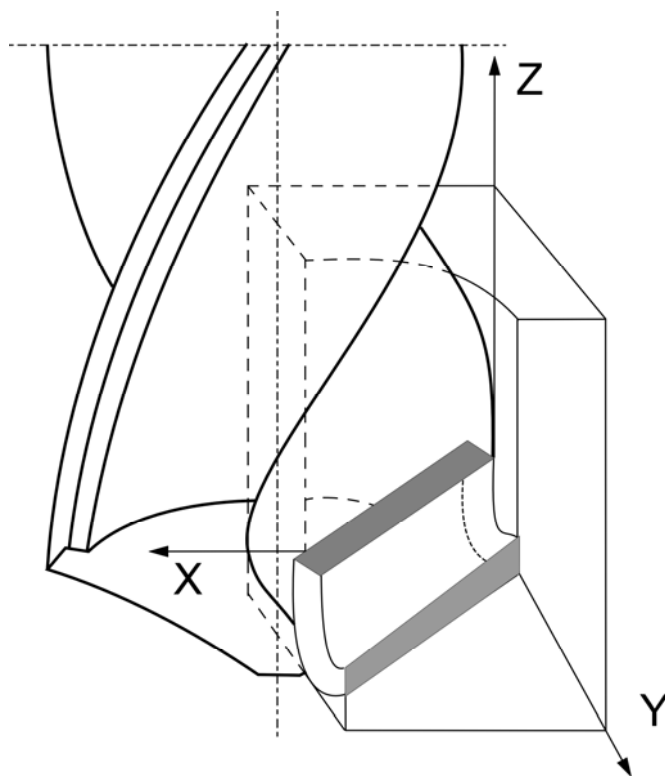


Borys STORCH

Podstawy

OBRÓBKI SKRAWANIEM



Koszalin

SPIS TREŚCI

1. Wiadomości ogólne.....	7
1.1. Wstęp.....	7
1.2. Podział i określenie obróbki ubytkowej	8
1.3. Narzędzia.....	13
1.3.1. Geometria części roboczej narzędzi skrawających.....	17
1.3.1.1. Rola i znaczenie kątów ostrza w procesie skrawania	33
1.3.2. Materiały narzędziowe.....	38
1.3.2.1. Stale narzędziowe węglowe.....	39
1.3.2.2. Stale narzędziowe stopowe.....	40
1.3.2.3. Stale szybko tnące.....	41
1.3.2.4. Spieki twarde	45
1.3.2.5. Materiały pokrywane twardymi warstwami.....	46
1.3.2.6. Materiały ceramiczne i cermetale	47
1.3.2.7. Materiały supertwarde	49
1.3.2.8. Materiały kompozytowe	51
1.3.2.9. Ogólne zasady doboru materiałów narzędziowych	51
1.4. Obrabiarki i ich rola w procesie skrawania	54
1.5. Znaczenie układu OUPN.....	59
1.5.1. Układ obrabiarka – uchwyt – przedmiot – narzędzie	59
1.5.2. Czynniki wejściowe i wyjściowe w obróbce skrawaniem.....	70
1.6. Odmiany skrawania	73
1.6.1. Struganie i dłutowanie	73
1.6.2. Toczenie.....	74
1.6.3. Wiercenie – obróbka otworów	75
1.6.4. Frezowanie.....	77
1.6.5. Przeciąganie.....	80
2. Wiadomości o oddzielaniu materiału	81
2.1. Formowanie wiórów.....	84
2.1.1. Wiór i spęczanie	92
2.1.1.1. Postaci wiórów.....	92
2.1.1.2. Współczynnik spęczenia.....	95
2.2. Siły i moc skrawania	96
2.3. Ciepło skrawania	103
2.4. Zjawisko narostu	110
2.5. Zużycie i trwałość ostrza	116
2.5.1. Model zużycia pomocniczej powierzchni przyłożenia	116
2.6. Płyny obróbkowe – chłodzące i smarujące.....	127
2.6.1. Ciecze obróbkowe olejowe.....	129
2.6.2. Emulsyjne ciecze obróbkowe	130
2.6.3. Wodorozcieńczalne ciecze obróbkowe.....	131
2.6.4. Lotne środki obróbkowe	132
2.7. Zjawiska przykrawędziowe	135

2.7.1. Skrawanie prostokątne – model skrawania.....	135
2.7.1.1. Model sił w strefie skrawania swobodnego	142
2.7.1.2. Rozkład naprężeń i przemieszczeń w materiale obrabianym.....	145
2.7.2. Skrawanie nieswobodne. Model skrawania.....	151
2.7.2.1. Rozkład sił na narożu ostrza	155
2.7.2.2. Tworzenie nierówności powierzchni obrobionej.....	158
3. Charakterystyka warstwy wierzchniej.....	165
3.1. Charakterystyka chropowatości 2D.....	166
3.2. Charakterystyka stereometryczna 3D.....	167
4. Dobór warunków skrawania	168
4.1. Ogólne zasady i tok doboru warunków obróbki.....	168
4.2. Optymalizacja z uwagi na największą wydajność.....	173
4.3. Optymalizacja z uwagi na trwałość ekonomiczną.....	176
5. Spis literatury	180

Słowa kluczowe:

obróbka skrawaniem – materiały
narzędziowe – sztywność OUPN
– podstawy formowania wiórów
– zjawiska fizyczne – zużycie
ostrza – WW – chropowatość
powierzchni obrobionej

1. Wiadomości ogólne

Skrypt poświęcony jest obróbce wiórowej. W kolejnych częściach omówione są tematy, które stanowią treści wykładów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej.

Na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn realizowane są zajęcia z przedmiotu Techniki Wytwarzania w różnej liczbie godzin w zależności od specjalności. Treści programowe wykładów różnią się uwzględniając specyfikę specjalności.

1.1. Wstęp

Rozdział pierwszy poświęcony jest wprowadzeniu i zdefiniowaniu pojęć stosowanych w obróbce skrawaniem, którymi są: budowa i stereometria ostrza, materiały narzędziowe, znaczenie układu OUPN, odmiany skrawania.

W rozdziale drugim przedstawiono podstawy formowania wiórów oraz zjawisk towarzyszących skrawaniu, zwłaszcza siły i temperatury skrawania, narostu oraz mechaniki tworzenia powierzchni obrobionej poszerzonej o zagadnienia dotyczące:

- rozkładu sił jednostkowych stycznych i normalnych do powierzchni zaokrąglenia krawędzi skrawającej w przekroju normalnym,
- rozkładu sił jednostkowych wzdłuż krawędzi skrawającej, gdy naroże ostrza wykonane jest jako wycinek walca o promieniu r_E ,
- rozkładu naprężeń i przemieszczeń w strefie skrawania swobodnego.
- przebiegu zużywania się powierzchni roboczych ostrza,
- chropowatości powierzchni obrobionej ostrzem „ostрым” i o wyraźnych śladach zużycia.

W trzeciej części przedstawiono opis warstwy wierzchniej dla charakterystyki z jednego przekroju oraz trójwymiarowej. W kolejnej czwartej części skryptu omówiono podstawy optymalizacji z uwagi na największą wydajność i trwałość ekonomiczną narzędzia.

1.2. Podział i określenie obróbki ubytkowej

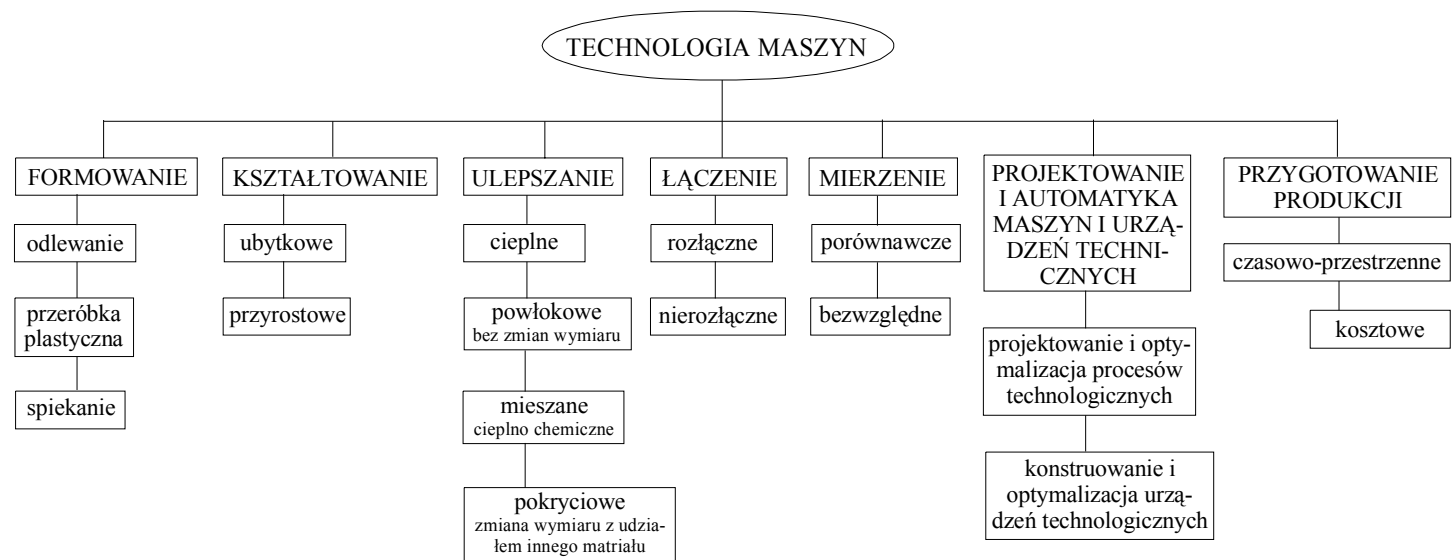
Technologia maszyn jest nauką o wytwarzaniu wyrobów z materiału wyjściowego, a jej zadanie polega na badaniu środków i procesów produkcji oraz ich optymalizacji. Jest dyscypliną młodą, choć związaną z bardzo starą działalnością ludzką. Podlega nieustannemu rozwojowi, tworząc podstawy teoretyczne dla technik wytwarzania, które są praktyczną jej realizacją. Na rys.1.1. przedstawiono 7 zagadnień wchodzących w skład Technologii Maszyn.

Ogólnie biorąc nadanie kształtu wyrobowi uzyskiwane jest przez technologie:

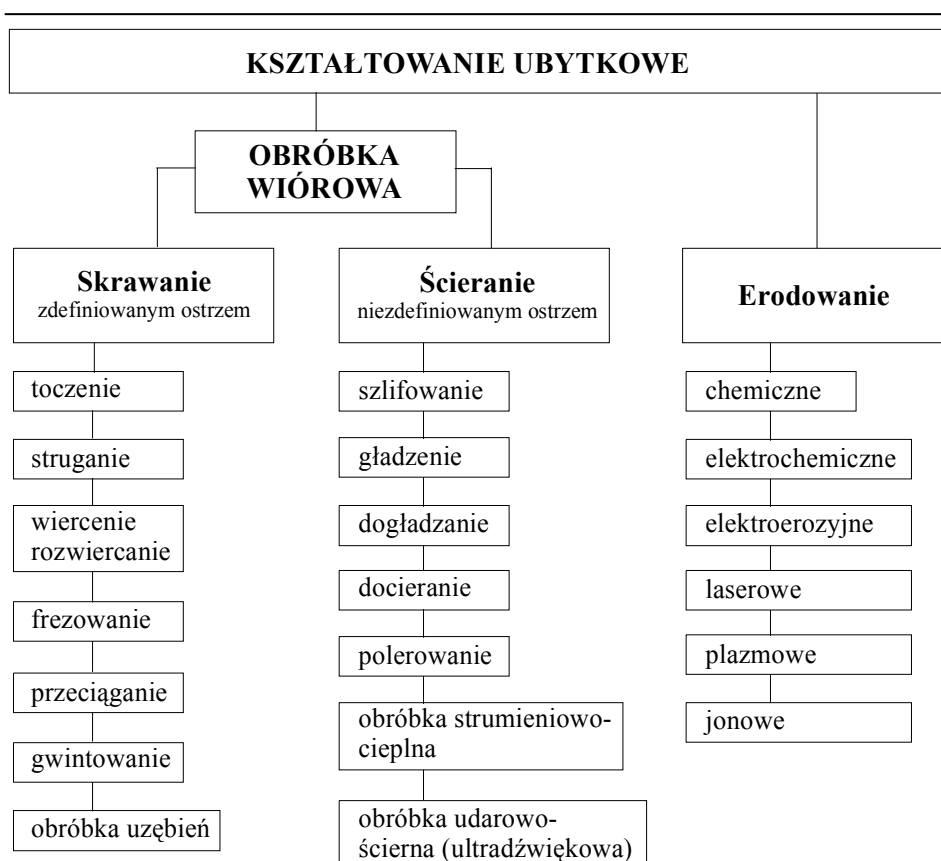
- **formujące** – przez odkształcenie materiału bez zmian objętości,
- **kształtujące przez przyrost materiału** – polegają na dodawaniu materiału,
- **kształtujące przez ubytek materiału** – polegają na stopniowym usuwaniu nadmiaru materiału, z przyjętej wstępnie jego większej ilości, zarówno sposobami skrawania, ścierania lub erodowania (rys.1.2.).

Obróbka wiórowa zdefiniowana jest jako: usuwanie w postaci wiórów, określonej objętości materiału, w celu otrzymania przedmiotu o zadanym wymiarze i kształcie oraz stereometrycznych i mechanicznych właściwościach warstwy wierzchniej przedmiotu z wykorzystaniem energii mechanicznej. W tej definicji mieści się pojęcie skrawania jako sposobu obróbki pojedynczym lub wieloma ostrzami o zdefiniowanej geometrii takich jak: toczenie, struganie, cięcie, wiercenie, rozwiercanie, frezowanie, przeciąganie, gwintowanie i obróbka kół zębatach.

