

Do użytku służbowego

Na prawach rękopisu

217206L/1

INSTYTUT TECHNOLOGII BUDOWY MASZYN
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Raport serii: PREPRINTY NR 69/588/79

Praca doktorska

Piotr CICHOSZ

METODYKA DYNAMICZNEJ
OPTIMALIZACJI PARAMETRÓW SKRAWANIA
W TOCZENIU WZDŁUŻNYM

**Publikacja nie zawiera nowego
rozwiązania zagadnienia technicznego
nadającego się do opatentowania.**

RZECZNIK PATENTOWY

10 STYC 1980

Mgr inż. Teodor Tofosiewicz

Słowa kluczowe: toczenie, optymalizacja, trwałość
ostrzy, rozrzut trwałości, metodyka

Promotor:

doc.dr inż. Henryk ŻEBROWSKI

Wrocław 1979

80052406003

SPIS TREŚCI
=====

	<u>str.:</u>
Wykaz ważniejszych oznaczeń	III
1. Wprowadzenie	1
2. Stan zagadnienia	5
2.1. Tezy pracy	11
2.2. Cele pracy	11
2.3. Zakres pracy	12
3. Losowy charakter rozrzutu trwałości ostrza	14
3.1. Przyczyny losowego zużywania się ostrza	14
3.2. Rozkłady trwałości narzędzi	19
3.2.1. Funkcje opisujące rozkłady trwałości narzędzi	19
3.2.2. Rozkład wykładniczy	20
3.2.3. Rozkład gamma	21
3.2.4. Rozkład normalny	22
3.2.5. Rozkład logarytmno-normalny	23
3.2.6. Rozkład Weibulla	24
3.2.7. Inne rozkłady	25
3.3. Estymowanie parametrów rozkładu	26
4. Koszty i wydajność toczenia	27
4.1. Funkcja kosztów skrawania	27
4.2. Wpływ rozrzutu trwałości narzędzia na koszty skrawania	28
4.3. Wydajność skrawania	36
4.4. Wnioski	40
5. Optymalizacja parametrów skrawania w toczeniu	42
5.1. Ograniczenia i warunki brzegowe obszaru rozwiązań	42
5.2. Wpływ stereometrii ostrza na wzrost efektywności skrawania	47
5.3. Metodyka doboru optymalnych parametrów skrawania	57
5.4. Wnioski	69
6. Badania doświadczalne	71
6.1. Przedmiot obrabiany	71
6.2. Rodzaj obróbki	71
6.3. Dobór narzędzia i obrabiarki	73
6.4. Wybór kryterium optymalności	73

6.5. Wybór punktu startowego	73
6.6. Wyznaczenie kierunku gradientu	74
6.6.1. Określenie błędu wykonania przedmiotu	75
6.7. Wyznaczenie linii ograniczeń	83
6.8. Przesunięcie ograniczenia	88
6.9. Wyznaczenie nowej linii ograniczeń	89
6.10. Określenie powierzchni odpowiedzi w obszarze stacjonarnym	91
6.11. Wyznaczenie optymalnych parametrów skrawania	94
6.12. Wnioski wynikające z realizacji przykładu doświadczalnego	95
7. Zakończenie	97
7.1. Wnioski końcowe	100
7.1.1. Wnioski o charakterze poznawczym	100
7.1.2. Wnioski o charakterze użytkowym	101
8. Literatura	103

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

=====

1. Znaki greckie:

- Δ - procentowa zmiana odwrotności trwałości spowodowana zakłóceniami losowymi [%],
- ΔF - różnica sił skrawania spowodowana zmianą geometrii ostrza [%],
- ΔK_V - błąd kosztów K_V wynikły z nieuwzględnienia zakłóceń losowych trwałości narzędzia [%],
- ΔK_{VG} - obniżka kosztów K_V spowodowana zmianą geometrii narzędzia [%],
- ΔT - różnica trwałości spowodowana zmianą geometrii ostrza [%],
- ΔW - błąd wydajności W wynikły z nieuwzględnienia zakłóceń losowych trwałości narzędzia [%],
- ΔW_G - wzrost wydajności spowodowany zmianą geometrii narzędzia [%],
- Δ_t - całkowity błąd toczenia [mm],
- Δ_y - błąd kształtu wynikły z powielenia błędów półfabrykatu [mm],
- η_i - współczynnik sprawności pary kinematycznej,
- λ - parametr skali, określający średnią prędkość zużywania się narzędzia,
- σ^2 - wariancja,
- σ - odchylenie standardowe,

2. Znaki łacińskie:

- a - głębokość skrawania [mm],
- b_i - współczynnik regresji i -tego czynnika,
- c - parametr określający położenie punktów na linii gradientu
- d - średnica toczenia [mm],
- f - liczba stopni swobody,
- F - statystyka Fishera,
- F_{kr} - wartość krytyczna statystyki Fishera,

- $f(T)$ - funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa,
 $F(T)$ - dystrybuanta zmiennej losowej,
 F_p - siła odporowa [N],
 F_v - siła obwodowa [N],
 K_m - godzinowy koszt pracy oraz koszty amortyzacji stanowiska [zł/h],
 KM - odległość najniższego punktu rowka zużycia od krawędzi [mm],
 KT - głębokość rowka zużycia [mm],
 k_u - wskaźnikowy normatyw czasu uzupełniającego,
 K_v - koszt zeskrwania jednostki objętości materiału [zł/mm³],
 l - długość skrawania [mm],
 L - wynagrodzenie pracownika [zł/h],
 m - liczba powtórzonych doświadczeń,
 M_{dop} - maksymalny dopuszczalny moment na wrzecionie [Nm],
 n - liczba wierszy w macierzy planowania,
 n_{sz} - liczba sztuk w partii wyrobów [szt],
 n_r - liczba współczynników regresji modelu matematycznego,
 n_{WR} - prędkość obrotowa wrzeciona [obr/min],
 N - skrócenie ostrza [mm],
 N_{emax} - maksymalna moc efektywna na wrzecionie [kW],
 N_s - moc silnika napędu głównego obrabiarki [kW],
 r - parametr kształtu rozkładu statystycznego wyrażający intensywność uszkodzeń,
 R_i - i-te ograniczenie obszaru rozwiązań,
 RT - równoważnik trwałości [min],
 s - posuw [mm/2 π rad],
 s_j - wskaźnik strat mocy ruchu jałowego,
 $s^2(b_i)$ - wariancja współczynnika regresji b_i ,
 s^2_R - wariancja resztowa,

- $s^2(y)$ - wariancja charakteryzująca błąd doświadczenia,
- t - czas wykonania jednej sztuki [min],
- t_i - statystyka Studenta,
- t_{kr} - wartość krytyczna statystyki Studenta,
- t_p - czas pomocniczy [min],
- t_{pz} - czas przygotowawczo-zakończeniowy [min],
- t_{wn} - czas wymiany narzędzia [min],
- T - trwałość ostrza [min],
- T_N - niezawodny okres pracy narzędzia [min],
- T_O - próg czułości zmiennej T [min],
- T_{sr} - wartość oczekiwana zmiennej T [min],
- v - prędkość skrawania [m/min],
- VB - szerokość zużycia na powierzchni przyłożenia [mm],
- $V(T)$ - współczynnik zmienności trwałości,
- W - wydajność toczenia [szt/min],
- W_N - koszt narzędzia przypadający na jeden okres trwałości ostrza [zł];
- x_{iu} - zmienna niezależna i -tego czynnika w u -tym wierszu macierzy planowania,
- y_i - wartość funkcji otrzymana dla i -tego punktu przestrzeni czynnikowej,
- \bar{y}_u - wartość średnia funkcji obliczona na podstawie powtórzeń zrealizowanych według u -tego wiersza macierzy planowania,
- ∇K_v - gradient kosztów skrawania,
- ∇W - gradient wydajności skrawania.

1. WPROWADZENIE

=====

Powszechność stosowania obróbki wiórowej w przemyśle powoduje poszukiwania coraz to bardziej skutecznych i dokładnych metod optymalizacji skrawania.

Ciągły rozwój techniki sprawia, że pojawiają się nowe materiały konstrukcyjne o odmiennych własnościach technologicznych, a w ślad za nimi idą nowe materiały narzędziowe. Również ciągłe zmiany cen narzędzi i obrabiarek, a także wynagrodzeń robotników powodują, że optymalne warunki obróbki przesuwają się w nowe, jeszcze dostatecznie do tej pory nieprzebadane, obszary zmian parametrów skrawania. Dotychczasowy stan wiedzy z teorii skrawania nie pozwala na wystarczająco dokładne, z punktu widzenia zastosowań praktycznych, prognozowanie przebiegów funkcji opisujących proces skrawania, takich jak: trwałość narzędzia, ograniczenia układu o-u-p-n, efekty technologiczne i ekonomiczno-produkcyjne. Powoduje to konieczność doświadczalnego określania tych zależności jako funkcji parametrów skrawania. W przypadku, gdy zachodzi potrzeba szybkiego znalezienia optymalnego stanu obiektu, można poszukiwać ekstremalnych wartości funkcji celu, stosując jedynie badania wycinkowe. Takie postawienie zagadnienia pozwala na znaczne skrócenie okresu oraz obniżenie kosztów badań, ma jednak tę wadę, że nie daje możliwości opisanie zależnościami funkcyjnymi całego zakresu zmian parametrów i warunków skrawania.

Trwałość narzędzia podlega silnym zakłóceniom losowym, co deformuje przebiegi funkcji celu przy określaniu optymalnego

stanu obiektu. Dotychczas stosowane funkcje celu, którymi są najczęściej koszty lub wydajność toczenia, nie uwzględniają losowego charakteru rozrzutu trwałości narzędzi. Należy więc przypuszczać, że wyznaczone na ich podstawie optymalne parametry skrawania mogą być błędne, a przewidywane efekty ekonomiczno-produkcyjne mogą się różnić od rzeczywiście uzyskiwanych.

Podczas doboru optymalnych parametrów skrawania zdarza się bardzo często, że optymalny stan obiektu znajduje się poza obszarem rozwiązań wyznaczonym przez warunki brzegowe. Złożoność zjawisk rządzących procesem skrawania, a także wzajemne oddziaływanie na siebie poszczególnych elementów układu o-u-p-n, sprawiają duże trudności w dokładnym wyznaczeniu przebiegu linii znacznej liczby ograniczeń brzegowych. Obszar rozwiązań określony na podstawie przesłanek i znajomości zjawisk rządzących procesem skrawania, nie ma zbyt precyzyjnych granic. Nasuwa się więc zawsze pytanie, czy jest dopuszczalne niewielkie przekroczenie niedokładnie wyznaczonej linii ograniczeń? A jeśli tak, to o ile?

Możliwość przewyciężenia przedstawionych wyżej trudności istnieje w wypadku zastosowania optymalizacji dynamicznej, ponieważ wówczas analizuje się tylko te poszczególne ograniczenia, na które natrafiono podczas realizacji doświadczeń. Z tego właśnie powodu zastosowano optymalizację dynamiczną w badaniach objętych niniejszą dysertacją.

Drugim ważnym problemem związanym z ograniczeniami, jest możliwość ich przesuwania. We wszystkich tych wypadkach, gdy przesunięcie ograniczenia nie pociąga za sobą niekorzystnych

zmian wartości funkcji celu; powiększenie obszaru rozwiązań jest w zupełności uzasadnione, w przeciwnym razie staje się ono wątpliwe. Ma to miejsce wówczas, gdy na przykład, stosując do obróbki narzędzie o optymalnej pod względem trwałości geometrii, natrafimy na ograniczenie. Każde przesunięcie, ograniczenia, które jest związane ze zmianą geometrii ostrza, pociągnie za sobą zmniejszenie okresu trwałości narzędzia, a tym samym wzrost kosztów narzędziowych i przestojów obrabiarki potrzebnych na częstszą regenerację narzędzia.

Jednonarzędziowe toczenie wzdłużne jest najpowszechniej stosowaną operacją w obróbce skrawaniem. Stanowi ono także modelowy proces, na którym przeprowadza się badania i analizę wielu zjawisk występujących w procesie skrawania. Dlatego też będzie ono przedmiotem badań objętych niniejszą pracą.

Dysertacja ma charakter analityczno-doświadczalny. W pierwszej części będzie zawierała analizę przyczyn powstawania różnych rozkładów statystycznych rozrzutu trwałości narzędzi i ocenę błędów jakie popełnia się podczas określania wartości funkcji kosztów i wydajności toczenia, jeśli nie uwzględnia się zakłóceń trwałości ostrza. Tradycyjne funkcje celu zostaną zmodyfikowane tak, aby uwzględniały rozrzut trwałości narzędzia. W dalszej kolejności oceni się możliwość polepszenia efektów ekonomiczno-produkcyjnych toczenia w tych przypadkach, gdy przesuwanie linii ograniczeń obszaru rozwiązań pociąga za sobą niekorzystne przyrosty wartości funkcji celu. Zaproponowana metodyka dynamicznego określania optymalnych parametrów skrawania w toczeniu uwzględniać będzie przedstawione problemy, jeżeli okażą się one istotne z praktycznego punktu wi-

dzenia.

Druga część pracy - doświadczalna, będzie zawierać analizę możliwości zmniejszenia liczby przejść narzędzia, koniecznej do osiągnięcia żądanej klasy dokładności wykonania przedmiotu, poprzez taki dobór parametrów skrawania, który nie powoduje przekroczenia dopuszczalnych błędów toczenia. Doświadczalne określenie optymalnego stanu obiektu będzie miało na celu wykazanie prawdziwości wniosków wyciągniętych z badań teoretycznych, potwierdzenie przydatności opracowanej metodyki do rozwiązywania konkretnych zagadnień z dziedziny optymalizacji skrawania.

2. STAN ZAGADNIENIA

=====

Prace naukowe nad metodami doboru optymalnych parametrów skrawania są prowadzone już od kilkudziesięciu lat, przy czym największy ich rozwój przypada na koniec lat sześćdziesiątych i trwa do chwili obecnej.

W początkowym okresie funkcje celu miały bardzo uproszczoną postać, a występująca w nich trwałość narzędzia zależała tylko od prędkości skrawania i była wyrażana zależnością Taylora. Również w późniejszym czasie były zalecane bardzo proste metody doboru optymalnych parametrów skrawania, oparte na nieskomplikowanych funkcjach celu i trwałości narzędzia [4,5,6,30]. Ich podstawową zaletą była łatwość posługiwania się nimi, co w warunkach przemysłowych dawało duże korzyści ze względu na możliwość powszechnego ich zastosowania. Jak podaje H.J. Burmester [8], zastosowanie w USA, w początkowym okresie wdrażania metod optymalizacyjnych programu "High-Efficiency-Programs", polegających na wyznaczaniu jedynie optymalnej prędkości skrawania, pozwoliło na obniżenie kosztów obróbki od 30 do 60%.

Obecnie, gdy większość normatywów dotyczących zalecanych parametrów skrawania jest oparta na przesłankach w miarę dobrze uzasadnionych, z punktu widzenia techniczno-ekonomicznego, stosowanie uproszczonych metod i zależności, nie musi prowadzić do spodziewanych korzyści. Dlatego też zaczęto wprowadzać funkcje celu i trwałości narzędzi coraz bardziej złożone i wierniej opisujące stan rzeczywisty [3,15,26,32,35,42,53].

Po przyjęciu kryterium optymalności i wyborze odpowiedniej funkcji celu, następnym krokiem jest określenie optymalnego

stanu obiektu. Ogólnie można wyróżnić dwa sposoby rozwiązania tego zagadnienia, a mianowicie: metodami statycznymi lub dynamicznymi.

W metodach statycznych optymalny stan obiektu znajduje się poprzez analityczne lub graficzne wyznaczenie zestawu parametrów, dających najkorzystniejszą wartość funkcji celu. Funkcje opisujące badany obiekt określa się z obowiązujących normatywów, zaleceń lub badań własnych.

Istnieje tu duża ilość sposobów określania optymalnego stanu obiektu [28,38,43,44]. Omówione zostaną tylko te, które są najbardziej przydatne i jednocześnie najczęściej stosowane w obróbce skrawaniem.

Do najprostszych należą metody graficzne [4,5,6,27,46,57], w których znalezienie rozwiązania polega na odczytaniu z wykresów lub nomogramów, maksymalnej lub minimalnej wartości funkcji celu.

Zaletami metod graficznych jest możliwość całościowej oceny stanu obiektu łącznie z ograniczeniami brzegowymi oraz duża szybkość rozwiązywania postawionego zadania. Do wad tych metod zaliczyć należy dużą pracochłonność sporządzania graficznych zależności i stosunkowo małą ich dokładność. Wadą jest również konieczność ponownego sporządzania wykresów, w przypadku zmian niektórych założeń dotyczących operacji technologicznej.

Druga metoda polega na zastosowaniu programowania liniowego. Pierwszym, który zastosował zasady programowania liniowego do optymalizacji parametrów skrawania, był G.K.Goranskij [22]. Podstawą tej metody jest przekształcenie funkcji celu do

postaci równania liniowego, a wszystkich ograniczeń brzegowych do nierówności liniowych i r o z w i ą z a n i e tak powstałego układu przy użyciu MC. Mimo zalet tej metody, takich jak możliwość automatyzacji obliczeń i przeanalizowanie wielu wariantów procesów technologicznych, z racji małej jej dokładności, wynikłej z uproszczeń, jakie są konieczne przy sprowadzaniu modeli matematycznych do postaci liniowej, nie jest ona często stosowana w praktyce.

Na tą wadę wskazują autorzy prac [24,26,32] proponując modyfikację metody poprzez zastosowanie m o d e l i n i e l i - n i o w y c h do opisu obiektu badań. Stanowi to niewątpliwie krok w kierunku poprawienia dokładności metody programowania liniowego.

Trzecią, chyba najczęściej stosowaną, grupą metod poszukiwania ekstremum funkcji są metody oparte na u p o c h a d - n i a n i u f u n k c j i c e l u względem parametrów skrawania lub trwałości narzędzia [3,4,6,25,35].

Podstawową zaletą tych sposobów określania optymalnego stanu obiektu jest prostota założeń matematycznych i duża szybkość otrzymania wyniku końcowego. Zalety te szczególnie wyraźnie uwidaczniają się dla prostych funkcji, gdy ekstremum funkcji znajduje się wewnątrz obszaru rozwiązań ograniczonego warunkami brzegowymi. Znalezienie optymalnego rozwiązania komplikuje się jeśli funkcja trwałości ostrza występująca w funkcjach celu ma bardziej złożoną budowę tzn. zależy nie tylko od prędkości skrawania. Wówczas pochodne cząstkowe funkcji celu względem v i s przyrównane do zera stanowią mogą sprzeczny układ równań nie dający dokładnego rozwiązania [14,15,18,35,48]. W tych wypadkach trzeba uciekać się do metod

przybliżonych, wymagających często zastosowania MC, ze względu na dużą pracochłonność obliczeń. Metody te napotykają również na pewne trudności wówczas, kiedy ekstremum funkcji znajduje się poza ograniczeniami brzegowymi. Sposób na ominięcie tego problemu podają autorzy prac [1,24,32,47], proponując wprowadzenie do rozwiązywanego układu równań zależności przedstawiającej ograniczenia, za którymi leży ekstremum.

Stosowanie metod upochadniania funkcji celu prowadzi często do tego, że optymalny stan obiektu bywa określony poza zakresem stosowalności zależności opisujących proces skrawania lub w obszarach, które nie mają praktycznego zastosowania. Potwierdzić to może przykład zaczerpnięty z pracy M. Białka [3], gdzie dla kryterium maksymalnej wydajności toczenia, otrzymano optymalny zestaw parametrów, dla których trwałość narzędzia wynosiła 1,6 min.

Ostatnią grupę metod statycznych stanowią metody polegające na bardzo pracochłonnym przeliczaniu wartości funkcji celu w dużej liczbie punktów badanej przestrzeni i wybraniu tego z nich, dla którego otrzymano najkorzystniejszy stan obiektu.

Można tu zastosować metody ograniczające liczbę koniecznych obliczeń takie choćby jak: metody iteracyjne, relaksacyjne, proporcjonalne itp. [19,36,43,45,57,58].

Mimo przyspieszenia poszukiwań optymalnego rozwiązania, komplikują one jednocześnie procedurę obliczeń. Duża pracochłonność tych metod, uważana za wadę, przestała być przeszkodą w stosowaniu, w dobie powszechnego dostępu do kalkulatorów programowanych, minikomputerów i maszyn cyfrowych. Wyszły na-

tomiaŝt na plan pierwszy takie ich zalety jak: duŝa dokładnoŝć i łatwoŝć wykonywania obliczeń.

Wszystkie omówione dotychczas metody wymagały znajomości funkcji opisujących proces skrawania lub ich ewentualnego doŝwiadczalnego okreŝlenia w badanym obszarze. Duŝą liczbę doŝwiadczeń moŝna znacznie ograniczyó, stosując dynamiczne metody optymalizacyjne /omówiono je szerzej w rozdz.5.3/. Na szczególną uwagę zasługują tu metody, które moŝna zastosować w trakcie realizacji zadań produkcyjnych. Należą do nich: metoda sympleksowa, planowania ewolucyjnego EVOP i gradientowa Boxa - Wilsona. Mimo duŝej skutecznoŝci i efektywnoŝci tych metod oraz stosowania ich w wycinkowych badaniach procesu skrawania [2,28,54,55], nie znalazły one jak dotąd pełnego zastosowania do kompleksowej optymalizacji parametrów skrawania, z punktu widzenia kosztów czy teŝ wydajnoŝci toczenia.

Wszystkie narzędzia skrawające, a wśród nich i noŝe tokarskie, odznaczają się znacznymi rozrzutami trwałoŝci ostrzy wokół wartoŝci ŝredniej. Zjawisko to jest powszechne w praktyce warsztatowej i obserwowane od wielu lat w prowadzonych badaniach doŝwiadczalnych.

Na znaczne różnice trwałoŝci jakie mogą występować w badaniach prowadzonych w różnych laboratoriach zwracają uwagę J.Fisher i J.Hargreaves [20]. Dla tych samych materiałów narzędzia i przedmiotu obrabianego oraz tej samej geometrii ostrza, wartoŝci wykładników potęgowych w równaniu Taylora różniły się między sobą trzykrotnie. D.Kochan [31] stwierdza, ŝe rozrzut trwałoŝci w badaniach laboratoryjnych wynosi $\pm 12\%$,

natomiast w warunkach skrawania produkcyjnego jest on znacznie większy. Wyniki obszernych badań trwałości narzędzi przeprowadzonych w warunkach przemysłowych w ZSRR przedstawili G.L.Chaet, V.V.Skibin, Ju.J.Vysocki [11]. Okazuje się, że w przypadku operacji tokarskich rozrzut ten wynosił od 30 do 116% wartości średniej. Z danych przytoczonych przez P.G.Kacewa [28] wynika, że średnie kwadratowe odchylenie od wartości średniej trwałości narzędzia wahało się w granicach od 27 do 100%.

D.Kochan [31] zwraca uwagę na zakłócenia funkcji kosztów frezowania, spowodowane rozrzutem trwałości narzędzi. Nie podaje on jednak sposobu, w jaki można uwzględniać te zakłócenia i zwiększyć dokładność wyznaczenia optymalnych parametrów.

H.Burmester [9] stwierdza, że podczas optymalizacji parametrów skrawania należałoby brać pod uwagę funkcję trwałości Taylora, przedstawioną w układzie podwójnie logarytmicznym, nie jako linię prostą lecz jako pewne pole określone rozrzutem normalnym. Tą myśl rozwija J.Michelbach w obszernej pracy [37], dotyczącej roli statystyki w skrawaniu metali. Analizuje on zjawisko wpływu rozrzutu trwałości narzędzia na koszty skrawania i proponuje wyznaczenie granic przedziału ufności dla trwałości ostrza określonej równaniem Taylora oraz wyliczenie dla górnej i dolnej granicy tego przedziału, optymalnych prędkości skrawania. Prawdopodobna wartość optymalna zawarta będzie pomiędzy wyznaczonymi granicznymi prędkościami optymalnymi. J.Michelbach nie podaje sposobu rozwiązania przedstawionego zagadnienia, lecz określa jedynie granice w jakich będzie się ono znajdować. Ponadto rozważa on

tylko te przypadki, gdy trwałość narzędzia jest opisana prostą zależnością Taylora i podlega prawom rozkładu normalnego.

2.1. Tezy pracy

Wychodząc z przytoczonych wyżej rozważań dotyczących problemów związanych z optymalizacją parametrów skrawania można sformułować następujące tezy pracy:

1. Funkcje celu służące do optymalizacji procesu skrawania powinny uwzględniać losowy charakter rozkładu trwałości ostrza.

2. Istnieje możliwość uzyskania lepszych efektów ekonomiczno-produkcyjnych skrawania również w tych przypadkach, gdy powiększanie obszaru rozwiązań na drodze zmiany geometrii ostrza powoduje skrócenie trwałości narzędzia.

2.2. Cele pracy

Celem głównym tej dysertacji jest opracowanie metody określania optymalnych parametrów skrawania w jedno-narzędziowym toczeniu wzdłużnym, z uwzględnieniem zakłóceń losowych trwałości narzędzia i występowania ograniczeń brzegowych obszaru rozwiązań.

Bardziej szczegółowymi celami o charakterze poznawczym są:

1/ dokonanie oceny wartości błędów, jakie popełnia się podczas wyznaczania wartości funkcji celu, jeśli nie uwzględnia się losowego rozrzutu trwałości ostrza,

2/ stworzenie funkcji celu uwzględniających losowy rozrzut trwałości narzędzia,

3/ przeprowadzenie analizy możliwości polepszenia efektów ekonomiczno-produkcyjnych skrawania, w tych wypadkach, gdy przesuwanie ograniczeń obszaru rozwiązań powoduje obniżenie się trwałości narzędzia.

Cele utylitarne będą natomiast związane z możliwościami:

1/ szybkiego wdrażania technicznie i ekonomicznie uzasadnionych warunków skrawania i związany z tym wzrost efektów ekonomiczno-produkcyjnych,

2/ bardziej intensywnego wykorzystania obrabiarek i narzędzi,

3/ uzyskania informacji potrzebnych przy projektowaniu nowych rozwiązań obrabiarek i ich wyposażenia,

4/ projektowania procesu technologicznego, w którym, dzięki analizie błędów toczenia, można zmniejszyć konieczną liczbę przejść narzędzia.

2.3. Zakres pracy

Praca obejmuje swoim zakresem:

- analizę zakłóceń losowych w pracy narzędzia, które powodują powstawanie różnych rozkładów statystycznych trwałości ostrza skrawającego,
- stworzenie funkcji celu uwzględniających losowy rozrzut trwałości narzędzia,
- dokonanie oceny wzrostu dokładności określenia optymalnego stanu obiektu, spowodowanej zmodyfikowaniem funkcji celu dla kosztów i wydajności toczenia,
- analizę możliwości obniżenia kosztów i wzrostu wydajności toczenia w tych wypadkach, gdy przesunięcie ograniczenia brzegowego powoduje skrócenie okresu trwałości narzędzia,

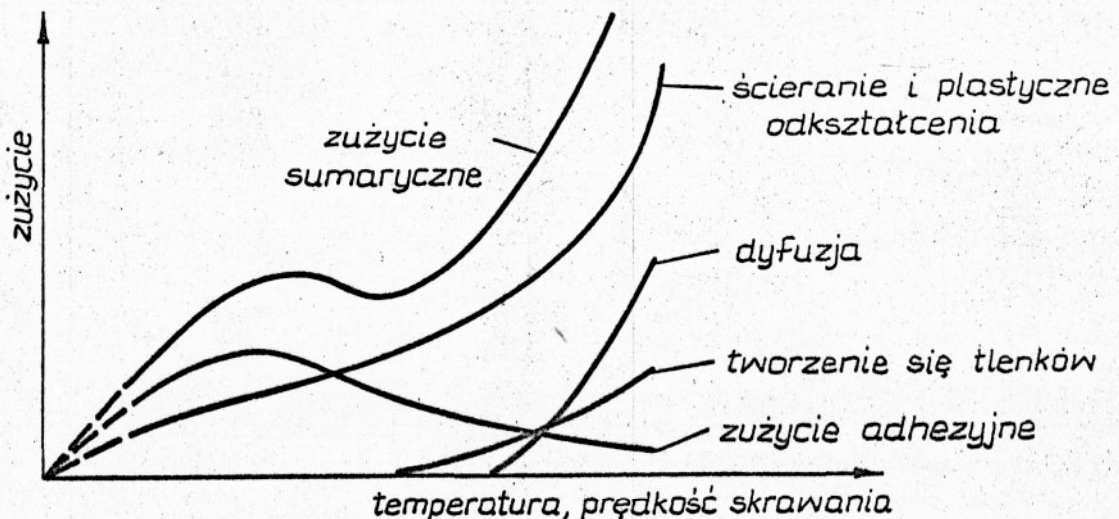
- opracowanie metodyki dynamicznej optymalizacji parametrów skrawania w toczeniu jednonarzędziowym, która uwzględniać będzie wszystkie wymienione wyżej problemy, jeśli okażą się one istotne z punktu widzenia zastosowań praktycznych,
- sprawdzenie zaproponowanej metodyki na przykładzie doświadczalnym.

3. LOSOWY CHARAKTER ROZRZUTU TRWAŁOŚCI OSTRZA

3.1. Przyczyny losowego zużywania się ostrza

Ostrze narzędzia skrawającego podlega w czasie pracy działaniu wielu czynników [17,29], do których można zaliczyć: bardzo duże statyczne i dynamiczne naciski jednostkowe, wysoką temperaturę, duże współczynniki tarcia, czyste chemicznie i fizycznie powierzchnie styku narzędzia z materiałem obrabianym. Zużycie powierzchni roboczych narzędzia skrawającego jest spowodowane takimi zjawiskami jak: mechaniczne ścieranie materiału ostrza, przekroczenie jego wytrzymałości doraźnej lub zmęczeniowej, cieplne zmiany własności materiału, adhezja, dyfuzja, powstawanie związków chemicznych.

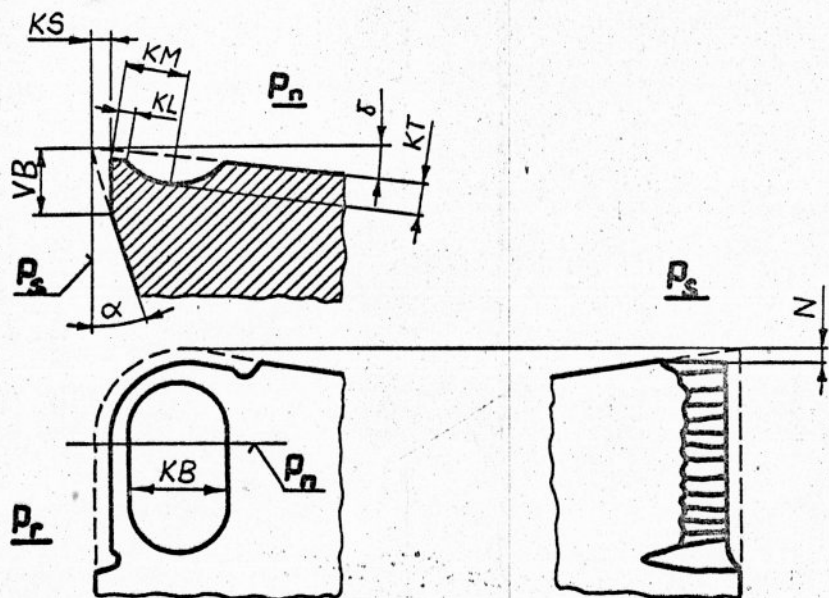
Udział poszczególnych zjawisk w sumarycznym zużyciu się narzędzia zmienia się w zależności od warunków skrawania /rys.1/, a także od stopnia zużycia narzędzia. Wzrost zużycia powoduje zwiększenie oporów skrawania, temperatury i drgań - zmieniają się więc warunki skrawania i udział cząstkowy poszczególnych zjawisk w sumarycznym zużyciu.



Rys.1. Udział zjawisk fizyko-chemicznych w sumarycznym zużyciu się narzędzia [41]

Dla określonych warunków skrawania zużywanie się narzędzia w funkcji czasu można podzielić na trzy etapy. W pierwszym, który charakteryzuje się dość dużymi przyrostami zużycia, następuje tzw. d o c i e r a n i e się narzędzia. Kolejny etap - to niemal liniowo zależne od czasu n a t u r a l n e zużywanie się ostrza, po którym następuje ponowny, wyraźny w z r o s t i n t e n s y w n o ś c i zużywania się, aż do chwili osiągnięcia kryterium stępienia lub utraty zdolności skrawnych.

Oznaczenia śladów zużycia ostrza narzędzia przedstawiono na rys.2.



Rys.2. Geometria i wskaźniki zużycia ostrza skrawającego

Dla tych samych warunków skrawania, przebiegi krzywych zużycia dla poszczególnych ostrzy różnią się między sobą, a uzyskane trwałości odznaczają się znacznymi rozrzutami. Spowodowane jest to zakłóceniami losowymi, które wywołane są następującymi przyczynami [16,21]:

1. B ł ę d y k o n s t r u k c y j n e .

Nadmierne zużywanie się narzędzia, a nawet całkowite jego zniszczenie, bywa często spowodowane nieuwzględnieniem możliwości zsumowania się obciążeń ekstremalnych, jakie mogą wystąpić podczas pracy. Ma to szczególne znaczenie w przypadku narzędzi składanych z płytką mocowaną mechanicznie, w których złe rozwiązanie konstrukcyjne może spowodować szybkie wyrabianie się elementów ustalająco-mocujących, a także wykruszanie się płytki skrawającej. Również w przypadku zbyt małego kąta ostrza β_0 zsumowanie się obciążeń maksymalnych /np. górna graniczna wartość nadadtku i wada materiału/ może spowodować zwiększone zużycie narzędzia.

2. W a d y t e c h n o l o g i c z n e .

Powstają wskutek niemożności zapewnienia idealnie takich samych warunków produkcji narzędzi. Do najczęściej spotykanych wad, powodujących niejednakową skrawność poszczególnych ostrzy, zaliczyć można:

- różnice w składzie chemicznym i mikrostrukturze materiału ostrza,
- wady materiałowe,
- błędy obróbki cieplnej,
- różnice w stereometrii poszczególnych ostrzy,
- różnice mikrotwardości i wartości naprężeń w warstwie wierzchniej ostrza skrawającego.

3. W a r u n k i e k s p l o a t a c j i .

Różnice w warunkach eksploatacji są spowodowane najczęściej przez:

- niejednakową obrabialność materiału tego samego gatunku, wynikłą np. z powodu odchyłeń w składzie chemicznym, mikro-

strukturze, twardości oraz wskutek wtrąceń niemetalicznych i wad materiałowych, a także odmiennego stanu powierzchni i umocnienia obróbczego,

- różny sposób i intensywność chłodzenia narzędzia w czasie jego pracy,

- błędy w nastawach parametrów skrawania i różnice w nadatkach obróbczych,

- możliwość jedynie dyskretnej a nie ciągłej regulacji procesu skrawania,

- odmienne charakterystyki statyczno-dynamiczne, a także różny stan techniczno-eksploatacyjny układu o-u-p-n,

- błędy oceny zużycia ostrza,

- różne kryteria zużycia narzędzia.

4. S t a r z e n i e s i ę n a r z ę d z i a .

W czasie eksploatacji, na skutek kolejnych przeostrzeń lub zmian krawędzi skrawających w nożach składanych, zachodzą nieodwracalne zmiany powodujące bezpośrednie obniżenie własności skrawnych ostrza, lub też pogorszenie poprawności współdziałania poszczególnych części składowych narzędzia.

Można wyróżnić następujące mechanizmy zużywania się narzędzia:

D z i a ł a n i e b o d ź c ó w s k o k o w y c h .

Typowym przykładem działania bodźców skokowych w obróbce skrawaniem jest obróbka żeliwa z takimi wadami jak zabeleńnięcia. Na skutek losowych zmian obciążenia ostrza również moment, w którym narzędzie staje się niesprawne, będzie przypadkowy i praktycznie niezależny od stopnia zużycia.

D z i a ł a n i e b o d ź c ó w k u m u l u j ą c y c h s i ę .

Temu mechanizmowi zużywania się odpowiada sytuacja, w któ-

rej niesprawność narzędzia powstaje w wyniku jego stopniowego starzenia lub zużywania się. Czas, po którym dowolny parametr określający zużycie ostrza przekroczy graniczną wartość dopuszczalną, jest okresem trwałości narzędzia.

D z i a ł a n i e b o d ź c ó w r e l a k s a c y j -
n y c h .

