łańcuchem działań, pozwala na różno-

rodne możliwości uszeregowania tych czynności. Wybór optymalnego wariantu procesu, w tym także najkorzystniejszego wariantu operacji technologicznej, jest możliwy, jeśli wykorzysta się zasady optymalizacji strukturalnej [251].

Aby wybrany wariant procesu był rzeczywiście najwłaściwszy, trzeba dokonać wyboru najkorzystniejszych parametrów skrawania dla poszczególnych operacji i zabiegów. Czyli trzeba dokonać tzw. optymalizacji parametrycznej.

Trudności w zastosowaniu optymalizacji strukturalnej, ale również i parametrycznej, pojawiają się wtedy, kiedy tworzenie programów NC odbywa się ze znaczącym wspomaganie komputerowym. Na ogół oprogramowanie wspierające opracowywanie programu NC samo generuje większość zabiegów i przejść, kierując się własnymi kryteriami, które nie muszą być zbieżne z kryteriami wybranymi przez technologa opracowującego program. Przeprowadzenie optymalizacji po napisaniu programu NC może być utrudnione ze względu na żmudność prac związanych z wyszukiwaniem niezbędnych danych, a także – na konieczność manualnych zmian programu NC po dokonaniu optymalizacji. Pewnym ułatwieniem może być wsparcie komputerowe tych czynności, np. analiza programów NC z wykorzystaniem programu CEZET (patrz p. 5.1.4).

Te i inne trudności w stosowaniu metod optymalizacji całej operacji technologicznej sprawiają, że nie są one rozpowszechnione w przemyśle. Jednak wydaje się, że jeśli nie w najbliższym czasie, to z pewnością w niedalekiej przyszłości, metody te, wsparte odpowiednim oprogramowaniem, znajdą swoje miejsce w praktyce przemysłowej i przyczynią się do zwiększenia efektywności wytwarzania.

Obecnie właściwe opracowanie procesu technologicznego opiera się w głównej mierze na bogatym doświadczeniu technologów. Już teraz daje się zauważyć [9, 12], że tworzone oprogramowania, wspomagające opracowywanie programów NC, są na tyle skomplikowane i wymagające dużej wiedzy informatycznej, że sprawiają niekiedy spore kłopoty technologom z dużym doświadczeniem warsztatowym. Nie sprawiają tych kłopotów natomiast ludziom młodym, dobrze sobie radzącym w sprawach informatycznych. Ale ci z kolei mają często zbyt małe doświadczenie technologiczne. Jeśli stan taki będzie się w dalszym ciągu utrzymywał, to zwiększać się będzie potrzeba stworzenia takich metod optymalizacyjnych, służących do wspomagania opracowywania operacji technologicznych, które by na zasadzie programów ekspertowych udostępniały niedoświadczonym programistom wiedzę warsztatową. Jednocześnie zauważa się w czołowych światowych firmach informatycznych dążenie do tego, aby nauka użytkowania oraz obsługa oferowanych przez nie oprogramowań stawała się łatwiejsza i prostsza.

7.3. OPTYMALIZACJA PARAMETRÓW SKRAWANIA

Celem optymalizacji parametrów skrawania jest zwiększanie efektywności wytwarzania. Ta droga zmniejszania kosztów i zwiększania wydajności ma i będzie miała nadal dość duże znaczenie. Dowodzi tego ogromna liczba publikacji dotycząca tej tematyki oraz efekty ekonomiczne, jakie uzyskano w wyniku jej zastosowania. Dlaczego zatem nie jest ona powszechnie stosowana w warunkach przemysłowych? Przyczyny tego stanu rzeczy są po części podobne, jak w przypadku optymalizacji struktury operacji. Są nimi:

❑ Złożoność samej metodyki – choć w przypadku optymalizacji parametrycznej jest ona znacznie prostsza w porównaniu z optymalizacją strukturalną.

❑ Wymóg posiadania pewnej wiedzy z dziedziny metod optymalizacyjnych.

❑ Konieczność sprawnego dysponowania zasobem odpowiednich danych.

❑ Liczebność serii wyrobów produkowanych z użyciem OSN-ów jest zazwyczaj mała, a więc koszty i nakłady czasu pracy związane z samą optymalizacją rozkładają się na mniejszą liczbę wyrobów. Dlatego uzyskane skutki optymalizacji są mniejsze niż w produkcji wielkoseryjnej, a nawet w skrajnych przypadkach mogą zwiększać koszty wytwarzania.

❑ Częstym czynnikiem decydującym o przyjęciu zlecenia zewnętrznego, lub uruchomieniu produkcji własnego wyrobu, jest szybkość realizacji zadania. Procedury optymalizacyjne na ogół wydłużają czas przygotowania produkcji, mogą zatem opóźniać termin zakończenia zlecenia.

❑ Trudności z pozyskiwaniem odpowiednich danych z programu NC z uwagi na to, że struktura języków programowania tworzona była pod kątem łatwości pisania samego programu, a nie optymalizacji parametrów skrawania. Ponadto niektóre programy komputerowe, wspomagające tworzenie programu NC, same generują ciąg instrukcji np. na podstawie rysunku, co utrudnia optymalizację, gdyż trzeba wtedy ingerować z zewnątrz w proces wspieranego komputerowo pisania programu.

❑ Brak znajomości wiarygodnych funkcji trwałości narzędzi. Ich znajomość jest warunkiem przeprowadzenia optymalizacji. Jest to obecnie największa przeszkoda w upowszechnianiu optymalizacji. Znane są jedynie nieliczne funkcje trwałości, które zazwyczaj obowiązują dla określonego zakresu parametrów skrawania, wybranego rodzaju obróbki i konkretnej pary materiału obrabianego oraz materiału ostrza [13, 33, 43, 46, 107, 114, 115, 121, 126, 168, 169, 245, 256, 258, 291]. Jeżeli jeszcze przed kilkunastu laty można było znaleźć w literaturze czy poradnikach [122, 156] informacje dotyczące trwałości narzędzi, to obecnie danych takich już się prawie nie spotyka, a poprzednie funkcje trwałości już się zdezaktualizowały w wyniku pojawienia się rozlicznych nowych generacji materiałów narzędziowych. Żaden z producentów narzędzi nie zamieszcza w swoich katalogach, czy materiałach informacyjnych, w sposób jawny funkcji trwałości narzędzi. Jedynie niektórzy z nich podają zalecane wartości parametrów skrawania, dla których można spodziewać się określonej trwałości narzędzia.

❑ Przeprowadzenie optymalizacji wymaga znajomości ograniczeń brzegowych, gdyż w obróbce skrawaniem prawie zawsze ekstremum funkcji celu leży poza obszarem dopuszczalnych rozwiązań. Znajomość przebiegu ograniczeń w funkcji parametrów skrawania jest drugim koniecznym warunkiem przeprowadzenia optymalizacji. Również i w tym przypadku napotyka się duże trudności związane z uzyskaniem tego typu informacji.

Jest to zresztą w pełni zrozumiałe, gdyż zarówno w przypadku trwałości, jak i ograniczeń brzegowych, dokładne opisanie matematyczne tych zależności wymagałoby obszernych, niezwykle kosztownych badań. Można sobie to uzmysłwić dzięki pomnożeniu przez siebie kilkunastu grup materiałów obrabianych, kilkunastu rodzajów materiałów ostrzy, kilku rodzajów powłok, kilkudziesięciu rodzajów narzędzi, kilkunastu rodzajów i odmian skrawania, kilku odmian płynów obróbkowych, kilkunastu wariantów geometrii ostrza, trzech parametrów skrawania i kilku poziomów ich zmian. Daje to rząd wielkości około 30 mln możliwych kombinacji.

Oczywiście nikt taką liczbą danych nie dysponuje. Zresztą nie zawsze pełna optymalizacja, obejmująca możliwie dużą liczbę czynników, jest konieczna, aby przynieść korzyści. Wystarczą czasami jedynie bardzo uproszczone, mało dokładne procedury optymalizacyjne, aby osiągnąć znaczące efekty. Tak np. stało się w latach 60. w USA, gdzie zaproponowano w początkowym etapie wdrażania metod optymalizacyjnych mało skomplikowaną procedurę *High-Efficiency-Programs* [28], obejmującą jedynie prędkość skrawania. Procedura ta, dzięki swej prostocie, bardzo szybko się upowszechniła. Przyniosło to duże zyski w postaci globalnego obniżenia kosztów obróbki skrawaniem, średnio o około 30–60%. Tak więc można powiedzieć, że lepsza jest optymalizacja „uproszczona” niż żadna. Jednak obecnie, gdy większość normatywów i zaleceń dotyczących doboru parametrów skrawania jest z techniczno-ekonomicznego punktu widzenia w miarę dobrze uzasadniona, stosowanie prostych metod i zależności nie musi prowadzić do tak spektakularnych korzyści jak dawniej.

W wielu ośrodkach na świecie, szczególnie w Niemczech, a także w Polsce, podejmowano próby tworzenia banków danych, które mogłyby stanowić podstawę do racjonalnego doboru parametrów skrawania, a nawet ich optymalizacji. Odnosi się to do powiązania warunków skrawania nie tylko z trwałością narzędzia, lecz także z jakością warstwy wierzchniej po obróbce [38, 104, 154, 171, 172, 202, 203, 298, 301].

Większość danych potrzebnych do przeprowadzenia skutecznej optymalizacji, takich jak np. koszt pracy stanowiska roboczego, wynagrodzenie pracownika, liczba zmian pracy danego wydziału produkcyjnego, liczba stanowisk obsługiwanych przez operatora obrabiarki, czasy pomocnicze, przygotowawcze, wymiany narzędzia itp., znajdują się wprawdzie w zasobach danych przedsiębiorstwa, lecz są rozproszone w różnych jego działach. Zanim więc pojawią się sprawdzone komercyjne programy komputerowe do optymalizacji parametrów skrawania, należy koniecznie stworzyć efektywnie zarządzane bazy danych, z których programy te pobierać będą informacje [7, 10, 12, 76, 84].

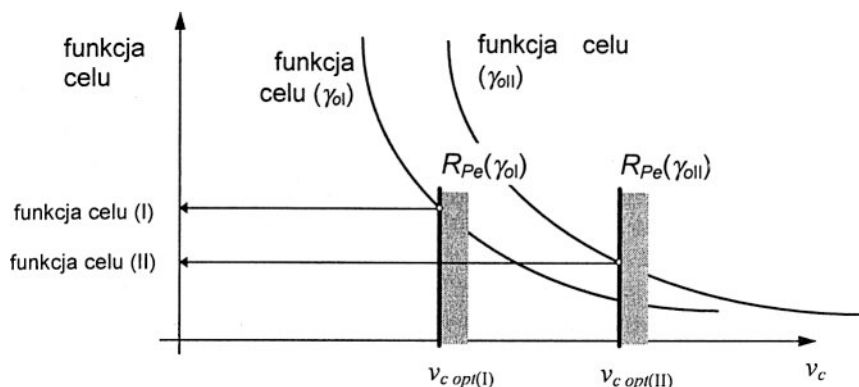
Optymalizacja parametrów skrawania jest bardzo ważnym czynnikiem, pozwalającym na zwiększanie efektywności wytwarzania. Jest to zagadnienie bardzo złożone i obszerne ze względu na dużą różnorodność odmian i rodzajów skrawania, różny stopień automatyzacji obrabiarek, szeregowy, równoległy bądź szeregowo-równoległy charakter pracy narzędzi, często marginalną znajomość funkcji trwałości i ograniczeń brzegowych itp. Optymalizacja wymaga jeszcze wielu badań nad uogólnieniem procedur, tak aby można było ją zastosować w możliwie wielu rodzajach i odmianach obróbek ubytkowych i to w odniesieniu do warunków przemysłowych.

7.3.1. PRZESUWANIE OGRANICZEŃ

Ważnym zagadnieniem w optymalizacji parametrów skrawania jest znajomość ograniczeń obszaru dopuszczalnych rozwiązań, gdyż jak już wspomniano, ekstremum funkcji znajduje się zazwyczaj poza tym obszarem. Im dokładniejsze i pewniejsze są te dane, tym precyzyjniej można przybliżyć się do najkorzystniejszego rozwiązania.

Ograniczenia dzielą się na sztywne, których przesunąć i przekroczyć nie można, oraz na elastyczne, których przemieszczenie, a nawet pewne przekroczenie, jest możliwe. Do ograniczeń sztywnych zaliczyć można np. minimalne i maksymalne zakresy prędkości obrotowej wrzeciona oraz wartości posuwów itp. Elastycznymi ograniczeniami mogą być np. za-

kres niekorzystnej postaci wióra, stabilnej pracy obrabiarki, a także ograniczenia związane pośrednio z siłami skrawania, takie jak moment i moc efektywna na wrzecionie, dokładność obróbki itp.



Rys. 7.7. Mechanizm zwiększania efektywności obróbki przez przesuwanie ograniczeń R_{Pe} (stany obiektu przed (I) i po (II) przesunięciu ograniczenia)

Fig. 7.7. Mechanism of increasing machining efficiency by means of displacing constraints R_{Pe} (state of object before (I) and after (II) displacement of constraint)

Jeśli ograniczenia aktywne, tzn. takie, na których zatrzymał się proces optymalizacji, są jednocześnie ograniczeniami elastycznymi, to przesuwając je można osiągnąć korzystniejszy stan obiektu (rys. 7.7). Przesuwanie ograniczeń w niektórych przypadkach jest bardzo proste, np. niekorzystną postać wiórów można próbować wyeliminować przez dobranie innego, bardziej odpowiedniego kształtu powierzchni natarcia lub właściwej długości nakładanego łamacza wióra. W przypadku innych ograniczeń, np. dopuszczalnej mocy efektywnej na wrzecionie, problem jest nieco bardziej skomplikowany. Co prawda, chwilowe przekroczenia tej mocy są dozwolone, ale przecież chodzi o to, aby można było skrawać w sposób ciągły. Przesunięcia ograniczeń związanych z siłami skrawania, a do takich należy dopuszczalna moc efektywna na wrzecionie, można dokonać przez zmianę geometrii ostrza na taką, która zmniejszy siły skrawania. I tak, zwiększając kąt natarcia można zmniejszyć siłę główną skrawania F_c . A ponieważ moc skrawania jest iloczynem siły głównej i prędkości skrawania ($P_s = F_c v_c$), więc zmniejszy się również i jej wartość. Formalnie wartość tego ograniczenia nie zmaleje, lecz przesunie się ono w kierunku większych wartości v_c . Jeśli pierwotnie dobrano geometrię ostrza właściwie, kierując się m.in. tym, aby osiągnąć maksymalną jego trwałość w danych warunkach obróbki, to po zmianie tej geometrii skróci się okres trwałości narzędzia, a tym samym zwiększy się czas i koszty obróbki. W takich przypadkach należy rozpatrzyć, czy zmniejszenie się kosztów i czasu wykonania operacji (wskutek przesunięcia ograniczeń) nie spowoduje zbyt dużego ich wzrostu w wyniku pogorszenia się okresu trwałości narzędzia. Mając do dyspozycji funkcje celu, łatwo tego dokonać. Możliwość takiego zwiększania efektywności obróbki, a także warunki, kiedy jest to najkorzystniejsze, przedstawiono i udowodniono w pracach [35, 42].

7.4. NADZÓR I DIAGNOSTYKA

Kolejnym krokiem do zwiększenia efektywności skrawania jest bezobsługowa, lub z ograniczonym nadzorem, praca systemów wytwórczych. Wobec rosnących kosztów siły roboczej pozwala ona ograniczać liczbę zatrudnionych oraz wykorzystywać rezerwy czasu drugiej i trzeciej zmiany, a także dni wolnych od pracy. Jednocześnie większy stopień automatyzacji komplikuje konstrukcje maszyn wytwórczych, co powiększa ich godzinowy koszt pracy, który nie zawsze jest wystarczająco rekompensowany wzrostem wydajności. Z tego powodu silna tendencja do pełnej automatyzacji gniazd, wydziałów, a nawet całych zakładów, jaka pojawiła się w najbardziej uprzemysłowionych krajach świata przed około dziesięciu laty, została ostatnio nieco przyhamowana. Okazało się bowiem, że niekiedy znacznie efektywniejszą jest tzw. „produkcja odchudzona” (*Lean Management*) [94, 134, 154, 183, 225, 226, 229, 277]. Jednak w perspektywie dłuższego okresu należy spodziewać się, że dążenie do zwiększania automatyzacji będzie z pewnością zachowane.

Jak wspomniano, zwiększanie stopnia automatyzacji komplikuje systemy wytwórcze, co powoduje także wzrost prawdopodobieństwa wystąpienia niesprawności lub awarii.

Trzeba zdawać sobie sprawę z tego, że skutki awarii i kolizji mogą powodować długotrwałe przestoje maszyn oraz znaczne koszty napraw. I tak np. w Niemczech w latach osiemdziesiątych średni koszt kolizji wynosił 18 tys. marek, a czas usuwania skutków takich zdarzeń – od jednego do dwóch tygodni [278]. Jako główne przyczyny kolizji wymienia się:

- | | |
|---|-----|
| – awarie układu sterowania NC i układu elektrycznego | 26% |
| – niewłaściwe ustawienie i zerowanie obrabiarki | 21% |
| – błędy obsługi | 20% |
| – zły wybór narzędzi i błędne wprowadzanie ich wymiarów | 18% |
| – błędy w programie NC | 13% |
| – nieprawidłowe wymiary półfabrykatu | 3%. |

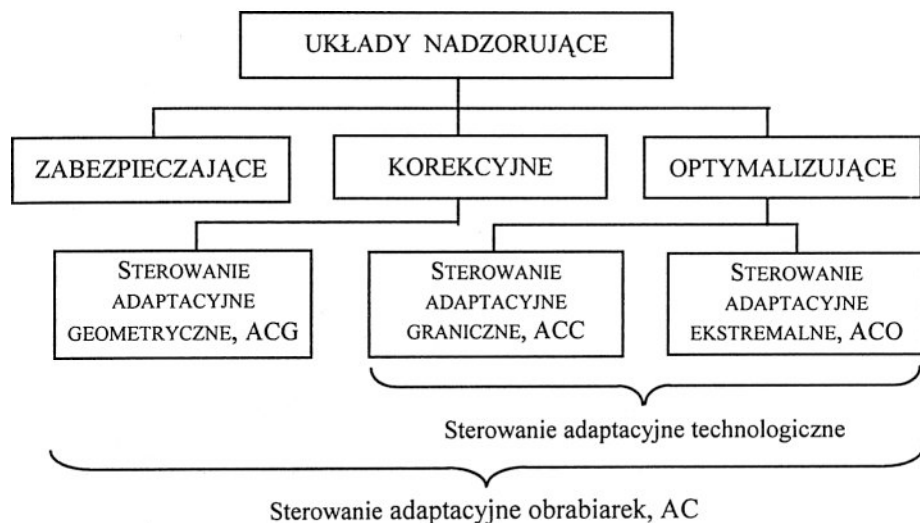
Zestawienie przyczyn awarii centrów obróbkowych, w rozbiciu na funkcje i zespoły, w których one wystąpiły, podano w pracy [278]. Wyrażono je w procentach liczby łącznych przestojów:

- | | |
|--|-------|
| – mechanizm przenoszenia i podawania przedmiotów | 20,1% |
| – układ sterowania DNC | 18,2% |
| – mechanizm wymiany narzędzi | 14,6% |
| – ustawianie długości narzędzia | 14,1% |
| – zespoły mechaniczne obrabiarki | 12,1% |
| – uszkodzenie narzędzia | 6,8% |
| – mocowanie przedmiotu | 2,6% |
| – sterowanie dopasowujące | 1,7% |
| – podawanie chłodziwa | 1,7% |
| – mocowanie palet | 1,1% |
| – układ NC, problemy z wiórami, hydraulika | 0,9%. |

Mając na względzie przytoczone dane, dotyczące przyczyn kolizji i awarii, można stwierdzić, że od najważniejszego ogniwa takiego systemu – obrabiarki – wymaga się zastosowania odpowiednich układów automatycznej diagnostyki i nadzoru.

Innym powodem stosowania układów nadzorujących jest dążenie do pełnego wykorzystania możliwości obróbkowych narzędzi i obrabiarek. Nie jest to możliwe podczas doboru parametrów skrawania z wykorzystaniem optymalizacji zewnętrznej, w której należy brać pod uwagę niepewność danych odnośnie do ograniczeń brzegowych, a także probabilistyczny charakter trwałości narzędzia. Aby w takiej sytuacji uniknąć awarii, a także powstawania braków, zakładany jest pewien margines bezpieczeństwa, który polega na przyjmowaniu, z odpowiednim zapasem, mniejszych wartości parametrów skrawania, wcześniejszej regeneracji narzędzi itp. Przez zastosowanie układów nadzorujących taki margines bezpieczeństwa można w znacznym stopniu zmniejszyć.

Podział układów nadzorujących przedstawiono na rys. 7.8.



Rys. 7.8. Podział układów nadzorujących obrabiarki według projektu PN [285]

Fig. 7.8. Subdivision of machine-tool monitoring systems according to standard proposal PN [285]

Zadania, jakie mogą spełniać układy nadzorujące i diagnostyczne, są rozliczne. Należą do nich [131, 151, 185, 211]:

- zapewnienie najlepszego działania systemu obróbkowego lub najmniejszych jego strat w razie wystąpienia zakłóceń
- osiągnięcie żądanej jakości wytwarzania przez sterowanie korekcyjne ze sprzężeniem zwrotnym
- ocena procesu, czy przebiega on prawidłowo
- wykrywanie kolizji, zapobieganie awariom lub ich skutkom
- określanie korekcji dla narzędzi nowo wprowadzanych na obrabiarkę
- śledzenie stanu zużycia narzędzia, umożliwiające bieżące poprawianie korekcji jego położenia

- określanie trwałości resztkowych narzędzi
- sygnalizowanie normalnego i katastroficznego stopnia ostrza
- diagnostyka postaci wióra
- śledzenie stanu odkształceń cieplnych, sprężystych oraz drgań układu OUPN i wprowadzanie korekcy do układu sterowania obrabiarki w celu zwiększenia dokładności obróbki
- optymalizacja warunków obróbki, itp.

Działania związane z nadzorem są dość rozległe. Dynamicznie rozwijają się prace teoretyczne i aplikacyjne nad wprowadzaniem **układów nadzorujących, zabezpieczających i korekcyjnych** [5, 8, 18, 70, 71, 76, 80, 86, 113, 131, 148, 151, 163, 174, 183, 185, 187, 207, 227, 261, 272, 278, 286, 287, 297] w celu zwiększania stopnia automatyzacji, z jednoczesnym zachowaniem dużej niezawodności systemów wytwórczych.

Technik **sterowania adaptacyjnego technologicznego ACC, ACO** (*nadzorowanie optymalizacyjne*), po innowacyjnych badaniach i próbach wdrożeniowych, jakie prowadzono w latach siedemdziesiątych, obecnie praktycznie nie stosuje się [215, 253]. Składa się na to kilka powodów:

- Możliwe do opanowania, z zastosowaniem układów ACC, zmiany wartości głębokości skrawania lub posuwu nie są na tyle duże, by nie można było ich dokonać stosując optymalizację zewnętrzną i przebieg obróbki sterowany przez NC.

- Zmieniły się cele w porównaniu z latami siedemdziesiątymi. Obecnie uważa się, że proces nie musi być bezwzględnie optymalny, lecz ze względu na tendencję do coraz bardziej „bezbosługowego” wytwarzania, powinien on przebiegać niezawodnie. A do tego nie jest konieczna regulacja, wystarczy nadzór.

- Corocznie pojawia się wiele udoskonalanych, a także nowych materiałów narzędziowych, dla których nie ma danych dotyczących charakteru zużywania się ostrzy czy funkcji trwałości narzędzi, i to nawet w odniesieniu do podstawowych materiałów konstrukcyjnych. A przecież znajomość tych funkcji jest warunkiem niezbędnym do przeprowadzania procedur optymalizacyjnych.

- Koszty urządzeń do sterowania AC i ich nadzór są jeszcze na tyle duże, że nie zawsze mogą być zrekompensovane wzrostem efektywności wytwarzania.

- Trudności z zadowalającym, w praktycznych zastosowaniach, czynnym pomiarem zużycia narzędzi różnych typów.

- Optymalizacja zewnętrzna jest znacznie łatwiejsza i dokładniejsza niż optymalizacja wewnętrzna. Ta ostatnia, z racji konieczności szybkiego działania w warunkach produkcyjnych, musi opierać się na uproszczonych funkcjach i algorytmach.

Kiedy nastąpi ponowne zainteresowanie sterowaniem adaptacyjnym, wykorzystującym optymalizację wewnętrzną – trudno przewidzieć. Wydaje się, że obecnie najwięcej problemów w przemysłowym stosowaniu ACC i ACO stwarza brak informacji o funkcjach trwałości narzędzi oraz trudności z czynnym pomiarem zużycia ostrza. Rysuje się możliwość rozwiązania czynnego, pośredniego pomiaru zużycia narzędzia przez zastosowanie sieci neuronowych [37, 81]. Problemy z niepewnością warunków brzegowych są natomiast do ominięcia przez wspomagające zastosowanie układów nadzorujących – zabezpieczających i korekcyjnych.

Układy diagnostyczne i nadzorujące ciągle jeszcze są traktowane jako wyposażenie specjalne obrabiarki, przez co cena ich jest stosunkowo wysoka. Podraża to godzinowy koszt pracy stanowiska roboczego, który ma największy wpływ na koszty operacji (patrz rys. 7.30).

7.5. OKREŚLANIE STRUKTURY FUNKCJI CELÓW

Przez pojęcie struktura funkcji czasu i kosztu wytwarzania rozumieć będziemy procentowe udziały poszczególnych czynników, z których owe funkcje się składają. Struktura ta określona zostanie dla typowych warunków polskiego zakładu produkcyjnego i obróbki narzędziami z ostrzami powszechnie stosowanymi, o przeciętnych możliwościach skrawnych. Następnie przeprowadzone zostaną podobne, kolejne analizy dla obróbki narzędziami i na obrabiarkach, które zezwalać będą na stosowanie coraz to większych parametrów skrawania, aż do obróbki narzędziami o przyjętych hipotetycznie dużych możliwościach skrawnych, których obecnie nie można zrealizować. Chodzi o to, aby możliwe było znalezienie prawidłowości zmian udziałów poszczególnych składników funkcji celu w miarę zwiększania się możliwości obróbkowych obrabiarek i narzędzi. Dla tak określonego toku postępowania podczas przeprowadzania analizy przyjęto następujące warianty obróbki i odpowiadające im dane.

□ **Wariant I** – obróbka jest prowadzona ostrzami z węgliku nie pokrywanego **H20S** (firmy BAILDON – Sandvik SA), których trwałość ostrza określić można wzorem *Taylora* o następujących współczynnikach [258]:

$$C_T = 1,06 \cdot 10^8; s = 4,15; u_T = 1,48; e_T = 0,89$$

(koszt płytki $K_p = 4$ zł).

□ **Wariant II** – obróbka odbywa się ostrzami wykonanymi z ultradrobnoziarnistych węglików spiekanych, pokrywanych wielowarstwowo **TN250** (firmy Widia Krupp), których trwałość określają parametry:

$$C_T = 1,60 \cdot 10^{12}; s = 5,05; u_T = 1,8; e_T = 0,59$$

(koszt płytki $K_p = 15,30$ zł).

□ **Wariant III** – obróbka z użyciem ostrzy z ceramiki **AC5** firmy Kenametal – Hertel, której trwałość określają parametry [167]:

$$C_T = 32796; s = 1,463; u_T = 0,3113; e_T = 0,181$$

(koszt płytki $K_p = 19,30$ zł).

□ **Wariant IV** – zakłada obróbkę ostrzami wykonanymi z materiału o przyjętych hipotetycznie dużych właściwościach skrawnych **HPT**, którego trwałość określają parametry [167]:

$$C_T = 4 \cdot 10^7; s = 2,00; u_T = 0,20; e_T = 0,10$$

(koszt takiej płytki przyjęto na poziomie $K_p = 57,90$ zł – trzykrotny wzrost w stosunku do ceny ceramiki AC5). Dla wariantu tego założono również następującą zmianę proporcji między poszczególnymi składnikami kosztów:

– dwukrotny wzrost godzinowego kosztu stanowiska pracy – $K_m = 60$ zł,

– pięciokrotny wzrost stawki godzinowej operatora obrabiarki – $K_{Lm} = 42$ zł.

Przyjmując takie proporcje składników kosztów, kierowano się danymi zamieszczonymi w pracach [57, 131, 270].

Pozostałe dane, które występują w analizowanych funkcjach, miały następujące wartości: $\varepsilon_{wk(i)} = 2$; $\varepsilon_{ok(i)} = 1$; $\lambda_b = 1,05$; $\lambda_{kwydz(b(w))} = 1,60$; $\lambda_{kwydzpr(z)} = 3,5$; $\lambda_l = 0,95$; $\lambda_L = 0,5$; $\lambda_o = 1,05$; $\lambda_T = 0,90$; $\lambda_{VB(i)} = 1$; $\lambda_{ws} = 1,25$; $\lambda_z = 0,90$; $t_{p(r)} = 3$ min; $t'_{p(r)} = 2$ min; $t_{pNC} = 0,5$ min; $t'_{pNC} = 0,1$ min; $t_{rd(i)} = 0,15$ min; $t'_{rd(i)} = 0$ min; $t_{dn(i)} = 1$ min; $t'_{dn(i)} = 0,9$ min; $t_{pz} = 120$ min; $t_{zn(i)} = 1$ min; $K_{Lm} = 8,40$ zł; $K_m = 30$ zł; $K_o = 35$ zł; $K_{opNC} = 420$ zł; $K_{opzl} = 8$ zł; $K_{pow} = 24$ zł; $K_{przyg} = 428$ zł; $k_u = 0,08$; $l_p = 10$; $n_{kp(i)} = 4$; $n_n = 8$ szt.; $n_{sz} = 100$ szt.; $n_{szdn} = 1$ szt.; $n_{w(i)} = 300$; $f = 0,24$ mm/obr; $a_p = 1,5$ mm; $d_{sr} = 80$ mm; $L_{sr} = 120$ mm.

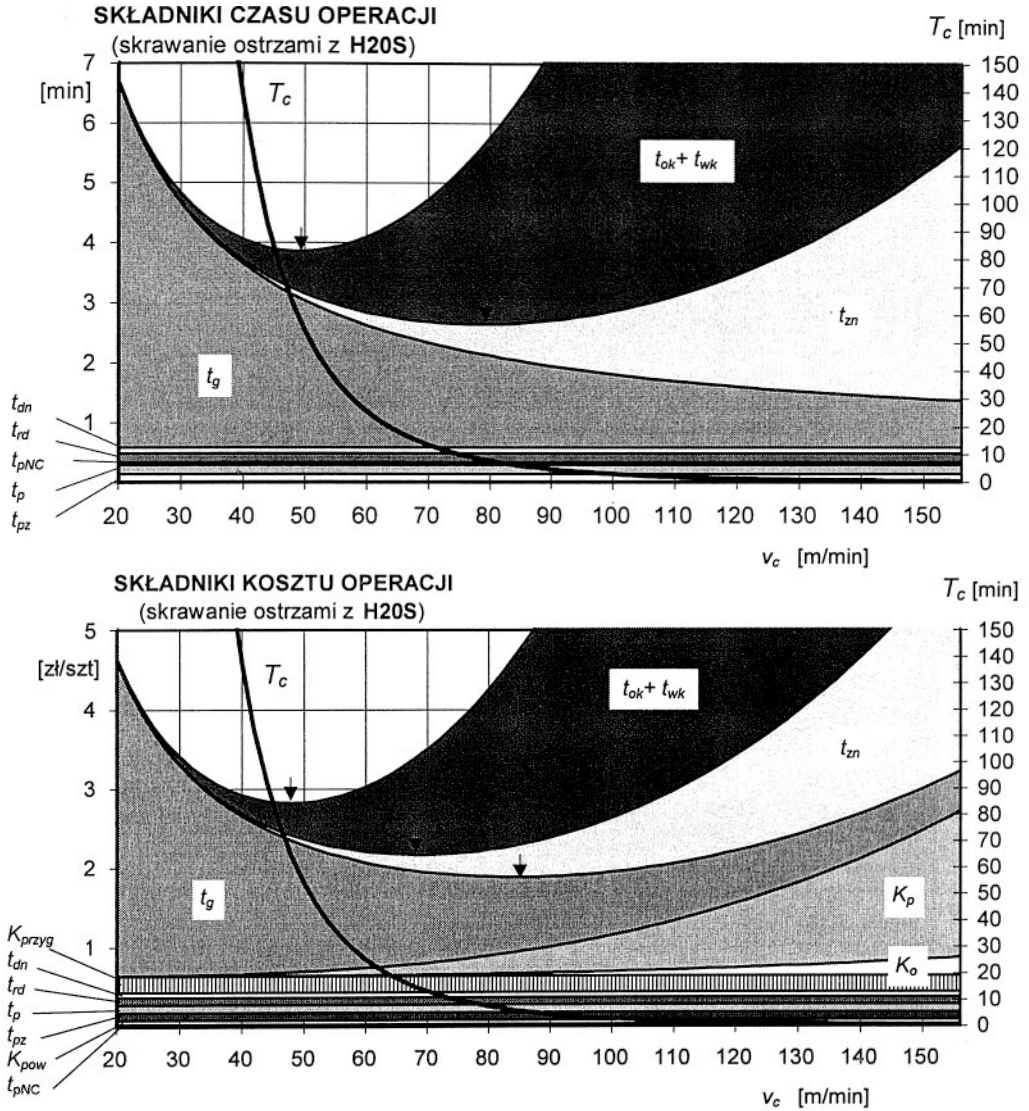
Składniki funkcji czasu i kosztów operacji dla poszczególnych wariantów warunków obróbki pokazano na rys. 7.9–7.12. Na przedstawionych tam wykresach zaznaczono strzałkami miejsca optymalnych wartości funkcji oraz naniesiono dodatkowo funkcję trwałości narzędzia $T_c = f(v_c)$.

W tym miejscu należałoby wyjaśnić pewien skrót myślowy, który będzie stosowany w dalszej części pracy. Chodzi o pojęcie „duże możliwości obróbkowe”. W odniesieniu do narzędzi pojęcie to oznaczać będzie możliwość efektywnego skrawania z prędkościami równymi i przekraczającymi górny zakres wartości obecnie stosowanych. I tak np. dla obróbki ostrzami diamentowymi materiałów metalowych lekkich mogą to być prędkości $1000 < v_c < 10\,000$ m/min, a dla obróbki zahartowanych stali ostrzami z regularnego azotku boru $v_c \geq 100$ m/min. Oznaczałoby to, że np. dla średnicy toczenia $d \cong 50$ mm i $v_c = 10\,000$ m/min obrabiarka wraz z uchwytem powinna pozwalać realizować prędkości obrotowe wrzeciona $n_{wr} \geq 63$ tys. obr/min (dla $d = 10$ mm, $v_c = 10\,000$ m/min, wymagane obroty to $n_{wr} \cong 160$ tys. obr/min). Współcześnie, poza laboratoriami badawczymi, byłoby to dość trudne do zrealizowania. Jednak nawet obecnie jest możliwe skrawanie z prędkościami $v_c = 10\,000$ m/min. Jeśli np. obrabiać się będzie tarczę o średnicy $d = 500$ mm, to dla tej prędkości skrawania wymagane obroty wrzeciona wyniosą około 6 300 obr/min. Nie jest to zbyt wygórowane oczekiwanie wobec dzisiejszych obrabiarek.

Zazwyczaj jednak w analizach porównawczych bierze się pod uwagę obróbkę materiałów nie o skrajnych właściwościach skrawalności, lecz materiałów konstrukcyjnych najczęściej skrawanych, np. stali średniowęglowej w stanie normalizowanym, żeliwa szarego 250–350 o twardości 150–170 HB itp. Materiały te można obrabiać ostrzami ceramicznymi z prędkościami dochodzącymi do 1000 m/min [36, 123, 180, 188, 231, 232, 237]. Tak więc, pojęcie „dużych możliwości obróbkowych” odnosić się będzie w głównej mierze do podstawowych materiałów i średnich zakresów średnic obrabianych przedmiotów.

Powróćmy do zasadniczego tematu pracy. Dokładniejsze omówienie wpływu poszczególnych składników na wartości i zachowanie się funkcji celów zostanie omówione w dalszej części monografii. Tutaj przedstawione zostaną jedynie ogólne spostrzeżenia.

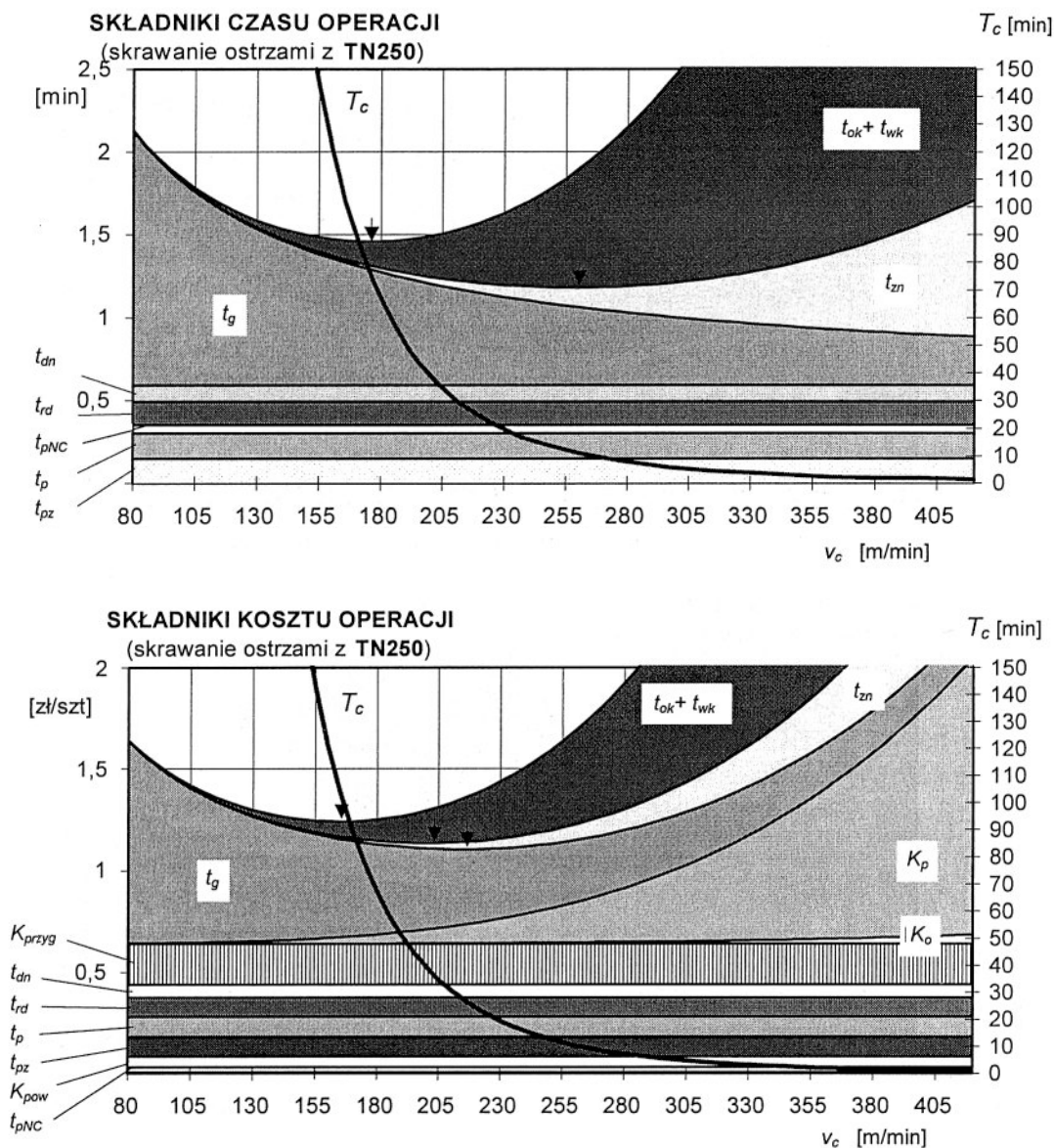
Z wykresów pokazanych na rys. 7.9–7.12 wynika, że dla prędkości skrawania mniejszych niż optymalne, dominującym składnikiem obu funkcji (czasu i kosztów) jest czas maszynowy obróbki t_g . Dla prędkości skrawania większych niż optymalne, pogarszanie się stanów funkcji celów jest wywoływane natomiast w głównej mierze czasem określania t_{ok} i wprowadzania korekcy t_{wk} , a także, w przypadku kosztów wytwarzania, kosztami płytek skrawających K_p , gdyż dla dużych v_c zmniejsza się okres trwałości i w związku z tym zwiększa się wymagana częstość wymian ostrzy oraz określań korekcy. Jedynie dla ostrzy (HPT) o hipotetycznie przyjętych dużych możliwościach obróbkowych funkcje czasu



Rys. 7.9. Struktura funkcji czasu i kosztów operacji w zależności od prędkości skrawania podczas obróbki z użyciem ostrzy z węgla H20S (niepowlekanego):

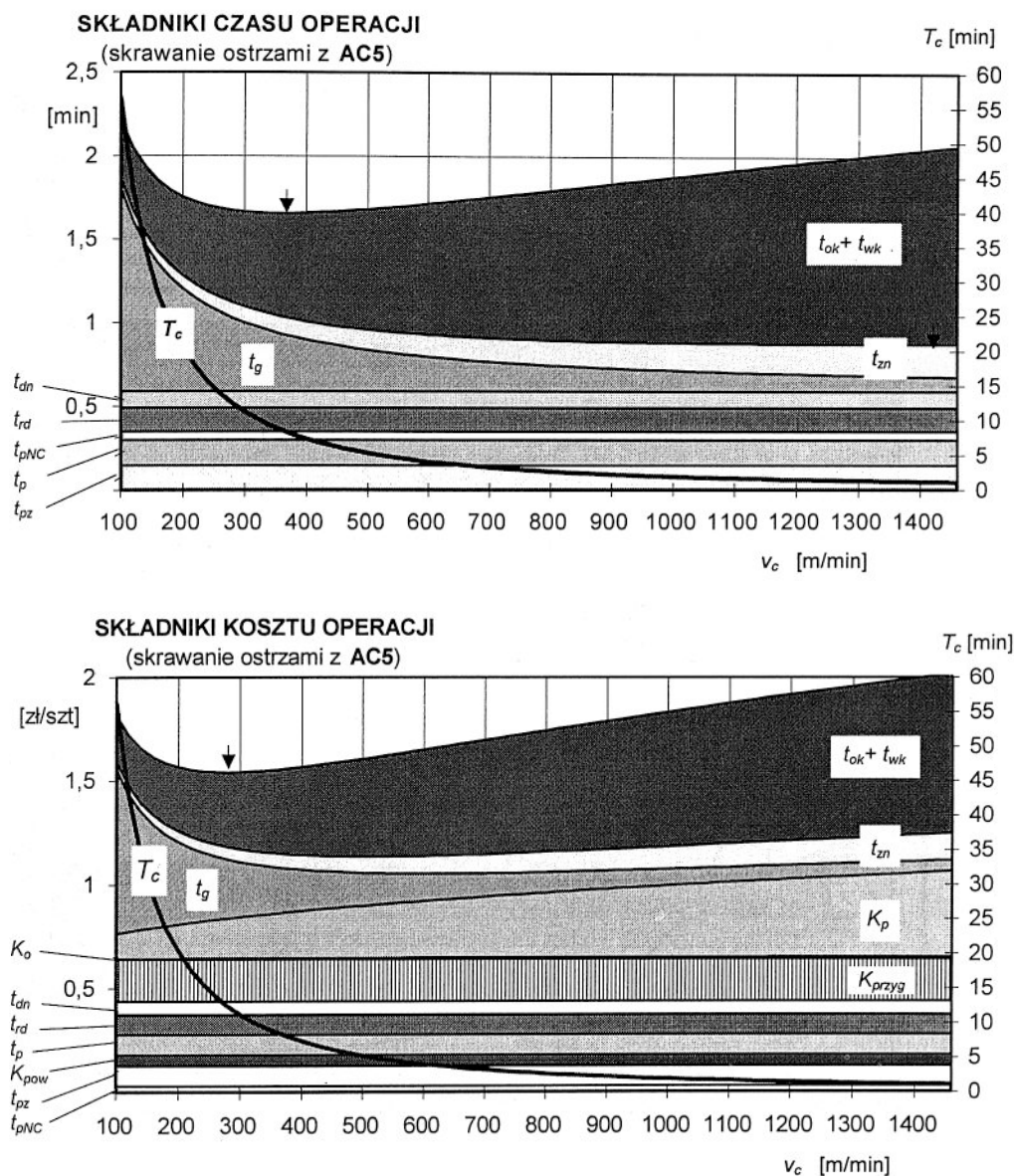
(t_{ok} – czas określania korekcy, t_{wk} – czas wprowadzania korekcy, t_{zn} – czas wymiany narzędzi, t_g – czas maszynowy obróbki, t_{dn} – czas diagnozowania, t_{pNC} – czas czynności pomocniczych realizowanych automatycznie, t_p – czas czynności pomocniczych wykonywanych przez operatora, t_{pz} – czas przygotowawczo-zakończeniowy, K_p – koszty płytek wielostrzowych, K_o – koszty oprawek nożowych, K_{przyg} – koszty przygotowania zlecenia, K_{pow} – koszty powtórzenia zlecenia)

Fig. 7.9. Structure of operation time/cost function as dependent on cutting speed for machining that employed edges of carbide composite H20S (not coated)



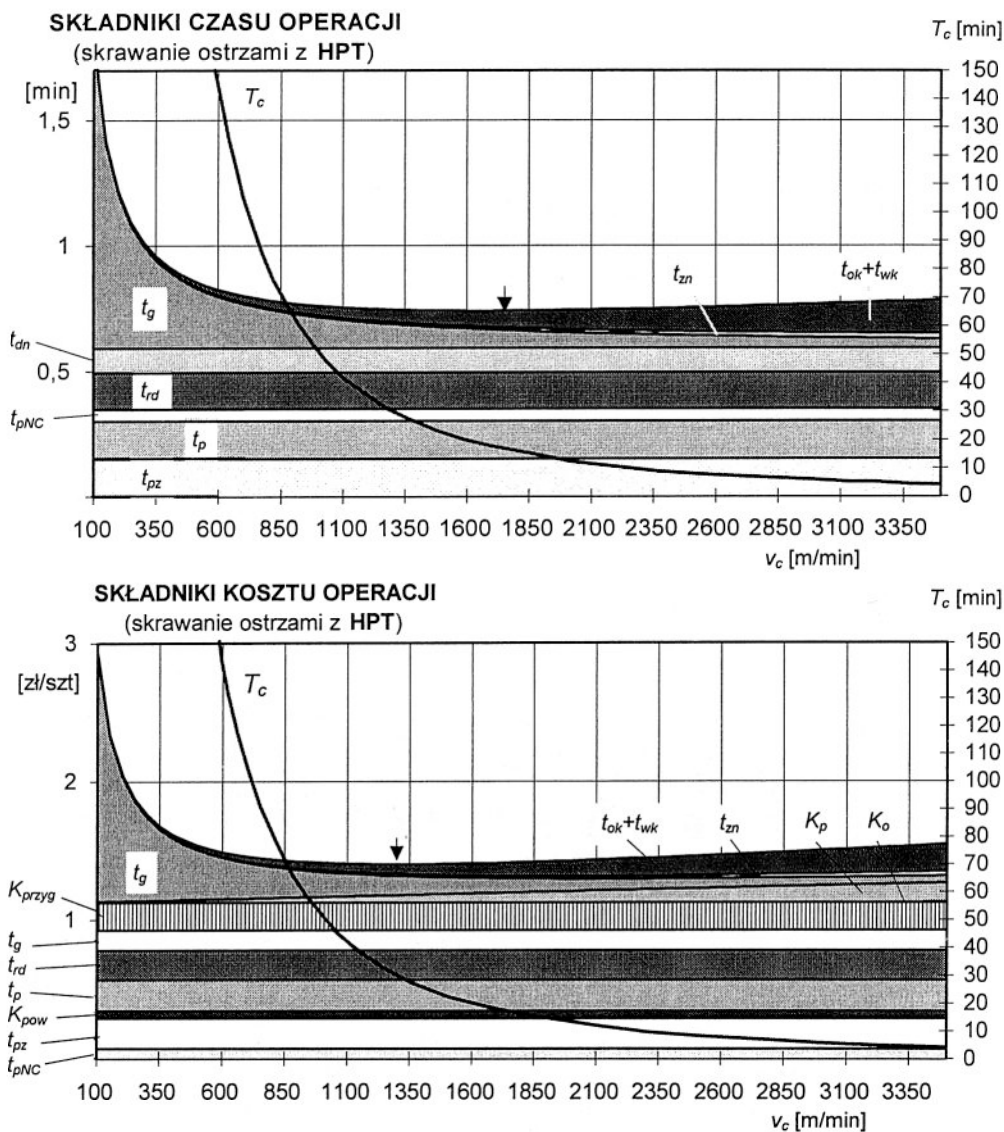
Rys. 7.10. Struktura funkcji czasu i kosztów operacji w zależności od prędkości skrawania podczas obróbki z użyciem ostrzy z węgla TN250 (węgiel ultradrobinziarnisty powlekany wielowarstwowo): (t_{ok} – czas określania korekcji, t_{wk} – czas wprowadzania korekcji, t_{zn} – czas wymiany narzędzi, t_g – czas maszynowy obróbki, t_{dn} – czas diagnozowania, t_{pNC} – czas czynności pomocniczych realizowanych automatycznie, t_p – czas czynności pomocniczych wykonywanych przez operatora, t_{pz} – czas przygotowawczo-zakończeniowy, K_p – koszty płytek wielostrzowych, K_o – koszty oprawek nożowych, K_{przyg} – koszty przygotowania zlecenia, K_{pow} – koszty powtórzenia zlecenia)

Fig. 7.10. Structure of operation time/cost function as dependent on cutting speed for machining that employed edges of carbide TN250 (multi-layer coated fine-grain carbide)



Rys. 7.11. Struktura funkcji czasu i kosztów operacji w zależności od prędkości skrawania podczas obróbki z użyciem ostrzy z ceramiki AC5:
 $(t_{ok}$ – czas określania korekcji, t_{wk} – czas wprowadzania korekcji, t_{zn} – czas wymiany narzędzi, t_g – czas maszynowy obróbki, t_{dn} – czas diagnozowania, t_{pNC} – czas czynności pomocniczych realizowanych automatycznie, t_p – czas czynności pomocniczych wykonywanych przez operatora, t_{pz} – czas przygotowawczo-zakończywowy, K_p – koszty płytek wieloostrowych, K_o – koszty oprawek nożowych, K_{przyg} – koszty przygotowania zlecenia, K_{pow} – koszty powtórzenia zlecenia)