Sposoby obróbki narzędziami z praktycznie niepoliczalną liczbą ostrzy i niezdefiniowaną ich geometrią jak: szlifowanie, gładzenie, dogładzanie, docieranie, polerowanie, strumieniowo – ścierna, udarowo – ścierna (zwana ultradźwiękową), nazwano ściernymi. Jest to dziedzina obróbki ubytkowej o znaczącym rozwoju w ostatnim dziesięcioleciu. Dotyczy to coraz powszechniej stosowanego diamentu technicznego oraz wynalezienia nowoczesnych, trwalszych, materiałów narzędziowych, umożliwiających obróbkę z wysokimi prędkościami (powyżej 60 m/s).

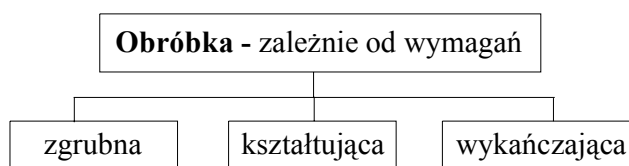


Rys.1.1. Podział w technologii maszyn



Rys.1.2. Podział obróbki ubytkowej

Każdy z rodzajów obróbki skrawaniem, w zależności od poziomu wymagań jej jakości, można określić jako zgrubny, kształtujący czy wykańczający (rys.1.3.) Wymusza to zastosowanie odpowiednich przyrządów, obrabiarek, narzędzi i organizacji procesu technologicznego.

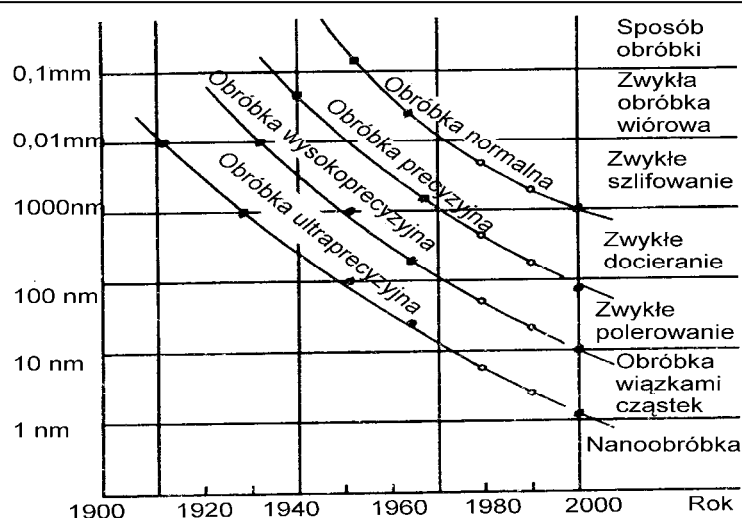


Rys.1.3. Podział w rodzajach kształtowania

Rola obróbki wykańczającej, zgodnie z przewidywaniami, ustawicznie wzrasta. Wprowadzanie coraz doskonalszych materiałów narzędziowych powoduje, że toczenie jest często wykańczającą operacją w procesie technologicznym bez potrzeby szlifowania. Brak jest jednak jednoznacznej definicji obróbki wykańczającej z punktu widzenia mechaniki i teorii skrawania. W literaturze [16], podkreślono, że „obróbki wykańczającej nie można zatem utożsamiać z tymi sposobami i odmianami obróbki skrawaniem, które umożliwiają otrzymanie wysokiej gładkości powierzchni obrobionych, gdyż w zasadzie każdy ze znanych sposobów obróbki skrawaniem może być w zależności od potrzeb zastosowany do wykończenia przedmiotu”. Brak jest w literaturze polskiej podobnego potraktowania zagadnienia obróbki wykańczającej jak na przykład ujmowała to norma TGL 0–140, która podawała następującą definicję:

„...toczeniem wykańczającym jest skrawanie o geometrycznie określonej formie ostrza, służące do poprawienia kształtu, wymiaru, położenia i powierzchni wstępnie obrobionego przedmiotu, przy czym należy dobrać odpowiednio posuw, prędkość skrawania, promień naroża ostrza r_e oraz materiał narzędzia tak, aby wysokość nierówności mieściła się w dopuszczalnym przedziale R_z od 10 do $40\mu m$ ”.

Każdy z rodzajów kształtowania inaczej wpływa na koszt wykonania przedmiotu. Procentowy wzrost kosztów, spowodowany wzrostem dokładności wymiarowej ma najczęściej charakter nieliniowy. Postęp techniczny powoduje, że dokładność wykonania przesuwa się (przy tych samych kosztach) do coraz mniejszych wartości wymiarowych. Dzisiaj mówi się o nanotechnologii i wyróżnia się ją jako odmianę wykonania przedmiotów z dokładnością do nanometrów w mechanice precyzyjnej. Gdy analizuje się uzyskiwane dokładności wyrobu, to widoczna jest ewolucja dotycząca zakresu pojęciowego stosowanych nazw. Przykładowo przez okres 100 lat zakres dokładności obróbki ultraprecyzyjnej przesunął się od; około 0.01mm charakterystycznej dla początku wieku do 1 nm na jego koniec (rys.1.4.).















Rys.1.4. Wzrost dokładności obróbki

Metody obróbki erozyjnej – erodowanie – zaliczane są do kształtowania ubytkowego, jednak różnią się od skrawania rodzajem wykorzystywanej energii – elektrycznej i postacią oddzielonego materiału. Zamiast wiórów jak to ma miejsce w skrawaniu, powstają produkty topienia i odparowania materiału obrabianego w temperaturze 10000K. Poszczególne jej odmiany znalazły bardzo konkretne zastosowania. Dotyczy to szczególnie obróbki materiałów konstrukcyjnych, których nie można obrobić skrawaniem czy ścieraniem, na przykład trudno obrabialnych takich jak: kompozytowych, spieków twardych, spieków ceramicznych albo stali austenitycznych. Istotną zaletą jest brak obciążenia układu obrabiarki siłami mechanicznymi. Sprzyja to uzyskiwaniu dobrej dokładności. Wadą jest znaczne, w porównaniu z obróbką wiórową, zużycie energii elektrycznej na jednostkę objętości usuniętego materiału.

Stosowany jest także podział obróbki z uwagi na kinematykę podstawowych ruchów, niezbędnych do oddzielenia warstwy materiału, które są określone jako (tabela1.):

Tabela 1. Odmiany skrawania z uwagi na wykonywane ruchy

Ruch narzędzia \ Ruch przedmiotu				
	brak możliwości wykonywania pracy			struganie wzdłużne
			frezowanie obwiedniowe	frezowanie
	wiercenie, pogłębianie, rozwiercanie, obtaczanie	frezowanie, gwintów, ślimaków	frezowanie kół zębatych	
	przeciąganie, struganie	toczenie zwykłe i na karuzelówce		

 spoczynek
  ruch prostoliniowy
  ruch obrotowy
  ruch sprzężony

- **główny** – jest to ten z ruchów (narzędzia lub przedmiotu), który pozwala na zaistnienie procesu oddzielania, podawany w jednostkach m/min lub m/s. Ma charakter jednorazowy i zanika, jeśli nie zostanie wykonany jakikolwiek dodatkowy ruch,
- **posuwowy** – ruch (narzędzia lub przedmiotu), który służy do podtrzymania procesu skrawania i podawany jest w mm/obr lub w mm/skok.

W tabeli 1, pokazano podział na odmiany skrawania z uwagi na wykonywane ruchy. Widoczne jest, że niektóre skojarzenia ruchów, przedmiotu i narzędzia, nie dają możliwości tworzenia wiórów. W tabeli brak także bardziej złożonych ruchów charakterystycznych dla obróbki kół zębatych, na przykład takich, które występują podczas przeciągania kół zębatych.

1.3. Narzędzia

Podstawowymi elementami konstrukcyjnymi narzędzia są części zwane:

1. chwytową,
2. roboczą,
3. łączącą.

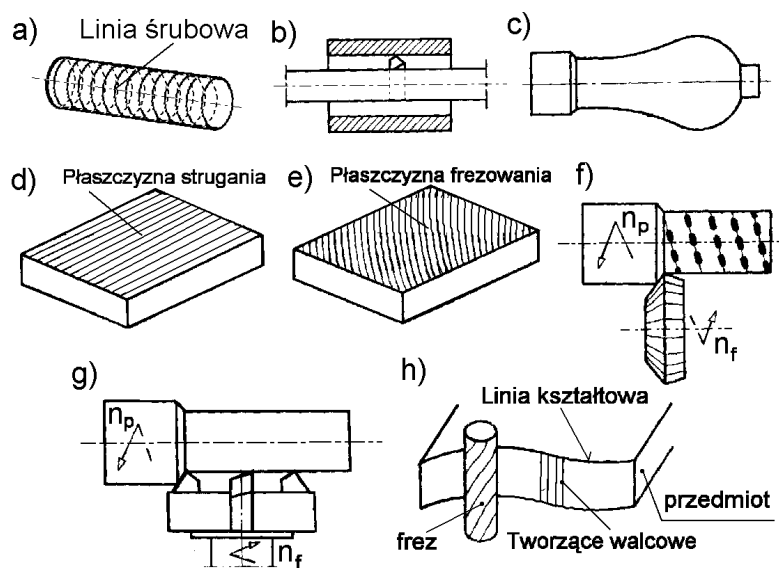
Część chwytowa służy do ustalania położenia krawędzi skrawającej oraz do mocowania narzędzia w celu przeniesienia przez nie obciążenia momentem lub siłami skrawania. Części chwytowe mają różne kształty. Mogą to być powierzchnie walcowe zewnętrzne (wierćła), wewnętrzne (otwory we frezach tarczowych), stożkowe zewnętrzne (frezy trzpieniowe), wewnętrzne (rozwiertaki) lub kształty wieloboków; najczęściej kwadratów, prostokątów.

Część robocza obejmuje elementy konstrukcyjne związane bezpośrednio z pracą narzędzia, a więc skrawaniem i wykańczaniem obrabianej powierzchni oraz prowadzeniem narzędzia w stosunku do przedmiotu lub przyrządu obróbkowego.

Część skrawająca, fragment części roboczej wykonującej proces skrawania, składa się z jednego lub większej liczby ostrzy skrawających, których odpowiednie powierzchnie stykają się w czasie skrawania albo z powstającym wiórem albo z powstającą powierzchnią na przedmiocie.

W obróbce wiórowej wyróżnia się trzy umowne metody tworzenia powierzchni przedmiotu:

- **punktową**, kształt obrobionej powierzchni jest zbiorem linii będących torem ruchu jednego lub kilku naroży względem przedmiotu (rys.1.5.)
- **kształtową**, powierzchnia obrobiona powstaje w wyniku współdziałania toru ruchu narzędzia (zwykle prostego) i kształtu (zarysu) krawędzi skrawającej (rys.1.6.),
- **obwiedniową**, złożone, kinematyczne zazębienie – przedmiotu i narzędzia z wieloma krawędziami skrawającymi. Powstająca powierzchnia jest obwiednią złożonego kształtu i trajektorii ruchu krawędzi skrawających (rys.1.7.).



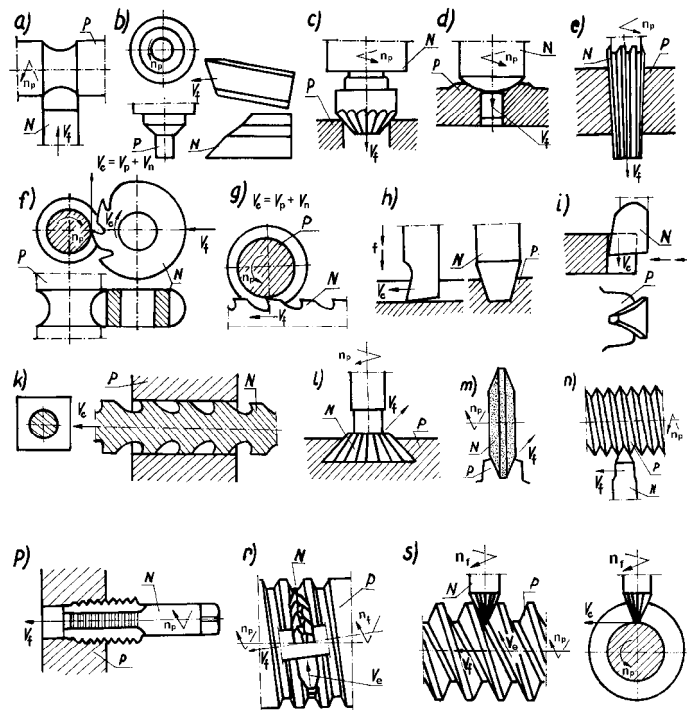
Rys.1.5. Przykłady obróbki metodą punktową

Przedstawione przykłady na rys.1.5. a) toczenia wzdłużnego zewnętrznego, b) toczenia wzdłużnego wewnętrznego, c) toczenia kopiowego, d) strugania płaszczyzn, e) frezowania płaszczyzn, f) frezowania obwodowego, g)

frezowania czołowego h) frezowania kopiowego, wskazują, że możliwości obróbki dotyczą powierzchni obrotowych, walcowych oraz o niekołowych przekrojach i innych.

Na kolejnym rysunku (rys.1.6.) zilustrowano przykłady powierzchni otrzymanych metodą kształtową. Zastosowane metody kształtowe pozwalają wykonać powierzchnie: 1) obrotowe (od a do g), 2) walcowe (od h do m), 3) śrubowe (od n do s). Podziały dokonywane są przede wszystkim według zasady wskazującej na złożoność kształtu narzędzia. Frez obwodowy z ostrzami prostymi, nie jest narzędziem kształtowym w odróżnieniu od noża do gwintu – zaliczanego do takich narzędzi.