Tego rodzaju mechanizm zużycia łączy w sobie stopniowe zużywanie się narzędzia oraz jego nagłe przejście do stanu niesprawności. Jako przykład można tu podać przypadek zniszczenia narzędzia, spowodowany działaniem obciążeń cyklicznych i przekroczeniem wytrzymałości zmęczeniowej samego wierzchołka ostrza, bądź też któregoś z elementów ustalająco-mocujących płytkę skrawającą.

Tak więc, zużycie narzędzia jest spowodowane działaniem bodźców relaksacyjnych, jeśli przejście jego w stan niesprawności odbywa się w sposób skokowy i wynika z powolnego działania bodźców kumulujących się.

P r z y c z y n y n i e z a l e ż n e .

Najczęściej spotykaną w praktyce jest sytuacja, w której zużycie narzędzia jest wynikiem nałożenia się na siebie kilku przyczyn działających jednocześnie. Zdarza się, że wśród wielu przyczyn wywołujących niesprawność narzędzia jedna lub dwie są przyczynami dominującymi, a wpływ pozostałych jest mało istotny.

W dalszej części każdy z omówionych tu mechanizmów zużycia się narzędzia zostanie opisany matematycznie.

3.2. Rozkłady trwałości narzędzi

3.2.1. Funkcje opisujące rozkłady trwałości narzędzi

Trwałość ostrza, dla założonych stałych warunków skrawania, można uważać za zmienną losową. Rozrzut trwałości wokół wartości średniej opisuje funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa $f(T)$. Wartość tej funkcji jest miarą skupienia prawdopodobieństwa w danym punkcie. Całka z funkcji gęstości w określonym przedziale jest prawdopodobieństwem wystąpienia zdarzenia w tym przedziale. Funkcja $f(T)$ musi spełniać następujące wymagania:

$$f(T) \geq 0, \quad \int_{-\infty}^{+\infty} f(T) dT = 1$$

Rozkład prawdopodobieństwa można w równoważny sposób opisać przy pomocy funkcji zwanej dystrybuantą zmiennej losowej $F(T)$. Funkcja ta jest określona równaniem

$$F(T) = \int_{-\infty}^T f(T) dT \quad (1)$$

i oznacza prawdopodobieństwo zdarzenia polegającego na tym, że zmienna losowa przyjmuje wartość mniejszą lub równą argumentowi tej funkcji.

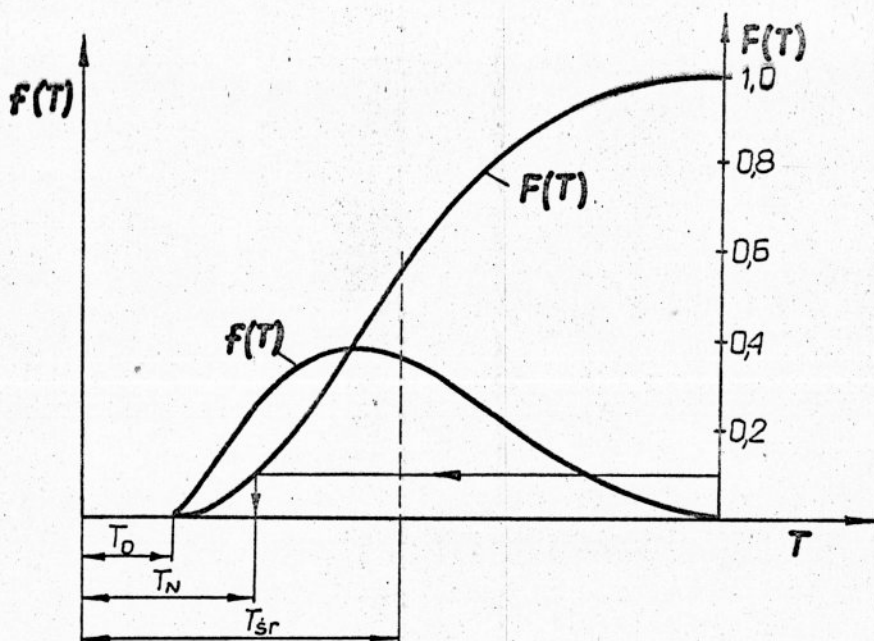
Obie te funkcje przedstawiono graficznie na rys. 3. Miarą rozproszenia zmiennej losowej wokół wartości średniej jest wariancja σ^2 lub odchylenie standardowe σ , które określa się zależnością

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (T - T_{sr})^2 f(T) dT \quad (2)$$

Współczynnik zmienności $V(T)$ jest charakterystyczną wielkością bezwymiarową, która ułatwia porównanie zmiennych losowych o różnych jednostkach i wartościach średnich. Opisuje go za-

leżność

$$V(T) = \frac{\zeta}{T_{sr}} \quad (3)$$



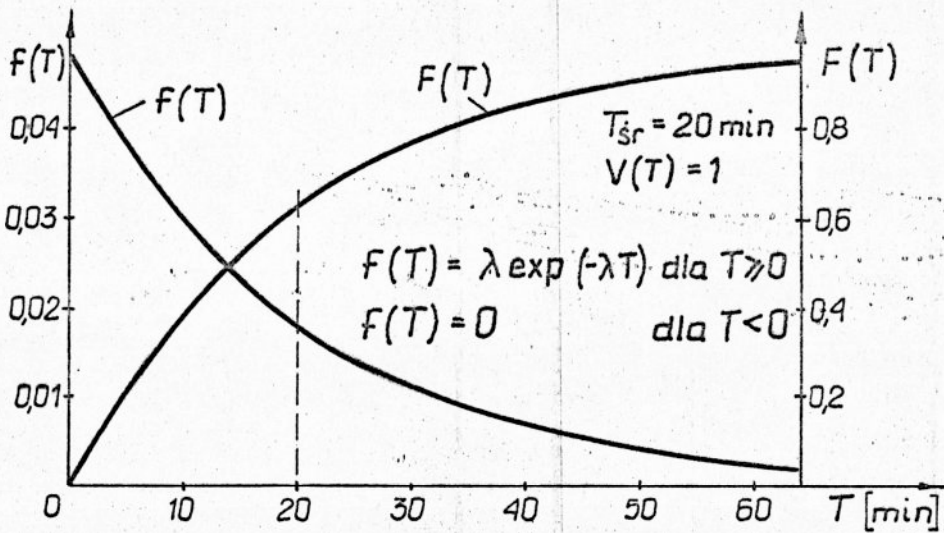
Rys.3. Gęstość i dystrybuanta zmiennej losowej T

Próg czułości T_0 stanowi wartość, poniżej której prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia jest równe zero, a więc funkcje gęstości i dystrybuanty mniejsze od tej wartości również będą miały wartość zero.

3.2.2. Rozkład wykładniczy

Rozkład wykładniczy opisuje bardzo dobrze gęstość rozrzutu trwałości w tych przypadkach, kiedy zużywanie się narzędzia jest zdominowane głównie działaniem bodźców skokowych, a wpływ innych przyczyn jest pomijalnie mały.

Na rys.4 przedstawiono funkcję gęstości i dystrybuanty rozkładu wykładniczego dla $T_{sr} = 20$ min i $\lambda = 0,05$.



Rys.4. Funkcje gęstości i dystrybuanty rozkładu wykładniczego

Wartość parametru λ można oszacować z zależności $\lambda = 1/T_{sr}$. Należy zaznaczyć, że współczynnik zmienności dla rozkładu wykładniczego jest zawsze równy jedności.

3.2.3. Rozkład gamma

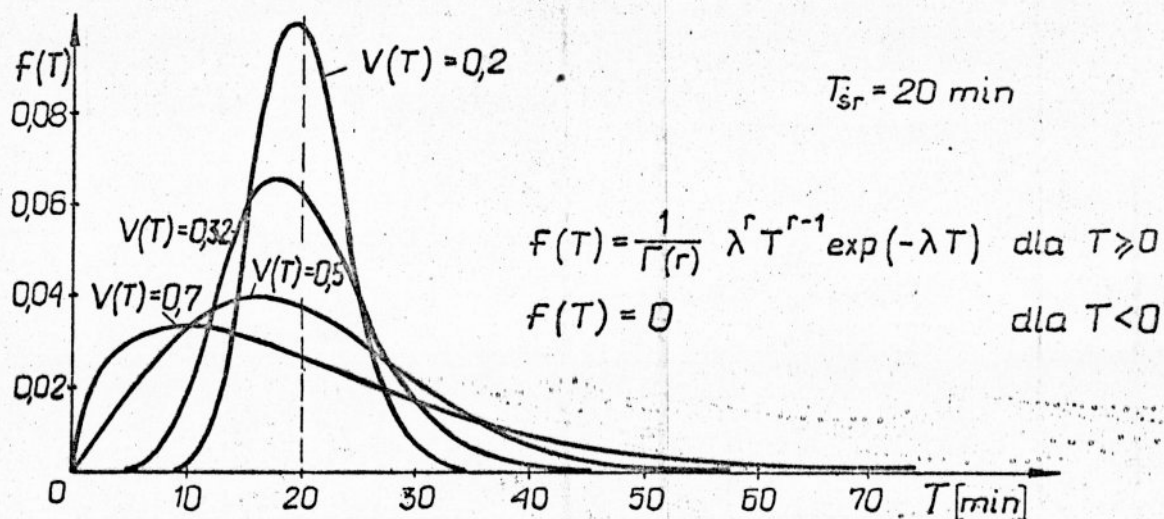
Trwałość ostrza może być opisana rozkładem gamma wówczas, jeśli jego zużycie dokonuje się w okolicznościach:

- dość dużej jednorodności początkowej narzędzi,
- zmienności warunków obciążenia,
- gdy czas docierania się w początkowej fazie oraz okres, nadmiernego zużywania się w ostatniej fazie jest stosunkowo niewielki w porównaniu z całym okresem trwałości ostrza.

Rozkład gamma jest jednym z rozkładów opisujących rozrzut trwałości narzędzia, jeśli jego zużywanie się spowodowane jest działaniem bodźców kumulujących się.

Na rys.5 przedstawiono funkcje gęstości rozkładu gamma dla różnych wartości współczynnika zmienności i $T_{sr} = 20$ min. Parametry rozkładu są określone następującymi zależnościami

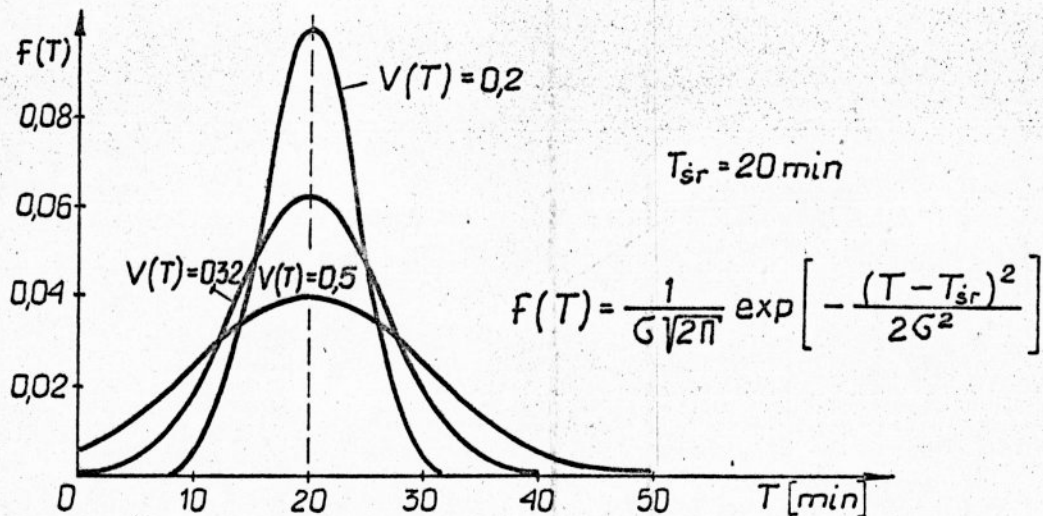
$$T_{sr} = \frac{r}{\lambda}, \quad \sigma^2 = \frac{r}{\lambda^2}.$$



Rys.5. Funkcja gęstości rozkładu gamma

3.2.4. Rozkład normalny

Dla dużych wartości parametru r i małych współczynników zmienności $V(T)$ rozkład gamma staje się bardziej symetryczny i przechodzi w rozkład normalny, którego funkcję gęstości przedstawiono na rys.6.



Rys.6. Funkcje gęstości rozkładu normalnego dla różnych wartości współczynników zmienności.

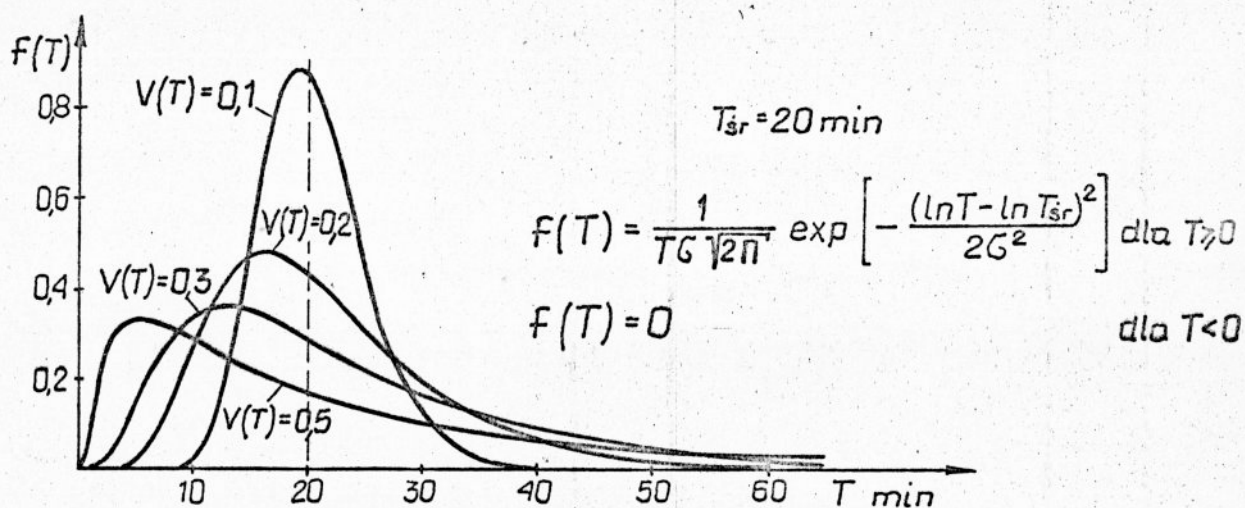
Rozkład normalny jest symetryczny względem wartości średniej i opisuje prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzeń w przedziale od $-\infty$ do $+\infty$. Występuje tu pewna nieścisłość, ponieważ prawdopodobieństwo wystąpienia trwałości ujemnej jest większe od zera, lecz dla współczynnika zmienności $V(T) \leq 0,33$

jest ono pomijalnie małe. Mimo tej wady rozkład normalny jest szeroko rozpowszechniony w praktyce doświadczalnej, wszędzie tam, gdzie zużycie narzędzia jest spowodowane jego starzeniem się i działaniem bodźców kumulujących się. Można się spodziewać, że rozkład trwałości będzie normalny tam, gdzie występuje duża jednorodność własności skrawnych narzędzi, średnia prędkość zużycia jest stała, a krzywe zużycia przeplatają się wzajemnie. Przejścia od rozkładu gamma do rozkładu normalnego można dokonać, gdy współczynnik zmienności $V(T)$ stanie się mniejszy od wartości 0,28.

3.2.5. Rozkład logarytmo-normalny

Rozkład logarytmo-normalny dobrze opisuje rozrzut trwałości narzędzia, jeżeli średnia prędkość zużywania się ostrza maleje w czasie. Ma to miejsce wtedy, gdy występuje dość długi okres docierania się narzędzia i brak jest trzeciego okresu przyspieszonego zużywania się, a także w przypadku, gdy zużycie następuje głównie w wyniku dyfuzji lub jest związane z wytrzymałością zmęczeniową materiału ostrza.

Rozkład logarytmo-normalny jest silnie asymetryczny. Funkcję gęstości dla różnych wartości $V(T)$ przedstawia rys.7. W przypadku logarytmów dziesiętnych oba wzory przedstawione na rys.7 należy pomnożyć przez $\log e = 0,4343$.



Rys.7. Funkcja gęstości rozkładu logarytmo-normalnego

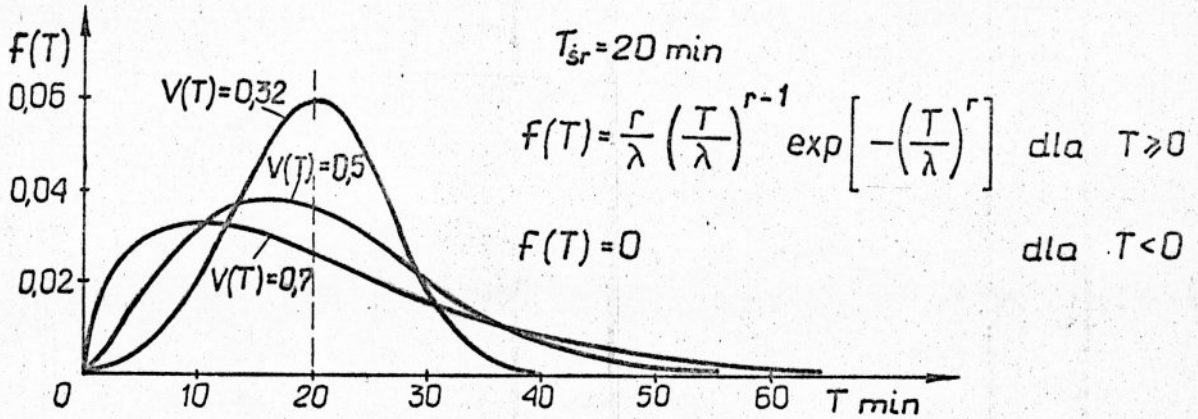
3.2.6. Rozkład Weibulla

W wielu przypadkach zużywanie się narzędzi skrawających nie jest zdominowane jedną przyczyną lecz wieloma działającymi niezależnie od siebie. Przykładem może być tu powolne zużywanie się ostrza narzędzia, spowodowane jego ścieraniem się oraz równoczesne niezależne przyrosty zużycia spowodowane występowaniem wad materiałowych.

We wszystkich tych przypadkach, gdy zużycie narzędzia może być spowodowane przyczynami niezależnymi, rozkład Weibulla dość dobrze opisuje prawdopodobieństwo rozrzutu trwałości ostrza.

Funkcje gęstości rozkładu Weibulla dla różnych wartości współczynnika $V(T)$ przedstawia rys.8.

Rozkład Weibulla jest jednym z najbardziej uniwersalnych rozkładów. Dla małych wartości współczynników zmienności $V(T)$ może on zastępować rozkład normalny, natomiast dla dużych wartości $V(T)$ staje się on zbliżony do rozkładu gamma. Gdy $V(T)$ osiągnie wartość 1, to rozkład Weibulla przechodzi w rozkład wykładniczy.



Rys.8. Funkcja gęstości rozkładu Weibulla.

Mimo tych zalet, rozkład ten, nie zawsze bywa chętnie stosowany ze względu na duże trudności z estymowaniem jego parametrów.

3.2.7. Inne rozkłady

Oprócz omówionych poprzednio rozkładów opisujących rozrzut trwałości narzędzi skrawających mogą występować sporadycznie jeszcze inne rozkłady odznaczające się bardzo dużą asymetrycznością, takie jak rozkład logarytmiczny gamma, logarytmiczny Weibulla, alfa itp.

Stosowane bywają również takie rozkłady jak np. rozkład Pearsona, Freudenthala, Gumbela i inne. Są one szczególnymi przypadkami omówionych poprzednio rozkładów.

Opisując rozkład trwałości narzędzia można użyć dowolnej funkcji, jeśli spełnia ona trzy warunki:

- funkcja ta w dowolnym punkcie musi być większa lub równa zeru,
- pole pod krzywą gęstości w przedziale "od $-\infty$ do $+\infty$ jest równe jedności,
- adekwatnie opisuje, z założonym stopniem prawdopodobieństwa, rozkład trwałości uzyskany z doświadczeń.

3.3. Estymowanie parametrów rozkładu

Procesy rządzące zużyciem się narzędzia są na tyle mało poznane, że przy obecnym stanie wiedzy nie jest możliwe teoretyczne określenie prawa rozkładu i wyznaczenie jego parametrów. Dlatego też rozkład trwałości ostrza należy określać na podstawie dużej liczby danych doświadczalnych. W pracach [16,21,23,28,50] można znaleźć wiele sposobów rozwiązania tego zagadnienia. Należą do nich:

a/ Wyznaczenie współczynnika zmienności na podstawie wyników przeprowadzonych doświadczeń. Znajomość współczynnika zmienności ułatwia określenie charakteru rozkładu i jego parametrów, gdyż istnieją tablice zależności tych parametrów od współczynnika zmienności.

b/ Zbudowanie histogramu lub funkcji gęstości rozkładu na podstawie danych doświadczalnych i porównanie ich z teoretyczną krzywą gęstości rozkładu.

c/ Zbudowanie empirycznej funkcji gęstości rozkładu na siatce prawdopodobieństwa, na której otrzymuje się zależność liniową w przypadku zgodności rozkładu teoretycznego i doświadczalnego. Do tego celu sporządzono siatki prawdopodobieństw dla różnych rozkładów.

Jeśli występuje tzw. próg czułości T_0 , to podczas estymowania parametrów rozkładów oraz posługiwania się funkcjami gęstości i dystrybuanty, należy wszędzie tam, gdzie występują we wzorach wielkości T i T_{gr} wstawić odpowiednio $T-T_0$ i $T_{gr}-T_0$. Dalszy tok postępowania nie ulega zmianie.

4. KOSZTY I WYDAJNOŚĆ TOCZENIA

=====

4.1. Funkcja kosztów skrawania

W operacji jednonarzędziowego toczenia wzdłużnego, koszty zeskrwania jednostki objętości materiału można wyrazić równaniem (4) zaczerpniętym z [14,15,35], które jednocześnie służy jako funkcja celu podczas doboru optymalnych parametrów skrawania ze względu na najmniejsze koszty wytwarzania

$$K_v = A + B + \frac{C}{v \cdot s} + \frac{D}{v \cdot s \cdot T} \quad (4)$$

gdzie:

$$A = \frac{(K_m + L)t_{pz}}{60n_{sz}\pi d l a}, \quad B = \frac{(K_m + L)t_p}{60 \pi d l a}$$

$$C = \frac{(K_m + L)}{6 \cdot 10^4 a}, \quad D = \frac{(K_m + L)t_{wn} + 60W_N}{6 \cdot 10^4 a}$$

Koszty A i B zależą od wymiarów przedmiotu, rodzaju obrabiarki, wynagrodzenia pracownika, liczby sztuk w partii wyrobów oraz od godzinowego kosztu pracy obrabiarki, stanowiska i wyposażenia. Bą one jednak stałe dla danej operacji i niezależne od parametrów skrawania.

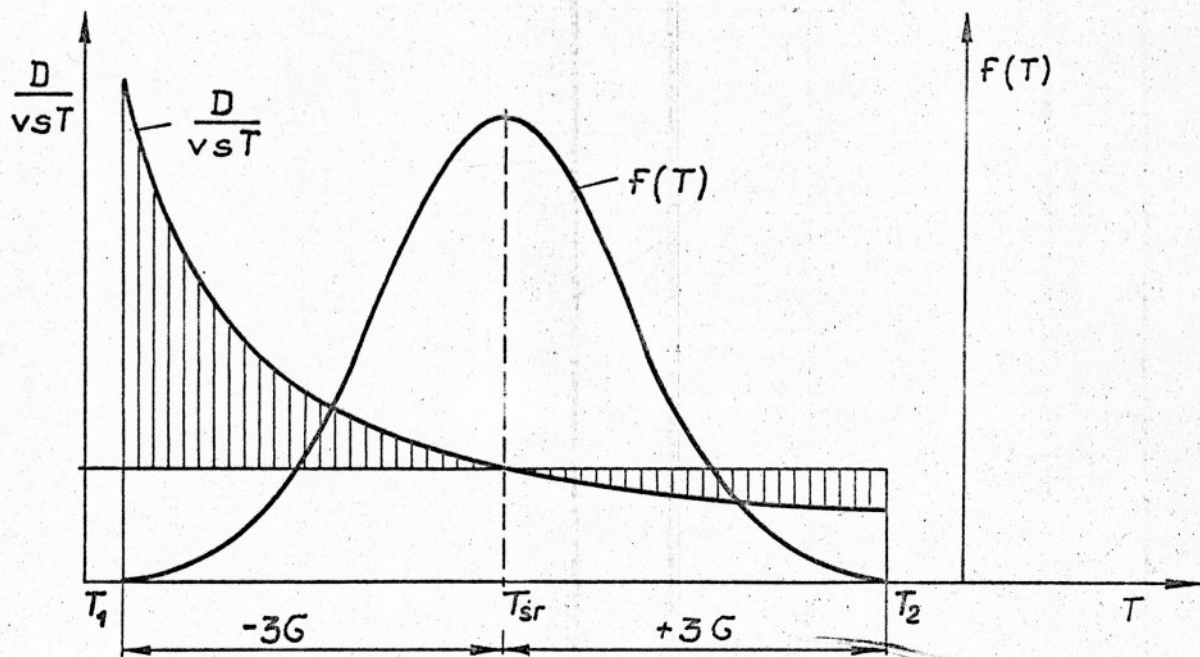
Trzeci składnik C/vs w równaniu (4) jest związany z czasem głównym i maleje wraz ze wzrostem parametrów skrawania. Im większe są wartości tych parametrów tym szybciej usunięta zostanie określona objętość materiału, a tym samym mniejsze będą koszty pracy stanowiska i wynagrodzenia pracownika przypadające na daną operację. Stosowanie coraz to większych wartości parametrów skrawania pociąga za sobą obniżenie się okresu trwałości narzędzia, a tym samym wzrost kosztów związanych

z wymianą narzędzia oraz z kosztami samego narzędzia. Koszty te przedstawia ostatni człon równania (4).

4.2. Wpływ rozrzutu trwałości narzędzia na koszty skrawania

W ostatnim członie funkcji kosztów D/vsT występuje w mianowniku trwałość ostrza T , która, jak już wspomniano, waha się z przyczyn losowych w dość szerokich granicach.

Rozważmy przypadek, w którym dwa kolejne okresy trwałości różnią się od wartości średniej i wynoszą $T_1 = T_{sr} - 3\sigma$ i $T_2 = T_{sr} + 3\sigma$ /rys.9/. Przyrost kosztów spowodowany krótszym okresem trwałości jest znacznie większy niż obniżenie kosztów wynikłe ze wzrostu trwałości, mimo iż odchylenia od wartości średniej były w obu wypadkach takie same. Spowodowane jest to tym, że ostatni człon równania (4) jest funkcją hiperboliczną względem trwałości ostrza.



Rys.9. Zależność kosztów skrawania i gęstości rozkładu trwałości narzędzia od rozrzutu trwałości ostrza.

Chcąc określić jak rozkład trwałości narzędzia wpływa na ostatni człon równania (4), należy obliczyć następujące wyrażenie:

$$\Delta = \frac{\int_0^{\infty} f(T) \cdot \frac{1}{T} dT - \frac{1}{T_{sr}}}{\frac{1}{T_{sr}}} \cdot 100\% \quad (5)$$

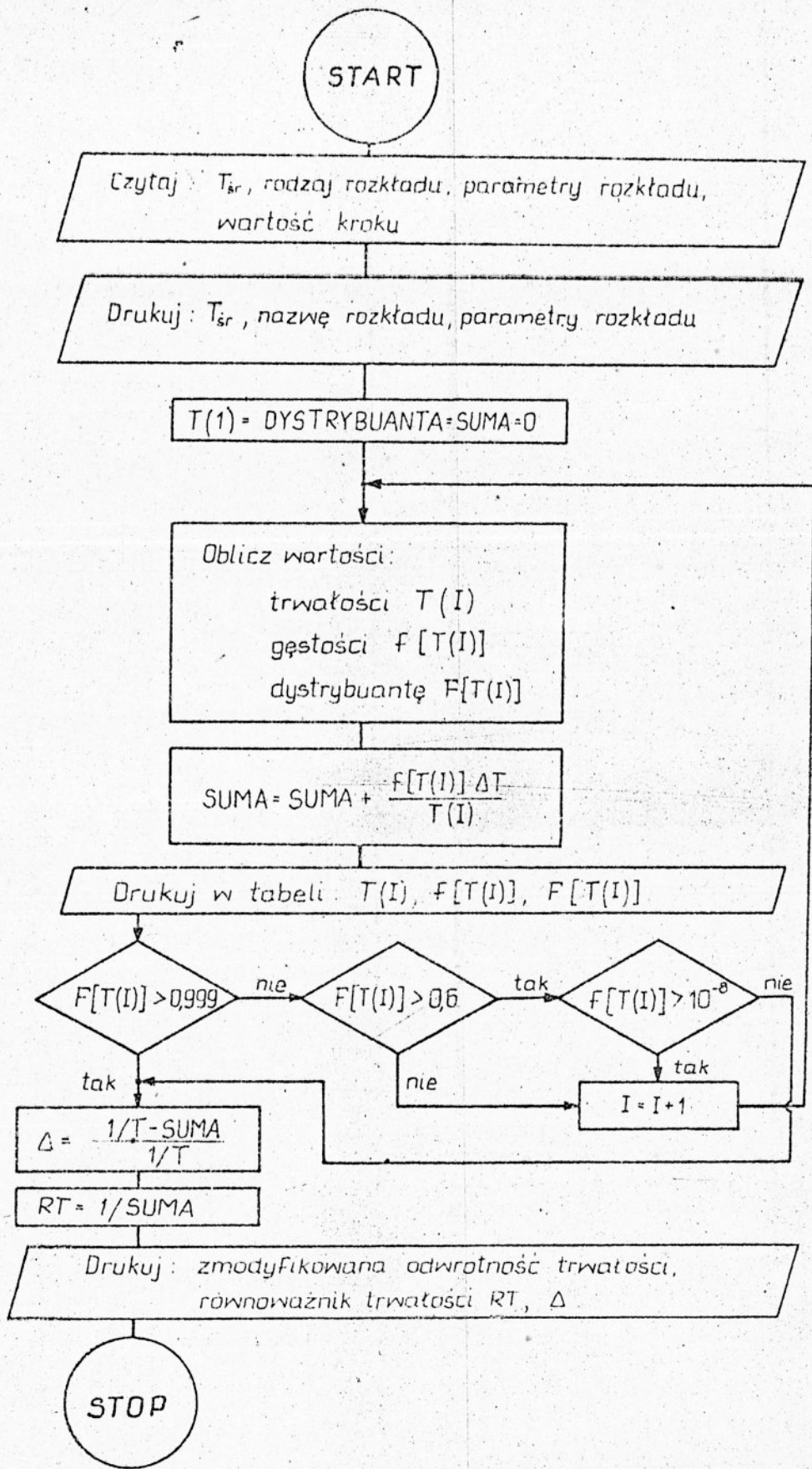
w którym $f(T)$ jest funkcją gęstości prawdopodobieństwa wystąpienia trwałości ostrza, określoną któryś z omawianych uprzednio rozkładów.

Równanie (5) wyraża w procentach wartość, o którą zmieni się ostatni człon równania (4), gdy trwałość ostrza podlegać będzie prawom rozkładu statystycznego.

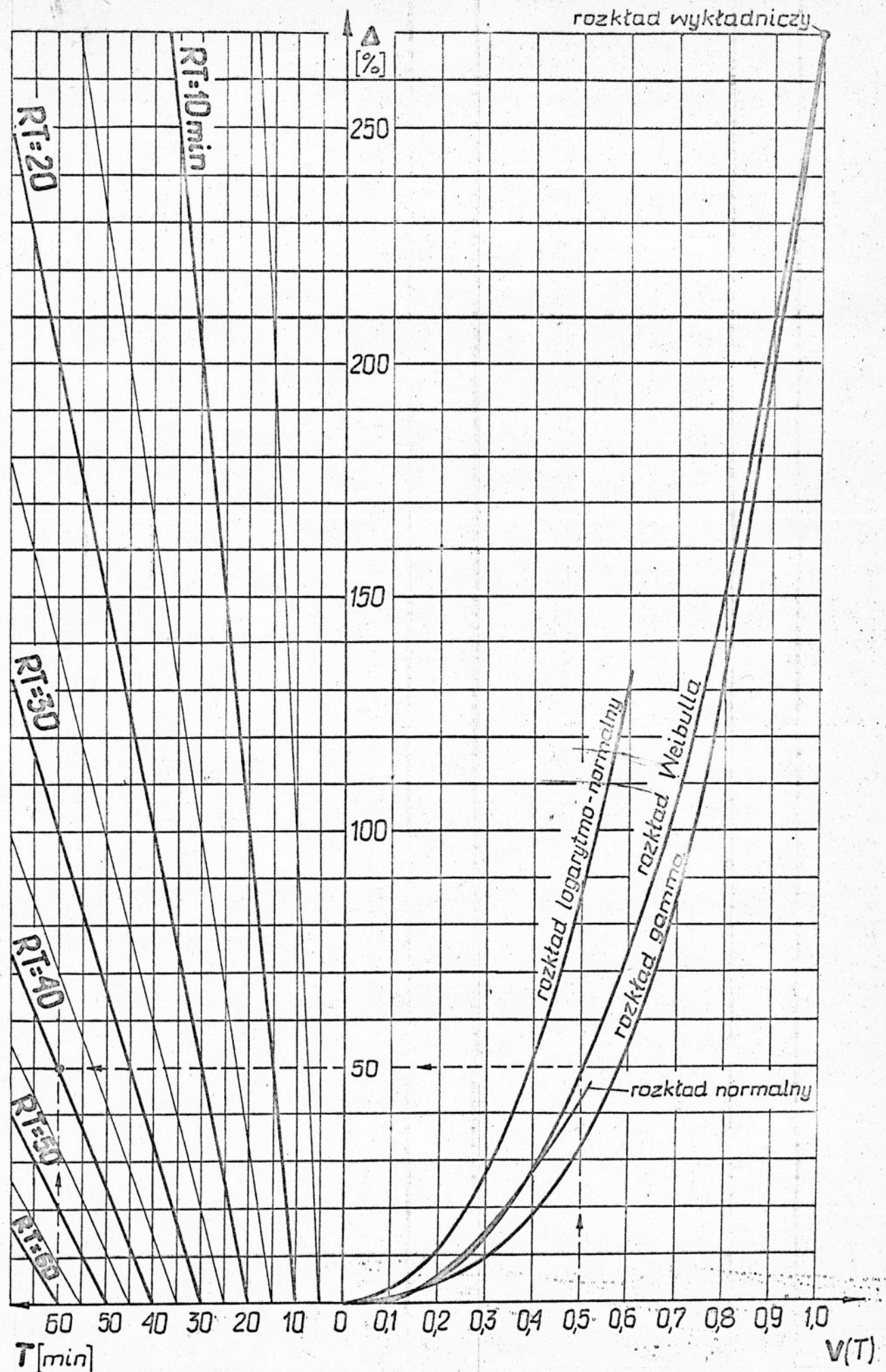
Przeprowadzono obliczenia wartości Δ dla różnych wartości średnich trwałości i różnych rozkładów. Schemat blokowy obliczeń przeprowadzonych na MC przedstawia rys.10.

Po wczytaniu do MC danych dotyczących parametrów rozkładu i współczynnika zmienności i po przeprowadzeniu obliczeń, otrzymuje się wyniki w postaci tabelaryzowanej funkcji gęstości i dystrybuanty oraz wartości zmodyfikowanej odwrotności trwałości, równoważnika trwałości i wartość Δ . Z tablic dystrybuanty można odczytać okres niezawodnej pracy narzędzia dla dowolnego stopnia prawdopodobieństwa.

Z rozważań teoretycznych potwierdzonych obliczeniami wynika, że jeśli przyjmie się określoną wartość współczynnika zmienności $V(T)$, to dla dowolnego rozkładu, wartość Δ nie zależy od wartości średniej trwałości, lecz jedynie od $V(T)$. Takie postawienie zagadnienia ma duże znaczenie praktyczne, ponieważ raz wyliczona wartość Δ , dla określonego $V(T)$ i danego rozkładu, przybiera takie same wartości dla dowolnej trwałości ostrza. Opierając się o tą prawidłowość sporządzono wykres zależności Δ od współczynnika zmienności dla różnych rozkładów /rys.11/.