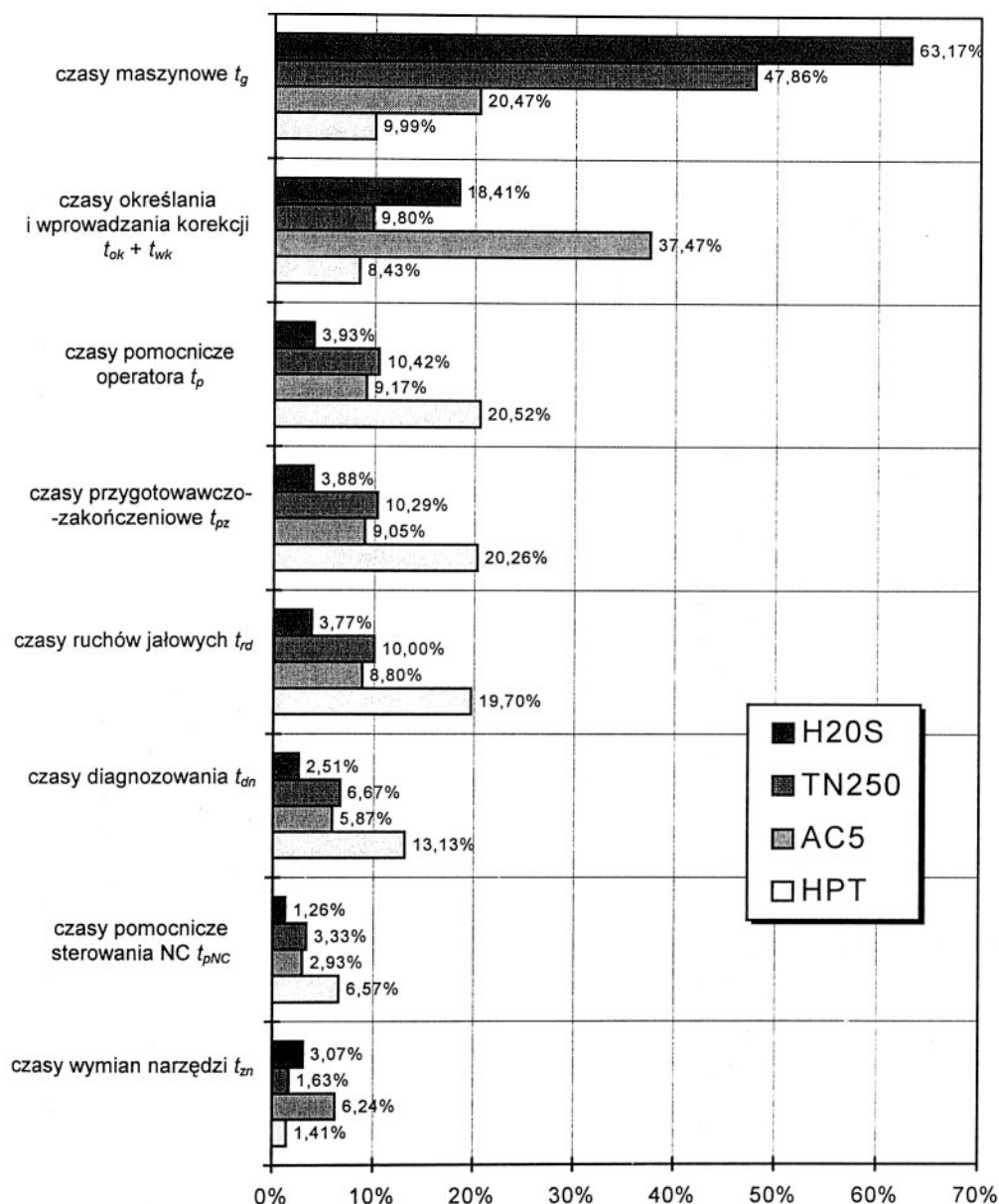
Fig. 7.11. Structure of operation time/cost function as dependent on cutting speed for machining that employed edges of AC5 ceramics



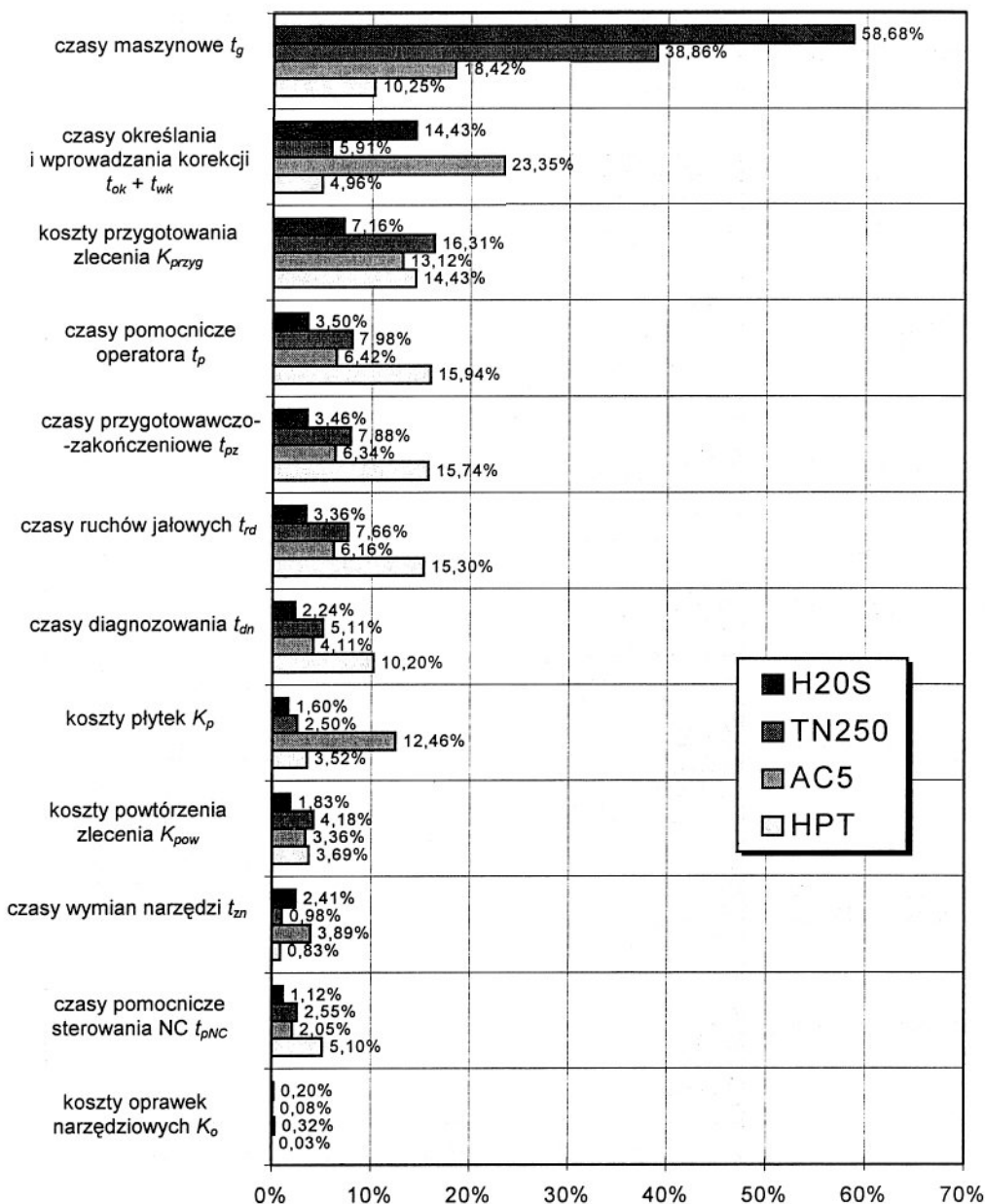
Rys. 7.12. Struktura funkcji czasu i kosztów operacji w zależności od prędkości skrawania podczas obróbki z użyciem ostrzy HPT (materiał o hipotetycznie dużych możliwościach obróbkowych)

(t_{ok} – czas określania korekcji, t_{wk} – czas wprowadzania korekcji, t_{zn} – czas wymiany narzędzi, t_g – czas maszynowy obróbki, t_{dn} – czas diagnozowania, t_{pNC} – czas czynności pomocniczych realizowanych automatycznie, t_p – czas czynności pomocniczych wykonywanych przez operatora, t_{pz} – czas przygotowawczo-zakończeniowy, K_p – koszty płytek wielostrzowych, K_o – koszty oprawek nożowych, K_{przyg} – koszty przygotowania zlecenia, K_{pow} – koszty powtórzenia zlecenia)

Fig. 7.12. Structure of operation time/cost function as dependent on cutting speed for machining that employed edges of HPT (a material of hypothetically excellent machining possibilities)



Rys. 7.13. Procentowy udział składników funkcji czasu operacji dla obróbki z użyciem ostrzy o coraz lepszych właściwościach skrawnych (H20S→TN250→AC5→HPT), określony dla optymalnych prędkości skrawania
 Fig. 7.13. Percentage of operation time function components for machining with increasingly efficient cutting edges (H20S→TN250→AC5→HPT) determined for optimum cutting speeds



Rys. 7.14. Procentowy udział składników funkcji kosztów operacji dla obróbki z użyciem ostrzy o coraz lepszych właściwościach skrawnych (H20S→TN250→AC5→HPT), określony dla optymalnych prędkości skrawania

Fig. 7.14. Percentage of operation cost function components for machining with increasingly efficient cutting edges (H20S→TN250→AC5→HPT) determined for optimum cutting speeds

i kosztów wytwarzania zwiększają się bardzo nieznacznie po przekroczeniu optymalnych zakresów prędkości skrawania. Wynika to z możliwości osiągnięcia bardzo dużych wydajności podczas skrawania tymi ostrzami bez konieczności częstej ich regeneracji.

Dla zależności przedstawionych na omawianych wykresach i miejsc, w których osiągają one stany optymalne, sporządzono zestawienia procentowe składników funkcji celów, które zobrazowano graficznie na rys. 7.13 i 7.14. Dane pogrupowano w ten sposób, żeby znalazły się obok siebie udziały tych samych składników (np. czasu t_g) ale odniesione kolejno do wzrastających możliwości obróbkowych (obróbka ostrzami H20S→TN250→AC5→HPT). Ponadto czynniki te uszeregowano w kolejności od najbardziej do najmniej istotnych. W zestawieniu tym nie wyodrębniono takich składników, jak koszt pracy stanowiska, wynagrodzenie pracownika oraz czas uzupełniający. Nie da się tego zrobić w takim ujęciu jak to pokazano na rys. 7.13 i 7.14, ponieważ składniki te w funkcjach celu są mnożone przez inne składniki, których oddziaływanie chciano tu wyodrębnić. Analiza wpływu tych bardzo ważnych czynników na charakter zmian czasu i kosztów wytwarzania zostanie przedstawiona w następnych podrozdziałach.

Z przedstawionych danych wynika, że najbardziej ważącymi składnikami funkcji celów, teraz i w przyszłości, będą czasy maszynowe t_g oraz czasy określania t_{ok} i wprowadzania t_{wk} korekcji. Do najmniej oddziałujących zaliczać się będą czasy czynności pomocniczych, realizowanych przez obrabiarkę t_{pNC} , czasy wymian narzędzi t_{zn} oraz koszty oprawki narzędziowej K_o i koszty powtórzenia zlecenia K_{pow} .

W miarę zwiększania się możliwości obróbkowych narzędzi i obrabiarek bardzo znacznie będzie zmniejszał się procentowy udział czasu maszynowego i to zarówno w czasie, jak i w kosztach wytwarzania. Wzrastał będzie natomiast, też znacznie, udział czasów czynności pomocniczych wykonywanych przez operatora t_p , czasów przygotowawczo-zakończeniowych t_{pz} i czasów diagnozowania t_{dn} .

7.6. CZASY PRZYGOTOWAWCZO-ZAKOŃCZENIOWE I POMOCNICZE

Przypomnijmy, że **czasy przygotowawczo-zakończeniowe** t_{pz} mogą obejmować czasy takich czynności, jak: zapoznanie się z dokumentacją zadania produkcyjnego; pobranie narzędzi, oprzyrządowania, półfabrykatów; uzbrojenie i ustawienie obrabiarki; określenie korekcji dla narzędzi; wprowadzenie ich do układu sterowania; wykonanie próbnego przedmiotu wraz z jego zmierzeniem, a po wykonaniu zadania rozbrojenie obrabiarki; zdanie narzędzi, oprzyrządowania, wykonanych przedmiotów i dokumentacji oraz doprowadzenie stanowiska roboczego do stanu wyjściowego. Czynności te dotyczą całego zadania produkcyjnego.

Na **czynności pomocnicze**, objęte czasem t_p , a wykonywane przez operatora obrabiarki, może składać się: ustawienie, zamocowanie i odmocowanie przedmiotu, uruchamianie programu obróbkowego, pomiar przedmiotu. Odnoszą się one do jednej operacji technologicznej.

W przypadku skomplikowanych przedmiotów i dużych wymagań co do dokładności wymiarowo-kształtowej, czasy t_{pz} mogą niekiedy trwać kilka, a nawet kilkanaście godzin, zwłaszcza, jeśli zakres obowiązków operatora obejmuje także przygotowanie narzędzi.

W dużej mierze czasy te zależą także od długości trwania programu NC, który oddziałuje na nie przez czasy wykonania pierwszego przedmiotu. Najczęściej jednak czasy przygotowawczo-zakończeniowe są zdecydowanie krótsze i mieszczą się w przedziale 100–200 min.

Z danych przedstawionych na rys. 7.8 i 7.14 wynika, że łącznie rola czasów t_{pz} i t_p jako składników czasu i kosztów wytwarzania, może wzrosnąć, w miarę zwiększania możliwości obróbkowych systemów wytwórczych, z obecnych kilku procent do około 30–40% w przyszłości, przy założeniu, że operator miałby wykonywać wszystkie czynności, które wymieniono wcześniej. Należy zatem uznać działania mające na celu skracanie tych czasów za bardzo istotne dla zwiększania efektywności wytwarzania.

Aby skrócić czasy przygotowawczo-zakończeniowe, przypadające na czynności konieczne do przygotowania obrabiarki do nowego zlecenia produkcyjnego, wyposaża się OSN-y w magazyny narzędzi, przedmiotów, a nawet w zautomatyzowane urządzenia transportowe, mogące obsługiwać wiele maszyn i łączyć je w jeden spójny system wytwórczy.

Do przenoszenia przedmiotów, szczęk uchwytów i narzędzi używa się najczęściej manipulatorów bramowych, które wyparły wcześniej stosowane pojedyncze roboty [131, 151, 215].

Narzędzia niezbędne do bezpośredniego użycia podczas realizacji obróbki według programu NC są dostępne w magazynie obrabiarki lub w głowicy rewolwerowej. Ma to na celu skrócenie czasów pomocniczych czynności wymiany narzędzi wykonywanych automatycznie przez układy sterowania NC (t_{pNC}).

Także rozwój uchwytów tokarskich jest stymulowany przede wszystkim dwoma podstawowymi wymaganiami, stawianymi przez użytkowników współczesnych tokarek CNC. Należą do nich krótki czas przebrojenia uchwytu (wymiany szczęk) oraz zapewnienie niezawodnego i bezpiecznego mocowania przedmiotu obrabianego podczas skrawania z dużymi prędkościami obrotowymi wrzecion [36, 96].

Najprostszym sposobem szybkiej wymiany szczęk w uchwycie z mocowaniem mechanicznym jest zastosowanie odpowiedniego zamka, uruchamianego za pomocą klucza, w miejscu połączenia szczęki górnej (nasadzonej) ze szczęką podstawową. Przykładami takich rozwiązań są np. uchwyty KNCS firmy SMW oraz QJ lub QB firmy Kitagawa. Wymianę szczęk w tego typu uchwytach wykonuje się w czasie krótszym niż jedna minuta, co jest znacznym osiągnięciem w porównaniu z 15–20 min potrzebnymi w standardowych uchwytach z mocowaniem mechanicznym.

W ASO można automatycznie, korzystając z odpowiedniej kasety i manipulatora, wymieniać szczęki lub całe uchwyty, przezbierane poza obrabiarką.

Skracanie czasów t_{pz} i t_p przez automatyzację czynności przezbierania obrabiarki i wymiany przedmiotów, czyli zastępowanie obrabiarki typu CNC obrabiarką ASO, które ma na celu zwiększenie wydajności i zmniejszenie kosztów wytwarzania, może mieć też niekorzystny wpływ na efektywność wytwarzania przez zwiększenie kosztów stanowiska pracy. Pamiętać należy, że koszt pracy stanowiska ma największy udział w całkowitych kosztach wytwarzania. Kieł w pracy [131] podaje, że koszt ASO może być większy o 270% niż obrabiarki CNC wskutek doposażenia jej w określone funkcje i możliwości. Czynniki, które mają największy wpływ na koszty, są: magazyn narzędziowy – 60%, magazyn przedmiotowy – 56%, system DNC – 32%, automatyczna wymiana narzędzi – 30%, system wymiany przedmiotów – 30%, system wymiany szczęk – 20%.

Wspomaganie komputerowe zarządzania całymi systemami wytwórczymi, w tym także ich mniejszymi ogniwami, takimi jak gniazda czy nawet poszczególne obrabiarki, a także właściwa organizacja warunków pracy, może spowodować znaczne ograniczenie czasów przygotowawczo-zakończeniowych. Szczególną rolę należy tu przypisać przygotowywaniu narzędzi do pracy. Niestety, w większości zakładów w Polsce pracę tę wykonuje operator obrabiarki. Sam pobiera z wypożyczalni narzędzia i ich części składowe, montuje je i ustawia na wymiar, określa korekcje itp. W tym czasie obrabiarka, której godzinowy koszt pracy stanowiska jest bardzo duży, stoi bezproduktywnie. Znacznie korzystniejsze jest wykonywanie tych czynności na oddzielnym, kilkakrotnie tańszym i wydajniejszym stanowisku w przygotowalni narzędzi. Operator przed uruchomieniem nowego zadania otrzymuje przygotowane narzędzia wraz z określonymi dla nich korekcjami. W ten sposób czas przygotowawczo-zakończeniowy może być znacznie skrócony.

Kolejnym ważnym składnikiem czasu przygotowawczo-zakończeniowego jest **czas przezbierania obrabiarki** do nowego zadania produkcyjnego.

Przezbieranie obrabiarek może powodować dość znaczne ich przestoje. Udział czasów przezbierania obrabiarek w czasie trwania jednej zmiany wynosi około 13% [185], a w skali całego roku i pracy tryzmiánowej około 6% [286]. W poszczególnych przypadkach czas ten może mieć znaczne odchylenia od podanych wartości. Udział ten jest tym większy, im większa jest liczba wszystkich narzędzi (łącznie z siostrzanymi) używanych na obrabiarce, im dłużej trwa samo przezbieranie, im krótsze i bardziej różnorodne są serie wykonywanych przedmiotów oraz im krócej trwa realizacja poszczególnych zleceń, im krótsze są czasy główne maszynowe i im mniejsza jest liczba narzędzi poszczególnych rodzajów (bez narzędzi siostrzanych) użytych do realizacji zadania.

Czas przezbierania obrabiarki należy skracać do minimum, gdyż jest to czas bezproduktywnie stracony, który zmniejsza jej wydajność. Zmusza to do poszukiwań coraz doskonalszych rozwiązań konstrukcyjnych obrabiarek i części chwytowych narzędzi, umożliwiających skracanie owych czasów oraz do opracowywania różnorodnych **strategii wymian narzędzi**.

Najprostsza z tych strategii polega na **zatrzymaniu obrabiarki, rozbrojeniu z narzędzi** potrzebnych do realizacji poprzedniego zlecenia i **uzbrojeniu do następnego**. Jest to najczęściej stosowany sposób, który ma zalety wynikające z bardzo prostej procedury wykonawczej, nie wymagającej wspomagania komputerowego i dodatkowego oprzyrządowania. Takie przezbieranie obrabiarki ma jednak zdecydowaną wadę polegającą na bardzo długim czasie przestoju obrabiarki. Sposób ten stosuje się wówczas, gdy udział czasów przezbierania w ogólnym czasie pracy obrabiarki jest krótki, a więc wtedy, gdy czasy obróbki są długie, duże są partie wyrobów i długie okresy trwałości narzędzi.

Kolejna strategia polega na **wymianie całych magazynów narzędziowych obrabiarki** wraz z kompletem narzędzi. Rozwiązanie to zdecydowanie skraca czas przezbierania obrabiarki. Wymaga jednak przystosowanych do tego obrabiarek i dodatkowych wymiennych magazynów. Ten sposób przezbierania obrabiarek bywa stosowany w przypadku częstych zmian zleceń produkcyjnych.

Następna strategia przezbierania polega tym, że wykonuje się ją **w czasie pracy obrabiarki**. Można ją zastosować jedynie wtedy, gdy obrabiarka ma zewnętrzny magazyn narzędziowy. Ten sposób wymaga odpowiedniego oprzyrządowania oraz oprogramowania obrabiarki, które musi:

- śledzić trwałości resztkowe każdego z narzędzi
- analizować programy NC i sprawdzać, które narzędzia z bieżącego zlecenia produkcyjnego mogą być wykorzystane w następnym zleceniu
- sprawdzać, czy trwałość resztkowa wymienionych narzędzi, po ostatnim ich użyciu podczas wykonywania ostatniego przedmiotu, jest wystarczająca do wykorzystania w następnym zleceniu (pozostawia się je wówczas w magazynie obrabiarki)
- znajdować odpowiednio długie czasy wykonywania zabiegów, podczas których można bez obawy kolizji lub zablokowania innych czynności programowych dokonywać przebrojeń obrabiarki, ale tylko z narzędzi zużytych oraz nie wykorzystywanych w następnym zleceniu
- śledzić i planować rozmieszczenia narzędzi nadwymiarowych w magazynie obrabiarki i palecie transportowej, tak aby wokół nich były miejsca wolne
- automatycznie wczytywać korekcie przypisane poszczególnym narzędziom itp.

Zalety tego sposobu przezbrajania OSN-ów to:

- skrócenie do minimum czasu wykonywania tej czynności w czasie nie pokrytym (w skrajnych wypadkach do zera)
- pełniejsze wykorzystanie okresów trwałości narzędzi
- zmniejszenie liczby narzędzi używanych jednocześnie na wydziale produkcyjnym
- zmniejszenie pracochłonności związanej z przygotowaniem narzędzi
- możliwość pełnej automatyzacji pracy obrabiarki w gnieździe produkcyjnym itp.

Do wad zaliczyć trzeba: wysoki koszt stanowiska pracy, wynikający z konieczności posiadania odpowiedniego oprzyrządowania i oprogramowania OSN-ów oraz trudności związane z wymianą narzędzi w trakcie pracy niektórych obrabiarek. Dla tokarek z głowicami narzędziowymi zagadnienie to nie zostało jeszcze do tej pory rozwiązane, przynajmniej w zastosowaniu przemysłowym. Tego typu strategię przezbrajania obrabiarek są natomiast opracowane dla centrów frezarskich. Niewątpliwie będą one przystosowywane także dla innych obrabiarek.

Istnieje także możliwość **jednoczesnego wykorzystywania tego samego zestawu narzędzi na dwóch lub więcej obrabiarkach**. Znane są takie przypadki w odniesieniu do centrów frezarskich, gdzie z jednego magazynu narzędziowego, paletowego bądź łańcuchowego korzysta kilka obrabiarek. **Korzyści** płynące z zastosowania takiej strategii użycia narzędzi to:

- możliwość pełniejszego wykorzystania narzędzi, zwłaszcza tych o krótkim czasie użycia na poszczególnych obrabiarkach
- zmniejszenie ogólnej liczby zasobów narzędziowych w systemie produkcyjnym
- zmniejszenie pracochłonności przygotowania zlecenia produkcyjnego w tej jego części, która przypada na narzędzia (mniejsza liczba narzędzi ogranicza czynności związane z pobraniem części składowych, ich montowaniem, mierzaniem bądź ustawianiem na wymiar, komisjonowaniem, transportem, uzbrajaniem w nie obrabiarek, określaniem korekty i wczytywaniem ich od układów sterowań obrabiarek itp.)
- mniejsza liczba narzędzi, ale pełniej wykorzystana, powoduje, że wówczas szybciej się one amortyzują, co umożliwia częstsze odnawianie zasobów narzędziowych, przez co nie dekapitalizują się one nadmiernie.

Do wad zaś zaliczyć należy:

- konieczność korzystania z bardziej złożonej struktury zarządzania narzędziami w obrębie gniazda produkcyjnego,
- konieczność posiadania specjalnych wspólnych magazynów i manipulatorów je obsługujących, które jako nietypowe są bardzo drogie.

Strategie polegające na wykorzystywaniu jednego zestawu narzędzi na wielu obrabiarkach są łatwiejsze do zastosowania w centrach frezarskich, w których użycie kolejnego narzędzia wymaga za każdym razem jego wyszukania w magazynie narzędziowym (obrabiarkowym lub wspólnym zewnętrznym) i zamocowania we wrzecionie. W tokarkach NC narzędzia są zazwyczaj umieszczone w głowicach narzędziowych. Wybór narzędzi sprowadza się do wyboru głowicy i odpowiedniej jej pozycji. Są jednak tokarki, np. niektóre odmiany ASO (autonomiczne stacje obróbkowe), które oprócz głowic narzędziowych mają także dodatkowe magazyny narzędziowe, pozwalające, w razie potrzeby, na automatyczną wymianę narzędzi między głowicą a magazynem narzędziowym. Sporadycznie powstają też takie konstrukcje tokarek, które mają magazyny narzędziowe rozwiązane w bardzo podobny sposób jak centra frezarskie, tzn. istnieje jedno gniazdo narzędziowe. Aby zamocować w nim narzędzie, trzeba każdorazowo pobrać je z magazynu łańcuchowego. Nie ma zatem przeszkód, aby kilka połączonych tokarek miało wspólny magazyn narzędziowy. Zapewni to podobne korzyści jak w przypadku frezarek.

Skracaniu czasów t_{pz} sprzyja także sterowanie DNC, w którym komputer nadrzędny nadzoruje pracę kilku obrabiarek. Może on m.in. automatycznie wczytywać programy NC, wartości korekcji narzędzi aktualnie wprowadzanych do zastosowania na obrabiarkach itp., co przyczyni się do znaczącego zmniejszenia czasów przeznaczonych na wymienione czynności.

Skracanie czasów pomocniczych t_p i ograniczanie ich wpływu na pogarszanie efektywności wytwarzania można uzyskać przez automatyzację czynności objętych tym czasem, a także przez wykonywanie ich w czasie pokrytym. I tak np. przedmioty można mocować za pomocą specjalnych robotów lub manipulatorów. Komplikuje to jednak i podraża koszt stanowiska pracy.

Wymiana przedmiotu na tokarce w czasie pokrytym jest możliwa na niektórych obrabiarkach wielowrzecionowych rotorowych, w których jedno lub dwa położenia bębna służą specjalnie do tego celu [251]. Mierzenie przedmiotu już obecnie jest dokonywane niemal wyłącznie w czasie pokrytym.

W podsumowaniu można stwierdzić, że istnieje wiele możliwości i sposobów na skracanie czasów przygotowawczo-zakończeniowych t_{pz} i pomocniczych t_p . W niektórych przypadkach komplikuje to stanowisko robocze lub wymusza zmianę zasad organizacji pracy. Nie zawsze dążenie do pełnej automatyzacji czy nowocześniejszych form działania przedsiębiorstwa musi prowadzić do zwiększenia efektywności wytwarzania.

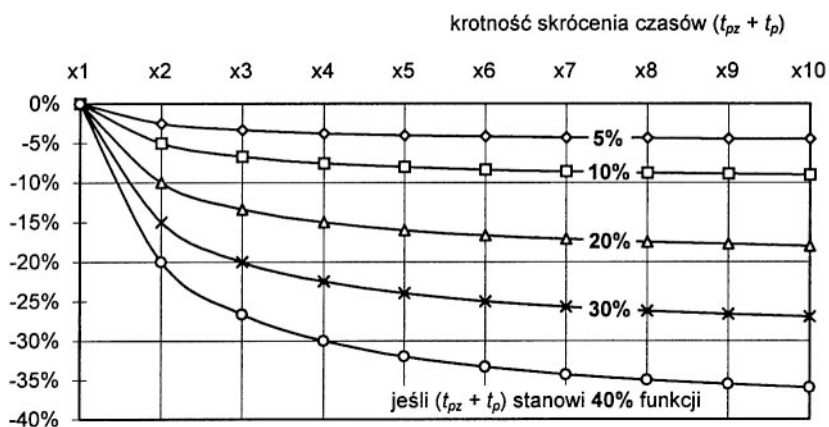
Należy także zwrócić uwagę na dyspozycyjność potencjału wytwórczego do szybkiej realizacji zleceń. Może ona czasami przesądzać o możliwości pozyskiwania zleceń i większej konkurencyjności, a także o szybszym i bardziej elastycznym dostosowywaniu się do koniunkturalnych wahań rynku. Czasami najniższe, lokalne koszty wytwarzania stanowiska pracy nie muszą być optymalne dla całego przedsiębiorstwa.

Czasy przygotowawczo-zakończeniowe i pomocnicze stanowią mogą znaczny składnik czasu i kosztów operacji, szczególnie jeśli stosować się będzie narzędzia i obrabiarki o du-

zych możliwościach obróbkowych, powodujących że czasy maszynowe przejść roboczych będą bardzo krótkie.

Czasy t_{pz} i t_p nie zależą od parametrów skrawania. A ponieważ mają stałą wartość, więc w miejscach optymalnych, w których funkcja celu ma najmniejsze wartości, ich procentowy udział przyjmuje największe wartości.

W jaki sposób zmieniać się będą wartości funkcji celów w wyniku skracania czasów przygotowawczo-zakończeniowych i pomocniczych pokazano na rys. 7.15. Linie tego wykresu obrazują zmiany wartości funkcji celów dla różnych wyjściowych procentowych udziałów sumy czasów ($t_{pz} + t_p$) w całkowitej wartości funkcji.



Rys. 7.15. Zmiany wartości funkcji celu spowodowane skróceniem czasów przygotowawczo-zakończeniowych i pomocniczych ($t_{pz} + t_p$)

Rys. 7.15. Variations in values of aim function due to the shortening of setup and auxiliary times ($t_{pz} + t_p$)

I tak, w przyszłościowych warunkach obróbki, dla których szacowany sumaryczny udział składników ($t_{pz} + t_p$) może wynosić 30–40%, skrócenie tych czasów choćby tylko o połowę pozwoliłoby zwiększyć efektywność wytwarzania o 15–20%. Skracając zaś te czasy 10-krotnie można by zmniejszyć koszty wytwarzania aż o około 27% i czas obróbki o 36%. W tym miejscu można postawić więc pytanie, czy 10-krotne skrócenie tych czasów jest możliwe do zrealizowania? Odpowiedź wydaje się twierdząca. Pamiętać należy, że punktem wyjścia do przedstawionych analiz była typowa dla polskich warunków sytuacja, w której pracownik sam przygotowuje narzędzia i uzbraja w nie obrabiarkę. W rozważaniach przyjęto, że czas ten wynosi $t_{pz}=120$ min. Jeśli zatem przygotowanie narzędzi wraz z określeniem korekcy zleci się innym służbom, to skrócenie czasu t_{pz} do 12 min jest wielce prawdopodobne. A przecież można doposażyć obrabiarkę w wymienny magazyn narzędziowy, w systemy automatycznej wymiany przedmiotu i automatycznego przekazywania wartości korekcy do układu sterowania obrabiarki itp. Tego typu możliwości są już dostępne. Tak więc potencjalnie czasy $t_{pz} + t_p$ można zmniejszyć znacznie bardziej niż tylko 10-krotnie.

7.7. CZASY WYMIANY NARZĘDZI

Przez pojęcie wymiana narzędzia rozumieć będziemy wymianę narzędzia po jego stępieniu, a nie przezbieranie obrabiarki do nowego zadania produkcyjnego. Odnosić się ona może do zamiany całych stępionych narzędzi na narzędzia siostrzane, lub tylko do regeneracji narzędzi przez wymianę lub obrót płytki wieloostrzowej.

Gdy obrabiarkę obsługuje operator i używane są narzędzia składane, wówczas typową sytuacją jest ich regeneracja przez wymianę ostrza skrawającego. Jeśli po takiej regeneracji konieczne byłoby dodatkowe ustawianie lub też określanie korekcji, to często wymienia się wtedy całe narzędzia na siostrzane, które wcześniej są ustawione i zmierzone poza obrabiarką. Ten drugi sposób wymiany narzędzi jest stosowany także w przypadku pracy bezobsługowej obrabiarek. Co prawda w ISW Uniwersytetu w Stuttgarcie opracowano prototypowe urządzenie do automatycznej wymiany płytek skrawających w narzędziach składanych, ale wydaje się, że do upowszechnienia i przemysłowych zastosowań tego urządzenia droga jest jeszcze daleka, choć w pracy [161] opisano zautomatyzowane stanowisko do wymiany płytek skrawających w narzędziach składanych. Pracuje ono jednak niezależnie poza obrabiarką.

Częstotliwość wymiany narzędzia zależy od stosunku trwałości narzędzia do czasu skrawania nim w operacji (T_c/t_s). Dla każdego z narzędzi częstotliwość ta może być inna. Pokusa, aby próbować zastosować dla OSN-ów strategię grupowej, uprzedzającej wymiany narzędzi, takie jakie bywają stosowane w automatycznych liniach ze sztywną więzią transportową [109, 110, 234, 248], nie mają tu żadnego uzasadnienia, gdyż dla OSN-ów czas łączny oddzielnie wymienianych kilku narzędzi jest taki sam jak wymienianych grupowo.

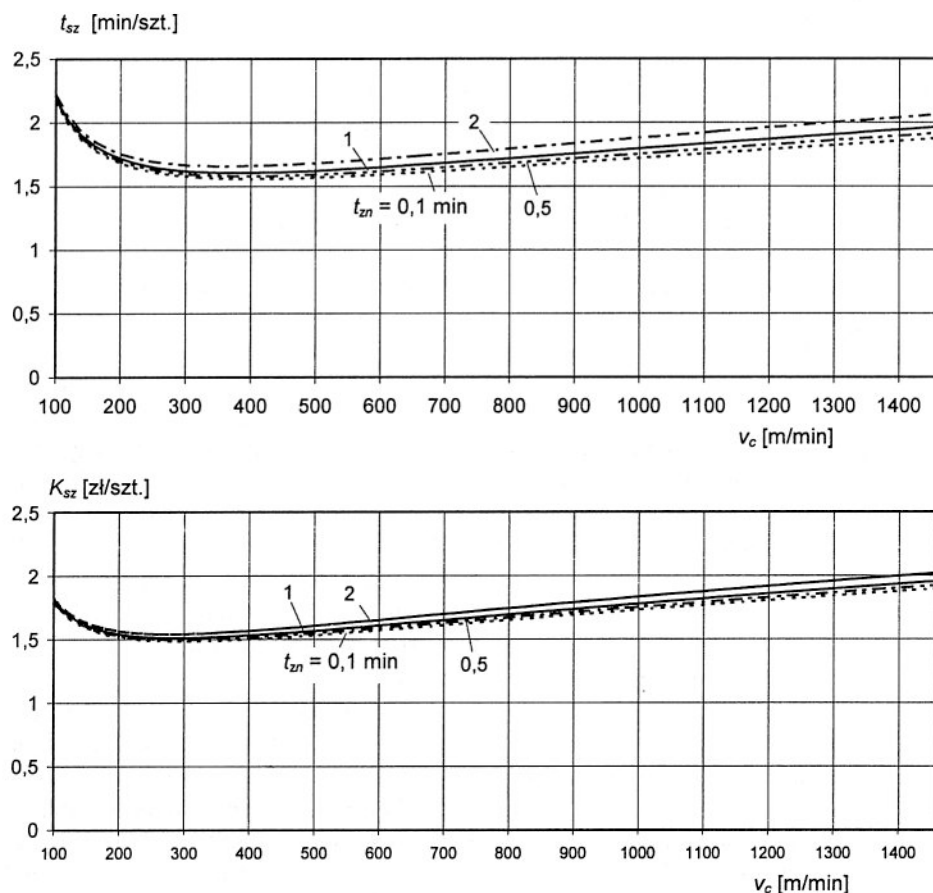
Odrębnym zagadnieniem jest problem uprzedzającej wymiany poszczególnych narzędzi, jeśli ich trwałości resztkowe są mniejsze niż czas użycia ich w następnej operacji ($T_{cr} < t_s$). Zagadnienie to omówiono w rozdz. 4. Zaproponowano tam taką postać funkcji celu, która pozwala optymalizować parametry skrawania z uwzględnieniem strat nie wykorzystanych w pełni możliwości skrawnych ostrzy. Dzięki temu uzyskuje się takie warunki obróbki, dla których trwałości resztkowe narzędzi można zredukować do zera lub do żądanej wartości uwarunkowanej progiem bezpieczeństwa.

Czas wymiany narzędzi nie jest znaczącym składnikiem funkcji celu. Współcześnie może on stanowić około 1,6 do 5% wartości czasu i około 1 do 3,9% kosztów operacji. W przyszłości udział jego będzie jeszcze mniejszy i będzie oscylował w granicach 1%.

Sposób, w jaki czas t_{zn} oddziałuje na wartość funkcji czasu i kosztów wykonania operacji, przedstawiono na przykładzie skrawania ostrzami ceramicznymi (rys. 7.16). Punktem wyjścia był czas wymiany płytki $t_{zn} = 1$ min, jaki jest zalecany w normatywach dla narzędzi składanych. Na wykresach zamieszczonych na rys. 7.16 zobrazowano zmiany funkcji celów dla wartości t_{zn} mniejszych niż 1 min oraz jedynie w celach orientacyjnych – dla wartości większych niż 1 min. Należy sądzić bowiem, że wysiłki konstruktorów obrabiarek i narzędzi będą zmierzały do skracania czasów t_{zn} .

Z przedstawionych danych na tych wykresach wynika, że wpływ czasu wymiany narzędzi, zarówno na czas, jak i koszty wytwarzania, nie jest zbyt duży. Aby dokładniej prześledzić i porównać otrzymane wyniki, zebrano wartości optymalne prędkości skrawania oraz odpowiadające im wartości funkcji celów i zamieszczono je w tab. 7.3. Jednocześnie podano pro-

centowe zmiany w stosunku do tych, jakie obowiązywały dla wyjściowego czasu $t_{zn} = 1$ min. Z danych przedstawionych w tab.7.3 wynika, że skrócenie czasów t_{zn} z 1 min do 0,1 min może spowodować skrócenie czasu wykonania operacji o około 3%, przy czym optymalna prędkość skrawania zwiększy się o 4,7%. W odniesieniu do kosztów operacji skutki analogicznych zmian czasu t_{zn} będą podobne choć nieco mniejsze. Koszty zmniejszą się o około 1,83%, a prędkość optymalna zwiększy się o 3,47%. Gdyby jednak czas t_{zn} miał znacznie większą wartość np. 4 min, wówczas czas obróbki wzrósłby o 9,6%, a koszt o 5,9%.



Rys. 7.16. Zależność czasu i kosztów wykonania operacji od czasu t_{zn} wymiany narzędzia

Fig. 7.16. Operation time/cost versus tool-exchange time t_{zn}

Należy się zastanowić, czy zmniejszenie czasu wymiany narzędzia z 1 min do 0,1 min, czyli do 6 s, jest możliwe? Z pewnością nie będzie to łatwe w przypadku wymiany ostrza w narzędziach składanych w obecnych systemach ustalania i mocowania płytek wielostrzowych. Ale w przypadku wymiany całych narzędzi, czas taki należy uznać za całkiem

realny, a nawet możliwy do jeszcze znaczniejszego skrócenia. Zwłaszcza, gdy zautomatyzuje się tę czynność. Jednak nie należy spodziewać się tu znaczących korzyści. Gdyby bowiem udało się nawet skrócić prawie do zera czas wykonywania tej czynności lub realizować ją w czasie pokrytym, np. podczas wymiany przedmiotu, to w porównaniu z czasem $t_{zn} = 6$ s, uzyskałoby się dalsze zmniejszenie czasu operacji zaledwie o 0,35%, a kosztów o 0,21%.

Tabela 7.3. Zestawienie optymalnych prędkości skrawania i funkcji celów t_{sz} i K_{sz} dla różnych czasów wymiany narzędzi t_{zn} Table 7.3. List of optimum cutting speeds and aim functions t_{sz} and K_{sz} for various tool-exchange times t_{zn}

t_{zn} min	Czas wykonania operacji				Koszt wykonania operacji			
	$v_{c(opt)}$	% v_c	t_{sz}	% t_{sz}	$v_{c(opt)}$	% v_c	K_{sz}	% K_{sz}
0,1	400	4,71%	1,556	-2,99%	298	3,47%	1,483	-1,83%
0,5	392	2,62%	1,578	-1,62%	292	1,39%	1,495	-1,01%
1	382	—	1,604	—	288	—	1,510	—
2	362	-5,24%	1,657	3,29%	278	-3,47%	1,541	1,99%
4	332	-13,09%	1,758	9,60%	262	-9,03%	1,600	5,90%

W przyszłości, gdy skrawać się będzie ostrzami o znacznie lepszych zdolnościach skrawanych, korzyści ze skracania czasów wymian narzędzi będą jeszcze mniejsze niż obecnie.

Trzeba zwrócić uwagę na jeszcze jeden problem związany z wymianą narzędzi. Ze względu na automatyczną pracę tokarek w dłuższym okresie pracy konieczny staje się zapas narzędzi większy niż w klasycznej głowicy rewolwerowej. Z tego też powodu pojawiają się w ostatnim czasie systemy automatycznej wymiany narzędzi między magazynem narzędziowym obrabiarki a głowicą lub gniazdem narzędziowym obrabiarki i to nie tylko w odniesieniu do centrów obróbkowych, ale także tokarek NC. Takim koncepcjom wymian narzędzi sprzyjają także:

- tendencje do skracania serii produkcyjnych z jednoczesnym zwiększeniem asortymentu wytwarzanych wyrobów (elastyczne wytwarzanie wymaga większej różnorodności narzędzi)

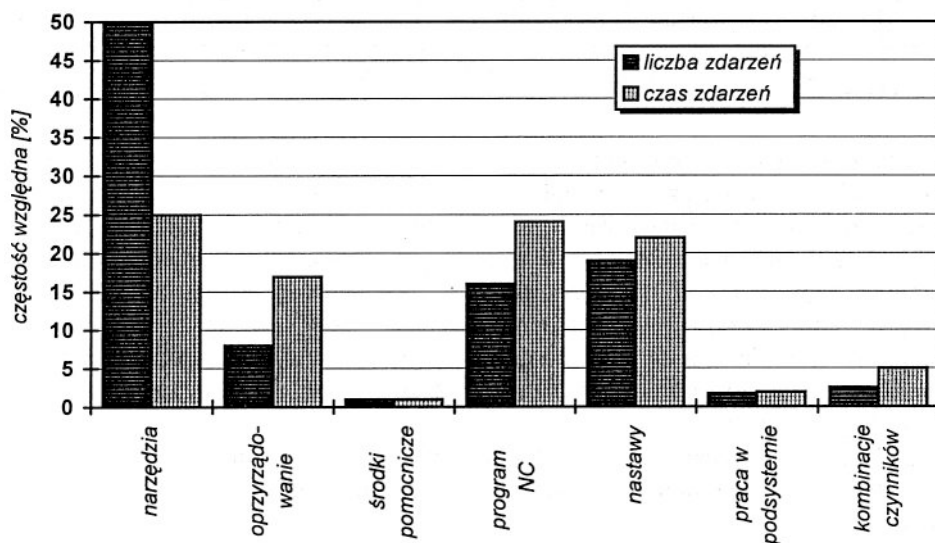
- skracanie się ekonomicznych okresów trwałości narzędzi, które wymuszają częstą wymianę ich na narzędzia zastępcze („siostrzane”).

Daje się zauważyć interakcję polegającą na tym, że szybka automatyczna wymiana narzędzi, z częstym samoczynnym określaniem lub choćby tylko wprowadzaniem korekcji do układu sterowania obrabiarki, skraca zdecydowanie czasy tych czynności, a to powoduje, że z kolei optymalne parametry skrawania mogą być znacznie większe niż te, które były ograniczane długimi czasami ręcznej wymiany narzędzi. Tak więc optymalizacja parametrów skrawania wskazuje na możliwość zwiększania efektywności obróbki przez automatyzację wymiany narzędzi, a automatyzacja pozwala na zwiększanie parametrów skrawania.

7.8. CZASY OKREŚLANIA I WPROWADZANIA KOREKCJI

Czasy określania i wprowadzania korekcji są jednym z bardziej znaczących składników czasu i kosztów wykonania operacji, co ilustrują dane na rys. 7.13 i 7.14. Czasy te stanowią mogą udział od kilku do nawet 35% wartości funkcji celu. Znaczenie skracania tych czasów będzie tym większe, im krótsze będą serie wykonywanych wyrobów, częstsze przezbieranie obrabiarek, dokładniejsza obróbka, w której określanie korekcji będzie zależało od wielkości obrabianych przedmiotów, a dokładniej – od długości dróg skrawania poszczególnymi narzędziami. Większość tych czynników jest charakterystyczna dla produkcji elastycznej, której udział w stosunku do innych form wytwarzania z roku na rok rośnie. Z tego też względu czasom określania i wprowadzania korekcji poświęcono nieco więcej uwagi. Ponadto wydaje się, że w tym obszarze działań można stosunkowo małym nakładem pracy i kosztów osiągnąć znaczące efekty w zwiększaniu efektywności wytwarzania.

Szybki i dokładny pomiar wymiarów rzeczywistych dużej liczby narzędzi, które są w obiegu, nie tylko zmniejsza przestoje obrabiarek, ale także może być czynnikiem zwiększenia dokładności obróbki oraz zapewnienia jakości wyrobu na odpowiednio wysokim poziomie.



Rys. 7.17. Zakłócenia pracy elastycznego gniazda produkcyjnego wywołane różnymi środkami produkcji.

Dane: praca dwuzmianowa, liczba dni pracy = 24, liczba obrabiarek = 9, liczba zdarzeń = 442, czas zakłóceń = 342 h, według pracy [243]

Fig. 7.17. Disturbance in operation of flexible manufacturing center due to various means of production.

Data: two-shift operation, number of work days = 24, number of machines = 9, number of events = 442, disturbance time = 342 hrs, acc. to [243]

Spśród wszystkich czynników, które wywołują przestoje obrabiarek w elastycznych systemach produkcyjnych (ESP), narzędzia należą do tej grupy, która powoduje najczęstsze

i najdłużej trwające przerwy w pracy (rys. 7.17). A każda przerwa w pracy, związana z narzędziem, wymaga zmierzenia, ustawienia lub choćby tylko skontrolowania jego wymiarów rzeczywistych. W tym celu używa się specjalnie do tego skonstruowanych urządzeń pomiarowych. Urządzenia te, wspomagane odpowiednim oprogramowaniem komputerowym, pozwalają na skrócenie czasu pomiaru lub ustawiania narzędzia na wymiar, a także na znaczne ograniczenie liczby pomyłek związanych z identyfikacją rodzaju oraz typu narzędzia, przyjmowaniem kierunków i zwrotów osi w układzie pomiarowym i ustawienia narzędzia, itp.

Ponieważ godzinowy koszt pracy wysoce zautomatyzowanego stanowiska pracy, jakim jest autonomiczna stacja obróbkowa, centrum obróbkowe lub tokarka NC, jest bardzo duży, przeto każde skrócenie przestojów związanych z pomiarem, ustawieniem i wymianą narzędzia może przyczynić się do zmniejszenia czasu wykonania zlecenia produkcyjnego i do ograniczenia kosztów wytwarzania.

Korekcje, czyli dodatkowe przemieszczenia suportów dla poszczególnych narzędzi, które ma zrealizować układ sterowania obrabiarki, określa się wtedy, gdy:

- występują różnice w wymiarach nominalnych i rzeczywistych narzędzi, w które jest uzbrajana obrabiarka
- nastąpiła wymiana narzędzi lub tylko ich ostrzy, które zużyły się
- postępujące zużywanie się narzędzia oddziałuje bezpośrednio na wymiar obrabianego przedmiotu lub pośrednio, przez wzrost sił skrawania, co jest przyczyną zwiększonych odkształceń sprężystych układu OUPN (obrabarka, uchwyt, przedmiot, narzędzie)
- konieczne jest skompensowanie odkształceń cieplnych i sprężystych układu OUPN
- chce się wyeliminować błędy systematyczne obrabiarki i programu NC
- potrzebne jest skorygowanie błędów zamocowania narzędzi w gniazdach głowic narzędziowych.

W wielu przypadkach nie jest konieczne każdorazowe określanie korekcji po wystąpieniu którejs z wymienionych przyczyn. Występuje to na przykład podczas obróbek zgrubnych lub kształtujących, w których wymagana tolerancja wykonania jest znacznie większa niż błąd toczenia, spowodowany zaniechaniem określania i wprowadzania korekcji po każdorazowej wymianie płytki skrawającej lub całego narzędzia.

Na szczególną uwagę zasługuje rozrzut położenia wierzchołka narzędzia składanego po kolejnych zmianach naroży płytek wieloostrowych. Rozrzut ten jest spowodowany [14, 31]:

- błędami wykonania płytek skrawających
- błędami ustalania i mocowania płytki w gnieździe oprawki lub korpusu narzędzia
- odkształceniami cieplnymi części składowych narzędzia
- różnicami w wymiarach naroży płytek zużytych i tych, które jeszcze nie pracowały.

Gdy dominującym i znaczącym składnikiem ogólnych błędów obróbki jest tolerancja wykonania płytki, dobrym rozwiązaniem może być użycie płytek o większej dokładności wykonania. Znaczny udział w niepowtarzalności położenia mogą mieć również błędy ustalania i mocowania płytek, wynikające z samej konstrukcji elementów ustalająco-mocujących narzędzia. Dotyczyć to może także narzędzi renomowanych firm światowych [31]. W takich przypadkach, wszędzie tam, gdzie zależy nam na uniknięciu określania korekcji, dla narzędzi, w których wymieniano ostrze, należy wybrać takie systemy ustalania i mocowania płytek, które odznaczają się najmniejszym rozrzutem położenia naroża.

Określanie korekcji dla narzędzi używanych na OSN-ach może być realizowane na kilka sposobów:

❑ **Na obrabiarence, metodą przejść próbnych**, kiedy narzędzia ustawia się wstępnie w sposób przybliżony, ale tak, aby nie powstał nienaprawialny brak, a następnie mierzy się dokładnie wykonany przedmiot i wprowadza do układu sterowania obrabiarki korekcje wyliczone dla poszczególnych narzędzi. Metoda ta odznacza się:

- długim czasem nieproduktywnym obrabiarki, podczas którego są określane korekcje
- wymaganiem wysokich kwalifikacji od operatora obrabiarki
- trudnościami z wprowadzaniem pełnej automatyzacji obrabiarek
- dużą dokładnością, która wynika z uwzględnienia nie tylko odchyłek od wymiarów nominalnych narzędzi, ale także błędów mocowania narzędzia w głowicy narzędziowej, odkształceń sprężystych statycznych i dynamicznych całego układu OUPN, jakie pojawiają się podczas mocowania i skrawania
- przyporządkowaniem odpowiedzialności za dokładność obróbki do jednej osoby, to jest do operatora obrabiarki.