Metodami obwiedniowymi wykonuje się w głównej mierze powierzchnie o zarysie walcowym i śrubowym. Dodatkowa grupa przedmiotów obrabianych metodami obwiedniowymi obejmuje te o kształcie kół zębatych stożkowych, ślimacznic. Na rys.1.7. zebrano przykłady obróbki obwiedniowej.



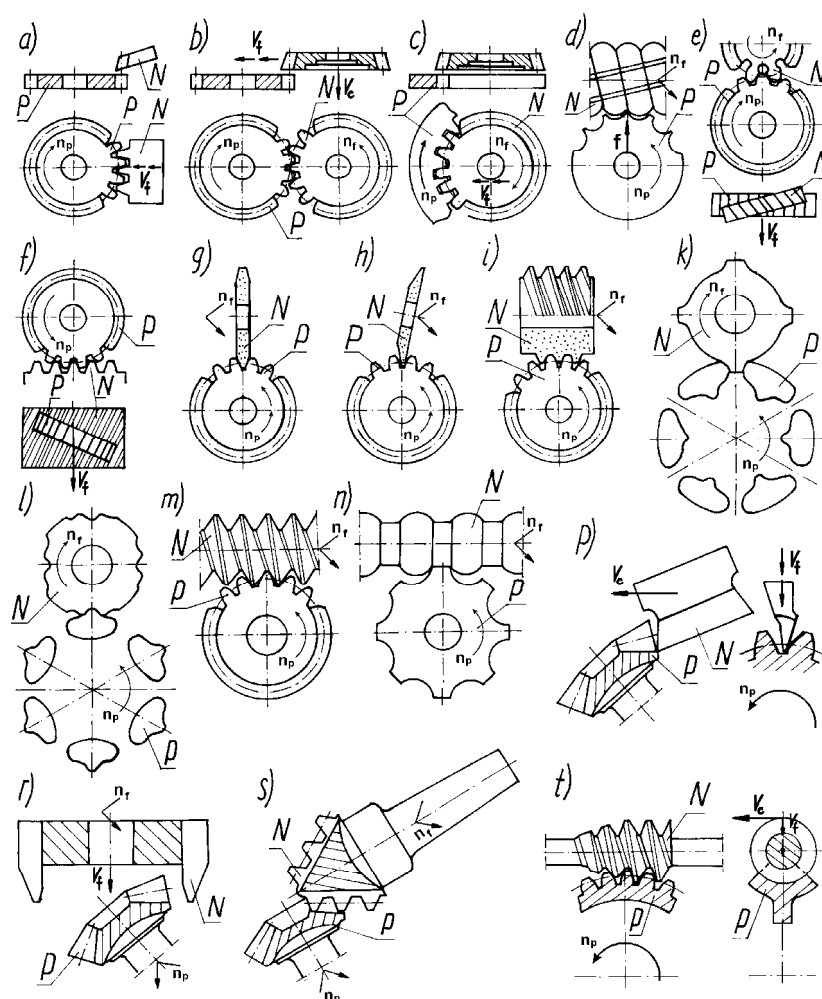
Rys.1.6. Przykłady obróbki kształtowej
p – przedmiot, N – narzędzie

W narzędziach kształtowych oraz do obróbki obwiedniowej zarysy krawędzi skrawającej są zazwyczaj krzywoliniowe. Wykonanie takich zarysów wymaga odpowiedniego wymiarowania. W miejsce dokładnych rozkładów pól tolerancji

uwzględniających złożoność kształtu i kinematykę przyjmuje się w obliczeniach zarysy zastępcze. Dla dużej tolerancji krzywoliniowego zarysu przedmiotu możliwe jest jego wykonanie za pomocą prostoliniowej krawędzi skrawającej. W istocie upraszcza to wykonanie narzędzi wymaga jednak zmniejszenia tolerancji wykonania narzędzia.

W literaturze wyróżniono dziewięć przypadków obróbki obwiedniowej, z uwagi na kształt elementów współpracujących: (rys.1.7.)

1. powierzchni walcowej z zębatką a) typu Maaga, b) c) Fellowsa,
2. powierzchni śrubowej z zębatką f), g), h),
3. powierzchni walcowych o osiach równoległych i prostopadłych b), c), k), l), m),
4. powierzchni śrubowych o osiach równoległych, jak w 3 ale dodatkowy ruch śrubowy narzędzia,
5. powierzchni walcowej i powierzchni śrubowej ale osie skrzyżowane,
6. powierzchni śrubowych o osiach skośnych d), e), i),
7. ślimaka z ostrzami na linii śrubowej ze ślimacznicą t),
8. ślimaka z ostrzami na powierzchni obrotowej ze ślimacznicą n),
9. koła stożkowego z pierścieniową zębatką: p) metoda Bilgrama, r) Gleasona, s) Klingelnberga.



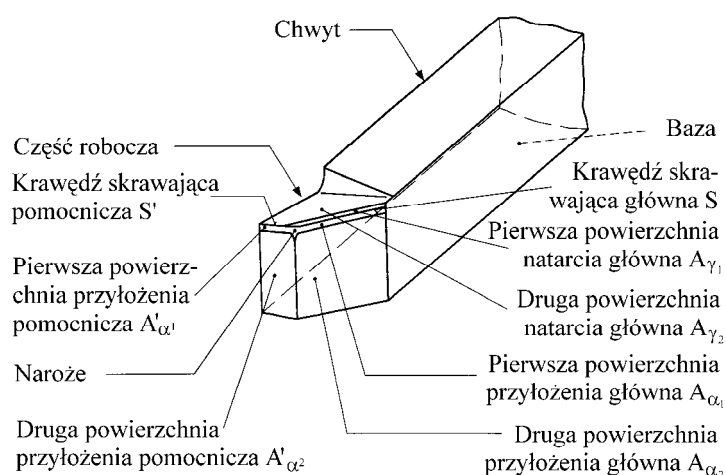
Rys.1.7. Przykłady obróbki obwiedniowej
P – przedmiot, N – narzędzie

1.3.1. Geometria części roboczej narzędzi skrawających

Stosowane nazwy krawędzi i powierzchni w narzędziach skrawających pokazano na przykładzie noża tokarskiego (rys.1.8.).

Powierzchnię (lub powierzchnie), po których sływa wiór nazwano **natarcia** A_γ , oraz powierzchnię (lub powierzchnie), nad którą przechodzi powierzchnia ukształtowana na przedmiocie obrabianym nosi nazwę – **przyłożenia** A_α .

Powierzchnia przyłożenia pomocnicza A'_{α} styka się z powierzchnią obrobioną. Wyróżnia się główną krawędź skrawającą S w miejscu przecięcia pierwszej powierzchni natarcia A_{γ} z pierwszą powierzchnią przyłożenia A_{α} . W miejscu przecięcia powierzchni natarcia z pierwszą pomocniczą powierzchnią przyłożenia A'_{α} powstaje pomocnicza krawędź skrawająca S' .



Rys.1.8. Krawędzie skrawające i powierzchnie części roboczej

Dla ujednolicenia opisu postaci narzędzi, w PN – 92/M – 01002/01 [48], przedstawiono zasady wymiarowania i kształtowania bryły ostrza narzędzi skrawających z uwzględnieniem przewidywanej jego pracy. Norma ta definiuje geometrię ostrza w dwóch układach odniesienia:

narzędzia (rys.1.9.) – przeznaczony do określenia geometrii narzędzia dla jego wykonania i sprawdzenia, wyznaczający geometrię ostrza narzędzia traktowanego jako bryła geometryczna, jednak z uwzględnieniem przewidywanej jego pracy, zaś płaszczyzny (oznaczane dużą literą P uzupełniane indeksem) układu wymiarowania orientuje się biorąc pod uwagę elementy bazowe narzędzia stosowane do ich wykonania takie na przykład, jak: oś dla narzędzi obrotowych lub podstawa mocowania dla narzędzi z uchwytem o przekroju wieloboku (rys.1.9. i rys.1.10.). Płaszczyzna podstawowa P_r , dla noża tokarskiego, przechodzi przez rozpatrywany punkt na krawędzi skrawającej równoległe do bazy noża i prostopadłe do kierunku ruchu głównego. Płaszczyzna krawędzi skrawającej P_s jest styczna do krawędzi skrawającej w rozpatrywanym

punkcie krawędzi i prostopadła do płaszczyzny podstawowej P_r . Płaszczyzna ortogonalna P_o przechodzi przez rozpatrywany punkt krawędzi skrawającej i jest prostopadła do płaszczyzn P_r i P_s . Płaszczyzna normalna P_n jest prostopadła do krawędzi skrawającej w rozpatrywanym punkcie tej krawędzi. Płaszczyzna boczna P_f przechodzi przez rozpatrywany punkt krawędzi skrawającej prostopadle do płaszczyzny podstawowej P_r i równoległe do zamierzonego kierunku ruchu posuwowego. Płaszczyzna tylna P_p w rozpatrywanym punkcie krawędzi skrawającej jest prostopadła do płaszczyzn P_r i P_f .

roboczym (rys.1.10.) – rozpatrującym geometrię ostrza narzędzia w warunkach skrawania. Płaszczyzny układu roboczego orientuje się biorąc pod uwagę kierunek wypadkowego ruchu względnego pomiędzy narzędziem a przedmiotem, w rozpatrywanym punkcie krawędzi skrawającej. W przypadku gdy prędkość ruchu posuwowego v_f jest nieznaczna w stosunku do prędkości ruchu głównego v_c , układ roboczy może być zastąpiony układem ustawienia, co prowadzi do istotnych uproszczeń obliczeniowych. Na rys.1.10. a i b przedstawiono geometrię ostrza w układzie roboczym. Z uwagi na przejrzystość ilustracji płaszczyzn na rysunku a) pokazano płaszczyzny boczną P_{fe} i tylną P_{pe} . Na drugiej części rys.1.10. przedstawiono położenia płaszczyzn P_{se} krawędzi skrawającej, P_{ne} normalnej i ortogonalnej P_{oe} .

Kąty w układzie narzędzia dla noża tokarskiego ilustruje rys.1.11. natomiast w układzie roboczym rys.1.12.

Układ ustawienia stosowany jest dla powiązania, układu narzędzia (wykorzystywanego do określania kątów narzędzia poruszającego się stosownie do zmiany położenia narzędzia względem obrabiarki) z układem roboczym (wykorzystywanym do wyznaczenia kątów roboczych uwzględniającym zmiany kierunku ruchu wypadkowego). Układ ustawienia nie obraca się wraz ze zmianą położenia narzędzia wzdłuż drogi skrawania ani zmianą kierunku ruchu wypadkowego (rys.1.13.).

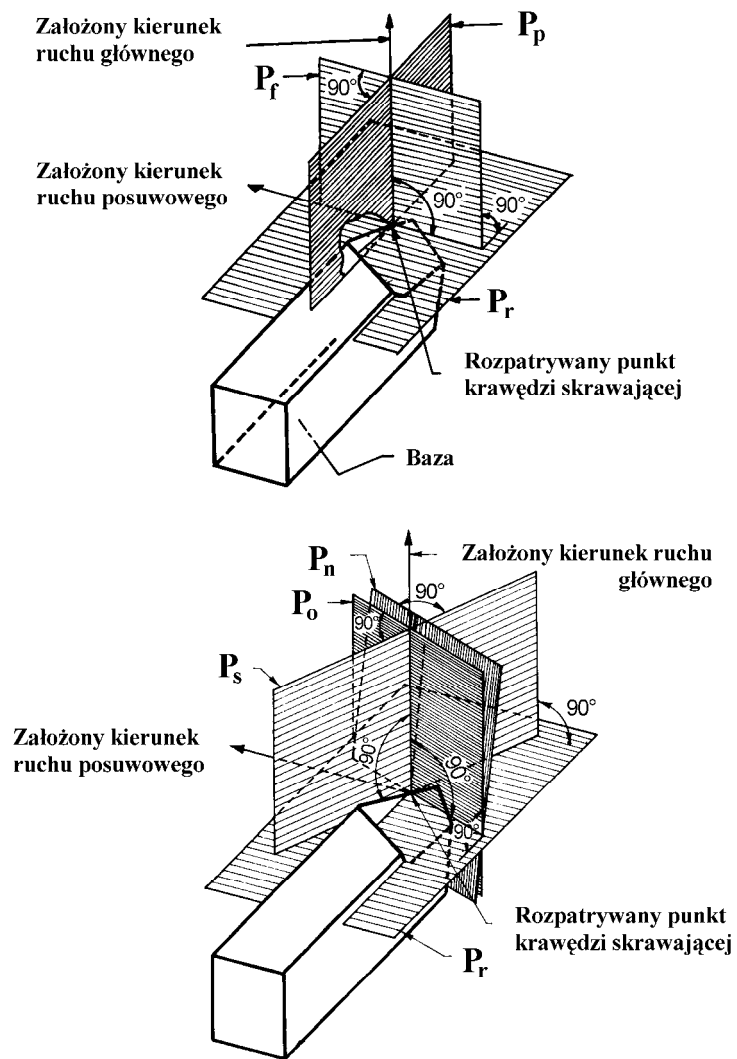
W PN zebrano zależności między kątami w układzie narzędzia, które ilustruje tabela 2.