Rys. 10. Uproszczony schemat blokowy obliczeń na EC do określenia wartości Δ , RT, okresu naliczania T_N pracy T_N



Rys.11. Zależność odchylenia Δ w funkcji współczynnika zmienności $V(T)$ i rodzaju rozkładu oraz zależność równoważnika trwałości RT od odchylenia Δ i trwałości T_{sr}

Z danych zamieszczonych w pracach [10,28] wynika, że współczynnik zmienności trwałości ostrza może wahać się w granicach od 0,27 + 1,16. Dla tych wartości współczynnika $V(T)$ wielkość Δ osiągała bardzo duże wartości, mieszczące się w przedziale od 8 do 300%. Tak duże zmiany ostatniego członu równania (4) nie mogą być nieuwzględniane podczas określania kosztów wytwarzania, czy też przy szukaniu optymalnych parametrów skrawania.

Lewą stronę wykresu, na rys.11, stanowi nomogram do wyznaczania równoważnika trwałości RT . Równoważnik ten wyznaczony dla określonej trwałości i danego rozkładu, wstawiony do funkcji (4) w miejsce wartości T , spowoduje zmianę ostatniego członu funkcji kosztów o wartość Δ . Równoważnik trwałości określony jest zależnością

$$RT = \frac{T_{\text{sr}}}{\frac{\Delta}{100} + 1} \quad (6)$$

Aby wyznaczyć z nomogramu wartość RT , wystarczy znać rodzaj rozkładu trwałości ostrza, wartość trwałości średniej T_{sr} i współczynnik zmienności $V(T)$. Na wykresie zaznaczono przykładowo sposób określania równoważnika trwałości RT dla $V(T) = 0,5$, $T_{\text{sr}} = 60$ min i rozkładu Weibulla. Wartość RT wynosi 40 min.

Przedstawiony nomogram pozwala wyjaśnić jeszcze inny problem, związany z jakością narzędzia i ekonomicznością obróbki.

Powołując się na przytoczony przykład, dla $T_{\text{sr}} = 60$ min i $V(T) = 0,5$ otrzymano równoważnik $RT = 40$ min. Otóż z ekonomicznego punktu widzenia, tak samo dobre jest narzędzie, które w tych samych warunkach pracy ma krótszy okres trwałości $T_{\text{sr}} = 50$ min i mniejszy współczynnik zmienności $V(T) = 0,38$, gdyż odpowiadający mu równoważnik trwałości jest taki sam

jak poprzednio i wynosi $RT = 40$ min.

Rozważmy inny przykład. Zwiększono trwałość narzędzia z 60 min na 66 /a więc o 10%/ , kosztem pogorszenia się stabilności jego pracy, co spowodowało, że dla tych samych warunków eksploatacji współczynnik zmienności zwiększył się z wartości 0,5 na 0,6. W efekcie uzyskano zmniejszenie się równoważnika trwałości z 40 na 37,6 min.

Z powyższych przykładów wynika, że podwyższanie jakości narzędzi poprzez zwiększanie ich trwałości może, w przypadku jednoczesnego wzrostu rozrzutu ich trwałości, spowodować obniżenie uzyskiwanych przez nie efektów ekonomiczno-produkcyjnych.

Rozrzuty trwałości narzędzi są spowodowane nie tylko złą jakością narzędzi ale również błędami eksploatacji. Tak więc, poprawa warunków pracy ostrza idąca w kierunku zmniejszenia rozrzutu jego trwałości, spowoduje również wzrost efektów ekonomicznych obróbki. I odwrotnie, zwiększając parametry skrawania pogarsza się na ogół warunki pracy ostrza, przez co wzrasta rozrzut trwałości narzędzi. Może to spowodować, że zamierzony efekt zwiększenia wydajności czy obniżki kosztów będzie znacznie mniejszy niż się spodziewano.

Aby uniknąć tych wszystkich błędów i nieścisłości, o których była mowa, celowym wydaje się zmodyfikowanie funkcji celu (4) do następującej postaci

$$K_V = A + B + \frac{C}{v \cdot s} + \frac{D}{v \cdot s} \int_0^{\infty} f(T) \cdot \frac{1}{T} dT \quad (7)$$

Aby wykazać, że stosowanie nowej funkcji kosztów wytwarzania jest uzasadnione z teoretycznego i praktycznego punktu widzenia, należy dokonać obliczeń kosztów korzystając z obu postaci funkcji.

Obliczenia takie wykonano dla jednozabiegowego toczenia wzdłużnego na tokarce uniwersalnej dla warunków dużego zakładu produkcyjnego.

Dane do przykładu: $K_m = 5,75$ zł/h, $L = 15,40$ zł/h, $W_N = 10,50$ zł/h, $t_{pz} = 24$ min, $t_p = 0,54$ min, $t_{wn} = 1,25$ min, $d = 160$ mm, $l = 600$, $a = 0,5$ i 4 mm, $n_{sz} = 600$ szt, $k_u = 0,13$, materiał obrabiany stal 14 HNMBCu, nóż składany NNZnP, materiał ostrza TCS2. Założono, że rozrzut trwałości ostrza jest opisany, w całym zakresie zmian badanych parametrów skrawania, rozkładem normalnym o współczynniku zmienności $V(T) = 0,32$. Wartość całki ze wzoru (7) określano metodą prostokątów, a obliczeń dokonano na MC.

Na podstawie wyników z obliczeń sporządzono wykres warstwowy kosztów zeskrwania jednostki objętości materiału w funkcji posuwu i prędkości skrawania /rys.12/.

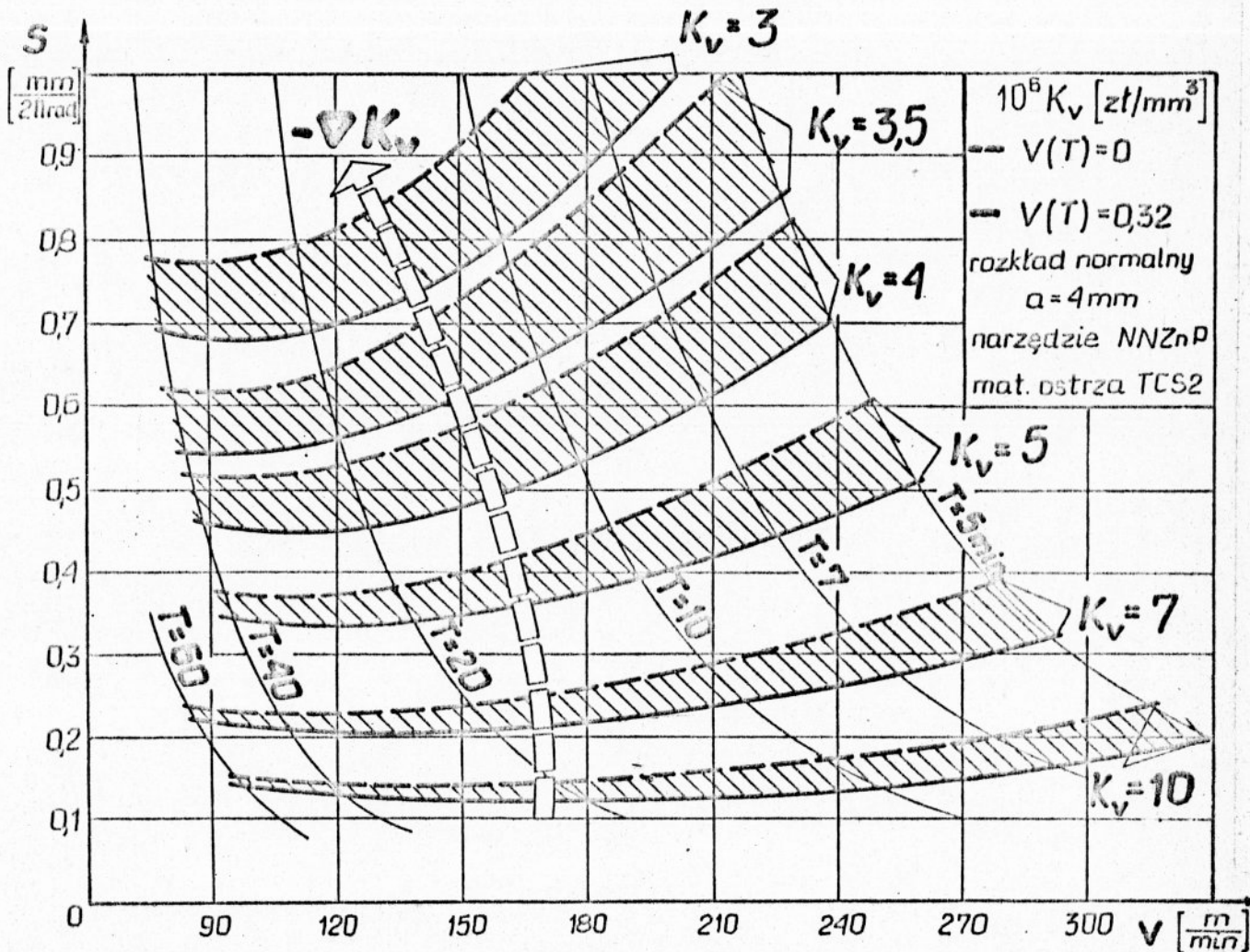
Analizując powierzchnię odpowiedzi kosztów wytwarzania, otrzymaną z tradycyjnego wzoru (4) /linia ciągła/ oraz według wzoru zmodyfikowanego (7) /linia przerywana/, można sformułować kilka spostrzeżeń:

- funkcja kosztów jest fragmentem wklęsłej czaszy, a kierunek wzrostu efektywności skrawania zdominowany jest głównie przyrostem wartości posuwu i w niewielkim stopniu zmniejszaniem się prędkości skrawania,

- różnice kosztów wytwarzania, liczone wg tradycyjnego i zmodyfikowanego wzoru są w całym przebadanym obszarze dość znaczne i wahają się w granicach od 5 do 13,5%,

- największa różnica kosztów występuje dla średnich prędkości skrawania i dużych posuwów, co odpowiada obróbce zgrubnej oraz dla dużych prędkości i małych posuwów, charakterystycznych dla obróbki wykończającej.

Funkcja celu nie osiągnęła swojego ekstremum, jednak miejsce najmniejszych kosztów znalazło się w obszarze prawie stacjonarnym. Powoduje to, że niedokładność określenia powierzchni odpowiedzi nawet o kilka procent, daje dość znaczne przesunięcie na siatce współrzędnych s-v. Tak więc, nawet niewielkie błędy w określeniu kosztów spowodowane nieuwzględnieniem losowego charakteru rozkładu trwałości narzędzia, mogą spowodować dość duże zmiany wartości optymalnych parametrów skrawania, a tym samym i wydajności, o czym będzie mowa w następnym rozdziale.



Rys.12. Wykres warstwiczny funkcji kosztów skrawania

Dla innych typów rozkładów i współczynników zmienności niż ten, dla którego przeprowadzono obliczenia, błędy w

określeniu funkcji kosztów będą się różnić od podanych w przykładzie. Aby ocenić wartości tych błędów, sporządzono wykres zależności K_V i ΔK_V od wartości Δ , dla współczynników $V(T)$ zmieniających się w szerokich granicach i różnych rozkładów /rys.13/. ΔK_V jest procentową różnicą wartości kosztów określonych wzorem tradycyjnym (4) i zmodyfikowanym (7). Na wykresie przedstawiono wyżej wymienione zależności dla dwóch zestawów parametrów skrawania, odpowiadających obróbce zgrubnej i wykończającej.

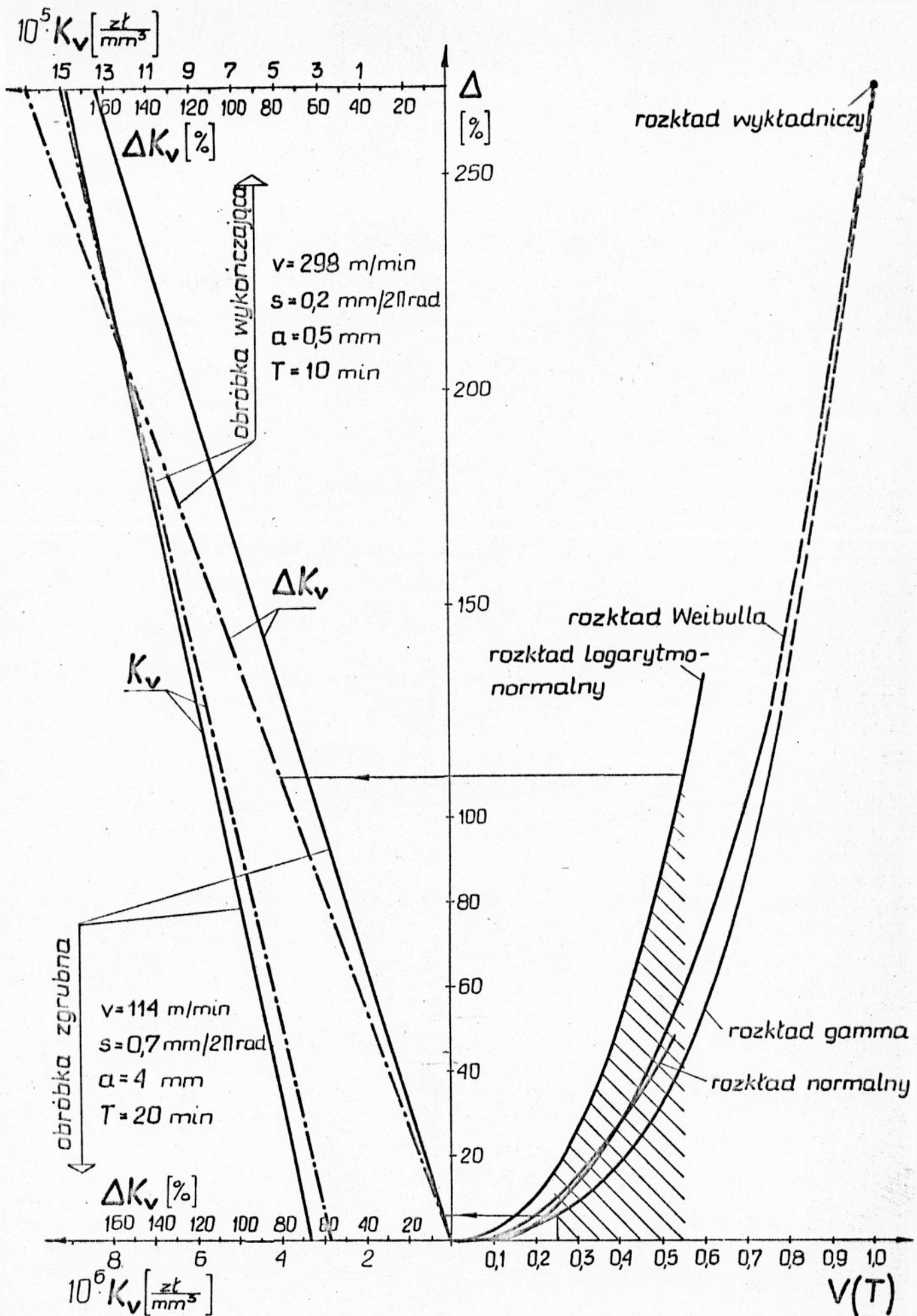
Najczęściej, przy prawidłowo przebiegającym procesie skrawania, rozrzut trwałości narzędzia można opisać współczynnikiem zmienności, którego wartość mieści się w przedziale od 0,25 do 0,55. Jak wynika z wykresów przedstawionych na rys.13, powoduje to, dla typowych rozkładów trwałości narzędzi, wzrost kosztów wytwarzania od 5 do 64% dla obróbki zgrubnej i od 5 do 82% dla obróbki wykończającej.

Przy większych zakłóceniach losowych, powodujących wzrost wartości współczynnika zmienności trwałości ostrza, koszty wytwarzania mogą wzrosnąć nawet dwukrotnie.

Koszty wytwarzania obróbki wykończającej silniej reagują na rozrzut trwałości narzędzi niż koszty obróbki zgrubnej.

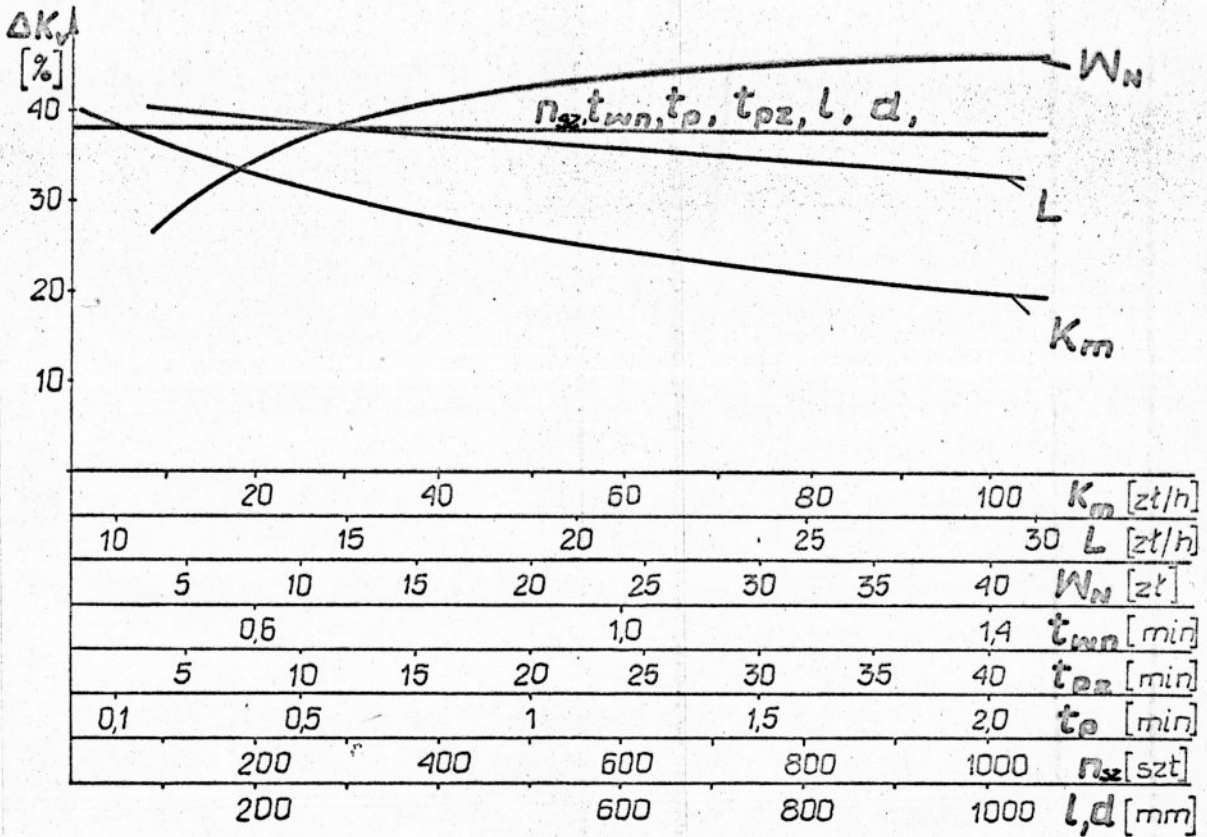
Aby wnioski i spostrzeżenia dotyczące wzrostu kosztów wytwarzania spowodowanego rozrzutem trwałości ostrza, miały bardziej ogólny charakter i nie dotyczyły tylko tego przykładu, dla którego przytoczono obliczenia, przeanalizowano wpływ wszystkich czynników występujących w funkcjach (4) i (7) na wzrost lub obniżenie błędu jej określenia.

Dla zestawu parametrów skrawania charakterystycznego dla obróbki wykończającej $v = 298$ m/min, $s = 0,2$ mm/2 π rad, $a = 0,5$ mm/ oraz stałej wartości $\Delta = 50\%$, zmieniano w dość



Rys.13. Wzrost kosztów wytwarzania w zależności od współczynnika zmienności $V(T)$ i rodzaju rozkładu statystycznego trwałości

szerokim zakresie wartości pozostałych czynników występujących we wzorach (4) i (7). Procentową różnicę z obu wzorów odniesioną do wartości funkcji niezmodyfikowanej przedstawiono na rys.14.



Rys.14. Zmiany ΔK_V w zależności od czynników występujących w funkcji (7).

Jak widać z przytoczonych na tym wykresie zależności, błąd określenia wartości kosztów skrawania metodą tradycyjną rośnie w miarę zwiększania się kosztów narzędzia przypadających na jeden okres trwałości W_N i maleje ze wzrostem godzinowego kosztu pracy stanowiska K_m , wynagrodzenia pracownika L .

Wpływ pozostałych czynników takich, jak $n_{sz}, t_{wn}, t_p, t_{pz}, l$ i d , powoduje zmiany ΔK_V nie przekraczające 0,5% i można uznać go za nieistotny.

4.3. Wydajność skrawania

Drugim ważnym, a czasem nawet wysuwającym się na plan pierwszy, kryterium optymalności obróbki skrawaniem, obok kosztów wytwarzania, jest wydajność.

Optymalizując parametry skrawania ze względu na maksymalną wydajność, jako funkcję celu przyjmuje się minimalny czas wykonania danej operacji lub maksymalną objętość zeskrawanego materiału w jednostce czasu. Obie te funkcje są zamienne i obliczone z nich optymalne parametry skrawania nie różnią się między sobą.

Biorąc za podstawę definicję normy czasu zadania roboczego, opracowano zależność wyrażającą średni czas wykonania jednej sztuki w danej partii wyrobów.

$$t = \frac{t_{pz}}{n} + \left\{ t_p + \frac{\pi dl}{10^3 v \cdot s} \left[1 + \frac{t_{wn}}{T} \right] \right\} (1 + k_u) \quad (8)$$

W funkcji tej trwałości narzędzia również występuje w mianowniku i daje się zauważyć wpływ jej rozrzutu na wydajność skrawania.

Obliczenia czasu wykonania jednej sztuki, w zależności od parametrów skrawania v i s , przeprowadzono dla danych i założeń z poprzedniego przykładu /rozdz.4.2/. Również i w tym przypadku dokonano analizy wpływu rozkładu trwałości ostrza na czas wykonania jednej sztuki. Porównano wyniki obliczeń otrzymanych ze wzoru (8) oraz, analogicznie jak poprzednio, ze zmodyfikowanej funkcji celu

$$t = \frac{t_{pz}}{n} + \left\{ t_p + \frac{\pi dl}{10^3 v \cdot s} \left[1 + t_{wn} \int_0^{\infty} f(T) \frac{1}{T} dT \right] \right\} (1 + k_u) \quad (9)$$

Po przeprowadzeniu wyliczeń i uwzględnieniu zależności, że wydajność jest odwrotnością czasu wykonania $W = 1/t$

szt/min , sporządzono wykres warstwicowy wydajności w funkcji parametrów skrawania v i s /rys.15/.

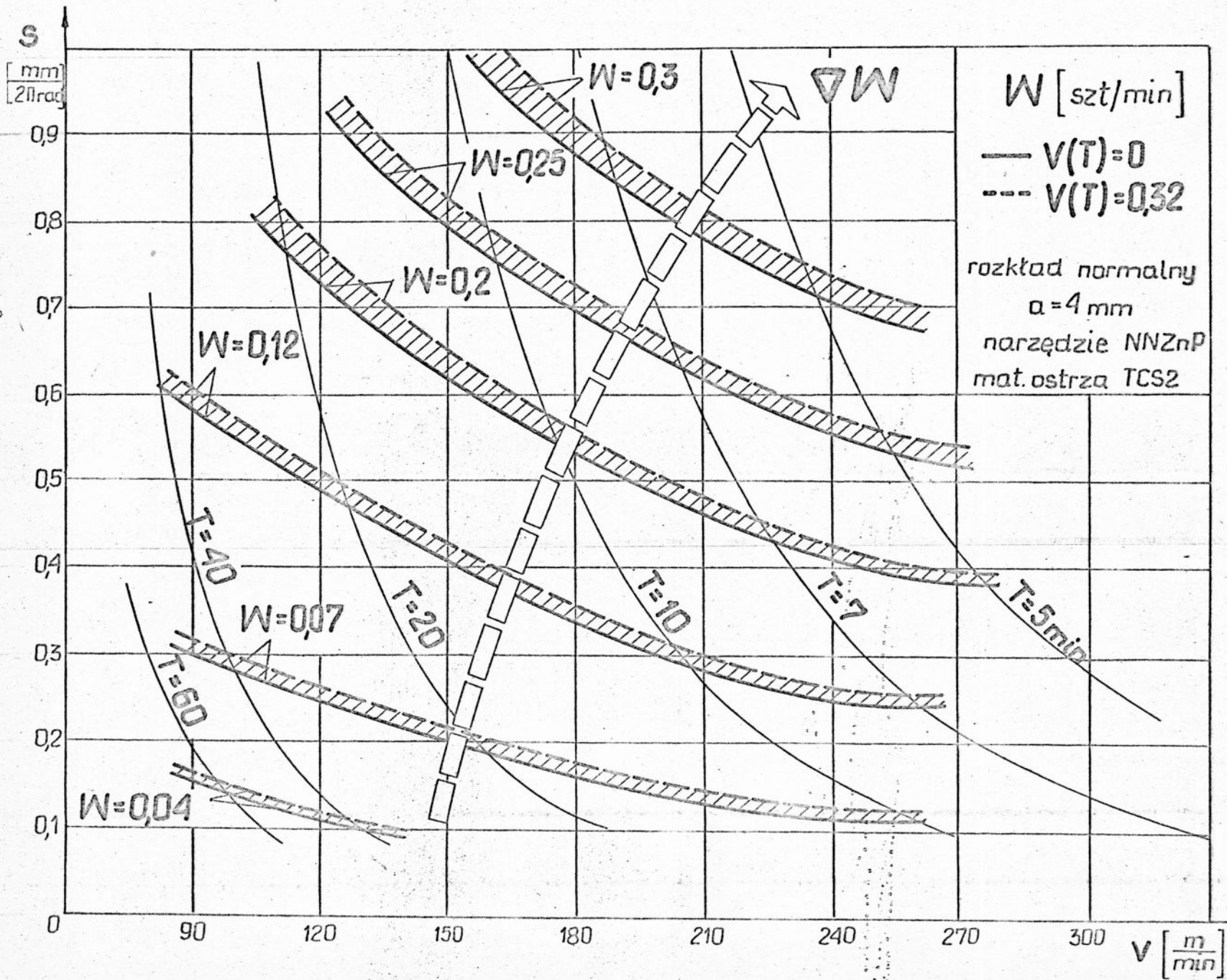
Również i w tym przypadku, tak jak i dla kosztów wytwarzania, funkcja celu nie posiada ekstremum dla przyjętego przedziału zmian parametrów skrawania. Można jedynie przypuszczać, że w górnym prawym rogu wykresu znajduje się obszar prawie stacjonarny, ponieważ gradient przyrostu wydajności jest w tym miejscu bardzo mały.

Przedstawiona powierzchnia wydajności, w przeciwieństwie do powierzchni kosztów, stanowi fragment wypukłej czaszy.

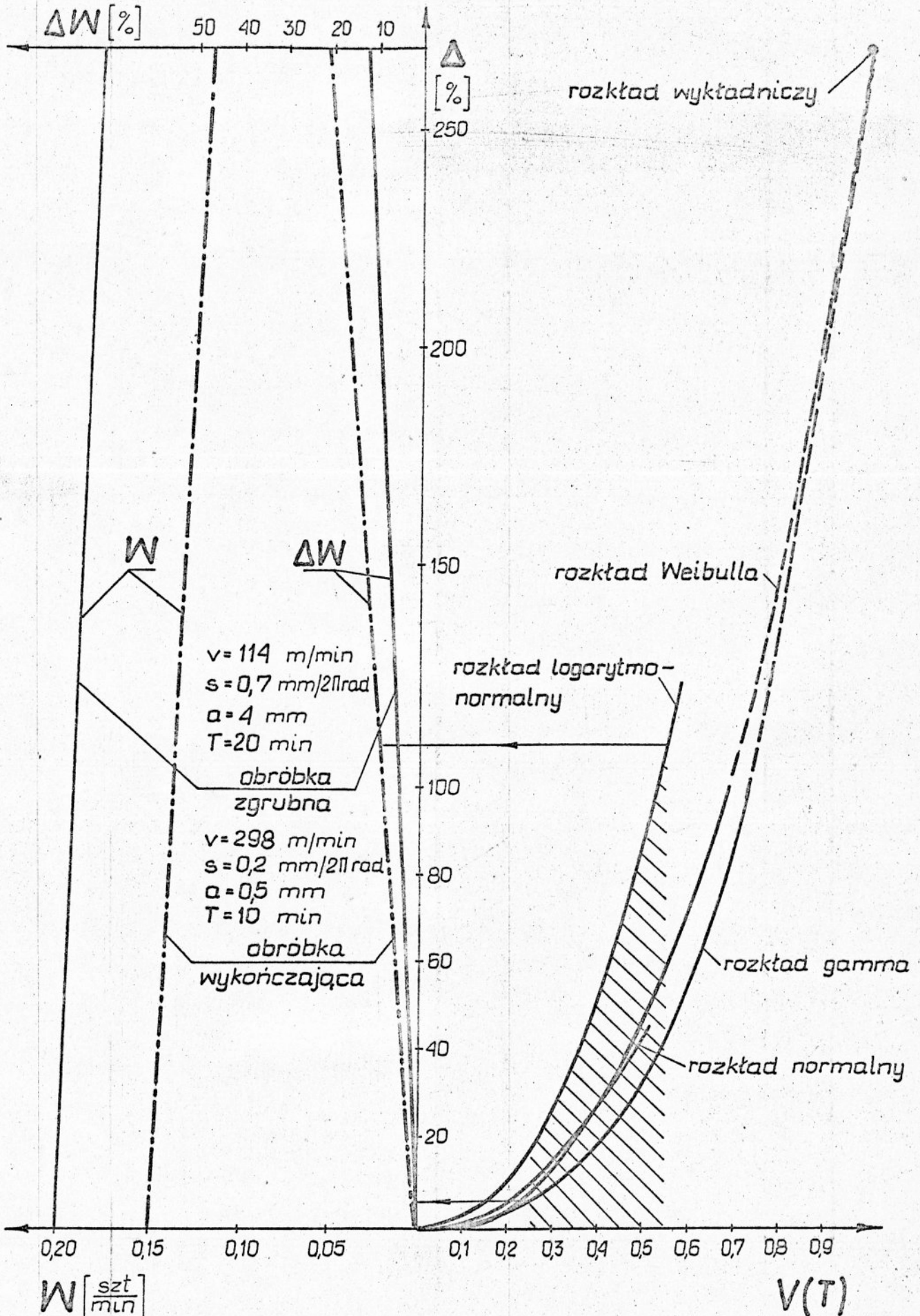
Z obliczeń wynika, że dla całego przebadanego zakresu zmian parametrów skrawania, różnice w wydajnościach określonych wzorami (8) i (9), wahały się od 0,25 do 3,2%, a więc były niewielkie. Największe odchylenia wystąpiły między innymi dla zestawów parametrów skrawania charakterystycznych dla obróbki zgrubnej i wykończającej. Efekt zastosowania zmodyfikowanej funkcji celu jest tu jednak znacznie mniejszy niż dla kosztów wytwarzania.

Tak jak dla kosztów wytwarzania, oceniono również zmiany wydajności spowodowane różnymi rozkładami i współczynnikami zmienności. Dla dwóch zestawów parametrów, charakterystycznych dla obróbki zgrubnej i wykończającej, sporządzono wykres zależności W i ΔW od wielkości Δ /rys.16/.

Błędy określenia dokładnej wartości wydajności ΔW metodą tradycyjną są znacznie mniejsze niż w wypadku kosztów. Dla najczęściej występujących rozrzutów trwałości /obszar zakreślowany na rys.16/ wahają się one średnio od 0,5 do 5,5% dla obróbki zgrubnej i od 1 do 9% dla obróbki wykończającej. Podobnie jak przy kosztach, wydajność skrawania dla warunków obróbki wykończającej jest w większym stopniu zakłócana losowo.



Rys.15. Wykres war-
stwicowy funkcji wy-
dajności skrawania

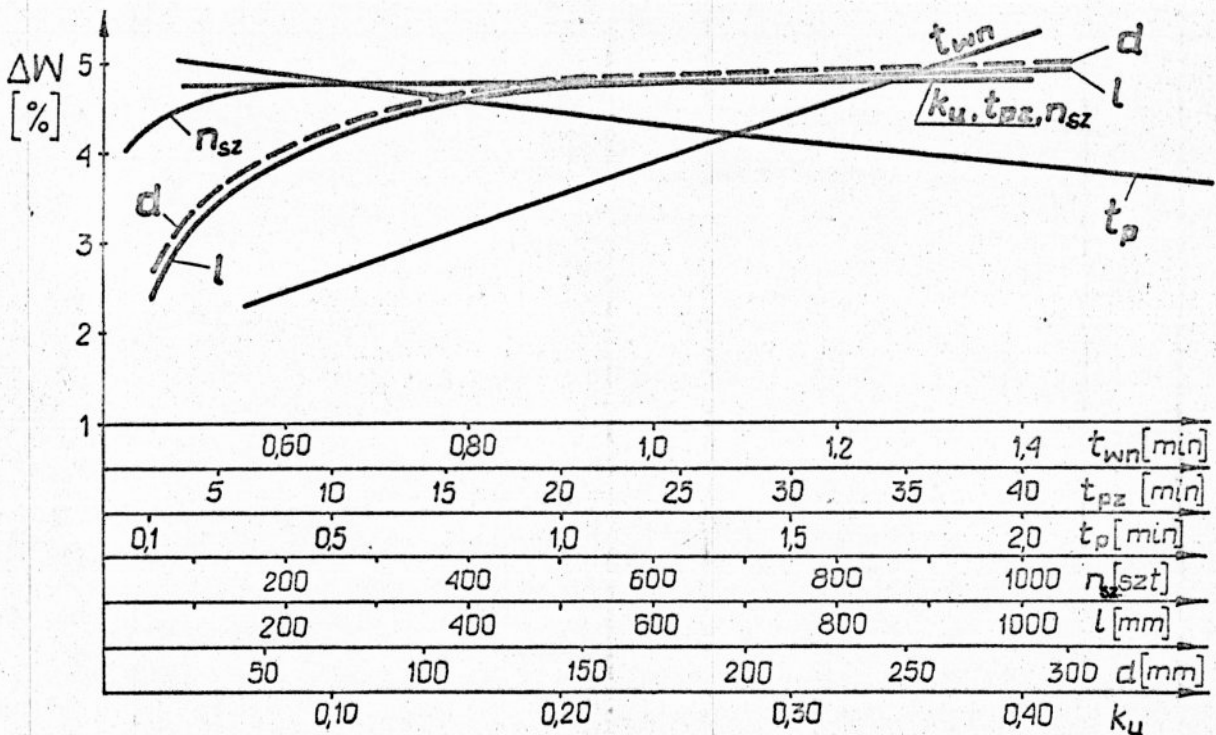


Rys.16. Zmniejszanie się wydajności skrawania w zależności od współczynnika zmienności $V(T)$ i rodzaju rozkładu statystycznego trwałości

wym rozrzutem trwałości narzędzia niż w obróbce zgrubnej.

Przeanalizowano i wyjaśniono czy w różnych warunkach techniczno-organizacyjnych otrzyma się podobne odchylenia wartości wydajności toczenia spowodowane nieuwzględnieniem rozrzutu trwałości ostrza.

Dla tych samych danych, dla których sporządzono wykres błędu określenia kosztów ΔK_v /rys.14/ zmieniano w szerokim zakresie wartości czynników występujących we wzorach (8) i (9). Różnicę uzyskaną z obu wzorów, odniesioną do wartości funkcji tradycyjnej, przedstawiono graficznie na rys.17.



Rys.17. Zmiany ΔW w zależności od wartości czynników występujących w funkcji (9).

Wartość odchylenia ΔW nie zależy, praktycznie biorąc, od takich czynników jak k_u i t_{pz} . W miarę zwiększania wartości d, l i t_{wn} , błąd ΔW rośnie, natomiast czas pomocniczy wpływa odwrotnie i ze wzrostem wartości t_p błąd maleje. Powiększanie liczby sztuk w partii zwiększa wartość błędów ΔW , lecz gdy przekroczy ona 200 sztuk, to dalszy wzrost błędów jest już prawie niezauważalny.