❑ **Na obrabiarence samoczynnie**, z zastosowaniem specjalnego oprzyrządowania, głowicy pomiarowej i układu sterowania CNC obrabiarki. Program NC sterujący pracą obrabiarki zleca najeżdżanie poszczególnymi narzędziami na czujnik głowicy pomiarowej. Odczytując automatycznie położenia suportów i wskazania głowicy, można określać wymiary rzeczywiste narzędzi. Metoda ta odznacza się:

- skróceniem czasów określania korekcji w porównaniu z metodą przejść próbnych
- uwzględnianiem błędów zamocowania narzędzi
- możliwością nadzorowania zużywania się narzędzia i podejmowania decyzji o korekcji położenia narzędzia lub jego wymianie, jeśli zostało przekroczone zużycie dopuszczalne lub też wystąpiło zużycie katastroficzne
- niezbyt dużą dokładnością pomiaru.

❑ **Poza obrabiarką, na specjalnych urządzeniach** do ustawiania i mierzenia narzędzi. Sposób ten ma następujące zalety i wady:

- czynności mierzenia i ustawiania narzędzi nie obciążają czasu pracy obrabiarki, co powoduje zwiększenie jej wydajności i obniżenie kosztów wytwarzania
- możliwość przezbierania obrabiarki do następnego zadania produkcyjnego podczas aktualnie realizowanego zadania, co znacznie ogranicza lub nawet eliminuje całkowicie tę część czasów przygotowawczo-zakończeniowych, które są z tą czynnością związane
- jedno urządzenie pomiarowe jest wykorzystywane do przygotowywania narzędzi dla wielu obrabiarek
- godzinowy koszt pracy urządzenia do ustawiania i mierzenia narzędzi jest znacznie mniejszy niż czas pracy OSN-ów
- duża dokładność pomiaru (współczesne urządzenia pomiarowe tego typu odznaczają się dokładnością od jednego do kilku mikrometrów)
- konieczność posiadania dokładnych, nie wyeksploatowanych adapterów i gniazd narzędziowych w obrabiarkach, aby błąd mocowania narzędzi nie wpłynął zbyt mocno na dokładność obróbki
- możliwość wspierania komputerowego pomiarów, łącznie z ich pełną automatyzacją

- łatwe włączanie się w różne struktury informatyczne obiegu informacji narzędziowych, zwłaszcza takich, w których informacja zapisana na magnetycznym nośniku wędruje razem z narzędziem w obrębie systemu wytwarzania
- konieczność posiadania specjalnego urządzenia pomiarowego
- ograniczenie, za pomocą wsparcia komputerowego, potencjalnego źródła błędów wynikających z przekłamań, jakie mogą się pojawić, gdy osie pomiarowe i ich zwroty w urządzeniu pomiarowym i w obrabiarce nie pokrywają się.

□ **Metodą pośrednią**, przez pomiar przedmiotu, podobnie jak w metodzie przejść próbnych, z tą różnicą, że odbywa się to na ogół poza obrabiarką podczas systematycznej lub okresowej kontroli wyrobów. Jeśli mierzone wymiary zbliżają się do granic pola tolerancji, a ostrze nie utraciło jeszcze swoich właściwości skrawnych, to można wprowadzić od układu sterowania obrabiarki korekcję o odpowiedniej wartości, aby zapobiec powstawaniu braków. Można też, w przypadku tzw. „narzędzi wymiarowych”, tzn. takich, w których ich wymiar decyduje w głównej mierze o dokładności obróbki (np. jak w przypadku wytaczadeł), przekazać korekcje bezpośrednio do narzędzia, np. za pomocą promieni podczerwonych [12].

Często stosuje się **łącznie kilka metod**, np. metodę ustawiania narzędzi poza obrabiarką i przejść próbnych. Dzieje się tak wówczas, gdy są duże wymagania odnośnie do dokładności wykonania niektórych powierzchni, a:

- urządzenie do mierzenia narzędzi nie zapewnia wystarczającej dokładności pomiaru
- części chwytowe narzędzi i gniazda adapterów w głowicach narzędziowych obrabiarzek są w złym stanie technicznym, powodującym zbyt duże błędy mocowania, które niweczą dużą dokładność pomiaru narzędzi poza obrabiarką
- występuje duży udział błędów odkształceń układu OUPN i niedokładności samej obrabiarki w sumarycznych, systematycznych błędach toczenia.

W takich przypadkach dla narzędzi, które wykonują powierzchnie o dużej dokładności, uściśla się, wyznaczone wcześniej poza obrabiarką, korekcje metodą przejść próbnych.

Ważna jest także odpowiednia, w miarę możliwości bez zakłóceń, transmisja danych (dotyczących wymiarów narzędzia i jego korekcji) do układu sterowania obrabiarki. Może się ona odbywać za pomocą:

- protokołów pomiarowych (papierowych)
- elektronicznych nośników informacji (dyskietki, taśmy magnetyczne i perforowane) przekazywanych w sposób oddzielony od narzędzia
- nośników informacji przytwierdzonych do narzędzia (nalepki, magnetyczne nośniki informacji, kody paskowe itp.)
- sieci komputerowej, bezpośrednio z urządzenia do ustawiania i mierzenia narzędzi do układu sterowania obrabiarki, lub częściej, za pośrednictwem centralnego banku danych.

Istnieje wiele rozwiązań konstrukcyjnych maszyn pomiarowych służących do ustawiania i mierzenia narzędzi [12, 40, 164]. Niemal standardem staje się wspomaganie komputerowe mierzenia, obliczania korekcji, drukowania protokołów pomiarowych i transmisji danych do magnetycznych nośników informacji umieszczanych w narzędziu, lub do baz danych.

Jednak główne cele oprogramowania wspomagającego czynności pomiarowe to:

- ułatwienie żmudnych czynności pomiarowych
- skrócenie czasu pomiaru

- ograniczenie pomyłek związanych np. z zamianą osi układu współrzędnych, co może wystąpić, gdy to samo narzędzie jest mocowane nawet na tej samej obrabiarce, ale raz w gnieździe znajdującym się np. na czole głowicy narzędziowej, a innym razem na jej obwodzie itp.
- ograniczenie pomyłek wynikających z przyjęcia złego znaku wartości wymiaru lub korekcji
- automatyczne obliczanie wartości korekcji narzędzi
- wyeliminowanie pomyłek związanych z niewłaściwym przyporządkowaniem zmierzonych wymiarów i obliczonych wartości korekcji do odpowiedniego narzędzia, itp.

Cele te można osiągać przez zaprogramowanie pomiarów. Pomiar narzędzi nadzoruje wówczas program, który narzuca wykonywanie kolejnych czynności i przyporządkowuje im, dla danego narzędzia i numeru gniazda obrabiarci, odpowiedni układ współrzędnych z prawidłowo określonymi osiami i ich zwrotami. Często programy te ułatwiają identyfikację narzędzia i orientację jego charakterystycznych wymiarów względem różnych układów odniesienia, za pomocą graficznej wizualizacji. Podczas pomiaru na ekranie monitora pojawia się wtedy rysunek narzędzia, z zaznaczonymi do zmierzenia wielkościami i osiami układu współrzędnych [10, 34].

Produkują się też urządzenia do mierzenia narzędzi, które są w pełni zautomatyzowane [17, 40]. Same pobierają narzędzia z palet, mocują je, identyfikują, wywołują odpowiedni program pomiarowy, „najeżdżają” układem optycznym w miejsce, w którym znajduje się naroże ostrza, analizują obraz z użyciem kamer CCD (o rozdzielczości $\pm 0,25 \mu\text{m}$), określają wymiary charakterystyczne narzędzia, wyliczają odpowiadające im korekcje, przekazują dane pomiarowe we właściwe miejsce.

Jak wspomniano, nie zawsze można się obejść bez określania korekcji metodą próbnych przejść. W takich przypadkach, aby skrócić czas trwania tych czynności, z pomocą może przyjść odpowiedni sposób pisania programu NC. Można bowiem umieszczać w nim bloki warunkowe, które realizują tylko krótkie zatoczenia na fragmentach obrabianych powierzchni ze zmniejszonymi głębokościami skrawania. Umożliwia to znacznie szybsze określanie korekcji niż podczas realizacji całego programu NC. Po określeniu korekcji przełącza się system sterowania na opcję pomijania bloków warunkowych i uruchamia pracę obrabiarci według tego samego programu, poczynając od przedmiotu służącego do określania korekcji.

Ograniczenie nie tyle czasu co konieczności określania korekcji, przez stosowanie metody próbnych przejść lub metody z wykorzystaniem sond pomiarowych do nadzorowania stanu ostrza, jest możliwe przez stosowanie takich systemów narzędziowych, które odznaczają się bardzo dużą dokładnością i powtarzalnością mocowania. Mając możliwość bardzo dokładnego pomiaru, lub ustawienia narzędzia poza obrabiarką, oraz bardzo dokładnego jego zamocowania w gnieździe głowicy narzędziowej obrabiarci, można niejednokrotnie uniknąć dodatkowego korygowania położenia ostrza nawet dla dużych dokładności obróbki. Nie zawsze jest to możliwe, ponieważ – przypomnijmy – metodą próbnych przejść eliminujemy nie tylko niedokładności wymiarów narzędzia i jego błędów zamocowania, ale także odkształcenia sprężyste i cieplne układu OUPN.

Wiele firm prowadzi prace nad zwiększaniem pewności i dokładności mocowania narzędzi [36, 62, 63, 151]. Powstało wiele rozwiązań konstrukcyjnych takich złączy, np. dla narzędzi

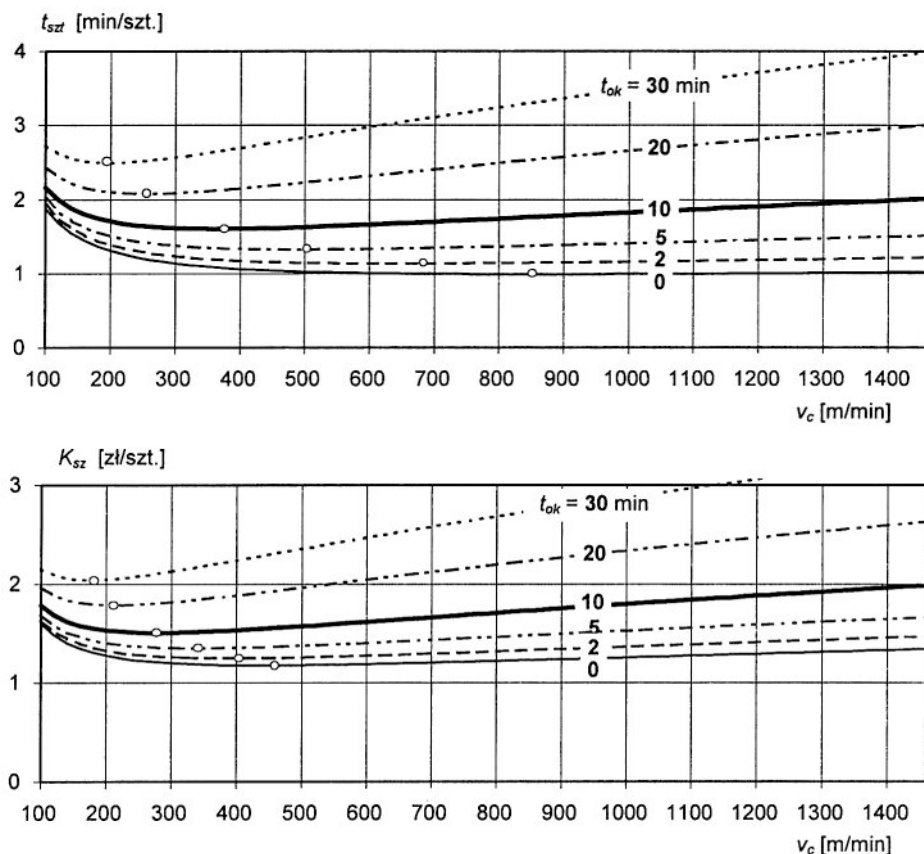
dzi mocowanych na tokarkach: system BTS (Sandvik), Multiflex (Widia–Krupp), FTS (Hertel), ABS (Komet), HSK (DIN 69893). Systemy te umożliwiają automatyczną wymianę zarówno całego narzędzia, jak i jego części roboczej wraz z przedłużką i reduktorem. Część chwytowa narzędzia zespolonego, zwana adapterem, pozostaje wówczas w gnieździe głowicy narzędziowej. Pozwala to na uzyskanie powtarzalności mocowania około kilku mikrometrów.

Gdy po stopieniu się narzędzia wymienia się nie całe narzędzie, lecz tylko jego ostrze, wówczas aby uniknąć określania korekcji, można użyć płytek o małych tolerancjach wykonania i narzędzi o takich mechanizmach ustalająco-mocujących, które zapewnią dużą powtarzalność położeń ostrza. Większa cena takich płytek może być zrekomensowana tym, że nie ma potrzeby określania korekcji. Występować może często sytuacja wyglądająca na paradoks: do obróbki średnio dokładnej używa się płytek precyzyjnych a płytek zwykłych do obróbek bardzo dokładnych. Dziać się tak może wtedy, gdy zastosowanie ostrza wykonanego z większą precyzją wystarcza do zaniechania korekcji dla obróbki średnio dokładnej, ale jest niewystarczające do obróbki bardzo dokładnej. W takim razie stosowanie bardziej precyzyjnych i droższych ostrzy do obróbki powierzchni bardzo dokładnych nie ma sensu, skoro każdorazowo po wymianie płytki i tak trzeba określać korekcje.

W tym miejscu rozważań analiza wpływu na funkcje celu czasu określania korekcji t_{ok} i czasu wprowadzania korekcji t_{wk} zostanie przeprowadzone oddzielnie, gdyż na ogół korekcje określa się jednokrotnie w ciągu całego okresu trwałości narzędzia i można to robić poza obrabiarką. Wprowadzeń korekcji natomiast dokonuje się zazwyczaj kilkakrotnie. Liczba tych wprowadzeń zależy od dokładności obróbki i od stabilności położenia naroża narzędzia względem wymiarów nominalnych obrabianych powierzchni. Na stabilność tę wpływa: zużywania się ostrza (bezpośrednio przez utratę wymiarów i pośrednio przez zwiększanie się odkształceń układu OUPN w wyniku wzrostu sił skrawania), odkształcenia cieplne układu OUPN, a także zmiany w czasie właściwości półfabrykatu (rozrzut twardości materiału oraz wielkości i równomierności rozłożenia nadmiaru). Podczas monitorowania przebiegu procesu skrawania można w sposób analityczny bądź doświadczalny określać przemieszczanie się narzędzia względem położeń wyjściowych. Jeśli zauważy się tendencję w zmianach wymiarów, które zagrażają przekroczeniu pola tolerancji obrabianej powierzchni, to można ręcznie lub automatycznie dokonać zmian korekcji.

Przyjrzyjmy się teraz, jakie korzyści może przynieść **ograniczanie i skracanie czasu trwania określania korekcji**. I w tym przypadku punktem odniesienia będą uśrednione przeciętne warunki, dla których analizowano wcześniej składniki funkcji celów. Przyjęto w nich, że dla jednego narzędzia czas określania korekcji metodą próbnych przejść wynosi $t_{ok} = 10$ min. Analizowano zachowanie się funkcji celów dla warunków obróbki prowadzonej ostrzami z różnych materiałów (H20S, TN250, AC5 i HPT). Na rysunku 7.18 przedstawiono charakter zmian funkcji czasu i kosztów wytwarzania w zależności od prędkości skrawania i różnych wartości t_{ok} podczas skrawania ostrzami z ceramiki AC5.

Z przebiegu krzywych funkcji celu widać bardzo duże oddziaływanie t_{ok} zarówno na wartości czasu i kosztów operacji, jak i na optymalne prędkości skrawania. Aby było można dokładniej porównać otrzymane wyniki, w tab.7.4 zebrano optymalne wartości prę-



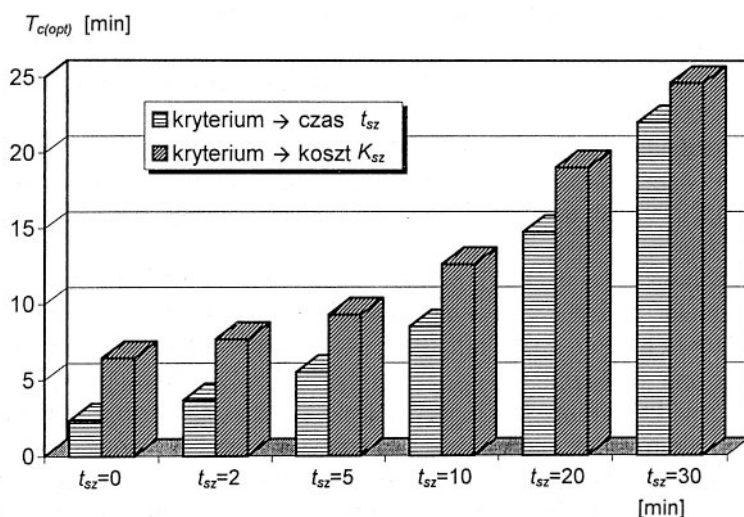
Rys. 7.18. Wpływ czasu określania korekcji t_{ok} na przebieg funkcji czasu i kosztów operacji
 Fig. 7.18. Influence of correction-determination time t_{ok} on the shape of operation time/cost function

kości skrawania oraz odpowiadające im czasy i koszty obróbki. Jednocześnie obliczono o ile procent zmieniają się one w stosunku do danych wyjściowych odpowiadających czasowi $t_{ok} = 10$ min. Czas $t_{ok} = 0$ oznacza, że określania korekcji odbywa się wyłącznie poza obrabiarką. Jeśli $t_{ok} = 2$ min, może to przykładowo odpowiadać sytuacji, w której dla większości narzędzi korekcje określa się na wydzielonym stanowisku, a jedynie dla dwóch narzędzi na dziesięć trzeba je wyznaczać na obrabiarce metodą próbnych przejść. Czas $t_{ok} = 2$ min może oznaczać również to, że dla wszystkich narzędzi wyznacza się korekcje na obrabiarce automatycznie, z użyciem sondy pomiarowej [211]. Czasy $t_{ok} > 10$ min odpowiadają często zdarzającym się przypadkom określania korekcji metodą próbnych przejść, w których istnieją bardzo duże wymagania co do dokładności i jednocześnie obrabia się przedmioty z długo realizowanymi programami NC.

Tabela 7.4. Zestawienie optymalnych prędkości skrawania i funkcji celów t_{sz} i K_{sz} dla różnych czasów określania korekcji t_{ok}

Table 7.4. List of optimum cutting speeds and aim functions t_{sz} and K_{sz} for various correction-determination times t_{ok}

t_{ok} min	Czas wykonania operacji				Koszt wykonania operacji			
	$v_{c(opt)}$	% v_c	t_{sz}	% t_{sz}	$v_{c(opt)}$	% v_c	K_{sz}	% K_{sz}
0	836	140,66	1,045	-36,93	440	58,27	1,211	-21,37
2	646	77,47	1,189	-28,22	390	40,29	1,283	-16,71
5	490	34,63	1,380	-16,74	338	21,58	1,385	-10,13
10	364	—	1,657	—	278	—	1,541	—
20	250	-31,32	2,130	28,57	210	-24,46	1,821	18,18
30	198	-45,60	2,544	53,53	176	-36,69	2,076	34,75



Rys. 7.19. Zależność okresu optymalnej trwałości narzędzia z ostrzem z ceramiki AC5 od czasu określania korekcji t_{ok}
Fig. 7.19. Dependence of optimum lifetime duration for a AC5-ceramics-edge tool on correction determination time t_{ok}

Na podstawie obserwacji i analizy danych przedstawionych na rys. 7.18 i rys. 7.19 oraz w tab. 7.4 można sformułować następujące spostrzeżenia:

- Czas oraz miejsce określania korekcji (na obrabiarce lub wydzielonym stanowisku) jest tym czynnikiem, dzięki któremu można znacząco oddziaływać na efektywność wytwarzania. Odnosi się to w głównej mierze do współczesnych możliwości obróbkowych, a także do przyszłości.
- Skracanie czasu określania korekcji zawsze umożliwia uzyskanie korzystniejszego stanu obiektu dla obu funkcji celu i zwiększenie optymalnych prędkości skrawania.

- Skrócenie średniego czasu określania korekcji z 10 do 2 min może wpływać na zmniejszenie średniego czasu operacji o około 28% i kosztów obróbki o około 17%, a odpowiadające im optymalne prędkości skrawania zwiększają się o 77% dla kryterium $t_{sz} \rightarrow \min$ i o około 40% dla kryterium $K_{sz} \rightarrow \min$.
- Doprowadzenie do sytuacji, w której korekcje określa się całkowicie poza obrabiarką, pozwoli (w porównaniu do stanu, w którym dla wszystkich narzędzi wyznacza się korekcje na obrabiarce) skrócić średni czas wykonania operacji o około 37% i zmniejszyć jej koszt o około 21%. Zwiększy się wówczas optymalna prędkość skrawania aż o około 140% dla kryterium $t_{sz} \rightarrow \min$ i o około 58% dla kryterium $K_{sz} \rightarrow \min$.
- Czas określania korekcji bardzo znacznie oddziałuje na okres optymalnej trwałości. Jeśli dla kryterium ($t_{sz} \rightarrow \min$) skróci się czas określania korekcji z 10 do 2 min, to odpowiadająca tym warunkom optymalna trwałość zmaleje z 8,5 do 2,35 min, a dla kryterium ($K_{sz} \rightarrow \min$) trwałość $T_{c(opt)}$ zmniejszy się z 13 do 6,5 min. W przypadkach większych wartości czasów określania korekcji, wynoszących np. 30 min, optymalne trwałości zwiększają się i osiągają $T_{c(opt)} = 22$ min dla ($t_{sz} \rightarrow \min$) i $T_{c(opt)} = 25$ min dla ($K_{sz} \rightarrow \min$).

Kolejnym czynnikiem poddanym analizie był **czas wprowadzania korekcji** t_{wk} do układu sterowania obrabiarki.

Czas t_{wk} występuje w funkcjach celu w tym samym miejscu co czasy określania korekcji t_{ok} i wymiany narzędzi t_{wn} , więc i charakter jego oddziaływania na czas i koszty wytwarzania, będzie taki sam jak tamtych składników. Jedynie intensywność jego może się nieco różnić.

Jak już wspomniano, w okresie trwałości ostrza dokonuje się kilku wprowadzeń korekcji. Z analiz wynika, że ich liczba wynosi średnio $\epsilon_{wk} = 3$, a czas ręcznego wprowadzania jednej korekcji trwa około $t_{wk} = 0,5$ min. Ponieważ czynności tej nie wykonuje się w czasie pokrytym, więc daje to łącznie $(t_{wk} - t'_{wk})\epsilon_{wk} = (0,5 - 0)3 = 1,5$ min na jeden okres trwałości. Jest więc to liczba, która może być nawet większa niż czas t_{zn} . Można zatem uznać, że nie tylko charakter, ale również intensywność oddziaływania czasu wprowadzania korekcji na funkcje celu będą podobne do czasu wymiany narzędzi (patrz rys. 7.16 i tab. 7.3).

Biorąc pod uwagę tę analogię można stwierdzić, że czas wprowadzania korekcji t_{wk} nie jest bardzo znaczącym składnikiem funkcji celu. Dla warunków współczesnych może on stanowić około 1,8–6% wartości czasu i około 1,3–4,2% kosztów operacji, a w przyszłości udział jego będzie jeszcze mniejszy – około 1,2%.

Wylimitowanie wpływu czasu t_{wk} na funkcje celu jest możliwe przez **automatyzację wprowadzania korekcji** i wykonywanie jej w czasie pokrytym. Takie automatyczne wprowadzanie korekcji do układu sterowania obrabiarki może ograniczyć także liczbę błędów i pomyłek w porównaniu z manualnym wykonywaniem tych czynności. Ponadto, jeśli odbywa się ono ze wspomaganiami komputerowymi, to trwa ułamki sekund. Przypomnijmy, czas ręcznego wprowadzania danych korekcyjnych z klawiatury do układu sterowania obrabiarki dla jednego narzędzia wynosi co najmniej 0,5 min. Gdy w operacji użyto kilkunastu narzędzi, a niektórym narzędziom przyporządkowano więcej niż jedną korekcję, wówczas sam czas wprowadzania korekcji, co jest bardzo odpowiedzialną czynnością, może trwać około 15–20 min. Ma to istotne znaczenie zwłaszcza wtedy, gdy wielkość partii wyrobów przewi-

dziana w zadaniu produkcyjnym jest znacząco mniejsza niż w rozpatrywanym tu przypadku. Wówczas podane procentowe udziały czasu t_{wk} w funkcji celu mogą być nieco większe.

Nawet dość wysokie koszty, poniesione na systemy do identyfikacji narzędzi, umożliwiające automatyczne przekazywanie informacji narzędziowych, w tym danych o korekcji, lub komputerowe systemy do gromadzenia i przetwarzania informacji w obrębie struktur kierowania produkcją, mogą się szybko zwrócić [10, 12].

7.9. CZASY UZUPEŁNIAJĄCE

Czynności, które obejmuje czas uzupełniający t_u , nie są zbyt precyzyjnie zdefiniowane i określane bywają z różnym stopniem szczegółowości [211]. Ogólnie czas uzupełniający składa się z czasów potrzebnych na potrzeby fizjologiczne i odpoczynek oraz czasu na obsługę techniczną i organizacyjną. Pewne nieścisłości tej definicji odnoszą się do pojęć obsługi technicznej. Niekiedy włącza się do tych czynności wymianę narzędzi, określanie korekcji, regulację obrabiarki, gdyż normującemu trudno jest na ogół, bez zbytniego wgłębiania się w zagadnienia procesu skrawania, dokładnie przewidzieć i obliczyć te czasy. Wówczas czas t_u określa się za pomocą normatywnego wskaźnika czasu uzupełniającego k_u

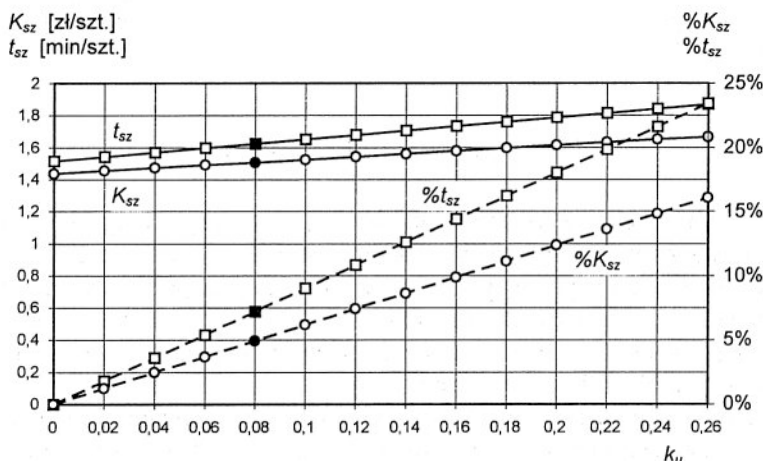
$$t_u = (t_p + t_g)k_u. \quad (7.23)$$

W pracy tej, w funkcjach czasu i kosztów operacji, czynności wymiany narzędzi, określania i wprowadzania korekcji zostały dość dokładnie zdefiniowane za pomocą wzorów matematycznych, w związku z tym występujący w nich wskaźnik k_u nie obejmuje tych czynności. Pozwala to na bardziej dokładne wyznaczanie funkcji celów, a także na poszerzoną o te składniki analizę badanych zależności.

W Polsce przyjmuje się, że pracownikowi na jednej zmianie przysługuje na potrzeby fizjologiczne co najmniej 25 min i 10 min na odpoczynek [211]. W tym czasie obrabiarka może stać bezczynna. Stanowi to około 8% czasu trwania całej zmiany. W rzeczywistości do zagadnienia tego podchodzi się w różnie. W jednych zakładach przyjmuje się wartości zalecanych czasów, o których była mowa, w innych pomija się całkiem ten składnik czasu, wychodząc z założenia, że skoro obrabiarka pracuje w cyklach półautomatycznych, to pracownik między kolejnymi wymianami przedmiotu i obsługą doraźną ma wystarczająco dużo czasu na czynności objęte czasem uzupełniającym. Wydaje się jednak, że właściwe postawienie problemu powinno znajdować się pomiędzy tymi dwoma skrajnościami. Gdy cykle obróbkowe są krótkie, pracownik obsługuje kilka obrabiarek, a w czasie pokrytym dokonuje czynności kontrolno-pomiarowych, wówczas wskaźnik k_u powinien przyjmować wartości od 0,12 do 0,15, a nawet większe. Dla długich cykli obróbkowych, jednostanowiskowej obsługi i niewielu czynności absorbujących operatora obrabiarki wskaźnik k_u powinien wynosić około 0,08. W miarę coraz większego zautomatyzowania czynności kontrolno-pomiarowych i diagnostycznych wartość tego wskaźnika powinna maleć jeszcze bardziej, by w przypadku pełnej automatyzacji i bezobsługowej pracy stanowiska roboczego przyjąć wartość równą zero.

Zależność czasu i kosztów operacji od współczynnika k_u , dla obróbki ostrzami ceramicznymi, przedstawiono na rys. 7.20. Na rysunku tym pokazano także procentowe

zmiany czasu i kosztów obróbki w funkcji czasu uzupełniającego, wyrażonego współczynnikiem k_u .



Rys. 7.20. Zależność czasu i kosztów operacji od czasu uzupełniającego, uwzględnianego współczynnikiem k_u
 Fig. 7.20. Dependence of operation time/cost on supplemental time determined by coefficient k_u

Dla przeciętnych warunków i przyjętej wartości wskaźnika $k_u = 0,08$ czas uzupełniający stanowić może około 7% czasu i odpowiadać za 5% kosztów wykonania operacji. Gdyby zatem zautomatyzować stanowisko pracy, tak aby $k_u = 0$, wówczas można by się spodziewać, że o tyle procent mógłby skrócić się czas obróbki. Trudno jest przewidzieć, jak zaważyłoby to na kosztach, ponieważ mimo skrócenia czasu operacji wzrosły z pewnością koszt godzinowy stanowiska wskutek jego doposażenia w urządzenia służące owej automatyzacji.

7.10. CZASY MASZYNOWE OBRÓBK

Czas maszynowy obróbki t_g należy do głównych czynników tworzących funkcje czasu i kosztów operacji. Może on mieć w obu tych funkcjach udział około 60%. Czas t_g zależy od objętości materiału przeznaczonego do usunięcia w danej operacji oraz od wartości parametrów skrawania. Skracanie czasu maszynowego należy ciągle do głównych zadań prowadzących do podwyższania efektywności obróbki. Aby czas ten mógł być zmniejszany, trzeba poszukiwać możliwości zwiększania parametrów skrawania. Wspomniano już, że powiększanie posuwu i głębokości skrawania napotyka liczne ograniczenia, z których najważniejsze to: jakość warstwy wierzchniej, dokładność obróbki i efektywna moc na wrzecionie. Zostaje zatem zwiększanie prędkości skrawania, które zależy od:

- bardzo dobrych zdolności skrawnych ostrza
- obrabiarek i uchwytów pozwalających realizować bardzo duże prędkości obrotowe wrzecion

- napędów wrzecion i suportów o dobrych właściwościach dynamicznych
- korzystnej postaci wiórów
- zapewnienia bezpiecznej pracy.

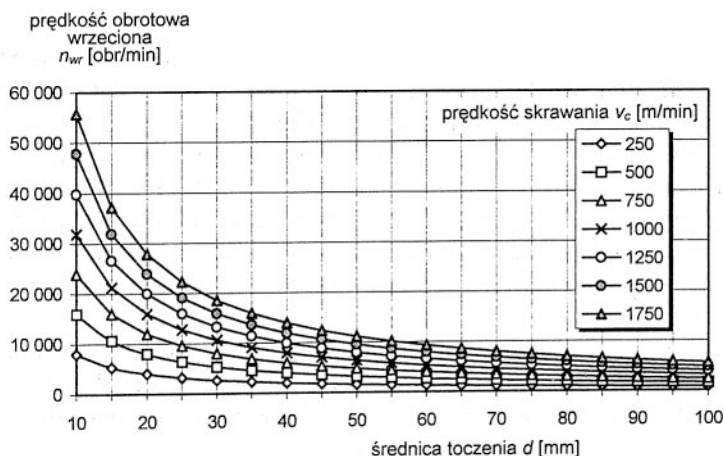
Współczesne materiały narzędziowe pozwalają na skrawanie podstawowych materiałów konstrukcyjnych, takich jak stale średniowęglowe, żeliwa szare z prędkościami dochodzącymi do 1000 m/min, a dobrze obrabialnych stopów metali kolorowych – ze znacznie większymi prędkościami. Inżynieria materiałowa ciągle czyni znaczne postępy, zarówno w dziedzinie samych materiałów narzędziowych, jak i w odniesieniu do powłok ochronnych ostrzy [2, 23, 36, 66, 69, 126, 139, 140, 141, 149, 181, 189, 192]. Obserwowane od lat tendencje ciągłego intensywnego zwiększania się optymalnej prędkości skrawania wskazują na to, że proces ten będzie postępował nadal [123, 182, 186, 231, 294].

Stosowanie HSM w toczeniu jest ograniczone licznymi barierami w porównaniu z frezowaniem. Należą do nich mogą:

- trudności z wyważaniem szybko wirującego uchwyty z przedmiotem, których masy i stopień niewyrównoważenia mogą być wielokrotnie większe niż uchwytów i narzędzi frezarskich
- problemy z pewnością mocowania przedmiotów w uchwytach
- konieczność zapewnienia bardzo dużej mocy skrawania
- większe trudności z zachowaniem wymogów bezpieczeństwa
- długie czasy rozpędzania i hamowania wrzecion
- względy ekonomiczne, które w przypadku frezowania mogą być mniej ważne, gdy chodzi np. o jakość obrobionych powierzchni kształtowych i dużą wydajność wykonywania drogich matryc w produkcji jednostkowej.

Trudności te są dość znaczne, ale trwają prace nad ich stopniowym przezwyciężaniem [36, 62, 145, 180, 182, 186, 224, 230, 231, 232, 238].

Na rysunku 7.21 przedstawiono prędkości obrotowe wrzeciona, które powinna mieć obrabiarka, aby zapewnić wymaganą prędkość skrawania dla określonej średnicy toczenia.



Rys. 7.21. Zależność prędkości obrotowej wrzeciona od średnicy i prędkości skrawania
Fig. 7.21. Dependence of spindle r.p.m. on diameter and cutting speed

Z przedstawionych na tym rysunku danych wynika, że aby osiągać stosowane już dzisiaj prędkości skrawania około 1000 m/min, potrzebne do toczenia powierzchni o średnicy 20 mm, wrzeciono obrabiarki powinno mieć prędkość obrotową $n_{wr} = 16\,000$ obr/min. Tokarka o $n_{wr} = 7\,500$ obr/min może natomiast zapewnić tę prędkość skrawania ($v_c = 1000$ m/min) dopiero powyżej 40 mm średnicy toczenia. Świadczy to o potrzebie budowania obrabiarek o coraz to większych prędkościach obrotowych wrzecion.

Kolejnym utrudnieniem w stosowaniu HSM jest **zapewnienie odpowiedniej mocy efektywnej na wrzecionie**. Moc skrawania jest iloczynem siły głównej skrawania i prędkości ($P_s = F_c v_c$). Z teorii skrawania, a także badań doświadczalnych, wiadomo [55, 167, 182, 228, 301] że bardzo duże prędkości v_c praktycznie nie oddziałują na zmianę wartości sił skrawania. Zatem jeśli skrawać się będzie z takimi samymi przekrojami warstwy skrawanej $f \times a_p$ (wówczas $F_c \equiv \text{const}$), to tylorotnie wzrośnie zapotrzebowanie na moc efektywną na wrzecionie, ile razy zwiększy się prędkość skrawania. Tak więc przykładowo, jeśli do skrawania z prędkością $v_c = 250$ m/min wystarczała moc $P_e = 25$ kW, to już dla prędkości $v_c = 1000$ m/min potrzebna byłaby moc aż $P_e = 100$ kW. Ponadto uważa się [231], że dla bardzo dużych prędkości skrawania, na to aby przyspieszyć przemieszczanie się materiału przez strefę skrawania, potrzebna jest dodatkowa energia o wartości około 10% podstawowej energii skrawania. Jeśli do tego wszystkiego doda się wymagane najczęściej bardzo duże prędkości obrotowe wrzeciona, to zrozumiałe stają się powody dość ograniczonego stosowania HSM w przypadku toczenia.

Uchwyt tokarski jest jednym z elementów systemu technologicznego obrabiarki, który stanowić może istotne ograniczenie dopuszczalnych rozwiązań ze względu na zagrożenia bezpiecznego przebiegu obróbki. Praktyczne określenie zakresu bezpiecznego użytkowania uchwytu sprowadzić można do [96]:

- wyznaczenia dopuszczalnej prędkości obrotowej wrzeciona i głównej siły skrawania (dla zadanej, wymaganej wartości siły zamocowania)
- wyznaczenia wymaganej siły zamocowania i głównej siły skrawania (dla ustalonej wartości prędkości obrotowej wrzeciona).

Pierwszy przypadek odnosi się najczęściej do obróbki przedmiotów sztywnych, zamocowanych z maksymalną siłą. Drugi zaś dotyczy obróbki przedmiotów podatnych na odkształcenia, gdy jest konieczne określenie wartości siły zacisku.

Bezpieczne użytkowanie uchwytów, w tym określanie dla nich dopuszczalnych obrotów, znalazło już swoje odbicie w międzynarodowych normach [191, 266].

Zwiększanie prędkości skrawania może napotykać ograniczenia związane z pewnością i bezpieczeństwem stosowania uchwytów, ale stanowi także impuls do udoskonalania ich konstrukcji i opracowywania nowych sposobów mocowania oraz wyważania szybko wirujących przedmiotów.

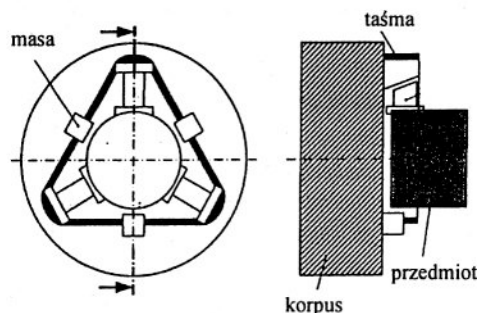
Bodaj największym problemem związanym ze stosowaniem uchwytów samocentrujących, przy dużych prędkościach obrotowych, jest zmniejszanie się siły zacisku w wyniku oddziaływania sił odśrodkowych na szczęki. Najczęściej spotykanym rozwiązaniem uchwytów do wysokoobrotowych tokarek są uchwyty z masami kompensacyjnymi, w których siły odśrodkowe przeciwcieżarów, po zmianie ich kierunku na dźwigniach, przeciwdziałają siłom wywieranym na szczęki. Dopuszczalne prędkości obrotowe dla takich

uchwytów wynoszą np. od około 7 500 obr/min dla uchwytów o średnicy 160 mm i do 4 000 obr/min dla uchwytów o średnicy 315 mm.

Oryginalne rozwiązanie kompensacji sił odśrodkowych opracowano w IWF Uniwersytetu Technicznego w Berlinie (rys. 7.22). W tym rozwiązaniu szczęki opasano taśmą z włóknistego tworzywa sztucznego, przenoszącą siły odśrodkowe. Dodatkowo na taśmie pomiędzy szczękami mogą być umieszczone masy kompensujące.

Uchwyt tego rodzaju, o średnicy zewnętrznej około 200 mm i maksymalnej średnicy mocowanego przedmiotu 90 mm, może pracować przy prędkości obrotowej do 15 000 obr/min.

Jedną z możliwości kompensacji zmniejszania się siły zacisku jest zwiększanie siły wywieranej z siłownika w miarę wzrostu prędkości obrotowej wrzeciona. Punktem wyjścia do regulacji siły zacisku są rzeczywiste wartości siły, mierzone za pomocą czujników tensometrycznych.



Rys. 7.22. Koncepcja uchwytu samocentrującego z kompensacją zmniejszającej się siły zacisku [36]

Fig. 7.22. Dependence of spindle r.p.m. on diameter and cutting speed [36]

Ograniczone możliwości stosowania uchwytów szczękowych spowodowały zwrócenie większej uwagi na uchwyty z tulejami zaciskowymi. Nowe rozwiązania konstrukcyjne tych uchwytów pozwalają na: zwiększenie przedziału średnic dających się zamocować w jednej tulejce zaciskowej, skrócenie czasu wymiany tulejek, dużą dokładność środkowania – około kilku mikrometrów i możliwość pracy z obrotami około 12 000 obr/min.

Dużą dokładnością, określoną biciem poniżej 3 μm , a zarazem wysokimi dopuszczalnymi prędkościami obrotowymi sięgającymi 12 000 obr/min [36], odznaczają się także uchwyty membranowe (np. firmy Rego-Fix). Przedmiot jest w nich mocowany siłami sprężystości, a do odmocowania zastosowano napęd pneumatyczny. Dodatkową zaletą tych uchwytów jest ich duża niezawodność i uniezależnienie sił mocowania od czynności związanych ze smarowaniem (bardzo istotnym np. w przypadku uchwytów szczękowych). Ze względu na stosunkowo niewielkie siły zacisku, mają one ograniczone zastosowanie.

Ruchy posuwowe na OSN-ach są realizowane w ten sposób, że rozpędzanie suportów następuje z określonym przyśpieszeniem, aż do chwili osiągnięcia zadanej prędkości, następnie ruch przyjmują stałą prędkość, a przy zbliżaniu się do miejsca docelowego następuje stopniowe hamowanie, by narzędzie mogło znaleźć się w określonym miejscu zadaną dokładnością. Jeśli poszczególne przemieszczenia narzędzia, realizowane według kolejnych bloków

programu NC, odbywają się w ten sposób, że tory ich są do siebie styczne lub prawie styczne, to narzędzie niepotrzebnie jest wyhamowywane i następnie ponownie rozpędzane podczas przejść między poszczególnymi blokami. Może to wywoływać nie tylko niekorzystne zmiany jakości obrobionych powierzchni (ślady wynikające ze zmniejszonego posuwu na obrót), ale także niekorzystną postać wióra, gdyż mała grubość warstwy skrawanej sprzyja powstawaniu wiórów wstęgowych. Takie zbędne hamowanie i rozpędzanie suportów również niepotrzebnie obciąża dynamicznie ich układy napędowe, co może oddziaływać niekorzystnie na ich trwałość, a także na dokładność obróbki. Gdy liczba takich przejść jest duża, np. podczas wykonywania złożonych zarysów, wówczas możliwe jest także zmniejszenie wydajności obróbki. Stąd też we współczesnych systemach sterowania pojawiła się możliwość takiej automatycznej analizy programu NC oraz zastosowania do interpolacji splinów, która powoduje, że jeżeli przejścia z bloku do bloku są do siebie styczne, to można uniknąć hamowania i rozpędzania suportów podczas realizacji przemieszczeń [215, 231].

Trwają wysiłki nad wspomaganiem komputerowo analizami kształtu obrabianego przedmiotu i dostosowaniem do niego najwłaściwszych strategii realizacji przemieszczeń suportów, zwłaszcza podczas określania toru szybko przemieszczającego się narzędzia wokół „ostrych” naroży zarysu przedmiotu. Chodzi o to, aby osiągać coraz większe dokładności w możliwie krótkim czasie wykonania operacji. Analizy takie uwzględniają między innymi bezwładność mechanizmów, stałe czasowe układów sterujących, możliwości eliminowania błędów systematycznych itp.

Zagadnienia optymalizacji procedur sterowania, służących realizacji przemieszczeń narzędzia, nabierać będą coraz większego znaczenia ze względu na to, iż skrawanie odbywa się z coraz większymi prędkościami.

Kolejną barierą stosowania HSM jest stosunkowo duża **bezwładność suportów**, która w dużym stopniu decyduje o właściwościach dynamicznych obrabiarki. Nawet jeśli układ napędu suportów ma dużą docelową, możliwą do osiągnięcia prędkość przemieszczania się, to osiągnięcie tej prędkości następuje po pewnym czasie, przy czym przed osiągnięciem końcowego punktu przemieszczenia następuje wcześniej zmniejszanie tej prędkości, aby możliwe było w miarę łagodne zahamowanie i osiągnięcie dużej dokładności pozycjonowania. Czasy rozpędzania i hamowania mogą być na tyle duże, że na krótkich odcinkach dróg narzędzia osiągnięcie maksymalnych możliwych prędkości przemieszczeń suportów staje się niekiedy niemożliwe do zrealizowania. W obróbce HSM wymagana prędkość przemieszczeń suportów, nawet dla ruchów roboczych, może być bardzo duża. Przykładowo, dla wcześniej podawanej prędkości skrawania $v_c = 1000$ m/min, realizowanej na średnicy 20 mm, są wymagane obroty wrzeciona $n_{wr} = 16\,000$ obr/min. Jeśli jest stosowany przy tym posuw $f = 0,2$ mm/obr, to odpowiadająca mu wartość posuwu minutowego suportu musiałaby wynosić 3,2 m/min.

Aby polepszyć właściwości dynamiczne suportów, podejmuje się próby zmniejszania ich masy przez zastąpienie tradycyjnego żeliwa, stopami tytanu, stopami metali lekkich, tworzywami sztucznymi. Stosuje się także bezpośrednie napędy z silnikami liniowymi [118, 215].

Istotne problemy obróbki z dużymi prędkościami stanowią **zużycie katastroficzne narzędzia i kolizje**, których skutki mogą być znacznie poważniejsze niż podczas skrawania z konwencjonalnymi prędkościami. Wynika to z:

- większej energii wirującego układu napędowego uchwytu i przedmiotu
- dłuższej drogi przemieszczenia się narzędzia od chwili wykrycia uszkodzenia do przerwania procesu skrawania, co wynika z podobnego czasu reakcji ale większego posuwu minutowego
- dłuższego czasu hamowania wrzecion i suportów.

Wynika stąd wnioszek, że aby zmniejszyć mogące powstać z tego powodu straty, należy modernizować układy nadzorujące pracę obrabiarki tak, by skrócić czas ich reakcji na zakłócenia oraz umożliwić procedurę wycofywania i wymiany awaryjnej narzędzi bez konieczności wyłączania obrotów wrzeciona.

Podstawowym warunkiem i jednym z najistotniejszych czynników skracania czasów głównych obróbki jest możliwość **stosowania ostrzy o dużych zdolnościach skrawnych**. Zagadnienie to omówiono częściowo w p. 7.2 (patrz rys. 7.9–7.14). Aby ułatwić prześledzenie tego zagadnienia zestawiono wybrane dane w tab. 7.5. Z danych tych wynika, że stosując ostrza z materiałów coraz bardziej odpornych na zużycie ($H20S \rightarrow TN250 \rightarrow AC5 \rightarrow HPT$), zmniejsza się zdecydowanie czas maszynowy obróbki t_g , a także jego udział w funkcji czasu obróbki odpowiednio z 63% → 48% → 20% → 10%. Oddziaływanie czasu maszynowego na koszty wytwarzania jest podobne, choć nieco mniej intensywne, gdyż proporcje te zmniejszają się w następująco: 59% → 39% → 18% → 10%.

Tabela 7.5. Zestawienie danych z analizy wpływu rodzaju ostrza na czas maszynowy i funkcje celu
Table 7.5. List of data from the analysis of edge type influence on machine time and aim function

Mat. ostrza	Kryterium optymalizacji $t_{sz} \rightarrow \min$				Kryterium optymalizacji $K_{sz} \rightarrow \min$			
	$v_{c(opt)}$ m/min	$T_{c(opt)}$ min	t_g min	t_g/t_{sz} %	$v_{c(opt)}$ m/min	$T_{c(opt)}$ min	t_g min	t_g/K_{sz} %
H20S	50	54,3	2,44	63	48	64,4	1,66	59
TN250	175	77,4	0,70	48	165	104,1	0,48	39
AC5	362	8,6	0,34	20	278	12,5	0,28	18
HPT	1650	18,8	0,07	10	1250	32,7	0,14	10

Zastosowanie narzędzi z **ostrzem jednokrawędziowym** bez naroża może umożliwić zwiększenie efektywności skrawania powierzchni przelotowych. Pozwolić to może na znaczne zwiększenie optymalnej prędkości skrawania oraz prawie na dwukrotne zmniejszenie kosztów obróbki, co wynika głównie z dużo większej odporności na zużycie tych narzędzi w porównaniu z narzędziami tradycyjnymi mającymi naroże [126].

Kolejnym czynnikiem, na pozór tylko mało ważnym, mogącym ograniczać stosowanie coraz to większych prędkości skrawania, jest **rodzaj powstających wiórów**. Jeśli tworzą się one w postaci ciągłej, skłębionej, to skrawanie na obrabiarce może być niemożliwe ze względu na blokowanie przez wióry automatycznie wykonywanych przemieszczeń zespołów roboczych obrabiarki.

Do rozdrabniania i nadawania korzystnej postaci wiórom służą nakładane lub ukształtowane na powierzchni natarcia podczas formowania ostrzy, łamacze i zwijacze wiórów,

a także nietradycyjne techniki rozdrabniania wiórów, jak stosowanie skrawania wibracyjnego [31] czy wysokociśnieniowego strumienia płynu [112]. Znaczne wysiłki wytwórców narzędzi zmierzają do takiego kształtowania powierzchni natarcia i krawędzi skrawających ostrzy, aby obszary rozdrabniania wiórów obejmowały coraz większy zakres parametrów skrawania i różne materiały obrabiane. Pojawiło się wiele bardzo wyrafinowanych kształtów ostrzy węglkowych i cermetowych, służących temu celowi. W przypadku ostrzy ceramicznych istnieją pewne trudności ze swobodnym kształtowaniem powierzchni roboczych, gdyż technologia wykonania wymaga ich szlifowania. Krawędzie ostrzy wykonanych z tych materiałów mają także ścin pierwszej powierzchni natarcia (fazkę ochronną), wykonany pod ujemnym kątem natarcia o znacznych wartościach γ_{01} od -20 do -45° . Dla małych przekrojów warstwy skrawanej i dużych prędkości skrawania powstający wiór wstęgowy potrafi „odbić” się od fazki w taki sposób, że żaden łamacz wióra nie jest skuteczny. Korzystne w HSM jest zjawisko, w którym znana z konwencjonalnych warunków obróbki tendencja do tworzenia się bardziej niekorzystnej postaci wióra, w miarę zwiększania się prędkości skrawania, zostaje zahamowana po przekroczeniu pewnego progu wartości prędkości skrawania v_c [4, 139, 145]. Wióry z kształtu wstęgowego jednolitego przechodzą wówczas do postaci o silnych cechach „piłozębności” i rozdrabniają się samoczynnie bądź z niewielkim wspomaganie zewnętrznym za pomocą konwencjonalnego łamacza wióra lub sprężonego powietrza.