Wzajemne związki układu ustawienia i:

- **układu narzędzia** – polegają na opisie położenia narzędzia po zamocowaniu na obrabiarce,

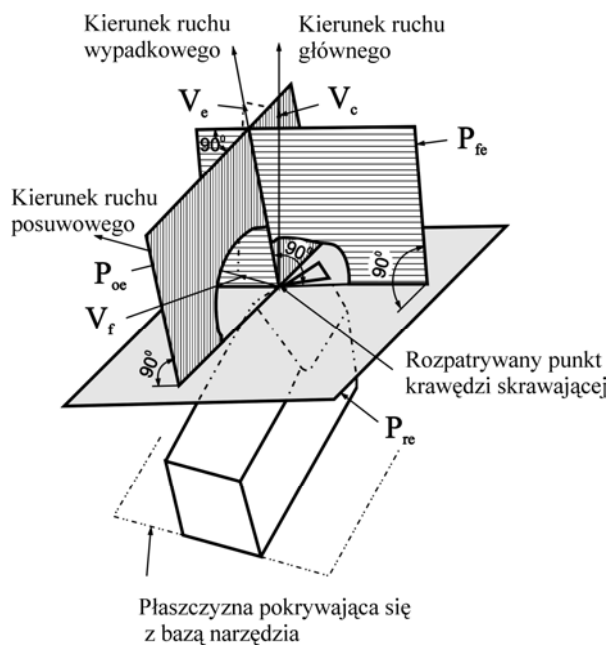
- **układu roboczego** – polegają na opisie rzeczywistej geometrii ostrza w ruchu narzędzia względem przedmiotu obrabianego.

Ogólnie mówiąc, stosuje się go celem określenia zmienności kątów ostrza wzdłuż krawędzi skrawającej w odniesieniu do punktu na powierzchni przedmiotu obrabianego. Płaszczyzny układu ustawienia (rys.1.13.) orientuje się w stosunku do kierunków ruchu głównego v_c i posuwowego v_f . Przy pokrywaniu się kierunków ruchów rzeczywistych z kierunkami przyjętymi przy definiowaniu układu narzędzia, obydwa układy zarówno narzędzia jak i ustawienia pokrywają się. Przesunięcie ostrza z osi obrabianego przedmiotu lub jego skręcanie powoduje zmianę kątów w układzie ustawienia (rys.1.13. a, b).

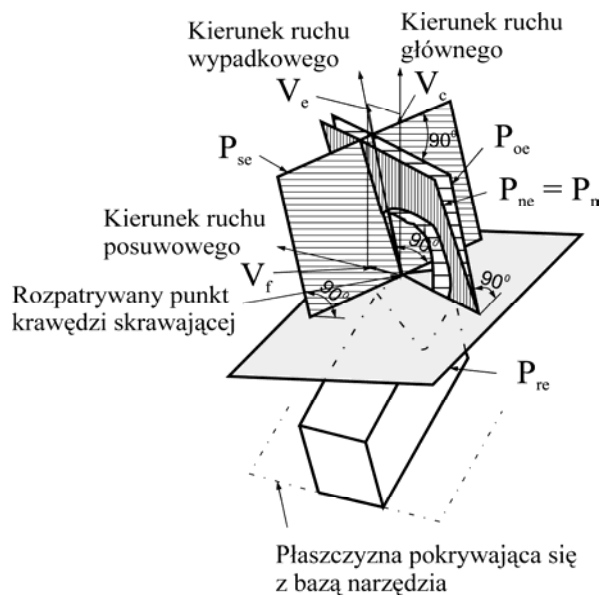


Rys.1.9. Płaszczyzny układu narzędzia

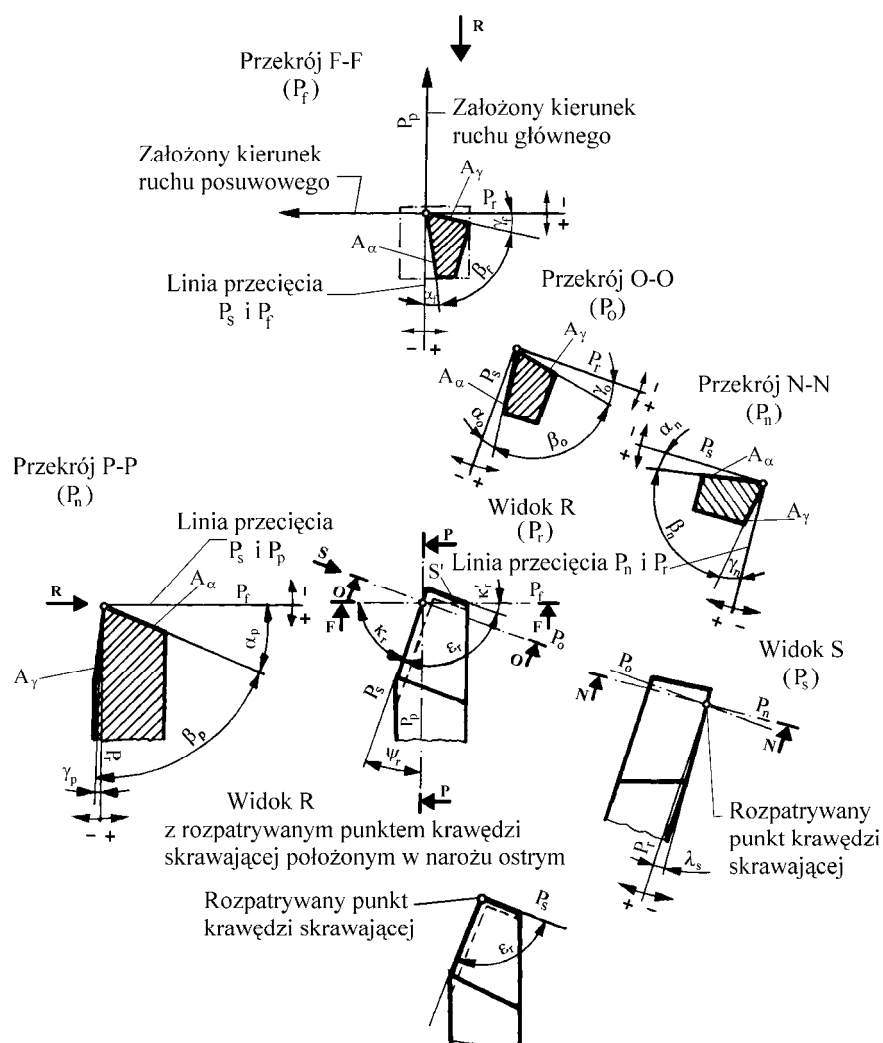
a)



b)



Rys.1.10. Podstawowe płaszczyzny w układzie roboczym



Rys.1.11. Nóż tokarski. Kąty w układzie narzędzia

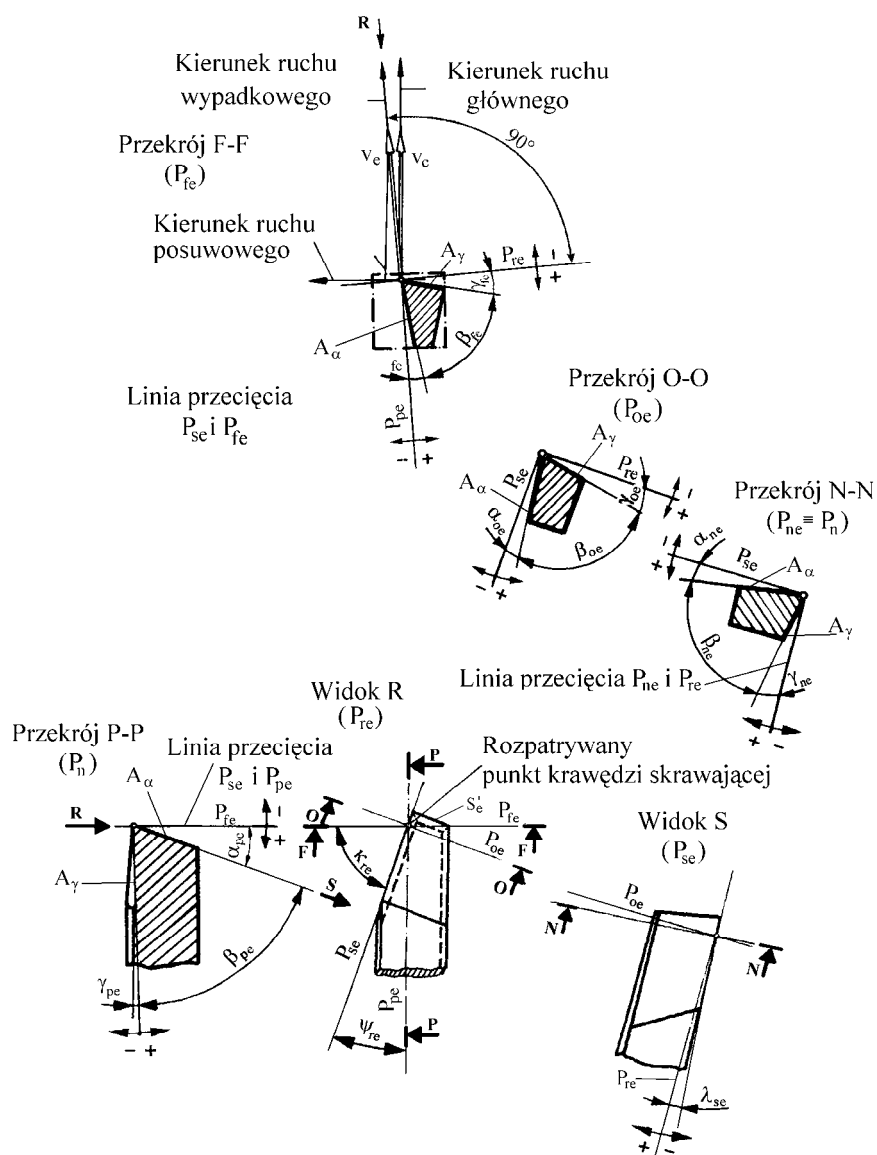
Tabela 2. Zależności między kątami w układzie narzędzia

	$\kappa_r, \lambda_s, \alpha_o, \gamma_o$	$\kappa_r, \lambda_s, \alpha_n, \gamma_n$	$\alpha_p, \alpha_f, \gamma_p, \gamma_f$	$\theta_r, \delta_r, \alpha_b, \gamma_g$
κ_r			$\operatorname{tg} \kappa_r = \frac{\operatorname{ctg} \alpha_f - \operatorname{tg} \gamma_f}{\operatorname{ctg} \alpha_p - \operatorname{tg} \gamma_p}$	$\operatorname{tg} \kappa_r = \frac{\operatorname{ctg} \alpha_b \cos \theta_r - \operatorname{tg} \gamma_g \cos \delta_r}{\operatorname{ctg} \alpha_b \sin \theta_r - \operatorname{tg} \gamma_g \sin \delta_r}$
λ_s			$\operatorname{tg} \lambda_s = \sin \kappa_r \operatorname{ctg} \alpha_p - \cos \kappa_r \operatorname{ctg} \alpha_f =$ $= \sin \kappa_r \operatorname{tg} \gamma_p - \cos \kappa_r \operatorname{tg} \gamma_f$	$\operatorname{tg} \lambda_r = -\frac{\cos(\kappa_r + \theta_r)}{\operatorname{tg} \alpha_b} =$ $= -\operatorname{tg} \gamma_g \cos(\kappa_r + \delta_r)$
α_o		$\operatorname{tg} \alpha_o = \operatorname{tg} \alpha_n \cos \lambda_s$	$\operatorname{ctg} \alpha_o = \cos \kappa_r \operatorname{ctg} \alpha_p +$ $+ \sin \kappa_r \operatorname{ctg} \alpha_f$	$\operatorname{tg} \alpha_o = \frac{\operatorname{tg} \alpha_b}{\sin(\kappa_r + \theta_r)}$
γ_o		$\operatorname{tg} \gamma_o = \frac{\operatorname{tg} \gamma_n}{\cos \lambda_s}$	$\operatorname{tg} \gamma_o = \cos \kappa_r \operatorname{tg} \gamma_p + \sin \kappa_r \operatorname{tg} \gamma_f$	$\operatorname{tg} \gamma_o = \operatorname{tg} \gamma_g \sin(\kappa_r + \delta_r)$
α_n	$\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{\operatorname{tg} \alpha_o}{\cos \lambda_s}$		$\operatorname{ctg} \alpha_n = (\cos \kappa_r \operatorname{ctg} \alpha_p +$ $+ \sin \kappa_r \operatorname{ctg} \alpha_f) \cos \lambda_s$	$\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{\operatorname{tg} \alpha_b}{\cos \lambda_s \sin(\kappa_r + \theta_r)}$
γ_n	$\operatorname{tg} \gamma_n = \operatorname{tg} \gamma_o \cos \lambda_s$		$\operatorname{tg} \gamma_n = (\cos \kappa_r \operatorname{tg} \gamma_p +$ $+ \sin \kappa_r \operatorname{tg} \gamma_f) \cos \lambda_s$	$\operatorname{tg} \gamma_n = \operatorname{tg} \gamma_g \cos \lambda_s \sin(\kappa_r + \delta_r)$
α_p	$\operatorname{ctg} \alpha_p = \cos \kappa_r \operatorname{ctg} \alpha_o +$ $+ \sin \kappa_r \operatorname{tg} \lambda_s$	$\operatorname{ctg} \alpha_p = \cos \kappa_r \frac{\operatorname{ctg} \alpha_n}{\cos \lambda_s} +$ $+ \sin \kappa_r \operatorname{tg} \lambda_s$		$\operatorname{ctg} \alpha_p = \sin \theta_r \operatorname{ctg} \alpha_b$

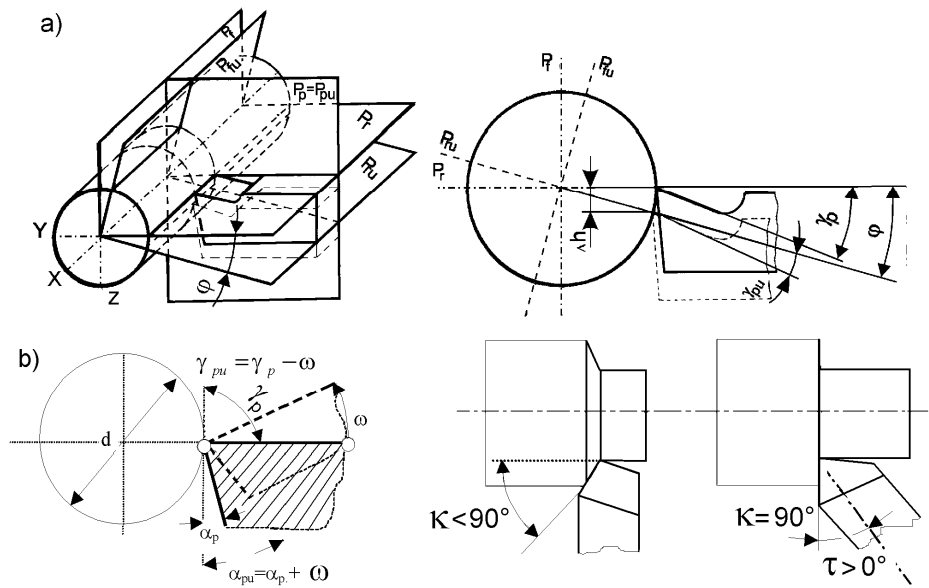
Tabela 2. Zależności między kątami w układzie narzędzia c.d.