W równaniach (4) i (8), będących funkcjami kosztów i czasu wykonania zabiegu, występują oprócz trwałości ostrza, jeszcze inne wielkości, które podlegają prawom statystycznego rozkładu. Należą do nich czasy t_{pz} , t_p i t_{wn} , ale ponieważ występują one zawsze w liczniku, to oba równania względem nich są funkcjami liniowymi. Odchylenia kosztów i wydajności, spowodowane rozrzutem tych czasów, są więc względem nich proporcjonalne i nie powodują żadnego błędu w określeniu wartości funkcji celu. Jedynie w przypadku silnej asymetrii rozkładów tych wielkości, mogą pojawić się pewne zakłócenia w dokładnym określeniu wartości funkcji. W praktyce natomiast czasy te prawie zawsze można opisać rozkładem normalnym, który jest symetryczny.

Po nałożeniu na siebie wykresów przedstawiających zależność kosztów i wydajności od parametrów skrawania, można sformułować kilka spostrzeżeń:

1. Miejsca najmniejszych kosztów i maksymalnej wydajności skrawania nie pokrywają się ze sobą.

2. Nieuwzględnienie faktu, że trwałość narzędzia podlega prawom statystycznego rozkładu, powoduje, że obliczone wartości kosztów wytwarzania oraz wydajności są bardziej optymistyczne niż te, które można osiągnąć praktycznie. Powoduje to często niechęć użytkowników do stosowania procedur optymalizacyjnych, co wynika z występowania różnic w wartościach obliczonych teoretycznie i uzyskiwanych w rzeczywistości.

Rozrzut trwałości ostrza zakłóca efekty ekonomiczno-produkcyjne nie tylko w przypadku toczenia ale również w innych odmianach obróbki skrawaniem, jak np. w wierceniu, gwintowaniu, frezowaniu, struganiu itp.

Zalecany przez niektórych autorów, np. M. Białka [3], S. Ziętarskiego, J. Pytkowskiego [58] pogląd, że należy dobrać takie parametry skrawania, aby trwałość ostrza stanowiła wielokrotność czasu maszynowego, jest słuszny jedynie wtedy, gdy obróbka wykonywana jest na tokarkach sterowanych programowo. Wtedy bowiem trwałość określa się nie jako wartość średnią, lecz jako okres niezawodnej pracy, po którym należy wymienić narzędzie, niezależnie od jego stopienia. W pozostałych przypadkach, gdy narzędzie wymienia się, po osiągnięciu przez nie kryterium stopienia, uzyskiwane trwałości narzędzi tak znacznie mogą różnić się od wartości średniej, że zalecenie, aby okres trwałości stanowił wielokrotność czasu maszynowego, nie ma praktycznego znaczenia.

4.4. Wnioski

Na podstawie rozważań teoretycznych oraz wyników obliczeń można sformułować następujące wnioski.

1. Zastosowanie zmodyfikowanej funkcji celu do określania optymalnych parametrów skrawania lub wyliczania spodziewanych kosztów i wydajności produkcji, daje znacznie lepsze przybliżenie do wartości rzeczywistych niż tradycyjna funkcja celu, która nie uwzględnia losowego charakteru rozkładu trwałości narzędzia.

2. Największe odchylenia powierzchni odpowiedzi, gdy określa się ją metodą tradycyjną i zmodyfikowaną, występują między innymi w tych miejscach przestrzeni czynnikowej, które odpowiadają warunkom obróbki zgrubnej i wykończającej.

3. W obszarach stacjonarnych lub prawie stacjonarnych nawet niewielkie przemieszczenia powierzchni odpowiedzi, powodują znaczne różnice w doborze optymalnego zestawu parametrów

skrawania. Daje się zauważyć duży wpływ błędu określenia kosztów wytwarzania na wydajność skrawania.

4. Błąd określenia wartości funkcji celu metodami tradycyjnymi nie zależy od wartości średniej okresu trwałości, lecz jedynie od współczynnika zmienności $V(T)$.

5. W numerycznej procedurze optymalizacyjnej, nawet niewielkie odchylenia od wartości rzeczywistych, tak kosztów jak i wydajności, mogą spowodować dobór takiego zestawu parametrów skrawania, który znacznie różni się od optymalnego, gdyż dla większości obrabiarek nastawianie obrotów i posuwów realizowane jest w sposób dyskretny - a nie ciągły.

6. Brak ekstremów funkcji kosztów i wydajności w dość szerokim przebadanym obszarze, upoważnia do stwierdzenia, że procedury optymalizacyjne, w których poszukiwanie optymalnych parametrów skrawania odbywa się na drodze upochodniania funkcji celu, mogą napotykać na wynikające stąd trudności.

5. OPTIMALIZACJA PARAMETRÓW SKRAWANIA W TOCZENIU

=====

5.1. Ograniczenia i warunki brzegowe obszaru rozwiązań

Parametry skrawania, takie jak prędkość skrawania v , posuw s i głębokość skrawania a , tworzą przestrzeń trójwymiarową, w której dla założonego kryterium, można znaleźć miejsce optymalnych rozwiązań. Poruszając się w takiej przestrzeni napotyka się na warunki brzegowe zwane o g r a n i c z e - n i a m i , których przekroczenie jest niewskazane lub niemożliwe.

W większości wypadków funkcja celu, opisująca optymalizowany obiekt, nie ma swojego ekstremum w obszarze rozwiązań określonych ograniczeniami, lecz poza nim. Wówczas optymalny stan obiektu będzie się znajdował na granicy obszaru rozwiązań, w miejscu, w którym proces optymalizacyjny natrafił na ograniczenie brzegowe.

Ograniczenia obszaru rozwiązań wynikają ze wzajemnego oddziaływania na siebie poszczególnych elementów układu o-u-p-n, samego procesu skrawania oraz warunków techniczno-organizacyjnych.

Najczęściej spotykanymi ograniczeniami mogą być [8,15,19,20,22,24,26,27,30,32,33,36,39,42,53]:

O g r a n i c z e n i a z w i ą z a n e z o b r a -
b i a r k ą

R_1 - maksymalna dopuszczalna prędkość skrawania, określona średnicą toczenia i maksymalną nastawialną liczbą obrotów wrzeczona na danej obrabiarce,

R_2 - minimalna dopuszczalna prędkość skrawania, wynikła ze średnicy toczenia i minimalnej nastawialnej liczby obro-

tów wrzeciona obrabiarki,

- R₃ - maksymalny dopuszczalny moment na wrzecionie obrabiarki,
- R₄ - maksymalna dopuszczalna moc użyteczna na wrzecionie,
- R₅ - maksymalny nastawialny posuw na danej obrabiarence,
- R₆ - minimalny nastawialny posuw na danej obrabiarence,
- R₇ - maksymalna dopuszczalna siła, którą może przenieść mecha-
nizm napędu posuwu,
- R₈ - maksymalne siły skrawania powodujące przekroczenie do-
puszczalnych odkształceń obrabiarki,

R₉ - maksymalny dopuszczalny poziom drgań układu o-u-p-n

O g r a n i c z e n i a z w i ą z a n e z p r z e d -
m i o t e m o b r a b i a n y m

- R₁₀ - maksymalna dopuszczalna głębokość skrawania wynikła
z nadatku na obróbkę,
- R₁₁ - maksymalny dopuszczalny błąd wykonania przedmiotu,
- R₁₂ - maksymalne siły skrawania i mocowania, nie powodujące
przekroczenia dopuszczalnych odkształceń przedmiotu
lub jego powierzchni,
- R₁₃ - maksymalna dopuszczalna chropowatość powierzchni po
obróbce,
- R₁₄ - maksymalny dopuszczalny zakres parametrów skrawania,
przy których uzyskuje się wymagany stan warstwy wierzch-
niej,
- R₁₅ - maksymalna dopuszczalna temperatura skrawania związana
z możliwością wystąpienia zbyt dużych odkształceń ter-
micznych przedmiotu,
- R₁₆ - maksymalna dopuszczalna temperatura skrawania, wynikła
z możliwości deformacji plastycznej przedmiotu /co mo-
że mieć miejsce w przypadku obróbki tworzyw termoplas-
tycznych/,

O g r a n i c z e n i a z w i ą z a n e z n a r z ę -
d z i e m

- R₁₇ - minimalna grubość warstwy skrawanej potrzebna do tego, aby mógł być zrealizowany proces skrawania,
- R₁₈ - minimalna, technologicznie dopuszczalna, głębokość skrawania dla danego typu narzędzia i rodzaju materiału obrabianego,
- R₁₉ - maksymalna dopuszczalna prędkość skrawania nie powodująca niekorzystnej postaci zużywania się ostrza,
- R₂₀ - maksymalne dopuszczalne obciążenie narzędzia, które nie powoduje niekorzystnej postaci zużywania się ostrza,
- R₂₁ - maksymalne obciążenie narzędzia, które nie powoduje przekroczenia dopuszczalnych naprężeń zginających i odkształceń sprężystych trzonka.

O g r a n i c z e n i a z w i ą z a n e z w y p o s a -
ż e n i e m s t a n o w i s k a

- R₂₂ - maksymalne dopuszczalne siły skrawania jakie może przemieścić uchwyt mocujący,
- R₂₃ - maksymalne siły skrawania, nie powodujące przekroczenia dopuszczalnych przemieszczeń elementów ustalająco-mocujących takich, jak np. konik, uchwyt, podtrzymka itp.

O g r a n i c z e n i a z w i ą z a n e z p r o c e -
s e m s k r a w a n i a

- R₂₄ - minimalny dopuszczalny zakres posuwów, określony obszarem korzystnej postaci wióra,
- R₂₅ - maksymalny dopuszczalny zakres prędkości skrawania, określony obszarem korzystnej postaci wióra,
- R₂₆ - maksymalny dopuszczalny zakres głębokości skrawania, określony obszarem korzystnej postaci wióra,

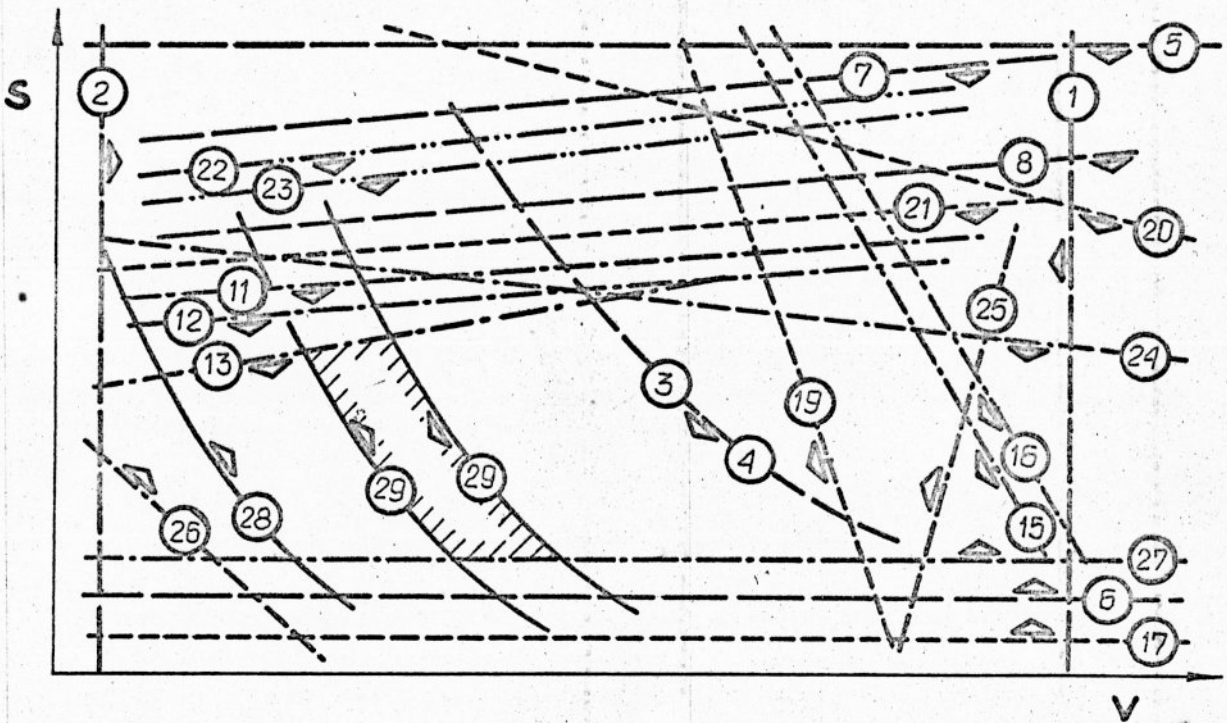
R_{27} - minimalny dopuszczalny stosunek a/s , wymagany z uwagi na korzystnie przebiegający proces skrawania.

O g r a n i c z e n i a z w i ą z a n e z w a r u n -
k a m i t e c h n i c z n o - o r g a n i z a c y j -
n y m i

R_{28} - zadana minimalna wydajność stanowiska,

R_{29} - rytm pracy linii produkcyjnej.

Ograniczenia te, przy założonej stałej głębokości skrawania, przedstawiono schematycznie na rys.18. Gdyby warunki brzegowe wystąpiły w takich proporcjach jak to przedstawiono na rysunku, to zakreskowane pole stanowiloby przestrzeń, w której można poszukiwać optymalnego rozwiązania.



Rys.18. Linie ograniczeń brzegowych obszaru rozwiązań we współrzędnych $v-s$ dla stałej głębokości skrawania

Podczas doboru optymalnych parametrów skrawania dla konkretnego zabiegu, wielu z wymienionych ograniczeń obszaru rozwiązań można nie brać pod uwagę. Na przykład w przypadku obróbki zgrubnej nie natrafimy na ograniczenie R_6 - minimal-

nego nastawialnego posuwu na obrabiarce, lub ograniczenie R_{18} - minimalnej grubości warstwy skrawanej, potrzebnej do tego, aby mógł być realizowany proces skrawania. W obróbce wykończającej natomiast, takie ograniczenie jak R_5 - maksymalny nastawialny posuw, $R_{3,4}$ - maksymalny dopuszczalny moment czy też moc na wrzecionie, nie będą z pewnością przeszkodą w doborze optymalnego zestawu parametrów.

Jeśli jednak algorytm optymalizacyjny ma być w miarę uniwersalny i ma obejmować większość możliwych przypadków, jakie mogą wystąpić podczas jednozabiegowego toczenia, w obróbce zgrubnej i wykończającej, to trzeba liczyć się z tym, że wymienione ograniczenia mogą wystąpić.

Opisanie matematyczne wszystkich tych ograniczeń wymagałoby obszernych i kosztownych badań doświadczalnych, przeprowadzanych w bardzo szerokich przedziałach zmian poszczególnych parametrów skrawania. Dynamiczny program optymalizacyjny pozwala uniknąć tej niedogodności, ponieważ, przemieszczając się po powierzchni odpowiedzi w kierunku gdzie znajduje się optymalny stan obiektu, badamy wówczas tylko te ograniczenia, na które natrafiamy i tylko w tym miejscu, gdzie aktualnie zatrzymał się proces optymalizacyjny.

Takie podejście do zagadnienia optymalizacji jest możliwe tylko wtedy, gdy nie zależy nam na szerokim opisanie zjawisk występujących w danym procesie, natomiast interesuje nas jedynie jego stan optymalny. Ma to miejsce w większości przypadków realizacji przemysłowych zadań produkcyjnych.

Niektóre z ograniczeń takich jak, np. $R_8, R_9, R_{12}, R_{14} \div R_{27}$, są dość trudne do określenia na drodze analitycznej, gdyż konieczne uproszczenia podczas rozważań teoretycznych oraz niedostateczna znajomość praw fizyko-chemicznych, rządzących

procesem skrawania, pozwala jedynie na wyznaczenie tych ograniczeń z dość dużym przybliżeniem.

W dowolnej procedurze optymalizacyjnej, gdy trafimy na ograniczenie, należy się zastanowić czy jest ono ograniczeniem sztywnym, które koniecznie trzeba przestrzegać, czy też elastycznym, którego niewielkie przekroczenie jest dozwolone. W przypadku dynamicznej procedury optymalizacyjnej problem ten nie jest tak istotny. Trafiając na ograniczenie elastyczne, którego przesunięcie jest możliwe, możemy wykonać następny krok w przestrzeni czynnikowej, obserwując uważnie czy nie spowodowało to wystąpienia niepożądanych zjawisk takich, jak np. wykruszanie się wierzchołka ostrza, przekroczenie tolerancji wykonania przedmiotu, i inne.

5.2. Wpływ stereometrii ostrza na wzrost efektywności skrawania

W warunkach obróbki zgrubnej obszar optymalnych rozwiązań jest określony ograniczeniami związanymi z siłami i oporami skrawania. Można do nich zaliczyć ograniczenia: $R_3, R_4, R_7, R_8, R_{11}, R_{12}, R_{20}, R_{21}, R_{28}, R_{29}$. Chcąc zwiększyć obszar poszukiwań, można niektóre z tych ograniczeń przesunąć, np. poprzez: dobór innej obrabiarki o większej mocy i sztywności, zmianę wyposażenia, zmianę sposobu mocowania przedmiotu bądź też przez zwiększenie przekroju trzonka noża. Takie pokonywanie ograniczeń jest znane i powszechnie stosowane. Trzeba się liczyć jednak z możliwością, że przesunięcie warunku brzegowego może pociągnąć za sobą wzrost kosztów wytwarzania lub obniżenie się wydajności, mimo przekroczenia bariery ograniczającej bardziej optymalne rozwiązanie. Może to być

spowodowane zastosowaniem innej obrabiarki czy stanowiska roboczego, którego godzinowy koszt pracy K_m jest większy niż poprzednio lub też zmianą oprzyrządowania, powodującą wzrost czasu pomocniczego.

Ograniczenia związane z siłami skrawania można również przesuwac poprzez zmianę geometrii ostrza, od której w znacznym stopniu zależą opory skrawania. Zakładając, że dla danych warunków obróbki geometria narzędzia została dobrana tak, aby uzyskać maksymalny okres trwałości, to zmiany tej geometrii powodujące zmniejszenie się sił skrawania pociągną za sobą skrócenie trwałości narzędzia, a tym samym wzrost kosztów i spadek wydajności skrawania.

Należy więc rozpatrzyć czy zmniejszenie się kosztów i czasu wykonania zabiegu, spowodowane przesunięciem ograniczeń, nie zostanie okupione zbyt dużym ich wzrostem w wyniku pogorszenia się trwałości narzędzia.

Rozważania takie przedstawiono na przykładzie zgrubnego toczenia tulei na tokarce uniwersalnej TUR50S. Założono, że proces optymalizacyjny zatrzymał się na dwóch przecinających się ograniczeniach, którymi są: maksymalna dopuszczalna moc i moment na wrzecionie R_4 i R_3 oraz siły skrawania, które powodują osiągnięcie maksymalnych dopuszczalnych odkształceń przedmiotu R_{12} . Wyznaczono linie ograniczeń w układzie współrzędnych $s-v$ oraz określono gradient zmniejszania się kosztów i wzrostu wydajności. W przypadku, gdy kierunki gradientu wskazywać będą, że stan optymalny znajduje się poza ograniczeniami, wyznaczone zostaną ponownie ograniczenia, przy założeniu takiej zmiany geometrii ostrza, która spowoduje zmniejszenie oporów skrawania i trwałości ostrza.

Porównane będą minimalne koszty wytwarzania i maksymalna

wydajność otrzymana dla obu narzędzi. Ponieważ w większości tokarek nastawianie parametrów jest realizowane w sposób dyskretny, to określony zostanie również optymalny stan obiektu dla rzeczywistych wartości posuwów i prędkości skrawania, jakie można nastawić na danej obrabiarce. Da to możliwość oceny czy podwyższenie efektywności skrawania poprzez zmianę geometrii noża, o której była uprzednio mowa, jest zauważalne również dla szeroko stosowanych typowych ciągów prędkości obrotowych i posuwów, jakie posiada obrabiarka uniwersalna TUR-50. Rozważania przeprowadzono z uwzględnieniem typowych danych charakterystycznych dla warunków techniczno-organizacyjnych dużego zakładu produkcyjnego, aktualnych cen obrabiarrek i narzędzi oraz wynagrodzeń robotników. Przyjęto następujące wartości składników występujących w funkcjach celu i w branych pod uwagę zależnościach ograniczeń brzegowych:

moc silnika napędu głównego $N_s = 11$ kW, maksymalny dopuszczalny moment na wrzecionie $M_{dop} = 1962$ Nm, prędkości obrotowe wrzeciona od $n_{WR} = 18$ do 1800 obr/min, stopniowane wg ciągu Renarda o ilorazie $\varphi = 1,26$, materiał obrabiany stal węglowa o $R_m = 7,2 \cdot 10^3$ MPa i twardości 215 HB, średnica toczenia $d = 160$ mm, długość toczenia $l = 160$ mm, głębokość skrawania $a = 3$ mm, liczba sztuk w partii $n_{sz} = 200$ szt, godzinowy koszt pracy stanowiska $K_m = 60$ zł/h, wynagrodzenie pracownika $L = 15,40$ zł/h, koszt regeneracji narzędzia $W_N = 10,50$ zł, czas przygotowawczo zakończeniowy $t_{pz} = 24$ min, czas pomocniczy $t_p = 0,54$ min, czas wymiany narzędzia $t_{wn} = 1,25$ min, materiał ostrza węgiel spiekany S10, siły skrawania nie powodujące przekroczenia dopuszczalnych deformacji przedmiotu

$$F_{R12} = 3434 \text{ N.}$$

Maksymalny dopuszczalny moment i moc użyteczna na wrzecionie.

Pomiędzy momentem obrotowym i mocą na wrzecionie istnieje ścisła zależność, dlatego też związane z nimi ograniczenia R_3 i R_4 należy rozpatrywać łącznie.

Maksymalną dopuszczalną moc efektywną na wrzecionie $N_{e\max}$ można określić ze wzoru

$$N_{e\max} = N_s (1 - s_j)(\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_k) \cdot K_p \quad (10)$$

W łańcuchu kinematycznym napędu głównego tokarki TUR50S jest 5 par kinematycznych typu przekładnia zębata o sprawności $\eta_{1+5} = 0,99$, 7 par typu wałek łożyskowy na łożyskach tocznych o sprawności $\eta_{6+12} = 0,99$ i jedna przekładnia pasowa klinowa o sprawności $\eta_{13} = 0,96$. Za L.T. Wrotnym [56] można przyjąć wartość współczynnika uwzględniającego straty mocy związane z napędem posuwu $K_p = 0,96$ oraz wskaźnik strat mocy ruchu jałowego $s_j = 0,12$. Po wstawieniu tych danych do wzoru (10) otrzymano

$$N_{e\max} = 11(1-0,12)0,99^5 \cdot 0,99^7 \cdot 0,96 \cdot 0,96 = 7,9 \text{ kW.}$$

Maksymalna dopuszczalna moc efektywna na wrzecionie jest w przybliżeniu stała dla prędkości obrotowych wrzeciona od $n_{WR} = 1800$ aż do 56 obr/min. Dla mniejszych prędkości obrotowych $N_{e\max}$ maleje ze względu na konieczność zachowania stałego momentu obrotowego na wrzecionie, który nie może przekroczyć dopuszczalnej wartości $M_{dop} = 1962 \text{ Nm}$, podanej w dokumentacji obrabiarki.

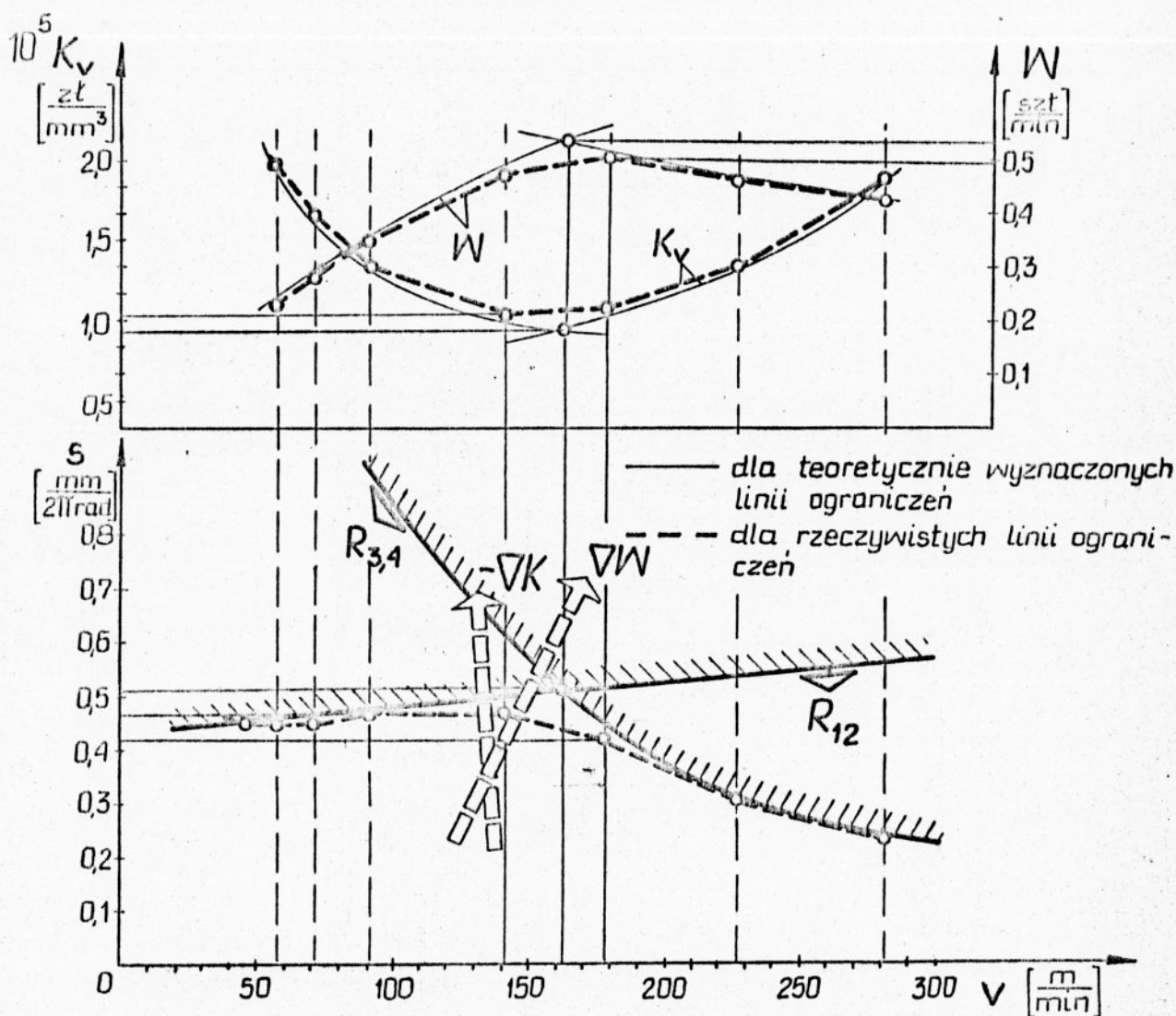
Gdy znamy średnicę toczenia d , to dla poszczególnych prędkości obrotowych wrzeciona można wyznaczyć dopuszczalne siły skrawania, jakie może przenieść mechanizm napędu głównego obrabiarki.

$$F_{VR3} = \frac{2 \cdot 10^3 M_{dop}}{d} \quad (11)$$

lub

$$F_{VR4} = \frac{6 \cdot 10^4 N_{emax}}{v} \quad (12)$$

Po wyliczeniu wartości F_{VR3} i F_{VR4} dla poszczególnych prędkości skrawania, ze wzorów na siły skrawania (13) i (14), zaczerpniętych z pracy J.Kaczmarka [29], można wyznaczyć odpowiadające im dopuszczalne wartości posuwów s_{R4} , które stanowiąc będą w układzie współrzędnych $s-v$ linię ograniczeń $R_{3,4}$ (rys.19)



Rys.19. Linie ograniczeń $R_{3,4}$ i R_{12} oraz wyznaczone na brzegach obszaru rozwiązań wartości funkcji kosztów K_v i wydajności W .

$$F_v = 191.9,81a \cdot s^{0,75} \cdot K_{zv} \rightarrow s = \left[\frac{F_v}{191.9,81 \cdot a \cdot K_{zv}} \right]^{\frac{1}{0,75}} \quad (13)$$

$$F_p = 0,45 F_v \quad (14)$$

gdzie: $K_{zv} = 1 - 8 \cdot 10^{-4}(v - 62)$.

Obliczone w ten sposób wartości dopuszczalnych sił skrawania F_{vR3} , F_{vR4} i posuwów s_{R4} , zamieszczono w tabeli 1.

S i ł y s k r a w a n i a n i e p o w o d u j ą c e p r z e k r o c z e n i a d o p u s z c z a l n y c h o d k s z t a ł c e ń p r z e d m i o t u .

Przedmiotem obrabianym jest tuleja, której ze względu na sztywność, nie można obciążyć wypadkowymi siłami skrawania większymi od $F_{R12} = 3434 \text{ N}$. Korzystając ze wzorów (13) i (14) oraz zależności, że

$$\sqrt{F_v^2 + F_p^2} \leq F_{R12}, \quad (15)$$

obliczono dopuszczalne wartości posuwów s_{R12} . Wartości te, które są współrzędnymi ograniczeń R_{12} zamieszczono w tabeli 1 oraz naniesiono na wykres pokazany na rys.19.

Z przedstawionych tam zależności wynika, że w miarę wzrostu prędkości skrawania aż do $v = 162 \text{ m/min}$, pole rozwiązań jest ograniczone sztywnością przedmiotu. Po przekroczeniu tej wartości, ograniczeniem będzie maksymalna dopuszczalna moc na wrzecionie. Na rys.19 zaznaczono kierunki gradientów, zmniejszenia się kosztów i wzrostu wydajności toczenia. Wskazują one, że optymalny stan obiektu znajduje się poza ograniczeniami $R_{3,4}$ i R_{12} .

Wartości kosztów i wydajności obliczono z równań (4) i (8), a występujące w nich trwałości narzędzia - ze wzoru zaczerpniętego z pracy J.Kaczmarka [29]

$$T = \frac{6,219 \cdot 10^{13}}{v^{2,56} \cdot s^{1,67} \cdot a^{0,83}} \quad (16)$$

Tabela 1

Wyznaczenie optymalnego stanu obiektu wzdłuż linii ograniczeń dla narzędzia o najkorzystniejszej geometrii ostrza ze względu na trwałość

n_{WR}	Dla dowolnych parametrów							Dla parametrów nastawialnych na obrabiarce			
	v	F_{VR4}	S_{R4}	S_{R12}	T	$10^5 K_V$	W	s	T	$10^5 K_V$	W
obr/min	m/min	lub F_{R3} N	mm/ 2π rad	mm/ 2π rad	min	zł/ mm ³	szt/ min	mm/ 2π rad	min	zł/ mm ³	szt/ min
112	56,7	8360	-								
				0,46	16263	1,9509	0,24	0,45	16871	1,9866	0,23
140	70,4	6733	-								
				0,465	4795	1,6261	0,29	0,45	5065	1,6687	0,28
180	90,5	5241	0,92								
				0,475	1145	1,3265	0,35	0,47	1166	1,3368	0,349
224	113	4195	0,78								
				0,485	322	1,1311	0,421	0,47	339	1,1550	0,409
280	140,7	3371	0,61								
				0,5	90,4	1,0026	0,4902	0,47	100,2	1,0381	0,4714
	162	2926	0,51	0,51	40	0,9727	0,5363	-	-	-	-
355	178,4	2659	0,44								
				0,515	29,9	1,0490	0,51645	0,42	32,3	1,0692	0,502
	200	2370	0,37								
				0,53	21	1,1689	0,492	-	-	-	-
450	226,2	2097	0,32								
				0,54	13,6	1,3314	0,476	0,31	14,3	1,3426	0,467
560	281,5	1685	0,24								
				0,565	6,5	1,8802	0,428	0,24	6,5	1,8802	0,428

Wartości kosztów i wydajności, obliczone dla punktów leżących na granicy pola rozwiązań, wskazują, że optymalny zestaw parametrów skrawania wyznacza punkt przecięcia się ograniczeń, którego współrzędne wynoszą $v = 162$ m/min i $s = 0,51$ mm/ 2π rad. W punkcie tym osiągnięto minimalne koszty wytwarzania $K_v = 0,9727 \cdot 10^{-5}$ zł/mm³ i maksymalną wydajność $W = 0,5363$ szt/min /p.tabela 1 i rys.19/.

Następnie dokonano hipotetycznej zmiany geometrii ostrza narzędzia, która pozwoliła, kosztem 10%-towego zmniejszenia się trwałości ostrza, uzyskać zmniejszenie się oporów skrawania również o 10%. Spowodowało to przesunięcie ograniczeń. Tak jak poprzednio, przeprowadzono obliczenia w celu wyznaczenia optymalnych parametrów skrawania. Wyniki tych obliczeń zamieszczono w tabeli 2 i przedstawiono graficznie na rys.20.

W tym wypadku, optymalnym parametrom skrawania ($v = 164$ m/min i $s = 0,57$ mm/ 2π rad) odpowiadają minimalne koszty wytwarzania $K_v = 0,9463 \cdot 10^{-5}$ zł/mm³ i maksymalna wydajność $W = 0,5728$ szt/min. Tak więc, w wyniku zmiany geometrii ostrza narzędzia, koszty toczenia zmniejszyły się o 2,71% a wydajność wzrosła o 6,8%.

Warunki skrawania odpowiadające optymalnym punktom pracy dla jednego i drugiego narzędzia nie mogą być zrealizowane praktycznie, ponieważ na tokarce TUR50S można jedynie skokowo nastawić prędkości obrotowe wrzeciona i posuwy. Dlatego też przeprowadzono obliczenia kosztów i wydajności dla maksymalnych rzeczywistych parametrów skrawania, nie przekraczających jednak linii ograniczeń $R_{3,4}$ i R_{12} . Wyniki z tych obliczeń zamieszczono również w tabelach 1 i 2 oraz na rys.19 i 20.