W ostatnich latach powstało wiele prac badawczych dotyczących nadzorowania postaci wiórów, gdyż problem ten ma dość istotne znaczenie w bezobsługowych systemach wytwórczych. Do nadzorowania wykorzystywano [65]:

- emisję promieniowania cieplnego wiórów
- emisję akustyczną procesu skrawania
- częstotliwość drgań sił skrawania.

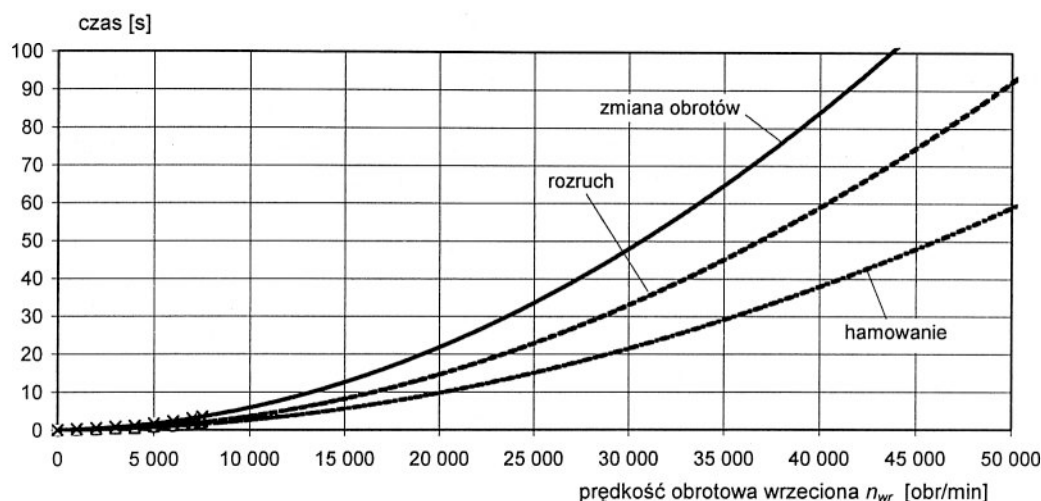
Do analizy danych uzyskanych z czujników stosowano także między innymi logikę rozmytą i sieci neuronowe.

7.11. CZASY ROZPĘDZANIA I HAMOWANIA WRZECIONA

Czasy rozpędzania, hamowania, a także zmiany prędkości obrotowych wrzeciona, mogą być znacznym ograniczeniem w stosowaniu HSM. By zilustrować to zagadnienie, posłużmy się prostym przykładem. Załóżmy, że hipotetyczna obrabiarka może realizować duże prędkości obrotowe, a jej dynamika jest taka jak tokarki V200 INDEX, której charakterystykę przedstawiono na rys. 7.2. Obrabiarka V200, która posłużyła za punkt wyjścia do obliczeń prognostycznych, ma bardzo dobre właściwości dynamiczne. Świadczyć może o tym np. czas potrzebny na zmianę kierunku obrotów wrzeciona z 7500 na -7500 obr/min (wraz z zamocowanym na nim uchwytem i przedmiotem), wynoszący zaledwie 3,6 s.

Przyjmując dane te za podstawę, obliczono czasy rozpędzenia, hamowania oraz zmiany kierunku obrotów dla bardzo dużych prędkości obrotowych wrzecion i przedstawiono je na rys. 7.23. Obliczeń dokonano za pomocą funkcji, którymi opisano charakterystyki dynamiczne zmierzone doświadczalnie. Funkcjami tymi były wielomiany 2. stopnia (rys. 7.2).

Nawet gdyby przedstawione na tym rysunku hipotetyczne zależności obarczone były znacznym błędem *in plus*, wówczas trzeba sobie zdać sprawę z tego, że czasy, o których mowa, mogą być dla wytwarzania przeciętnych pod względem wielkości i pracochłonności obróbki przedmiotów porównywalne, a nawet znacznie dłuższe niż czasy główne skrawania. Jeśli, dajmy na to, skrawanie ma być realizowane z prędkością obrotową wrzeciona 40 000 obr/min, to jedno tylko uruchomienie i zahamowanie obrotów wrzeciona będzie trwało 98 s, czyli 1,63 min. Skrawanie podczas rozpędzania się wrzeciona nie jest na ogół możliwe, ponieważ układy sterowania mają w większości przypadków zablokowaną możliwość realizacji dalszych czynności zanim prędkość obrotowa wrzeciona nie osiągnie założonego poziomu zadanych wartości, np. 95%.



Rys. 7.23. Czas rozpędzania, hamowania oraz zmiany obrotów wrzeciona dla hipotetycznej obrabiarki
Fig. 7.23. Spindle acceleration, breaking, and rotation reversal for a hypothetical machine-tool

W prezentowanych do tej pory funkcjach czasu i kosztów operacji, czasy hamowania i rozpędzania były traktowane jako wartości stałe, które zawarto w czasie t_{pNC} , obejmującym czynności pomocnicze realizowane automatycznie przez układ sterowania NC. Usprawiedliwione to było bardzo małymi ich wartościami, które dla obróbek konwencjonalnych nie przekraczały kilku sekund. I nawet niewielkie zmiany takiego kilkusekundowego składnika, wywołane stosowaniem różnych prędkości obrotowych wrzecion, są pomijalnie małe w stosunku do względnie długich czasów wykonywania całej operacji. Jednak w przypadku stosowania HSM nie można tego zagadnienia tak upraszczać, gdyż czasy te, jak wykazano, mogą osiągać znaczne wartości. W takich przypadkach zatem funkcja czasu jednostkowego wykonania operacji powinna zawierać składniki czasu rozruchu t_{roz} , hamowania t_{ham} i zmiany obrotów wrzeciona t_{zm} . Czasy te są funkcją prędkości obrotowej wrzeciona, która z kolei zależy od prędkości skrawania, średnicy toczenia oraz właściwości dynamicznych układu napędowego.

Tak więc **funkcja czasu operacji dla HSM** w uproszczonym zapisie będzie miała postać

$$t_{sz} = \frac{t_{pz}}{n_{sz}} + \left(\Sigma t_p + \Sigma t_{pNC} + \Sigma t_{rd} + \Sigma t_{roz} + \Sigma t_{ham} + \Sigma t_{zm} + \Sigma t_g + \Sigma \frac{\Sigma t_{zn,ok,wk}}{T_c} \right) \frac{1}{t_s} (1 + k_u). \quad (7.24)$$

Funkcja kosztów dla HSM nie zmieni się, gdyż dodatkowo uwzględniane teraz czynniki ($t_{roz} + t_{ham} + t_{zm}$) wchodzi do niej przez składnik t_{sz} , a ewentualne zwiększenie kosztów pracy stanowiska, wynikające z zastosowania droższej obrabiarki, konieczności zainstalowania szybko reagujących układów nadzorujących i zabezpieczających, wymogów bezpieczeństwa itp., są zapisane w funkcji kosztów składnikiem kosztów pracy stanowiska K_m .

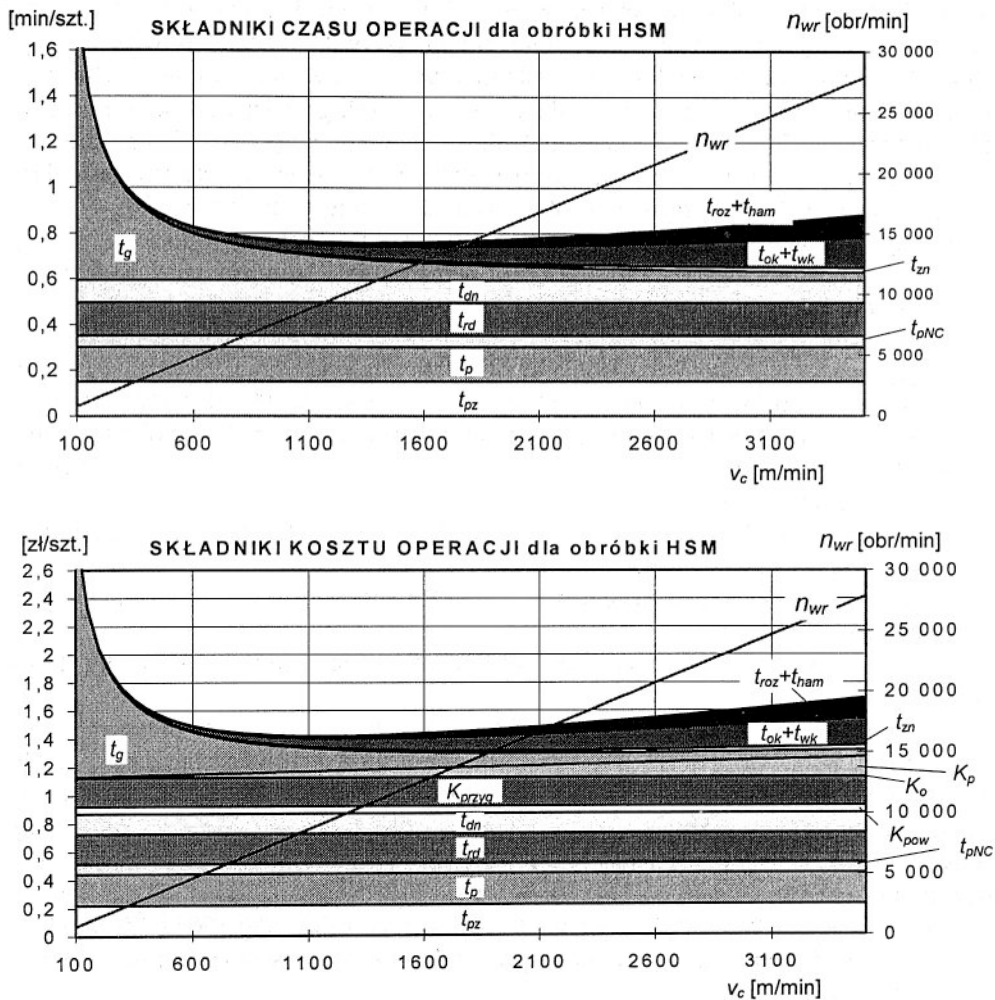
Prześledźmy jak zachowywać się będą tak uzupełnione funkcje celu w warunkach bardzo dużych prędkości obrotowych wrzecion. Aby analiza miała bardziej ogólny charakter, tak jak poprzednio, wszystkie dane odniesione zostały do sytuacji, w której skrawa jedno „uśrednione” narzędzie. Założmy także, że obróbka odbywa się z użyciem ostrzy o hipotetycznie dużych możliwościach skrawnych HPT. Wszystkie dane do obliczeń zostaną zachowane na takim samym poziomie, jaki przyjęto do analiz w p. 7.2. Zmniejszy się tylko średnica toczenia D z 80 na 40 mm, aby wymusić konieczność stosowania większych obrotów wrzeciona, oraz wydłużona zostanie długość drogi toczenia L z 120 na 240 mm, aby zachować tę samą objętość materiału, która ma zostać zeskrawiana jednym narzędziem ($V = \pi \times D \times L \times a_p = 3,14 \times 80 \times 120 \times 1,5 = 3,14 \times 40 \times 240 \times 1,5 = 45\,216 \text{ mm}^3$).

Przyjęto też logiczne założenie, że skoro czasy ($t_{roz} + t_{ham} + t_{zm}$) mogą stanowić znaczący składnik funkcji celów, to obróbka powinna odbywać się w taki sposób, że podczas operacji zostanie tylko jednokrotnie uruchomione i zatrzymane wrzeciono obrabiarki i nie będzie dokonywana zmiana ani wartości ani kierunków obrotów. Czasy te odniesione do jednego „uśrednionego” narzędzia będą zatem odpowiednio mniejsze. W naszych rozważaniach przyjęto, że w jednej operacji używa się przeciętnie około ośmiu narzędzi. Tak więc statystycznie na obróbkę jednym narzędziem czasy t_{roz} i t_{ham} będą oddziaływać w ośmiokrotnie mniejszym stopniu.

Zależność czasu i kosztów operacji oraz ich składników w funkcji prędkości skrawania, dla tak ostrożnie przyjętych założeń, przedstawiono na rys. 7.24. Na podstawie analizy i obserwacji danych, przedstawionych na tym rysunku, można sformułować następujące **wnioski i spostrzeżenia**.

1. Udział czasów rozpędzania i hamowania wrzecion w sumarycznym czasie i kosztach wytwarzania zaczyna dość intensywnie zwiększać się przekroczeniu wartości optymalnych prędkości skrawania i może wielokrotnie przekraczać udział czasu maszynowego obróbki.

2. Jeśli w funkcjach celu t_{sz} i K_{sz} nie uwzględni się czasu rozpędzania i hamowania wrzeciona, to stają się one bardzo płaskie dla prędkości skrawania większych niż optymalne. Dlatego też nawet niewielki wpływ czasów t_{roz} i t_{ham} może powodować dość znaczne zmiany wartości optymalnej prędkości skrawania. W rozpatrywanym przykładzie w miejscu optymalnym $v_{c(opt)} = 1350 \text{ m/min}$ (dla kryterium $t_{sz} \rightarrow \min$), czasy ($t_{roz} + t_{ham}$) stanowią zaledwie 2,1% czasu obróbki. W miejscu optymalnym ze względu na minimum kosztów ($v_{c(opt)} = 1190 \text{ m/min}$), udział czasów ($t_{roz} + t_{ham}$) stanowi tylko 1,1% wartości funkcji celu.



Rys. 7.24. Zależność funkcji czasu i kosztów wytwarzania od prędkości skrawania w warunkach HSM, z uwzględnieniem czasu rozruchu i hamowania wrzeciona ($D = 40$ mm, $L = 240$ mm)

Fig. 7.24. Dependence of manufacturing time/cost function on cutting speed in HSM conditions while allowing for spindle acceleration/breaking time ($D = 40$ mm, $L = 240$ mm)

3. Dla obróbki HSM czasy ($t_{roz} + t_{ham}$) powodują dość znaczne przesuwanie się optymalnych prędkości skrawania, zawsze w kierunku mniejszych wartości.

4. Analiza wpływu czasów t_{roz} i t_{ham} na zachowanie się funkcji celu została przeprowadzona dla bardzo niskiego oddziaływania tego czynnika. Przypomnijmy, że założono: tylko

jednokrotne uruchomienie i zatrzymanie wrzeciona w czasie trwania operacji, brak zmian wartości i kierunków obrotów wrzeciona, dość złożoną operację z użyciem ośmiu narzędzi, stały koszt pracy stanowiska mimo konieczności stosowania coraz to większych prędkości obrotowych wrzeciona. Ponadto prędkość obrotowa wrzeciona, dla optymalnych prędkości skrawania, nie była aż tak duża jak na obróbkę HSM, gdyż jej wartość wynosiła $n_{wr} \equiv 11\,000$ obr/min. Mimo to zauważono dość silny wpływ czasów ($t_{roz} + t_{ham}$) na wartości obu funkcji celów. Należy się spodziewać, że wpływ ten będzie znacznie większy, jeśli skrawać się będzie w warunkach sprzyjających takiemu oddziaływaniu, a mianowicie:

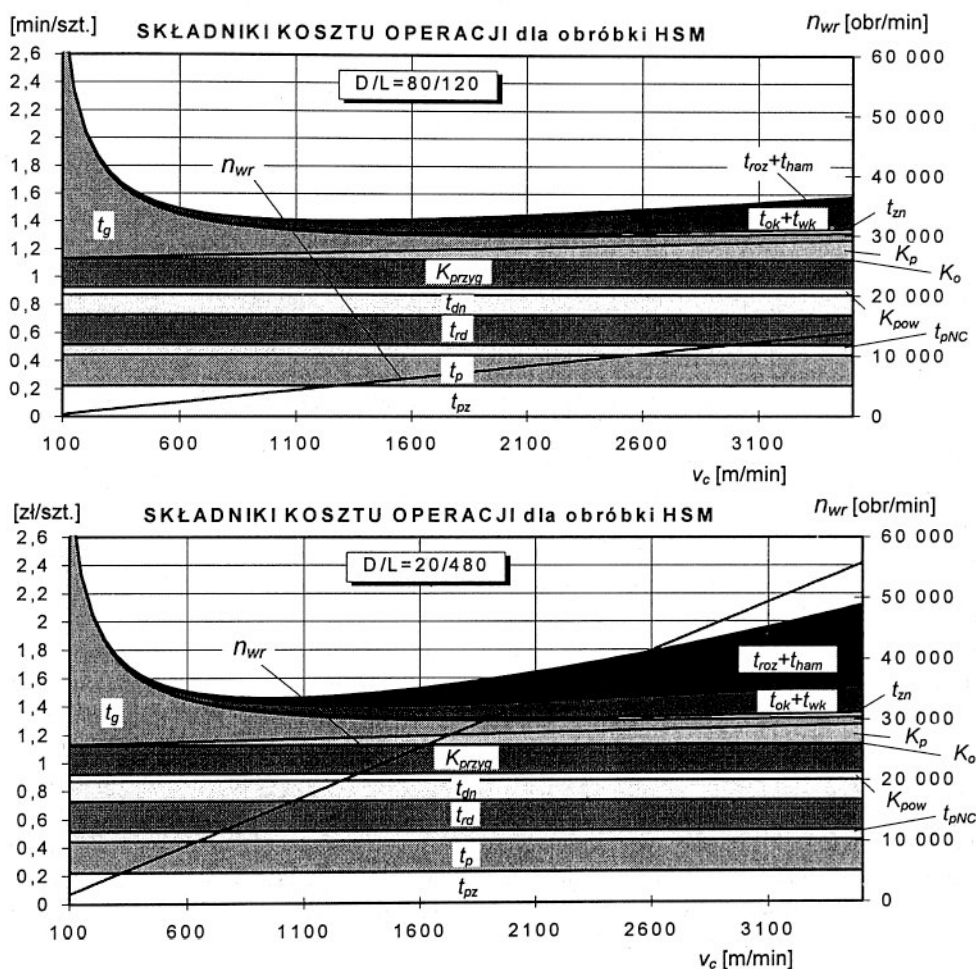
- gdy wymagane będą znacznie większe prędkości obrotowe wrzecion, by osiągać optymalne prędkości skrawania (czas rozpędzania i hamowania w bardzo dużym stopniu zależy od n_{wr})
- dla małej pracochłonności operacji
- gdy stosować się będzie obrabiarki dwu- lub wielosuportowe, wymagające zmiany kierunku obrotów wrzeciona
- w razie konieczności stosowania częstych zmian wartości prędkości obrotowych
- gdy podczas obróbki zmiennych średnic toczenia używać się będzie funkcji stałej prędkości skrawania,
- gdy realizacja dużych prędkości obrotowych wrzeciona będzie wymagać stosowania droższych stanowisk pracy
- gdy stosowanie HSM będzie ograniczać możliwości stosowania wielostanowiskowej obsługi obrabiarek.

Te wyliczenia stanowią jednocześnie przeciwwskazania, kiedy nie należałoby stosować obróbki HSM.

Rozważając zasadność stosowania HSM, prześledźmy jeszcze dwa przypadki obróbki z wykorzystaniem tego rodzaju skrawania. Dla każdego z nich wszystkie dane i założenia przyjęto takie same, jak w przedstawionych wcześniej analizach. Taka sama będzie też objętość materiału przeznaczona do zeskrawania jednym narzędziem ($V = \pi \times D \times L \times a_p = \text{const}$), zmienione zostaną jedynie proporcje D/L , tak aby zmieniała się liczba obrotów wrzeciona konieczna do zrealizowania określonej prędkości skrawania. Dla pierwszego wariantu przyjęto $D/L = 20/480$, a dla drugiego wariantu $D/L = 80/120$. Zależność czasu obróbki od prędkości skrawania dla obu przypadków z „wymuszonym” stosowaniem różnych prędkości obrotowych wrzecion, przedstawiono na rys. 7.25. Kolorem ciemnym zaznaczono udział czasu rozpędzania i hamowania wrzeciona.

Z przedstawionych na tym rysunku danych wynika bardzo niewielkie oddziaływanie czasów t_{roz} i t_{ham} na wartość funkcji celu w warunkach skrawania, wymagających stosowania prędkości n_{wr} w zakresie do kilkunastu tysięcy obr/min. Powyżej tej granicy udział tych czasów intensywnie zwiększa się i staje się dominującym składnikiem czasu i kosztów wytwarzania. Stwierdzono też silne oddziaływanie dużych prędkości obrotowych wrzeciona na przemieszczanie się optymalnej prędkości skrawania w kierunku mniejszych wartości. Przy czym, mimo znacznego zmniejszenia się $v_{c(opt)}$, wartość funkcji celu pogarsza się w mniejszym zakresie, co jest wynikiem wspomnianego wcześniej płaskiego przebiegu funkcji celów powyżej optymalnych prędkości skrawania (jeśli oddziaływanie czasów t_{roz} i t_{ham} jest niewielkie lub się je pominie). Dla rozpatrywanego tutaj przypadku (rys. 7.25 – $D/L = 20/480$), w wyniku stosunkowo długich czasów rozpędzania i hamowania wrzeciona,

mimo iż $v_{c(opt)}$ zmniejszyła się z 1450 m/min na 950 m/min, czyli o 35%, to koszt operacji zwiększył się z 1,4 na 1,47 zł/szt., czyli tylko o 5%.



Rys. 7.25. Porównanie zachowania się funkcji czasu operacji podczas usuwania tej samej objętości materiału, ale z różnym stosunkiem średnicy do długości toczenia D/L , wymuszającym stosowanie innych obrotów wrzeciona
Fig. 7.25. Comparison of operation-time function behaviour when removing the same volume of material for various ratios of turning diameter and length D/L enforcing differing spindle rotational speeds

W świetle powyższych stwierdzeń należy uznać, że dla określonych właściwości dynamicznych napędu wrzeciona tokarki wzrost prędkości skrawania poza pewną granicę może spowodować zwiększanie się czasu i kosztów operacji ze względu na rosnące czasy rozpędzania, hamowania oraz zmiany obrotów wrzeciona.

Szczególnie ważne w stosowaniu HSM jest zapewnienie bezpieczeństwa w obrębie stanowiska pracy. Pamiętać bowiem należy, że racjonalne wykorzystanie takiego sposo-

bu obróbki jest uzasadnione wtedy, gdy należy usunąć duże objętości nadmiaru, a to sprawia, że wielkość i masa toczonych przedmiotów są w takich przypadkach zazwyczaj dość znaczne. Nadanie dużych prędkości obrotowych takim przedmiotom powoduje nagromadzenie w nich olbrzymiej energii, która w przypadku awarii może spowodować bardzo znaczne szkody materialne, a także może stanowić duże zagrożenie dla życia operatora. Nie do pominięcia jest tu także aspekt stresu, jaki towarzyszy obsługującemu stanowisko. Przedstawione w pracach [97, 98, 99, 228] stanowiska badawcze z szybkoobrotowymi tokarkami zawierają opisy dość drastycznych zabezpieczeń przed skutkami awarii. Są nimi specjalne, pochłaniające energię, wielowarstwowe, pancerne osłony.

Zachowanie odpowiednich wymogów bezpieczeństwa, jak również inne wymienione wcześniej trudności ze stosowaniem HSM w odniesieniu do toczenia, nie przekreślają działań idących w kierunku zwiększania prędkości obrotowych wrzecion. Głównym motorem postępu są tu rozwiązania konstrukcyjne zastosowane we frezarkach, a także wiertarkach. Frezowanie z użyciem dużych prędkości skrawania bywa już wykorzystywane w praktycznych zastosowaniach. Stosuje się je głównie w przemyśle lotniczym do obróbki części wykonywanych z pełnego materiału, odznaczających się dużymi nadmiarami, cienkimi uźebrowaniami i dużymi wymaganiami, dotyczącymi małej chropowatości powierzchni po obróbce, i korzystnych właściwości fizycznych warstw przypowierzchniowych. W takich przypadkach bardzo pracochłonnych operacji stosowanie HSM ma uzasadnienie. Czasy rozpędzania i hamowania wrzeciona stanowią wówczas małą część czasu obróbki, a ponadto jest możliwe wykonywanie kolejnych operacji bez zatrzymywania obrotów wrzeciona obrabiarki, co w przypadku tokarek byłoby niezmiernie trudne do zrealizowania.

Rozwiązania konstrukcyjne napędów głównych obrabiarek do HSM zmierzają w kierunku stosowania napędów bezpośrednich w postaci elektrowrzecion, łożyskowania wrzecion z wykorzystaniem łożysk z elementami tocznymi ceramicznymi, a także łożysk aerostatycznych, magnetycznych, itp. Szybkoobrotowe wrzeciona powinny być chłodzone ze względu na znaczne wydzielanie się ciepła w węzłach łożyskowych, jak również ze względu na straty mocy w samym silniku, którego wirnikiem jest wrzeciono. Aby zmniejszyć ilość ciepła w węzłach łożyskowych wrzeciona głównego, a także – koniecznego dla takich przypadków – wrzeciona konika, stosuje się smarowanie olejowo-powietrzne z minimalnym bezpośrednim dozowaniem mgły olejowej do łożysk. Sprężone powietrze jest jednocześnie czynnikiem chłodzącym [228].

7.12. CZASY RUCHÓW JAŁOWYCH

Ruchy jałowe są realizowane na podobnych zasadach jak ruchy posuwowe (robocze), lecz ze znacznie większą prędkością. Występują tu kolejno po sobie takie fazy, jak rozpędzanie się do maksymalnej prędkości $v_{j(max)}$ możliwej do zrealizowania na danej obrabiarence, przemieszczanie się z tą prędkością aż do chwili, kiedy następuje włączenie funkcji hamowania i pozycjonowania suportu. Czas przemieszczania się suportu w ruchu jałowym (posuw przyspieszony według instrukcji np. G00) składa się z czasów realizacji wymienionych faz i zależy od drogi przemieszczenia, własności dynamicznych napędu

i czasu pozycjonowania. W tabeli 7.6 przedstawiono postęp, jaki nastąpił w ostatnich latach w dziedzinie właściwości dynamicznych napędów posuwów obrabiarek NC.

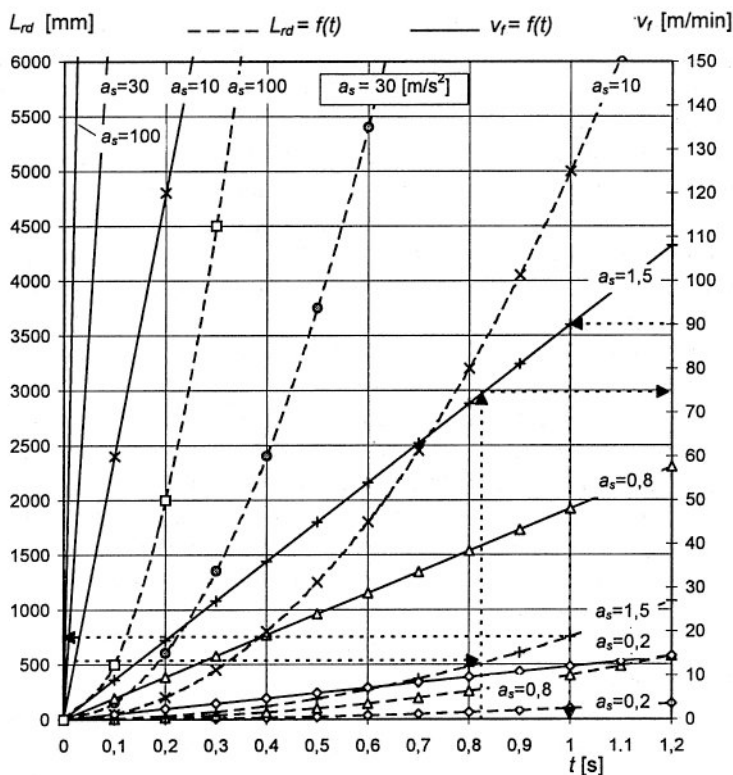
Tabela 7.6. Postęp w dziedzinie właściwości dynamicznych napędów posuwów [131]
Table 7.6. Progress in the area of dynamic properties of feed drives [131]

Rok	1965	68	70	75	80	85	90
Maksymalna prędkość ruchów jałowych $v_{f(max)}$, m/min	4	6	10	20	40	60	90
Czas przemieszczania suportu na odległość 200 mm, s + czas pozycjonowania, s	10 +6	6 +3	2 +0,3	1 +0,2	0,6 +0,15	0,3 +0,1	0,21

Współczesne tokarki NC średniej wielkości dysponują przyspieszeniami a_s suportów, mieszczącymi się w przedziale $0,8\text{--}1,5\text{ m/s}^2$ (według Kiefa [131]). Obrabiarki bardzo dokładnie mają mniejsze przyspieszenia, około $0,2\text{--}0,4\text{ m/s}^2$. Z prospektów i materiałów firm obrabiarkowych, a także z danych zamieszczonych w pracy Szafarczyka [253] wynika, że przyspieszenia suportów mogą osiągać wielokrotnie większe wartości. Nawet stosując napędy tradycyjne w postaci silników obrotowych i przekładni śrubowych toczone można osiągnąć a_s około $20\text{--}30\text{ m/s}^2$, a w przypadku zastosowania silników liniowych przyspieszenia te mogą być jeszcze większe i dochodzić do 100 m/s^2 . Tak duże wartości przyspieszeń granicznych uzyskuje się na razie w laboratoriach badawczych. Należy przypuszczać, że niebawem, w miarę zmniejszania się kosztów napędów liniowych, które są obecnie większe niż koszty napędów tradycyjnych, napędy liniowe będą również powszechnie stosowane w obrabiarkach seryjnie produkowanych.

Dla wartości przyspieszeń a_s z przedziału $0,2$ do 100 m/s^2 wyliczono drogę $L_{(rd)}$ i prędkość v_f w zależności od czasu rozpędzania się suportu. Wyniki tych obliczeń przedstawiono na rys. 7.26. Daje się zauważyć bardzo silne oddziaływanie wartości przyspieszeń na czas, umożliwiającym osiągnięcie maksymalnej znamionowej prędkości przemieszczania się suportu, którą dysponuje obrabiarka. I tak, aby osiągnąć prędkość $v_f = 90\text{ m/min}$ obrabiarka o bardzo dobrych właściwościach dynamicznych ($a_s = 1,5\text{ m/s}^2$) potrzebuje czasu około 1 s i drogi 750 mm . Jeśli zaś przyspieszenie, jakim ona dysponuje, jest mniejsze, np. $a_s = 0,8\text{ m/s}^2$, to do osiągnięcia tej samej prędkości posuwu potrzebuje $1,9\text{ s}$ czasu i 1 500 mm drogi. Dla małych wartości przyspieszenia $a_s = 0,2\text{ m/s}^2$, czasy te i drogi są zdecydowanie dużo większe i wynoszą $7,5\text{ s}$ i aż 5 625 mm . Już z tych pobieżnych obliczeń wynika, że często będzie niemożliwe osiągnięcie nominalnej prędkości przesuwu przyspieszonego, zwłaszcza dla mniejszych wartości przemieszczeń i niezbyt dynamicznych napędów. Analizowany wykres przedstawia sytuację, gdy następuje tylko rozpędzanie suportów. A przecież, do zrealizowania określonej wartości przemieszczenia potrzeba co najmniej takiej samej drogi na wyhamowanie i precyzyjne pozycjonowanie suportu. Załóżmy teraz sytuację odwrotną. Ma być zrealizowane przemieszczenie na odległość 1000 mm . Obliczmy, jaką maksymalną prędkość $v_{f(max)}$ byłaby w stanie osiągnąć obrabiarka, gdy założymy, że połowę tej drogi będzie trwało rozpędzanie, a drugą połowę hamowanie. Dla przyspieszenia $a_s = 1,5\text{ m/s}^2$ maksymalna prędkość v_f wyniesie 75 m/min , dla $a_s = 0,8\text{ m/s}^2$ v_f wyniesie 54 m/min , a dla $a_s = 0,2\text{ m/s}^2$ zaledwie 27 m/min .

Z przedstawionych danych wynika, że znacznie korzystniejsze ze względu na efektywność obróbki jest zwiększanie własności dynamicznych napędów niż maksymalnych prędkości przemieszczeń suportów. Te ostatnie ($v_{f(max)}$) bardzo często nie mogą być osiągnięte podczas wykonywania operacji ze względu na to, że długości przemieszczeń ruchów jałowych nie przekraczają wartości kilkuset milimetrów. Jedynie pierwsze i ostatnie ruchy przyspieszone, wykonywane według programu NC, związane ze zjazdem suportów na punkt „startowy” obróbki, odbywają się na większe odległości. Pozostałe ruchy jałowe mają niewielkie wartości przesunięć, zwłaszcza gdy obrabiarka należy do klasy małych i średnich. Tak więc zaoszczędzenie czasu, spowodowane możliwością osiągnięcia przez obrabiarkę maksymalnych prędkości $v_{f(max)}$, jedynie w chwili rozpoczynania i kończenia operacji, ma niewielkie znaczenie ze względu na to, że czasy wykonania operacji trwają najczęściej kilkanaście minut.



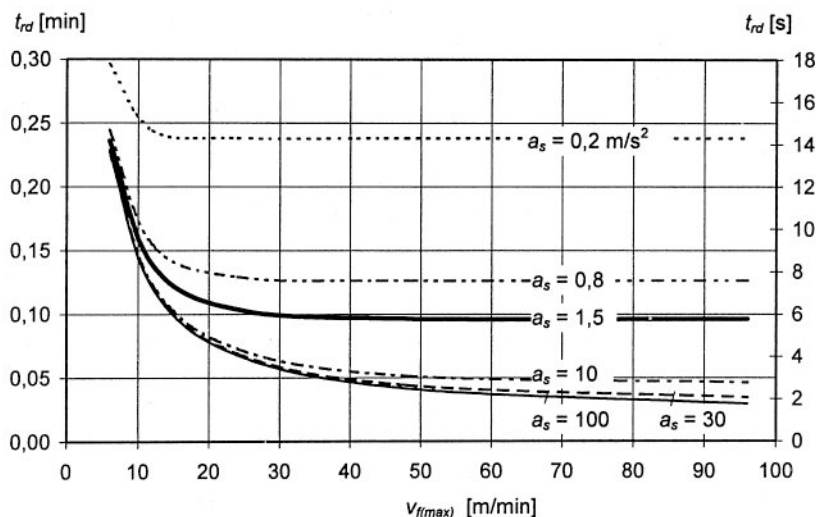
Rys. 7.26. Droga i prędkość przemieszczania się suportu w zależności od czasu i wartości przyspieszeń a_s

Fig. 7.26. Support movement length and speed a function of time and acceleration values a_s

W kolejnym przykładzie zostanie przeanalizowany wpływ prędkości ruchów przyspieszonych obrabiarki na czas i koszty operacji. Tak jak i poprzednio, punktem odniesienia niech będzie obróbka ostrzem ceramicznym AC5. Przyjmijmy, że dysponujemy obrabiarkami z napędami posuwów, pozwalającymi realizować przyspieszenia a_s o wartościach

z zakresu od 0,2 do 100 m/s². Jeśli idzie o długości przemieszczeń dla ruchów jałowych, to przyjmiemy je jako dość zróżnicowane, gdyż ma to tu istotne znaczenie. Inaczej będzie bowiem oddziaływać np. dziesięć przemieszczeń na odległość 50 mm, a inaczej jedno przemieszczenie na odległość 500 mm, co wynika z niemożności rozpędzenia się suportu na małych odcinkach dróg. W przykładzie poddanym analizie przyjęto, że w operacji na jedno narzędzie przypadają będzie średnio 6 przemieszczeń na odległość 80 mm (towarzyszących ruchom roboczym), dwa przemieszczenia na odległość 300 mm (w celu wykonania zmiany pozycji głowicy narzędziowej) oraz dwa na odległość 800 mm (w związku ze zjazdem na punkt startowy obróbki). Przy czym czas tych ostatnich zjazdów, jako że odbywa się raz na całą operację, będzie podzielony przez średnią liczbę narzędzi $n_n = 8$ szt. użytych w operacji.

Dla tak przyjętych danych i założeń, za pomocą wzorów (7.17)–(7.21) określono czasy ruchów jałowych dla różnych prędkości maksymalnych posuwów v_f i wartości przyspieszeń a_s . Wyniki obliczeń przedstawiono graficznie na rys. 7.27.



Rys. 7.27. Zależność czasu ruchów jałowych, przypadających na jedno narzędzie, od prędkości maksymalnej ruchów przyspieszonych v_f i przyspieszenia a_s

Fig. 7.27. Dependence of idle movement times per one tool on maximum velocity of accelerated movements v_f and acceleration a_s

Obserwując przebieg krzywych $t_{rd} = f(v_f, a_s)$ można zauważyć, że dla typowej operacji i średniej wielkości obrabiarki, wartości maksymalne prędkości v_f większe niż 15–30 m/min nie mają wpływu na czas ruchów jałowych, ponieważ dla zdecydowanej większości ruchów wykonywanych podczas operacji obrabiarka nie jest w stanie osiągać maksymalnych prędkości przemieszczeń. Potwierdza się jeszcze raz spostrzeżenie poczynione wcześniej, że znacznie ważniejszym od $v_{f(max)}$ i decydującym czynnikiem jest przyspieszenie a_s , jakie suporty są w stanie osiągać. Dla analizowanego przykładu czasy ruchów jałowych, dla

najmniejszej i największej z badanych wartości przyspieszeń, wynoszą 14,2 i 2 s. Czyli możliwe jest około 7-krotne skrócenie czasu t_{rd} .

Wyliczone w ten sposób czasy ruchów jałowych wstawiono do wzorów określających czas i koszty wytwarzania oraz wyznaczono optymalne wartości funkcji celów. Daje się zauważyć znacznie mniejszy wpływ zarówno na czasy, jak i na koszty operacji, prędkości posuwów przyspieszonych v_f , a większe oddziaływanie przyspieszenia a_s . Powyżej pewnej wartości prędkości v_f wpływ tego czynnika na wartość funkcji celu stabilizuje się.

Jeśli nie nastąpi jakiś przełom w konstrukcji obrabiarek (zmniejszenie bezwładności suportów, zwiększenie dynamiki układów napędowych), to nie należy się spodziewać poprawienia efektywności wytwarzania przez skracanie czasów ruchów jałowych. Nawet dla przeciętnych warunków i typowych operacji oraz dobrych właściwości dynamicznych napędów, np. czterokrotne zwiększenie v_f z 24 na 96 m/min i blisko dwukrotne przyspieszenia a_s z 0,8 na 1,5 m/s², spowoduje zmniejszenie się czasów ruchów jałowych z 0,129 do 0,096 min, czyli tylko o 25%. Takie skrócenie czasów t_{rd} spowoduje obniżenie się czasów operacji zaledwie o 2% i kosztów o 1,4% i to pod warunkiem, że nie zmieni się cena obrabiarki, co jest przecież mało realne. A każde nawet kilkuprocentowe zwiększenie kosztów pracy stanowiska bardzo silnie wpływa na koszty wytwarzania, co będzie udowodnione w p. 7.13.

Powyższe stwierdzenia mówią o możliwościach dość ograniczonego oddziaływania na skracanie czasów ruchów jałowych przez polepszanie własności dynamicznych napędów posuwów. Pewnych osiągnięć można się spodziewać jedynie dla obrabiarek ciężkich, na których obrabiać się będzie przedmioty o dużych gabarytach, konieczne będą długie przemieszczenia ruchów jałowych. Procentowy udział czasu t_{rd} , jako składnika funkcji czasu i kosztów obróbki, będzie się zwiększał w miarę polepszania się możliwości obróbkowych narzędzi i obrabiarek.

Rozważania hipotetycznej sytuacji obróbki HSM, dla której bardzo duże prędkości skrawania wymuszają stosowanie dużych prędkości posuwów minutowych dla ruchów roboczych, mogą doprowadzić do wniosku, że ze względu na ograniczone własności dynamiczne napędów suportów, możliwe do osiągnięcia prędkości v_f dla obu rodzajów ruchów, jałowych i roboczych, będą do siebie zbliżone. Można zatem przypuszczać, że wpływ czasów t_g i t_{rd} na wartość funkcji czasu wykonania operacji będzie podobny. Spostrzeżenie to potwierdzają dane zamieszczone na rys. 7.13 i 7.14. Wynika z nich malejąca rola czasu maszynowego i rosnąca rola czasów ruchów jałowych, w miarę polepszania się właściwości skrawnych ostrzy. Należy zwrócić uwagę także na znaczenie optymalizacji strukturalnej operacji, która w przyszłości będzie odgrywać coraz bardziej znaczącą rolę. Jeśli prędkości ruchów roboczych i przyspieszonych zaczną się do siebie zbliżać, to funkcje celu, służące do optymalizacji struktury operacji, powinny być poszerzone o zależności określające czasy ruchów jałowych (np. tak jak to uczyniono we wzorach (7.18) i (7.21)).

7.13. KOSZTY PRACY STANOWISKA WYTWÓRCZEGO

Koszt pracy stanowiska roboczego K_m składa się z kosztów eksploatacji obrabiarki i oprzyrządowania K_o oraz kosztów eksploatacji powierzchni użytkowej, zajmowanej przez

stanowisko pracy K_s . Koszty te są obliczane w różny sposób [12, 68, 84, 107, 154, 156, 211, 220, 223, 258, 284, 270].

Nie wnikając w szczegóły naliczania kosztów K_m i ich poszczególnych składników (patrz p. 4.3), należy się zastanowić nad tym, w jaki sposób można próbować je minimalizować. Ta dziedzina wiedzy nie jest związana bezpośrednio z tematem pracy i nie będzie tu szerzej omawiana. W odniesieniu do stanowiska obróbkowego można przyjąć, że najistotniejszymi elementami działania, mającego na celu zmniejszenie kosztów pracy stanowiska, powinno być:

□ Uruchamianie produkcji na drugą i trzecią zmianę, a także w dni wolne od pracy. Zmniejszy to odpisy amortyzacyjne obrabiarek, wyposażenia i powierzchni stanowiska, a także ograniczy koszty ogólnowydziałowe i ogólnozakładowe jednej godziny pracy stanowiska. Ponadto praca wielozmianowa eliminuje lub ogranicza bezproduktywny czas pracy obrabiarki na biegu luzem, który jest potrzebny do osiągnięcia stabilizacji cieplnej tokarki przed uruchomieniem na niej wytwarzania. Jest to niekiedy warunkiem koniecznym utrzymania parametrów dokładnościowych obróbki. Uważa się, że jeśli obrabiarka pracuje tylko w dni robocze i na jedną zmianę, to jej efektywne wykorzystanie (czas maszynowy obróbki) wynosi zaledwie 8% w stosunku do całego roku i pracy na trzy zmiany [16, 178]. Jeśli uruchomi się produkcję także na drugą zmianę, to udział ten może się zwiększyć do 24% [87, 269], a w przypadku pracy trzyzmianowej do 46% [130].

□ Zwiększanie rzeczywistej liczby godzin pracy obrabiarki, tak aby udział rocznego odpisu funduszu amortyzacyjnego w kosztach K_m był jak najmniejszy. Można tego dokonać przez: właściwe harmonogramowanie i organizację prac na obrabiarkach, planowe remonty i konserwację, właściwe szkolenie personelu oraz stosowanie układów nadzorujących i zabezpieczających, które ograniczać będą liczbę i czas trwania awarii, a zatem także koszty usuwania ich skutków.

□ Stosowanie dodatkowego wyposażenia stanowiska pracy tylko w tych sytuacjach, kiedy jest to rzeczywiście uzasadnione, np. względami ekonomicznymi (odpowiedni do nakładów wzrost wydajności), zwiększeniem elastyczności wytwarzania, ułatwieniami w obsłudze i wzrostem bezpieczeństwa pracy, ochroną środowiska itp.

□ Posiadanie obrabiarek tego samego producenta, jeśli nie jest to sprzeczne z innymi względami. Zmniejszają się wtedy koszty przeszkolenia personelu obsługującego obrabiarki, a uzasadnione może stać się zorganizowanie własnego serwisu (naprawczego i remontowego).

Niestety ciągle jeszcze częstą praktyką w polskich przedsiębiorstwach jest liczenie kosztów pracy stanowiska jako wartości średniej dla danego wydziału produkcyjnego. Jest to metoda bardzo prosta i wygodna do szybkiego szacowania spodziewanych kosztów wykonania zlecenia. Niestety niewiele ma ona wspólnego z rzeczywistymi kosztami pracy konkretnego stanowiska pracy, gdyż liczony tą metodą godzinowy koszt pracy stanowiska, w skład którego wchodzi np. bardzo tania i wyeksploatowana, prosta obrabiarka (np. wiertarka stołowa), jest taki sam jak stanowiska z nowoczesną, drogą obrabiarką typu centrum obróbkowe z układem sterowania CNC.

Aby określać rzeczywiste koszty wytwarzania (zwłaszcza dla zleceń zewnętrznych), racjonalność modernizacji parku maszynowego oraz analizować warianty procesu wykonywane na różnych obrabiarkach, trzeba koszty wyznaczać indywidualnie dla każdego stanowiska pracy. Jest to także warunkiem właściwych wyników optymalizacji parametrów skrawania.

Wspominano już o pracy na drugiej i trzeciej zmianie, a także w dni ustawowo wolne od pracy, jako jednym ze sposobów zwiększania efektywności wytwarzania. Drugim ważnym elementem pełniejszego wykorzystania czasu pracy obrabiarki jest skracanie do minimum okresu od chwili zakupu obrabiarki do uruchomienia na niej produkcji. Czas ten może być dość znaczny, jeśli jest kupowana pierwsza w przedsiębiorstwie obrabiarka NC, lub gdy obrabiarka jest nowego typu, której praca, lub dla której pisanie programu, różni się od obrabiarek używanych dotychczas w zakładzie.

Istotne dla przyspieszenia uruchomienia produkcji na takich obrabiarkach jest wcześniejsze, jeszcze przed dostarczeniem jej od zakładu, wykonanie takich czynności, jak:

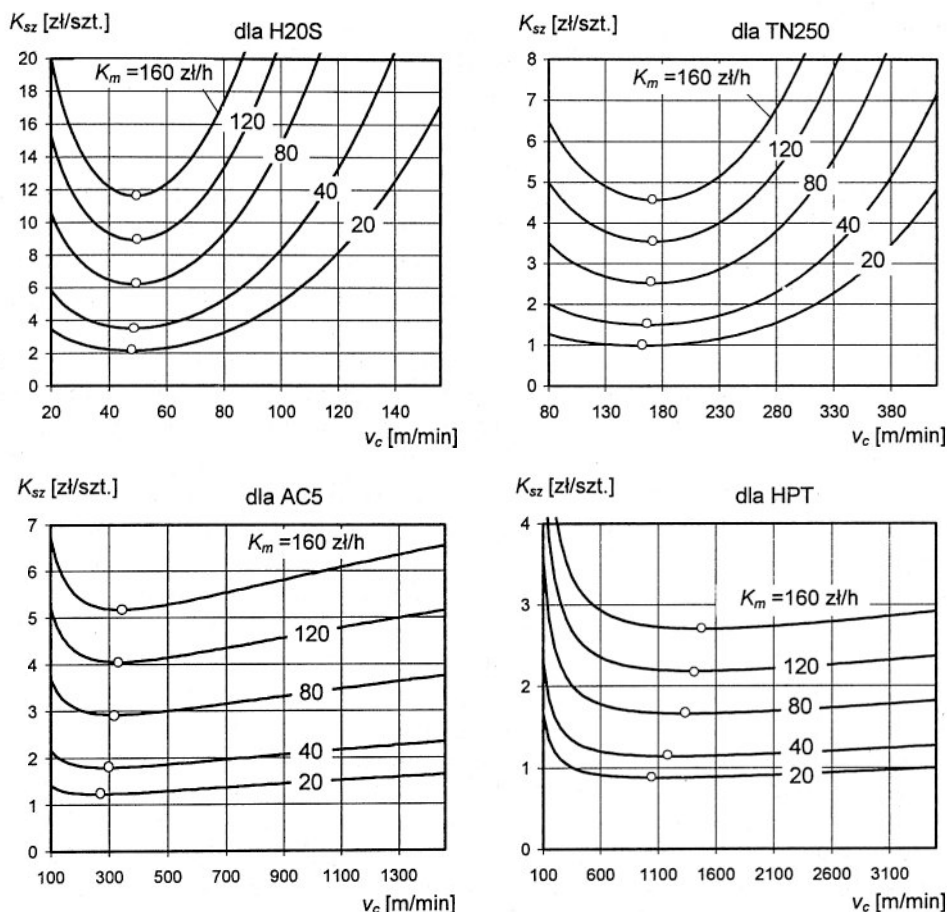
- Wybranie miejsca ustawienia obrabiarki i przygotowanie go zgodnie z zaleceniami producenta (fundamenty, zasilanie w energię elektryczną, sprężone powietrze, płyny obróbkowe, podłączenie do sieci informatycznej, włączenie w system transportu wewnątrzwzrostowego itp.).
- Przeanalizowanie i zakupienie niezbędnego wyposażenia obrabiarki (oprogramowanie, uchwyty, szczęki, narzędzia pomiarowe i skrawające, adaptory, itp.).
- Wybór przedmiotów, które mają być wytwarzane na danej obrabiarce, w tym przedmiotów mogących służyć do jej odbioru i obróbki próbnej. Należy przy tym pamiętać, aby na początku przedmioty te nie były zbyt skomplikowane technologicznie.
- Wybór i przeszkolenie personelu obsługującego obrabiarkę oraz programistów piszących programy NC, przed jej włączeniem do toku produkcyjnego.
- Opracowanie, z odpowiednim zapasem, programów do obróbki przedmiotów na danej obrabiarce w pierwszym okresie czasu jej pracy.

Spełnienie tych warunków pozwoli na niemal natychmiastowe intensywne eksploataowanie obrabiarki zaraz po jej uruchomieniu przez serwis i przyczyni się w ten sposób do zwiększenia efektywności wytwarzania w całym okresie jej użytkowania.

Powróćmy do zasadniczego wątku pracy i określmy, w jaki sposób oddziałuje na funkcję celów koszt pracy stanowiska roboczego. Analizę tę wykonano dla przyjmowanych wcześniej różnych możliwości zwiększania obróbkowych stanowiska pracy, które skrótowo określano jako obróbka ostrzami H20S→TN250→AC5→HPT. Do obliczeń przyjęto koszty pracy stanowiska K_m o wartościach 20, 40, 80, 120, 160 zł/h. Wyniki obliczeń przedstawiono na kolejnych wykresach na rys.7.28. Z obserwacji i analizy zgromadzonych tam danych wynika, że niezależnie od możliwości obróbkowych zwiększanie kosztów pracy stanowiska bardzo silnie wpływa na wzrost kosztów operacji. Wpływ ten zmniejsza się w miarę polepszania się właściwości skrawnych ostrzy. I tak, dla skrajnych wartości $K_m = 20$ i 160 zł/h i skrawania ostrzami H20S optymalne koszty operacji zwiększyły się z 2,14 do 11,62 zł/szt., czyli o 442%. Taka sama zmiana kosztów pracy stanowiska w stosunku do obróbki ostrzami ceramicznymi AC5 spowodowała wzrost kosztów K_{sz} z 1,22 do 5,17 zł/szt., czyli o 323%.