α_f	$\text{ctg } \alpha_f = \sin \kappa_r \text{ctg } \alpha_o - \cos \kappa_r \text{tg } \lambda_s$	$\text{ctg } \alpha_f = \sin \kappa_r \frac{\text{ctg } \alpha_n}{\cos \lambda_s} - \cos \kappa_r \text{tg } \lambda_s$		$\text{ctg } \alpha_f = \cos \theta_r \text{ctg } \alpha_b$
γ_p	$\text{tg } \gamma_p = \cos \kappa_r \text{tg } \gamma_o + \sin \kappa_r \text{tg } \lambda_s$	$\text{tg } \gamma_p = \cos \kappa_r \frac{\text{tg } \gamma_n}{\cos \lambda_s} - \sin \kappa_r \text{tg } \lambda_s$		$\text{tg } \gamma_p = \sin \delta_r \text{tg } \gamma_g$
γ_f	$\text{tg } \gamma_f = \sin \kappa_r \text{tg } \gamma_o - \cos \kappa_r \text{tg } \lambda_s$	$\text{tg } \gamma_f = \sin \kappa_r \frac{\text{tg } \gamma_n}{\cos \lambda_s} - \cos \kappa_r \text{tg } \lambda_s$		$\text{tg } \gamma_f = \cos \delta_r \text{tg } \gamma_g$
θ_r	$\text{tg}(\kappa_r + \theta_r) = -\frac{\text{ctg } \alpha_o}{\text{tg } \lambda_s}$	$\text{tg}(\kappa_r + \theta_r) = \frac{\text{ctg } \alpha_n}{\sin \lambda_s}$	$\text{tg } \theta_r = \frac{\text{tg } \alpha_f}{\text{tg } \alpha_p}$	
δ_r	$\text{tg}(\kappa_r + \delta_r) = -\frac{\text{tg } \gamma_o}{\text{tg } \lambda_s}$	$\text{tg}(\kappa_r + \delta_r) = -\frac{\text{tg } \gamma_n}{\sin \lambda_s}$	$\text{tg } \delta_r = \frac{\text{tg } \gamma_p}{\text{tg } \gamma_f}$	
$\alpha_b^{1)}$	$\text{ctg } \alpha_b = \pm \sqrt{\text{ctg}^2 \alpha_o + \text{tg}^2 \lambda_s}$	$\text{tg } \alpha_b = \pm \sqrt{\frac{\text{ctg}^2 \alpha_n}{\cos^2 \lambda_s} + \text{tg}^2 \lambda_s}$	$\text{ctg } \alpha_b = \pm \sqrt{\text{ctg}^2 \alpha_p + \text{ctg}^2 \alpha_f}$	
$\gamma_g^{1)}$	$\text{tg } \gamma_g = \pm \sqrt{\text{tg}^2 \gamma_o + \text{tg}^2 \lambda_s}$	$\text{tg } \gamma_g = \pm \sqrt{\frac{\text{tg}^2 \gamma_n}{\cos^2 \lambda_s} + \text{tg}^2 \lambda_s}$	$\text{tg } \gamma_g = \pm \sqrt{\text{tg}^2 \gamma_p + \text{tg}^2 \gamma_f}$	

¹⁾ Znaki kątów α_b i γ_g określa się na podstawie konwersji wg 5.3. PN – 92/M. – 01002/01 [48].



Rys.1.12. Nóż tokarski. Kąty w układzie roboczym



Rys.1.13. Związki geometryczne w układzie ustawienia
dla a) płaszczyzn b) geometrii ostrza

Zmiany kątów narzędzia na kąty robocze i odwrotnie, czyli **ogólne zasady konwersji**, opisuje druga część normy PN-92/M.-01002/02 [48]. Układ narzędzia porusza się wraz z narzędziem skrawającym. W zależności zaś od zmiany kierunku ruchu wypadkowego zmienia się położenie układu roboczego. Podstawową sprawą jest zdefiniowanie osi współrzędnych układów odniesienia.

W układzie narzędzia założonej płaszczyzny bocznej f – osie opisują krawędzie przecięcia odpowiednich płaszczyzn i dla

- $X_f(P_r P_p)$ (podstawowej i tylnej),
- $Y_f(P_p P_f)$ (tylnej i bocznej),
- $Z_f(P_f P_r)$ (bocznej i podstawowej).

Zwroty dodatnie osi:

X_f – w miarę oddalania się od powierzchni obrobionej lub naroża,

Y_f – przeciwny do założonego ruchu głównego,

Z_f – w miarę oddalania się od powierzchni przejściowej.

Osie w układzie roboczym f_e stanowią linie przecięcia par $X_{fe}(P_{re} P_{pe})$,

$Y_{fe}(P_{pe} P_{fe})$, $P_{fe}(P_{fe} P_{re})$. Przyjęto za zwroty dodatnie dla osi:

- X_{fe} – oddalanie się od powierzchni obrobionej lub naroża odniesienia,

- Y_{fe} – ruch przeciwny do założonego ruchu wypadkowego,
- Z_{fe} – oddalanie się od powierzchni przejściowej.

Transformację **prostą** stanowi wyrażenia wyznaczające kąt roboczy jako funkcję kątów narzędzia, kątów ustawczych i kątów ruchu. Transformację **odwrotną** stanowi wyrażenie przedstawiające kąt narzędzia jako funkcję kątów roboczych, kątów ustawczych i kątów ruchu.

Przyjęto konwencję oznaczania kątów między osiami układu narzędzia (X_f, Y_f, Z_f) oraz układu roboczego (X_{fe}, Y_{fe}, Z_{fe}) (tabela 3.).

Tabela 3. Zasada opisywania kątów transformacji

osie	X_{fe}	Y_{fe}	Z_{fe}
X_f	kąt(1.1)	kąt(1.2)	kąt(1.3)
Y_f	kąt(2.1)	kąt(2.2)	kąt(2.3)
Z_f	kąt(3.1)	kąt(3.2)	kąt(3.3)

Osie układu ustawienia (X_m, Y_m, Z_m) tworzą najczęściej kąty z osiami układu narzędzia i roboczego, których cosinusy są pomocnicze dla wyliczenia kątów między osiami układu narzędzia. Korzystając z tablicy cosinusów kątów (zawartych w tabeli 4) można wyznaczać te kąty dla dowolnych przypadków.

Tabela 4. Kosinusy kątów pomocniczych

$\cos(1,1) = \cos(X_f, X_m) \cdot \cos(X_{fe}, X_m) + \cos(X_f, Y_m) \cdot \cos(X_{fe}, Y_m) + \cos(X_f, Z_m) \cdot \cos(X_{fe}, Z_m)$
$\cos(2,1) = \cos(Y_f, X_m) \cdot \cos(X_{fe}, X_m) + \cos(Y_f, Y_m) \cdot \cos(X_{fe}, Y_m) + \cos(Y_f, Z_m) \cdot \cos(X_{fe}, Z_m)$
$\cos(3,1) = \cos(Z_f, X_m) \cdot \cos(X_{fe}, X_m) + \cos(Z_f, Y_m) \cdot \cos(X_{fe}, Y_m) + \cos(Z_f, Z_m) \cdot \cos(X_{fe}, Z_m)$
$\cos(1,2) = \cos(X_f, X_m) \cdot \cos(Y_{fe}, X_m) + \cos(X_f, Y_m) \cdot \cos(Y_{fe}, Y_m) + \cos(X_f, Z_m) \cdot \cos(Y_{fe}, Z_m)$
$\cos(2,2) = \cos(Y_f, X_m) \cdot \cos(Y_{fe}, X_m) + \cos(Y_f, Y_m) \cdot \cos(Y_{fe}, Y_m) + \cos(Y_f, Z_m) \cdot \cos(Y_{fe}, Z_m)$
$\cos(3,2) = \cos(Z_f, X_m) \cdot \cos(Y_{fe}, X_m) + \cos(Z_f, Y_m) \cdot \cos(Y_{fe}, Y_m) + \cos(Z_f, Z_m) \cdot \cos(Y_{fe}, Z_m)$
$\cos(1,3) = \cos(X_f, X_m) \cdot \cos(Z_{fe}, X_m) + \cos(X_f, Y_m) \cdot \cos(Z_{fe}, Y_m) + \cos(X_f, Z_m) \cdot \cos(Z_{fe}, Z_m)$
$\cos(2,3) = \cos(Y_f, X_m) \cdot \cos(Z_{fe}, X_m) + \cos(Y_f, Y_m) \cdot \cos(Z_{fe}, Y_m) + \cos(Y_f, Z_m) \cdot \cos(Z_{fe}, Z_m)$
$\cos(3,3) = \cos(Z_f, X_m) \cdot \cos(Z_{fe}, X_m) + \cos(Z_f, Y_m) \cdot \cos(Z_{fe}, Y_m) + \cos(Z_f, Z_m) \cdot \cos(Z_{fe}, Z_m)$

Gdy płaszczyzna robocza P_{fe} pokrywa się z płaszczyzną P_f w układzie narzędzia – sytuacje typowe dla:

- większości operacji wytaczania i toczenia powierzchni walcowych,
- wiercenia i podobnych obróbek,
- frezowania.

przez podstawienie wartości kątów pomocniczych do ogólnych wzorów konwersji otrzymuje się zależności (1.1):

$$\sin \lambda_{se} = \sin \lambda_s \cdot \cos(2,2) - \cos \lambda_s \cdot \cos \kappa_r \cdot \sin(3,2),$$

$$\tan \kappa_{\text{re}} = \frac{\cos \lambda_s \cdot \sin \kappa_r}{\sin \lambda_s \cdot \sin(3,2) + \cos \lambda_s \cdot \cos \kappa_r \cdot \cos(2,2)}, \quad (1.1)$$

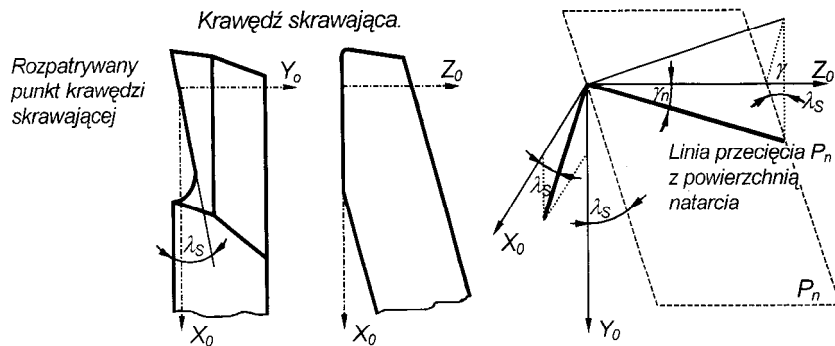
$$\sin \gamma_{ne} = \frac{1}{\cos \lambda_{se}} \cdot [(\sin \gamma_n \cdot \sin \lambda_s \cdot \cos \kappa_r) \cdot \sin(3,2) + \sin \gamma_n \cdot \cos \lambda_s \cdot \cos(2,2)].$$

Transformację **odwrotną**, polegającą na tym, że znany jest obrót układu roboczego a zadaniem jest wyliczenie kątów w układzie narzędzia, wykorzystuje się do sprawdzania granicznych warunków kinematyki ruchu z uwagi na geometrię ostrza. W normie proponowane są wzory konwersji w oparciu o metodę macierzową, bardziej przydatną w zastosowaniach komputerowych.