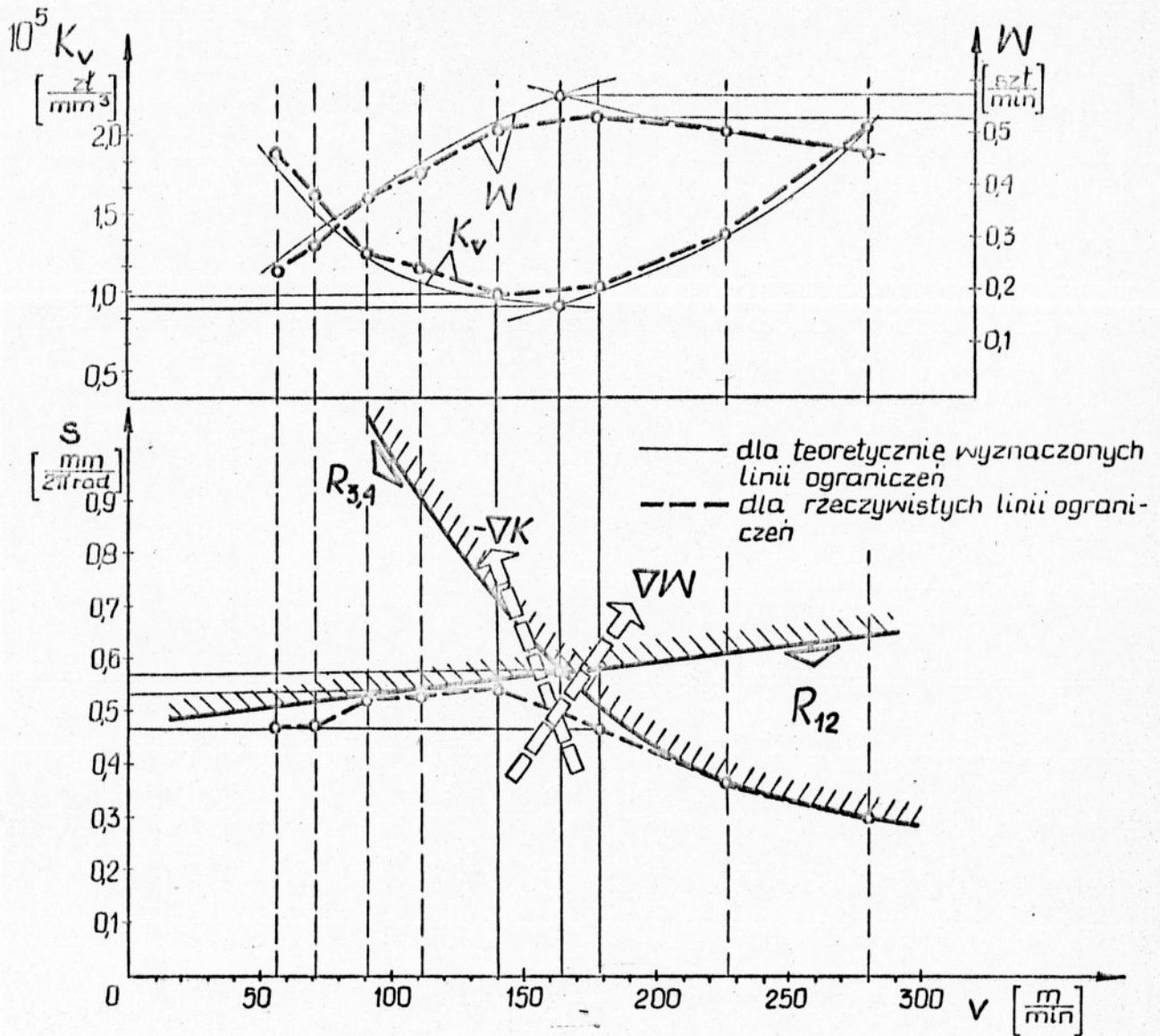
Dla rzeczywistych warunków pracy, parametry skrawania, optymalne ze względu na koszty i wydajność, nie pokrywają

Tabela 2

Wyznaczenie optymalnego stanu obiektu wzdłuż linii ograniczeń dla narzędzia o zmienionej geometrii ostrza

n_{WR}	Dla dowolnych parametrów							Dla parametrów nastawialnych			
	v	F_{VR4}	\bar{s}_{R4}	s_{R12}	T	$10^5 K_V$	W	s	T	$10^5 K_V$	W
obr/min	m/min	N	mm/ 2π rad	mm/ 2π rad	min	zł/ mm ³	szt/ min	mm/ 2π rad	min	zł/ mm ³	szt/ min
112	56,7	8360	-	0,505	12525	1,8080	0,256	0,47	14121	1,9169	0,242
140	70,4	6733	-	0,515	3639	1,5023	0,309	0,47	4239	1,6128	0,288
180	90,5	5241	1,06	0,53	858	1,2270	0,381	0,52	886	1,2437	0,375
224	113	4195	0,905	0,54	269	1,0549	0,449	0,52	286	1,0808	0,438
280	140,7	3371	0,7	0,56	67,3	0,9515	0,525	0,54	71,5	0,9693	0,5136
	164	2890	0,57	0,57	27,9	0,9463	0,5728	-	-	-	-
355	178,4	2659	0,5	0,58	21,7	1,0214	0,553	0,47	24,1	1,0426	0,5347
	200	2370	0,425	0,59	15,1	1,1502	0,53	-	-	-	-
450	226,2	2097	0,37	0,605	9,6	1,3452	0,511	0,37	9,6	1,3452	0,511
560	281,5	1685	0,3	0,64	4	2,0311	0,467	0,3	4	2,0311	0,467

się ze sobą, tak dla jednego jak i drugiego narzędzia. Dla pierwszego narzędzia minimalne koszty $K_v = 1,0381 \cdot 10^{-5}$ zł/mm³ odpowiadają parametrom $v = 140,7$ m/min i $s = 0,47$ mm/2 π rad, natomiast maksymalną wydajność $W = 0,502$ szt/min osiągnięto dla $v = 178,4$ m/min i $s = 0,42$ mm/2 π rad.



Rys.20. Linie ograniczeń $R_{3,4}$ i R_{12} oraz wyznaczone na brzegach obszaru rozwiązań wartości funkcji kosztów K_v i wydajności W , po zmianie geometrii ostrza.

Dla narzędzia o zmienionej geometrii ostrza, minimalne koszty $K_v = 0,9693 \cdot 10^{-5} \frac{\text{zł}}{\text{mm}^3}$ uzyskano gdy $v = 140,7$ m/min i $s = 0,54$ mm/2 π rad, a maksymalna wydajność $W = 0,5347$ szt/min dla $v = 178,4$ m/min i $s = 0,47$ mm/2 π rad.

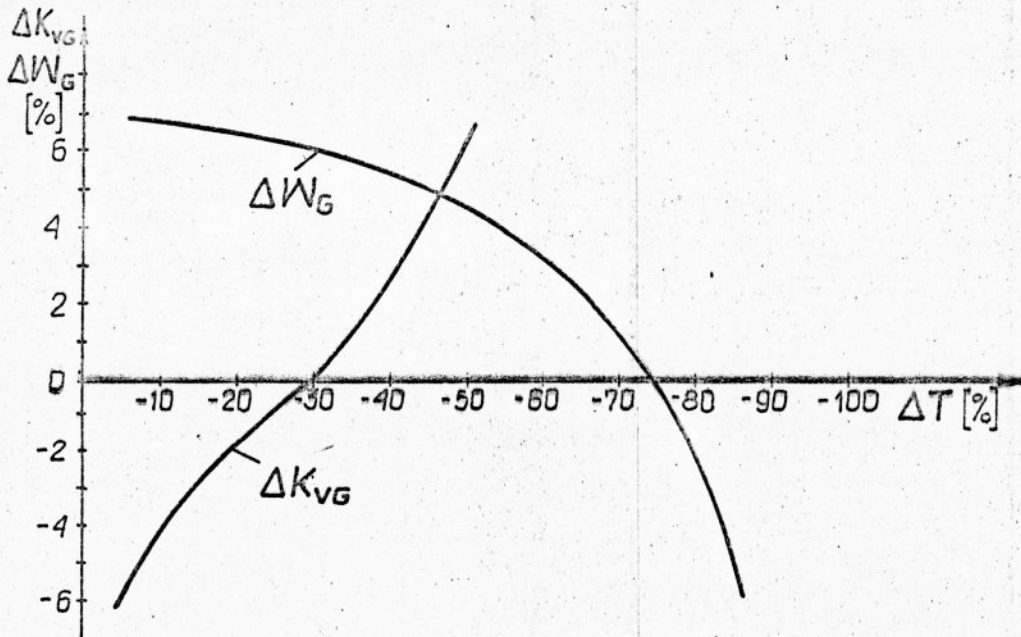
Dla parametrów skrawania zmieniających się w sposób dyskretny wartości funkcji celu w miejscach optymalnych są mniej korzystne niż gdyby istniała możliwość ich ciągłej regulacji. I tak koszty wytwarzania są większe o około 2,4 do 6,7%, a wydajność skrawania mniejsza o 6 do 6,6%.

Porównując najkorzystniejsze wartości funkcji celu dla obu narzędzi zaobserwowano, że w wyniku zmiany geometrii ostrza istnieje możliwość zmniejszenia kosztów wytwarzania o 6,62% lub zwiększenia wydajności o 6,41%.

Przedstawione tu procentowe wartości wzrostu efektywności skrawania mają jedynie charakter informacyjny i mogą się zmieniać, gdyż zależą, między innymi, od wielkości przedziałów dyskretnych zmian parametrów skrawania, średnicy toczenia, a szczególnie od wartości gradientu funkcji celu w miejscu wystąpienia ograniczenia. Tam, gdzie wartość tego gradientu będzie duża, można spodziewać się większego obniżenia kosztów wytwarzania oraz wzrostu wydajności niż w obszarach stacjonarnych lub prawie stacjonarnych.

Całość tych rozważań odnosi się do takiej hipotetycznej zmiany geometrii narzędzia, która powodowała jednakowy, 10%-tawy, spadek oporów i trwałości narzędzia. Sprawdźmy jeszcze co spowodują, dla danych z powyższego przykładu, inne zmiany geometrii ostrza narzędzia, dające większe zmniejszenie się trwałości narzędzia niż oporów skrawania.

Na rys.21 przedstawiono zależność zmniejszania się kosztów wytwarzania ΔK_{VG} i wzrostu wydajności ΔW_G w funkcji spadku trwałości ostrza ΔT , spowodowanej zmianami geometrii narzędzia. Jako wartość podstawową przyjęto stałe 10%-tawe zmniejszenie się sił skrawania, względem którego analizowano różne poziomy obniżenia się trwałości ostrza.



Rys.21. Zależność ΔW_G i ΔK_{VG} w funkcji zmniejszenia się trwałości ostrza ΔT , która jest spowodowana różnymi zmianami geometrii ostrza.

Z przedstawionych na tym rysunku zależności wynika, że zmiany geometrii narzędzia są opłacalne nawet wówczas, gdy pociąga to za sobą znaczne skrócenie trwałości narzędzia. Jeśli przyjąć za kryterium optymalności najniższe koszty wytwarzania, to korzystna jest każda zmiana geometrii ostrza, która powoduje, że stosunek skrócenia trwałości ostrza do zmniejszenia się sił skrawania nie przekracza wartości 3. Dla wydajności toczenia stosunek ten jest znacznie większy i wynosi aż 7,5. Spowodowane jest to tym, że wydajność zależy w znacznie większym stopniu od parametrów skrawania niż od trwałości ostrza. Dopiero, gdy trwałość narzędzia osiąga wartość tego samego rzędu co czas jego wymiany, to wpływ jej na wydajność zaczyna być zauważalnie duży.

W świetle powyższych rozważań można stwierdzić, że druga teza niniejszej pracy została udowodniona.

Tak więc, w przypadku natrafienia na ograniczenie, u którego podstaw leżą siły bądź opory skrawania, należy w miejscu tego ograniczenia wyznaczyć gradient funkcji celu. Jeśli jego

wartość jest wyraźnie większa od błędu określenia funkcji celu, to można się zastanowić nad taką zmianą geometrii ostrza, aby przy możliwie dużym zmniejszeniu sił skrawania, uzyskać jak najmniejsze obniżenie trwałości narzędzia. Celowość takich zmian należy sprawdzić, stosując przytoczony tok postępowania.

5.3. Metodyka doboru optymalnych parametrów skrawania

Istnieje wiele dynamicznych metod optymalizacyjnych badań doświadczalnych takich, jak:

- i t e r a c y j n e , do których można zaliczyć: sekwencyjne pojedyncze i wielokrotne, proporcjonalne /Newtona/, dychotomii, Fibonacciego, złotego podziału i inne,
- g r a d i e n t o w e , łączone często z planowaniem doświadczeń ekstremalnych /Boxa-Wilsona/ lub metodą proporcjonalną,
- r e l a k s a c y j n e Gaussa-Seidela,
- s y m p l e k s o w e ,
- e w o l u c y j n e /EVOP/ i inne.

Wymienione tu metody oraz ich wady i zalety omówione zostały w pracach Z.Polańskiego [44], W.Nalimowa, A.Czernowej [38], A.Pierwozwanskiego [43], P.Kacewa [28], J.Wawrzynka [52].

Żadna z tych metod nie ma zdecydowanej przewagi nad innymi, gdy ma się na uwadze ich zastosowanie do doboru optymalnych parametrów tak złożonego procesu jakim jest skrawanie. Dlatego też, decydując się na wariant algorytmu optymalizacyjnego, należy wybrać jedną z metod lub kilka połączonych w całość tak, aby spełniały najlepiej warunki jakie w danym przypadku są im stawiane.

Do doboru optymalnych parametrów skrawania w jednonarzędziowym toczeniu wzdużnym, algorytm badań optymalizacyjnych

powinien spełniać następujące wymagania:

1. Liczba doświadczeń, z którą wiążą się koszty eksperymentu i czas badań, powinna być możliwie mała,
2. Dokładność wyznaczenia wartości optymalnych parametrów i wartości funkcji celu powinna być duża,
3. Ograniczenia obszaru rozwiązań i związana z nimi możliwość popełnienia znacznych błędów, nie powinny wpływać na dokładność oszacowania optymalnego zestawu parametrów,
4. W przypadku natrafienia na ograniczenie brzegowe, powinna istnieć możliwość podjęcia decyzji co do zakończenia optymalizacji lub przesunięcia tego ograniczenia. Dlatego też wskazana byłaby znajomość gradientu w miejscu ograniczenia, co ułatwiłoby podjęcie takiej decyzji,
5. Powinien być uwzględniony wpływ losowego charakteru rozkładu trwałości narzędzia na osiągnięte wartości funkcji celu i dobór optymalnych parametrów skrawania,
6. Powinna istnieć możliwość uwzględnienia również takiego przypadku, w którym trwałość narzędzia określa się nie jako wartość średnią, lecz jako okres niezawodnej jego pracy,
7. Powinien uwzględniać dyskretną regulację wartości parametrów skrawania,
8. Powinien być możliwie prosty i łatwy w stosowaniu w warunkach przemysłowych,
9. Powinna istnieć możliwość zaprogramowania go na maszynę cyfrową.

Z przedstawionych wymagań jakie winien spełniać algorytm optymalizacyjny wynika, że najkorzystniejszym rozwiązaniem będzie połączenie metody gradientowej i sekwencyjnej - pojedynczej.

Optymalizowanymi czynnikami będą parametry

skrawania v i s oraz ewentualnie geometria ostrza narzędzia.

Wpływ prędkości skrawania i posuwu na wartość funkcji celu jest znacznie większy niż geometrii ostrza. Dlatego też w pierwszej kolejności, dla dobranego narzędzia o geometrii, którą można uważać w przybliżeniu za optymalną, wyznaczy się optymalny stan obiektu, przeprowadzając odpowiednią serię badań wg metody gradientowej. Jeśli optimum znajduje się na linii ograniczeń związanych z siłami skrawania, to w kolejnej sekwencji badań można do optymalizowanych czynników włączyć geometrię ostrza narzędzia. Takie rozdzielenie optymalizowanych czynników znacznie zmniejsza ilość badań. Sama metoda gradientowa również odznacza się małą liczbą prób, a ponadto eliminuje wadę metody sekwencyjnej, jaką jest niedokładność oszacowania optymalnego stanu obiektu.

Obie metody mogą prowadzić do błędnych wyników, gdyż proces optymalizacyjny realizowany według ich programów może się zatrzymać na ekstremum lokalnym. Ta poważna wada nie może jednak wystąpić wówczas, gdy funkcjami celu są koszty i wydajność toczenia, ponieważ obie te funkcje są unimodalne. Funkcje te nie posiadają również stromych grzbietów i wąwozów czy tzw. "siodeł", co mogłoby spowodować zmniejszenie efektywności wybranych metod, lecz tworzą w miarę regularną czaszę wklęsłą /koszty - rys.12/ i wypukłą /wydajność - rys.15/.

Metoda ta ma jeszcze tą wadę, że jej skuteczność zależy silnie od wyboru punktu startowego, od którego zaczyna się badanie, a ponadto, że kierunek gradientu zależy w pewnym stopniu od przyjętych przedziałów zmian badanych czynników. Inaczej mówiąc, metoda ta jest tym bardziej skuteczna im więcej wiemy o danym obiekcie. W obróbce skrawaniem, a szcze-

gólnie w toczeniu wzdłużnym, stosowane zakresy zmian parametrów, a także orientacyjne przebiegi poszczególnych funkcji obiektu są na tyle znane, że można przypuszczać, iż właśnie metoda gradientowa określania optymalnych parametrów skrawania będzie bardzo dobrze spełniała swoje zadanie.

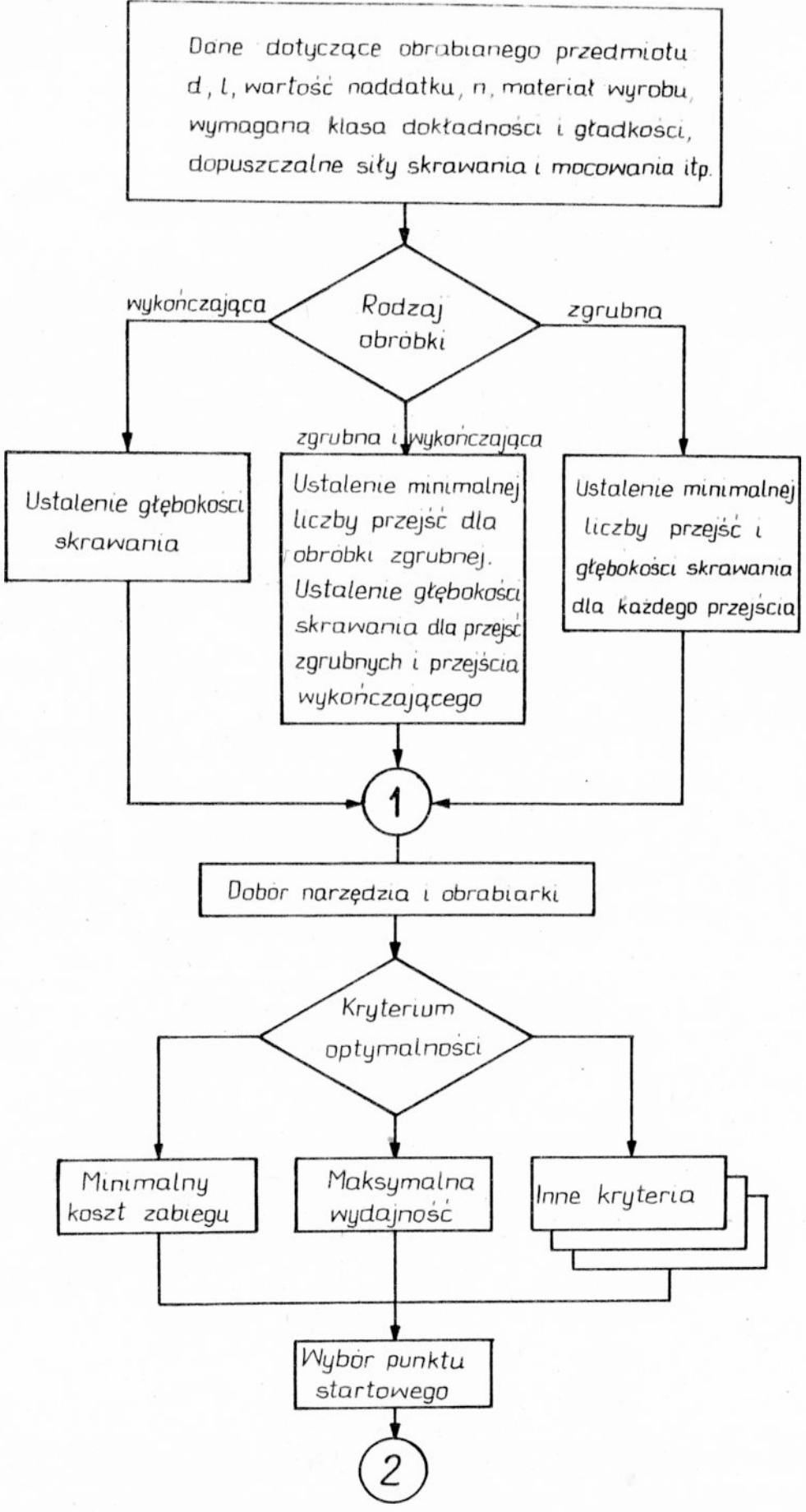
Algorytm dynamicznych badań optymalizacyjnych przedstawiono na rys.22. Poszczególne jego elementy zostaną omówione w dalszej części pracy.

Dane dotyczące obrabianego przedmiotu jak i przebieg procesu technologicznego decydują o tym, czy dana obróbka będzie tylko zgrubną lub zgrubną i wykończającą, czy tylko wykończającą. Wartość naddatku, błędy półwyrobu lub błędy obróbkowe z poprzednich operacji oraz wymagana po toczeniu klasa dokładności wymiaru i gładkość powierzchni determinują przyjęty rodzaj obróbki.

Wielu autorów m.in.H.J.Jacobs [26], M.Ja.Levickij, V.P. Štompel [36], M.Białek [3] i inni wykazało, że za optymalną głębokość skrawania można uważać taką, która obróbcę wykończającej zapewni wymaganą dokładność i gładkość powierzchni, a obróbcę zgrubnej minimalną liczbę przejść. Zalecenie, aby stosować maksymalną, dopuszczalną ze względu na ograniczenia głębokość skrawania, wynika z tego, że jej zwiększanie powoduje taki sam wzrost wydajności jak pozostałe parametry skrawania, a jednocześnie najmniej z nich niekorzystnie wpływa na trwałość narzędzia.

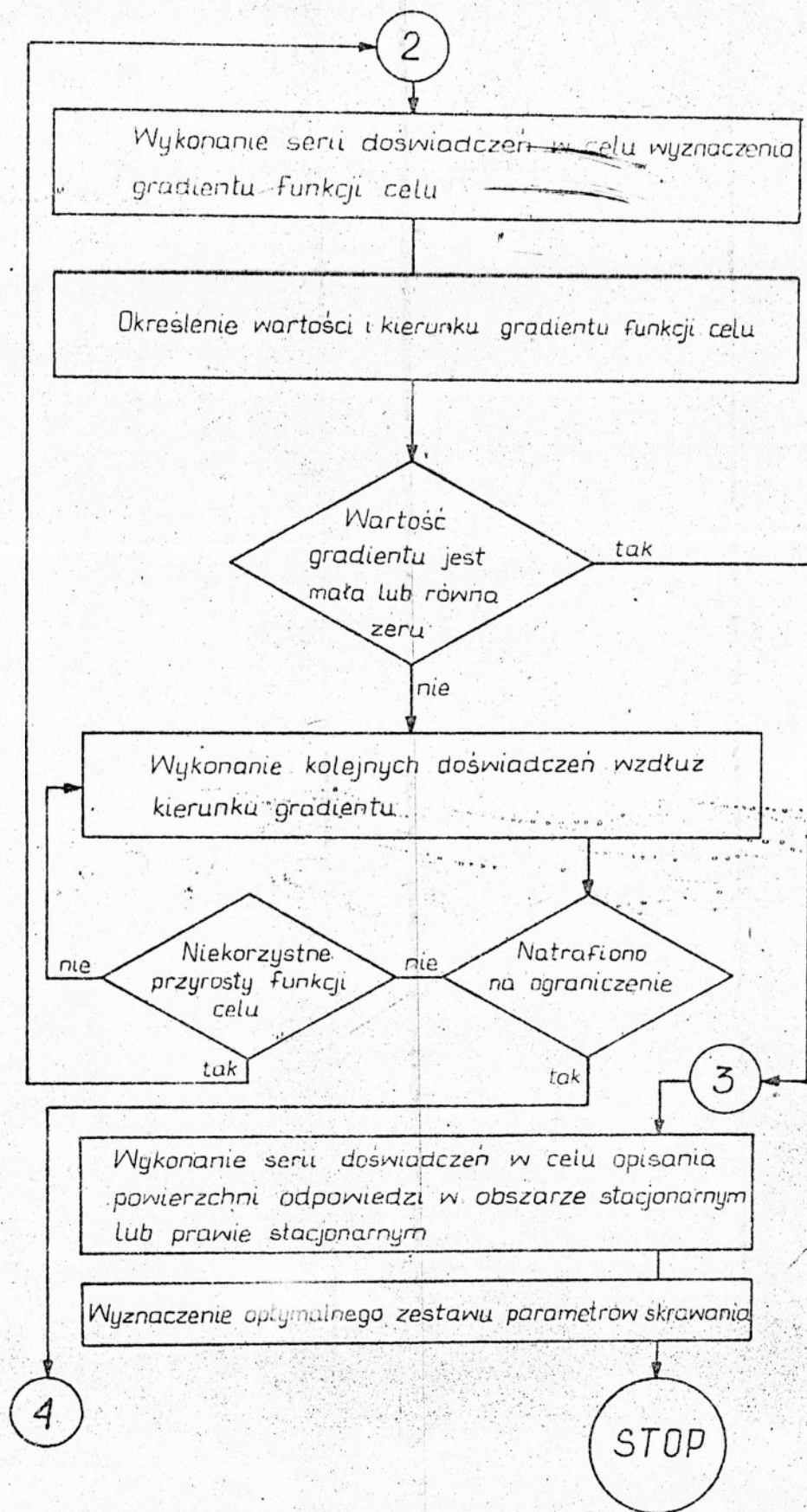
Doboru narzędzia i obrabiarki dokonuje się po określeniu rodzaju obróbki oraz głębokości skrawania, mając na uwadze takie dane o obrabianym przedmiocie, jak twardość i wytrzymałość jego materiału, stan warstwy wierzchniej półwyrobu.

a)

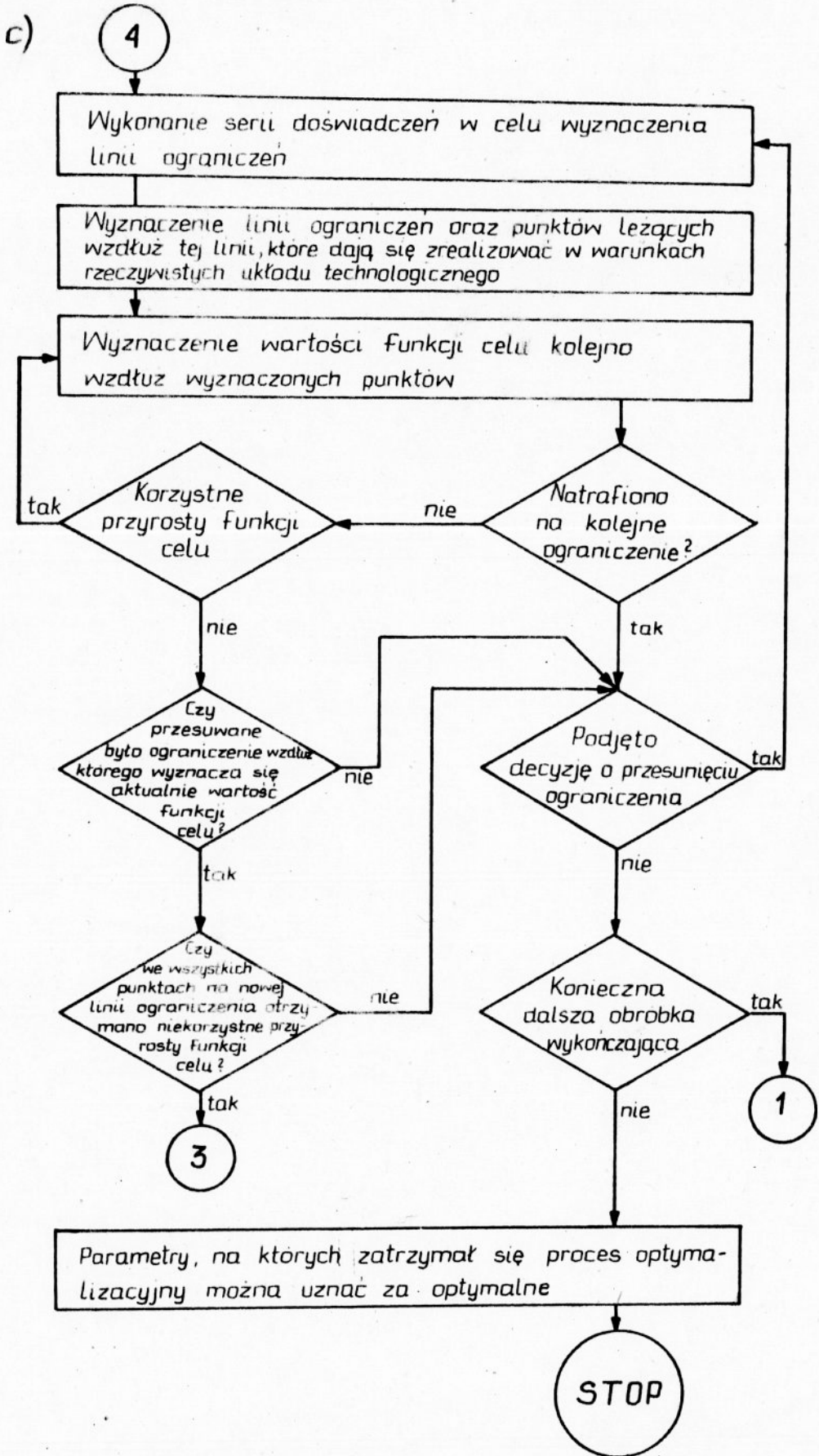


Rys.22.a. Schemat blokowy algorytmu badań doświadczalnych służących do określenia optymalnych parametrów skrawania w toczeniu wzdłużnym

b)



Rys.22. Schemat blokowy algorytmu badań doświadczalnych służących do określania optymalnych parametrów skrawania w toczeniu wzdłużnym



Rys.22. Schemat blokowy algorytmu badań doświadczalnych służących do określenia optymalnych parametrów obrabiania w toczeniu wzdłużnym.

Wyboru obrabiarki, a w zasadzie całego stanowiska roboczego, dokonać należy mając na względzie nie tylko optymalizowany zabieg lub operację tokarską, ale również pozostałe operacje, które mają być wykonywane podczas procesu technologicznego na danej tokarce.

Istnieje wiele stosowanych kryteriów optymalności obróbki skrawaniem. Zaliczyć do nich można:

- minimalne koszty wykonania przedmiotu lub zeskrawania jednostki objętości materiału w partii wyrobów,
- minimalny czas wykonania przedmiotu lub maksymalną wydajność obróbki skrawaniem dla partii wyrobów,
- maksymalną stopę zysku kosztów względnych K_K , określaną jako stosunek różnicy ceny zbytu K_Z i wartości kosztów wytwarzania K_V do sumy kosztów półwyrobu K_M i kosztów wytwarzania K_V . $K_K = (K_Z - K_V) / (K_M + K_V)$,
- maksymalną stopę zysku czasu względnego określoną wzorem $K_t = (K_Z - K_V) / t$.

Oprócz wymienionych wyżej kryteriów optymalności, omówionych szerzej w pracy H.J.Jacobsa [26], można jeszcze rozpatrywać dobór optymalnych parametrów skrawania z punktu widzenia jednoczesnej maksymalizacji lub minimalizacji wielu funkcji celu. Przegląd metod optymalizacji wielokryterialnej podaje A.Osyczka [40]. Wydaje się, że w warunkach gospodarki socjalistycznej najczęściej stosowanym kryterium optymalności powinny być minimalne koszty wytwarzania lub, w niektórych wypadkach, maksymalna wydajność.

Na podstawie wstępnych danych oraz niekiedy nawet bardzo przybliżonych zależności opisujących proces skrawania, należy wybrać współrzędne punktu startowego tak, aby stanowiły one najlepsze przybliżenie do wartości optymal-

nych. Im trafniej zostaną dobrane parametry punktu startowego, od którego zaczyna się właściwy proces optymalizacji dynamicznej, tym całe badania będą bardziej efektywne, tzn. będą one trwały krócej i będzie potrzebna mniejsza liczba doświadczeń.

Już w tym miejscu należy wziąć pod uwagę to, jaką obrabiarkę przewidziano do danej operacji. Jeśli jest nią tokarka sterowana automatycznie według programu, to wszędzie tam, gdzie w funkcji celu występuje trwałość narzędzia, trzeba wstawić nie średnią wartość trwałości uzyskaną z doświadczeń, lecz znacznie krótszy od niej, niezawodny okres jego pracy, który się określa z dystrybuanty rozkładu statystycznego trwałości /p.rozd.3/. Parametry skrawania należy wówczas dobrać tak, aby okres ten był wielokrotnością czasu wykonania zabiegu lub czasu wymiany bądź regeneracji pozostałych narzędzi, biorących udział w danej operacji. Dla innych obrabiarek konieczność taka nie zachodzi.

Doświadczenia służące do wyznaczenia kierunku gradientu przeprowadza się w okolicach wybranego punktu startowego. Serię badań najkorzystniej przeprowadzić w oparciu o teorię planowania doświadczeń ekstremalnych Boxa-Wilsona.

Jeśli funkcją opisującą badany obiekt jest wielomian pierwszego stopnia

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (17)$$

to pochodne cząstkowe, które są jednocześnie współczynnikami regresji, stanowią składniki gradientu tej funkcji

$$\text{grady} = \begin{vmatrix} \frac{\partial y}{\partial x_1} \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial y}{\partial x_k} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{vmatrix} \quad (18)$$

Chcąc przemieszczać się zgodnie z kierunkiem gradientu, należałoby po każdym kroku określić jego kierunek na podstawie wielomianów wyższych stopni. Wymagałoby to dużej ilości badań i znacznie wydłużało okres poszukiwania optimum. Dlatego też w metodzie tej, aby zredukować liczbę doświadczeń, przemieszczamy się po raz wyznaczonym kierunku gradientu, mimo iż kierunek ten jest jedynie jego liniowym przybliżeniem.

Ponieważ funkcje celu mają dość złożoną budowę, to przekształcenie ich do modelu liniowego (17) na drodze matematycznej jest bardzo kłopotliwe. Dlatego też do wyznaczenia gradientu dowolnej funkcji celu zastosujemy od razu funkcję (17), która w tym przypadku przyjmie postać

$$y = b_0 + b_v v + b_s s \quad (19)$$

oraz zależność (18).

Badania przeprowadza się wg schematu pokazanego w tabeli 3 [44].

Tabela 3

Macierz planowania do wyznaczenia gradientu funkcji celu

Nr doświadczenia	Oznaczenie kodowe	v m/min	Oznaczenie kodowe	s mm / 2π rad	\bar{y}_i	Uwagi
0	0	v_0	o	s_0		punkt startowy
1	+	$v_0 + \Delta v$	-	$s_0 - \Delta s$	y_1	Seria badań do wyznaczenia kierunku gradientu
2	+	$v_0 + \Delta v$	+	$s_0 + \Delta s$	y_2	
3	-	$v_0 - \Delta v$	-	$s_0 - \Delta s$	y_3	
4	-	$v_0 - \Delta v$	+	$s_0 + \Delta s$	y_4	

Zmieniając parametry skrawania zgodnie z kolejnymi wierszami tabeli, wyliczamy wartości wybranej funkcji celu (7) lub (9)

i wstawiamy je w odpowiedni wiersz tabeli 3.

Dla pierwszych doświadczeń, gdy liczba pomiarów jest jeszcze zbyt mała, aby dokładnie określić funkcję gęstości trwałości narzędzia występującą we wzorach (7) i (9), można, na podstawie obserwacji modelu zużywania się narzędzia, ocenić w przybliżeniu jaki rozkład statystyczny będzie opisywał funkcję gęstości /p.rozd.3/. Dla danego rodzaju rozkładu i oszacowanego współczynnika zmienności $V(T)$, można z wykresu przedstawionego na rys.11 odczytać wartość równoważnika trwałości RT . Wstawienie wartości RT do tradycyjnej funkcji celu w miejsce trwałości T da taki sam efekt jak zastosowanie zmodyfikowanej postaci funkcji celu.

Współczynniki regresji równania (19) oblicza się z zależności:

$$b_o = \frac{1}{4} (\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 + \bar{y}_4) \quad (20)$$

$$b_v = \frac{1}{4} (\bar{y}_1 + \bar{y}_2 - \bar{y}_3 - \bar{y}_4) \quad (21)$$

$$b_s = \frac{1}{4} (-\bar{y}_1 + \bar{y}_2 - \bar{y}_3 + \bar{y}_4) \quad (22)$$

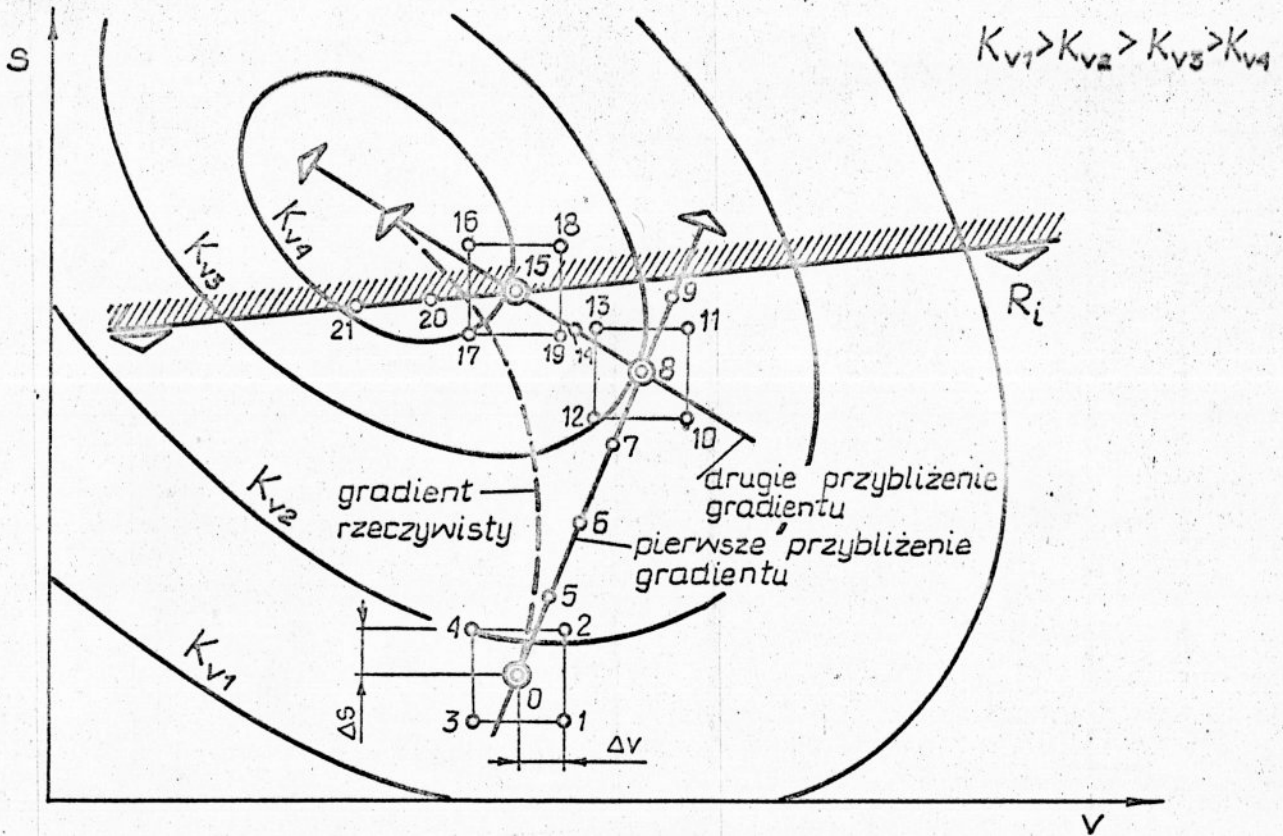
Zgodnie ze wzorem (18), gradientem funkcji celu będzie

$$\text{grady} = \begin{pmatrix} b_v \\ b_s \end{pmatrix} \quad (23)$$

Jeśli wartość gradientu jest bardzo mała lub równa zero, to można wnioskować, że punkt startowy wybrany został szczęśliwie w obszarze stacjonarnym lub prawie stacjonarnym i należy przejść do tej części końcowej algorytmu, w której wyznacza się powierzchnię odpowiedzi i zestaw optymalnych parametrów skrawania. Można tu pominąć możliwość wystąpienia niewielkich wartości gradientu wynikłych z przyjęcia zbyt małych przedziałów zmian parametrów skrawania.