Wzrost kosztów K_m powoduje także zwiększanie się optymalnej prędkości skrawania. W miarę polepszania się możliwości skrawnych ostrzy te same zmiany godzinowych kosztów pracy stanowiska (z 20 do 160 zł/h) powodują, dla skrawania ostrzami H20S, przyrost prędkości optymalnej $v_{c(opt)}$ o zaledwie 2%, a dla skrawania ostrzami z ceramiki AC5 już o 31%.

Koszt pracy stanowiska jest najbardziej cenotwórczym składnikiem kosztów operacji i to niezależnie od właściwości skrawnych stosowanych ostrzy.



Rys. 7.28. Zależność kosztów operacji K_{sz} od prędkości skrawania v_c i kosztów godzinowych pracy stanowiska roboczego K_m podczas skrawania ostrzami H20S, TN250, AC5, HPT

Fig. 7.28. Dependence of operation cost K_{sz} on cutting speed v_c and hourly cost of workplace operation K_m for cutting with edges H20S, TN250, AC5, HPT

7.14. KOSZTY WYNAGRODZENIA PRACOWNIKA

Koszt wynagrodzenia pracownika jest niejednokrotnie wliczany do kosztów pracy stanowiska [211]. Jednak zdecydowana większość publikacji wydzieliła ten składnik kosztów jako odrębną pozycję. Tak też uczyniono w zależnościach prezentowanych w tej pracy. Kierowano się tym, że często jeden operator obsługuje kilka obrabiarek NC, jeśli pracują one w cyklu automatycznym lub półautomatycznym. Musi to zatem znaleźć swoje odbicie w funkcji celu. W omawianych zależnościach uwzględniono to współczynnikiem λ_L , przez który mnoży się

stawkę godzinową pracownika. Współczynnik ten jest odwrotnością liczby stanowisk, które obsługuje operator. Zmniejszanie kosztów wytwarzania przez przydzielanie większej liczby obrabiarek pod opiekę jednego pracownika nie odbywa się bezkarnie. Maleje bowiem wydajność pracy stanowisk w porównaniu z sytuacją, gdyby każdą obrabiarkę obsługiwał jeden operator. Wynika to z następujących przyczyn:

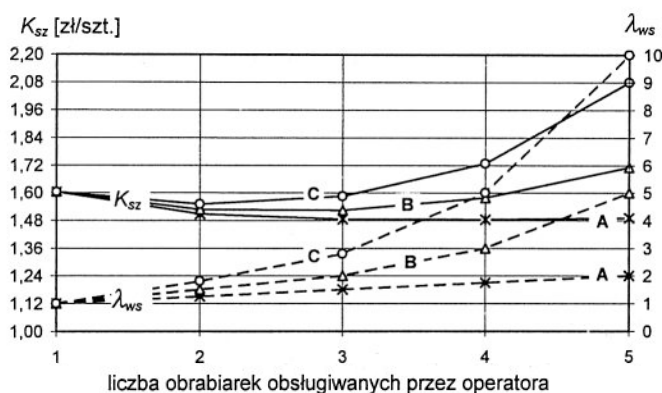
- uruchamianie bądź wznowianie produkcji nowego wyrobu absorbuje operatora przez dość długi okres, w związku z czym maleje jego dyspozycyjność wobec innych obrabiarek
- trudno jest tak dobrać operacje na kilku obrabiarkach, obsługiwanych przez jednego pracownika, aby czasy operacji były mniej więcej jednakowe i przesunięte w czasie; w związku z tym zdarza się, że operator potrzebny jest na kilku stanowiskach jednocześnie
- awaria lub niesprawność jednej obrabiarki oraz zaangażowanie operatora w jej usuwanie również wpływają na ograniczenie jego dyspozycyjności.

Wymienione przyczyny mają wpływ na to, że wielostanowiskowość obsługi zmniejsza wydajność obróbki. We wzorach określających czas operacji uwzględnić ją można współczynnikiem λ_{ws} , przez który mnoży się czas czynności pomocniczych, wykonywanych przez operatora. Jeśli pracownik obsługuje jedną obrabiarkę, to $\lambda_{ws} = 1$. Gdy na obsługującego przypada większa liczba obrabiarek, trudno jest dokładnie podać o ile procent wydłuży to czasy pomocnicze t_p i t'_p i, w związku z tym, jaką wartość powinien mieć współczynnik λ_{ws} . Zależy to bowiem od wielu czynników, takich choćby jak: czas trwania operacji, stopień automatyzacji stanowiska pracy, wymagana liczba i czas trwania czynności pomocniczych na poszczególnych stanowiskach itp. W dotychczasowych rozważaniach przyjęto, że gdy na jednego pracownika przypadają dwie obrabiarki, wówczas współczynnik $\lambda_{ws} = 1,25$.

W warunkach przemysłowych, gdy intuicyjnie wyczuwa się, że takie obniżenie się wydajności mogłoby być zbyt duże, wówczas ogranicza się liczbę stanowisk przypadających na operatora. Z pewnością do takich sytuacji zaliczać się będzie operacje, których czas trwania jest bardzo krótki, wymiana przedmiotów i narzędzi odbywa się ręcznie, korekcje są określane metodą próbnych przebiegów, dokładności obróbki są dość duże i wymagające czynności pomiarowych wykonywanych przez obsługującego, a do tego produkcja jest małoseryjna lub realizowana w krótkich partiach. W sytuacji zaś skrajnie odmiennej od podanej, zdarzać się będą i takie przypadki, że spadek wydajności w wyniku obsługi wielostanowiskowej będzie bardzo niewielki.

Nie ma odpowiednich danych statystycznych odnośnie do zmniejszania się wydajności wskutek zwiększania liczby stanowisk obsługiwanych przez operatora. Aby jednak przynajmniej oszacować wartość tego wpływu, przyjęto następujące założenia: Analiza zostanie przeprowadzona dla skrawania ostrzami z ceramiki AC5 i takich samych przeciętnych danych, jakie do tej pory przyjmowano do rozważań. Obliczenia zostaną dokonane dla stałej optymalnej prędkości skrawania, ponieważ czasy pomocnicze nie wpływają na jej wartość $v_{c(opt)}$ lecz na poziom wartości funkcji celu. Założono kilka wariantów oddziaływania na współczynnik λ_{ws} liczby obrabiarek przypadających na operatora. Pierwszy wariant A, bardzo łagodny, to liniowa zależność, kolejne warianty B i C to zależności coraz bardziej progresywne. Tę progresywność oddziaływania, wyrażającą się dynamiką zwiększania się współczynnika λ_{ws} , przedstawiono na rys. 7.29. Na rysunku tym zamieszczono także przebiegi zmian kosztów operacji K_{sz} w zależności od liczby obrabiarek obsługiwanych przez operatora. Z analizy

przedstawionych tam danych wynika, że zwiększanie wielostanowiskowości obsługi może być czynnikiem powodującym obniżanie kosztów wytwarzania również w tych przypadkach, gdy zakłóca to wyraźnie i wydłuża czynności pomocnicze wykonywane przez operatora. Nawet dla najbardziej progresywnego wariantu C, w którym praca na dwóch obrabiarkach, będących pod opieką operatora, spowoduje prawie dwukrotne zwiększenie czasów pomocniczych ($\lambda_{ws} = 1,8$) i tak nastąpi zmniejszenie kosztów operacji K_m z 1,6 na 1,55 zł/szt. – czyli o 3,1%, a czas operacji t_{sz} zwiększy się o 6%. Dla wariantu C dalsze zwiększanie liczby obrabiarek przydzielonych do obsługi jednemu operatorowi spowoduje zwiększanie kosztów operacji. Dla łagodniejszych wariantów A i B optymalna liczba obrabiarek, przypadająca na jednego pracownika, jest większa i wynosi odpowiednio 4 i 3 obrabiarki. Takie liczby wynikają z czystego rachunku ekonomicznego. W realiach przemysłowych trzeba brać pod uwagę także inne czynniki: zapewne konieczne zwiększenie czasów uzupełniających, możliwość powstawania większej liczby braków, dłuższych przestojów w przypadku awarii, a także prawdopodobnie wyższej stawki zaszeregowania pracownika.



Rys. 7.29. Wpływ wielostanowiskowości obsługi na koszty operacji dla różnych wariantów (A,B,C) intensywności oddziaływania takiej obsługi na zwiększanie się czasów pomocniczych wyrażonego współczynnikiem λ_{ws}

Fig. 7.29. Effect of multi-workplace operation on operation cost for various levels (A,B,C) of multi-workplace operation influence on increase in auxiliary times expressed in terms of λ_{ws} coefficient

Przetawiona analiza dotyczyła aktualnych proporcji średnich krajowych kosztów godzinowych pracy stanowiska K_m i kosztów wynagrodzenia pracownika K_{Lm} . Należy przypuszczać, że zarówno w Polsce, jak i na świecie, proporcje te będą się w dalszym ciągu zmieniać. Zauważa się na przestrzeni kilkudziesięciu lat, że stawki godzinowe pracowników zdecydowanie szybciej rosną niż koszty pracy stanowiska [131]. Tak więc szybsze tempo wzrostu kosztów K_{Lm} , w porównaniu z K_m , spowoduje w przyszłości większe zainteresowanie wielostanowiskowością obsługi, gdyż dzięki temu korzyści z jej stosowania mogą być jeszcze większe niż to oszacowano obecnie.

Wielostanowiskowość obsługi wpływać może na zmniejszenie się kosztów operacji. Niemal zawsze natomiast powoduje spadek wydajności wytwarzania.

Charakter oddziaływania stawki godzinowej pracownika K_{Lm} i kosztów pracy stanowiska K_m na funkcję kosztów operacji K_{sz} jest podobny, ponieważ składniki te występują

w funkcji celu w tym samym miejscu jako suma. Dla obsługi jednostanowiskowej wzrost o tę samą kwotę K_m lub K_{Lm} odniesie dokładnie taki sam skutek w zmianach kosztów operacji. Tak więc wszystkie uwagi i spostrzeżenia, dotyczące analizy oddziaływania kosztów pracy stanowiska na funkcję celu, odnoszą się także do analogicznego oddziaływania kosztów wynagrodzenia pracownika (patrz rys. 7.28). Zwiększanie stawki godzinowej pracownika powoduje wzrost kosztów operacji i optymalnej prędkości skrawania. Wpływ ten jest jednak znacznie mniejszy, gdyż wartość K_{Lm} jest w porównaniu z kosztami pracy stanowiska około 3,5-krotnie mniejsza. Dla obsługi wielostanowiskowej oddziaływanie to jest jeszcze mniejsze, rozkłada się bowiem wówczas na większą liczbę obrabiarek.

7.15. NARZĘDZIA – WŁAŚCIWOŚCI SKRAWNE, KOSZTY NARZĘDZIOWE

Narzędzia należą do najważniejszych pomocniczych środków produkcji. Oddziałują one w wieloraki sposób na funkcje czasu i kosztów operacji. Wpływają na nie **bezpośrednio** przez:

- możliwość stosowania określonych parametrów obróbki zdeterminowanych właściwościami skrawnymi
- czas, po którym należy wymieniać narzędzie, co z kolei jest uwarunkowane okresem trwałości ostrza
- koszty eksploatacji narzędzia
- czas przezbierania obrabiarki do nowego zadania
- czas wymiany ostrza
- czas określania korekcji, itp.

Narzędzia oddziałują także na funkcję celu **pośrednio** przez:

- możliwość wykorzystywania ich w roli narzędzi wielozadaniowych
- ograniczenia brzegowe obszaru stosowania dopuszczalnych zakresów warunków obróbki (siły skrawania, wytrzymałość oprawki, jakość obrobionej powierzchni, zakres łamania wiórów, drgania, odkształcenia sprężyste, utrata wymiaru wskutek zużycia itp.),
- zamrożony kapitał w narzędziach nie wykorzystywanych bezpośrednio w danej operacji, ale koniecznych w magazynie narzędziowym wydziału do tego, aby mogły być w miarę szybko i elastycznie realizowane zadania produkcyjne wewnątrzzakładowe i te zlecane z zewnątrz.

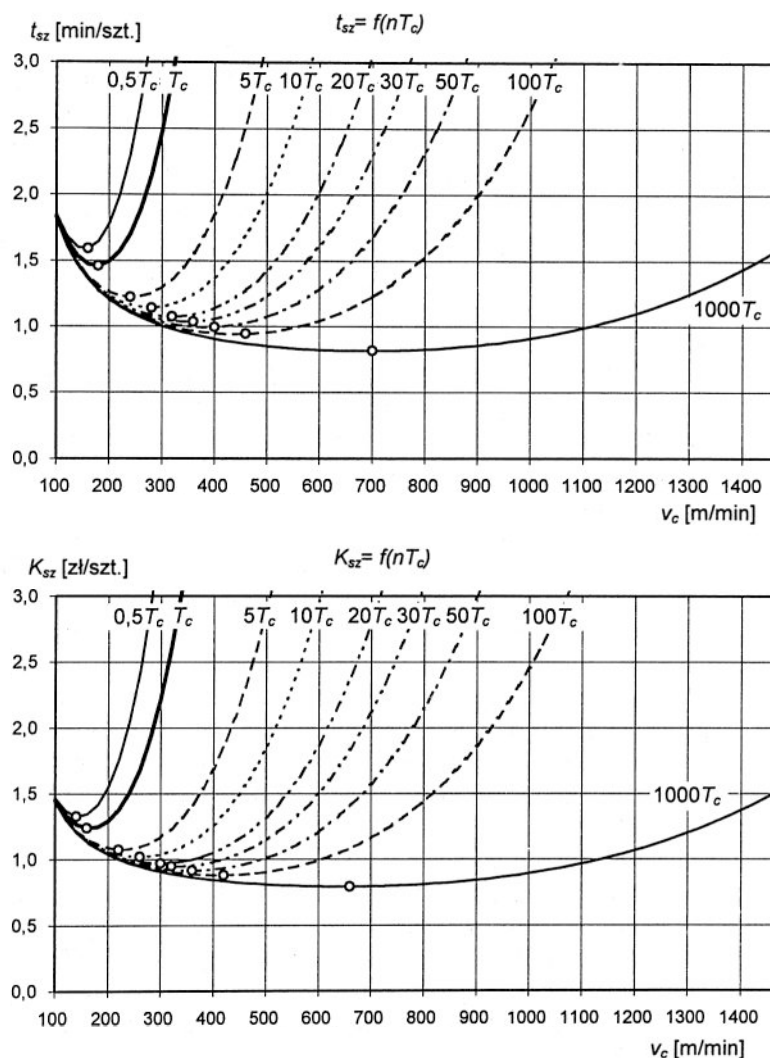
Większość z tych oddziaływań przedstawiono i omówiono już wcześniej podczas analizy wpływu innych czynników. W tej części pracy uwaga skupiona zostanie na kolejnych wzajemnych relacjach narzędzie–koszt operacji, które nie były analizowane do tej pory.

Relacja I. Właściwości skrawne ostrza oddziałują na: okres trwałości → koszt ostrza → koszt operacji

Przy dużej ofercie rynkowej narzędzi rodzi się pytanie, czy bardziej opłacalne jest stosowanie drogich narzędzi renomowanych firm światowych, czy korzystniej jest używać narzędzi tańszych, ale o mniejszych możliwościach obróbkowych? Pytanie to odnosi się

także do wyrobów jednego producenta, oferującego ostrza wykonane z różnych materiałów, z różnymi pokryciami i o bardzo zróżnicowanych cenach.

Rozpatrzmy najpierw oddzielnie, jak wpływają na funkcje celu okres trwałości narzędzia, a potem cena ostrza.



Rys. 7.30. Zależność czasu t_{sz} i kosztów operacji K_{sz} od hipotetycznie przyjętych zmian trwałości ostrza

Fig. 7.30. Dependence of operation time t_{sz} and cost K_{sz} on hypothetical modifications of edge lifetime

Założmy, że wpływ ten określimy dla warunków takich, jakie przyjęto w obróbce ostrzami węglukowymi TN250 (p. 7.2), a zmieniać będzie się jakość ostrza wyrażana krotkością jego trwałości ($n \times T_c$). Funkcje czasu i kosztów obróbki powstałe w wyniku takich zmian przedstawiono na rys. 7.30.

Z danych na wykresie wynika, że zwiększanie trwałości ostrza powoduje początkowo bardzo wyraźne zmniejszanie się czasu obróbki i kosztów operacji, z jednoczesnym przemieszczaniem się optymalnej prędkości skrawania w kierunku większych wartości. Jednak dalsze zwiększanie trwałości przynosi coraz mniej spektakularne korzyści, nawet dla bardzo dużych wielokrotności okresu trwałości i to w odniesieniu do obu funkcji t_{sz} i K_{sz} .

Prześledźmy teraz wpływ ceny płytki skrawającej na koszt operacji. W funkcjach kosztów operacji cena płytki jest dzielona przez liczbę naroży możliwych do wykorzystania. Dlatego też często używa się dokładniejszego określenia „koszt jednego okresu trwałości”. Określenie to jest bardziej ogólne, gdyż obejmuje także przypadki, w których narzędzia są ostrzone.

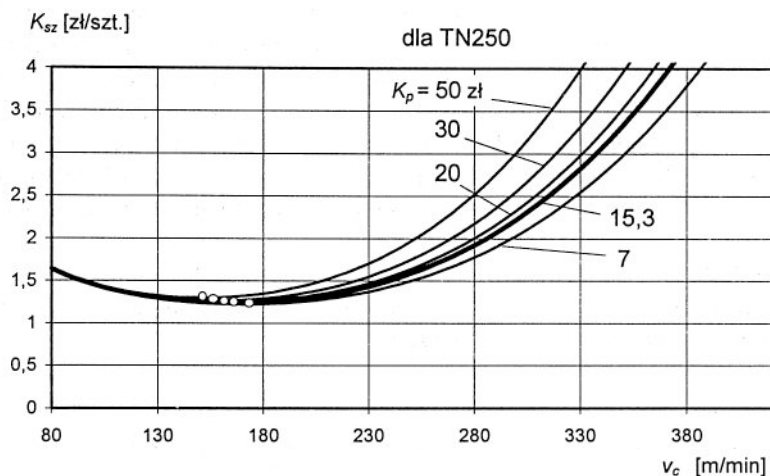
Dla tych samych danych co poprzednio, wyznaczono przebiegi funkcji kosztów operacji przy zmieniających się hipotetycznie cenach płytek skrawających. Przypomnijmy, że prawdziwą realną ceną płytki z materiału TN250 jest $K_p = 15,30$ zł. Otrzymane zależności przedstawiono graficznie na rys. 7.31.

Daje się zauważyć niewielkie oddziaływanie ceny płytki na funkcję kosztów operacji. Ponad trzykrotne zwiększenie ceny K_p z 15,30 do 50 zł spowodowało wzrost kosztów operacji z 1,22 na 1,30 zł/szt, czyli zaledwie o 6,3%. Jednocześnie zmniejszyła się optymalna prędkość skrawania ze 170 na 150 m/min, czyli o 11,8%.

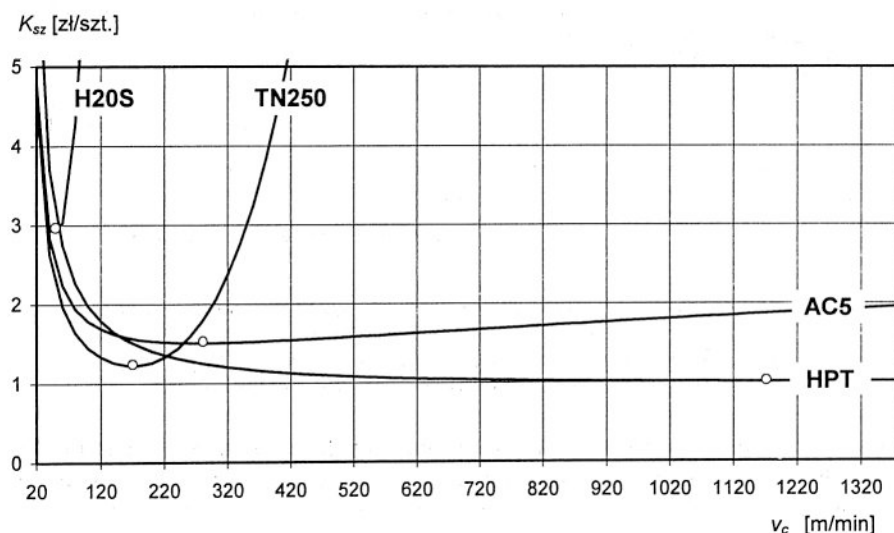
Taka oddzielna analiza wpływu trwałości i ceny płytki na funkcje celu miała za zadanie ocenić charakter tego wpływu i szacunkową jego wartość. W rzeczywistości najczęściej zmienia się, jednocześnie wraz z odpornością na zużycie, również cena płytki. Aby móc porównać racjonalność użycia płytek różniących się właściwościami skrawnymi i ceną, należałoby oceniać je odnosząc do siebie optymalne koszty $K_{sz(opt)}$ wytwarzania, wyznaczone dla każdej z płytek. Porównania takie, dokonane dla nieoptymalnych parametrów, mogą prowadzić do błędnych wyników, tzn. spowodować mogą wybór płytki nie tej, dla której możliwe jest osiągnięcie najkorzystniejszego stanu obiektu. Można to łatwo zaobserwować przez porównanie, zestawionych na rys. 7.32, funkcji kosztów K_{sz} , wyznaczonych dla analizowanych już wielokrotnie ostrzy o coraz to lepszych właściwościach skrawnych H20S→TN250→AC5→HPT.

Z analizy przebiegu krzywych kosztów K_{sz} wynika, że gdyby oceniać celowość stosowania płytek skrawających wykonanych z różnych materiałów, dokonując porównań, np. dla prędkości $v_c = 120$ m/min, wówczas najkorzystniejsze okazałoby się ostrze z materiału TN250. Dla prędkości $v_c = 222$ m/min tak samo dobre byłyby ostrza TN250 i HPT, a dla prędkości $v_c > 222$ m/min najlepsze byłoby ostrze z materiału HPT. Jednak oceniając te ostrza przez porównanie kosztów operacji w miejscach optymalnych, można stwierdzić, że najkorzystniejsze, w tych konkretnych analizowanych warunkach, jest zastosowanie płytki z materiału HPT.

Ważne dla zwiększania efektywności wytwarzania jest zmniejszanie udziału kosztów ostrza w kosztach wytwarzania przez stosowanie, tam gdzie jest to możliwe, płytek dwustronnych oraz takich, które mają możliwie dużą liczbę naroży skrawających. Wtedy koszt „jednego okresu trwałości” jest najmniejszy.



Rys. 7.31. Zależność kosztów operacji od hipotetycznie zmienianej ceny płytki skrawającej TN250
Fig. 7.31. Dependence of operation cost on hypothetical modifications in price of TN250 cutting plate



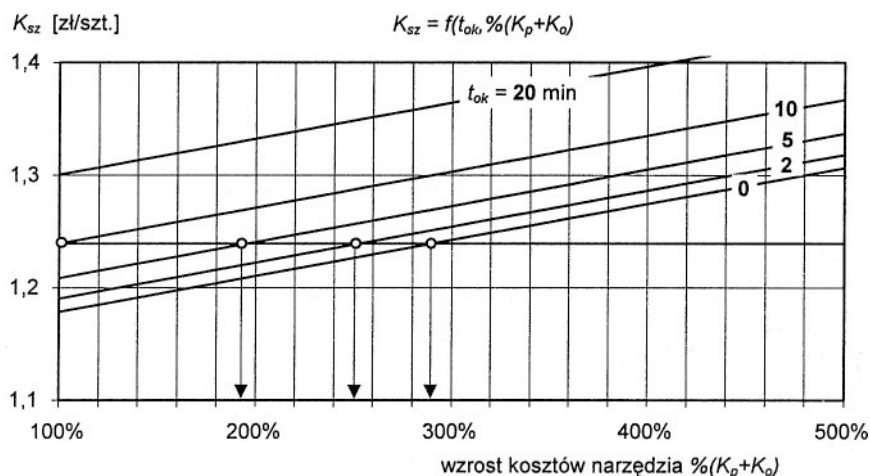
Rys. 7.32. Porównanie kosztów operacji wykonywanej z użyciem różnych rodzajów ostrzy o zwiększających się możliwościach skrawnych H20S→TN250→AC5→HPT
Fig. 7.32. Comparison of operation cost for edges with increasing cutting efficiencies H20S→TN250→AC5→HPT

Relacja II. Pewność i dokładność mocowania ostrza oddziałuje na: czas określania korekcy → koszt narzędzia → koszt operacji

W relacji tej zostanie oceniona możliwość zwiększania efektywności obróbki w wyniku zastosowania oprawek odznaczających się dużą powtarzalnością położenia naroża ostrza

po kolejnych jego wymianach, a także w wyniku użycia wprawdzie droższych, ale dokładniej wykonanych płytek, co może wyeliminować konieczność określania korekcji. Tak więc chodzi o zbadanie, czy może nastąpić i w jakich warunkach, zrekompensowanie kosztów zastosowania droższej płytki przez wyeliminowanie czasu określania korekcji. Analiza idąca w tym kierunku wydaje się zasadna, ponieważ, jak już wcześniej ustalono, bardzo znaczącym składnikiem kosztów operacji jest czas określania korekcji, który może wynosić kilkanaście procent. Udział ceny płytki i oprawki jest natomiast zdecydowanie mniejszy.

Rozważania te dotyczą sytuacji, w której, dla wszystkich lub znacznej części narzędzi biorących udział w operacji określa się korekcje na obrabiarce. W podrozdziale 7.8 wymieniono, kiedy taka sytuacja może wystąpić.



Rys. 7.33. Wykres do określania zakresu ekonomicznej opłacalności stosowania narzędzi droższych ale skracających czas określania korekcji t_{ok}

Fig. 7.33. Diagram for determining the area of economical efficiency of tools which are more expensive but shorten the correction-determination time t_{ok}

Zakres ekonomicznej opłacalności stosowania narzędzi droższych, ale eliminujących lub skracających czas określania korekcji, przedstawiono na rys. 7.33. Korzystanie z przedstawionego tam diagramu odbywa się następująco: Najpierw należy odszukać miejsce przecięcia się prostej charakteryzującej zmiany kosztów K_{sz} dla czasu określania korekcji t_{ok} z osią rzędną. Załóżmy, że dla naszego przypadku będzie to punkt o wartości $K_{sz} = 1,24$ zł/szt., w którym linia K_{sz} dla $t_{ok} = 10$ min przecina oś rzędną. Z tego punktu należy poprowadzić poziomo linię. Rzuty punktów przecięcia tej linii z kolejnymi liniami kosztów, wyznaczonych dla różnych czasów określania korekcji, określają zakresy opłacalności stosowania innych narzędzi. W rozważanym tu przykładzie zakresami opłacalnych zmian są takie narzędzia, które umożliwiają skrócenie czasu t_{ok} z 10 do 5 min, ale jednocześnie cena ich ($K_p + K_o$) nie będzie stanowiła więcej niż 194% ceny porównywanego narzędzia. Jeśli udałoby się dobrać narzędzie całkowicie eliminujące czas określania korekcji

na obrabiarce, to granicą opłacalności takiej zmiany byłaby blisko trzykrotnie większa cena narzędzia (290%). Jest oczywiste, że im mniejszy jest rzeczywisty przyrost ceny narzędzia w porównaniu z górną granicą opłacalności zmian, tym korzyści są większe.

Drugą granicą, tym razem największych korzyści, są punkty przecięcia prostych K_{sz} z osią rzędnych. Obrazują one sytuację, w której można zmniejszyć czas określania korekcy bez zmiany ceny narzędzia. I tak, jeśli w naszym przykładzie zmniejszy się czas t_{ok} z 10 min do 5 min z zachowaniem tych samych kosztów narzędzi $[100\%(K_p + K_o)]$, to można obniżyć koszt operacji z 1,24 do 1,21 zł/szt., czyli o 2,5%, a wyeliminowanie określania korekcy na obrabiarce może zmniejszyć koszty obróbki o 5,3%. Rozważania i analiza oparta na danych z wykresu na rys.7.33 mają przybliżony charakter, gdyż przedstawione tam zależności są wyznaczone dla optymalnych parametrów, ale dla narzędzia pierwotnie planowanego do zastosowania. Korzyści z zastosowania innego narzędzia mogą być zatem większe niż to wynika z wykresu, jeśli po zmianie narzędzia dokona się ponownie optymalizacji parametrów skrawania.

Potwierdzają się jeszcze raz wcześniej poczynione spostrzeżenia o dużym wpływie czasu określania korekcy na koszty wytwarzania.

Relacja III. Łatwość wymiany stępięnego ostrza oddziałuje na: czas wymiany narzędzia → koszt narzędzia → koszt operacji.

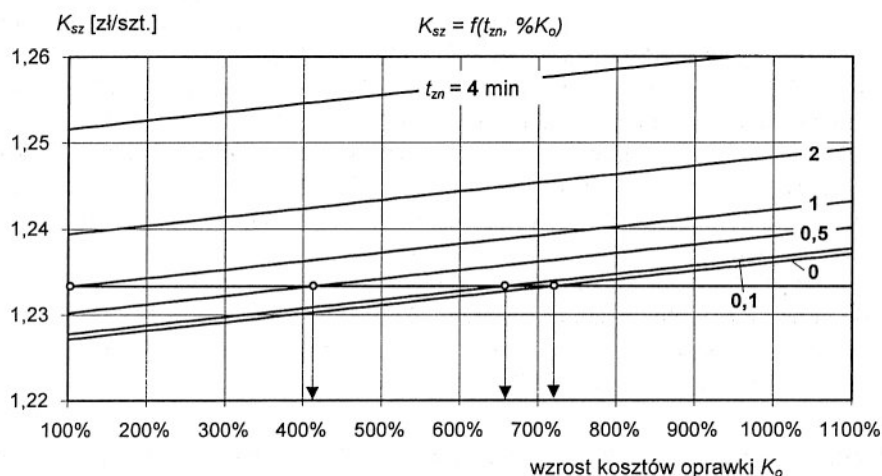
Dobierając narzędzia podczas projektowania procesu technologicznego (pisanie programu NC), zbyt rzadko zwraca się uwagę na kryterium, jakim jest czas wymiany płytki wieloostrzowej. Jeśli obróbka odbywa się z zastosowaniem dużych parametrów skrawania i jest konieczna częsta regeneracja ostrza, przez obrót lub wymianę płytki wieloostrzowej, to długi czas t_{zn} może odgrywać pewną rolę wówczas, gdy ma on dużą wartość. Większość rozwiązań konstrukcyjnych systemów ustalająco-mocujących płytkę pozwala na dość szybką wymianę ostrza. Ale są i takie, dla których czasy te są dość długie, np. gdy płytkę mocuje się za pomocą śruby przechodzącej przez otwór w płytce, co wymaga wykręcenia całej śruby, by wymienić ostrze. Jeśli do tego ostrze nagrzeje się podczas pracy do temperatury kilkuset stopni, to czynność ta może trwać nawet kilka minut.

Oszacujmy, czy działania mające na celu zmniejszenie czasu wymiany ostrza mogą przynieść jakieś korzyści, a jeśli tak, to w jakich sytuacjach? W odróżnieniu od czasu określania korekcy, czas wymiany ostrza, a ogólniej – czas wymiany narzędzia, odgrywa znacznie mniejszą rolę i ma skromniejszy procentowy udział w funkcjach celu (patrz p. 7.7). Tak więc skutki skracania czasu t_{zn} mogą być znacznie mniejsze niż skutki ograniczania czasów korekcy. Ich oceny dokonano analogicznie jak poprzednio (patrz relacja II) oraz na podstawie podobego wykresu (rys. 7.34).

Załóżmy, że jest zamieniane narzędzie, dla którego czas $t_{zn} = 1$ min, na narzędzie umożliwiające wymianę płytki w ciągu pół minuty. Wówczas granicą opłacalności takiej zmiany jest ponad czterokrotnie większa cena oprawki. Idąc dalej, opłacalne byłoby zastosowanie narzędzia droższego nawet o około 660%, jeśli można byłoby skrócić czas wymiany ostrza do 0,1 min.

Maksymalne korzyści, jakich się można spodziewać w wyniku takich działań, są odzwierciedlone na osi rzędnych w punktach, w których przecinają je linie K_{sz} . Nie są one znaczące nawet wówczas, gdy czas wymiany ostrza udałoby się zmniejszyć bez zwiększania

kosztów oprawki. I tak, w przypadku skrócenia czasu t_{zn} z 4 do 1 min lub nawet do 0,1 min, koszty wytwarzania zmniejszyłyby się odpowiednio o 1,4% i 2%. Analogiczne skrócenie czasu t_{zn} , ale z 1 min do 0,1 min, zmniejszy koszty operacji tylko o 0,5%.



Rys. 7.34. Wykres do określania zakresu ekonomicznej opłacalności stosowania narzędzi droższych, ale pozwalających na szybszą wymianę ostrzy

Fig. 7.34. Diagram for determining the area of economical efficiency of tools which are more expensive but allow to exchange edges more quickly

Tak więc racjonalne wydają się takie kierunki poszukiwania rozwiązań mechanizmów ustalająco-mocujących płytkę w oprawce nożowej, które skróciłyby czasy wymiany ostrza. Może to bowiem przynieść poprawę efektywności wytwarzania, nawet jeśli cena takiego narzędzia będzie wielokrotnie większa niż obecnie stosowanych narzędzi. Skrócenie czasu wymiany ostrza może także oddziaływać pośrednio na zwiększanie efektywności wytwarzania. Zmniejsza ono bowiem zaabsorbowanie operatora obsługą obrabiarki, co może doprowadzić do zwiększenia liczby stanowisk pracy, będących pod jego nadzorem, to zaś może zmniejszyć koszty wytwarzania znacznie bardziej niż skrócenie czasu wymiany ostrza.

Innym wnioskiem wynikającym z analizy tego wykresu jest to, by zwracać baczniejszą uwagę, podczas doboru narzędzi do operacji, na czas wymiany ostrza. Uwaga ta jest szczególnie istotna wtedy, kiedy narzędzia po wymianie ostrza nie wymagają określania korekcji, a samej wymiany ostrza dokonuje się na obrabiarce. W przypadku długich czasów t_{zn} korzystniejsze może być zastąpienie wymiany ostrza na obrabiarce zamianą całego narzędzia. Regeneracja narzędzia może być wówczas dokonana w czasie pokrytym przez operatora poza obrabiarką lub przez inne służby na specjalnie wydzielonym stanowisku. Ale czas wymiany całego narzędzia musi być wówczas krótszy niż czas wymiany ostrza oraz wymiana całego narzędzia nie może wprowadzać dodatkowego określania korekcji metodą próbnych przejeżdż.

Można zauważyć, że wpływ ceny oprawki K_o narzędzia na koszt operacji jest bardzo niski. W warunkach współczesnych udział K_o w całkowitych kosztach operacji K_{sz} wynosi

zaledwie 0,08–0,31%, a dla warunków przyszłościowych będzie on jeszcze mniej znaczący, bo szacuje się go na 0,03%. Ten niewielki udział wynika z bardzo niewielkich kosztów oprawek noży tokarskich w porównaniu np. z kosztami głowic frezowych czy zespolonych narzędzi obrotowych, oraz z dużej liczby wymian ostrzy, na jaką przewidziano trwałość oprawki, którą szacuje się zazwyczaj na około 300. Bezpośredni wpływ tego składnika na koszty operacji jest zatem pomijalnie mały. Oddziałuje on natomiast przez konieczne zapasy stanu magazynowego narzędziowni. Szacuje się, że koszty zasobów narzędziowych, przypadające na stanowisko pracy centrum obróbkowego, stanowić mogą około 29% kosztów całego stanowiska [243]. Zwiększając one koszty funkcjonowania wydziału i ponoszone z tego tytułu narzuty. W funkcjach kosztów operacji wyraża je współczynnik narzutów kosztów wydziałowych λ_{kwpr} (patrz wzór (4.12)). Zmniejszanie zasobów narzędziowych, niezbędnych do sprawnego funkcjonowania wydziału produkcyjnego, pozwoliłoby na zmniejszenie kosztów ogólnowydziałowych. Uważa się [10, 12, 242, 243], że dzięki wsparciu komputerowemu zarządzania narzędziami, wykorzystującemu bank danych narzędziowych i odpowiednią identyfikację narzędzi w systemie produkcyjnym, jest możliwe zmniejszenie stanu narzędzi w magazynach o 1/3.

7.16. KOSZTY PRZYGOTOWANIA I POWTÓRZENIA ZLECENIA

Koszty przygotowania zlecenia K_{przyg} stanowią średnio około kilkunastu procent kosztów operacji K_{sz} , a **koszty powtórzenia zlecenia** K_{pow} około kilku procent. Zgodnie z wzorem (4.11) koszty K_{przyg} składają się z sumy kosztów prac biurowych, takich jak koszt opracowania zlecenia, opracowania programu NC, i ewentualnie kosztów optymalizacji ($K_{opzl} + K_{opNC} + K_{opt}$) oraz kosztów oprzyrządowania technologicznego K_{oprz} .

Koszty przygotowania zlecenia K_{przyg} są odnoszone do jednej sztuki wykonywanej w całej serii $l_p \times n_{sz}$. Im dłuższa jest seria produkowanych wyrobów, tym koszty K_{przyg} rozkładają się na większą liczbę wyrobów i ich udział w ogólnych kosztach operacji jest mniejszy.

Koszty powtórzenia zlecenia K_{pow} zawierają głównie koszty prac biurowych, a także koszty prac na wydziałach produkcyjnych, które są niezbędne do ponownego uruchomienia kolejnej partii wyrobów. Koszty te są odnoszone do jednej sztuki w partii wyrobów n_{sz} .

Wszystkie składniki kosztów przygotowania i powtórzenia zlecenia oraz możliwości ich zmniejszania nie będą dokładniej analizowane, gdyż nie są objęte zakresem tematyki tej pracy. Jedynie czynnościom opracowania programu NC poświęcono nieco więcej uwagi, gdyż mają one bezpośredni związek z obrabiarką, a nawet mogą być na niej wykonywane.

Programy NC tworzy się dzisiaj już najczęściej nie ręcznie, lecz ze wspomaganie komputerowym, zwanym automatycznym lub maszynowym. Systemy wspierające opracowywanie programów NC można podzielić na te, które generują drogi przemieszczeń ruchów roboczych i pomocniczych na podstawie opisu geometrycznego przedmiotu, wykonanego w specjalnych językach programowania NC, takich jak np. APT (*Automatically Programmed Tools*), EXAPT (*Extended Subset of APT*) itp., lub takie, które dokonują tego bezpośrednio na podstawie rysunku przedmiotu sporządzonego za pomocą jakiegoś neutralnego edytora np. AUTOCAD-a.

Programowanie maszynowe w porównaniu z programowaniem ręcznym ma wiele zalet i możliwości, do których zaliczyć można [151, 211, 215]:

- mniejszą pracochłonność i znaczne skrócenie czasu pisania programu
- możliwość łatwego generowania i dodawania stałych cykli obróbkowych
- zdecydowane zmniejszenie liczby i rodzajów pomyłek związanych ze zdefiniowaniem rodzajów i kierunków osi, długości osi sterowanych, itp.
- automatyczny podział naddatku
- możliwość programowania obszaru bezpiecznego i sprawdzania kolizji narzędzia z układem OUPN
- automatyczną kompensację wymiarów narzędzia
- większą uniwersalność napisanego programu, który można łatwo zaaplikować na różne obrabiarki i systemy sterowania NC
- symulację i graficzną wizualizację cyklu obróbkowego
- szybsze wdrożenie programu, które wynika z mniejszej liczby błędów
- mniejszą liczbę groźnych i kosztownych w skutkach awarii
- obliczanie czasu operacji
- wydruk listy narzędzi w kolejności ich użycia
- możliwość wykorzystania splinów do interpolacji powierzchni o złożonych zarysach
- możliwość uwzględniania właściwości dynamicznych obrabiarki podczas generowania torów przemieszczeń narzędzi, zwłaszcza wokół „ostrych zarysów”, co przyczynia się do większej dokładności obróbki.

Nie wszystkie wymienione możliwości są oferowane przez każdy z kilkudziesięciu znanych języków programowania.

Wielu producentów wyposaża obrabiarki w **oprogramowanie zorientowane warsztatowo WOP** (ang. *Workshop Oriented Programming*), wspomagające tworzenie programów NC bezpośrednio na obrabiarce. Nie podnosi to zbyt ceny obrabiarki, gdyż współczesne układy sterowania CNC dysponują własnym komputerem, a za to rozszerzają się ich możliwości pracy. Jednak pisanie programów „na obrabiarce” ma jedynie sens w przypadku wykonywania prototypów, produkcji wybitnie małoseryjnej oraz ograniczonej wydajności działów technologicznych odpowiedzialnych za opracowywanie programów NC, gdyż pisanie programu NC z wykorzystaniem komputera obrabiarki powoduje jej unieruchomienie, co jest na ogół zbyt kosztowne. Nawet, jeśli istnieją możliwości równoczesnego wykonywania jednego programu NC i pisania nowego, to trudno sobie wyobrazić obciążenie operatora taką dodatkową, absorbującą umysł pracą.

Programowanie WOP ma jednak niewątpliwą zaletę w postaci możliwości interaktywnego programowania, pozwalającego na niemal zupełną swobodę zmiany danych. Jest ono przydatne do weryfikacji i modyfikacji programu obróbkowego.

Jak wspomniano, systemy programowania maszynowego mają wiele zalet i mogą znacznie przyspieszyć tworzenie programów oraz przyczynić się do zwiększenia efektywności wytwarzania. Są one jednak bardzo kosztowne. W zależności od stopnia uniwersalności i możliwości wspomagania czynności programowania ceny takich oprogramowań wynoszą około 10–200 tys. DEM [131], a nawet więcej. Decydując się zatem na zakup odpowiedniego oprogramowania trzeba brać pod uwagę przede wszystkim rentowność takiej

inwestycji. Podjęciu decyzji o zakupie oprogramowania o dużych możliwościach sprzyjać będą następujące okoliczności i uwarunkowania [131, 151]:

- Duża liczba procesów, maszyn technologicznych sterowanych numerycznie i różnorodność sterowań NC, zwiększająca trudności programowania ręcznego.
- Złożoność kształtów i technologii wykonania przedmiotów, duża liczba osi równocześnie interpolowanych, stwarzająca czasami tak duże utrudnienia w ręcznym programowaniu, że staje się ono mało efektywne i jedyną alternatywą jest wówczas programowania maszynowe.
- Konieczność tworzenia dużej liczby programów NC.
- Elastyczne wytwarzanie oraz elastyczne układanie harmonogramów obłożenia obrabiarek wymusza napisanie „uniwersalnego” programu pośredniego CL-Tape, znacznie ułatwiającego i przyspieszającego wygenerowanie, za pośrednictwem odpowiedniego postprocesora, programu technologicznego zorientowanego na taką obrabiarkę, której obciążenie jest najbardziej racjonalne ze względu na pracę całego gniazda lub wydziału produkcyjnego.
- Mniejsze obciążenie psychiczne, techniczne i fizyczne programistów ze względu na ograniczenie możliwości popełnienia błędów programowania.
- Pełniejsze wykorzystanie dużych możliwości obliczeniowych komputerów obsługujących systemy sterowania DNC.

7.17. WSPOMAGANIE PROCESU SKRAWANIA

Wspomaganie procesu skrawania ma na celu polepszenie warunków oddzielania materiału i jakości obrabianej powierzchni, zmniejszenie zużycia narzędzia, ograniczenie odkształceń cieplnych układu OUPN, rozdrobnienie wiórów i ułatwienie ich transportu, itp. Może się ono odbywać przez: chłodzenie ostrza, smarowanie strefy kontaktu materiału przedmiotu obrabianego i wióra z narzędziem, nagrzewanie materiału obrabianego, stosowanie silnego strumienia płynu obróbkowego do wypłukiwania i usuwania wiórów, celowe wprowadzenie drgań narzędzia, mające na celu rozdrobnienie wiórów.

7.17.1. CHŁODZENIE I SMAROWANIE STREFY SKRAWANIA – JAKOŚĆ PROCESU I EKOLOGIA

Chłodzenie i smarowanie strefy skrawania stosowane jest głównie w celu:

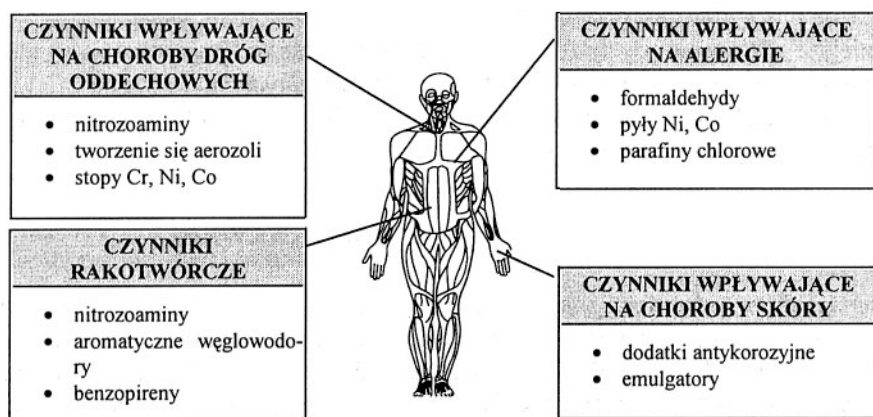
- zwiększania wydajności procesu skrawania, co wynika z możliwości zwiększania prędkości skrawania
- polepszenia jakości warstwy wierzchniej przedmiotu po obróbce
- zwiększenia dokładności obróbki
- usuwania i transportu wiórów
- zwiększenia odporności na korozję przedmiotu w trakcie jego procesu technologicznego itp.

Cele te mogą być osiągnięte m.in. przez obniżenie temperatury w obrębie strefy skrawania i związane z tym: zmniejszenie odkształceń cieplnych narzędzia i przedmiotu, zmniejszenie tarcia, ograniczenie tworzenia się narostu, spadek intensywności zużycia ostrza itp.

Stosowanie płynów chłodząco-smarujących ma także wiele **wad**. Są to:

- problemy z utylizacją i wydalaniem zużytych środków chłodząco-smarujących
- szkodliwe oddziaływanie na środowisko i zdrowie człowieka
- znaczne koszty instalacji, zakupu i utylizacji środków chłodząco-smarujących, ochrony zdrowia
- utrudnienia związane ze „śliskością” zaolejonych środków produkcji
- konieczność instalowania sprzętu przeciwpożarowego w pobliżu stanowisk, na których stosuje się oleje jako płyny obróbkowe.

W wyniku reakcji chemicznych, którym sprzyja wysoka temperatura w strefie skrawania, mogą powstawać produkty rakotwórcze. Zaliczyć do nich można nitrozoaminę, która tworzy się w emulsji z azotanu (dodatku wody) i aminy zawartej w koncentracie olejowym. Prócz oddziaływań rakotwórczych można spotkać, łatwiejsze do zauważenia: szkodliwy wpływ na drogi oddechowe, alergie i choroby skóry. Na rys. 7.35 przedstawiono czynniki niekorzystnie wpływające na organizm ludzki [60, 158, 239].



Rys. 7.35. Czynniki niekorzystnie wpływające na organizm ludzki, wynikające ze stosowania płynów obróbkowych
Fig. 7.35. Factors related to cooling fluids which unfavourably influence human health

Szkodliwe oddziaływanie na człowieka substancji zawartych w płynach obróbkowych można ograniczyć przez:

- stosowanie emulsji ekologicznych, w których w znacznym stopniu zredukowano bezpośrednie szkodliwe oddziaływanie na człowieka i środowisko
- odsysanie par i aerozoli substancji szkodliwych lub produktów ich utleniania się z miejsc ich powstawania
- właściwą wentylację
- stosowanie środków ochrony ciała.

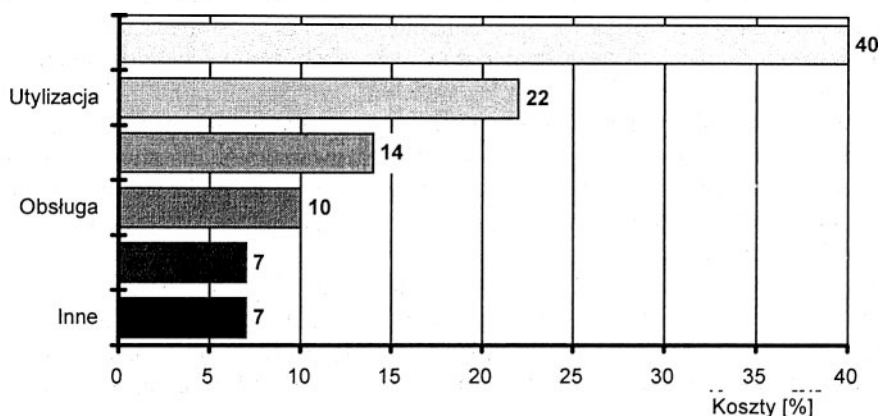
Ograniczenie niekorzystnego oddziaływania na środowisko możliwe jest natomiast przez:

- zmniejszone stosowanie płynów obróbkowych
- oczyszczanie i neutralizację zużytych emulsji olejowych
- przedłużanie okresu eksploatacji płynów obróbkowych.

Stosowanie płynów obróbkowych powoduje znaczne koszty, które nie zawsze są w pełni uświadamiane. Z badań przeprowadzonych w Niemczech [60, 75, 133, 239] wynika, że np. w przemyśle motoryzacyjnym koszty te mogą stanowić aż od 8 do 17% kosztów wytwarzania i przekraczają wielokrotnie koszty narzędziowe, których udział szacuje się na poziomie 3–4%.

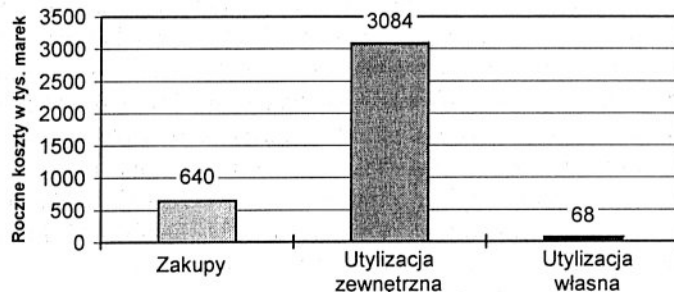
Na tak duże koszty stosowania płynów obróbkowych ma wpływ wiele czynników (rys. 7.36).

Z danych przedstawionych na rysunku 7.36 wynika, że dość znaczny udział w przedstawionych kosztach ma utylizacja zużytych płynów. Inne źródła podają [60], że koszty utylizacji płynów obróbkowych mogą być nawet 5-krotnie większe niż koszty ich zakupu (rys. 7.37).