Układ z rys.1.14. nazywano układem – (O) osi współrzędnych. Osie tego układu wyznaczają krawędzie przecięcia płaszczyzn:

- $X_0 - P_R \perp P_S$ (podstawowej i krawędzi skrawającej),
- $Y_0 - P_S \perp P_O$ (krawędzi skrawającej i ortogonalnej),
- $Z_0 - P_O \perp P_R$ (ortogonalnej i podstawowej)

W tym układzie współrzędnych brane są pod uwagę dwie charakterystyczne linie. Pierwsza jest krawędzią skrawającą, a druga linią przecięcia płaszczyzny P_n z powierzchnią natarcia w określonym punkcie na tej krawędzi.



$$G = \begin{vmatrix} \cos \lambda_s & \sin \lambda_s & 0 \\ -\sin \gamma_n \sin \lambda_s & \sin \gamma_n \cos \lambda_s & \cos \gamma_n \end{vmatrix}$$

Rys.1.14. Cosinusy kierunkowe

Cosinusy kierunkowe tych dwu linii:

- krawędzi skrawającej: $(\cos \lambda_s, \sin \lambda_s, 0)$,

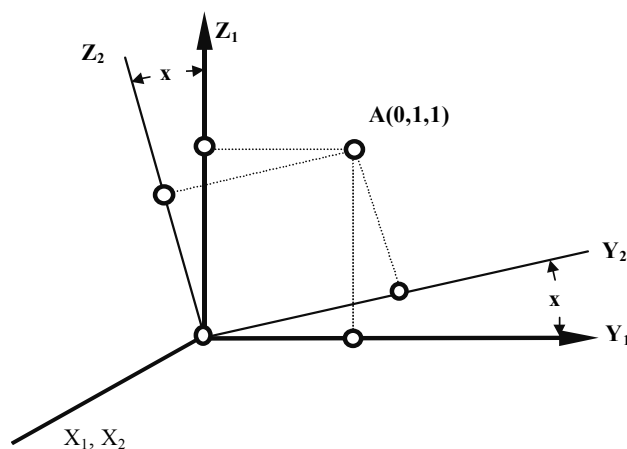
- linii przecięcia płaszczyzny P_n z powierzchnią natarcia A_γ :
 $(-\sin \gamma_n \sin \lambda_s, \sin \gamma_n \cos \lambda_s, \cos \gamma_n)$,
 tworzą macierz G :

$$G = \begin{vmatrix} \cos \lambda_s & \sin \lambda_s & 0 \\ -\sin \gamma_n \sin \lambda_s & \sin \gamma_n \cos \lambda_s & \cos \gamma_n \end{vmatrix} \quad (1.2)$$

odpowiednio dla układu osi – G_e :

$$G_e = \begin{vmatrix} \cos \lambda_{se} & \sin \lambda_{se} & 0 \\ -\sin \gamma_{ne} \sin \lambda_{se} & \sin \gamma_{ne} \cos \lambda_{se} & \cos \gamma_{ne} \end{vmatrix} \quad (1.3)$$

Widoczne jest, że transformacja macierzy G do macierzy G_e polega na obrocie układu współrzędnych wokół jednej z jego osi. Na przykład, dla danego punktu $A(0,1,1)$ w układzie współrzędnych $X_1 Y_1 Z_1$, gdy pokrywają się początki współrzędnych oraz jedna z osi $X_2 = X_1$ dla x kąta między osiami Y_1 i Y_2 , to współrzędne punktu w nowym układzie otrzymuje się z wymnożenia jednowierszowej macierzy współrzędnych oraz macierzy transformacji T_x (rys.1.15.):



Rys.1.15. Obrót elementarny wokół osi X

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} \cdot T_x = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos x & -\sin x \\ 0 & \sin x & \cos x \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & \cos x + \sin x & -\sin x + \cos x \end{vmatrix} \quad (1.4)$$

gdzie: T_x macierz transformacji przy obrocie wokół osi X , natomiast macierze transformaty wokół osi Y i Z mają postać:

$$T_y = \begin{vmatrix} \cos y & 0 & \sin y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin y & 0 & \cos y \end{vmatrix} \quad T_z = \begin{vmatrix} \cos z & -\sin z & 0 \\ \sin z & \cos z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (1.5)$$

Jeśli zamierza się wykonać kolejne transformacje, wówczas ostateczna macierz transformacji jest iloczynem macierzy transformacji elementarnych T_x, T_y, T_z . Polska norma PN-92/M.-01002/02 opisuje kilka formuł wzajemnych transformacji podając jednocześnie postacie transformat:

$$\text{z układu } -O \text{ do układu } -f, \quad T_{\kappa_f} = \begin{vmatrix} \sin \kappa_f & 0 & -\cos \kappa_f \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \kappa_f & 0 & \sin \kappa_f \end{vmatrix} \quad (1.6)$$

z układu $-f$ do układu–ustawienia,

$$T_G = \begin{vmatrix} \cos G & 0 & \sin G \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin G & 0 & \cos G \end{vmatrix} \quad T_H = \begin{vmatrix} \cos H & -\sin H & 0 \\ \sin H & \cos H & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \text{oraz } T_L = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos L & -\sin L \\ 0 & \sin L & \cos L \end{vmatrix} \quad (1.7)$$

gdzie G, H i L to kąty ustawcze:

G – poziomy, odpowiada obrotowi wokół osi Y_m w układzie ustawienia, wyznaczany w płaszczyźnie podstawowej układu narzędzia P_f , zawarty między założoną płaszczyzną P_f w jej położeniu zerowym i założoną płaszczyzną roboczą końcową.

H – pionowy, odpowiada obrotowi wokół osi Z , wyznaczany między osią Y_m układu ustawienia a jej rzutem na założoną płaszczyznę roboczą P_f .

L – obrotu, odpowiada obrotowi wokół osi X_f układu narzędzia, zawarty między płaszczyzną P_r w jej położeniu zerowym i końcowym.

Położeniem zerowym określono układ osi X, Y, Z , wyznaczony dla każdego typu obrabiarki. Przy „położeniu zerowym” narzędzia względem obrabiarki płaszczyzny układu narzędzia X_f, Y_f, Z_f pokrywają się z płaszczyznami układu obrabiarki X, Y, Z . Gdy płaszczyzna P_f pokrywa się z kierunkiem posuwu to system stałych osi układu ustawienia X_m, Y_m, Z_m pokrywa się także z osiami układu narzędzia X_f, Y_f, Z_f . z układu ustawienia do układu – f

$$T_M = \begin{vmatrix} \cos M & 0 & \sin M \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin M & 0 & \cos M \end{vmatrix}$$

$$T_N = \begin{vmatrix} \cos N & -\sin N & 0 \\ \sin N & \cos N & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \text{ oraz}$$

$$T_T = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos T & -\sin T \\ 0 & \sin T & \cos T \end{vmatrix} \quad (1.8)$$

gdzie **M, N, T** to kąty ruchu:

M – poziomego, odpowiada obrotowi układu pomocniczego wokół osi Y_m , dla toczenia powierzchni walcowych i większości innych operacji $M = 0$. Należy uwzględnić go podczas obróbki powierzchni stożkowych.

N – pionowego, odpowiada obrotowi wokół osi Z , zawarty jest między osią Y_m układu ustawienia i jej rzutem na płaszczyznę roboczą P_{fe} . W większości przypadków, kąt ruchu pionowego jest równy zeru. Dla toczenia gdy rozpatrywany punkt krawędzi skrawającej znajduje w odległości Δh poniżej osi obrotu to kąt N wyznacza się z zależności:

$$\sin N = \frac{2 \cdot \Delta h}{d} \quad (1.9)$$

d – średnica toczenia.

T – **obrotowego**, odpowiada obrotowi wokół osi X_{fe} , wyznaczany w płaszczyźnie P_{fe} a zawarty między płaszczyzną X_m, Z_m układu ustawienia i płaszczyzną podstawową roboczą P_{re} . W toczeniu, gdy kierunek ruchu głównego pokrywa się z osią Y_m układu ustawienia to kąt T jest kątem między kierunkiem ruchu głównego i kierunkiem ruchu wypadkowego:

$$\tan T = \frac{f}{\pi \cdot d} \quad (1.10)$$

1.3.1.1. Rola i znaczenie kątów ostrza w procesie skrawania

Parametry geometryczne ostrza wpływają w zasadniczy sposób na przebieg i wyniki procesu skrawania, a w szczególności na: odkształcenia warstwy skrawanej, opór i siły skrawania, zużycie i trwałość ostrza, sposób i przebieg tworzenia wióra, wytrzymałość ostrza, temperaturę skrawania, chropowatość powierzchni i naprężenia warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego.

Dobór geometrii ostrza przeprowadza się z uwzględnieniem wytrzymałości ostrza, zminimalizowania sił skrawania i tarcia oraz sterowania zachowaniem wiórów, na co silny wpływ mają: właściwości materiału obrabianego i materiału ostrza, warunki obróbki, rodzaj obrabiarki, sztywność układu OUPN. Można optymalizować geometrię ostrza z uwagi na wymienione czynniki lub przyjmując wartości kątów ostrza z poradników doboru warunków skrawania, które są także stosowane przez różnych producentów gotowych narzędzi. Gotowe narzędzia nie zawsze mają ostrza o optymalnej geometrii – są jednak poprzez unifikację typów przyjętą przez grupy producentów, tańsze od indywidualnych wyrobów.

Podstawowe kąty ostrza wpływające na proces skrawania, to:

1. **Kąt przyłożenia** – α_n , zmienia opory ruchu – wpływa bezpośrednio na tarcie powierzchni przyłożenia o przedmiot – powierzchni ostrza po powierzchni przedmiotu obrabianego. Od wartości kąta przyłożenia zależą: odkształcenia w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego, siły skrawania, chropowatość powierzchni obrobionej, intensywność zużycia i trwałość oraz wytrzymałość ostrza. Zalecane wartości kątów przyłożenia mieszczą się w granicach $6^\circ \div 12^\circ$, mniejsze wartości od 6° do 8° stosuje się do obróbki zgrubnej.
2. **Kąt natarcia** – γ_n , wpływa decydująco na tworzenia się wióra, opór i siły skrawania, naprężenia i odkształcenia w strefie skrawania, drgania, temperaturę, zużycie i trwałość ostrza, dokładność obróbki. Przedział zalecanych wartości kątów natarcia zawiera się:
 - od $0^\circ \div 30^\circ$ dla narzędzi ze stali szybko tnących,
 - od $-15^\circ \div 10^\circ$ dla narzędzi ze spieków twardych.

Większe wartości kątów natarcia stosuje się dla obróbki stopów lekkich, aluminium i magnezu:

- do 30° dla narzędzi ze stali szybko tnącej,
- do 10° dla narzędzi ze spieków twardych.

Mniejsze wartości kątów natarcia zalecane są przy skrawaniu stali twardych i żeliw:

- $0^\circ \div 10^\circ$ dla narzędzi ze stali szybko tnącej,
- $-15^\circ \div 0^\circ$ dla narzędzi ze spieków twardych.

3. Kąt przystawienia – κ_r , wpływa na wytrzymałość ostrza, zmienia parametry warstwy skrawanej, siły i temperaturę skrawania, chropowatość powierzchni, drgania, zużycie i trwałość ostrza. Wartości kąta κ_r zależą od sztywności układu OUPN. Dla dużej sztywności układu OUPN kąt κ_r można przyjmować od $30^\circ \div 50^\circ$. Dla sztywnych przedmiotów obrabianych, gdy stosunek długości przedmiotu l do jego średnicy d , wynosi $\frac{l}{d} < 6$, gdy $\frac{l}{d} = 12$ wówczas kąt κ_r zwiększamy do $60^\circ, 70^\circ$. Dla przedmiotów wiotkich, gdy $\frac{l}{d} \geq 12$ to należy zwiększać kąt do $80^\circ, 90^\circ$.

4. Kąt przystawienia pomocniczy – κ_r' , wpływa głównie na zmiany stereometryczne powierzchni obrobionej, wytrzymałość i trwałość ostrza. Zalecane wartości pomocniczego kąta przystawienia wynoszą odpowiednio:

- $5^\circ \div 10^\circ$ podczas skrawania przedmiotów sztywnych,
- $10^\circ \div 15^\circ$ podczas obróbki przy małej sztywności układu OUPN oraz
- $1^\circ \div 2^\circ$ dla przecinaków i narzędzi kształtowych.

5. Kąt pochylenia głównej krawędzi skrawającej – λ_s , zmienia kształt i kierunek spływu wióra, wpływa na odsunięcie od słabego wierzchołka punktu obciążenia siłami skrawania, przy rozpoczynaniu pracy wcinania ostrza. Znaczącą rolę odgrywa przy poprawianiu równomierność skrawania powierzchni przerywanych. Zalecane wartości kąta λ_s wynoszą:

- $15^\circ \div 20^\circ$ przy małej sztywności OUPN,
- $0^\circ \div 5^\circ$ podczas skrawania przedmiotów sztywnych i równomiernym naddatku,
- $-10^\circ \div 12^\circ$ przy skrawaniu ostrzami o ujemnych kątach natarcia wykonanych ze spieków twardych,

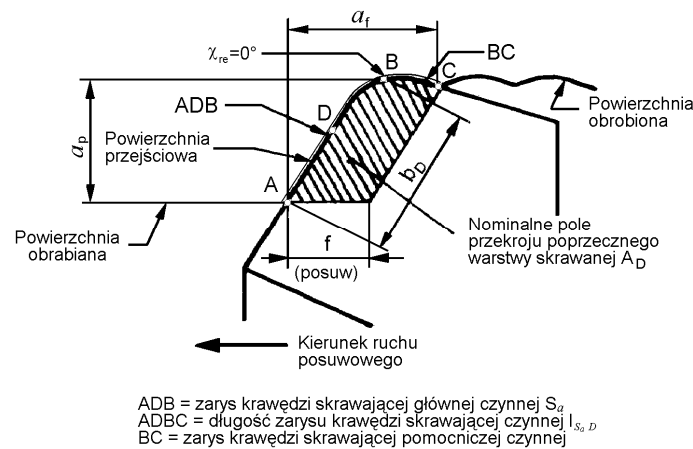
- $-10^\circ \div 30^\circ$ przy skrawaniu materiałów trudnoobrabialnych z nierównomiernym nadładkiem.