Kolejne sekwencje określania optymalnego stanu obiektu pokazano na rys.23. Punkt startowy, oznaczony jako zero, jest

punktem centralnym do serii badań, oznaczonych numerami 1 do 4, służących do określenia pierwszego przybliżenia kierunku gradientu.



Rys.23. Schemat dynamicznego algorytmu optymalizacyjnego na przykładzie warstwiczowego wykresu funkcji kosztów K_V .

Współrzędne kolejnych punktów pomiarowych wzdłuż kierunku gradientu, oznaczonych w naszym przypadku numerami 5 do 9, wyznaczamy z następujących zależności

$$v_i = v_0 + i \cdot c \cdot b_v \cdot \Delta v \quad (24)$$

$$s_i = s_0 + i \cdot c \cdot b_s \cdot \Delta s \quad (25)$$

gdzie: $i = 1, 2, 3, \dots$ - kolejne kroki wzdłuż kierunku gradientu.

Wartość parametru c , określającego położenie punktów na linii gradientu, można wyznaczyć wieloma sposobami, które podają P.G.Kacew [28] i A.A.Pierwozwanski [43]. Podczas doboru optymalnych parametrów skrawania, gdy spodziewana liczba kro-

ków wzdłuż wyznaczonego kierunku jest niewielka, można przyjąć stałą wartość kroku. Dobranie zbyt małego kroku powoduje wzrost liczby doświadczeń, natomiast przyjęcie zbyt dużego kroku stwarza niebezpieczeństwo "przeskoczenia" obszaru optymalnego. Wydaje się rozsądne przyjęcie takiej wartości kroku, aby wielkość przesunięcia dla czynnika najbardziej wpływającego na wartość funkcji celu, była w przybliżeniu równa wartości przedziału zmian tego czynnika w momencie określania gradientu. Określenie parametru c według niżej podanego toku spełni ten warunek, gdy:

a/ obliczamy iloczyny $|b_v \cdot \Delta v|$ i $|b_s \cdot \Delta s|$,

b/ wybieramy ten czynnik, który da większą wartość bezwzględną iloczynu, nazywając go b a z o w y m b_b ,

c/ obliczamy wartość parametru c ze wzoru

$$c = \frac{\mu}{|b_b|} \quad \text{gdzie } \mu = 0,8 + 1 \quad (26)$$

Przemieszczenie się wzdłuż wyznaczonego kierunku gradientu trwa tak długo aż przyrosty funkcji celu zaczną przybierać niekorzystne wartości.

Dla przypadku przedstawionego na rys.23, wartość funkcji K_V malała w kolejnych krokach aż do punktu oznaczonego numerem 8, a następnie zaczęła ponownie rosnać. Współrzędne punktu nr 8 należy uznać za wartości centralne do następnej serii badań, oznaczonych numerami 10 do 13, służącej do wyznaczenia drugiego przybliżenia gradientu. Kolejne sekwencje takiego postępowania powtarza się tak długo, aż osiągnięty zostanie obszar stacjonarny lub prawie stacjonarny. Wówczas należy wykonać badanie w celu opisanie powierzchni odpowiedzi bardziej złożonym modelem niż przybliżenie liniowe i wyznaczyć optymalny stan obiektu.

Jeśli w którejś sekwencji takiego postępowania natrafimy na ograniczenie brzegowe obszaru rozwiązań /w tym przypadku jest to punkt nr 15/, wówczas należy wykonać badanie w okolicy tego ograniczenia, w celu wyznaczenia przebiegu jego linii /seria doświadczeń w punktach 16 do 19/. Wyznacza się również kierunek, w którym należy się przemieszczać wzdłuż tego ograniczenia tak, aby osiągnąć bardziej optymalny stan obiektu. Jeśli krocząc wzdłuż tego kierunku natrafi się na kolejne ograniczenie, to cały cykl przedstawiony na rys.22c należy powtórzyć. Jeżeli natomiast przyrosty funkcji celu zaczną wcześniej przyjmować niekorzystne wartości, wówczas należy podjąć decyzję czy otrzymany w ten sposób punkt można uznać za optymalny, czy też decydujemy się na przesunięcie tego ograniczenia.

Określenie wartości funkcji celu wzdłuż linii ograniczeń daje możliwość uniknięcia błędu, jaki można popełnić przyjmując za punkt optymalny miejsce, w którym proces optymalizacyjny natrafił na ograniczenie. Przypadek taki miałby miejsce, gdyby w sytuacji pokazanej na rys.23 przyjąć za optymalne parametry skrawania współrzędne punktu 15. Jak wynika to z wykresu przedstawionego na tym rysunku w punkcie nr 20 znajduje się korzystniejszy stan obiektu. W rzeczywistości jednak, podczas badań dynamicznych, nie jest znana powierzchnia opisana funkcją celu. Stwierdzenie więc, w którym miejscu znajduje się rzeczywiście optymalny stan obiektu, jest możliwe dopiero po określeniu wartości funkcji wzdłuż linii ograniczeń.

Podczas badań służących do wyznaczenia linii ograniczeń, można również określić wartość gradientu funkcji celu. Jeśli wartość tego gradientu jest wyraźnie większa od błędu określenia badanej funkcji, to można się spodziewać, że przesunięcie

danego ograniczenia da zauważalne korzystne zmiany optymalizowanych zależności. W przypadku zaś, gdy znajdujemy się w obszarze prawie stacjonarnym, to decyzji takiej można zaniechać.

Podczas realizacji badań doświadczalnych współrzędne wszystkich punktów należy skorygować do wartości rzeczywistych, nastawialnych na danej obrabiarce. Wprowadza to dodatkowe kłopoty i niedokładności w określeniu optymalnych parametrów skrawania, jednak w przypadku obrabiarek z dyskretną regulacją, kłopotów tych nie da się uniknąć.

Wyznaczenie powierzchni odpowiedzi w obszarze stacjonarnym lub prawie stacjonarnym przeprowadza się wtedy, jeżeli przybliżenie liniowe, jakie się stosuje do wyznaczenia kierunku gradientu, nieadekwatnie opisuje powierzchnię odpowiedzi. W tym celu, zgodnie z teorią planowania doświadczeń ekstremalnych [11,28,38,44,52], należy przeprowadzić doświadczenia uzupełniające i opisać obiekt bardziej złożonym modelem matematycznym. Sposób sprawdzenia adekwatności modelu podano w wyżej przytoczonych pracach oraz w rozdz. 6.7.

Wobec na ogół małej liczby możliwych do zrealizowania w warunkach rzeczywistych zestawów parametrów skrawania, określenie optymalnego zestawu parametrów skrawania, polega na wyznaczeniu wartości funkcji celu w poszczególnych punktach badanej przestrzeni i wybraniu tych współrzędnych, dla których osiągnięto najkorzystniejszą wartość tej funkcji.

W tym celu należy określić współczynniki regresji funkcji trwałości ostrza i przyjąć na podstawie obserwacji przebiegu krzywych zużycia ostrza domniemane prawo rozkładu statystycznego, a także określić współczynnik zmienności $V(T)$. Wobec ma-

żej na ogół liczby pomiarów nie jest możliwym dokładne oszacowanie parametrów rozkładu, dlatego też można się posłużyć nomogramem przedstawionym na rys.11, służącym do wyznaczenia równoważnika trwałości. Wstawienie RT w miejsce trwałości w tradycyjnej funkcji celu (8), pozwoli uwzględnić rozrzut trwałości i ominąć tę niedogodność, nie zwiększając liczby pomiarów.

Podczas realizacji zadań produkcyjnych, jeżeli zajdzie potrzeba, można zebrać odpowiednio obszerny materiał statystyczny, który pozwoli na dokładne określenie prawa rozkładu trwałości, a także jego parametrów, co pozwoli na bardziej precyzyjne wyliczenie spodziewanych efektów ekonomiczno-produkcyjnych.

5.4. Wnioski

1. Im większa jest wartość gradientu funkcji celu w miejscu gdzie proces optymalizacyjny zatrzymał się na ograniczeniu związanym z siłami lub oporami skrawania, tym zmiana optymalnej pod względem trwałości geometrii ostrza na taką, która wywoła mniejsze opory skrawania, da wyraźniejszy wzrost efektów ekonomiczno-produkcyjnych.

2. Podczas przesuwania ograniczeń obszaru rozwiązań, drogą zmiany geometrii ostrza, istnieje taki stosunek $\Delta T/\Delta F$, powyżej którego zmiany takie stają się już nieopłacalne. Stosunek ten jest znacznie większy dla wydajności skrawania niż dla kosztów wytwarzania.

3. W wypadkach, kiedy proces optymalizacyjny zatrzymał się na typowych ograniczeniach związanych z siłami lub oporami skrawania, to istnieje możliwość wystąpienia jednego punktu optymalnego, tak ze względu na kryterium kosztów jak i wydaj-

ności. Prawdopodobieństwo wystąpienia takiego punktu jest największe, gdy istnieje możliwość ciągłej regulacji parametrów skrawania lub gdy dyskretne przedziały zmian są względnie małe.

4. Dla ciągłej regulacji parametrów skrawania, można osiągnąć znacznie lepsze efekty ekonomiczno-produkcyjne niż dla regulacji dyskretnej.

5. Wprowadzenie do algorytmu badań optymalizacyjnych określenia wartości funkcji celu wzdłuż linii ograniczeń pozwala na bardziej dokładne określenie optymalnego stanu obiektu.

6. BADANIA DOŚWIADCZALNE

=====

Badania doświadczałne przeprowadzono w celu sprawdzenia zaproponowanej metodyki określania optymalnych parametrów skrawania w toczeniu, a zrealizowano je w oparciu o algorytm przedstawiony na rys.22.

6.1. Przedmiot obrabiany

Postawionym do rozwiązania zadaniem jest znalezienie optymalnych parametrów skrawania w toczeniu wałka ze stali 55 o twardości 205 + 211 HB. Średnica toczenia wynosiła $d = 61,5$ mm, a długość toczenia $l = 300$ mm. Wartość naddatku na stronę, wynikała z tolerancji wykonania półfabrykatu, wahała się w granicach od 1 do 3 mm. Tolerancja wykonania gotowego wyrobu nie powinna przekraczać wartości 0,074 mm, co odpowiada klasie IT9. Liczba sztuk w partii wyrobów wynosiła $n_{sz} = 150$ szt, $t_{pz} = 24$ min, $t_p = 0,19$, $t_{wn} = 1$ min, $k_u = 0,12$.

6.2. Rodzaj obróbki

Nierównomierność rozłożenia naddatku powoduje, że zabieg obróbki skrawaniem prowadzony jest w warunkach dość dużych zmian wartości sił skrawania. W wyniku tego, że układ technologiczny o-u-p-n jest układem sprężystym i do tego o niejednakowej sztywności w różnych punktach przestrzeni, w której obrabia się przedmiot, powstaje tzw. efekt kopiowania się błędów półfabrykatu lub błędów z poprzedniej operacji. Uważa się [51], że jeśli stosunek K_0 pola tolerancji półfabrykatu i gotowej części jest mniejszy od 10, to możliwa jest obróbka w jednym przejściu, gdy $10 \leq K_0 < 50$, to obróbka wymaga dwu przejść, gdy zaś $K_0 > 50$ to konieczne są conajmniej trzy przejścia.

Wychodząc z założenia, że wzrost dokładności musi odbywać się stopniowo ustala się naddatek operacyjny tak, aby po jego zeskraniu usunięte zostały wady warstwy wierzchniej i błędy dokładności z poprzednich operacji technologicznych oraz błędy ustawienia w danym zabiegu. Przy takim podejściu do projektowania procesu technologicznego, dobór parametrów skrawania dla poszczególnych zabiegów dokonuje się w oparciu o przyjęte kryterium optymalności.

Istnieje jeszcze inna możliwość rozwiązania tego zagadnienia, a mianowicie, podczas projektowania procesu technologicznego należy wyjść z dokładności obrabianego przedmiotu i dopuszczalnych błędów przed i po kolejnych zabiegach. Jeśli jest możliwa obróbka z mniej ekonomicznymi parametrami skrawania w poszczególnych zabiegach, ale dająca większy wzrost dokładności i zmniejszenie liczby przejść, to taki wariant operacji technologicznej będzie z reguły bardziej opłacalny z punktu widzenia całego procesu technologicznego.

Taka metoda doboru optymalnych parametrów skrawania jest nieco bardziej skomplikowana od wyżej przytoczonej, ale może dawać znacznie lepsze efekty ekonomiczno-produkcyjne. Sama metoda optymalizacyjna nie ulega zmianie, przesuwają się jedynie ograniczenia związane z siłami i oporami skrawania w kierunku mniejszych wartości.

W przykładzie tym zdecydowano się na tą drugą metodę projektowania procesu technologicznego. Dla stosunku pola tolerancji półfabrykatu i gotowego wyrobu $K_0 = 4/0,074 = 54$ zalecana liczba przejść wynosi 3. Założmy więc, że liczbę przejść zmniejszy się do 2, przy czym obróbkę zgrubną przeprowadzi się stosując takie parametry, aby pole tolerancji po zabiegu wynosiło 0,428 mm. Da to możliwość wykonania przedmiotu na gotowo

w następnym zabiegu, bo stosunek pól tolerancji przed i po obróbce wykończającej będzie wynosił $K_0 = 0,428/0,074 = 5,78$, a więc będzie mniejszy od 10.

Naddatek na poszczególne zabiegi rozdzielono w ten sposób, że dla obróbki zgrubnej głębokość skrawania wynosiła $a = 2,5$ mm, a dla wykończającej $a = 0,5$ mm.

Dalszy tok procedury optymalizacyjnej będzie dotyczył obróbki zgrubnej.

6.3. Dobór narzędzia i obrabiarki

Do produkcji seryjnej wałka ze stali 55 w warunkach, gdy mogą wystąpić ograniczenia obszaru rozwiązań związane z siłami skrawania, dobrano składany nóż tokarski z dodatnim kątem natarcia o symbolu hR 111.17-2525. Ostrze stanowiła wymienna płytko wieloostrowa o symbolu S20S SPUN 120308. Geometria ostrza: $\alpha_n = 6^\circ$, $\gamma_n = 6^\circ$, $\kappa_r = 45^\circ$, $\lambda_s = 0^\circ$, $r_\epsilon = 0,8$ mm. Jako obrabiarkę postanowiono użyć tokarkę uniwersalną TUR 50, o mocy znamionowej silnika $N_s = 7,5/11$ kW, z zakresem prędkości obrotowych wrzeciona $n_{WR} = 18 \div 1800$ obr/min o ilorazie $\varphi = 1,26$ i zakresem posuwów wzdłużnych $s = 0,08 \div 3,26$ mm/ 2π rad.

6.4. Wybór kryterium optymalności

Jako kryterium optymalności podczas doboru parametrów skrawania przyjęto **m a k s y m a l n ą w y d a j n o ś ć t o c z e n i a**.

6.5. Wybór punktu startowego

Przyjęto, że współrzędnymi punktu startowego będą następujące parametry skrawania: $v = 112$ m/min i $s = 0,275$ mm/ 2π rad. Przy wyborze liczone się bowiem z moż-

liwością wystąpienia dużych odkształceń sprężystych układu technologicznego, a tym samym z możliwością przekroczenia zadanej tolerancji wykonania przedmiotu po zabiegu.

6.6. Wyznaczanie kierunku gradientu

K i e r u n e k g r a d i e n t u wydajności wyznaczono w oparciu o teorię planowania doświadczeń ekstremalnych Boxa-Wilsona, omówioną w rozdziale 5.3.

Serię doświadczeń wykonano zgodnie z macierzą planowania zamieszczoną w tabeli 4. W każdym badanym punkcie wykonywano po 5 powtórzeń. W celu wyeliminowania dryfu czasowego dokonano randomizacji badań, poprzez losowy wybór kolejności wykonania doświadczeń. Podczas prób trwałościowych staczano wały stalowe o średnicy 200 mm i długości 800 mm. Zakłócenia losowe, jakie powstają przy nierównomiernym naddatku zastąpiono zakłóceniami prędkości skrawania. Odchylenia sięgające wartości 6% badanej prędkości łącznie z innymi niekontrolowanymi zakłóceniami przypadkowymi, powodowały rozrzuty trwałości o współczynniku zmienności zawartym w przedziale od 0,12 do 0,42, co odpowiadało wartościom spotykanym w praktyce.

Pomiaru zużycia dokonywano przy pomocy mikroskopu konstrukcji prof.Z.Bodnara, o działce elementarnej $1,666 \mu\text{m}$. Mikroskop ten pozwalał na pomiar szerokości starcia VB na powierzchni przyłożenia, a także wielkości charakteryzujących żłobek na powierzchni natarcia. Jako kryterium stopienia ostrza przyjęto $VB = 0,6 \text{ mm}$ lub $K = KT/KM = 0,15$, zależnie od tego, które z nich zostało wcześniej osiągnięte.

Z analizy przebiegu krzywych zużycia wynikało, że rozkładem statystycznym opisującym rozrzut trwałości narzędzi będzie rozkład Weibulla. Z nomogramu przedstawionego na rys.11 okreś-

70

Tabela 4

Dane doświadczalne potrzebne do wyznaczenia kierunku gradientu wydajności toczenia oraz błędu toczenia Δ_t

NR dośw.	v		s		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T _{śr}	V(T)	RT	W	F _{p max}	F _{p min}	Δ _{y max}	Δ _{y min}	Δ _y	Δ _t
	ozn. kod.	m/min	ozn. kod.	mm/2πrad	min	min	min	min	min	min	min	min	szt/min	N	N	mm	mm	mm	mm
0	0	112	0	0,275															
1	+	137	-	0,21	81	71	60	45	38	59	0,3	52	0,3743	845	290	0,107	0,012	0,095	0,406
2	+	137	+	0,34	40	35	39	47	28	38	0,185	36,35	0,5542	1000	380	0,127	0,016	0,111	0,422
3	-	87	-	0,21	140	76	120	111	78	105	0,263	95	0,2524	945	350	0,120	0,105	0,105	0,416
4	-	87	+	0,34	80	85	81	66	93	81	0,12	79,8	0,3855	1095	490	0,139	0,021	0,118	0,430
	v		s																
	teor.	rzecz	teor.	rzecz															
5	130,6	137	0,327	0,34	40	35	39	47	28	38	0,185	36,4	0,5542	1000	380	0,127	0,016	0,111	0,422
6	149,1	137	0,379	0,37	27	40	41	24	38	34	0,232	31,2	0,5903	1041	419	0,132	0,019	0,114	0,425
7	167,7	174	0,431	0,45	26	32	12	26,5	12	21,7	0,422	16,3	0,7603	1070	430	0,136	0,019	0,117	0,429

lono dla każdego punktu pomiarowego, równoważnik trwałości, korzystając z wcześniej wyliczonego współczynnika zmienności $V(T)$. Wstawiając wartość równoważnika w miejsce trwałości w równaniu (8) otrzymano wydajność toczenia z uwzględnieniem rozrzutu trwałości narzędzia.

Gradient funkcji celu wyznaczono ze wzorów (21) i (22)

$$b_v = \frac{1}{4} (0,3743 + 0,5542 - 0,2524 - 0,3855) = 0,07265$$

$$b_s = \frac{1}{4} (-0,3743 + 0,5542 - 0,2524 + 0,3855) = 0,07825$$

$$\text{grad } W = \left\| \begin{array}{l} b_v = 0,07265 \\ b_s = 0,07825 \end{array} \right\|$$

Współrzędne kolejnych kroków wzdłuż kierunku gradientu wyznacza się ze wzorów (24), (25) i (26). Jako współczynnik bazowy przyjęto $b_b = b_s = 0,07825$, a wartość $\mu = 0,8$. Stąd

$$v_i = 112 + i \frac{0,8}{0,07825} \cdot 0,07265 \cdot 25 = 112 + i \cdot 18,57$$

$$s_i = 0,275 + i \cdot 0,8 \cdot 0,052 = 0,275 + i \cdot 0,0416$$

Wyliczone teoretycznie współrzędne kolejnych punktów pomiarowych oraz odpowiadające im rzeczywiste wartości nastawialne na obrabiarce, zamieszczono w tabeli 4 jako kolejne punkty pomiarowe 5, 6 i 7.

Aby móc poruszać się wzdłuż wyznaczonych punktów, zgodnie z kierunkiem gradientu, należy w każdym z nich określić błąd toczenia i stwierdzić, za każdym krokiem, czy nie przekroczono ograniczenia związanego z wymaganą dokładnością przedmiotu po obróbce zgrubnej.

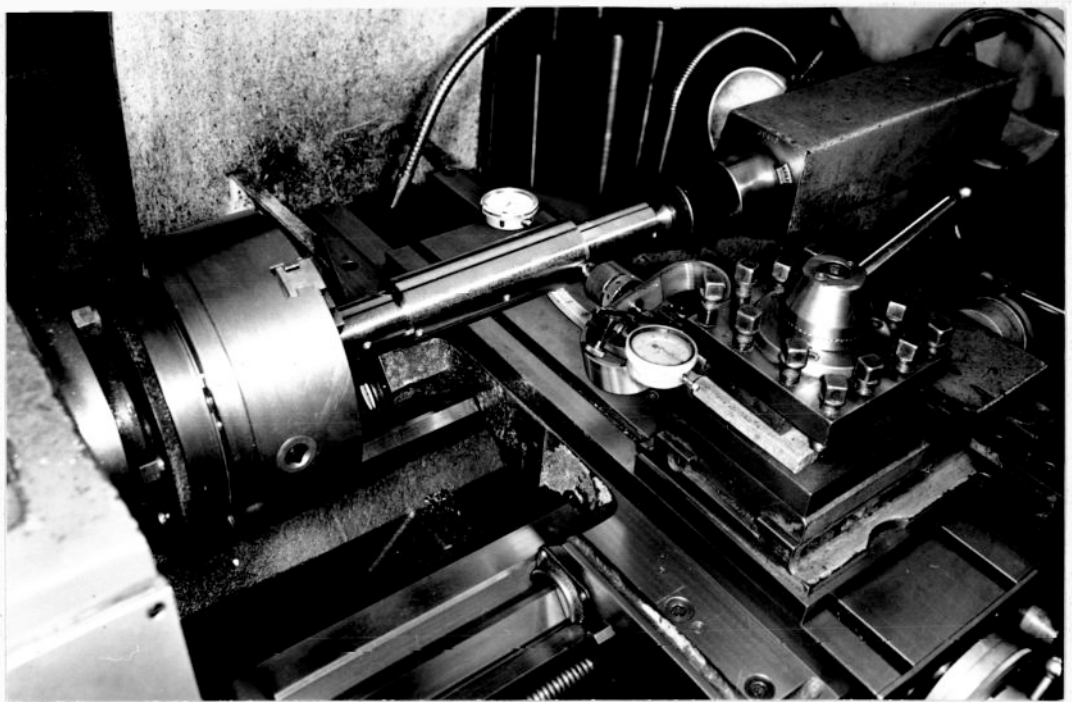
6.6.1. Określenie błędu wykonania przedmiotu

Określenie błędu toczenia polega na odpowiednim zsumowaniu błędów pierwotnych występujących w różnych przekrojach obrabianego przedmiotu. Do błędów tych zaliczyć można:

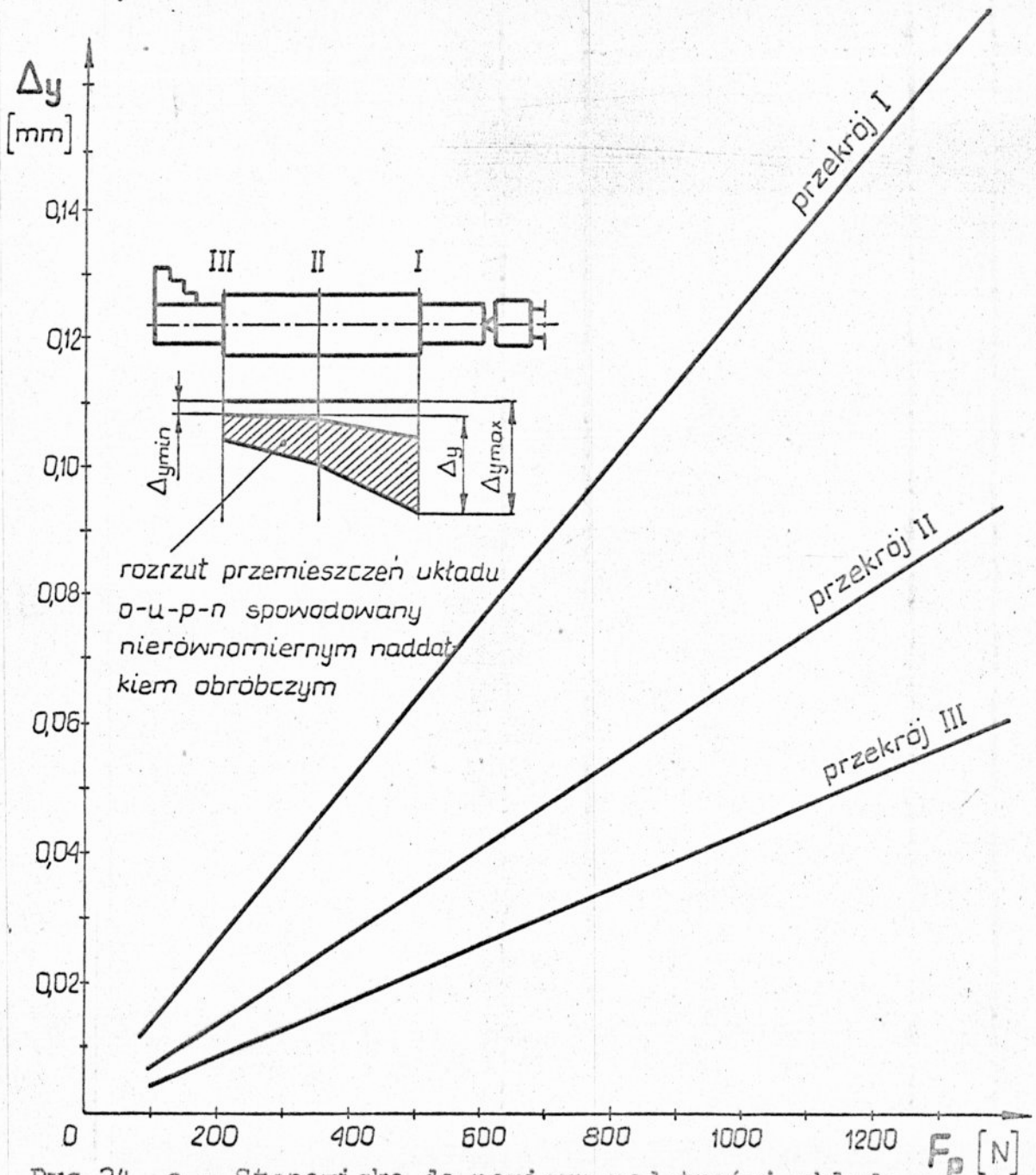
Błąd kształtu Δ_y - wynikły z kopiowania się błędów półfabrykatu. Podczas nastawiania narzędzia na dany wymiar według metody próbnych sztuk, można skorygować błąd systematyczny, wynikły z odkształceń sprężystych układu technologicznego. Nie da się natomiast uniknąć błędów przypadkowych, spowodowanych deformacjami sprężystymi wywołanymi nierównomiernym naddatkiem i niejednakową sztywnością układu. Określając więc błąd kształtu Δ_y trzeba brać różnicę położenia przedmiotu i wierzchołka noża pomiędzy maksymalnym odchyleniem w rozpatrywanym przekroju i najmniejszym z pozostałych przekrojów. Sumowanie przemieszczeń narzędzia należy dokonywać na kierunku osi y. Wpływ przemieszczeń sprężystych na dokładność toczenia, w kierunkach pozostałych osi jest pomijalnie mały. Ze względu na duże rozbieżności w informacjach, dotyczących określania przewidywanych sztywności układów technologicznych, podawanych przez różnych autorów, zdecydowano się na doświadczalne wyznaczenie sztywności układu. Pomiar przeprowadzono na stanowisku pokazanym na rys.24. W imaku nożowym, w miejscu gdzie mocowany jest nóż tokarski, umieszczono siłomierz pałkowy oraz uchwyt, do którego przykręcono czujnik zegarowy o działce elementarnej $1 \mu\text{m}$.

Pomiary przemieszczeń, pod wpływem różnych sił F_p , przeprowadzono w różnych przekrojach obrabianego przedmiotu i przy różnym ustawieniu szczęk uchwytu tokarskiego względem kierunku wywieranej siły. Przedmiot mocowano tak jak podczas obróbki skrawaniem, tzn. w uchwycie trójszczękowym, a drugi koniec podpierano kłem konika. Do sporządzenia wykresu przedstawionego na rys.24, przedstawiającego przemieszczenie osi przedmiotu pod wpływem siły F_p , brano średnie wartości odkształceń dla najniekorzystniejszego ustawienia szczęk.

a)



b)



Rys.24. a - Stanowisko do pomiaru podatności układu o-u-p-n
 b - Podatność układu o-u-p-n w różnych przekrojach

Przedstawiona metoda określania podatności jest bardzo prosta i umożliwia wyznaczenie charakterystyki statycznej całego układu o-u-p-n, w warunkach bardzo zbliżonych do rzeczywistych. Największe odkształcenie sprężyste $\Delta_{y\max}$ wystąpiło w przekroju I, charakteryzującym się największą podatnością, w chwili zadziałania maksymalnej siły skrawania $F_{p\max}$, wywołanej największą możliwą głębokością skrawania $a = 2,5$ mm. Natomiast najmniejsze odkształcenie sprężyste $\Delta_{y\min}$ zanotowano w przekroju III o największej sztywności układu, w chwili wystąpienia minimalnej siły $F_{p\min}$, wywołanej najmniejszą możliwą głębokością skrawania $a = 0,5$ mm. Błąd $\Delta_{y\min}$ jest błędem systematycznym możliwym do skorygowania po przejściach próbnych.

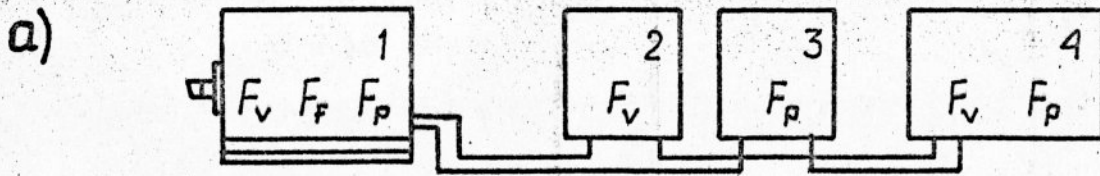
Błąd kształtu wynikły z powielenia błędów półfabrykatu wyliczyć można ze wzoru:

$$\Delta_y = \Delta_{y\max} - \Delta_{y\min} \quad (27)$$

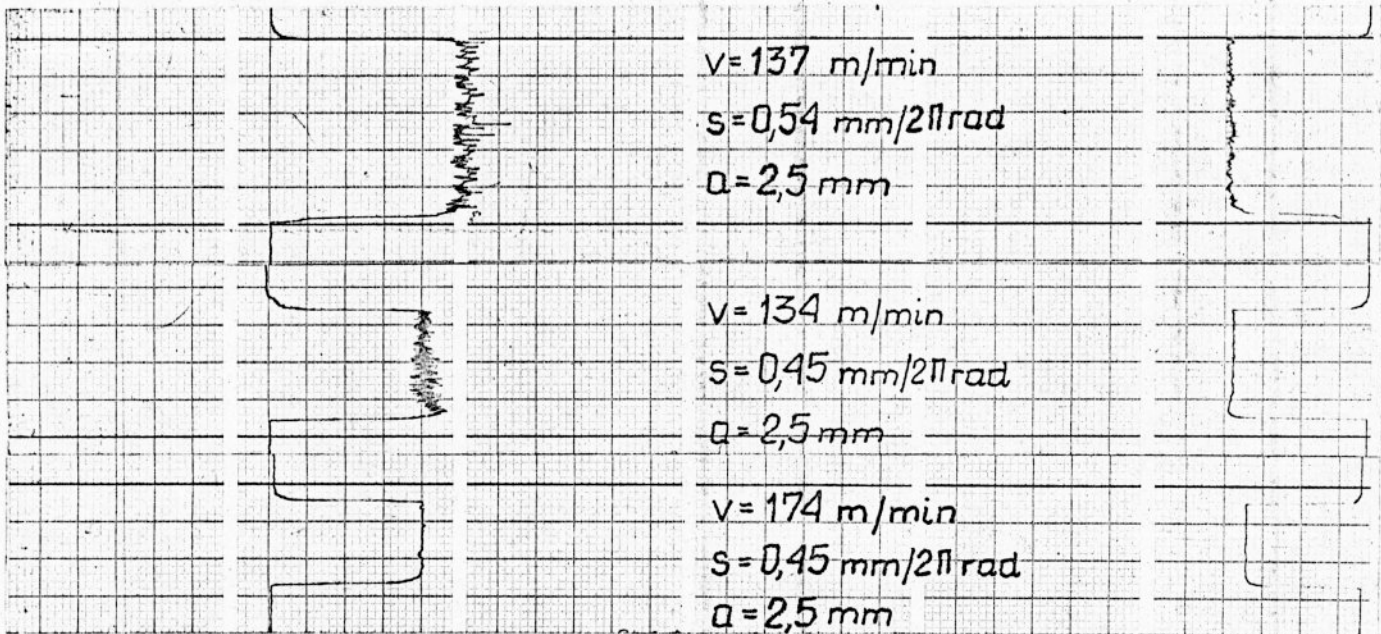
W celu wyznaczenia sił skrawania potrzebnych do określenia błędu Δ_y , posłużono się stanowiskiem pomiarowym pokazanym schematycznie na rys.25a. Składało się ono z trójskładowego siłomierza tokarskiego 1 /zaprojektowanego i wykonanego w Instytucie Technologii Budowy Maszyn Politechniki Wrocławskiej [49]/, mocowanego na suporcie tokarki TUR 50, dwóch mostków pomiarowych 2 i 3 typu KWS/II/5 firmy Hottinger Messtechnik klasy Q5 oraz rejestratora typu HE-4t tej samej firmy, zapisującego na taśmie termoczułej przebiegi sił F_v i F_p .