Rys. 7.36. Składniki kosztów stosowania płynów chłodziwo-smarujących według [133]

Fig. 7.36. Cost components involved in applying cooling/lubricating liquids acc. to [133]



Rys. 7.37. Składniki kosztów zakupu i utylizacji płynów obróbkowych

dla linii produkcyjnej korpusu skrzyni biegów samochodu osobowego w Niemczech [60]

Fig. 7.37. Components of purchase and utilization cost for cutting fluids on a production line of passenger car gearbox bodies in Germany [60]

Coraz bardziej restrykcyjne przepisy dotyczące ochrony środowiska, a także duże koszty stosowania i utylizacji płynów obróbkowych, skierowały uwagę i wysiłki wielu ośrodków badawczych na obróbkę na „sucho” (niem. *Trockenbearbeitung*) lub ze znacznie ograniczoną ilością środka smarnego [11, 274]. Z tych samych względów zwraca się uwagę na stosowanie alternatywnych sposobów chłodzenia i smarowania strefy skrawania, np. z wykorzystaniem mniej szkodliwych dla środowiska mediów chłodzących, takich jak sprężone powietrze, azot [39], lub też stosowanie wewnętrznego, zamkniętego obiegu czynnika chłodzącego narzędzie [45, 47, 54, 165, 170].

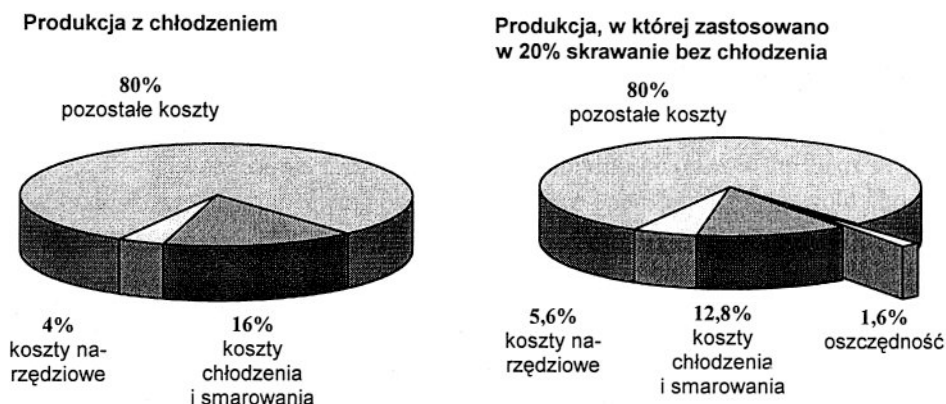
Wiele współczesnych materiałów narzędziowych, używanych na ostrza skrawające, nie wymaga stosowania płynów obróbkowych. Zaliczyć do nich można płytki węglkowe powlekane wielowarstwowymi powłokami, cermety. W wielu przypadkach stosowanie wspomagania skrawania różnymi sposobami chłodzenia i smarowania strefy skrawania nie przynosi, wobec pewnych grup materiałów narzędziowych, spodziewanych korzyści [39, 38]. Dla innych materiałów, takich jak wszelkiego rodzaju ceramiki, CBN, producenci nie zalecają stosowania płynów obróbkowych, wobec niektórych zaś dopuszczają jedynie użycie chłodziwa. Warto więc zastanowić się nad stosowaniem takich nowoczesnych materiałów narzędziowych, które oprócz niewątpliwych zalet w postaci możliwego znacznego wzrostu wydajności skrawania, eliminują problem związany ze stosowaniem chłodziwa i z jego późniejszą utylizacją.

Stosowanie skrawania na sucho eliminuje jedną z funkcji płynu obróbkowego, jaką jest transport ze strefy skrawania i zmywanie wiórów. Przykłady zastępowania tej funkcji innymi sposobami, podane są w pracach [36, 133, 274]. Zastosowanie powłok MOVIC na bazie dwusiarczku molibdenu, o bardzo małym współczynniku tarcia, znacznie ułatwia transport wiórów w rowkach wiórowych wiertel. Innymi sposobami, mającymi na celu szybkie usunięcie wiórów z miejsca ich powstawania i gromadzenia się, mogą być: wykorzystanie pochylego łoża, osłon przewodnic, w których wykorzystano wibracje, płaszcze wodne, sprężone powietrze, przemieszczające się pole magnetyczne, a także odsysanie wiórów ze strefy skrawania.

Szybkie odebranie wiórów ze strefy skrawania, oprócz ułatwienia ruchów narzędzi i suportów, ma także na celu zmniejszenie ilości ciepła przekazywanego wtórnie z wiórów do układu OUPN. Pamiętać należy, że ilość ciepła wydzielona w jednostce czasu w strefie skrawania może być bardzo znaczna. Skrawanie z mocą kilkunastu, a nawet kilkadziesiąt kW, jest powszechnie stosowane. A ponieważ większość ciepła jest odprowadzana ze strefy skrawania przez wióry, więc błyskawiczne przemieszczenie tego ciepła wraz z wiórami poza obręb obrabiarki może skutecznie ograniczać nagrzewanie się układu OUPN, a w rezultacie zmniejszać jego odkształcenia cieplne, co prowadzi do zwiększenia dokładności obróbki.

Aczkolwiek są liczne uzasadnione przypadki stosowania obróbki skrawaniem bez chłodzenia, to są też i takie, w których efektywne wytwarzanie nie jest możliwe bez środków chłodziwo-smarujących, jak np. wiercenie głębokich otworów, gwintowanie. Podobnie jest wszędzie tam, gdzie nie można zastosować odpowiednio dużych prędkości skrawania, np. dla bardzo małych średnic toczenia i wiercenia, dla których konieczne jest użycie narzędzi ze stali szybko tnących itp. Dlatego są prowadzone prace nad zastępowaniem w płynach obróbkowych, dodatków szkodliwych dla zdrowia i środowiska (takich, jak np. chlor), innymi dodatkami, neutralnymi lub mniej szkodliwymi.

W pracy [241] zwrócono uwagę na możliwość zmniejszania kosztów wytwarzania wskutek zmniejszenia liczby operacji wymagających chłodzenia. Nawet jeśli udział operacji nie wymagających stosowania płynów obróbkowych będzie stanowił tylko 20% wszystkich operacji, może to spowodować obniżenie kosztów wytwarzania o 1,6% (patrz rys.7.38).



Rys. 7.38. Możliwości zmniejszania kosztów wytwarzania w wyniku ograniczania stosowania środków chłodziwo-smarujących
 Fig. 7.38. Possibilities of manufacturing cost reduction due to reduction in cooling/lubricating fluid application

Aby przedłużyć okres eksploatacji emulsji olejowej i zabezpieczyć ją przed biologiczną degradacją, stosuje się dodatki bakteriostatyczne. Dość skutecznie chronią one przed działaniem bakterii. Dodatki te mają jednak tę wadę, że dostając się do biologicznych oczyszczalni ścieków, blokują ich działanie. Można tego uniknąć przez używanie emulsji pozwalających na ich stosowanie przez wiele lat. Przykładem może być emulsja Blasocut, której producent firma Blaser gwarantuje nieprzerwaną eksploatację przez okres 10 lat, bez uzupełniania takimi dodatkami, jak biocydy, inhibitory korozji czy środki antypienne. A przecież 10 lat takiej eksploatacji, to 10 lat ochrony środowiska bez konieczności utylizacji odpadów i problemów z nią związanych.

Płyny obróbkowe i środki smarne stosuje się indywidualnie, bezpośrednio na obrabiarzach, gniazdach lub wydziałach produkcyjnych, ich neutralizację i utylizację przeprowadza się natomiast w innych komórkach przedsiębiorstwa dla całego zakładu. Można także zlecać wykonanie tych czynności na zewnątrz wyspecjalizowanym przedsiębiorstwom. Stąd też wynikają trudności z wyodrębnieniem kosztów stosowania płynów obróbkowych na wydzielonym stanowisku pracy. Obecnie koszty te uwzględnia się przez wskaźnik narzutów ogólnozakładowych, przez który mnoży się koszty powstałe na wydziale produkcyjnym. Jednak wydaje się, że ten, jak się okazuje ważny składnik kosztów wytwarzania, którego znaczenie z czasem stawać się będzie coraz bardziej istotne, powinien być wydzielony i stanowić odrębny składnik kosztów operacji.

7.17.2. NAGRZEWANIE OBRABIANEGO MATERIAŁU

Nagrzewanie materiału obrabianego w obrębie jego styku z ostrzem może być alternatywnym, do chłodzenia i smarowania strefy skrawania, sposobem wspomagania procesu skrawania. Sprawdza się on szczególnie dobrze w przypadku obróbki materiałów twardych i utwardzających się, o wyjątkowo złej skrawalności [141]. Materiał może być podgrzewany np. w wyniku **przepuszczania prądu elektrycznego o dużym natężeniu przez narzędzie i przedmiot obrabiany** [26, 279, 280], co powoduje wzrost temperatury i uplastycznienie materiału skrawanego w miejscu największych odkształceń.

Tego typu wspomaganie zostało praktycznie zrealizowane podczas obróbki na obrabiarkach konwencjonalnych. W przypadku tokarek sterowanych numerycznie trzeba się liczyć ze znacznie większymi utrudnieniami związanymi z koniecznością:

- odizolowania elektrycznego narzędzi od gniazd głowic narzędziowych obrabiarki – co wymaga zastosowania specjalnych adapterów lub dodatkowych elementów z wkładkami izolacyjnymi, które mogą zwiększać podatność całego zestawu narzędziowego
- doprowadzenia prądu do narzędzi, co może być kłopotliwe ze względu na możliwość stosowania wielu narzędzi mocowanych w kilku głowicach o różnej kolejności pracy
- wymaganego zazwyczaj chłodzenia wewnętrznego narzędzia
- odizolowania przedmiotu od uchwytu i kła konika obrabiarki z jednoczesnym doprowadzeniem prądu do przedmiotu
- nadzorowania za pomocą specjalnych czujników wad materiałowych przedmiotu, w celu odcięcia w odpowiednim czasie dopływu prądu, aby zapobiec powstawaniu łuków elektrycznych niszczących narzędzie – co jest bardzo trudne do zrealizowania, gdy narzędzia poruszają się po krzywoliniowych torach, skrawają wzdłużnie i poprzecznie powierzchnie zewnętrzne i wewnętrzne, a także wielokrotnie wchodzą i wychodzą z materiału obrabianego
- zapobiegania zwarciom między strefą skrawania a elementami obrabiarki, powstającym w wyniku tworzenia się wiórów ciągłych, które mogą pojawiać się w nieustabilizowanych warunkach skrawania, np. w chwili rozpoczynania skrawania, zmian warunków skrawania wynikających z realizacji programu NC, a także nie w pełni kontrolowanego zbytznego uplastycznienia materiału obrabianego.

Ponadto przepuszczanie prądu przez strefę skrawania uniemożliwia stosowanie do obróbki materiałów trudno obrabialnych ostrzy z takich współcześnie stosowanych materiałów narzędziowych, które nie przewodzą prądu elektrycznego lub przewodzą go w niewielkim stopniu – należą do nich wszelkiego rodzaju ceramiki, jak również ostrza węglkowe i cermetowe pokrywane. Powodować może ono także powstawanie uszkodzeń obrabiarki (łożyska wrzecionowe, łożyska kła konika, prowadnice toczne suportów) od łuków elektrycznych, a także uszkodzenia układów sterowania, jeśli dojdzie do przypadkowych zwarć – jest to chyba największa wada tej metody wspomagania procesu skrawania.

Ten sposób wspomagania procesu skrawania na OSN-ach będzie zastosowany jedynie wtedy, gdy zostanie rozwiązana większość wymienionych problemów. Jeżeli kiedyś do tego dojdzie i ten sposób wspomagania skrawania okaże się bardziej efektywny niż zastosowanie pojawiających się coraz nowocześniejszych materiałów narzędziowych o coraz lepszych właściwościach skrawnych, to będzie się to działo w najpierw na tych obrabiarkach,

które będą przeznaczone do wytwarzania w produkcji o większej skali niż obecnie. Wówczas dodatkowe koszty oprzyrządowania i nadzorowania, a także koszty związane z czasem t_{pz} , będą rozłożone na większą liczbę przedmiotów. Obecnie nie widać zbyt pomyślnych perspektyw zastosowania tego typu wspomagania skrawania dla tokarek sterowanych numerycznie, zwłaszcza że większość materiałów trudno obrabialnych da się dość dobrze obrabiać współczesnymi materiałami narzędziowymi [36, 126].

Inną metodą nagrzewania strefy skrawania jest skierowanie w jej obręb silnej wiązki strumienia **światła laserowego** [147, 272, 296, 303]. Jest ona pozbawiona tych wad, jakie miała poprzednia metoda. Wymaga ona jednak zastosowania lasera o dużej mocy (np. lasera CO₂, 2,5 kW), który ze względów technicznych musi być zainstalowany poza obrabiarką. Wymaga to odpowiedniego układu optycznego do przesyłania strumienia świetlnego w obręb strefy skrawania, przemieszczającej się w przestrzeni roboczej tokarki [272]. Układ taki musi odznaczać się dużą sprawnością energetyczną i gwarantować duży stopień bezpieczeństwa dla personelu i otoczenia.

Wspomnieć należy także o innych, wcześniejszych próbach nagrzewania przedmiotu obrabianego za pomocą **strumienia plazmy** i **prądów indukcyjnych**, a także o **nagrzewaniu całego przedmiotu** w piecu elektrycznym przed jego zamocowaniem na obrabiarence. Te metody nagrzewania są stosowane głównie do skórowania i obróbek zgrubnych stopów tytanu w przemyśle kosmicznym i lotniczym.

7.17.3. SKRAWANIE WIBRACYJNE

Obróbka prowadzona w cyklach automatycznych wymaga, by powstające wióry miały odpowiednią, rozdrobnioną postać. Nie zawsze użycie łamaczy i zwijaczy wiórów jest skuteczne (patrz p. 7.3.1). W takich przypadkach pomocne może być wprowadzenie wymuszonych drgań narzędzia. Odpowiednio dobrana częstotliwość, amplituda oraz przesunięcie fazowe drgań pozwalają z powodzeniem rozdrabniać wióry nawet tak trudno obrabialnych pod tym względem materiałów, jak np. stale austenityczne. Właściwe dobranie parametrów drgań nie tylko nie powoduje zmniejszenia okresu trwałości narzędzia, ale może nawet go powiększyć [31, 32].

7.18. KONSTRUKCJA OBRABIARKI

Rozwiązanie konstrukcyjne obrabiarki jest jednym z najważniejszych czynników wpływających na efektywność wytwarzania. O możliwościach obróbkowych i niezawodnym charakterze pracy obrabiarki, lecz jednocześnie o jej cenie i kosztach eksploatacji, stanowią:

- wielkość obrabiarki
- liczba wrzecion i suportów
- moc i właściwości dynamiczne napędów głównych oraz posuwu
- sztywność OUPN i jego odporność na drgania
- dokładność wykonania
- maksymalna prędkość obrotowa wrzecion
- liczba głowic narzędziowych i narzędzi, które można wykorzystać

- możliwość stosowania narzędzi obrotowych, napędzanych i głowic kątowych
- istnienie lub brak konika
- wrzeciona przechwytyjące
- systemy zasilania w przedmioty i narzędzia
- liczba sterowanych osi, sterowana numerycznie podtrzymka
- stopień automatyzacji
- systemy nadzoru i diagnostyki
- możliwości systemu sterowania
- wspomaganie procesu oddzielania materiału i kształtowania wióra
- proekologiczne rozwiązania systemów smarowania i chłodzenia obrabiarki oraz procesu skrawania
- możliwości recyklingu jak największej liczby elementów obrabiarki itp.

Możliwości oddziaływania większości tych czynników na efektywność wytwarzania omówiono bezpośrednio lub pośrednio podczas analizy wpływu poszczególnych składników funkcji celów na czas i koszty operacji. W dalszej części pracy uwaga będzie skoncentrowana na wybranych elementach konstrukcji obrabiarek i ich bezpośrednim związku z efektywnością wytwarzania.

7.18.1. TOKARKI WIELOSUPORTOWE, WIELOWRZECIONOWE

Głównym powodem konstruowania i stosowania **obrabiarek wielosuportowych** jest dążenie do skoncentrowania, we względnie małym objętościowo obszarze, dużej liczby zabiegów oraz do zwiększenia wydajności obróbki przez możliwość równoległej pracy narzędzi. W **obrabijkach wielowrzecionowych** chodzi głównie o zwielokrotnienie wydajności przez powielenie jednoczesnej obróbki wielu przedmiotów.

Analiza zasad pracy i funkcjonowania tego typu obrabiarek, a także wzorów opisujących czasy i koszty operacji na nich wykonywanych (patrz wzory (4.3)–(4.14) wskazują, że zwiększanie liczby suportów i wrzecion obrabiarek powoduje zwiększenie ich wydajności. Obniżanie kosztów wytwarzania zależy natomiast od wielu czynników.

Do najważniejszych **pozytywnych skutków stosowania obrabiarek wielosuportowych i wielowrzecionowych**, związanych ze zmniejszaniem kosztów operacji, zaliczyć można:

- większą wydajność
- korzystny stosunek wydajności obrabiarki do powierzchni przez nią zajmowanej i do personelu ją obsługującego
- możliwość skracania czasów pomocniczych
- ograniczanie lub eliminowanie czynności transportu i magazynowania międzyoperacyjnego
- na ogół większe możliwości technologiczne
- możliwość obróbki przedmiotu z wielu stron.
- **Negatywne skutki** stosowania omawianych obrabiarek to:
 - zwiększający się koszt obrabiarki wraz z coraz większym stopniem jej skomplikowania (wzrost liczby suportów, wrzecion, sterowanych osi itp.)
 - większe koszty opracowania technologii wykonania wyrobu i napisania programu NC

- większe wymagania odnośnie do operatorów obsługujących obrabiarkę i personelu opracowującego programy NC
- konieczność wspomagania pisania programów NC bardziej skomplikowanymi programami komputerowymi
- niewykorzystywanie pełnych możliwości obróbkowych narzędzi i suportów ze względu na różnego nasilenia i nakładanie się ograniczeń brzegowych
- dłuższe czasy przezbrajania obrabiarki
- większa kolizyjność w przypadku obrabiarek wielosuportowych
- niewykorzystanie pełnych możliwości obrabiarki, gdyż trudno jest tak dobrać operacje, aby czasy ich wykonywania na poszczególnych wrzecionach były takie same
- większe trudności w przeprowadzaniu optymalizacji parametrycznej i strukturalnej
- większe przestoje w porównaniu z wykonaniem takich zadań na niezależnych, prostszych konstrukcyjnie, obrabiarkach jednowrzecionowych, ponieważ awaria lub niesprawność jednego z elementów powoduje przestój wszystkich zespołów roboczych (w pracy [129] podano, że dla obrabiarek wielowrzecionowych średni czas dyspozycyjności poszczególnych wrzecion, ze względu na niezawodność, wynosi 94,5%).

Do najczęściej stosowanych obrabiarek z omawianej grupy należą te z dwoma niezależnymi suportami, pozwalającymi obrabiać przedmiot zamocowany w jednym wrzecionie obrabiarki, głównym lub przechwytyjącym, jeśli tokarka takim dysponuje.

Do wad obrabiarek dwusuportowych zaliczyć należy:

❑ Większą o około 40–60% cenę tego typu obrabiarek (uchwytowych) w porównaniu z ceną obrabiarek jednosuportowych.

❑ Trudniejsze pisanie programów NC ze względu na większą możliwość występowania kolizji w warunkach jednoczesnej pracy obu suportów.

❑ Trudności z dobraniem optymalnych parametrów skrawania dla narzędzi pracujących jednocześnie, gdyż różne optymalne prędkości skrawania dla obu narzędzi zazwyczaj nie mogą być zrealizowane ze względu na tę samą prędkość obrotową przedmiotu i różne średnice toczenia.

❑ Czas wspólnej pracy obu suportów jest stosunkowo niewielki, szacuje się go na około 40% ogólnego czasu skrawania podczas obróbek zgrubnych i kształtujących, a w przypadku przejść wykańczających zazwyczaj nie występują okresy jednoczesnego skrawania obu narzędzi ze względu na możliwość wzajemnego oddziaływania na siebie takich zjawisk, jak odkształcenia układu OUPN i drgania. Tak niewielki udział jednoczesnego skrawania przez dwa narzędzia wynika także z konieczności występowania zwłok czasowych w pracy poszczególnych narzędzi, spowodowanych możliwością wystąpienia kolizji, a także niemożnością takiego zaprojektowania procesu technologicznego, aby dla optymalnych, lub choćby tylko zalecanych, parametrów skrawania czasy pracy narzędzi w obu suportach były takie same lub zbliżone do siebie. Nie bez znaczenia jest tu także możliwości realizowania jednej tylko prędkości obrotowej wrzeciona w warunkach jednoczesnej pracy dwu narzędzi.

❑ Preferencja, a w zasadzie możliwość jednoczesnej pracy dwóch narzędzi, głównie w obróbce kształtującej i zgrubnej, ogranicza zastosowanie większych, bardziej wydajnych parametrów skrawania ze względu na ograniczenie dopuszczalnej mocy, jaką dysponuje obrabiarka na wrzecionie. Ograniczenie to występuje najczęściej wtedy, gdy są stosowane wysokowydajne ostrza ceramiczne.

❑ Obrabiarki dwusupportowe, ze względu na ograniczenia w przestrzeni roboczej, mają zazwyczaj po jednej głowicy narzędziowej na każdym z supportów, co powoduje, że liczba możliwych do użycia narzędzi na obrabiarce jednosupportowej z dwoma głowicami narzędziowymi i dwusupportowej jest w przybliżeniu taka sama.

❑ Większe trudności z wprowadzaniem układów nadzorowania pracy obrabiarki.

Ta duża liczba wad, jakie mają obrabiarki dwusupportowe, nie zawsze jest wystarczająco rekompensowana znaczącym zwiększeniem wydajności. Z tego powodu obrabiarki te są rzadziej stosowane niż obrabiarki jednosupportowe wielogłowicowe. Na ogół bardziej opłacalny jest zakup, za tę samą kwotę, trzech obrabiarek jednosupportowych niż dwóch dwusupportowych. Wyjątkiem jest tu grupa tokarek karuzelowych, w których wymienionych wad i niedogodności, związanych z zastosowaniem dwóch i większej liczby niezależnych supportów, jest dużo mniej. Wynika to ze znacznego oddalenia od siebie supportów, więc również mniejszych możliwości wystąpienia kolizji, a także mniejszego, niż w przypadku małych tokarek uchwytych, udziału kosztów związanych z dodatkowym supportem w całkowitym koszcie obrabiarki. Ponadto tokarki karuzelowe zajmują dużą powierzchnię hali fabrycznej i ograniczenie ich liczby przez zwiększenie wydajności obróbki na pozostałych obrabiarkach jest bardziej opłacalne niż w przypadku innych, mniejszych tokarek. Również moc i moment, jakie mają tokarki karuzelowe, nie zawsze są w pełni wykorzystane i stosunkowo rzadko zdarza się, aby ograniczały one stosowanie optymalnych parametrów skrawania, lub równoległą pracę narzędzi.

Zastosowanie tokarek dwusupportowych zwiększy się z pewnością wtedy, gdy pojawią się takie programy komputerowe, wspomagające tworzenie programów NC, które pozwolą w prosty i szybki sposób wygenerować i przeanalizować możliwie dużą liczbę wariantów operacji technologicznych oraz wybrać rozwiązanie optymalne. Szczególna rola w optymalizacji operacji technologicznych, realizowanych na tokarkach dwusupportowych, dotyczy zwiększenia czasu wspólnej pracy obu supportów, co jest możliwe przez:

- właściwe rozplanowanie operacji skrawania naddatku narzędziami zamocowanymi w obu supportach
- wybranie najkorzystniejszego wariantu uzbrojenia w narzędzia obu głowic narzędziowych
- ograniczenie do minimum niekorzystnego wzajemnego oddziaływania na siebie obu supportów podczas jednoczesnej ich pracy, a nawet określanie korzystnych interakcji odkształceń pod wpływem działania przeciwnie skierowanych sił od narzędzi zamocowanych w różnych supportach
- zwiększenie mocy na wrzecionie obrabiarki, tak aby nie stanowiła ona ograniczenia podczas obróbki zgrubnej, z jednoczesnym wykorzystaniem obu supportów.

Do rozszerzenia w przyszłości zakresu zastosowań obrabiarek dwusupportowych powinno przyczynić się także zmniejszenie ich ceny. Wydaje się, że dodatkowy suport i dwie sterowane osie nie powinny aż tak znacznie zwiększać ceny w porównaniu z ceną obrabiarki jednosupportowej, jak to się dzieje obecnie. Choć, gdy porównuje się tokarkę dwusupportową z tokarką jednosupportową, trzeba także pamiętać o tym, że do wykorzystania w pełni możliwości skrawnych narzędzi pracujących na obu obrabiarkach, trzeba mocy na wrzecionie obrabiarki dwusupportowej dwukrotnie większej niż na wrzecionie obrabiarki jednosupportowej, a to ma

wpływ na jej koszty. Stosunkowo wysokie ceny tych obrabiarek wynikają prawdopodobnie także z małej skali ich produkcji.

Dążenie do większej koncentracji liczby zabiegów na jednej obrabiarce, tak aby można było obrobić całkowicie przedmiot na jednym stanowisku, doprowadziło do powstania **obrabiarek z przechwytyjącym wrzecionem** oraz głowic, w których w części gniazd można mocować **napędzane obrotowo narzędzia**. W połączeniu ze sterowaną numerycznie osią C wrzeciona napędu głównego stwarza to bardzo duże możliwości kształtowania wyrobów, w tym wykonywania w nich otworów poprzecznych i równoległych do osi przedmiotu, frezowania rowków, kanałków, powierzchni płaskich itp. Takie możliwości technologiczne pozwalają ograniczyć liczbę operacji, obrabiarek i personelu, koniecznych do wytworzenia wyrobu, skrócić bądź wyeliminować czasy t_{pz} , t_p , transport i magazynowanie międzyoperacyjne, a także zwiększyć dokładność obróbki dzięki mniejszej liczbie mocowań przedmiotu. Ponadto znacznie zwiększone możliwości wykonawcze jednego stanowiska pracy mogą korzystnie wpłynąć na konstrukcję całego wyrobu. Może bowiem być bardziej racjonalne zrezygnowanie z rozdzielania finalnego wyrobu na kilka prostszych technologicznie części na rzecz bardziej skomplikowanych elementów konstrukcyjnych, nie wymagających montażu lub znacznie go ułatwiających.

Aby uniknąć niektórych wad tokarek dwusuportowych, takich jak kolizyjność pracy obu suportów, wzajemne oddziaływanie odkształceń OUPN podczas obróbki dwoma narzędziami jednego przedmiotu, a zachowania ich zalet, tj.: możliwości zwiększenia wydajności obróbki i koncentracji równolegle wykonywanych zabiegów w małej przestrzeni roboczej, skonstruowano obrabiarkę **dwusuportową, dwuwrzecionową** z jednym napędem wrzeciona. Obrabiarka taka jest przeznaczona do obróbki niezależnej dwu przedmiotów jednocześnie. Znacznym ograniczeniem w zastosowaniu takiej obrabiarki jest brak możliwości uzyskania różnych prędkości obrotowych na każdym z wrzecion lub niezależnego zatrzymania któregośkolwiek z nich. Dlatego obrabiarki te są przeznaczone do obróbki małych przedmiotów podobnych klas i o zbliżonej pracochłonności operacji. Chodzi bowiem o to, by optymalne lub zalecane prędkości skrawania dla obu operacji nie różniły się znacznie między sobą oraz, aby nie było zbędnych przestojów w wyniku oczekiwania na wymianę przedmiotu do czasu, kiedy zostaną zakończone operacje na przedmiocie o większej pracochłonności. Stąd też wykorzystuje się często tego typu obrabiarki do obróbki tego samego przedmiotu z obu stron. Przedmiot, po ukształtowaniu jednej strony, jest przekładany do drugiego wrzeciona i obrabiany z drugiej strony. Podobne zadania spełniają obrabiarki z przechwytyjącym wrzecionem, lecz są one mniej wydajne, ponieważ obrabiany jest na nich w tym samym czasie tylko jeden przedmiot a nie dwa.

Tokarki wielowrzecionowe sterowane numerycznie powstały na drodze ewolucji z wielowrzecionowych automatów sterowanych krzywkowo. Początkowo automaty wyposażano tylko w jeden lub dwa suporty sterowane numerycznie do wykonywania powierzchni krzywoliniowych. Następnie, wraz z ciągłym zmniejszaniem się cen układów sterujących i coraz większymi możliwościami obliczeniowymi komputerów obsługujących układy sterowania CNC, zaczęto produkować także automaty wielowrzecionowe z wszystkimi suportami sterowanymi numerycznie, w których liczba sterowanych osi dochodziła do trzydziestu. Pozwoliło to połączyć w jednej tokarce dwie pozytywne właściwości, nieza-

leżnie do tej pory występujące w dwóch różnych obrabiarkach, tj. dużą wydajność automatu wielowrzecionowego oraz możliwość szybkiego przezbierania obrabiarki do nowego zadania produkcyjnego, jaką mają OSN-y. Rozszerzyło to zakresy zastosowań obu do tej pory niezależnie egzystujących grup obrabiarek. OSN-y, przez zwiększenie wydajności, mogą być już stosowane w produkcji wielkoseryjnej, a wydajne automaty wielowrzecionowe, przez skrócenie o około 85% czasu przezbierania [131], mogą być opłacalne w produkcji o mniejszej skali.

7.18.2. TOKARKI UCHWYTOWE Z PIONOWYM WRZECIENIEM

Specyficzną grupę tokarek NC stanowią obrabiarki uchwytowe z pionowo zorientowanym wrzecionem, które zapewniają szczególnie korzystne warunki grawitacyjnego usuwania wiórów ze strefy skrawania i uniemożliwiają gromadzenie się ich na prowadnicach i łożu obrabiarki. W tej grupie obrabiarek pewną oryginalnością wyróżniają się tokarki firmy INDEX. W obrabiarkach tych narzędzia są zamocowane w gniazdach nieruchomego, pionowego stołu, a wszystkie ruchy (główne i posuwowe) wykonuje wrzeciono wraz z wrzeciennikiem. Możliwość przemieszczania się wrzeciona można więc wykorzystać do „najechnia” nim na odpowiednie miejsca (te same lub różne) przestrzeni roboczej, z których będzie pobierany półfabrykat, i na które będzie odkładany gotowy wyrób. Takie rozwiązanie konstrukcyjne umożliwia automatyczne zasilanie obrabiarki w przedmioty, bez zwiększania nakładów na dodatkowe wyposażenie stanowiska pracy. Nie wymaga ponadto sprzęgania układów sterowania manipulatorów lub robotów z układem sterowania obrabiarki. Można więc automatyzować czynności wymiany przedmiotu, skracać czasy pomocnicze, ograniczać koszty obsługi operatora, nie zwiększając przy tym kosztów pracy stanowiska.

Inną korzyścią takiego rozwiązania konstrukcyjnego obrabiarki, a dokładniej, nieruchomo zamocowanych w gniazdach stołu narzędzi, jest możliwość łatwego mocowania i przestawiania obrotowych narzędzi napędzanych.

Taką tokarkę, w której wszystkie ruchy wykonuje wrzeciono wraz z wrzeciennikiem, łatwo zaadaptować do grupy obrabiarek (na razie tylko frezarek i szlifierek) o nowatorskiej budowie typu „sześcionogi” (patrz rys. 2.1). Niewątpliwie po frezarkach i szlifierek pojawiają się także tokarki uchwytowe podobnie rozwiązane konstrukcyjnie. Skutki zastosowania tego typu mechanizmów realizacji przemieszczeń w tokarkach nie będą aż tak spektakularne jak w innych obrabiarkach. Efektywność toczenia ogranicza na ogół moc i dynamika napędu głównego obrabiarki, zużywanie się narzędzia oraz wsparcie komputerowe nie pozwalające znacznie skrócić czasu przestawiania produkcji z jednego wyrobu na drugi. Prędkości ruchów dosuwowych suportów współczesnych konwencjonalnych tokarek NC są zaś na tyle duże, że dalsze ich zwiększanie nie wpłynie znacząco na czas wykonania przedmiotu, a zwiększanie prędkości ruchów posuwowych roboczych uniemożliwia pogarszanie się chropowatości obrobionej powierzchni. Większość problemów dotyczących toczenia z zastosowaniem skrawania z dużymi prędkościami skrawania, o których wspomniano wcześniej, będzie odnosić się także do tokarek typu „sześcionogi”. Ponadto przestrzeń robocza obrabiarki byłaby ograniczona dużą liczbą „nóg”, co stanowiłoby utrudnienie podczas zasilania obrabiarki w przedmioty i narzędzia, a także komplikować usuwanie wiórów. Trudne do rozwiązania byłoby także mocowanie przedmiotów wymagających podparcia kłem konika. Niewątpliwą korzyścią płynącą z takiego rozwiązania to-

karki byłyby jej większa sztywność i związana z tym, prawdopodobnie mniejsza, podatność na drgania, a to powinno wpłynąć na zwiększenie dokładności obróbki.

Tokarki skonstruowane jako „sześciopodopieczni” będą miały podobne zalety jak klasyczne obrabiarki uchwytywne z pionowym wrzecionem, tzn. łatwy grawitacyjny sposób usuwania wiórów oraz możliwość wykorzystania układu sterowania i przemieszczeń wrzeciennika do zasilania obrabiarki w przedmioty, a nawet narzędzia.

7.18.3. FREZOTOCZENIE

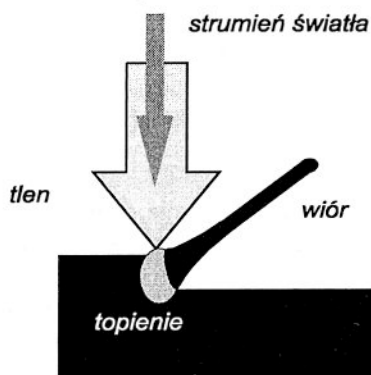
Frezotoczenie łączy kinematykę toczenia i frezowania. Takie połączenie dwóch rodzajów obróbki pozwala zdecydowanie zwiększyć wydajność toczenia i umożliwia obróbkę materiałów skłonnych do tworzenia niekorzystnej postaci wióra. Podczas tradycyjnego toczenia wzrost wydajności obróbki przez zwiększanie posuwu ogranicza pogarszanie się chropowatości powierzchni (odwzorowanie naroża) i dokładności obróbki (duże siły skrawania). Zastosowanie wysokoobrotowego, wielostrzowego narzędzia frezarskiego nawet dla dużych posuwów pozwala na zmniejszenie sił skrawania [228] oraz chropowatości powierzchni [222] w porównaniu z obróbką z użyciem noża tokarskiego. Prędkość obwodowa przedmiotu jest dla freza, w tym rodzaju obróbki, ruchem posuwowym. Maksymalny dopuszczalny posuw minutowy dla konwencjonalnego toczenia stanowił, w przeciwieństwie do frezotoczenia, duże ograniczenie. Znaczne postępy w HSM, jakie poczyniono w ostatnich latach [72, 124, 125, 180, 182, 186, 230, 231, 233], pozwalają przypuszczać, że ten rodzaj obróbki zastosowany do frezowania obrotowego może odegrać w przyszłości znacznie większą rolę niż w toczeniu [176, 222].

Znacznym ograniczeniem stosowania frezotoczenia są małe możliwości obróbki powierzchni kształtowych, podcięć kanałków, a także skrawania powierzchni wewnętrznych.

7.18.4. NIEKONWENCJONALNE ŁĄCZENIE TECHNIK WYTWARZANIA

Dążenie do koncentracji już nie zabiegów, ale różnych technik wytwarzania w obrębie jednego stanowiska pracy, jest powodem podejmowania prób integracji różnych technologii, takich jak np. wciskania, spawania, montażu z możliwościami obróbkowymi i zdolnością do precyzyjnego przemieszczania się głowic narzędziowych, jakimi dysponuje obrabiarka i jej układ sterowania numerycznego. I tak np. tokarka może być wyposażona w manipulator, podający części do montażu, a w jednej z głowic narzędziowych można umieścić laser, służący do spawania wykonywanych na bieżąco, a także podawanych do montażu części [204, 296]. Doposażenie w ten sposób konwencjonalnej obrabiarki sterowanej numerycznie w dodatkowe oprzyrządowanie czyni z niej maszynę wytwórczą do dość złożonych zadań produkcyjnych. Takie całościowe podejście do zagadnień opracowywania technologii wyrobów pozwala wykorzystywać istniejące układy sterowania i zespoły funkcjonalne obrabiarek do nowych zadań produkcyjnych. Prowadzić to może do zmniejszenia kosztów maszynowych w porównaniu z tradycyjnymi technologiami. Ponadto znacznie skracają się czasy pomocnicze, jest ograniczany lub eliminowany transport międzystanowiskowy, zmniejsza się też powierzchnia hali fabrycznej i obsada stanowisk, konieczna do wytworzenia danego wyrobu itp.

Odmienny, specyficzny przykład łączenia różnych technologii polega na zastąpieniu ostrza noża tokarskiego strumieniem światła laserowego [283, 296]. Zasady oddzielania materiału w tej technice kształtowania powierzchni pokazano na rys. 7.39.



Rys. 7.39. Schematyczne przedstawienie zasad oddzielania materiału z wykorzystaniem strumienia światła laserowego (według [296])

Fig. 7.39. Schematic representation of the concept of removing material with the use of laser light beam acc. to [296]

Do obróbki trudno obrabialnych materiałów, takich jak niektóre metale, ceramiki, grafit, tworzywa sztuczne, można wykorzystywać silny strumień światła, który działając na materiał kształtowany powoduje jego odparowywanie. Podczas obróbki stali konstrukcyjnych, narzędziowych i stopowych można, kierując pod odpowiednim kątem strumień światła i wykorzystując zjawiska naprężeń cieplnych powstałych w czasie odpowiednio realizowanych cykli temperaturowych, przetapiać materiał obrabiany w postać wióra.

Jeśli przedmiot obrabia się „na gotowo” na tokarce CNC i jest wymagane jedynie tylko późniejsze przeszlifowanie niektórych jego powierzchni, to konieczne jest zazwyczaj wykonanie nakiełków jako bazy pośredniej i użycie innej obrabiarki, w tym wypadku szlifierki. Wtedy, gdy jest to możliwe, korzystne mogłoby być wyeliminowanie tych czynności przez zastąpienie szlifowania nagniataniem, wyko-

nanym bezpośrednio na tokarce [216]. Można w ten sposób nie tylko zmniejszyć liczbę operacji, ale także uzyskać mniejszą chropowatość powierzchni i korzystniejszy stan naprężeń w warstwie wierzchniej.

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W monografii przedstawiono stan zagadnienia z zakresu kształtowania skrawaniem przedmiotów osiowosymetrycznych w zintegrowanym wytwarzaniu. Stało się to punktem wyjścia do sformułowania celów i zakresu pracy. Przeprowadzone badania analityczne upoważniają do stwierdzenia, że założone cele zostały osiągnięte.

Analizowano struktury funkcji czasu i kosztów operacji dla różnych możliwości obróbkowych narzędzi i obrabiarek w warunkach współczesnych, a także dla hipotetycznie przyjętych warunków, które będą mogły być zrealizowane dopiero w przyszłości. Pozwoliło to na określenie zależności i trendów najskuteczniejszych kierunków badań i poszukiwań możliwości zwiększania efektywności wytwarzania na tokarkach NC.

Analizę funkcji celów oparto na danych pozyskanych z badań ankietowych, przeprowadzonych w zakładach przemysłowych. Dla warunków tych, będących punktem odniesienia, zbadano charakter zmian struktury funkcji celów z uwzględnieniem poszczególnych czynników zmieniających się w bardzo szerokich granicach.

Udowodniono, że funkcje czasu i kosztów operacji mogą mieć miejsca nieciągłości i nieoznaczoności. Odpowiada to często spotykanym w warunkach produkcyjnych sytuacjom, polegającym na uprzedzającej wymianie narzędzi, dokonywanej nie wtedy, kiedy narzędzie stępi się, lecz wtedy, gdy jego trwałość resztkowa jest krótsza niż czas jego użycia w następnej operacji. Stwierdzono także możliwość występowania dodatkowych zakłóceń w ciągłości przebiegu funkcji celu, spowodowanych niemożnością wykorzystania resztkowych okresów trwałości narzędzi, kończących wykonywanie zadania produkcyjnego. Zbadano charakter i wielkość tych zakłóceń, a także warunki, w których nieciągłości te mogą osiągać największe wartości oraz obszary, gdzie są one pomijalnie małe.

Opracowano oryginalne funkcje czasu i kosztów operacji, w których uwzględniono owe zakłócenia, a także koszty samej optymalizacji. Posłużyły one jako funkcje celu do optymalizacji parametrów skrawania, a także były podstawą do badań analitycznych struktury funkcji czasu i kosztów operacji.

Aby ocena i analiza możliwości zwiększania efektywności wytwarzania na tokarkach NC mogła mieć bardziej ogólny charakter, dokonano założenia polegającego na odniesieniu funkcji czasu i kosztów operacji do jednego narzędzia. Było to konieczne ze względu na złożoność i wielowariantowość możliwości warunków pracy narzędzi, wielorakość obrabiarek sterowanych numerycznie, różnorodność obrabianych przedmiotów, struktur operacji itp.

Oszacowano wpływ czasu rozpędzania, hamowania i zmiany kierunków obrotów wrzeciona na czas i koszty wytwarzania. Zwrócono uwagę na to, że czasy te podczas skrawania, w którym są stosowane bardzo duże prędkości obrotowe wrzeciona, mogą znacząco oddziaływać na funkcje celu, co powinno być uwzględnione bardziej precyzyjnymi zależnościami.

Wiele uwagi poświęcono narzędziom wielozadaniowym, których rola w wytwarzaniu na OSN-ach jest coraz bardziej znacząca. Dla skrawania nimi opracowano funkcje celu oraz zaproponowano metodykę optymalizacji parametrów obróbki, pozwalającą na lepsze określenie stanu obiektu niż tradycyjnymi metodami optymalizacyjnymi, które nie gwarantują wykorzystania pełnych możliwości skrawnych tego typu narzędzi.

Zaproponowane metodyki, służące do optymalizacji operacji prowadzonych na tokarkach sterowanych numerycznie, pozwalają dobierać najkorzystniejsze dla przyjętego kryterium parametry skrawania, z możliwością uwzględniania różnych materiałów ostrzy dla każdego z narzędzi oraz przyjmowania dla nich różnych kryteriów stopienia. Mogą one uwzględniać dużą liczbę nieliniowych ograniczeń brzegowych, a także dodatkowo narzucone warunki, takie np. jak: określona (maksymalna, minimalna, równa, całkowita) liczba narzędzi przeznaczonych do wykonania zadania produkcyjnego, krotność stosunku okresu trwałości narzędzia do czasu skrawania nim w operacji $T_c/t_s \in (1, 2, 3, \dots, n)$, itp. Ograniczenia, o których wspomniano, mogą być nakładane globalnie na całą operację, ale także lokalnie na poszczególne przejścia i zabiegi, jakie wykonują narzędzia.

Do analizy programów NC i automatycznego wyszukiwania z nich danych, potrzebnych do optymalizacji parametrów skrawania, opracowano program komputerowy CEZET i zweryfikowano go w warunkach przemysłowych.

Skutki wynikające z oddziaływań poszczególnych składników na funkcje czasu i kosztów operacji, a także korzyści wynikające z optymalizacji, mogłyby być bardziej uwypuklone, gdyby odnosić je tylko do tych części funkcji, które zależą od parametrów skrawania i są wystarczające do optymalizacji parametrów skrawania. Tak czyni znaczna część autorów publikacji zajmujących się problemami optymalizacji. Jednak wszelkie porównywanie wartości funkcji, z użyciem tak „okrojonych modeli”, fałszują na swój sposób wyniki analiz całościowych. Z tych też względów zdecydowano się, żeby w monografii uwzględnić wszystkie składniki funkcji czasu i kosztów operacji, łącznie z czasami przygotowawczo-zakończeniowymi, pomocniczymi, uzupełniającymi, a także kosztami przygotowania, powtórzenia zlecenia oraz kosztami samej optymalizacji. Trzeba bowiem zdawać sobie sprawę z tego, że składniki niezależne od parametrów skrawania mogą sumarycznie stanowić do około 80% wartości czasu i kosztów operacji.

Niewątpliwym ułatwieniem w realizacji pracy był wysoki poziom oferowanych współcześnie metod numerycznych oraz możliwości sprzętu komputerowego. Pozwoliło to na efektywne prowadzenie dość obszernych badań, realizację złożonych procedur optymalizacyjnych, a także na graficzną wizualizację danych obliczeniowych, ułatwiającą analizę otrzymanych wyników. Bez tych udogodnień wykonanie pracy w takim zakresie byłoby niemożliwe. Ze względu na znaczną objętość wyników badań analitycznych w pracy zdokumentowano przykładowo tylko niewielką ich część.

Wnioski z przeprowadzonych badań i analiz podzielono na takie, które mają charakter poznawczy, użyteczny i na takie, które odnoszą się do możliwych kierunków dalszych badań.

8.1. WNIOSKI O CHARAKTERZE POZNAWCZYM

1. Aby optymalizacja parametrów skrawania lub całej struktury operacji wykonywanych na OSN-ach mogła być efektywna, powinna być wykonana dość szybko, gdyż obrabiarki tego

typu są najczęściej wykorzystywane w produkcji małoseryjnej, elastycznej, w której przygotowanie technologii i wykonanie zadania musi być zrealizowane w krótkim czasie. Przeprowadzenie optymalizacji, nawet ze wspomaganie komputerowym, wymaga jednak pewnego czasu, który wydłuża okres przygotowania programu. Dlatego bardziej dokładne i dogłębne procedury optymalizacyjne będą odgrywały na razie większą rolę jedynie w produkcji o większej skali. Rola optymalizacji dla produkcji małoseryjnej będzie mogła być znacząca wówczas, gdy pojawią się programy komputerowe skracające do minimum, nie tyle czas samej optymalizacji, bo ten już teraz może być bardzo krótki, co czas analizy programów NC, wyszukiwania i przygotowywania niezbędnych danych wejściowych.

2. Parametry skrawania v_c , f , a_p mają ten sam charakter oddziaływania zarówno na funkcje czasu, jak i kosztów operacji. Jest to istotne stwierdzenie ze względu na procedury i metodyki optymalizacyjne. Niektóre z nich są bowiem wrażliwe na takie właściwości funkcji jak np. unimodalność, wypukłość, nieciągłość itp. Dlatego dobraną i przetestowaną procedurę optymalizacyjną z użyciem jednej funkcji celu, np. czasu t_{sz} , można z powodzeniem użyć do optymalizacji drugiej funkcji, w tym wypadku K_j . Ponadto istnieje pewność, że funkcja celu, będąca sumą ważoną tych funkcji, zastosowana w procedurach optymalizacji wielokryterialnej, również będzie się zachowywała tak samo, jak każda z omawianych wcześniej.

3. Funkcje czasu i kosztów operacji mogą mieć nieciągłości, jeśli narzędzia wymieniane są uprzedzająco, gdy ich trwałości reszkowe są krótsze niż czasy użycia ich w kolejnej operacji. Takie „zakłócenia” funkcji celów są wywołane zawartymi w nich członami z funkcjami schodkowymi $\text{entier}[T_c/t_s]$. Uskoki funkcji w miejscach nieciągłości mogą być dość znaczne. Największe wartości uskoków funkcji schodkowych, dochodzące do 100% ich wartości, występują gdy stosunek T_c/t_s jest nieco mniejszy niż 2. Jeśli liczba obrabianych przedmiotów w jednym okresie trwałości T_c/t_s jest większa niż sto, to uskoki te są mniejsze niż 1%.

4. Koszty, w porównaniu z funkcją czasu operacji, mogą zawierać dodatkowy człon wywołujący kolejne nieciągłości. Odzwierciedla on sytuację, w której ostatnie z narzędzi siostrzanych (w skrajnym przypadku jedno) nie zostały w pełni zużyte po wykonaniu ostatniego przedmiotu w partii wyrobów, a pozostałych okresów trwałości reszkowych nie opłaca się lub nie potrafi się spożytkować w innym zadaniu obróbkowym. Na zakłócenia funkcji kosztów wywołanych tą przyczyną największy wpływ ma liczba sztuk w partii wyrobów n_{sz} oraz możliwa do wykonania liczba operacji w ciągu jednego okresu trwałości T_c/t_s . Im mniejsza jest wartość n_{sz} i im większa wartość stosunku T_c/t_s , tym bardziej zwiększa się udział kosztów niewykorzystania okresu trwałości reszkowej ostatniego z narzędzi siostrzanych w średnim koszcie operacji. Największa wartość zakłóceń występuje w przypadku skrajnym, gdy wykonuje się tylko jeden przedmiot ($n_{sz} = 1$). Wartość członu schodkowego funkcji kosztów może się wówczas różnić nawet więcej niż o 1000% (np. dla $T_c/t_s > 10$) w porównaniu z sytuacją, gdy jest możliwe wykorzystanie trwałości reszkowej narzędzi w innym zadaniu obróbkowym. W miarę zwiększania się liczby sztuk w partii wyrobów wartość zakłóceń tych maleje, gdyż rozkłada się ona na coraz to większą liczbę przedmiotów. I tak, dla $n_{sz} > 50$ sztuk zakłócenia te stają się pomijalnie małe.

5. Uskoki funkcji celów, powstające w miejscach ich nieciągłości, zawsze pogarszają efektywność skrawania, tzn. zwiększają czas i koszty wytwarzania. Dlatego powinno się dążyć do tego, aby wpływ ich był jak najmniejszy. Takimi działaniami mogą być:

- próby wykorzystania trwałości resztkowych narzędzi wszędzie tam, gdzie jest to możliwe i uzasadnione
- dążenie do tego, aby liczba sztuk w partii wyrobów była możliwie duża
- właściwie przeprowadzona optymalizacja parametrów skrawania powinna pozwalać na wybranie najkorzystniejszego stanu obiektu, który znajduje się zazwyczaj w „bruździe” w pobliżu linii nieciągłości, a więc w miejscu, gdzie niekorzystny „uskok” funkcji ma najmniejszą wartość.

6. Optymalizacja parametrów skrawania wpływa znacząco na efektywność wytwarzania. Świadczą o tym następujące spostrzeżenia:

- jak wykazano, na stan optymalny obiektu wpływa bardzo dużo czynników, niektóre z nich w sposób bardzo istotny, więc nieuwzględnianie ich podczas doboru parametrów skrawania może spowodować to, że wydajność lub koszty obróbki mogą być znacznie mniej korzystne niż te, które określono by na podstawie optymalizacji
- obserwując stosowane w przemyśle parametry skrawania należy stwierdzić, że odbiegają one na ogół dość zdecydowanie od parametrów optymalnych
- porównując otrzymywane podczas badań analitycznych trwałości optymalne z zalecaną powszechnie trwałością 15 min należy stwierdzić, że tylko w nielicznych przypadkach wartości te były zbliżone do siebie.

7. Rola optymalizacji będzie rosła w miarę stosowania coraz to większych prędkości skrawania, gdyż wówczas będzie zaznaczał się, silnie deformujący funkcję celów, wpływ czasów rozpędzania, hamowania i zmiany obrotów wrzeciona. Wpływ ten łatwo można uwzględnić w funkcjach czasu i kosztów obróbki, a wtedy wyznaczanie optymalnych parametrów skrawania będzie bardziej dokładne.