Oprócz omówionych kątów istotnymi elementami konstrukcyjnymi ostrza są:

- **Zaokrąglenie krawędzi skrawającej**

Ostrze w skrawaniu swobodnym prostokątnym ma łatwo definiowalną geometrię z uwagi na to, że ograniczone jest tylko przez jedną powierzchnię natarcia i przyłożenia, które przecinając się tworzą zwykle prostoliniową krawędź skrawającą. Powierzchnię, którą jest zaokrąglenie na przejściu z powierzchni natarcia do powierzchni przyłożenia, nazywa się zaokrągleniem krawędzi skrawającej. Jest to ostrze techniczne, dlatego, mimo iż z definicji krawędź przecięcia dwóch powierzchni jest zbiorem ich punktów wspólnych, to krawędź rzeczywista jest zaokrągloną powierzchnią o promieniu r_n . Geometrię takiego ostrza w dostatecznym stopniu określa się w płaszczyźnie prostopadłej do krawędzi skrawającej.

W układzie skrawania nieswobodnego z udziałem pomocniczej krawędzi skrawającej, geometria ostrza jest nieco trudniejsza do opisu. Ukształtowanie geometrycznej bryły wierzchołka narzędzia, dla ostrzy zdefiniowanych, polega na zgodnym z zaleceniami konstrukcyjnymi przeszlifowaniu lub zaformowaniu kąta przystawienia κ_r i promienia zaokrąglenia naroża ostrza r_g . Otrzymana krawędź skrawająca jest najczęściej krzywoliniowa. Wymiary i podstawowe nazwy warstwy skrawanej pokazano na rys.1.16.



Rys.1.16. Wymiary warstwy skrawanej przy toczeniu

- **Naroże**

Naroże nazywamy stosunkowo małą część krawędzi skrawającej ostrza w miejscu przejścia głównej krawędzi skrawającej w pomocniczą krawędź skrawającą. Może być ono:

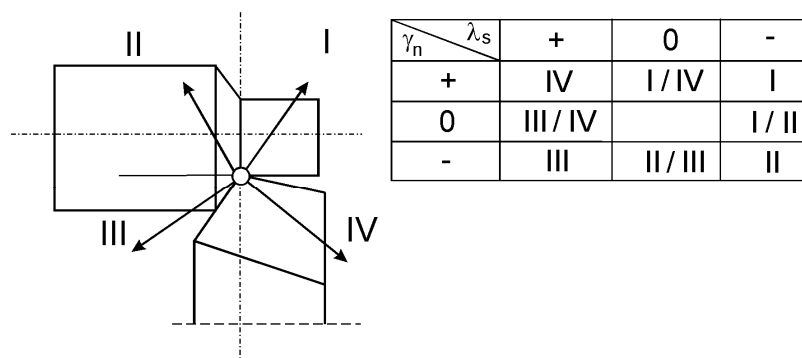
- rzeczywistym przecięciem tych krawędzi – naroże ostre,
 - prostoliniowym – naroże ścięte,
 - krzywoliniowym – naroże zaokrąglone, zwane czasem zaokrągleniem naroża o promieniu r_E , wyznaczonym w rzucie na płaszczyznę podstawową.
- Często spotykaną nazwą jest także określenie – przejściowa krawędź skrawająca.

• Wierzchołek

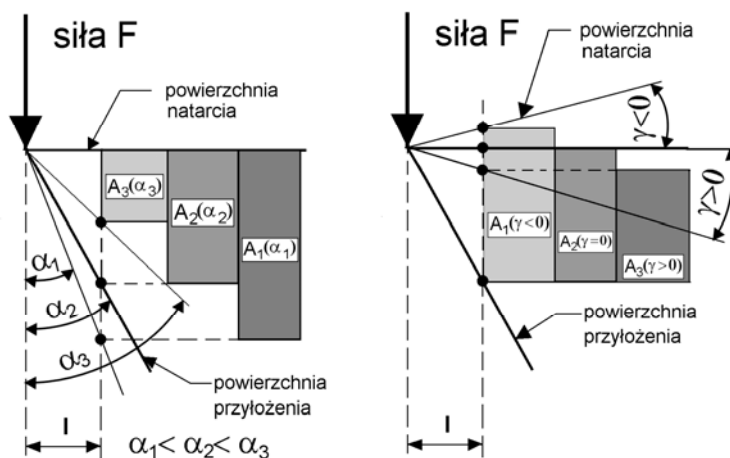
Wierzchołkiem nazywamy część ostrza najdalej wysuniętą wzdłuż jego osi lub prostopadle do niej, utworzoną przez załamanie głównej krawędzi skrawającej.

Praktyczne wykorzystanie wiedzy o geometrycznych wielkościach ostrza skrawającego przedstawione zostanie na przykładzie wpływu kątów narzędzia γ_n , λ_s i α_n na niektóre zjawiska dotyczące mechaniki skrawania i wytrzymałości ostrza. Jeśli podzieli się umownie strefę skrawania na cztery części w sposób pokazany na rys.1.17., to można przez odpowiednie ukształtowanie γ_n , λ_s dwóch podstawowych kątów, dotyczących położenia powierzchni natarcia, sterować kierunkiem spływu wióra do każdej z nich.

Racjonalny dobór tych kątów γ_n i α_n wpływa również na wytrzymałość ostrza, zależną od jego przekroju jak to zilustrowano na rys.1.18.



Rys.1.17. Sterownie za pomocą kątów γ_n , λ_s kierunkiem spływu wiórów

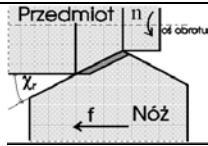
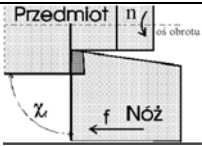
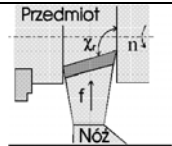
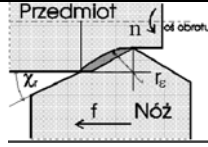
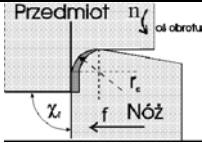
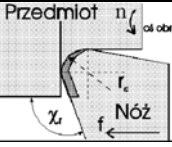
Rys.1.18. Wpływ kątów γ_n i α_n na wytrzymałość ostrza

Ukształtowanie ostrza zdefiniowane w:

1. nożach tokarskich,
2. frezach,
3. wiertłach,
4. pogłębiaczach,
5. rozwiertakach,
6. przeciągaczach

można uporządkować, z uwagi na kąt przystawienia κ_r oraz wartość promienia zaokrąglenia naroża r_ϵ , na sześć grup (tabela 5.). Podobieństwa pracy narzędzi dla każdej z tych grup, obejmuje zarówno zagadnienia transformacji geometrii ostrza, wpływu kątów ostrza na mechanikę oddzielania wióra od powierzchni obrabianej, przebiegu zużycia ostrza, tworzenia się powierzchni obrobionej.

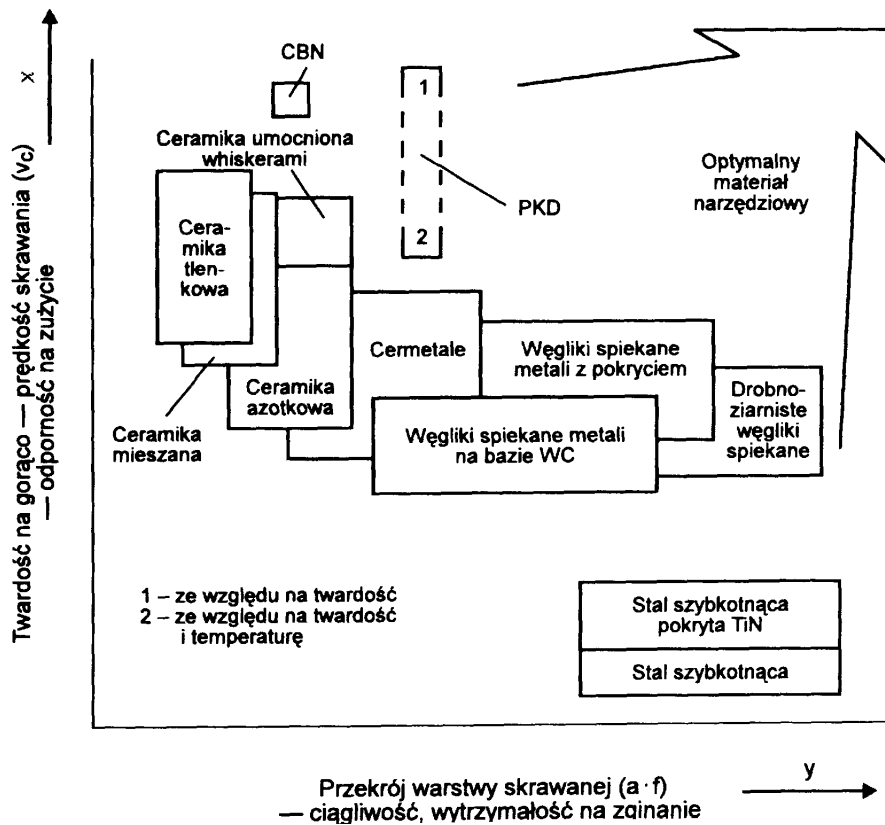
Tabela 5. Ukształtowanie ostrza

K_r r_ε	$\kappa_r < 90^\circ$	$\kappa_r = 90^\circ$	$\kappa_r > 90^\circ$
$r_\varepsilon = 0$	 <p>operacja: 1,2,3</p>	 <p>operacja: 4,5</p>	 <p>operacja: 1,6</p>
$r_\varepsilon > 0$	 <p>operacja: 1,2</p>	 <p>operacja: 1,3,5</p>	 <p>operacja: 1,2</p>

W dalszych rozdziałach przybliżone zostaną wspomniane podobieństwa oraz omówione zostaną możliwości ich praktycznego wykorzystania.

1.3.2. Materiały narzędziowe

Do wyrobu narzędzi skrawających wykorzystuje się różne materiały narzędziowe. Wyróżniki stosowane do oceny jakości materiału to: wytrzymałość na zginanie, ciągliwość, twardość, odporność na wysokie temperatury. Do chwili obecnej znane są różne materiały, a to: stale narzędziowe węglowe, stale narzędziowe stopowe, spieki twarde metali trudno topliwych – w praktyce nazywane spiekami, spieki na osnowie ceramicznej zwane cermetami, materiały super twarde – azotek boru, diament oraz materiały zwane kompozytowymi. Materiały takie jak: diament czy azotek boru są mniej wytrzymałe na zginanie niż stal szybko tnąca, która za to traci szybko swą wytrzymałość w wyższych temperaturach. Inżynieria materiałowa, której rola rośnie w ostatnim dziesięcioleciu, zajmuje się opracowaniem takiego materiału, który łączyłby razem najlepsze własności (rys.1.19.).



Rys.1.19. Kierunki rozwoju materiałów narzędziowych

1.3.2.1. Stale narzędziowe węglowe

Stale narzędziowe węglowe (0,6 – 1,3%C) o twardości w stanie hartowanym od 58 do 62 HRC, w temperaturze około 200°C, szybko tracą własności skrawne. Dzieli się te stale na płytko hartujące się, oznaczone jako: N7E, N8E, N9E, N10E, N11E, N12 oraz stale głęboko hartujące się, oznaczone jako: N5, N6, N7, N8, N9, N10, N11 i N12. Narzędzia z tych stali o niewielkich rozmiarach do 1 mm lub dużej zmienności przekroju, w czasie obróbki cieplnej, ulegają dużym odkształceniom. Wykonuje się z tych stali narzędzia takie jak: pilniki, wiertła, frezy, rozwiertaki, gwintowniki, przebijaki, dłuta, piły taśmowe do drewna, narzędzia kowalskie itd. Więcej szczegółów na temat tych stali zawiera PN – 86/H – 85020 [48].

1.3.2.2. Stale narzędziowe stopowe

Dodatki stopowe w tych stalach poprawiają własności skrawne podnosząc ich twardość od 61 do 64 HRC przy zawartości węgla od 0,75 do 2,0%. Stale te oprócz węgla C, niewielkich ilości manganu Mn i krzemu Si oraz szkodliwych domieszek fosforu P i siarki S, zawierają inne składniki stopowe, jak chrom Cr, nikiel Ni, a także wolfram W, molibden Mo, wanad V, kobalt Co. Narzędzia wykonane z tych stali posiadają zdolności skrawne w temperaturach od 260 do 650°C. Stale narzędziowe stopowe dzielimy na: stale do pracy na zimno, stale do pracy na gorąco oraz stale szybko tnące (punkt 1.3.2.3).

Spośród stali narzędziowych stopowych, których skład określono w PN – 86/H – 85023 [48], wyróżnić należy takie ich gatunki jak:

- NC6
 - gwintowniki, narzynki, rozwiertaki, frezy, wiertła maszynowe, sprawdziany, matryce, wykrojniki,
- NC10
 - wykrojniki, pierścienie do przeciągania, noże, sprawdziany, przebijaki, walce kuźnicze,
- NC11
 - ciągadła, pierścienie do przeciągania, wykrojniki, gwintownice, noże, matryce, stemple do wyciskania,
- NC11LV
 - przeciągacze, frezy, obcinarki, rozwiertaki, wykrojniki, narzędzia tnące do papieru, marmuru i tworzyw sztucznych,
- NMV
 - sprawdziany, narzędzia pomiarowe, długie gwintowniki i narzynki, rozwiertaki, wykrojniki, noże talerzowe i tarczowe, frezy, stemple,
- NZ3
 - przebijaki, przecinaki, matryce, narzędzia do obróbki drewna, stemple, gradownice,
- NW1
 - noże do drewna, papieru, tytoniu, gumy, wiertła, spirale, piły i piłki, stemple,
- WCL
 - formy do odlewów pod ciśnieniem, wkładki matrycowe, na bardzo obciążone części pras,
- WCLV
 - wkładki matrycowe, matryce i stemple do wyciskania, walce oporowe,
- WNL
 - matryce kuźnicze, kowadła, stemple,

- WWN1
 - matryce, formy ciśnieniowe, ciągadła na gorąco,
- WWS1
 - formy ciśnieniowe, stemple, matryce, noże do cięcia na gorąco.