Do badań użyto noży ze stępionymi ostrzami, aby określić maksymalne możliwe do wystąpienia siły skrawania. Przykładowe przebiegi sił pokazano na rys.25b. Zmierzone wartości sił F_p , w kolejnych badanych punktach, dla maksymalnej $/a = 2,5$ mm/ i minimalnej $/a = 0,5$ mm/ głębokości skrawania oraz odpowiadające im przemieszczenia $\Delta_{y\max}$ i $\Delta_{y\min}$, odczytane z wykre-

su pokazanego na rys.24b, zamieszczono w tabeli 4 jako wartości średnie z trzech powtórzeń.



b) F_v F_p

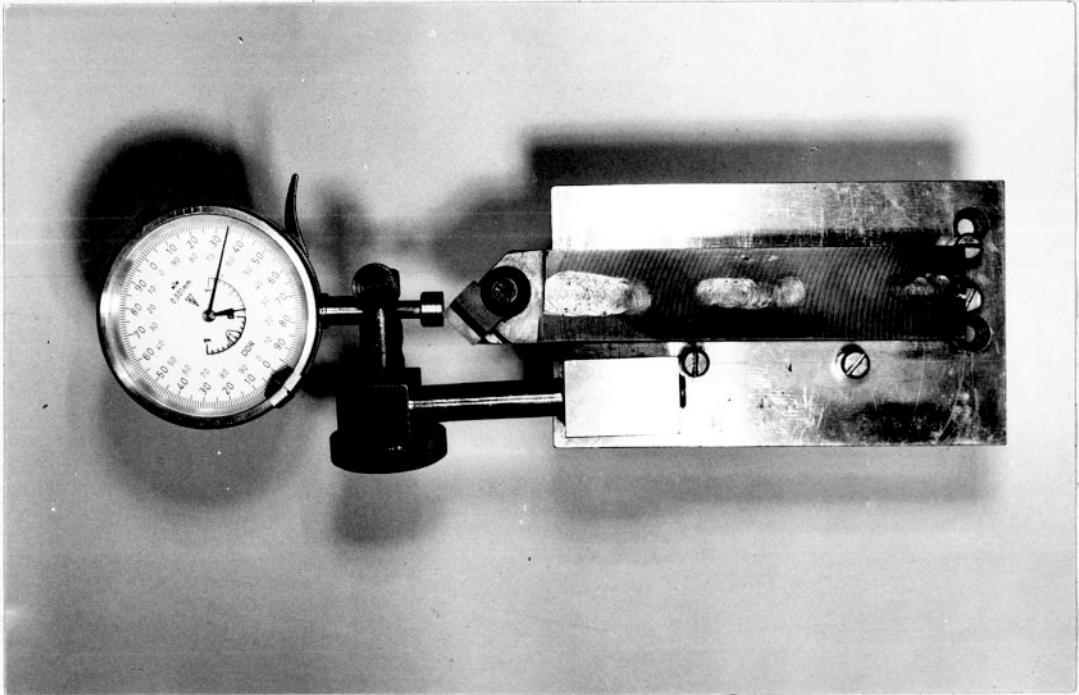


Rys.25.a- Schemat stanowiska do pomiaru sił skrawania
 1 - siłomierz tokarski, 2 i 3 - mostki pomiarowe,
 4 - rejestrator,
 b- Przykładowe zapisy przebiegów sił skrawania na taśmie rejestratora.

Błąd nastawienia narzędzia na wymiar Δ_n jest sumą błędów niedokładności ustawienia suportu poprzecznego Δ_{no} i błędu wynikłego z niepowtarzalności położenia wierzchołka ostrza noża składanego Δ_{nn} oraz błędu pomiaru Δ_{np} .

Dla tokarki TUR-50 można oszacować wartość błędu ustawienia na $\Delta_{no} = 0,025$ mm.

Błąd niepowtarzalności położenia wierzchołka noża Δ_{nn} składa się z błędu mocowania i niedokładności wykonania płytek skrawających. Wartości tego błędu mierzono na stanowisku pokazanym na rys.26.



Rys.26. Stanowisko do pomiaru błędu niepowtarzalności położenia wierzchołka noża Δ_{nn} .

Badając położenie wierzchołka noża dla kolejnych 80-ciu ostrzy oszacowano wartość błędu jako sześciokrotną wartość średniego odchylenia kwadratowego od wartości średniej $\Delta_{nn} = 6 \cdot s = 6 \cdot 0,021 = 0,126$. Pomiaru średnicy obrabianego przedmiotu dokonywano z dokładnością $\Delta_{np} = 0,05$ mm.

Dla rozkładów normalnych poszczególnych błędów, sumaryczny błąd można określić z zależności uwzględniającej losowe pokrywanie się błędów cząstkowych [34]

$$\Delta_n = \sqrt{\Delta_{no}^2 + \Delta_{nn}^2 + \Delta_{np}^2} = \sqrt{0,025^2 + 0,126^2 + 0,05^2} = 0,1378 \text{ mm.}$$

Błąd kształtu spowodowany odkształceniami układu technologicznego od sił mocowania Δ_m można pominąć, ponieważ przedmiot obrabiany jest sztywnym wałkiem, a mocowanie w uchwycie trójścżękowym z podparciem kłem konika, nie powoduje zauważalnych zmian kształtu obrabianej powierzchni.

Błąd kształtu wynikły z odkształceń cieplnych układu Δ_T . Na podstawie badań stabilności cieplnej tokarek serii TUR, prowadzonych w ITBM P.Wr. [7] można stwierdzić, że maksymalne przemieszczenia w kierunku osi y, w okolicy wrzeciona, mogą osiągnąć wartości 0,02 mm po upływie około 120 min pracy ciągłej, a podczas pracy przerywanej okres stabilizacji jeszcze bardziej się wydłuża.

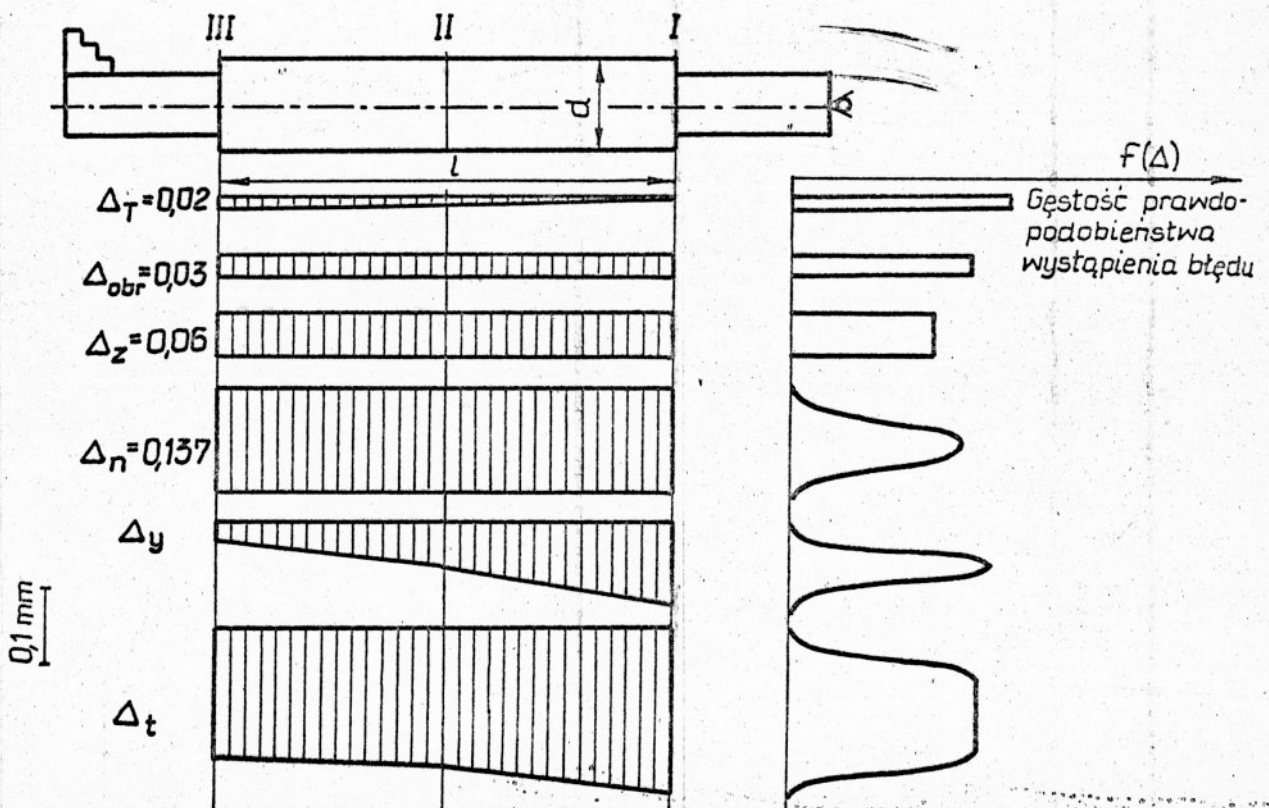
Błąd kształtu wynikły z odkształceń układu podczas jednego przejścia narzędzia wynoszącego około 1 min. można pominąć. Systematyczny maksymalny błąd natomiast pojawi się w przekroju III po ustabilizowaniu się cieplnym obrabiarki. W przekroju I odkształcenia te będą bliskie zeru, ponieważ przemieszczenia konika podczas stabilizacji termicznej obrabiarki są praktycznie niezauważalne. Odkształcenia cieplne Δ_T będą częściowo niwelowały znacznie większy błąd stożkowości Δ_y , wynikły z większej sztywności układu w przekroju III niż w przekroju I /rys.27/.

W początkowym okresie pracy, lub po dłuższym postoju, kiedy obrabiarka nie jest ustabilizowana cieplnie, wartości Δ_T mogą być tak małe, że ich korzystny wpływ na poprawienie błędu kształtu Δ_y może być pominięty. Dlatego też, przyjmując bardziej niekorzystny wariant pracy i powstawania błędów, pominięto w dalszych rozważaniach odkształcenia cieplne.

Błąd kształtu wynikły z geometrycznych niedokładności obrabiarki Δ_{obr} , jest spowodowany głównie biciem promieniowym wrzeciona oraz nierównoległością osi wrzeciona do prowadnic. Wartości te wg Dokumentacji Techniczno Ruchowej obrabiarki TUR-50 wynoszą odpowiednio 0,01 mm i 0,02 mm, tak więc $\Delta_{obr} = 0,03$ mm.

Błąd kształtu spowodowany zużyciem narzędzia Δ_z oceniono na podstawie badań zużycia promieniowego ostrza N. Nie przekraczało ono wartości 0,06 mm, a więc błąd $\Delta_z = N = 0,06$ mm.

Wymienione wyżej błędy pierwotne, jakie mogą powstać podczas toczenia sztywnego wałka zamocowanego w uchwycie trójszczękowym i podpartego kłem konika, pokazano schematycznie na rys.27.



Rys.27. Błędy pierwotne i błąd sumaryczny toczenia.

Gdyby całkowity błąd toczenia określać jako wynik dodania

do siebie wszystkich błędów składowych, wówczas prawdopodobieństwo wystąpienia tak dużego błędu byłoby praktycznie nieosiągalne, a marginesy bezpieczeństwa podczas ustalania naddatków na obróbkę byłoby zbyt duże. Dlatego też uwzględniając gęstość prawdopodobieństwa wystąpienia określonej wartości błędów cząstkowych całkowity błąd toczenia w danym przekroju można określić z następującego wzoru [35]

$$\Delta_t = 2 \cdot t_t \sqrt{\lambda_1 \Delta_{obr}^2 + \lambda_2 \Delta_z^2 + \lambda_3 \Delta_n^2 + \lambda_4 \Delta_y^2} \quad (28)$$

gdzie: t_t - współczynnik określający procent ryzyka otrzymania większego błędu niż wyliczony, dla $t = 2$ wynosi on 4,5%, a dla $t = 3$ ma wartość 0,27%,

λ_i - współczynniki zależne od krzywej rozkładu błędów pierwotnych. Dla rozkładu normalnego $\lambda = 1/9$, dla krzywej zbliżonej do trójkąta $\lambda = 1/6$, a dla rozkładów, o których nic nie wiadomo lub prostokątnych, zaleca się przyjęcie $\lambda = 1/3$.

Liczba 2 powoduje zamianę określonych wcześniej błędów promieniowych na błąd średnicy.

Ponieważ krzywe gęstości rozkładu błędów Δ_{obr} i Δ_z są rozkładami prostokątnymi, a błędów Δ_n i Δ_y rozkładami normalnymi, wzór (28), dla którego prawdopodobieństwo otrzymania nieprawdziwych wartości będzie wynosiło 0,27%, przyjmie postać

$$\Delta_t = 2 \sqrt{3\Delta_{obr}^2 + 3\Delta_z^2 + \Delta_n^2 + \Delta_y^2} \quad (29)$$

Obliczenia błędów wykonania przedmiotu przeprowadzono dla przekroju I, w którym występują największe ich wartości. Błędami tymi uzupełniono tabelę 4. Z przedstawionych tam danych wynika, że w doświadczeniu oznaczonym numerem 4 przekroczono minimalnie wartość dopuszczalnego błędu wynoszącego 0,428 mm. Świadczy to o tym, że doświadczenia oznaczone numerami 1,2,3,4, służące do wyznaczenia kierunku gradientu, znajdują się w obszarze przylegającym do ograniczenia związanego z maksymalnym dopuszczalnym błędem wykonania przedmiotu R_{11} .

W kolejnych krokach 5,6 i 7 procesu optymalizacyjnego dokonano pomiarów trwałości ostrza i obliczono współczynnik zmienności $V(T)$. Na podstawie przyjętego rozkładu gęstości prawdopodobieństwa Weibulla wyznaczono, z nomogramu przedstawionego na rys.11, równoważnik trwałości R_T , służący do określenia wydajności toczenia. Wartości tych wielkości oraz sił skrawania F_{pmax} i F_{pmin} , a także odpowiadające im odkształcenia, które służą do wyznaczenia błędu toczenia Δ_T , zamieszczono w tabeli 4.

Poruszając się wzdłuż kierunku gradientu wydajności, otrzymano coraz to większe wydajności toczenia. W punkcie nr 7 przekroczono ograniczenie R_{11} , bowiem wartość $\Delta_T = 0,429$ mm jest większa od dopuszczalnego błędu równego $0,428$ mm. W związku z tym należy przejść do kolejnego bloku algorytmu optymalizacyjnego.

6.7. Wyznaczenie linii ograniczeń

Do wyznaczenia linii ograniczeń R_{11} potrzebna jest znajomość składowej siły skrawania F_p jako funkcji parametrów v, s, a . Ponieważ zastosowany układ do pomiaru sił skrawania pozwala zmierzyć jednocześnie pozostałe składowe siły skrawania, dlatego też zdecydowano się określić w tej samej serii doświadczeń, zależność $F_v = f(v, s, a)$ i związaną z nią linię ograniczeń R_4 .

Doświadczenia wykonano zgodnie z teorią planowania doświadczeń ekstremalnych, a macierz planowania zamieszczono w tabeli 5.

Współczynniki regresji określono z zależności

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} \bar{y}_u}{n} \quad (30)$$

a przyjęty jako model matematyczny sił skrawania, niepełny wielomian drugiego stopnia, ma postać

$$y_p = 682,5 - 23,7x_1 + 46,3x_2 + 278,7x_3 + 2,5x_1x_2 - 15x_1x_3 + 30x_2x_3 + 3,7x_1x_2x_3 \quad (31)$$

Tabela 5

Macierz planowania oraz wektor wyjścia składowych sił skrawania F_p i F_v
dla noża hR 111.17-2525

Kolejn. Nr dośw.	Macierz planowania							y_{p1}	y_{p2}	y_{p3}	y_{pi}	\bar{y}_{pi}	\hat{y}_{v1}	y_{v2}	y_{v3}	\bar{y}_{vi}	\hat{y}_{vi}
	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	F_{p1}	F_{p2}	F_{p3}	F_p	\bar{F}_p	\hat{F}_{v1}	F_{v2}	F_{v3}	\bar{F}_v	\hat{F}_v
8	-	+	+	-	-	+	-	990	1020	1200	1070	1061	2300	2210	2210	2240	2236
9	-	-	+	+	-	-	+	890	940	960	930	909	1610	1680	1600	1630	1621
10	+	+	+	+	+	+	+	1070	1060	885	1005	1014	2170	2180	2250	2200	2204
11	+	-	+	-	+	-	-	820	870	830	840	861	1620	1530	1590	1580	1589
12	-	+	-	-	+	-	+	420	450	420	430	444	650	680	590	640	651
13	-	-	-	+	+	+	-	415	390	380	395	411	560	530	470	520	521
14	+	+	-	+	-	-	-	395	430	405	410	396	580	620	690	630	619
15	+	-	-	-	-	+	+	390	375	375	380	364	460	510	500	490	489
Oznaczenia	Zmienna niezależna		Oznaczenie kodowe					Poziom zmiennej		Wartość poziomu							
	v		x_1					wyższy	+	216		m/min					
								niższy	-	174		m/min					
	s		x_2					wyższy	+	0,45		mm/2 π rad					
							niższy	-	0,34		mm/2 π rad						
a		x_3					wyższy	+	2,5		mm						
							niższy	-	0,5		mm						
Zmienne zależne w postaci niezakodowanej i zakodowanej równają się $F_p = y_p$ i $F_v = y_v$ [N]																	

Sprawdzenia istotności wpływu poszczególnych współczynników regresji na wartość funkcji celu ma za zadanie wyeliminowanie współczynników nieistotnych, a także pozyskanie pewnej liczby stopni swobody do sprawdzenia adekwatności modelu matematycznego. Ponieważ nie wykonano doświadczeń w punkcie centralnym, a liczba określanych współczynników równa się liczbie wierszy macierzy planowania, to liczba stopni swobody równa się zero, co uniemożliwia sprawdzenie hipotezy o adekwatności modelu matematycznego. Gdyby wszystkie współczynniki regresji okazały się istotne, wówczas do oceny adekwatności trzeba by było wykonać kilka doświadczeń w punkcie centralnym, w celu wyznaczenia krzywizny powierzchni odpowiedzi i na tej podstawie ocenić czy model liniowy jest wystarczający, czy też brakuje w nim wyrazów kwadratowych. Dla całkowitego doświadczenia czynnikowego, przy tej samej liczbie powtórzeń w poszczególnych punktach planu, wariancję charakteryzującą błąd doświadczenia można określić z zależności

$$s^2(y) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (y_{ji} - \bar{y}_{ji})^2}{n(m-1)} \quad (32)$$

ze stopniami swobody $f = n(m-1)$, a wariancję współczynników regresji ze wzoru

$$s^2(b_i) = \frac{s^2(y)}{n m} \quad (33)$$

Sprawdzenie istotności współczynników regresji poszczególnych czynników polega na obliczeniu wartości statystyki Studenta t_i i porównaniu z wartością krytyczną odczytaną z tablic.

Korzystając z wyników zamieszczonych w tabeli 5, określono na podstawie wzorów (32) i (33) wartość wariancji charakteryzującej błąd doświadczenia $s^2(y) = 3344$ oraz wariancję współczynników regresji $s^2(b_i) = 139,3$. Dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$

i liczby stopni swobody $f = 16$ wartość krytyczna wynosi $t_{kr} = 1,746$. Wartości statystyki t_i wyznaczone ze wzoru

$$t_i = \frac{|b_i|}{s(b_i)} \quad (34)$$

dla poszczególnych współczynników regresji wynoszą odpowiednio:

$$\begin{array}{ll} t_0 = 57,84 & t_{12} = 0,2118 < t_{kr} \\ t_1 = 2,008 & t_{13} = 1,271 < t_{kr} \\ t_2 = 3,92 & t_{23} = 2,542 \\ t_3 = 23,62 & t_{123} = 0,3135 < t_{kr} \end{array}$$

Tak więc, jako nieistotnie różniące się od zera można uznać współczynniki b_{12} , b_{13} , b_{123} . Ponieważ zaproponowana metoda planowania badań pozwala na niezależne wyznaczanie współczynników regresji, to nie trzeba ponownie obliczać pozostałych współczynników. Równanie dla zmiennych zakodowanych przyjmie więc postać

$$y_p = 682,5 - 23,75x_1 + 46,25x_2 + 278,75x_3 + 30x_2x_3 \quad (35)$$

Sprawdzenia adekwatności modelu dokonano przy pomocy testu Fishera. W tym celu należało sprawdzić nierówność

$$F = \frac{s_R^2}{s^2(y)} = \frac{\frac{1}{n-n_r} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_{ij} - \hat{y}_{ji})^2}{s^2(y)} \leq F_{kr} \quad (36)$$

dla stopni swobody $f_1 = n - n_r$ i $f_2 = n(m-1)$ oraz założonego poziomu istotności α . Jeżeli obliczona wartość F jest mniejsza od wartości krytycznej F_{kr} odczytanej z tablic, to hipoteza jest słuszna i należy uznać, że model matematyczny adekwatnie opisuje wyniki doświadczeń.

Dla równania (35) wartość testu wynosi $F = 0,1942$. Odczytana z tablic wartość krytyczna, dla $f_1 = 3$, $f_2 = 16$ i poziomu istotności $\alpha = 0,05$, ma wartość $F_{kr} = 3,24$ i jest większa od obliczonej, co potwierdza hipotezę o adekwatności modelu matematycznego.

Można teraz przystąpić do odkodowania równania (35). W tym celu do równania (35) należy podstawić odpowiednio wartości $x_1 = (v-195)/21$, $x_2 = (s-0,395)/0,055$, $x_3 = (a-1,5)/1$ i po prostych przekształceniach otrzyma się równanie w postaci odkodowanej

$$F_p = 475,93 - 1,131v + 22,73s + 63,3a + 545,45 \cdot s \cdot a \quad (37)$$

Wyznaczenie linii ograniczeń R_{11} przebiega następująco. Dla wyliczonych wcześniej błędów, mogących wystąpić w warunkach tego przykładu oraz określonego wcześniej całkowitego dopuszczalnego błędu toczenia $\Delta_t = 0,428$ mm, wyznacza się z równania (29) wartość błędu zależną od siły skrawania F_p . Wynosi ona $\Delta_y = 0,1163$. Dla poszczególnych prędkości skrawania, dających się zrealizować na obrabiarce, wyznacza się ze wzoru (37) graniczne posuwy, które dla głębokości $a = 2,5$ mm w przekroju I i dla $a = 0,5$ mm w przekroju III /rys.26/, dawać będą różnicę $\Delta_y = 0,1163$. Wyznaczone tak współrzędne ograniczeń R_{11} , będą miały odpowiednio wartości $v = 174$ m/min i $s = 0,444$ mm/2 π rad oraz $v = 216$ m/min i $s = 0,487$ mm/2 π rad. Linie ograniczeń poprowadzoną przez te punkty zaznaczono na rys.28.

Ograniczenie związane z maksymalną dopuszczalną mocą skrawania na wrzecionie R_4 , wyznacza się podobnie jak w rozdziale 5.2. W tym celu należy najpierw określić zależność siły F_v od parametrów skrawania. Korzystając z wyników pomiarów sił F_v i macierzy planowania zamieszczonych w tabeli 5 oraz zależności (30) oblicza się współczynniki regresji modelu matematycznego, którym jest niepełny wielomian drugiego stopnia. Po wstawieniu wartości współczynników regresji, dla zmiennych zakodowanych, przyjmie on postać

$$y_v = 1241,25 - 16,25x_1 + 186,25x_2 + 671,25x_3 + 3,75x_1x_2 - 6,25x_1x_3 + 121,25x_2x_3 - 1,25x_1x_2x_3 \quad (38)$$

Wartość wariancji charakteryzującej błąd doświadczenia wynosi $s^2(y) = 2075$, a wariancji współczynników regresji $s^2(b_i) = 86,46$. Wyliczone wartości statystyki t_i służące do oceny istotności współczynników regresji wynoszą odpowiednio

$$t_0 = 133,5 \qquad t_{12} = 0,403 < t_{kr}$$

$$t_1 = 1,747 \qquad t_{13} = 0,672 < t_{kr}$$

$$t_2 = 20,0 \qquad t_{23} = 13,0$$

$$t_3 = 72,1 \qquad t_{123} = 0,137 < t_{kr}$$

Dla krytycznej wartości testu $t_{kr} = 1,746$, przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$, jako nieistotne uznać można współczynniki b_{12} , b_{13} , b_{123} . Równanie (38) przyjmie zatem postać

$$y_v = 1241,25 - 16,25x_1 + 186,25x_2 + 671,25x_3 + 121,25x_2x_3 \quad (39)$$

Obliczona, w celu sprawdzenia adekwatności modelu matematycznego wartość testu $F = 0,07 < F_{kr} = 2,591$, co potwierdza słuszność hipotezy o wystarczająco dobrym opisanu powierzchni odpowiedzi równaniem (39). Po odkodowaniu, w sposób analogiczny jak poprzednio, dla wartości rzeczywistych przyjmie ono postać

$$F_v = 353,9 - 0,7738v + 79,2 \cdot s - 199,6 \cdot a + 2204 \cdot s \cdot a \quad (40)$$

Korzystając z zależności (10) i (12), dla dających się zrealizować w warunkach rzeczywistych prędkości skrawania, obliczono dopuszczalne wartości sił skrawania F_{vR4} . Odpowiadające tym siłom i prędkościom skrawania posuwy, wyliczone z równania (40), dla maksymalnej możliwej głębokości skrawania $a = 2,5$ mm, stanowią linię ograniczeń R_4 .

$$v = 137 \text{ m/min}, \quad F_v = 3459,8 \text{ N}, \quad s = 0,664 \text{ mm}/2\pi\text{rad};$$

$$v = 174 \text{ m/min}, \quad F_v = 2724 \text{ N}, \quad s = 0,537 \text{ mm}/2\pi\text{rad};$$

$$v = 216 \text{ m/min}, \quad F_v = 2194 \text{ N}, \quad s = 0,448 \text{ mm}/2\pi\text{rad};$$

$$v = 270 \text{ m/min}, \quad F_v = 1755 \text{ N}, \quad s = 0,377 \text{ mm}/2\pi\text{rad}.$$

Na rys.28 zaznaczono linię ograniczeń R_{11} i R_4 oraz znajdującą

ce się w ich pobliżu współrzędne rzeczywistych punktów 16,17, 18,19, które dają się zrealizować na obrabiarce TUR-50. Wyniki realizowanych kolejno wg tych punktów doświadczeń zamieszczono w tabeli 6.

Tabela 6

Wyznaczone wartości funkcji celu wzdłuż linii ograniczeń R_4 i R_{11}

Nr dośw.	v	s		T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_{sr}	V(T)	RT	W
		teo- ret.	rze- czyw.									
	m/ min	mm/ 2π rad	mm/ 2π rad	min	min	min	min	min	min	-	min	szt/ min
16	137	0,403	0,39	39	42	28	26	30	33	0,214	31,2	0,6149
17	174	0,444	0,42	33	26	20	21	40	28	0,302	24,2	0,7707
18	216	0,448	0,42	8	4,5	5	6,5	4	5,6	0,292	4,9	0,8120
19	270	0,377	0,37	0,5	1	0,5	0,8	1,5	x/	-	-	-

x/ niekorzystna postać zużywania się ostrza.

W punkcie nr 18, o współrzędnych $v = 216$ m/min i $s = 0,42$ mm/ 2π rad, osiągnięto maksymalną wydajność toczenia $W = 0,8120$ szt/min. Punkt ten należy uważać za optymalny dla narzędzia hR111.17-2525 z płytką S20S.

6.8. Przesunięcie ograniczenia

Kolejny krok algorytmu optymalizacyjnego przewiduje możliwość przesunięcia ograniczenia, na którym zatrzymał się proces optymalizacyjny. W omawianym przypadku jest to miejsce przecięcia się dwóch ograniczeń związanych z siłami i mocą skrawania R_{11} i R_4 . Chcąc przesunąć te ograniczenia trzeba zmienić geometrię ostrza narzędzia, a zwłaszcza kąt α_r , który bardzo silnie wpływa na składową siłę skrawania F_p . Zwiększenie kąta γ_n , dające podobny skutek, ze względu na uzyskane poprzednio małe okresy trwałości $T_{sr} = 5,6$ min, wydaje się

być niecelowe ponieważ osłabiło by to dodatkowo już bardzo silnie obciążone ostrze.

Jako nowe narzędzie, użyto do dalszych badań składany nóż tokarski o symbolu hR 110.17 2525 z tą samą płytką skrawającą co poprzednio, o geometrii $\alpha_n = 6^\circ$, $\gamma_n = 6^\circ$, $\alpha_r = 75^\circ$, $\lambda_s = 0^\circ$, $r = 0,8$ mm.

6.9. Wyznaczenie nowej linii ograniczeń

Wyznaczenie ograniczeń dla nowego narzędzia przeprowadzamy w sposób analogiczny jak w rozdz.6.7. Do wyznaczenia zależności $F_p = f(v,s,a)$ i $F_v = f(v,s,a)$ posłużyła seria doświadczeń oznaczonych numerami od 20 do 27, których współrzędne znajdują się poza obszarem określonym poprzednimi ograniczeniami /rys.28/.

Macierz planowania i uzyskane na jej podstawie wyniki z doświadczeń i obliczeń zawiera tabela 7. Z obliczeń otrzymano zależność $F_p = f(v,s,a)$, dla danych zakodowanych

$$y_p = 384 - 6,5x_1 + 22,25x_2 + 75,25x_3 + 0,25x_1x_2 - 2,75x_1x_3 + 8,5x_2x_3 - 1x_1x_2x_3, \quad (41)$$

z wariancjami $s^2(y) = 1347,8$ i $s^2(b_i) = 56,16$. Obliczone wartości statystyki t_i dla poszczególnych współczynników regresji wynoszą:

$$\begin{array}{ll} t_0 = 51,24 & t_{12} = 0,033 < t_{kr} \\ t_1 = 0,867 < t_{kr} & t_{13} = 0,367 < t_{kr} \\ t_2 = 2,969 & t_{23} = 1,137 < t_{kr} \\ t_3 = 10,04 & t_{123} = 0,133 < t_{kr} \end{array}$$

Ponieważ wartość krytyczna testu, dla liczby stopni swobody $f = n/m - 1 = 16$ i poziomu istotności $\alpha = 0,05$, wynosi $t_{kr} = 1,746$, można współczynniki regresji $b_1, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ odrzucić jako nieistotne, a równanie (41) przyjmie postać

Tabela 7

Macierz planowania oraz wektor wyjścia składowych sił skrawania F_p i F_v
dla noża hR 110.17-2525

Nr dośw.	Macierz planowania								wektor wyjścia					wektor wyjścia					
	x_0	planowanie				x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	F_{p1i}	F_{p2i}	F_{p3i}	\bar{F}_{pji}	\hat{F}_{pji}	F_{v1i}	F_{v2i}	F_{v3i}	\bar{F}_{vji}	\hat{F}_{vji}
		y_{p1i}	y_{p2i}	y_{p3i}	\bar{y}_{pji}					\hat{y}_{pji}	y_{v1i}	y_{v2i}	y_{v3i}	\bar{y}_{vji}	\hat{y}_{vji}				
		N	N	N	N					N	N	N	N	N	N				
20	+	-	+	+	-	-	+	-	460	490	550	500	482	2300	2400	2620	2440	2377	
21	+	-	-	+	+	-	-	+	405	420	486	437	437	1900	2100	2420	2140	2172	
22	+	+	+	+	+	+	+	+	440	470	530	480	482	2600	2400	2230	2410	2377	
23	+	+	-	+	-	+	-	-	390	440	430	420	437	2100	2300	1930	2110	2172	
24	+	-	+	-	-	+	-	+	340	330	305	325	331	800	740	620	720	755	
25	+	-	-	-	+	+	+	-	330	290	280	300	287	580	580	655	605	555	
26	+	+	+	-	+	-	-	-	310	280	370	320	331	730	680	675	695	755	
27	+	+	-	-	-	-	+	+	320	290	260	290	287	620	610	540	590	555	
Oznaczenia	Zmienna niezależna				Oznaczenie kodowe				Poziom zmiennej					Wartość poziomu					
	Fikcyjna zmienna				x_0				wyższy +					-					
	v				x_1				wyższy +					174 m/min					
									niższy -					137 m/min					
s				x_2				wyższy +					0,54 mm/2π rad						
								niższy -					0,45 mm/2π rad						
a				x_3				wyższy +					2,5 mm						
								niższy -					0,5 mm						

$$y_p = 384 + 22,25x_2 + 75,25x_3 \quad (42)$$

W celu sprawdzenia adekwatności tego równania, obliczono wartość statystyki $F = 0,1463$. Jest ona mniejsza od wartości krytycznej odczytanej z tablic, dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$, a wynoszącej $F_{kr} = 2,85$, a więc oceniany model matematyczny adekwatnie opisuje wyniki doświadczeń. Po przejściu do zmiennych rzeczywistych równanie (42) przyjmie postać

$$F_p = 26,4 + 494,4 \cdot s + 75,25 \cdot a \quad (43)$$

Trzeba nadmienić, że tak prosta budowa matematyczna równań, przedstawiających zależność sił od parametrów skrawania, wynika z faktu opisywania powierzchni odpowiedzi w niewielkich wycinkach przestrzeni czynnikowej.

Wyznaczoną, podobnie jak poprzednio, linię ograniczeń R_{11} stanowi w tym wypadku niezależna od prędkości skrawania /wpływ prędkości okazał się nieistotny/, wartość posuwu $s = 1,46 \text{ mm}/2\pi\text{rad}$. Tak więc zmiana narzędzia spowodowała bardzo znaczne przesunięcie linii ograniczeń R_{11} - prawdopodobnie poza obszar optymalnych rozwiązań.

Aby wyznaczyć drugie ograniczenie R_4 , związane z mocą skrawania, należy określić współczynniki regresji funkcji $F_v = f(v, s, a)$. W tym celu należy skorzystać z wyników pomiarów sił F_v , zamieszczonych w tabeli 7 oraz wzorów (30), (32), (33), (34) i (36). Otrzyma się kolejno: równanie regresji w postaci zakodowanej

$$y_v = 1463,7 - 12,5x_1 + 102,5x_2 + 811,25x_3 - 1,25x_1x_2 + 2,5x_1x_3 + 47,5x_2x_3 + 1,25x_1x_2x_3 \quad (44)$$

z wariancją błędu doświadczenia $s^2(y) = 22162,5$ i wariancją współczynników regresji $s^2(b_i) = 923,4$. Po sprawdzeniu istotności, odrzucono następujące współczynniki regresji: b_1 , b_{12} , b_{13} , b_{23} , b_{123} , co uprościło równanie (44) do postaci

$$y_V = 1463,7 + 102,5x_2 + 811,25x_3 \quad (45)$$

Sprawdzenie adekwatności $F = 0,1667 < F_{kr} = 2,85$, dla poziomu istotności $= 0,05$, potwierdziło poprawność modelu matematycznego. Po odkodowaniu równania (45), otrzymano zależność funkcyjną siły F_V od parametrów skrawania

$$F_V = -880,7 + 2278 \cdot s + 811,3 \cdot a \quad (46)$$

Korzystając z zależności (10), (12) oraz (46) wyznaczono współrzędne ograniczeń R_4 , związanych z dopuszczalną mocą na wrzecionie

$$v = 137 \text{ m/min}, \quad F_V = 3459,8 \text{ N}, \quad s = 1,015 \text{ mm/2}\pi\text{rad}$$

$$v = 174 \text{ m/min}, \quad F_V = 2724 \text{ N}, \quad s = 0,692 \text{ mm/2}\pi\text{rad},$$

$$v = 216 \text{ m/min}, \quad F_V = 2194 \text{ N}, \quad s = 0,459 \text{ mm/2}\pi\text{rad}.$$

Linie ograniczeń R_4 przechodzącą przez powyższe współrzędne, naniesiono na wykres pokazany na rys.28.