8. Wartości optymalnych parametrów skrawania, określane ze względu na kryterium minimalnych kosztów wytwarzania, nie zależą od wartości poszczególnych składników kosztów występujących w funkcjach celu, lecz od wzajemnych proporcji między nimi. Jeśli zatem wszystkie składniki kosztów wzrosną proporcjonalnie, np. o 50 lub 100%, to również o tyle samo wzrosną koszty wytwarzania, ale optymalne parametry skrawania nie zmienią swoich wartości. Wynika to z budowy omawianych funkcji celu. Nawet jeśli zmieni się struktura składników kosztów, ale w taki sposób, że nie zmienią się proporcje między grupą kosztów związanych z pracą stanowiska i wynagrodzeniem pracownika $\Sigma(K_m + K_{l,m})$ a kosztami związanymi z eksploatacją narzędzia $\Sigma(K_o + K_p + K_n + K_{os})$, to również optymalne wartości parametrów skrawania nie zmienią się. Można zatem stwierdzić, że przeprowadzona analiza funkcji celów oraz wyciągnięte na tej podstawie wnioski i spostrzeżenia będą obowiązywać niezależnie od przyjętej jednostki waluty, stopnia inflacji, a także czasu wnioskowania, jeśli tylko nie zmienią się proporcje między tymi dwoma grupami składników kosztów.

9. Długości dróg i średnic toczenia, na jakich operują narzędzia w czasie realizacji programu NC, wpływają bardzo silnie na miejsce występowania i wielkość nieciągłości

funkcji celów. Dla tych przypadków, w których funkcje celu nie mają nieciągłości lub nieciągłości te są pomijalnie małe, średnice i długości dróg skrawania decydują o czasie i kosztach operacji, ale nie wpływają na wartości optymalnych parametrów skrawania.

10. Zwiększanie prędkości skrawania, które jest możliwe przede wszystkim dzięki stosowaniu materiałów narzędziowych i obrabiarek coraz nowszych generacji, powoduje i powodować będzie znaczne skrócenie czasów maszynowych. Coraz większą rolę odgrywać będą wówczas czasy związane z czynnościami pomocniczymi, przygotowawczymi-zakończeniowymi oraz z przygotowaniem produkcji. Zwiększanie efektywności wytwarzania możliwe będzie zatem dzięki dalszej automatyzacji obsługi obrabiarek, większej koncentracji operacji, wsparciu komputerowemu czynności związanych z projektowaniem i realizacją programów NC, przezbrajaniu obrabiarek, stosowaniu narzędzi wielozadaniowych itp.

11. Jeżeli obróbkę prowadzi się ostrzami o dużych możliwościach skrawnych, to dobór parametrów skrawania, mniejszych od optymalnych, powoduje znaczniejsze pogorszenie efektywności wytwarzania niż przyjęcie wartości parametrów większych od optymalnych, ponieważ funkcje celu dla tych ostrzy, w miarę zwiększania się parametrów skrawania, stają się bardziej płaskie. Stwierdzenie to daje znaczący argument za stosowaniem optymalizacji wewnętrznej z wykorzystaniem układów nadzorujących i diagnostycznych, które pozwalają dobierać większe parametry skrawania niż optymalizacja zewnętrzna, która musi przyjmować znacznie szerszy margines bezpieczeństwa, sytuując warunki obróbki w niższych zakresach, w których funkcje celu przyjmują zdecydowanie mniej korzystne wartości.

12. Zwiększone możliwości obróbkowe narzędzi wielozadaniowych, w porównaniu z narzędziami jednozadaniowymi, mogą przyczynić się do:

- zmniejszenia koniecznej liczby operacji
- wzrostu wydajności i obniżenia kosztów obróbki
- zwiększenia możliwości kształtowania powierzchni na obrabiarce, którą da się uzbroić tylko w określoną liczbę narzędzi.

Można zwiększyć efektywność wytwarzania tymi narzędziami, jeśli zastosuje się zaproponowaną w pracy metodykę określania optymalnych parametrów skrawania.

13. Optymalizacja lub choćby tylko dobór parametrów skrawania dla narzędzi wielozadaniowych powinny być odmienne niż dla narzędzi jednozadaniowych. W tych przypadkach, gdy jest to możliwe, warunki obróbki dla krawędzi mniej obciążonych powinny być tak zwiększone, aby zużycie wszystkich krawędzi następowało po wykonaniu tej samej liczby operacji. Takie podejście do tego zagadnienia zwiększa wykorzystanie możliwości skrawnych narzędzi, co prowadzi do wzrostu efektywności wytwarzania.

14. Oddziaływanie czasów rozpędzania i hamowania wrzeciona na wartość funkcji celu jest bardzo niewielkie dla warunków skrawania wymagających stosowania prędkości obrotowych wrzeciona w zakresie do kilkunastu tysięcy obr/min. Powyżej tej granicy udział czasów $t_{roz} + t_{ham}$ zaczyna gwałtownie zwiększać się, stając się dominującym składnikiem funkcji celów, co może pogarszać efektywność toczenia mimo braku technicznych przeszkód w realizacji tak znacznych prędkości obrotowych. Dla takich warunków funkcje czasu i kosztów operacji powinny uwzględniać bardziej dokładnie opóźnienia obróbki wywo-

lane rozpędzaniem i hamowaniem napędu głównego obrabiarki. Stwierdzono też silne oddziaływanie dużych prędkości obrotowych wrzeciona na przemieszczanie się optymalnej prędkości skrawania w kierunku mniejszych wartości.

15. Ze względu na efektywność obróbki znacznie korzystniejsze jest zwiększanie własności dynamicznych napędów niż maksymalnych prędkości przemieszczeń suportów. Te ostatnie bowiem bardzo często nie mogą być osiągnięte podczas wykonywania operacji ze względu na to, że długości dróg rozpędzania i hamowania suportu mogą być większe niż przeciętne długości przemieszczenia się ich podczas wykonywania ruchów jałowych.

16. Koszt pracy stanowiska jest najbardziej cenotwórczym składnikiem kosztów operacji i to niezależnie od możliwości obróbkowych obrabiarek i narzędzi. Ten bardzo duży udział kosztów K_m zmniejsza się w miarę polepszania się właściwości skrawnych ostrzy.

17. Ponieważ czas maszynowy obróbki jest funkcją hiperboliczną względem prędkości skrawania, więc zwiększanie tej prędkości powyżej 2 000 m/min powoduje już tylko nieznaczne zmiany wartości tego czasu. Tak więc poprawianie wydajności i zmniejszanie kosztów toczenia, przez zwiększanie prędkości skrawania powyżej tej granicy, wydaje się niecelowe ze względu na niewielką, możliwą do osiągnięcia poprawę efektywności obróbki, a także ze względu na utrudnienia związane z koniecznością realizacji skrawania wymagającego bardzo dużych prędkości obrotowych wrzecion.

18. Jest możliwe zwiększanie efektywności wytwarzania na drodze przesuwania ograniczeń brzegowych nawet wówczas, gdy przesuwanie to spowoduje zmniejszenie się okresu trwałości ostrza.

8.2. WNIOSKI O CHARAKTERZE UTYLITARNYM

1. Optymalizacja zewnętrzna parametrów skrawania oddziałuje zarówno bezpośrednio na zwiększenie efektywności wytwarzania, jak też pośrednio, gdyż skracając czas wykonania operacji przyczynia się do skrócenia czasu przygotowawczo-zakończeniowego, w skład którego wchodzi zwykle czas wykonania pierwszego przedmiotu, oraz do skrócenia czasu określania korekcji metodą próbnych przejść.

2. Dokładne wyznaczanie optymalnych parametrów skrawania ma mniejsze znaczenie dla małych serii produkcyjnych, do jakich obecnie najczęściej bywają stosowane OSN-y. Zauważa się tendencję do wykorzystywania OSN-ów również do produkcji o coraz większej skali, więc dla takich zastosowań właściwy dobór parametrów skrawania będzie miał większe znaczenie, gdyż w miarę wydłużania serii produkowanych wyrobów procentowy udział czasów t_{pz} i t_p w czasie jednostkowym wykonania przedmiotu maleje, a zwiększa się procentowy udział czasu głównego. Optymalizowane parametry skrawania będą zatem tym bardziej rzutować na wydajność jak i na koszty wytwarzania, im bardziej wydłużać się będzie seria produkcyjna.

3. Nowoczesne materiały narzędziowe pozwalają na obróbkę materiałów bardzo twardych w stanie ulepszonym, a nawet zahartowanym, co umożliwia obróbkę kształtującą

i wykańczającą przedmiotu w jednej operacji, bez konieczności rozdzielania jej, by przeprowadzić obróbkę cieplną. Prowadzi to do skracania czasów wytwarzania w wyniku większej koncentracji czynności na jednej obrabiarkie i dzięki uniknięciu strat czasu oraz kosztów związanych z transportem międzyoperacyjnym i międzywydziałowym. Taka koncentracja czynności pozwala także na zwiększenie dokładności obróbki, gdyż unika się wtedy błędów dodatkowego mocowania przedmiotu.

4. Obróbka przedmiotów w stanie ulepszonym lub zahartowanym, z użyciem nowoczesnych materiałów narzędziowych, nie wymagających zazwyczaj stosowania płynów obróbkowych, pozwala także niejednokrotnie na uniknięcie energochłonnego szlifowania, do którego trzeba stosować duże ilości emulsji chłodzących. Jest to niewątpliwie przyczynkiem do zmniejszania skutków negatywnego oddziaływania procesów wytwarzania na środowisko naturalne.

5. Realizacja procesu skrawania z coraz to większymi prędkościami skrawania i zachowanymi na stałym poziomie przekrojami warstwy skrawanej ($a_p \times f$) wymagać będzie obrabiarek o coraz to większych mocach efektywnych na wrzecionie. Zależność $N_s = f(v_c)$ jest niemal liniowa dla dużych prędkości skrawania.

6. Toczenie z dużymi prędkościami skrawania (HSC) musi pogodzić dwie sprzeczności. Pierwsza sprzeczność polega na tym, że uwarunkowaniem ekonomicznego stosowania HSC jest zdejmowanie bardzo dużych objętości materiału, co na ogół występuje podczas obróbki dużych przedmiotów. Druga zaś na tym, że ze zwiększaniem się wymiarów przedmiotów gwałtownie narastają trudności techniczne realizowania dużych prędkości obrotowych wrzecion. W związku tym bardziej racjonalne wydaje się być zastosowanie HSC nie w klasycznym toczeniu, lecz we frezotoczeniu.

7. Częstym argumentem przeciwko stosowaniu dużych prędkości skrawania, wyznaczonych dla kryterium optymalności $t_{sc} \rightarrow \min$, są bardzo krótkie optymalne okresy trwałości, np. około kilku minut. Podświadomie kojarzy się to z koniecznością wymiany narzędzia po kilku minutach pracy obrabiarki, a nie pracy narzędzia. Narzędzie, skrawając z dużymi parametrami, wykona swoje zadanie w ciągu tych paru minut, uczestnicząc np. w kilkudziesięciu operacjach. A przecież czas trwania operacji składa się także z czasów maszynowych innych narzędzi, a także czasów pozostałych składników funkcji celu. Jeśli więc w programie obróbkowym uczestniczy kilka czy kilkanaście narzędzi, to w takich przypadkach wymiana narzędzi może następować nawet po kilku godzinach pracy obrabiarki.

8. Układy diagnostyczne i nadzorujące spełniają wiele bardzo ważnych funkcji w procesie wytwarzania i mogą przyczynić się do zwiększenia efektywności wytwarzania. Mogą one powodować takie korzystne oddziaływania, jak: zmniejszenie liczby awarii i ich skutków, możliwość bezobsługowej pracy obrabiarki, poprawa jakości procesu. Układy te, przez szybką reakcję na zakłócenia, mogą się także przyczyniać do bardziej intensywnego i pełnego wykorzystania możliwości obróbkowych narzędzi oraz obrabiarek niż w przypadku zastosowania optymalizacji zewnętrznej. Trzeba jednak pamiętać, że układy takie zwiększają dość znacznie koszt pracy stanowiska, który najsilniej oddziałuje na koszty operacji. Decydując się zatem na zastosowanie określonego układu nadzorującego, trzeba dokonać oceny ekonomicznej takiego przedsięwzięcia.

9. W miarę zwiększania się możliwości obróbkowych narzędzi i obrabiarek bardzo znacznie będzie się zmniejszał procentowy udział czasu maszynowego zarówno w czasie, jak i w kosztach wytwarzania. Wzrośnie natomiast udział czasów czynności pomocniczych wykonywanych przez operatora t_p , czasów przygotowawczo-zakończeniowych t_{pz} i czasów diagnozowania t_{dn} . Do najmniej oddziałujących zaliczać się będą natomiast czasy czynności pomocniczych, realizowanych przez obrabiarkę t_{pNC} , czasy wymian narzędzi t_{zn} oraz koszty oprawki narzędziowej K_o i koszty powtórzenia zlecenia K_{pow} .

10. Czasy przygotowawczo-zakończeniowe i pomocnicze stanowią mogą znaczący składnik czasu i kosztów operacji, szczególnie jeśli stosować się będzie narzędzia i obrabiarki o dużych możliwościach obróbkowych, dla których czasy maszynowe przejść roboczych będą bardzo krótkie. W takich warunkach szacowany udział składników ($t_{pz} + t_p$) może stanowić 30–40% wartości funkcji celu, jeśli większość czynności objętych tymi czasami wykonuje operator obrabiarki. Skrócenie tych czasów choćby tylko o połowę pozwoliłoby na zwiększenie efektywności wytwarzania o 15–20%. Skracając zaś czasy te 10-krotnie, można by zmniejszyć koszty wytwarzania aż o około 27% i czas obróbki o 36%. Tak znaczna redukcja czasów jest realna, jeśli zmieni się tradycyjne, w przeważającej części przedsiębiorstw krajowych, zasady organizacji pracy wydziału i gniazda produkcyjnego. Najpierw powinno odciążyć się operatora obrabiarki od możliwie dużej liczby czynności związanych z uruchomieniem zlecenia. Narzędzia powinny być przygotowane, zmierzone i dostarczone do obrabiarki przez wydzielone służby. Istnieje także wiele możliwości realizowania czynności w czasie pokrytym. Można także doposażyć obrabiarkę w wymienny magazyn narzędziowy, system automatycznej wymiany przedmiotu i automatycznego przekazywania wartości korekcji do układu sterowania obrabiarki itp.

11. Czasy t_{pz} i t_p nie zależą od parametrów skrawania, a ponieważ mają stałą wartość, więc w miejscach optymalnych, w których funkcja celu ma najmniejsze wartości, ich procentowy udział przyjmuje największe wartości.

12. Czas wymiany narzędzi nie jest znaczącym składnikiem funkcji celu. Dla warunków współczesnych może on stanowić około 1,6–5% wartości czasu i około 1–4% kosztów operacji. W warunkach przyszłościowych udział jego będzie jeszcze mniejszy i będzie wynosił około 1%.

13. Łącznie czasy określania i wprowadzania korekcji ($t_{ok} + t_{wk}$) należą do bardziej istotnych składników czasu i kosztów wykonania operacji. Mogą one stanowić od kilku do nawet 35% wartości funkcji celu. Znaczenie skracania tych czasów będzie tym większe, im krótsze będą serie wykonywanych wyrobów, częstsze przezbieranie obrabiarek, dokładniejsza obróbka, im większe będą obrabiane przedmioty, a dokładniej – im dłuższe będą drogi skrawania poszczególnymi narzędziami. Większość z tych czynników jest charakterystyczna dla produkcji elastycznej, której znaczenie rośnie z roku na rok.

Doprowadzenie do sytuacji, w której korekcje określa się całkowicie poza obrabiarką, może pozwolić (w porównaniu ze stanem, w którym dla wszystkich narzędzi wyznacza się korekcje na obrabiarence) na skrócenie średniego czasu wykonania operacji o około 37% i zmniejszenie jej kosztów o około 21%. Zwiększa to jednocześnie optymalną prędkość skrawania aż o około 140% dla kryterium $t_{sz} \rightarrow \min$ i o około 58% dla kryterium $K_{sz} \rightarrow \min$.

W warunkach przyszłościowych oddziaływanie to będzie mniejsze i wynosić będzie odpowiednio dla czasu około 8% i dla kosztów operacji około 5%.

14. Wpływ wprowadzania korekcji na efektywność wytwarzania nie jest aż tak marginalny, jak to by można na pozór sądzić. Jeśli jest dokonywane ono ręcznie i trwa za każdym razem około 0,5 min, jest powtarzane przeciętnie kilkakrotnie w czasie jednego okresu trwałości, to jego oddziaływanie można porównać do wpływu czasu wymiany narzędzia, czyli można go szacować na poziomie kilku procent.

15. Głównym kierunkiem działań w celu zwiększania efektywności wytwarzania, przez zmniejszanie składnika funkcji celu związanego z czasem określania i wprowadzania korekcji, będzie:

- wszędzie gdzie to tylko jest możliwe, przeniesienie czynności mierzenia i ustawiania narzędzi z obrabiarki na specjalne stanowisko w przygotowni narzędzi
- stosowanie dokładnych systemów narzędzi zespolonych, odznaczających się dużą pewnością i powtarzalnością mocowania na obrabiarce, eliminujące konieczność dodatkowych przejść próbnych podczas uruchamiania produkcji nowego przedmiotu i po wymianie narzędzi
- stosowanie płytek wielostrzowych o większej dokładności wykonania oraz narzędzi z mechanizmami ustalająco-mocującymi ostrza o dużej powtarzalności
- wspomaganie komputerowe i automatyzacja czynności wprowadzania korekcji do układu sterowania obrabiarki.

16. Czas uzupełniający stanowi dość znaczny składnik funkcji celu, szczególnie w tych przypadkach, gdy operator jest silnie zaabsorbowany obsługą obrabiarki. Wtedy czas uzupełniający stanowić może nawet kilkanaście procent wartości funkcji celu. W miarę zwiększania się stopnia automatyzacji nadzoru i diagnostyki stanowiska roboczego udział czasu uzupełniającego będzie odgrywał coraz mniejszą rolę.

17. Wzrost efektywności obróbki, dzięki skracaniu czasów głównych maszynowych, jest współcześnie możliwy przede wszystkim przez zwiększanie prędkości skrawania. Zwiększanie posuwu jest natomiast ograniczone pogarszającą się chropowatością obrobionej powierzchni, a głębokość skrawania wynika z naddatku obróbkowego. Opłacalne ekonomicznie zwiększanie prędkości skrawania możliwe jest dzięki stosowaniu ostrzy z nowoczesnych materiałów o bardzo dobrych właściwościach skrawnych, a także dzięki dynamicznym napędom o dużej mocy, pozwalającym na realizowanie dużych prędkości obrotowych wrzecion.

18. Wielostanowiskowość obsługi może być czynnikiem powodującym obniżanie kosztów wytwarzania, również w tych przypadkach, gdy zakłóca to wyraźnie i wydłuża czynności pomocnicze wykonywane przez operatora. Obsługa ograniczona do dwóch, trzech stanowisk może zmniejszyć koszty operacji, ale niemal zawsze ma to wpływ na spadek wydajności wytwarzania.

19. Daje się zauważyć bardzo niewielkie, bezpośrednie oddziaływanie kosztów narzędziowych ($K_o + K_p$) na koszty operacji. Wpływ ceny oprawki jest niemal pomijalnie mały ($< 1\%$). Udział ceny płytki skrawającej w kosztach operacji jest nieco większy i wynosi

zazwyczaj kilka procent. Wobec tego w wielu wypadkach opłacalne byłoby zastosowanie wielokrotnie droższych narzędzi, ale umożliwiających skrócenie czasu wymiany ostrza lub też eliminujących konieczność określania korekcji. Wynika to z bardziej znaczącego oddziaływania czasów trwania tych czynności na funkcje celu niż oddziaływania kosztów płytki i oprawki.

20. Obrabiarki sterowane numerycznie są w większości przeznaczone do obróbki przedmiotów o skomplikowanych kształtach i dużej dokładności. Jednak wtedy, gdy zdarzają się im przestoje, celowe może być używanie ich także do wykonywania przedmiotów prostych i mniej dokładnych, oraz do uzupełniającej produkcji części zamiennych.

21. Dążenie do dużej koncentracji nie tylko zabiegów, ale i różnych technik wytwarzania w obrębie jednego stanowiska pracy, jest powodem do prób integracji różnych technik łączenia, jak np. wciskanie, spawanie, montaż, z możliwościami obróbkowymi różnych odmian skrawania, a także ze zdolnością do precyzyjnego przemieszczania się głowic narzędziowych, jakimi dysponuje obrabiarka i jej układ sterowania numerycznego. Takie poszukiwania są racjonalnie uzasadnione dążeniem do zmniejszenia kosztów maszynowych w porównaniu do kosztów osiąganych tradycyjnymi technologiami z oddzielnie prowadzonymi operacjami. Ponadto znacznie skraca się czasy pomocnicze, jest ograniczany lub eliminowany transport międzystanowiskowy, zmniejsza się też powierzchnia hal fabrycznych i liczba pracowników konieczna do wytworzenia danego wyrobu.

22. W ostatnich latach wzrasta silnie świadomość ochrony środowiska naturalnego. Powstaje wiele przepisów i aktów prawnych normujących te problemy. Dążą one do standardów Unii Europejskiej, które są bardzo restrykcyjne wobec wszelkich działań mogących powodować zanieczyszczanie środowiska. Zwiększają się i będą się coraz bardziej pogłębiać problemy z wydalaniem i utylizacją zużytych środków chłodząco-smarujących lub ich pozostałości. Powoduje to zwiększenie kosztów wytwarzania, jeśli stosuje się płyny obróbkowe, to zaś wymaga zastanowienia się nad innymi, alternatywnymi sposobami wspomagania procesu skrawania lub wszędzie tam, gdzie to jest możliwe, obróbką bez użycia środków chłodząco-smarujących, a z zastosowaniem nowoczesnych materiałów narzędziowych.

8.3. WYTYCZNE DO DALSZYCH BADAŃ

Praca nie wyczerpuje wszystkich problemów z bardzo szerokiej tematyki związanej z efektywnością wytwarzania skrawaniem przedmiotów osiowosymetrycznych w zintegrowanym wytwarzaniu. Istnieje jeszcze wiele zagadnień, których rozwiązanie mogłoby przyczynić się do zwiększenia wydajności i zmniejszenia kosztów skrawania na obrabiarkach sterowanych numerycznie. Jeśli chodzi o **działania utylitarne**, to wynikają one z przedstawionych wniosków i mogą odnosić się do tych kierunków i czynników, dla których oceniono, że można oczekiwać największych efektów ekonomicznych i technicznych. Przedstawione wnioski odnoszą się nie tylko do skrawania i optymalizacji operacji technologicznych, ale także do konstrukcji obrabiarek oraz organizacji produkcji.

Dalszymi kierunkami badań naukowych mogą natomiast być:

– prace nad większym wspomaganie komputerowym procedur optymalizacyjnych parametrów skrawania, a także optymalizacją całych operacji technologicznych, tak aby

mogły być one wykonywane niemal w pełni automatycznie, a rola technologa powinna ograniczać się wówczas do wyboru odpowiednich opcji podpowiadanych przez komputer i do zatwierdzania wyników optymalizacji

- prace nad uwzględnieniem w procedurach optymalizacyjnych stochastycznego charakteru takich czynników, jak: trwałości ostrza, niektóre ograniczenia brzegowe, a także jakość obróbki

- prace nad możliwościami takiego modułowego budowania programów optymalizacyjnych, które można by łatwo, np. za pomocą odpowiednich interfejsów programowych, włączać w większe struktury wspomagane komputerowo projektowania procesów technologicznych

- tworzenie elektronicznych baz danych przedsiębiorstwa, które są niezbędne do tego, aby można było szybko, łatwo i niezawodnie pozyskiwać wszelkie informacje niezbędne do podejmowania decyzji, uruchamiania procedur optymalizacyjnych itp.

Zawsze będzie istniało zapotrzebowanie na badania zwiększania efektywności wytwarzania, którą warunkują, w dużej mierze, optymalizacja parametrów skrawania oraz struktur całych operacji i procesów technologicznych. Będzie to ważny temat, zarówno dla użytkowników, jak i wytwórców obrabiarek skrawających. Tego bowiem wymagają warunki przetrwania i rozwoju przedsiębiorstw wobec coraz bardziej agresywnej konkurencji i dużego otwarcia naszego przemysłu na rynki światowe.

Zagadnienia, będące przedmiotem pracy, były opracowywane i dotyczyły wytwarzania na tokarkach sterowanych numerycznie, jednak większość z nich ma ogólny charakter i jeśli nie bezpośrednio, to w łatwy sposób można je odnieść do innych obrabiarek.

LITERATURA

- [1] ABEL R.: *Automatisierungsgerechte Spanformung mit neuzeitlichen Schneidstoffen*. VDI-Berichte, 1984, Nr 517.
- [2] ABEL R.: *Beschichtete Schneidkeramik- und Cermet-Wendeschneideplatten*. dima, 1992, Nr 7/8.
- [3] ABEL R.: *Cermets – bestens Geeignet für das Schlichten*. Werkzeuge für die Spanende Fertigung, 1989, Nr 9.
- [4] AGAPIOU J.: *Full Speed Ahead*. Cutting Tool Engineering (43)1991, No. 2.
- [5] ARASZKIEWICZ S., KASZEWIAK J.: *Elastyczne systemy produkcyjne na 7. EMO w Mediolanie*. Przegląd Mechaniczny, 1988, nr 12–14.
- [6] ARLT M., FINK H., WEISS D.: *Rationelle Gestaltung der Strategie zur Ermittlung optimaler technologischer Arbeitswerte*. Fertigungstechnik und Betrieb (25)1975, Nr 2.
- [7] AUER J.: *Werkzeuge mit integriertem CAD-System und relationaler Datenbank verwalten*. ZwF (87)1992, Nr 7.
- [8] BALBACH J.: *Organisation des Betriebsmittelwesens als Baustein zur Rüstzeiterkürzung*. Werkstattstechnik, 1988, Nr 78.
- [9] BAŁAMUCKI J., CICHOSZ P., ŻABA K.: *Zasady doboru warunków skrawania w zintegrowanym wytwarzaniu*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń (21)1997, nr 1.
- [10] BAŁAMUCKI J., CICHOSZ P., KOCH J., KUZINOVSKI M., SZUBERT Z., WERYŃSKI J., ŻEBROWSKI H., ŻABA K.: *Opracowanie systemu gospodarki narzędziowej w zintegrowanym zarządzaniu*. Raporty Inst. Technol. Masz. i Aut. PWr., serii Sprawozdania nr 9/97, 1997.
- [11] BAŁAMUCKI J., GLADYSZ J., KOCH J., STREUBEL A., SZUBERT Z., SZAWDZIN K.: *Umweltgerechte Zerspanungstechnik, Reduzierung und Ersatz von Fertigungshilfsstoffen beim Bohren*. Projekt: STD – 2-EC ERB CIPACT 930167, Raporty Inst. Technol. Masz. i Aut. PWr., Wrocław 1996, nr 41.
- [12] BAŁAMUCKI J., CICHOSZ P., DZIUBA R., KOCH J., SZUBERT Z., ŻABA K., ŻEBROWSKI H.: *Zarządzanie narzędziami*. Wrocław, Wrocławskie Centrum Transferu Technologii, 1996.
- [13] BAŁAMUCKI J., CICHOSZ P., STORCH B., SZUBERT Z.: *Stale szybko tnące o wyższych własnościach skrawnych, analiza wyników badań wytrzymałościowych noży tokarskich oraz wskaźniki użytkowe noży ze stali szybko tnących*. Przegląd Mechaniczny, 1983, nr 5.
- [14] BAŁAMUCKI J., CICHOSZ P., SZUBERT Z.: *Konstrukcja noży składanych a dokładność obróbki*. Konferencja naukowo-techniczna nt. Rozwój Narzędzi Tokarskich – PAFANA'95, Łódź, 20.09.1995.
- [15] BARTSCH S., CASSEL C.: *Cermets zum Drehen von Stahlwerkstoffen*. VDI-Z, (132) 1990, Nr 5.
- [16] BARTSCH S.: *Stufenweise Automatisierung vom Bearbeitungszentrum zum flexiblen Fertigungssystem*. Werkstatt und Betrieb (123)1990, Nr 9.
- [17] BELLMANN B., BECKER F., BECKER F.: *Werkzeuge automatisch messen*. Sonderdruck HERTEL, WB, 1989, Nr 10.

- [18] BETZ F., SCHÄFER W.: *Zur Problematik der Verschleisserfassung an Zerspanungswerkzeugen*. Annals of the CIRP, 1973, No. 22/1.
- [19] BIAŁEK M.: *Dobór optymalnych parametrów skrawania na przykładzie toczenia wzdłużnego w obróbce jednonarzędziowej*. Prace naukowe – Mechanika, nr 45, Politechnika Warszawska, Warszawa, 1977.
- [20] BIAŁEK M.: *Kierunki rozwoju współczesnych tokarek*. VI Ogólnokrajowa Konferencja Obrabiarkowa KO '96, Warszawa, 3–4.12.1996.
- [21] BIAŁEK M.: *Wymagania stawiane współczesnym obrabiarkom skrawającym*. Przegląd Mechaniczny, 1997, nr 11–12.
- [22] BIEBLER K.: *Beitrag zur Entwicklung und Testung neuer Strategien und Modelle zur Primärdatengewinnung sowie zur Standzeit- und Reststandzeitprognose für spanende Werkzeuge*. Dissertation, Technische Universität, Dresden, 1994.
- [23] BONETTI R.: *Beschichtung von Hartmetallen: Entwicklungen und Anwendungen, Trends in der Zerspanungstechnik*. Schweizerischer Verband für Materialtechnik, Pullen, 1996.
- [24] BOOTHAROYD G., RUSEK P.: *Wyznaczanie okresu trwałości narzędzia przy uwzględnianiu wymagań rentowności produkcji*. Mechanik, 1975, nr 3.
- [25] BREUNINGER R., SADOWY N.: *Einfache Optimierung der Schnittgeschwindigkeiten bei Dreharbeiten*. TZf.prakt. Metallbearbeitung (65) 1971, Nr 9.
- [26] BRUKWICKI J.: *Techniczne aspekty realizacji procesu obróbki z przepływem dodatkowego prądu przez strefę kontaktu (TCAC)*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 1993, nr 11.
- [27] BÜHLER E., HABAN D., REIBETANZ T., STORR A.: *Fortschritte im CAD/CAM-Bereich durch neuartige Schnittstellen*. FTK'94 Fertigungstechnisches Kolloquium „Schriftliche Fassung der Vorträge zum Fertigungstechnischen Kolloquium, Stuttgart, 8/9 November 1994.
- [28] BURMESTER H.: *Eine Strategie zur Ermittlung der kostengünstigen Schnittdaten bei der spanenden Formung*. TZf. prakt. Metallbearbeitung (69)1975, Nr 2.
- [29] BURMESTER H.: *Spanende Formung mit optimierten Arbeitsbedingungen*. TZf. prakt. Metallbearbeitung (67)1973, Nr 9.
- [30] CHARCHUT W., TSCHÄTSCH H.: *Werkzeugmaschinen*. Carl Hanser Verlag, München–Wien, 1984.
- [31] CHOROSZY B.: *Mechanizm zużywania się ostrzy podczas skrawania wibracyjnego*. Pr. nauk. Inst. Technol. Masz. i Aut. PWr. nr 48, Wrocław 1991.
- [32] CHOROSZY B.: *Wpływ wymuszonych drgań narzędzia w kierunku wzdłużnym na trwałość ostrza*. Mechanik, 1988, nr 9.
- [33] CICHOSZ P.: *Zakłócenia funkcji wydajności frezowania rozrzutem trwałości narzędzi*, Archiwum Technologii Budowy Maszyn, 1984, nr 3/U.
- [34] CICHOSZ P., GROMADA G., ŻABA G.: *The Graphic Part of the Database for Tool Kits*, micro-CAD'95, International Computer Science Conference. Miskolc–Egyetemvaros, February 23, 1995.
- [35] CICHOSZ P.: *Metodyka dynamicznej optymalizacji parametrów skrawania w toczeniu wzdłużnym*. Praca doktorska, Inst. Technol. Bud. Masz. PWr., Wrocław 1979.
- [36] CICHOSZ P., i inni: *Nowoczesne narzędzia skrawające i oprzyrządowanie*. Pr. nauk. Inst. Technol. Masz. i Aut. PWr. W: Wrocławskie sympozjum – Automatyzacja Produkcji. Innowacje w Technice i Zarządzaniu, Wrocław 1997.
- [37] CICHOSZ P., KUZINOVSKI M., MIERNIK M.: *Diagnozowanie stanu zużycia ostrza za pomocą sieci neuronowej*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń (21) 1997, nr 1.
- [38] CICHOSZ P., GADŻAŁA F., ŻEBROWSKI H.: *Wpływ intensywnego chłodzenia strefy skrawania na zużycie ostrza i naprężenia w WW po toczeniu*. Pr. nauk. Inst. Technol. Masz. i Aut. PWr. nr 49, W: Podstawy Technologii Maszyn '91, Wrocław 1991.

- [39] CICHOSZ P., KUZINOWSKI M., ŻEBROWSKI H.: *Einfluß der Ausgewählten Kühlungsverfahren auf Verschleiß von Beschichteten Hartmetall-Schneiden*. VII Internationale Werkzeugkonferenz und Werkzeugausstellung, 25 Jährige Jubiläumskonferenz, Miskolc, 30.09–1.09.1993.
- [40] CICHOSZ P., KUZINOWSKI M.: *Pomiar i ustawianie narzędzi skrawających w elastycznych gniazdach produkcyjnych*. W: I Szkoła Użytkowników Maszyn Pomiarowych, Bielsko-Biała, 18–20 kwietnia 1994.
- [41] CICHOSZ P., STORCH B., SZUBERT Z.: *Wpływ konstrukcji składanych noży tokarskich na powtarzalność położenia wierzchołka ostrza*. W: Narzędzia Skrawające i Ścierne, NASS'85, WSI Koszalin, Lubniewice, 23–25 maj 1985, Materiały i Narzędzia Skrawające, WSI Koszalin, 1985.
- [42] CICHOSZ P., STORCH B., SZUBERT Z.: *Erweiterung des Lösungsfeldes bei der Optimierung des Drehens durch Einbeziehung der Schneidengeometrie*. W: Gestaltung von Fertigungsprozessen im Maschinenbau, 3 Fachtagung, TH Magdeburg, 18–19 September 1985.
- [43] CICHOSZ P., SZUBERT Z., TALAREK R.: *Wpływ stopnia przerobu plastycznego na własności skrawne stali szybko tnącej SW7M po przetopie elektrodożuwowym*, Mechanik, 1983, nr 11.
- [44] CICHOSZ P., SZUBERT Z.: *Ocena jakości narzędzia z punktu widzenia rozrzutu jego trwałości*. W: Badania Narzędzi w Warunkach Laboratoryjnych i Przemysłowych, I Międzynarodowe Sympozjum, Kraków–Janowice–Tarnów, kwiecień 1980, Politechnika Krakowska, 1980.
- [45] CICHOSZ P., ŻEBROWSKI H.: *Nakładany łamacz wióra*. Int.CI5 B23B 27/22, Politechnika Wrocławska, Polska, patenty nr 163980, nr 164244, nr 164299, nr 1643600, nr 164301, nr 164469.
- [46] CICHOSZ P., ŻEBROWSKI H.: *Optymalne zakresy parametrów toczenia wykańczającego narzędziami z ostrzami ceramicznymi produkcji krajowej*. Archiwum Technologii Budowy Maszyn, 1990, nr 8.
- [47] CICHOSZ P., ŻEBROWSKI H.: *Platka podporowa ostrza skrawającego*. Int.CI5 B23B 27/22, Politechnika Wrocławska, Polska, patenty nr P287668-P287671.
- [48] CICHOSZ P., ŻEBROWSKI H.: *Wpływ rozkładów statystycznych trwałości narzędzia na koszty i wydajność toczenia*. W: Badania narzędzi w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych, I Międzynarodowe Sympozjum, Kraków–Janowice–Tarnów, kwiecień 1980, Politechnika Krakowska, 1980.
- [49] CICHOSZ P., ŻEBROWSKI H.: *Zakłócenia losowe trwałości narzędzi a efekty ekonomiczno-produkcyjne toczenia*. W: Zastosowanie Matematyki w Technice, Ogólnopolskie Seminarium Naukowe, Ośrodek Badań i Konsultacji TWP Gorzów Wielkopolski, Gorzów Wielkopolski–Witnica, 19–20 październik 1981, OBIK, 1981.
- [50] CICHOSZ P., ŻEBROWSKI H.: *Zależność kosztów i wydajności toczenia od rozrzutu trwałości narzędzia*. Mechanik, 1980, nr 8.
- [51] CICHOSZ P.: *Dobór optymalnych warunków toczenia narzędziami składanymi*, Mechanik, 1990, nr 11/12.
- [52] CICHOSZ P.: *Evaluation of Operating Time and Remanent Durability of Tools in Numerically Controlled Lathes*. microCAD'96, International Computer Science Conference, Miskolc–Egyetemvaros, 29.02.1996.
- [53] CICHOSZ P.: *Mechanizmy zużycia oraz właściwości skrawne ostrzy ceramicznych spiekanych w atmosferze powietrza i w próżni*. W: Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 1989, nr 1–4.
- [54] CICHOSZ P.: *Wieloostrzowa płytka skrawająca*. Int.CI5 B23B 27/16, Politechnika Wrocławska, Polska, patenty nr 163935-163937 i nr 163977-163979.
- [55] CICHOSZ P.: *Wpływ geometrii ostrza ceramicznego i parametrów obróbki na siły skrawania w toczeniu kształtującym i wykańczającym*. Mechanik, 1991, nr 10.
- [56] CICHOSZ P.: *Wpływ zakłóceń losowych obiektów technicznych na budowę modelu matematycznego obiektu badań*. W: Metody i Środki Projektowania Automatycznego, III Konferencja Inst. Technol. Bud. Masz. Pol. Warsz., 19–21 listopad 1981, zbiór referatów cz. 2, Warszawa, 1981.

- [57] CICHOSZ P.: *Kierunki zwiększania efektywności toczenia*, Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, PAN (17)1993, nr 4.
- [58] COLDING B., JACOBSON G.: *Zweckmässigkeit analytischer Standzeitdarstellungen für die Verfahrensoptimierung in der Spannungstechnik*. Fertigungstechnik und Betrieb (26)1976, Nr 1.
- [59] COLDING B., KÖNIG W.: *Validity of the Taylor Equation in Metal Cutting*. Annals of the CIRP (25)1971, No. 5.
- [60] CSELLE T.: *Hartstoffbohrer: Schon voll ausgereizt?* Gottlieb Gühring KG, Albstadt-Ebingen, 1996.
- [61] DANIEL A., DERSTROFF B.: *Komplettbearbeitung in einer Drehmaschine*. Werkstatt und Betrieb (121)1988, Nr 5.
- [62] DARLEWSKI J., KAWALEC M., OLSZAK W., GAWLIK J., STREUBEL A.: *Narzędzia i procesy obróbki wiórowej*. Ogólnokrajowa Konferencja Obrabiarkowa KO'96, Warszawa, 3–4.12.1996.
- [63] DARLEWSKI J.: *Kierunki badań narzędzi do obróbki wiórowej*. Sympozjum nt. Wybrane Problemy Projektowania Procesów Technologicznych, Gdańsk, 26–27 maja 1994.
- [64] DARLEWSKI J.: *Narzędzia do obróbki wiórowej na 11 EMO w Mediolanie*. Mechanik, 1995, nr 10.
- [65] DARLEWSKI J.: *Postępy w obróbce wiórowej*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń (20) 1996, nr 5.
- [66] DARLEWSKI J.: *Tendencje rozwoju narzędzi do obróbki wiórowej*. Mechanik, 1994, nr 1.
- [67] DEGENHARD U.: *Die Bedeutung des Werkzeugverschleisses im Hinblick auf eine Optimierung der Zerspanungsbedingungen*. Industrie Anzeiger (90) 1968, Nr 93.
- [68] DEGENHARD U.: *Grundlagen zur Optimierung der Zerspanungsbedingungen unter besonderer Berücksichtigung des Werkzeugverschleißes*. Dissertation, RWTH Aachen, 1968.
- [69] DENG J., AI X., ZHANG J.: *Effect of Whisker Orientation on the Friction and Wear Behaviour of $Al_2O_3 / TiB_2 / SiC_w$ Composites in Sliding Wear Test and in Machining Processes*. Wear (201)1996.
- [70] DENKENS B.: *Beitrag zum Verschleißverhalten von Schneidkeramik bei wechselnder Schnitttiefe*. Werkstattstechnik (81)1991, Nr 1.
- [71] DENKENS B.: *Über das Verschleißverhalten von Schneidkeramik bei wechselnder Schnitttiefe*. Werkstattstechnik (81)1991, Nr 1.
- [72] DERSTROFF B., SAHM D.: *Hochgeschwindigkeitsdrehfräsen, Hochgeschwindigkeitsbearbeitung*. München–Wien, Carl Hanser Verlag, 1996.
- [73] DĘBSKI J.: *Model racjonalnego doboru parametrów skrawania i systemu zamiany narzędzi dla układów wielonarzędziowych automatów tokarskich wielowrzecionowych*, Mechanik, 1992, nr 11.
- [74] DOPIERAŁA A.: *Zużycie ostrzy wiertłofrezów*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, 1994, nr 13.
- [75] DÖPPER W., FABRY J., KAMMRMEIER D.: *Umweltverträgliche Zerspanung aus Sicht eines Werkzeugherstellers, Auf dem Weg zur Trockenbearbeitung*. Düsseldorf, VDI Verlag GmbH, 1996.
- [76] EVERSHEIM W., KALS H., KÖNIG W., LUTTERVELT C., MILBERT J., STORR A., TÖNSHOFF H., WECK M., WEULE H., ZDEBLICK W.: *Tool Management: The Present and the Future*. Annals of the CIRP (40)1991, No. 2.
- [77] FELTEN K.: *Die Gestaltung von Fertigungssystemen zur Bearbeitung von Rotationsteilen*. Dissertation RTHW, Aachen 1977.
- [78] FIKUS J.: *Efekty automatyzacji technicznego przygotowania produkcji*. Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna INTERTECHNO nt. Efektywność ekonomiczna automatyzacji, Rydzyna, 7–10 października 1987.
- [79] FILIPOWSKI R.: *Dobór optymalnych parametrów skrawania dla tokarek uniwersalnych za pomocą EMC*. Mechanik, 1972, nr 4.

- [80] FRIEDL A., DITTRICH V., WIECHMANN R.: *Automatisierter Werkzeugfluß in flexiblen Fertigungssystemen*. ZWF (85)1990, Nr 2.
- [81] GAWLIK J., KARBOWSKI K.: *Prognozowanie stanu ostrza skrawającego z zastosowaniem sieci neuronowych*. Mechanik, 1997, nr 4.
- [82] GAWLIK J., KULAWIK E.: *Ekonomiczne aspekty eksploatacji narzędzi skrawających w obróbce zautomatyzowanej*. Archiwum Technologii Budowy Maszyn, 1987, nr 6.
- [83] GAWLIK J.: *Prognozowanie stanu zużycia ostrzy narzędzi w procesie skrawania*. Monografia nr 66, Politechnika Krakowska, Kraków 1988.
- [84] GEBAUER D.: *Systeme zur rechnerunterstützten Schnittwertoptimierung, Zeit-, Kosten-, und Methodenplanung für die spanende Fertigung*. Dissertation, Universität Stuttgart, 1980.
- [85] GORANSKIJ G.K.: *K teorii avtomatizacii inżynernogo truda*. Mińsk, IAHBSSR, 1962.
- [86] HAKE U.: *Steuern und Überwachen des Werkzeugflusses*. Betriebsmittelseminar '91, IFS Universität Stuttgart, Oktober 1991.
- [87] HAMMER H., VIEHWEGER B.: *Neuartiges Werkzeugschnellwechselverfahren für Bearbeitungszentren*. ZWF, 83(1988), Nr 4.
- [88] HÄNSE W.: *Standzeitkriterium für das Drehen auf ACC-Maschinen*. Industrie Anzeiger (97)1975, Nr 33.
- [89] HAY R.: *Diamond-coated tools prove their value*. American Machinist, 1994, No. 5.
- [90] HESBACHER M.: *More effective Milling with Six Legs*. European Production Engineering (21)1997, August.
- [91] HERRMANN J.: *Die Ermittlung von optimalen Schnittbedingungen mit Hilfe der multiplen linearen Regressionsanalyse*. ZWF (69)1974, Nr 4.
- [92] HINDUJA S.: *Important Features of TECHTURN and TECHMILL – Computer – Aided – Process – Planning Systems*. Seminarium nt. Technologicznie zorientowane systemy CAM, Wrocław, 13.06.1997.
- [93] HONCZARENKO J., KRZYŻANOWSKI J., SZWENGIER G.: *Modułowe zespoły w budowie obrabiarek*. VI Ogólnokrajowa Konferencja Obrabiarkowa KO'96, Warszawa, 3–4.12.1996.
- [94] HOPEJ M., SZELOCH M.: *Lean Management – nowa koncepcja zarządzania*. Przegląd Organizacji, 1994, nr 2.
- [95] HOWALD U.: *Simultan-CNC-Drehbearbeitung mit angetriebenen Werkzeugen*. München, Carl Hanser Verlag, 1988.
- [96] HYŻY J., STÓS J., KASPRZAK A.: *Określenie obszaru bezpiecznego użytkowania samocentrujących uchwytów tokarskich*. Prace Instytutu Obróbki Skrawaniem, Kraków, 1995, nr 53.
- [97] ICKS G.: *Maschinenseitige Grenzen des Hochgeschwindigkeitsdrehens*. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 1981.
- [98] ICKS G.: *Maschinenseitige Voraussetzungen für die Zerspanung mit hohen Schnittgeschwindigkeiten*. Seminar: Konstruktion und Betrieb von Werkzeugmaschinen, Stuttgart, 30.10–1.10.1981.
- [99] ICKS G.: *Hochgeschwindigkeitsdrehen mit Schneidkeramik*. Industrie Anzeiger, 1980, Nr 25.
- [100] IKAWA N., DONALDSON R., KOMANDURI R., KÖNIG W., MCKEOWN P., MORIWAKI T., SROWERS I.: *Ultraprecision Metal Cutting – The Past, the Present and the Future*. Annals of the CIRP (40)1991, No. 2.
- [101] ISRAELSSON J.: *Carbide Technology Improves Insert Performance*. American Mechanist, 1996, No. 1.
- [102] JACOB E.: *Anwendung des Programms AUTOTECH-KOFA 2 zur maschinellen Optimierung der Arbeitswerte beim Schruppdrehen*. Fertigungstechnik und Betrieb (25)1975, Nr 11.

- [103] JACOBS H.J., KNÖRRICH A.: *Spanform als technische Grenze bei der manuellen und maschinellen Optimierung des Abspannverfahrens Drehen mit Wendeschneidplatten*. Fertigungstechnik und Betrieb (25) 1975, Nr 12.
- [104] JACOBS H.J.: *Datenbankprozessoren für Kenngrößen der Zerspanbarkeit zur automatischen Verfahrensoptimierung in der Abspanntechnik*, Fertigungstechnik und Betrieb, 1971, Nr 1.
- [105] JACOBS H.J.: *Grundlagen der maschinellen, externen Verfahrensoptimierung in der Abspanntechnik*. Fertigungstechnik und Betrieb (21)1971, Nr 2.
- [106] JACOBS H.J.: *Verfahrensunabhängige Zielfunktionen zur maschinellen, externen Verfahrensoptimierung in der Abspanntechnik*. Fertigungstechnik und Betrieb (21)1971, Nr 6.
- [107] JACOBS H.J., JACOB E., KOCHAN D.: *Spanungsoptimierung*. Berlin, VEB Verlag Technik, 1977.
- [108] JAKOBS H.J.: *Technologische Grundlagen der stetigen internen Verfahrensoptimierung in der Abspanntechnik*. Fertigungstechnik und Betrieb (21)1971, Nr 5.
- [109] JAKUBIEC W., MIGACZ H.: *Badanie efektywności cyklicznej wymiany uprzedzającej grup narzędzi w liniach automatycznych*. Praca doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź, 1978.
- [110] JAKUBIEC W.: *Modele sterowania zamianą narzędzi w obrabiarkach automatycznych*. Posiedzenie Sekcji Podstaw Technologii Komitetu Budowy Maszyn PAN, Bielsko-Biała, 22–23.10.1996.
- [111] JANKOWSKI A.: *Nowoczesna gospodarka chłodziwami w fabryce SKF*. Mechanik, 1996, nr 2.
- [112] JAVAHIR I., LUTTERVELT C.: *Recent Developments in Chip Control Research and Applications*. Annals of the CIRP (42)1994, No. 2.
- [113] JEMIELNIAK K., KOSMOL J.: *Diagnostyka narzędzia i procesu skrawania – stan aktualny i kierunki rozwoju*. Mechanik, 1996, nr 10.
- [114] JEMIELNIAK K., KWIATKOWSKI L., ZAWISTOWSKI J.: *Możliwość przewidywania zużycia ostrza noża tokarskiego przy skrawaniu ze zmiennymi parametrami*, Archiwum Technologii Budowy Maszyn, 1987, nr 6.
- [115] JEMIELNIAK K., SZAFARCZYK M., SZEWCZYK W., ZAWISTOWSKI J.: *Zużycie noży tokarskich przy obróbce ze zmiennymi parametrami skrawania*. Mechanik, 1983, nr 1.
- [116] JEMIELNIAK K., ZAWISTOWSKI J.: *Prognozowanie niezawodności narzędzi skrawających*. Mechanik, 1983, nr 8.
- [117] JEMIELNIAK K., ZAWISTOWSKI J.: *Testowanie rozkładu trwałości narzędzia na podstawie wyników badań prowadzonych w celu ustalenia zależności $T=f(v,p,g,...)$* . Zesz. Nauk. Pol. Śląskiej, seria: Mechanika, 1984, nr 81.
- [118] JENRICH J., FRITZ H., FAHRBACH C., RUDOLFF H., PHILIPP W.: *Direktantriebe im Werkzeugmaschinenbau*. FTK'94 Fertigungstechnisches Kolloquium „Schriftliche Fassung der Vorträge zum Fertigungstechnischen Kolloquium, Stuttgart, 8/9 November 1994.
- [119] JĘDRZEJEWSKI J.: *Techniki rozwoju i wytwarzania nowoczesnych wyrobów*. Inżynieria Maszyn, 1996, nr 1.
- [120] JĘDRZEJEWSKI J., REIFUR B., BŁARZEJEWSKI A.: *Obrabiarki do części korpusowych – stan rozwoju*. Mechanik, 1997, nr 4.
- [121] KACEW P.G.: *Kontrola narzędzi skrawających metodami statystycznymi*. Warszawa, WNT, 1978.
- [122] KACZMAREK J.: *Podstawy obróbki wiórowej ścierniej i erozyjnej*. Warszawa, WNT, 1970.
- [123] KARPUSCHEWSKI B., ASCHE J., BLAWIT C.: *Neue Entwicklungen in der Zerspanungstechnologie, Trends in der Zerspanungstechnik*. Schweizerischer Verband für Materialtechnik, Pullen, 1996.
- [124] KAUFELD M.: *Hochgeschwindigkeitsfräsen aus der Sicht von Anwendern und Maschinenbauern*. Werkstatt und Betrieb (123)1990, Nr 10.