Podczas prób trwałościowych przeprowadzanych w punktach rzeczywistych, znajdujących się w pobliżu linii ograniczeń, o współrzędnych:

$$v = 216 \text{ m/min}, \quad s = 0,45 \text{ mm/2}\pi\text{rad},$$

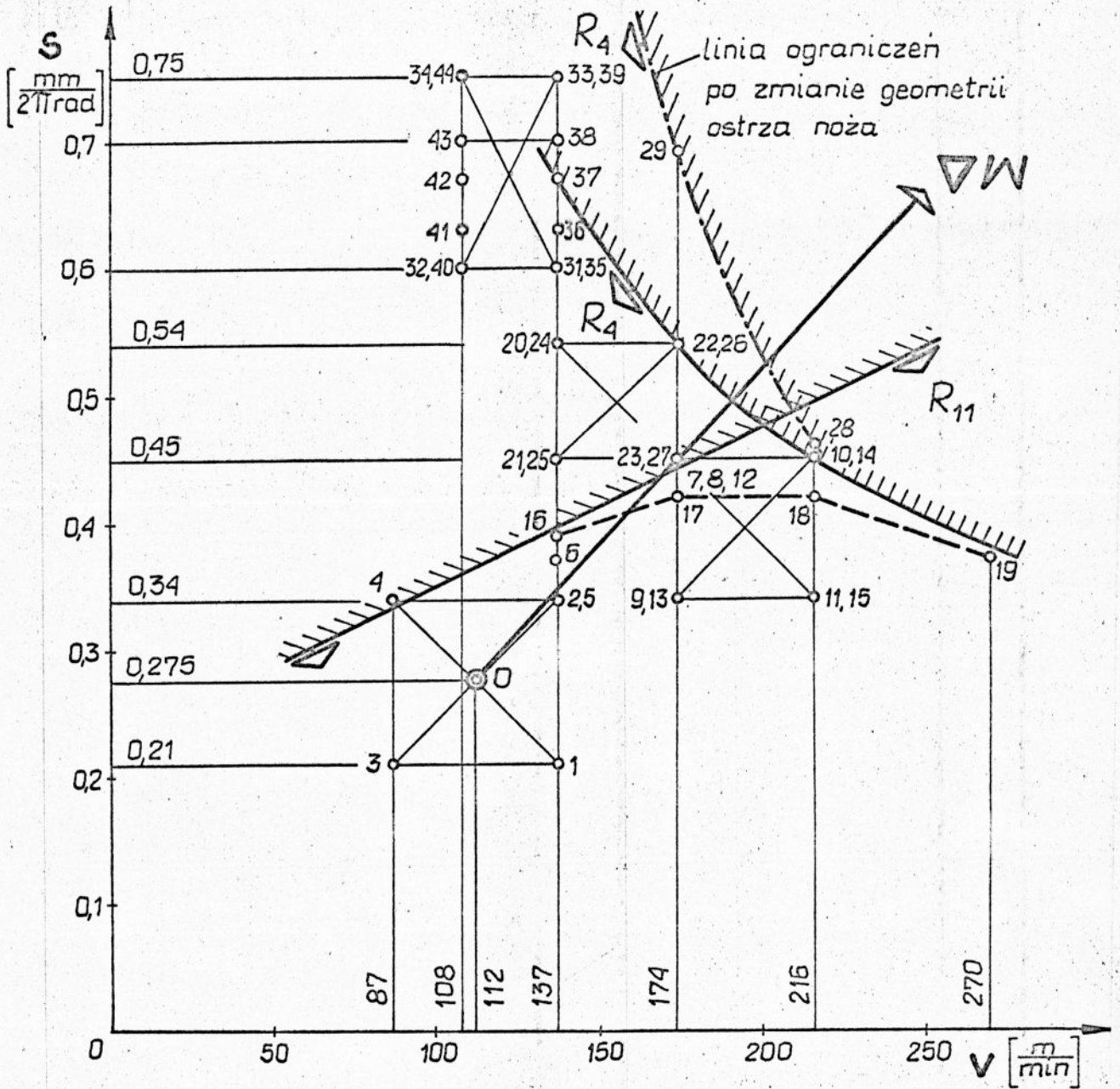
$$v = 174 \text{ m/min}, \quad s = 0,67 \text{ mm/2}\pi\text{rad},$$

$$v = 137 \text{ m/min}, \quad s = 0,94 \text{ mm/2}\pi\text{rad},$$

wierzchołek narzędzia "upał się" po okresie pracy nie przekraczającym 1 min. Tak więc można stwierdzić, że obszar optymalny znajduje się wewnątrz pola rozwiązań ograniczonego warunkami brzegowymi R_4 i R_{11} .

6.10. Określenie powierzchni odpowiedzi w obszarze stacjonarnym

Kolejną sekwencją algorytmu optymalizacyjnego jest seria doświadczeń przeprowadzona w celu wyznaczenia powierzchni odpowiedzi w obszarze stacjonarnym lub prawie stacjonarnym.



Rys.28. Linie ograniczeń oraz punkty przedstawiające kolejne fazy realizacji badań optymalizacyjnych

W funkcji celu (9) nieznaną jest jej część dotycząca trwałości. Aby można było określić optymalny stan obiektu, należy wyznaczyć doświadczalnie funkcję trwałości ostrza i prawo jej rozkładu.

Jako model matematyczny trwałości narzędzia przyjęto powszechnie stosowaną postać potęgową, która bardzo dobrze speł-

nia swoją rolę w niewielkich przedziałach zmian parametrów skrawania

$$T = C_T v^u s^w \quad (47)$$

Badania wykonano w oparciu o teorię planowania doświadczeń ekstremalnych. Aby można było tego dokonać zamieniono równanie (47) na wielomian pierwszego stopnia poprzez zlogarytowanie obu stron i wprowadzenie oznaczeń $y = \ln T$, $b_0 = \ln C_T$, $b_1 = u$, $b_2 = w$, $x_1 = \ln v$, $x_2 = \ln s$

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 \quad (48)$$

Macierz planowania oraz wyniki z doświadczeń zamieszczono w tabeli 8.

Po obliczeniu współczynników regresji otrzymano równanie

$$y = 2,568 - 0,7568x_1 - 0,6216x_2, \quad (49)$$

z wariancjami $s^2(y) = 0,1106$ i $s^2(b_i) = 5,53 \cdot 10^{-3}$. Obliczone wartości statystyki t_i dla poszczególnych współczynników regresji wynoszą odpowiednio $t_0 = 34,53$, $t_1 = 10,176$, $t_2 = 8,358$ i są większe od wartości krytycznej $t_{kr} = 1,746$, odczytanej z tablic rozkładu Studenta dla $\alpha = 0,05$ i $f = 16$. Tak więc, wszystkie współczynniki okazały się istotne. Następnym krokiem podczas opracowania statystycznych wyników doświadczeń jest sprawdzenie adekwatności modelu matematycznego. Obliczona wartość testu Fishera wynosi $F = 0,7805$ i jest mniejsza od wartości krytycznej $F_{kr} = 4,49$ odczytanej z tablic dla liczby stopni swobody $f_1 = 4 - 3 = 1$ i $f_2 = 4(5 - 1) = 16$ i poziomu istotności $\alpha = 0,05$. Potwierdza to adekwatność przyjętego modelu matematycznego.

Po odkodowaniu równania (49) i przejściu do postaci potęgowej, otrzymano wzór na trwałość narzędzia zależną od prędkości skrawania i posuwu

Tabela 8

Macierz planowania oraz wyniki doświadczeń służące do wyznaczenia funkcji trwałości w obszarze stacjonarym

Nr dośw.	Macierz planow.			Wektor						wyjścia						
	x_0	x_1	x_2	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	$T_{\text{śr}}$	y_{1i}	y_{2i}	y_{3i}	y_{4i}	y_{5i}	\bar{y}_{ji}	\hat{y}_{ji}
31	+	+	-	7,5	10	18	16	18,5	14	2,0149	2,3026	2,8903	2,7726	2,9178	2,5796	2,4328
32	+	-	-	37,5	40	49	47	51,5	45	3,6243	3,6889	3,8918	3,8501	3,9416	3,7994	3,9464
33	+	+	+	1,5	3,5	2,5	4	3,5	3	0,4055	1,2528	0,9163	1,3863	1,2528	1,0427	1,1896
34	+	-	+	19	11	24	22	14	18	2,9444	2,3979	3,1781	3,091	2,639	2,8501	2,7032
Zmienne niezależne				Oznaczenie kodowe					Poziom zmiennej			wartość poziomą				
Fikcyjna zmienna				x_0					wyższy +			-				
v				x_1					wyższy +			137 m/min				
									niższy -			108 m/min				
s				x_2					wyższy +			0,75 mm/2 π rad				
									niższy -			0,6 mm/2 π rad				

$$T = 2,6213 \cdot 10^{13} \cdot v^{-6,36} \cdot s^{-5,57} \quad (50)$$

Obliczona średnia wartość współczynnika zmienności trwałości wynosiła $V(T) = 0,2322$. Na podstawie obserwacji krzywych zużycia się ostrzy skrawających podczas badań trwałościowych można stwierdzić, że prawem rozkładu trwałości będzie rozkład Weibulla.

6.11. Wyznaczenie optymalnych parametrów skrawania

Określenie optymalnego stanu obiektu, polega na wyborze najkorzystniejszego zestawu parametrów skrawania, spośród możliwych do zrealizowania w warunkach rzeczywistych obszaru stacjonarnego.

Trwałość ostrza wyznaczano ze wzoru (50), a z nomogramu przedstawionego na rys.11 określono odpowiadający jej równoważnik RT , który występuje w funkcji celu. Wyliczone wartości wydajności toczenia z równania (8), dla wszystkich kombinacji parametrów skrawania z obszaru stacjonarnego, przedstawiono w tabeli 9. Największą wartość wydajności $W = 0,8361$ szt/min otrzymano dla prędkości skrawania $v = 137$ m/min i posuwu $s = 0,7$ mm/2 π rad. Ten zestaw parametrów należy uważać za optymalne rozwiązanie postawionego zadania.

Porównując tą wydajność z poprzednio otrzymaną, można stwierdzić, że w wyniku przesunięcia ograniczeń, poprzez zmianę narzędzia, otrzymano wzrost wydajności w miejscach optymalnych o 3%. Gdyby ograniczenie, które przesunięto, było bardziej oddalone od obszaru stacjonarnego, niż to miało miejsce w omawianym przykładzie, wówczas zmiana narzędzia powodowałaby jeszcze większy wzrost wydajności. Trzeba nadmienić, że osiągnięto korzystniejszy stan obiektu mimo iż trwałość nowego narzędzia, w miejscu optymalnym dla poprzedniego, była, jak wykazały to

Tabela 9

Stabilicowane wartości funkcji celu w obszarze stacjo-
narym

Lp.	v	s	T	RT	W
	$\frac{m}{\text{min}}$	$\frac{\text{mm}}{2\pi\text{rad}}$	min	min	$\frac{\text{szt}}{\text{min}}$
35		0,6	11,39	10,65	0,8088
36		0,63	8,68	8,11	0,8214
37	137	0,67	6,16	5,76	0,8315
38		0,7	4,83	4,51	0,8361
39		0,75	3,29	3,07	0,8263
40		0,6	51,8	48,4	0,7168
41		0,63	39,44	36,9	0,7394
42	108	0,67	28	26	0,7668
43		0,7	22,9	20,5	0,7855
44		0,75	14,9	13,9	0,8119

badania uzupełniające, około trzykrotnie mniejsza, gdyż wierzchołek ostrza "upalał się" po niecałych dwóch minutach pracy. Tak nagłe zmniejszenie się trwałości było spowodowane pracą w warunkach ekstremalnych obciążeń. Wówczas nawet niewielka zmiana optymalnej, z uwagi na trwałość, geometrii ostrza sprawia, że żywotność narzędzia gwałtownie maleje. Mimo tak stosunkowo niekorzystnej chwili do przeprowadzenia zmiany geometrii narzędzia, uzyskano w efekcie wzrost wydajności. Potwierdza to jeszcze raz słuszność drugiej tezy niniejszej dysertacji.

6.12. Wnioski wynikające z realizacji przykładu doświadczalnego

W oparciu o doświadczalnie przeprowadzoną optymalizację parametrów skrawania oraz analizę błędów toczenia, można wyciągnąć następujące wnioski i spostrzeżenia:

1. Opracowana metodyka dynamicznego określania optymalnych parametrów skrawania okazała się efektywną w zastosowaniu.
2. Zastosowana do optymalizacji metoda gradientowo-sekwencyjna, z wykorzystaniem planowania doświadczeń ekstremalnych, pozwala: znacznie ograniczyć liczbę pomiarów, stosować nieskomplikowane matematycznie zależności funkcyjne, wyznaczyć estymatory metodą najefektywniejszą tzn. z najmniejszą możliwą wariancją błędu, znacznie uprościć obliczenia, wyznaczyć współczynniki regresji w sposób niezależny od siebie oraz obiektywnie ocenić błąd doświadczenia, istotność poszczególnych czynników i adekwatność przyjętego modelu matematycznego.
3. W niewielkich wycinkach przestrzeni czynnikowych do opisanie zależności funkcyjnych takich, jak np. siły skrawania czy trwałość narzędzia, wystarczają najprostsze modele matematyczne o postaci niepełnych wielomianów drugiego stopnia czy równań potęgowych.

4. Podczas toczenia przedmiotów sztywnych na tokarkach uniwersalnych, w sumarycznym błędzie toczenia najbardziej ważącymi składnikami są błędy nastawienia narzędzia na wymiar oraz błędy wynikłe z odkształceń sprężystych układu o-u-p-n.

5. Błędy wynikłe z odkształceń cieplnych obrabiarki w kierunku osi y, mogą powodować zmniejszenie się pola tolerancji wykonania przedmiotu, jeśli w trakcie obróbki jest on podparty kłem konika.

6. Podczas toczenia dokładnego, szczególnie na obrabiarkach sterowanych według programu, należy dobierać takie narzędzia, których rozwiązania konstrukcyjne zapewniają małe rozrzuty położeń wierzchołka noża, podczas wymiany ostrza skrawającego. Dotyczy to nie tylko tolerancji wykonania samej płytki skrawającej, ale także pewności i dużej powtarzalności mocowania elementów ustalająco-mocujących noża.

7. Zmiana narzędzia optymalnego pod względem trwałości, na narzędzie o gorszej trwałości, ale dające mniejsze siły skrawania, może spowodować poprawę efektów ekonomiczno-produkcyjnych, w warunkach występowania takich ograniczeń jak maksymalny dopuszczalny błąd wykonania przedmiotu lub maksymalna dopuszczalna moc użyteczna na wrzecionie.

8. Analizując efekt kopiowania się błędów, okazuje się, że można dobrać takie warunki obróbki, aby zmniejszyć konieczną liczbę przejść, potrzebną do uzyskania żądanej klasy dokładności.

7. ZAKOŃCZENIE =====

W przedstawionej dysertacji przeanalizowano przyczyny losowego zużywania się ostrza oraz podano jakie mechanizmy powodują, że w danych warunkach rozrzut trwałości narzędzia będzie opisany takim a nie innym rozkładem statystycznym. Ma to duże znaczenie praktyczne w początkowym okresie badań, kiedy to najczęściej nie ma dostatecznie dużej liczby danych, aby można było na drodze matematycznej określić rodzaj i parametry rozkładu trwałości ostrza.

Wyjaśniono mechanizm powstawania zakłóceń funkcji kosztów i wydajności toczenia, a także podano ilościową ich ocenę dla rozkładów statystycznych trwałości, najczęściej spotykanych w praktyce. Oceniono także, które ze składowych wyżej wymienionych funkcji celu najbardziej sprzyjają powiększaniu się błędów ich określenia, jeżeli nie uwzględnia się rozrzutu trwałości narzędzia.

Zaproponowane nowe postacie funkcji kosztów i wydajności, uwzględniające losowy rozrzut trwałości narzędzia, są zdaniem autora, najważniejszym osiągnięciem tej pracy. Opierają się one o zależności tradycyjne, powszechnie zaakceptowane, które uzupełniono prostą zależnością matematyczną. Z praktycznego punktu widzenia nie mniej ważna jest możliwość uwzględniania wpływu rozrzutu trwałości w funkcjach celu, dzięki wprowadzonemu pojęciu równoważnika trwałości RT . Wartość tego równoważnika można oszacować z nomogramu lub przy pomocy programu opracowanego na MC.

Po udowodnieniu drugiej tezy pracy, która mówiła o możliwości polepszenia optymalnego stanu obiektu drogą zmian najkorzyst-

niejszej pod względem trwałości geometrii narzędzia, jeśli zmiany takie powodują przesunięcie ograniczeń obszaru rozwiązań, włączono ją do algorytmu optymalizacyjnego. Korzystając z tego algorytmu, można kolejnymi sekwencjami wyznaczyć optymalny zestaw parametrów skrawania. Takie przedstawienie metodyki optymalizacyjnej pozwala prześledzić jej schemat myślowy, a także ułatwia tok postępowania.

Metodykę optymalizacyjną sprawdzono na przykładzie doświadczalnym, do którego dane i założenia dobrano tak, aby zaszła konieczność przejścia przez wszystkie bloki jej algorytmu.

Wszędzie tam, gdzie zachodziła konieczność wyznaczenia jakiejś funkcji przy pomocy eksperymentu, stosowano metodę planowania doświadczeń ekstremalnych. Jest ona w chwili obecnej najefektywniejszą z możliwych do zastosowania, bowiem pozwala, przy minimalnym nakładzie pracy, uzyskać maksimum informacji z minimalnymi wariacjami błędu określenia współczynników regresji i funkcji aproksymujących. Ponadto stwarza ona możliwość obiektywnej statystycznej oceny istotności wpływu poszczególnych czynników w funkcji, a także sprawdzenia adekwatności całego równania regresji.

Do niedostatków tej pracy zaliczyć można brak sprawdzenia zaproponowanej metodyki w warunkach przemysłowych, co stworzyłoby możliwość bardziej obiektywnej jej oceny. Ponieważ metodyka nadaje się do zastosowania podczas realizacji zadań produkcyjnych, to główna część eksperymentu - badania trwałościowe - powinna być przeprowadzona na konkretnych przedmiotach w warunkach obróbki produkcyjnej, co by pozwoliło oszacować wszystkie zakłócenia losowe, jakie mogą wystąpić podczas przyszłej normalnej pracy. W przykładzie doświadczalnym próby trwałościowe wykonano skrawając wały stalowe, a zakłócenia losowe,

jakie powstają przy nierównomiernym naddatku, zastąpiono zakłóceniami prędkości skrawania. Mimo pewnego odstępstwa od warunków przemysłowych, takie generowanie zakłóceń powodowało rozrzuty trwałości narzędzi spotykane w praktyce, a ponadto pozwoliło wykorzystać do badań dostępny materiał obrabiany /zużyto go łącznie około 4 ton/ oraz skrócić znacznie czas eksperymentu. Takie postawienie zagadnienia jest, zdaniem autora, dopuszczalne, ponieważ w przykładzie doświadczalnym chodziło nie o wyznaczenie stanu optymalnego obiektu, lecz o sprawdzenie metodyki badań.

Przedstawiona metodyka posiada również takie wady jakie mają wszystkie metody dynamiczne, a mianowicie nie ma możliwości opisanie zależności funkcyjnymi całego obszaru badań, lecz jedynie jego pewne wycinki. Nie można też określić precyzyjnie liczby i czasu trwania badań doświadczalnych.

Zdaniem autora, metodyka dynamicznej optymalizacji parametrów skrawania w toczeniu może być zastosowana wszędzie tam, gdzie funkcje opisujące proces skrawania nie są jeszcze dostatecznie poznane.

W świetle powyższych rozważań wydaje się celowe wskazanie dalszych kierunków badań, które pozwolą na pełniejsze rozwiązanie poruszanych w tej pracy problemów.

Dokładne przeanalizowanie wszystkich ograniczeń obszaru rozwiązań stworzy możliwość pełnej automatyzacji proponowanej procedury optymalizacyjnej.

Zastosowanie ETO i sformalizowanego toku postępowania, da możliwość stosowania tej metody optymalizacyjnej przez pracowników, którzy nie będą się musieli wykazać dużą wiedzą z teorii skrawania, czy planowania eksperymentu.

Główne tezy tej pracy, aczkolwiek sformułowane pod kątem

obróbki toczeniem, obowiązują także w innych rodzajach obróbki skrawaniem, takich choćby, jak frezowanie czy wiercenie. Analiza korzyści jakie można osiągnąć poprzez analogiczne, jak dla toczenia, modyfikacje funkcji celów, dla innych rodzajów obróbki skrawaniem, wydaje się być celowa do przeprowadzenia.

7.1. Wnioski końcowe

Szczegółowe wnioski, wynikające z analizy poruszanych w tej pracy problemów, zostały umieszczone w odpowiednich podrozdziałach. Wnioski ogólne podzielono, w zależności od charakteru, na wnioski p o z n a w c z e i u t y l i t a r n e .

7.1.1. Wnioski o charakterze poznawczym

1. Rozrzut trwałości narzędzia wpływa bardziej zakłócająco na funkcje celu w obróbce wykończającej niż w obróbce zgrubnej.

2. W obszarach stacjonarnych lub prawie stacjonarnych, a więc w tych, w których najczęściej kończy się proces optymalizacji, nawet niewielkie błędy określenia funkcji celu, powodują dość duże różnice, gdy chodzi o dobór optymalnego zestawu parametrów obróbki.

3. W chwili, gdy podczas optymalizacji natrafi się na ograniczenie związane z siłami lub oporami skrawania, zmiana optymalnej, pod względem trwałości, geometrii ostrza na taką, która zwiększy obszar rozwiązań, stwarza tym większe możliwości poprawienia efektów ekonomiczno-produkcyjnych, im większy jest gradient funkcji celu w miejscu ograniczenia.

4. Podczas zmian optymalnej pod względem trwałości geometrii ostrza, mającej na celu przesunięcie ograniczeń, istnieje spowodowany tym taki stosunek skrócenia okresu trwałości do

zmniejszenia się sił skrawania, powyżej którego zmiany te stają się już nieopłacalne.

5. Jeżeli proces optymalizacji dynamicznej zatrzyma się na ograniczeniu brzegowym, to określenie funkcji celu wzdłuż linii ograniczeń, pozwala na bardziej dokładne określenie optymalnego stanu obiektu.

6. Zastosowanie zmodyfikowanej funkcji celu podczas określania optymalnych parametrów skrawania lub wyliczaniu spodziewanych kosztów czy wydajności toczenia, daje znacznie lepsze przybliżenie do wartości rzeczywistych niż tradycyjne zależności, nie uwzględniające losowego charakteru rozrzutu trwałości narzędzia.

7.1.2. Wnioski o charakterze utylitarnym

1. Typowe rozrzuty trwałości narzędzia spotykane w praktyce mogą spowodować wzrost kosztów toczenia zgrubnego od 5 do 64%, a toczenia wykończającego od 5 do 82%.

2. Wpływ rozrzutu trwałości narzędzia na wydajność toczenia jest znacznie mniejszy niż na koszty wytwarzania i powoduje odpowiednio dla obróbki zgrubnej obniżenie wydajności od 0,5 do 5,5%, a dla obróbki wykończającej od 1 do 9%.

3. Największe odchylenia funkcji kosztów i wydajności, spowodowane rozrzutem trwałości, występują w tych zakresach zmian parametrów skrawania, w których prowadzi się najczęściej obróbkę wykończającą i zgrubną.

4. Dla takich warunków obróbki, w których występują duże koszty narzędziowe przypadające na jeden okres trwałości oraz małe koszty pracy stanowiska i wynagrodzenia pracownika, należy liczyć się z silnym wpływem rozrzutu trwałości narzędzia na koszty toczenia. Wpływ pozostałych czynników występujących

w funkcji celu jest pomijalnie mały.

5. Wydajność toczenia najsilniej będzie zakłócana rozrzutem trwałości ostrza podczas obróbki przedmiotów o dużych rozmiarach /duże średnice i długości toczenia/, przy dużej liczbie sztuk w partii oraz w tych przypadkach, gdy czas wymiany narzędzia będzie długi. Pozostałe czynniki występujące w funkcji wydajności nie mają istotnego wpływu na wartość błędu jej określenia.

6. Zaproponowany algorytm optymalizacyjny jest łatwy do zastosowania w warunkach przemysłowych, ponieważ występujące w nim zależności funkcyjne mają prostą i logiczną budowę matematyczną. Stosunkowo zaś mały krok, z jakim należy się poruszać, aby osiągać coraz to korzystniejsze wartości optymalizowanej funkcji obiektu, zapobiega znacznemu przekroczeniu optymalnego punktu. Poza tym, wszystkie punkty doświadczalne, określone tak, aby dały się zrealizować w warunkach rzeczywistych obiektu badań.

7. Opracowana metodyka dynamicznego określania optymalnych parametrów skrawania okazała się efektywna w praktycznym zastosowaniu.

8. LITERATURA

=====

- [1] Arlt M., Fink H., Weiss D., Rationelle Gestaltung der Strategie zur Ermittlung optimaler technologischer Arbeitswerte, Fertigungstechnik und Betrieb, t.25, 1975, nr 2.
- [2] Banaś G., Optymalizacja wybranych parametrów dogładzania oscylacyjnego wałków stalowych pokrytych elektrolitycznie chromem twardym. Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1975.
- [3] Białek M., Dobór optymalnych parametrów skrawania na przykładzie toczenia wzdłużnego w obróbce jednonarzędziowej. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Seria Mechanika Nr 45, Warszawa 1977.
- [4] Boothroyd G., Rusek P., Wyznaczanie okresu trwałości narzędzia przy uwzględnieniu wymagań rentowności produkcji, Mechanik, 1975, nr 3.
- [5] Braun Y., Ekonomičeskaja stoikost' rezanija, Ekspres-Informacija. Režušcie Instrumenty, 1974, nr 19.
- [6] Breuninger F., Sadowy M., Einfache Optimierung der Schnittgeschwindigkeiten bei Dreharbeiten, TZf. prakt. Metallbearb., t.65, 1971, nr 9.
- [7] Buchman K., Jędrzejewski J., Kwaśny W., Potrykus J., Określenie warunków wzrostu stabilności termicznej tokarek serii TUR. Raport nr 463, Inst. Technol. Bud. Masz. P. Wr. Wrocław 1979.
- [8] Burmester H.J., Eine Strategie zur Ermittlung der kostengünstigsten Schnittdaten bei der spanenden Formung, TZf. prakt. Metallbearb., t.69, 1975, nr 2.
- [9] Burmester H.J., Spanende Formung mit optimierten Arbeitsbedingungen. TZ f. prakt. Metallbearb., t.67, 1973, nr 9.
- [10] Chaet G.L., Skibin V.V., Vysockij Ju.I., Sokraščennyj metod opredelenija stojkosti tverdosplavnych rezcov. Stanki i Instrument, 1971, nr 8.

- [11] Cichosz P., Dembiński B., Żebrowski H., Zastosowanie statystycznych metod planowania doświadczeń ekstremalnych i opracowania wyników na przykładzie badań z zakresu skrawania. Prace Naukowe Inst.Technol.Bud.Masz.P.Wr., nr 9, seria Konferencje nr 1, Wrocław 1975.
- [12] Colding B., Jacobson G., Zweckmässigkeit analytischer Standzeitdarstellungen für die Verfahrensoptimierung in der Spannungstechnik, Fertigungstechnik und Betrieb, t.26, 1976, nr 1.
- [13] Colding B., König W., Validity of the Taylor Equation in Metal Cutting, Annals of the CIRP, Vol.25/5, 1971.
- [14] Degenhardt U., Die Bedeutung des Werkzeugverschleisses im Hinblick auf eine Optimierung der Zerspanungsbedingungen. Industrie Anzeiger, t.90, 1968, nr 93.
- [15] Depiereux W.R., Neues Standzeitkriterium bei spanender Bearbeitung mit hohen Schnittbedingungen. Industrie Anzeiger, t.90, 1968, nr 101.
- [16] Dethoor J.M., Groboillot J.L., Trwałość urządzeń technicznych, WNT, Warszawa 1971.
- [17] Dmochowski J., Podstawy obróbki skrawaniem. PWN, Warszawa 1978.
- [18] Essel K., Hänsel W., Analyse der Standzeitgleichungen, Industrie-Anzeiger, t.94, 1972, nr 5.
- [19] Filipowski R., Dobór optymalnych parametrów skrawania dla tokarek uniwersalnych za pomocą EMC. Mechanik 1972, nr 4.
- [20] Fisher J., Hargreaves J., Sbor i ispolzowanie danych po režimam obrabotki rezaniem. Ekspres-informacija. Režušcie Instrumenty, 1975, nr 36.
- [21] Gerbach I.B., Kordonski CH.B., Modele niezawodnościowe obiektów technicznych, WNT, Warszawa 1968.
- [22] Goranskij G.K., K teorii avtomatizacii inženernogo truda. IAHBSSR, Minsk 1962.
- [23] Grzesiak K., Kołodziejski J., Netzel Z., Badania trwałościowe obiektów technicznych. WNT, Warszawa 1968.

- [24] Jacob E., Anwendung des Programms AUTOTECH-KOFA 2 zur maschinellen Optimierung der Arbeitswerte beim Schruppdrehen. Fertigungstechnik und Betrieb, t.25, 1975, nr 11.
- [25] Jacobs H.J., Grundlagen der maschinellen, externen Verfahrensoptimierung in der Abspantechnik. Fertigungstechnik und Betrieb, t.21, 1971, nr 2.
- [26] Jacobs H.J., Jacob E., Kochan D., Spannungsoptimierung. VEB Verlag Technik, Berlin 1977.
- [27] Jacobs H.J., Knörrich A., Spanform als technische Grenze bei der manuellen und maschinellen Optimierung des Abspanverfahrens Drehen mit Wendeschneidplatten. Fertigungstechnik und Betrieb, t.25, 1975, nr 12.
- [28] Kacew P.G., Kontrola narzędzi skrawających metodami statystycznymi, WNT, Warszawa 1978.
- [29] Kaczmarek J., Podstawy obróbki wiórowej, ściernej i erozyjnej. WNT, Warszawa 1970.
- [30] Kluge G., Optimale Schnittgeschwindigkeit und zulässiger Vorschub beim Schruppdrehen kurzer Rundteile. Abtrenntechnik, 1968, nr 12.
- [31] Kochan D., Nutzungsformen und Anwendungsgebiete von Optimierungsmodellen für die Abspantechnik. Annals of the CIRP Vol. 22/1, 1973.
- [32] Kochan D., Jacobs H.J., Automatische Festwert- und stetige Optimierung technologischer Arbeitsgrößen in der metallverarbeitenden Industrie. Fertigungstechnik und Betrieb, t.20, 1970, nr 10,11,12.
- [33] Kočergin A.I., Zadači voznikajuščie pri optimizaciji geometričeskich parametrov režuščich instrumentov i metody ich rešenija. PTM, Minsk 1972.
- [34] Korsakov V.S., Točnost mehaničeskoj obrabotki. GNTIML, Moskva 1961.
- [35] König W., Depiereux W.R., Wie lassen sich Vorschub und Schnittgeschwindigkeit optimieren? Industrie Anzeiger, t.91, 1969, nr 61.

- [36] Levickij M. Ja, Štompel V.P., Opredelenie na elektronnych cifrovych vyčislitel'nych mašinach režimov rezanija pri točenni. Technika, Kiev 1966.
- [37] Michelbach J., Statistik als Entscheidungshilfe in der Metallzerspanung TZ f.prakt.Metallbearbeitung, t.71, 1977, nr 4, t.72, 1978, nr 3 i nr 5.
- [38] Nalimow W.W., Czernowa N.A., Statystyczne metody planowania doświadczeń ekstremalnych. WNT, Warszawa 1967.
- [39] Nguyen Tien Dat., Bestimmung des maximalen Vorschubs beim Schruppdrehen. Fertigungstechnik und Betrieb, t.23, 1973, nr 12.
- [40] Osyczka A., Przegląd metod optymalizacji wielokryterialnej. Konferencja naukowa Optimos 78 nt. Podstawy optymalizacji procesów obróbki skrawaniem. Kraków czerwiec 1978.
- [41] Opitz H., Moderne Produktionstechnik. Verlag W.Girardet, Essen 1970.
- [42] Otto F., Hähnel W., Kombination von Optimier- und Grenzregelung mit automatischer Schnittaufteilung beim Drehen. Industrie Anzeiger, t.96, 1974, nr 6.
- [43] Pierwozwanski A.A., Metody szukania, WNT, Warszawa, 1974.
- [44] Polański Z., Metody optymalizacji w technologii maszyn. PWN, Warszawa 1977.
- [45] Rasch F.O., Rolstadås A., Selection of Optimum Feed and Speed in Finish Turning, Annals of the CIRP Vol.25/5, 1971.
- [46] Ravignani G.L., Graphisches Verfahren zur Ermittlung optimaler Schnittbedingungen, Industrie-Anzeiger, t.93, 1971, nr 15.
- [47] Ravignani G.L., Optimierung von Abspanverfahren mit vorgegebenen Grenzen, Werkstattstechnik, t.65, 1975, nr 5.
- [48] Sirotin A.A., Lebeder A.S., Optimizacija processa rezanija pri tokarnoj obrabotke, Stanki i instrument, 1973, nr 11.
- [49] Storch B., Streubel A., Siłomierz tensometryczny do pomiarów oporów w toczeniu. Raport nr 280. Inst.Technol.Bud.Masz. P.Wr., Wrocław 1975.

- [50] Szor J.B., Koźmin F.I., Ocena niezawodności urządzeń. Tablice. WNT, Warszawa 1970.
- [51] Tymowski J., Technologia Budowy Maszyn. WNT, Warszawa 1970.
- [52] Wawrzynek J., Planowanie doświadczeń dla zagadnień regresji. IV Kurs zastosowań matematyki. Inst. Matematyczny PAN. Wrocław 1976/77.
- [53] Weber H., Schuster R., Aspekte zur Optimierung des Bearbeitungsprozesses bei spanenden Verfahren, Fertigungstechnik und Betrieb, t.25, 1975, nr 4.
- [54] Weiss Z., Weiss E., Eine Methode zur Optimierung der Bearbeitungsparameter in der Fertigungstechnik, ZwF., t.70, 1975, nr 2.
- [55] Weiss E., Wybrane zagadnienia wpływu warunków dogładzania na jakość warstwy wierzchniej na przykładzie bieżni pierścieni łożysk tocznych. Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1971.
- [56] Wrotny L.T., Podstawy Konstrukcji obrabiarek. WNT, Warszawa 1973.
- [57] Zeile H., Michelbach J., Rechenbeispiel zur Ökonomischen Optimalität des Metallzerspanens, ZwF, t.70, 1975, nr 7.
- [58] Ziętarski S., Pytkowski J., Doświadczalne wdrożenie w zakładach mechanicznych "Ursus" optymalizacji parametrów skrawania za pomocą komputerów dla obróbki - toczenie wzdłużne, TEKOMA, P 592, Warszawa 1976.

Wykaz odbiorców

Ilość egz.

1. Biblioteka i Ośrodek Informacji Naukowo-Technicznej Instytutu Technologii Budowy Maszyn Politechniki Wrocławskiej	1
2. Biblioteka Główna Politechniki Wrocławskiej	1
3. Promotor	1
4. Recenzenci	2
5. Autor	1

	6

		* N * MNSZWTTCN 12.13	
1075 4479		I 24 23.11.000 02	
I 24/P-069/79 *			
Symbol UKB 621.941	toczenie	79:Inst.Technol. Bud.Masz. PWr MNSZWT pol.	
Opis bibliograficzny			
Cichosz Piotr			
Metodyka dynamicznej optymalizacji parametrów skrawania w toczeniu wzdłużnym.			
Raporty Inst.Technol.Bud.Masz.PWr 1979 ser. PRE nr 69			
107 s. 28 rys. 9 tabl. bibliogr.58 poz. /maszyn.powiel./			
Rozprawa doktorska Politechnika Wrocławska Instytut Technologii Budowy Maszyn Wrocław Promotor: doc. dr inż. Henryk Żebrowski			
Charakter pracy: stosowana		Rozpowszechnienie do użytku	
Materiały odpłatne CB		służb.	

Analiza dokumentacyjna

(1) Opracowano metodykę dynamicznego określania optymalnych parametrów skrawania w toczeniu wzdłużnym z uwzględnieniem zakłóceń losowych trwałości narzędzia. Przeprowadzono analizę możliwości polepszenia efektów ekonomiczno-produkcyjnych toczenia, również w tych wypadkach, gdy przesuwanie ograniczeń obszaru rozwiązań powoduje skrócenie okresu trwałości narzędzia. Praca ma charakter analityczno-doświadczalny. Stwierdzono, że rozrzuty trwałości ostrzy narzędzi znacznie wpływają na przebiegi funkcji celu. Funkcje celu, z uwagi na koszty i wydajność skrawania, zmodyfikowano uwzględniając w nich wpływ rozrzutu trwałości narzędzia. Wykazano, że istnieje możliwość polepszenia efektów ekonomiczno-produkcyjnych toczenia przez przesuwanie linii ograniczeń, również wtedy, gdy przesuwanie tych linii powoduje skrócenie trwałości ostrza, a gradient funkcji celu ma niewielką wartość.

Imię i Nazwisko autora analizy

Piotr Cichosz

Słowa kluczowe

<S- toczenie, optymalizacja, trwałość ostrzy, rozrzut trwałości, metodyka.

**0480 * 00* 064246

<A _____ *B _____ *C _____ *D _____
 *E _____ *F _____ *G _____ *H _____

WPS	CINTE	APW	Podpis red.	Podpis asyst. d/s badań	Potwierdzenie przyjęcia poprawki.	Potwierdzenie przyjęcia karty w Oddziale Dokumentacji.
nie	tak	tak	<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>		
Wpisać TAK lub NIE						