- [125] KAUFELD M.: *Rationalisierungs-Effekt beim Hohgeschwindigkeitsfräsen*. Werkstatt und Betrieb, 123 (1990), Nr 9.
- [126] KAWALEC M., KRÓL G.: *Efektywność ekonomiczna stosowania ostrzy z różnych materiałów narzędziowych w warunkach toczenia hartowanej stali ŁH15*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, Poznań, 1993, nr 11.
- [127] KAWALEC M.: *Fizyczne i technologiczne zagadnienia przy obróbce z małymi grubościami warstwy skrawanej*. Seria Rozprawy nr 106, Wyd. Pol. Pozn., Poznań 1980.
- [128] KAWALEC M.: *Skrawanie hartowanych stali i żeliwa narzędziami o określonej geometrii ostrza*. Seria Rozprawy, nr 234, Wyd. Pol. Pozn., Poznań, 1990.
- [129] KEGG R.: *One-line Machine and Process Diagnostics*. Annals of the CIRP, 1984, No. 2.
- [130] KIEF H.: *FFS-Handbuch '92/93: Einführung in Flexible*. München–Wien, Carl Hanser Verlag, 1992.
- [131] KIEF H.: *NC/CNC Handbuch '97/98*. München–Wien, Carl Hanser Verlag, 1997.
- [132] KLAEGER S.: *Technologische Konzeption zur systemtechnischen Gestaltung und Entwicklung flexibler Maschinensysteme*. Rozprawa hab., TH Magdeburg 1972.
- [133] KLOCKE F., GERSCHWILER K.: *Trockenbearbeitung – Grenzen und Perspektiven, Trends in der Zerspanungstechnik*. Schweizerischer Verband für Materialtechnik, Pullen, 1996.
- [134] KNUPFER H.: *EDV im Werkzeugmanagement – lohnt sich das?* Betriebsmittelseminar'92, ISW Universität Stuttgart, 16 Okt. 1992.
- [135] KOCH J.: *Współczesne tendencje i problemy w budowie obrabiarek i systemów obróbkowych*. Sympozjum nt. Wybrane Problemy Projektowania Procesów Technologicznych, Gdańsk, 26–27 maja 1994.
- [136] KOCHAN D., JACOBS J.: *Automatische Festwert- und Optimierung technologischer Areitsgrößen in der metallverarbeitenden Industrie – Teil I, II, III*. Fertigungstechnik und Betrieb (20) 1970, Nr 10, 11, 13.
- [137] KOCHAN D.: *Nutzungsformen und Anwendungsgebiete von Optimierungsmodellen für die Abspanttechnik*. Annals of the CIRP (22) 1973, Nr 1.
- [138] KOĆ A., POZNAŃSKI J., WROTNY L.T.: *Normalizacja w zakresie obrabiarek, narzędzi i oprzyrządowania technologicznego*. VI Ogólnokrajowa Konferencja Obrabiarkowa KO'96, Warszawa, 3–4.12.1996.
- [139] KOMANDURI R.: *Status of High-Speed Machining*. Carbide and Tool Journal, September/ October 1986, November/December 1986.
- [140] KÖNIG W., GOLDSTEIN M., IDING M.: *Drehen gehärteter Stahlwerkstoffe*. Industrie Anzeiger, 1988, Nr 14.
- [141] KÖNIG W., CRONJÄGER L., SPUR G., TÖNSHOFF H., VIGNEAU M., ZDEBLICK W.: *Machining of New Materials*. Processing of Advanced Materials, 1991, No. 1.
- [142] KÖNIG W., DEPIEREUX R., ESSEL K.: *Optimierung der Schnittbedingungen für hoch automatisierte Werkzeugmaschinen Untersuchungen beim Drehen mit erhöhten Schnittbedingungen*, Opladen, Westdeutscher Verlag, 1972.
- [143] KÖNIG W., DEPIEREUX W.: *Wie lassen sich Vorschub und Schnittgeschwindigkeit optimieren?* Industrie Anzeiger (91) 1969, Nr 61.
- [144] KÖNIG W., LAUSCHER J., LINK R.: *Anwendungsbereiche der Siliziumnitrid-Schneidkeramik*. Industrie Anzeiger, 1987, Nr 13.
- [145] KÖNIG W., LOWIN R., STEFFENS K., HANN V.: *Aspekte zur Technologie der Hochgeschwindigkeitszerspanung*. Industrie Anzeiger, 1981, Nr 1/2.
- [146] KÖNIG W., OTTO F., ESSEL K.: *Automatisches Führen des Drehprozesses nach Optimalwertkriterien*. Industrie Anzeiger (98) 1976, Nr 19.

- [147] KÖNIG W., ZABOKLICKI A.: *Laserunterstützte Drehbearbeitung von Siliziumnitrid-Keramik*. VDI-Z, (135)1993, Nr 6.
- [148] KÖNIG W.: *Fertigungsverfahren*. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1990.
- [149] KOPPLIN D., GROßMANN G., MALLE K.: *Beschichtete Cermets: Gewinn für das Drehen*. VDI-Z (133)1991, Nr 2.
- [150] KORZAN B.: *Grafy i sieci – Poradnik Inżyniera Matematyka*. T. 1, Warszawa, WNT, 1986.
- [151] KOSMOL J.: *Automatyzacja obrabiarek i obróbki skrawaniem*. Warszawa, WNT, 1995.
- [152] KOSMOL J.: *Elektryczne silniki i układy napędowe obrabiarek i maszyn technologicznych*. Gliwice, Wyd. Pol. Śląskiej, 1993.
- [153] KOSMOL J.: *Obrabiarki ciężkie*. Przegląd Mechaniczny, 1997, nr 13.
- [154] KRAMER W., WIECHMAN D.: *BDE-gestützte Kosteninformationssysteme*. CIM-Management, 1990, Nr 3.
- [155] KRONNENBERG M.: *Ersatz der Taylor-Formel durch eine neue Standzeitgleichung*. Zwf (66)1971, Nr 1.
- [156] KRZYŻANIAK S., KAWALEC M.: *Optimalizacja parametrów skrawania w obróbce jedno- i wielonarzędziowej*. Wyd. Pol. Pozn., nr 1279, Poznań 1985.
- [157] KRZYŻANIAK S.: *Metoda doboru optymalnych warunków skrawania z uwzględnieniem maksymalnego zysku*. Zesz. Nauk. Pol. Pozn., seria Mechanika, Poznań 1984, nr 29.
- [158] KRZYŻANOWSKI J., i inni: *Ekologiczne aspekty produkcji*, Prace naukowe Inst. Technol. Masz. i Aut. PWr., nr 67, seria Konferencje, nr 29, Wrocławskie sympozjum – Automatyzacja Produkcji Innowacje w Technice i Zarządzaniu, Wrocław 1997.
- [159] KRZYŻANOWSKI J.: *Własności układu konstrukcyjnego obrabiarek skrawających*. Pr. nauk. Inst. Technol. Masz. i Aut. PWr. nr 43, Wrocław 1990.
- [160] KÜMMEL D.: *Fräsen von Gußeisen mit Hartmetallwerkzeugen bei hohen Schnittgeschwindigkeiten*. Industrie Anzeiger, 1987, Nr 30.
- [161] KURTH J.: *Entwicklungstrends bei Zerspanungswerkzeugen*. FTK'94 Fertigungstechnisches Kolloquium Schriftliche Fassung der Vorträge zum Fertigungstechnischen Kolloquium, Stuttgart, 8/9 November 1994.
- [162] KUSYK A., BREWIŃSKI J.: *Przepływ materiałów w elastycznych systemach obróbkowych*. Mechanik, 1988, nr 8.
- [163] KUSYK A., BREWIŃSKI J.: *Autonomiczne stacje obróbkowe – konfiguracje i stan rozwoju*. Mechanik, 1988, nr 4.
- [164] KUZINOVSKI M., CICHOSZ P., PAVLOVSKI V., ŻEBROWSKI H.: *Role and Significance of Setting and Measuring on the Cutting Tool in Flexible Manufacturing Systems*. The 13th International Conference on Production Research, Jerusalem, 6–10.08.1995.
- [165] KUZINOVSKI M., CICHOSZ P., ŻEBROWSKI H.: *Nowe konstrukcje składanych noży tokarskich do zintensyfikowanego chłodzenia i smarowania ostrza i strefy skrawania*. W: VII Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna nt. Tendencje Rozwojowe w Technologii Maszyn, Komisja TBN PAN Oddział w Poznaniu, WSI w Zielonej Górze, Zielona Góra, 18–19 września 1992.
- [166] KUZINOVSKI M., CICHOSZ P., ŻEBROWSKI H.: *Optymalne zakresy parametrów toczenia ostrzami ceramicznymi*. W: VI Ogólnopolska Konferencja nt. Tendencje Rozwojowe w Technologii Maszyn, Komisja TBM PAN Oddział w Poznaniu, WSI w Zielonej Górze, Zielona Góra, wrzesień 1990.
- [167] KUZINOVSKI M., CICHOSZ P., ŻEBROWSKI H.: *Wpływ parametrów obróbki i zużycia ostrzy ceramicznych na siły skrawania podczas toczenia*. W: VII Ogólnopolska Konferencja Naukowo-

- Techniczna nt. Tendencje Rozwojowe w Technologii Maszyn, Komisja TBN PAN Oddział w Poznaniu, WSI w Zielonej Górze, Zielona Góra, 18–19 września 1992.
- [168] KUZINOVSKI M., CICHOSZ P., ŻEBROWSKI H.: *Wpływ parametrów toczenia na zużycie geometryczne ostrzy ceramicznych*. W: VII Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna nt. Tendencje Rozwojowe w Technologii Maszyn, Komisja TBN PAN Oddział w Poznaniu, WSI w Zielonej Górze, Zielona Góra, 18–19 września 1992.
- [169] KUZINOVSKI M., CICHOSZ P., ŻEBROWSKI H.: *Wpływ podwyższonych prędkości skrawania na zużycie i trwałość ostrzy ceramicznych*, W: VI Ogólnopolska Konferencja nt. Tendencje Rozwojowe w Technologii Maszyn, Komisja TBN PAN Oddział w Poznaniu, WSI w Zielonej Górze, Zielona Góra, wrzesień 1990.
- [170] KUZINOVSKI M., CICHOSZ P.: *Wpływ wybranych metod chłodzenia ostrzy na okres trwałości narzędzia w warunkach obróbki wykańczającej*. W: Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna nt. Tendencje Rozwojowe w Technologii Maszyn, Komisja TBN PAN Oddział w Poznaniu, WSI w Zielonej Górze, Zielona Góra, 18–19 września 1992.
- [171] KUZINOVSKI M., PAVLOVSKI V., ŻEBROWSKI H., CICHOSZ P.: *Research of the Roughness Profile Height Parameters of the Surface Machined by Turning with Ceramic Inserts*. Journal of the Balkan Tribological Association, 1994.
- [172] KUZINOVSKI M., PAVLOVSKI V., ŻEBROWSKI H., CICHOSZ P.: *The Investigation of the Influence of the Cutting Edge Wear on the Changes of the Height Roughness Parameters after Turning with Ceramic Cutting Inserts*. National Conference on Tribology „TRIBOLOGIA'94”, Sofia, 7–8 October 1994.
- [173] KUZINOVSKI M., ŻEBROWSKI H., CICHOSZ P.: *Mathematische Modellierung der Änderung des radialen Verschleißes der keramischen Schneidplatten AC5 beim Drehen mit erhöhten Schnittgeschwindigkeiten*. Proc. Fac. Mech. Eng. Skopje (10)1991, No. 10.
- [174] LANGHAMMER K.: *Schnittkräfte als Kenngrößen zur Verschleißbestimmung an Hartmetall-Drehwerkzeugen und als Zerspanbarkeitskriterium von Stahl*. Sonderdruck VFI der Versuchs- und Forschungsingenieur, 1973, Nr 4/5.
- [175] LEHMANN T.: *Ortogonalen Drehfräsen*. Dissertation, Technische Hochschule, Darmstadt, 1992.
- [176] LEWANDOWSKI S.: *Problemy doboru tokarek i kierunki ich rozwiązania*. Praca doktorska, Inst. Technol. Bud. Masz. PWr., Wrocław 1970.
- [177] LEWANDOWSKI S.: *Technologiczne wykorzystanie obrabiarek*. Mat. Inf. i Metod. Inst. Org. Przem. Masz., Warszawa, 1963.
- [178] LIS S., SANTAREK K., STRZELCZAK S.: *Organizacja elastycznych systemów produkcyjnych*. Warszawa, PWN, 1994.
- [179] LUTZ M.: *Erfahrungen bei der Reduzierung des Kühlschmierstoffeinsatzes in der Zerspanung*. FTK'94 Fertigungstechnisches Kolloquium „Schriftliche Fassung der Vorträge zum Fertigungstechnischen Kolloquium, Stuttgart, 8/9 November 1994.
- [180] MALLE K.: *Hochgeschwindigkeitsbearbeitung*. VDI-Z (131)1989, Nr 9.
- [181] MALLE K.: *Schneidstoffe: Leistungen und Anforderungen*. VDI-Z (131)1989, Nr 7.
- [182] MATHEW P., OXLEY L.: *Predicting the Effects of Very High Cutting Speeds on Cutting Forces*. Annals of the CIRP (31)1982, No. 1.
- [183] MAYER J.: *Werkzeugorganisation für flexible Fertigungszellen und -systeme*. Dissertation, Universität Stuttgart, 1988.
- [184] MAZUROWICZ R., RACZYK R.: *Wysokoobrotowe wrzeciona typu MFW firmy Fischer*. Mechanik, 1996, nr 56.

- [185] MELDNER B., DARLEWSKI J.: *Narzędzia skrawające w zautomatyzowanej produkcji*. Warszawa, WNT, 1991.
- [186] MERCHANT E.: *Manufacturing in the 21st Century*. Third International Conference on Advanced Manufacturing Systems and Technology AMST'93, Udine, 1993.
- [187] MERETZ H.: *Flexible Fertigungssysteme in der Praxis – eine unendliche Geschichte*. Werkstatt und Betrieb, (122)1989, Nr 2.
- [188] *Mit Keramik in das Volle*. Schweizer Maschinenmarkt, 1993, Nr 5.
- [189] MOMPER F.: *Mischkeramiken und Bornitrid-Schneidstoffe*, Industrie Anzeiger, 1988, Nr 14.
- [190] NALIMOW W., CZERNOWA N.: *Statystyczne metody planowania doświadczeń ekstremalnych*. Warszawa, WNT, 1967.
- [191] Norma ISO/TR 13618: 1993 *Code of Practice for the Safe Operation of Work-holding Chucks Used on the Lathes*.
- [192] OCZOŚ K.: *Cermetale – charakterystyka, zakres zastosowań i szlifowanie*. Mechanik, 1995, nr 2.
- [193] OCZOŚ K.: *Dzisiaj i jutro techniki wytwarzania – Refleksje z wystawy EMO '91*. Mechanik, 1991, nr 11.
- [194] OERTIL CAJACOB P.: *New Machine Concepts Open up Market Opportunities*. European Production Engineering (19)1995, No. 1–2.
- [195] OLSZAK W.: *Plastyczna obróbka gwintów na obrabiarkach skrawających*. Symposium nt. Wybrane Problemy Projektowania Procesów Technologicznych, Gdańsk, 26–27 maja 1994.
- [196] OLSZOWSKA M.: *Japoński przemysł obrabiarkowy (stan na rok 1989) Opracowanie wg Machine Tool Industry Japan 1989*, Mechanik, 1990, nr 11–12.
- [197] OPITZ H., HERRMANN J., EVERSHEIM W.: *Untersuchungen über technische Ausnutzung von Werkzeugmaschinen und Ermittlung von Werkstückcharakteristiken zur Auslegung und Auswahl von Werkzeugmaschinen*. Köln u.Opladen, Deutscher Verlag, 1966.
- [198] OPITZ H., ROHS h.: *Die Ausnutzung von Werkzeugmaschinen*, Werkstattstechnik. 1959, Nr 9.
- [199] OSWALD P.: *Cost Estimating*. New Jersey, Englewood Cliffs, 1984.
- [200] OSYCZKA A.: *Przegląd metod optymalizacji wielokryterialnej*. Ogólnokrajowa Konferencja Naukowa nt. Podstawy optymalizacji procesów obróbki skrawaniem OPTIMOS'78, czerwiec, 1978.
- [201] OTTO F., HÄNSEL W.: *Kombination von Optimier- und Grenzregulung mit automatischer Schnittaufteilung beim Drehen*. Industrie Anzeiger (96)1974, Nr 6.
- [202] PAVLOVSKI V., KUZINOVSKI M., ŻEBROWSKI H., CICHOSZ P.: *Experimental Research of the Physical Phenomena in Turning With Ceramic Cutting Inserts*. W: Advanced Manufacturing Systems and Technology AMST'93, Proceedings 3rd International Conference on Advanced Manufacturing Systems and Technology, University of Udine – Faculty of Engineering – Italy, Centre International des Sciences Mecaniques – CISM – Udine – Italy, University of Rijeka – Technical Faculty – Croatia, Udine, Italy, April 26–27, 1993, Vol. 1.
- [203] PAVLOVSKI V., KUZINOVSKI M., ŻEBROWSKI H., CICHOSZ P.: *Residual Stress in the Surface Layer of the Machining Surface by Turning With Ceramic Cutting Inserts*. W: Advanced Manufacturing Systems and Technology AMST'93, Proceedings 3rd International Conference on Advanced Manufacturing Systems and Technology, University of Udine – Faculty of Engineering – Italy, Centre International des Sciences Mecaniques – CISM – Udine – Italy, University of Rijeka – Technical Faculty – Croatia, Udine, Italy, April 26–27, 1993, Vol. 1.
- [204] PESCH M.: *Laser Welding on a Lathe*, European Production Engineering. (21)1997, August.
- [205] PESCHEL M., RIEDLEL C.: *Poliptymalizacja – Metody podejmowania decyzji kompromisowych w zagadnieniach inżynierijno-technicznych*. Warszawa, WNT, 1979.

- [206] PETROVIĆ B.: *Bauformen moderner Fertigungssysteme*. Berlin–Heidelberg–New York, Springer Verlag, 1992.
- [207] PFEIFER T., ELZER J.: *Optoelektronische Bohrerverschleißüberwachung*, VDI-Z (132)1990, Nr 10.
- [208] PIERWOZWANSKI A.A.: *Metody szukania*. Warszawa, WNT, 1974.
- [209] PŁONKA S.: *Optymalizacja wielokryterialna struktury procesów technologicznych w obecności ocen rozmytych*. Posiedzenie Sekcji Podstaw Technologii Komitetu Budowy Maszyn PAN, Bielsko-Biała, 22–23.10.1996.
- [210] POLAŃSKI Z.: *Metody optymalizacji w technologii maszyn*. Warszawa, PWN, 1977.
- [211] Poradnik inżyniera – *Obróbka skrawaniem T. I,II,III*. Warszawa, WNT, 1991,1993, 1994.
- [212] POTRYKUS J., WASIAK Z., WOJCIECHOWSKI J.: *Wieviel Schmierstoff darf es sein? – Minimalmengenschmierung im Werkzeugmaschinenbau und in der Fertigungstechnik*. Tribologie + Schmierungstechnik (44)1997, Nr 4.
- [213] POTRYKUS J.: *Smarowanie minimalne obrabiarek*. Pr. nauk. Inst. Technol. Masz. i Aut. PWr. nr 47, Wrocław 1991.
- [214] POTSCH H.: *Traub: Mit Innovationen der Marktschwäche begegnen*. dima, 1992, Nr 7/8.
- [215] PRITSCHOW G.: *Technika sterowania obrabiarkami i robotami przemysłowymi*. Wrocław, Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław 1995.
- [216] PRZYBYLSKI W.: *Rozwój technologii nagniatania z wykorzystaniem tokarek NC*. Sympozjum nt. Wybrane Problemy Projektowania Procesów Technologicznych, Gdańsk, 26–27 maja 1994.
- [217] RASCH F., ROLSTADAS A.: *Selection of Optimum Feed and Speed in Finish Turning*. Annals of the CIRP (25)1971, No. 5.
- [218] RAVIGNANI G.: *Graphisches Verfahren zur Ermittlung optimaler Schnittbedingungen*. Industrie Anzeiger (93)1971, Nr 15.
- [219] RAVIGNANI G.: *Optimierung von Abspannverfahren mit vorgegebenen Grenzen*. Werkstattstechnik (65)1975, Nr 5.
- [220] RESCHE H.: *Kostenrechnung*. Stuttgart, Taylorix-Fachverlag, 1988.
- [221] RICHTER A., JAKOBS H., KÜNZANZ K.: *Technologische Bestwertregelungen des Abspannvorgangs – Inhalt und Bedeutung*. Fertigungstechnik und Betrieb, (19)1969, Nr 7.
- [222] SAHM D.: *Hochgeschwindigkeitsdrehfräsen, Hochgeschwindigkeitsbearbeitung*. München–Wien, Carl Hanser Verlag, 1996.
- [223] SALLER H.: *Kalkulations System*. Anwenderhandbuch, FC-303, Delmenhorst, 1992.
- [224] SAMEK A., STÓS J., KWATERA M., CEBULEWSKI K.: *Oprzrządowanie przedmiotowe i narzędziowe w technologii maszyn*. VI Ogólnokrajowa Konferencja Obrabiarkowa KO'96, Warszawa, 3–4.12.1996.
- [225] SANTAREK K., ARASZKIEWICZ S., BARDYSZEWSKI J.: *Zintegrowane systemy wytwarzania*, VI Ogólnokrajowa Konferencja Obrabiarkowa KO'96, Warszawa, 3–4.12.1996.
- [226] SANTAREK K., STRZELCZAK S.: *Elastyczne systemy produkcyjne*, Warszawa, WNT, 1989.
- [227] SCHMIDT E.: *Werkzeugverwaltung durch induktive Identifikationssysteme*. Werkstatt und Betrieb 125(1992), Nr 1.
- [228] SCHNEIDER T.: *Hochgeschwindigkeitsdrehen, Hochgeschwindigkeitsbearbeitung*. München–Wien, Carl Hanser Verlag, 1996.
- [229] SCHOSSIG H.: *Low-cost-Fertigungszellen im Vergleich*. VDI-Z (135)1993, Nr 6.
- [230] SCHULZ H., DAMARITÜRK H.: *Hohe Schnittgeschwindigkeiten ändern den Zerspanprozeß*. Werkstatt und Betrieb 123(1990), Nr 5.

- [231] SCHULZ H., MORIWAKI T.: *High Speed Machining*. Annals of the CIRP (42)1993, No. 2.
- [232] SCHULZ H., SCHERER J.: *Bearbeiten bei hohen Schnittgeschwindigkeiten*. Werkstatt und Betrieb (122)1989, Nr 2.
- [233] SCHULZ H.: *Die Forschungsaktivitäten des PTW auf dem Gebiet der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung*. Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, München–Wien, Carl Hanser Verlag, 1996.
- [234] SKIERNIEWSKI J.: *Wpływ sposobu wymiany narzędzi na ich zużycie w automatycznej linii produkcyjnej*. Przegląd Mechaniczny, 1991, nr 10.
- [235] SOBCZYK J.: *Model matematyczny operacji jako podstawa optymalizacji parametrów procesu technologicznego obróbki skrawaniem*. Praca niepublikowana, Inst. Bud. Masz. Pol. Śląskiej, Gliwice 1982.
- [236] SPUR G.: *Die Werkzeugmaschinen im technologischen Wandel*. Sympozjum nt. Wybrane Problemy Projektowania Procesów Technologicznych, Gdańsk, 26–27 maja 1994.
- [237] SPUR G.: *Feinbearbeitung Schlüsseltechnologie zur Herstellung hochwertiger Produkte*. 7. Internationales Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium (FBK), Hohe Prozeßsicherheit, Hohe Leistung, Hohe Präzision, Braunschweig, 2–4 März 1993.
- [238] STEINBERGER J.: *Richtig Spannen beim Hochgeschwindigkeits-Drehen*. Werkstattstechnik (79)1989.
- [239] STOLZ R.: *Pro & Contra Trockenbearbeitung*. Bohrmeister Gühring, 1994, Nr 39.
- [240] STORF R.: *Drehen: Grundlagen und Anwendungstechnik*. Plansee TIZIT GmbH–Düsseldorf, VDI-Verlag, 1987.
- [241] STORR A., BUCK K.: *Computerunterstützte Werkzeugorganisation spart Kosten*. dima, 1992, Nr 11/12.
- [242] STORR A., HAKE U.: *Computer-Aided Tool Management*, In: *Information Technology for Advanced Manufacturing Systems*. Preprinted Proceedings of the International Conference, ITAMS'91, Nanjing, China, 17–19.09.1991.
- [243] STORR A., ORDENEWITZ R.: *Integrierte Datenhaltung für die betriebsweite Werkzeugorganisation*. ZwF (87)1992, Nr 1.
- [244] STORR A., SCHLUCK M.: *Stammdatenverwaltung und rechnerunterstützte Werkzeugorganisation*, Seminarium nt. Automatyzacja przepływu informacji technicznej w komputerowo zintegrowanym wytwarzaniu, Wrocław, 17–18.02.1993.
- [245] SZADKOWSKI J.: *Model matematyczny strukturalnej i parametrycznej optymalizacji wielonarzędziowych procesów obróbki skrawaniem*. Archiwum Technologii Budowy Maszyn, 1992, nr 9.
- [246] SZADKOWSKI J.: *Model programowania liniowego jako rozszerzenie modelu klasycznego optymalizacji parametrów skrawania*. Posiedzenie Sekcji Podstaw Technologii Komitetu Budowy Maszyn PAN, Bielsko-Biała, 22–23.10.1996.
- [247] SZADKOWSKI J.: *Optymalizacja warunków skrawania w wielooperacyjnych procesach technologicznych*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 1984, nr 4.
- [248] SZADKOWSKI J.: *Projektowanie operacji wielonarzędziowych – polioptymalizacja warunków skrawania przy wymianie narzędzi blokami*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 1982, nr 4.
- [249] SZADKOWSKI J.: *Projektowanie operacji wielonarzędziowych – warunki drogi krytycznej i polioptymalizacja warunków skrawania*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 1981, nr 3–4.
- [250] SZADKOWSKI J.: *Projektowanie operacji wielonarzędziowych – złożone modele sieciowe pracy narzędzi*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 1983, nr 4.
- [251] SZADKOWSKI J.: *Wielonarzędziowa obróbka skrawaniem*. Zesz. Nauk. Pol. Łódzkiej Filii w Bielsku-Białej, nr 8, Bielsko-Biała, 1992.

- [252] SZAFARCZYK M., CYKLIS J., RAFAŁOWICZ J., KLEIN B.: *Kierunki rozwoju automatyzacji procesów, maszyn, urządzeń i systemów produkcyjnych*. Podstawy Technologii Maszyn '91, Pr. nauk. Inst. Technol. Bud. Masz. PWr. nr 49, Wrocław 1991.
- [253] SZAFARCZYK M.: *Sterowanie i napędy obrabiarek*. Mechanik, 1997, nr 8–9.
- [254] SZAFARCZYK M.: *Wióry przy skrawaniu z naukowego i technicznego punktu widzenia*. Mechanik, 1994, nr 4.
- [255] SZAFARCZYK M.: *Sterowanie i napęd obrabiarek*. VI Ogólnokrajowa Konferencja Obrabiarkowa KO'96, Warszawa, 3–4.12.1996.
- [256] SZWABOWSKI J.: *Analiza minimalnych kosztów jednostkowych operacji o różnych liczbach zabiegów*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, Z. nr 14, Poznań, 1995.
- [257] SZWABOWSKI J.: *Dobór minimalnej ceny jednostkowej podczas polioptymalizacji parametrycznej operacji z kolejną pracą narzędzi*. Konferencja Naukowo-Techniczna nt. Współczesne Problemy w Budowie i Eksploatacji Maszyn, Szczecin, 19–20.09.1996.
- [258] SZWABOWSKI J.: *Polioptymalizacja parametryczna wielozabiegowych operacji toczenia zarysów złożonych*. Pr. nauk. Pol. Szcz., nr 504, Instytut Technologii Mechanicznej nr 12, Szczecin, 1993.
- [259] SZWABOWSKI J.: *Programowanie geometryczno-liniowe w projektowaniu dwuzabiegowej operacji tokarskiej*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 1991, nr 1.
- [260] SZWABOWSKI J.: *Wybrane problemy polioptymalizacji parametrycznej operacji z kolejną pracą narzędzi*. Konferencja nt. Projektowanie procesów technologicznych TPP'95, Poznań, 1995.
- [261] SZYMCZAK A.: *Sposoby usuwania skutków nieprawidłowości pracy wielostanowiskowych zaautomatyzowanych systemów obróbkowych*. Mechanik, 1992, nr 10.
- [262] TAKEYAMA H., HONDA T., SEKIGUCHI H., TAKADA K.: *Optimierende Steuerung bei Drehbearbeitungen*. Werkstatt und Betrieb (103)1970, Nr 9.
- [263] TLUSTY J.: *High-Speed Machining*. Annals of the CIRP (42)1993, No. 2.
- [264] TÖNSHOFF H., DENKENA B., WOBKER H.: *Bearbeitung und Einsatz von Si₃N₄-Schneidstoffen*. T. II, Zwf (86)1991, Nr 2.
- [265] TÖNSHOFF H., SPINTING W., KÖNIG W., NEISES A.: *Machining of Holes Development in Drilling Technology*. Annals of the CIRP (43)1994, No. 2.
- [266] VDI 3106-1983 *Ermittlung der zulässigen Drehzahl von Drehfuttern*.
- [267] VDI-RICHTLINIEN: *Auslegung von Drehprozessen*. VDI 3206, April 1993.
- [268] VDI-RICHTLINIEN: *Optimierung des Spanens, Grundlagen*. VDI 3321, März 1976.
- [269] VIEHWEGER B.: *Toolmanagement in Zukunft immer bedeutender*. Industrie-Anzeiger, 1988, Nr 29.
- [270] WARNECKE H.J., BULLINGER H.J., HICHERT R., VOEGELE A.: *Kostenrechnung für Ingenieure*. München–Wien, Carl Hanser Verlag, 1990.
- [271] WASCHKIES E., HEPP K., PITSCH H., FISHER J.: *Schallquellen analysieren*. Fertigungstechnik, 1992, Nr 8.
- [272] WECK M., HERMANN C.: *Laserintegration in Werkzeugmaschinen*. VDI-Z (135)1993, Nr 5.
- [273] WECK M., LUDERICH J.: *Stand der Entwicklung und Anwendung der Ultrapräzisionstechnik*. 7. Internationales Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium (FBK), Hohe Prozeßsicherheit, Hohe Leistung, Hohe Präzision, Braunschweig, 2–4 März 1993.
- [274] WECK M.: *Probleme auf dem Weg zur ölfreien Werkzeugmaschine, Auf dem Weg zur Trockenbearbeitung*, Düsseldorf, VDI Verlag GmbH, 1996.
- [275] WECK M.: *Werkzeugmaschinen – Fertigungssysteme*, Düsseldorf, VDI, 1995.
- [276] WECK M.: *Werkzeugmaschinen*. B. 3, Automatisierung und Steuerungstechnik, VDI Verlag, 1989.

- [277] WESTKÄMPER E.: *CIM und Lean Production*. VDI-Z (134)1992, Nr 10.
- [278] WIDOTA A.: *Diagnostyka obrabiarek i procesu obróbki oraz jej zastosowanie w ASO*. Mechanik, 1988, nr 4.
- [279] WIECZOROWSKI K., BABIARZ J.: *Pewne nowe aspekty optymalizacji obróbki z przepływem prądu elektrycznego przez układ OPN pod kątem sterowania adaptacyjnego*. V Międzynarodowa Konferencja nt. Postępy w teorii i technice obróbki materiałów, Sekcja W PAN-IO-SIMP, Kraków 1979.
- [280] WIECZOROWSKI K., BRUKWICKI J.: *Analiza procesu skrawania z zastosowaniem dodatkowego prądu płynącego w układzie OPN*. Zesz. Nauk. Pol. Pozn., seria Mechanika, nr 29, Poznań 1984.
- [281] WIECZOROWSKI K., CZYŻEWSKI B., GIERSZAL J.: *Próba oceny jakości narzędzi skrawających przy pomocy rozkładu Weibulla*. V krajowa Konferencja „SKJ”, SIMP, Poznań 1970.
- [282] WIECZOROWSKI K., PAJĄK E.: *Podstawy optymalizacji operacji technologicznych w przykładach*. Warszawa-Poznań, PWN, 1982.
- [283] WIEDMAIER M., MEINERS E., CALLIES G., RAIBER A.: *Abtragen und Spanen mit Laserstrahl*. FTK'94 Fertigungstechnisches Kolloquium „Schriftliche Fassung der Vorträge zum Fertigungstechnischen Kolloquium”, Stuttgart, 8/9 November 1994.
- [284] WIEBACH H.: *Statische Kostenrechnungsverfahren für Zerspanvorgänge im Fahrzeug-Aggregatebau*. Werkstatt und Betrieb (121)1988, Nr 3.
- [285] WROTNY L., SZAFARCZYK M., PIOTROWSKI I., OLSZOWSKI T.: *Obrabiarki do metali. Zautomatyzowane, elastyczne obrabiarki i systemy obrabiarek. Nazwy i określenia*. Projekt Polskiej Normy, 1986.
- [286] WROTNY L.: *Rozwój elastycznie zautomatyzowanego wytwarzania w obróbce skrawaniem – od obrabiarek NC do komputerowo zintegrowanej produkcji (CIM)*. Mechanik, 1991, nr 10.
- [287] WROTNY L.: *Współczesne obrabiarki skrawające do metali w świetle 9. Europejskiej Wystawy Obrabiarek EMO'91 w Paryżu, centra obróbkowe, automatyczne stacje obróbkowe*. Część IV. Mechanik, 1992, nr 5–6.
- [288] WRÓBEL J.: *Elementy teorii konstrukcji maszyn*. Przegląd Mechaniczny, 1996, nr 16.
- [289] WUCHERER K.: *Die Wende in der Steuerungstechnik*. FTK'94 Fertigungstechnisches Kolloquium „Schriftliche Fassung der Vorträge zum Fertigungstechnischen Kolloquium”, Stuttgart, 8/9 November 1994.
- [290] WYSIECKI M.: *Nowoczesne materiały narzędziowe*, Warszawa, WNT, 1997.
- [291] ZASADA M.: *Okres trwałości ostrza przy toczeniu kształtowymi nożami punktowymi*. Mechanik, 1984, nr 4.
- [292] ZEILE H., MICHELBAACH J.: *Rechnenbeispiel zur ökonomischen Optimalität des Metallzerspanens*. Zwf (70)1975, Nr 7.
- [293] ZEILE H., MICHELBAACH J.: *Bestimmung der ökonomischen Optimalität des Metallzerspanens*. Zwf (70)1975, Nr 5.
- [294] ZELLER R.: *Trends in der Zerspanungstechnik – die Sicht eines Anwenders, Trends in der Zerspanungstechnik*. Schweizerischer Verband für Materialtechnik, Pullen, 1996.
- [295] ZENKER J.: *Getting Acquainted With High Speed Spindles*. American Machinist, 1994, No. 11.
- [296] ZEPPELIN W.: *Modulare und integrale Bauweisen – neue Konzepte im Maschinenbau*. FTK '94 Fertigungstechnisches Kolloquium „Schriftliche Fassung der Vorträge zum Fertigungstechnischen Kolloquium, Stuttgart, 8/9 November 1994.
- [297] *Zugriff per Chip*. Industrie Anzeiger, 1992, Nr 35.
- [298] ŻEBROWSKI H., CICHOSZ P., DEMBŃSKI B., GADŻAŁA F., MIERNIK M., BAŁAMUCKI J., SZUBERT Z.: *Badania nad zwiększaniem efektywności toczenia z podwyższonymi prędkościami i*

- konstytuowaniem warstwy wierzchniej o żądanych właściwościach. Raporty Inst. Technol. Masz. i Aut. PWr., seria Sprawozdania nr 35/92, Wrocław 1992.
- [299] ŻEBROWSKI H., i inni: *Trendy w ubytkowych metodach obróbki*, Pr. nauk. Inst. Technol. Masz. i Aut. PWr. nr 67, Wrocławskie Sympozjum – Automatyzacja Produkcji. Innowacje w Technice i Zarządzaniu, Wrocław 1997.
- [300] ŻEBROWSKI H., CICHOSZ P., DEMBIŃSKI B., GADŻAŁA F., MIERNIK M.: *Badanie zjawisk w skrawaniu z podwyższonymi szybkościami*. Raporty Inst. Technol. Masz. i Aut. PWr., seria: Sprawozdania nr 7, Wrocław 1991.
- [301] ŻEBROWSKI H., CICHOSZ P., DEMBIŃSKI B., GADŻAŁA F., MIERNIK M., STORCH B.: *Badania zużycia się ostrzy, konstytuowania WW, mechanizm tworzenia wióra oraz sił skrawania podczas toczenia z podwyższonymi prędkościami*. Raporty Inst. Technol. Masz. i Aut. PWr., seria: Sprawozdania nr 58, Wrocław 1988.
- [302] ŻEBROWSKI H., KUZINOVSKI M., CICHOSZ P.: *Untersuchung des Verschleißprozesses für Freifläche der keramischen Schneidplatten AC5 bei der Drehbearbeitung*. Proc. Fac. Mech. Eng. Skopje (10)1991, No. 10.
- [303] ŻEBROWSKI H.: *Współczesne kierunki badań w obróbce skrawaniem*. Sympozjum nt. Wybrane Problemy Projektowania Procesów Technologicznych, Gdańsk, 26–27 maja 1994.
- [304] ŻUREK J.: *Zastosowanie optymalizacji wielokryterialnej przy wariantowaniu procesu technologicznego*. Archiwum Technologii Budowy Maszyn, 1987, nr 6.

EFFECTIVENESS OF THE CUTTING-FORMING OF AXIALLY SYMMETRIC WORKPIECES IN INTEGRATED MANUFACTURING

The monograph presents the current state-of-the-art in the domain's scope, which is at present the subject of investigation. This became a starting point for the formulation of the aim, theses, and scope of the work. The analytical investigation performed confirms the submitted propositions.

It has been demonstrated that the time and cost functions can reveal places of discontinuity and indeterminacy. They relate to those situations, frequently experienced in real production, which require the preemptive exchange of a tool. Such an exchange is done when the tools residual lifetime is shorter than its usage duration in the next operation, rather than when it becomes excessively blunt.

Additional deviations from the aim function continuity have been found which result from the impossibility to fully exploit residual lifetimes of the tools at the end of a production job. The character and intensity of the deviations have been investigated as well as conditions in which the discontinuities tend to attain maximum values and the areas where they are insignificant.

Novel operation-time/cost functions have been worked out to allow for the deviations and for the cost of optimization itself. The functions were employed as the aim functions in the optimization of cutting parameters; they also constituted a basis for the analytical investigation of the operation time/cost function structure.

The effect of running up, breaking, and changing the rotational speed of the spindle on the time and cost of manufacturing has been assessed. It has been noted that these times can significantly influence the aim function for those cutting processes, in which extremely high rotational speeds of the spindle are employed. The functions should therefore allow for the fact by including more accurate relationships.

Much attention has been paid to multi-purpose tools whose role in the NC-machine-tool manufacturing is becoming increasingly important. Aim functions have been worked out for the cutting with these tools and a methodology proposed for the optimization of cutting parameters.

The methodologies proposed, aiming at the optimization of NC lathe operations, make it possible to choose cutting parameters while allowing for the different types of cutting edge materials used in each of the tools. They enable to allow for a great number of nonlinear boundary constraints and, additionally, include enforced conditions such as a determined (maximum, minimum, equal, whole) number of tools allocated for the production job, the ratio of the tools lifetime and the duration of the tools engagement in the operation $T_i/t_i \in (1, 2, 3, \dots, n)$, etc. The constraints in question can be imposed globally on the entire operation, and locally on the individual passes that the tools perform.

A computer program CEZETA, designed for the analysis of NC programs and extraction of data necessary for the optimization of cutting parameters, has been developed and verified in industrial environment.

Analytical investigation was based on the data collected by polling a number of industrial enterprises. The type of change in the aim function structure has been evaluated for the conditions thus determined, which were assumed as a reference. Extensive variations of the individual factors were taken into account.

The structures of the operation time/cost functions were analyzed for various machining capacities of tools and machines, within the range of conditions currently attainable as well as for hypothetical conditions which will be possible in the future only. This made it possible to determine relationships and trends from which conclusions were drawn as to the most effective directions of investigation and research for the possibilities of increasing the NC-lathe production efficiency.

The sophistication of numerical methods and the excellent performance of computer hardware available today offered a great help in the realization of the work. This allowed quite an extensive investigation to be conducted efficiently, complicated optimization procedures to be feasible, and the graphical visualization of calculational data helpful in the analysis of the results obtained. Without the facilities this scope of work would be impossible. Due to the considerable volume of analytical investigation results, only a small portion of them have been documented in the work.

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE	7
2. STAN ZAGADNIENIA	10
3. CEL I ZAKRES PRACY	29
4. FUNKCJE CZASU I KOSZTÓW WYTWARZANIA NA RÓŻNYCH TYPACH TOKAREK NC	31
4.1. Wprowadzenie	31
4.2. Czasy jednostkowe wytwarzania	33
4.3. Koszty jednostkowe wytwarzania	39
4.4. Trwałość ostrza narzędzia w zmiennych warunkach skrawania	42
4.5. Porównanie funkcji czasu i kosztów jednostkowych wytwarzania	43
4.6. Nieciągłości funkcji czasu i kosztów wytwarzania	44
5. OPTYMALIZACJA PARAMETRÓW SKRAWANIA	51
5.1. Metodyka optymalizacji parametrów skrawania	51
5.1.1. Funkcje celu	51
5.1.2. Ograniczenia	54
5.1.3. Procedura optymalizacyjna	55
5.1.4. Wspomagana komputerowo analiza programów NC w celu pozyskiwania danych optymalizacji	57
5.2. Przykład optymalizacji parametrów skrawania	63
6. NARZĘDZIA WIELOZADANIOWE	66
6.1. Zużycie ostrzy narzędzi wielozadaniowych	68
6.2. Czas obróbki narzędziami wielozadaniowymi	68
6.3. Koszty wytwarzania narzędziami wielozadaniowymi	70
6.4. Założenia optymalizacji parametrów skrawania	70
6.5. Przykład optymalizacji parametrów skrawania	72
7. EFEKTYWNOŚĆ OBRÓBKII NA TOKARKACH NC I MOŻLIWOŚCI JEJ ZWIEKSZANIA	77
7.1. Założenia analizy funkcji celów	77
7.1.1. Analiza programu NC i jej weryfikacja doświadczalna	78
7.2. Optymalizacja struktury operacji	89
7.3. Optymalizacja parametrów skrawania	90
7.3.1. Przesuwanie ograniczeń	92
7.4. Nadzór i diagnostyka	94
7.5. Określanie struktury funkcji celów	97
7.6. Czasy przygotowawczo-zakończeniowe i pomocnicze	105
7.7. Czasy wymiany narzędzi	111
7.8. Czasy określania i wprowadzania korekcy	114
7.9. Czasy uzupełniające	123
7.10. Czasy maszynowe obróbki	124
7.11. Czasy rozpędzania i hamowania wrzeciona	130

7.12. Czasy ruchów jałowych	136
7.13. Koszty pracy stanowiska wytwórczego	140
7.14. Koszty wynagrodzenia pracownika	138
7.15. Narzędzia – właściwości skrawne, koszty narzędziowe	143
7.16. Koszty przygotowania i powtórzenia zlecenia	153
7.17. Wspomaganie procesu skrawania	155
7.17.1. Chłodzenie i smarowanie strefy skrawania – jakość procesu i ekologia	155
7.17.2. Nagrzewania obrabianego materiału	160
7.17.3. Skrawanie wibracyjne	161
7.18. Konstrukcja obrabiarki	161
7.18.1. Tokarki wielosuportowe, wielowrzecionowe	162
7.18.2. Tokarki uchwytyowe z pionowym wrzecionem	166
7.18.3. Frezotoczenie	167
7.18.4. Niekonwencjonalne łączenie technik wytwarzania	167
8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	169
8.1. Wnioski o charakterze poznawczym	170
8.2. Wnioski o charakterze użytkowym	174
8.3. Wytyczne do dalszych badań	178
LITERATURA	180

CONTENTS

1.	INTRODUCTION.....	7
2.	PRESENT STATE OF THE SUBJECT	10
3.	THESES, AIM, AND SCOPE OF THE WORK	29
4.	MANUFACTURING TIME/COST FUNCTIONS FOR VARIOUS TYPES OF NC LATHES	31
	4.1. Introduction	31
	4.2. Manufacturing unit times	33
	4.3. Manufacturing unit costs	39
	4.4. Tool lifetime in varying cutting conditions	42
	4.5. Comparison of manufacturing unit time/cost functions	43
	4.6. Discontinuities in manufacturing time/cost functions	44
5.	OPTIMIZATION OF CUTTING PARAMETERS	51
	5.1. Methodology of cutting parameter optimization	51
	5.1.1. Aim functions	51
	5.1.2. Constraints	54
	5.1.3. Optimization procedure	55
	5.1.4. Computer-aided analysis of NC programs	57
	5.2. Example of cutting parameter optimization	63
6.	MULTIPURPOSE TOOLS.....	66
	6.1. Wear of cutting edges in multipurpose tools	68
	6.2. Machining time for multipurpose tools	68
	6.3. Manufacturing cost for multipurpose tools	70
	6.4. Assumptions for cutting parameter optimization	70
	6.5. Example of cutting parameter optimization	72
7.	EFFECTIVENESS OF NC LATHES – POSSIBILITIES OF IMPROVEMENT.....	77
	7.1. Assumptions for analysis of aim function	77
	7.1.1. Analysis of NC program and experimental verification of analysis	78
	7.2. Optimization of operation structure	89
	7.3. Optimization of cutting parameters	90
	7.3.1. Displacement of constraints	92
	7.4. Monitoring and diagnostics	94
	7.5. Determination of aim function structure	97
	7.6. Auxiliary and setup times	105
	7.7. Tool exchange time	111
	7.8. Correction determination/implementation times	114
	7.9. Supplemental times	123
	7.10. Processing machine times	124
	7.11. Spindle accelerating/breaking times.....	130
	7.12. Idle movement times	136
	7.13. Workplace operating cost.....	140

7.14. Worker payment cost.....	138
7.15. Tools – cutting properties, tooling costs.....	143
7.16. Order preparation/repetition cost	153
7.17. Cutting process support.....	155
7.17.1. Cutting zone cooling and lubrication – process quality and ecology.....	155
7.17.2. Workpiece material heating	160
7.17.3. Vibrational cutting	161
7.18. Machine-tool design.....	161
7.18.1. Multisupport/multispindle lathes	162
7.18.2. Vertical-spindle chucking lathe	166
7.18.3. Milling-turning.....	167
7.18.4. Unconventional combinations of technologies	167
8. SUMMARY AND CONCLUSIONS.....	169
8.1. Knowledge-enhancing conclusions	170
8.2. Practical conclusions	174
8.3. Directions for further investigation	178
REFERENCES	180



PRACE NAUKOWE INSTYTUTU TECHNOLOGII MASZYN I AUTOMATYZACJI
(wydane w latach 1995–1998)

- Nr 56, Konferencje nr 22, *Manufacturing Diagnostics and Knowledge Representation*. V. Scientific School of Supervising and Diagnostics of Machining Systems, Wrocław 1995
- Nr 57, Konferencje nr 23, *Sztuczna inteligencja w diagnostyce i nadzorowaniu*, IV Naukowa Szkoła Nadzorowania i Diagnostyki Systemów Obróbkowych, Wrocław 1995
- Nr 58, Monografie nr 17, R. Kaczmarek, *Kompozyty włókniste otrzymywane przez natryskiwanie plazmowe*, Wrocław 1996
- Nr 59, Konferencje nr 24, *XVIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej*, Wrocław 1995
- Nr 60, Konferencje nr 25, *Procesy i urządzenia wytwórcze – tendencje badań i zastosowań*, Wrocław 1995
- Nr 61, Konferencje nr 26, *Diagnostics and Supervising in Flexible Manufacturing*, VI Workshop on Supervising and Diagnostic of Machining Systems, Wrocław 1995
- Nr 62, Monografie nr 18, T. Koch, *Programowanie redundantnych robotów przemysłowych*, Wrocław 1996
- Nr 63, Konferencje nr 27, *Thermal Behaviour, Intelligent Diagnostics and Supervising of Machining Systems*, VII Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems, Wrocław 1996
- Nr 64, Konferencje nr 28, *17 Seminarium Obrabiarkowe*, Technische Universität Dresden, České Vysoké Učení Technické v Praze, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1996
- Nr 65, Monografie nr 19, J. W. Kaczmar, *Spiekane materiały kompozytowe uzyskiwane w procesie mechanicznego wytwarzania stopów i wyciskania*, Wrocław 1997
- Nr 66, Monografie nr 20, A. Ambroziak, *Zgrzewanie tarciove metali trudno topliwych w cieczy na tle innych metod spajania*, Wrocław 1998
- Nr 67, Konferencje nr 29, *Automatyzacja produkcji '97. Innowacje w technice i zarządzaniu*, Wrocław 1997
- Nr 68, Konferencje nr 30, *Manufacturing control optimization. VIII Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems* (ed. by J. Jędrzejewski), Wrocław 1997
- Nr 69, Konferencje nr 31, *Manufacturing simulation for industrial use. IX Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems* (ed. by J. Jędrzejewski), Wrocław 1998





Zanalizowano strukturę funkcji czasu i kosztów miotów osiowosymetrycznych dla różnych narzędzi i obrabiarek. Pozwoliło to na określenie najbardziej efektywnych warunków poszukiwań możliwości zwiększania efektywności wytwarzania na tokarkach sterowanych numerycznie. Opracowano funkcje celu, opisujące złożone warianty pracy narzędzi, a także uwzględniające specyficzny charakter wykonywania operacji w zintegrowanym wytwarzaniu. Wiele uwagi poświęcono narzędziom wielozadaniowym, których rola w wytwarzaniu na obrabiarkach sterowanych numerycznie jest coraz bardziej znacząca. Opracowano metodykę optymalizacji, pozwalającą na wyznaczenie korzystniejszych warunków obróbki od tych, które uzyskiwano dotychczasowymi metodami optymalizacyjnymi.

Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
są do nabycia w następujących księgarniach:
„Politechnika”

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
budynek A-1 PWr., tel (0-71) 320-25-34,
„Tech”

plac Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław
budynek D-1 PWr., tel, (0-71) 320-32-52
Prowadzimy sprzedaż wysyłkową