1.3.2.3. Stale szybko tnące

Stalami szybko tnącymi nazywa się stale wykazujące wysokie własności skrawne przy prędkościach skrawania i przekrojach wiórów wywołujących nagrzewanie się ostrza do 650°C. Osiągają twardość po hartowaniu 64 do 66 HRC i z niewielkimi zmianami zachowują ją do temperatur od 550 do 650°C. Zawartość węgla zmienia się od 0,75 do 1,45%. Dodatki stopowe stanowią różny udział procentowy w stopie i alfabetycznie najczęściej są to:

Chrom – zawartość jego służy jednorodności i drobnoziarnistości struktury oraz zwiększeniu odporności stali na ścieranie, a udział procentowy chromu mieści się w granicach od 3,5 do około 4,5%,

Kobalt – podwyższa odporność na wysokie temperatury, zmniejsza wrażliwość na przegrzania, zmniejsza zmiany objętościowe stali po obróbce cieplnej. Zawartość jego w stopie wynosi 5% lub 10,5%,

Molibden – służy głównie do zastępowania drogiego wolframu, zawartość jego waha się od 0,7 do 10%.

Wanad – przyczynia się do powstawania drobnoziarnistej budowy stali, w wysokiej temperaturze przeciwdziała rozrostowi ziarn, zwiększa głębokość hartowania, zwiększa twardość ostrza, zmniejsza kruchość odpuszczania. Zawartość wanadu w stali waha się od 1 do 4,8%, w szczególnych przypadkach sięga 9,0% zastępując wolfram.

Wolfram – zawartość tego pierwiastka waha się od 1,3 do 19% i dalsze zwiększanie jego udziału blokuje rozrost ziaren szczególnie gdy ograniczona jest zawartość wanadu,

Należy zaznaczyć, że pierwiastki stopowe takie jak: kobalt, molibden, wanad oraz wolfram tworzą w stalach stopowych głównie węgliki, które w znaczący sposób polepszają własności mechaniczne tych właśnie stali.

Polska Norma PN – 86/H – 85022 [48] podaje skład chemiczny tych stali. Podkreślono w niej, że stal SW7M jest zalecaną w miejsce dotychczas powszechnie stosowanej SW18. Przeważają tu względy ekonomiczne związane z ceną wolframu i jego znaczeniem strategicznym. Zastąpienie wolframu molibdenem sprzyja otrzymaniu stali o mniejszej segregacji i większym rozdrobnieniu węglików, co poprawia własności mechaniczne stali. W praktyce okazało się jednak, że jest podatna ona na odwęglenia i przez to trudna w

przygotowaniu dobrych narzędzi. Wykorzystuje się ją głównie na wiertła, rozwiertaki, nawiertaki i gwintowniki, czyli na narzędzia do obróbki otworów.

W stali SW12, dla poprawienia twardości i trwałości podwyższono zawartość węgla do 1,15%. Wzrost zawartości węgla wymaga zwiększenia zawartości wanadu. Zmniejszono, zatem zawartość wolframu o, około 30%, ale prawie dwukrotnie podwyższono udział wanadu. Stal SW12, w badaniach laboratoryjnych wykazywała oczekiwane własności. W praktycznych zastosowaniach była trudna w przygotowaniu z niej narzędzi z uwagi na dużą skłonność do przypaleń szlifierskich. Ponadto, obserwowano dość duży rozrzut trwałości ostrzy wykonanych z tej stali [40]. Stale SK5, SK5V, SK10V, SK5M i SK8M to stale kobaltowe i kobaltowo – wanadowe. Ogólnie charakteryzują się one skłonnością do odwęglania i utrudnioną szlifowalnością. Rekompensują one te niedostatki podwyższoną trwałością ostrzy i wzrostem wydajności obróbki w wyniku podwyższenia prędkości skrawania.

Najważniejsze gatunki stali szybko tnących oraz najpopularniejsze ich zastosowania podaje tabela 6.

Zbadano przydatność gatunków stali szybko tnących; SW18, SW12, SK5 i SK5V, na noże tokarskie; zdzieraki proste, noże boczne oraz przecinaki [40]. Wieloparametrowa ocena wykazała, że stale kobaltowe SK5 i SK5V mają najlepsze własności skrawne w każdym rodzaju narzędzi. W cięższych warunkach pracy, jakie mają miejsce przy przecinaniu korzystniejsze jest stosowanie stali SK5V niż stali SK5.

Tabela 6. Gatunki stali szybko tnących

Gatunek stali		Cechy charakterystyczne	Przykłady zastosowania	
Znak	cecha			
SW12	W5	stal o dobrej ciągliwości; skrawność lepsza niż SW18; duża odporność na ścieranie; wydajność większa niż średnia	stal na narzędzia do obróbki zgrubnej i wykańczającej ogólnego przeznaczenia, do obróbki materiałów o średniej wytrzymałości	frezy wiertła, narzędzia do gwintowania, segmenty, brzeszczoty pił, frezy ślimakowe
SW18	W4	stal o dobrej ciągliwości; mało wrażliwa na warunki hartowania, z tego względu może być hartowana przy mniej dokładnym pomiarze temperatury; wydajność średnia		jak SW12 oraz noże tokarskie, strugarskie
SW2M5	M1	stal o dużej ciągliwości i dobrej odporności na ścieranie	stal na narzędzia do obróbki materiałów o średniej wytrzymałości przy średnich wydajnościach (szybkościach skrawania)	wiertła kręte, nawiertaki, gwintowniki, piły do metali, frezy do gwintowania, narzędzia do obróbki plastycznej na zimno
SW7M	M2	stal o bardzo dobrej ciągliwości, o dużej odporności na ścieranie; wydajność duża; skłonna do odwęglenia i przegrzewania przy hartowaniu	stal uniwersalna nadająca się na narzędzia o dużej wydajności i dużej ciągliwości, na narzędzia narażone na skręcanie, do obróbki materiałów o wytrzymałości powyżej 830 MPa	wiertła kręte, narzędzia do nacinania gwintów, segmenty do pił tarczowych, przeciągane frezy do gwintowania, frezy zataczane, rozwiertaki, narzędzia do obróbki kół zębatych
SK5	K2	stal o dużej ciągliwości; dużej odporności na ścieranie; wydajność duża; skłonna do odwęglenia	stal na narzędzia do obróbki zgrubnej i wykańczającej materiałów o dużej wytrzymałości, do obróbki na automatach	noże oprawkowe do gwintowania, przecinaki, narzędzia do obróbki kół zębatych
SK5M	K4	stal o dobrej ciągliwości; dużej odporności na odpuszczanie; wydajność bardzo duża, większa niż stali SK5	stal na narzędzia do obróbki materiałów trudno skrawalnych, twardych i ze stali austenitycznych, do obróbki w ciężkich warunkach zestawów kołowych, obręczy, walców, wyrobów z żeliwa itd.	noże strugarskie, tokarskie, frezy, wiertła specjalne, narzędzia do obróbki kół zębatych, noże kształtowe

Tabela 6. Gatunki stali szybko tnących c.d.

SK5MC	K5	stal o dobrej ciągliwości i odporności na ścieranie; wydajność duża	stale na narzędzia do obróbki stali konstrukcyjnych ulepszonych cieplnie oraz stali kwaso- i żaroodpornych	narzędzia trzpieniowe i nasadowe, frezy ślimakowe pracujące w szczególnie ciężkich warunkach
SK8M	K8	stal o dużej ciągliwości; dużej odporności na ścieranie i odpuszczanie; wydajność bardzo duża	stal na narzędzia do obróbki zgrubnej i wykańczającej, jak również na automatach przy dużych szybkościach skrawania, do obróbki stali twardych i austenitycznych	frezy, noże kształtowe
SK5V	K3	stal o mniejszej ciągliwości, bardzo dużej odporności na odpuszczanie, skłonna do odwęglenia; szlifowanie utrudnione; wydajność bardzo duża	stal na narzędzia do obróbki wykańczającej materiałów o dużej wytrzymałości i austenitycznych, na narzędzia do pracy na automatach, do obróbki materiałów nieżelaznych	noże tokarskie i przecinaki, noże kształtowe, rozwiertaki, frezy, koła do cięcia, także do prac przy niedostatecznym chłodzeniu, dłutki, narzędzia do automatów
SK10V	K6	stal o mniejszej ciągliwości i bardzo dużej odporności na ścieranie i odpuszczanie, skłonna do odwęglenia; szlifowanie utrudnione	stal na narzędzia do obróbki zgrubnej i wykańczającej, a także na automatach i łuszczarkach, materiałów o dużej wytrzymałości przy dużych szybkościach skrawania, do obróbki stali nierdzewnych i austenitycznych	wysoko wydajne frezy, noże tokarskie i strugarskie

Trwają badania nad opracowaniem stali szybko tnących o coraz doskonalszych własnościach skrawnych. Poszukiwania te kierują się na:

1. wprowadzaniu do stali taniego azotu, nawet do 0.4%, który tworzy węglikoazotki wanadu, wolframu i molibdenu w wyniku tego rośnie twardość i odporność na podwyższone do 550° C temperatury,
2. podwyższeniu do 2% zawartości krzemu, który rozpuszczając się w węglkach molibdenu wypiera z siatki wolfram i molibden, które reagują z węglem zwiększając ilość ich węglików,
3. elektrożuźlowe przetapianie, eliminujące niekorzystny wpływ na skrawność narzędzi, pasmowego rozkładu i segregacji grawitacyjnej dużych węglików w stopach stali [40],

4. spiekanie proszków stali o mikronowych wymiarach około do 7 μm otrzymywanych przez rozpylanie stopionej stali szybko tnącej w próżni za pomocą wody. w wyniku ujednoliczona zostaje struktura i poprawia się obrabialność w stanie zmiękczonej oraz szlifowalność tych stali w stanie hartowanym (metoda ASEA – STORA),
5. pokrywania twardymi warstwami azotków lub węglików, szczególnie korzystne rezultaty uzyskuje się dla dużych narzędzi kształtowych.

1.3.2.4. Spieki twarde

Spiekane węgliki metali trudnotopliwych produkuje się ponad 60 lat. Składają się one z wysokotopliwych węglików wolframu WC, tytanu TiC, tantalu TaC i niobu NbC (65 do 98%) oraz kobaltu metalu wiążącego. Producenci, a jest ich bardzo wielu, mogą zmieniać składy tych materiałów. Wyższa zawartość węglików podwyższa twardość materiału i odporność na ścieranie. Wzrostowi zawartości kobaltu towarzyszy większa miękkość, ale za to wyższa wytrzymałość, szczególnie na zginanie. Twardość spieków dochodzi do 92 HRA i do temperatury około 870°C, nie obserwuje się zauważalnej utraty własności skrawnych. Do temperatury 1270°C zachowują na tyle dużą twardość, że możliwe jest dalsze skrawanie. Podstawowe gatunki spiekanych węglików metali trudnotopliwych według PN-93/M – 01006 [48], stosowanych na narzędzia do obróbki metali, to:

- **grupa P** (kolor niebieski) – do obróbki stopów żelaza, dających wiór długi, stali i staliwa, żeliwa sferoidalnego lub niektórych stali kwasoodpornych z uwagi na to, że są odporne na tworzenie rowka na powierzchni natarcia. Zawierają większe ilości węgla tytanu TiC oraz tantalu TaC, przez co stają się odporne na tworzenie rowka na powierzchni natarcia. Duża zawartość węglików powoduje jednak niższą wytrzymałość, a zmiany odporności na ścieranie są wypadkową odmiennych wpływów TiC i TaC. Wyższa zawartość TaC, wpływa na obniżenie odporności na ścieranie, czyli odwrotnie niż działa węgiel tytanu TiC. Oznaczenia gatunku płytek to P01, P10, P20, P30, P40 i P50.
- **grupa K** (kolor czerwony) – wykazują najwyższą wytrzymałość dla danej twardości. Używane są do skrawania stopów żelaza, dających wiór elementowy, ponieważ są odporne na ścieranie powierzchni przyłożenia. Szczególnie polecane są do obróbki żeliwa, metali nieżelaznych, stali kwasoodpornych, żaroodpornych i niemetali takich jak: szkło, ceramika oraz niektórych stali hartowanych. O jakości tych węglików decydują: wielkość ziaren węgla wolframu oraz zawartość kobaltu, z których głównie zbudowane są spiekane węgliki metali trudnotopliwych. Drobniejsze ziarno węgla powoduje spadek wytrzymałości z jednoczesnym wzrostem twardości materiału narzędziowego. Mniejsza

zawartość kobaltu sprzyja wyższej twardości, ale obniża wytrzymałość. Podstawowe gatunki to K01, K10, K20, K30 i K40.

- **grupa M** (kolor żółty) – do obróbki stopów żelaza dających wiór długi lub krótki oraz metali nieżelaznych, Własności tej grupy spieków są wypośrodkowane z tych dla P i K. Są oznaczone jako M10, M20, M30 i M40. Uniwersalność zastosowań nie może, z założenia, spełniać wszystkich oczekiwań, w znaczący sposób ogranicza jednak liczbę różnych narzędzi w magazynach warsztatowych.

Zasadą doboru jest, aby do obróbki wykańczającej wybierać gatunki z niższymi wartościami liczbowymi. Im niższa prędkość skrawania tym wyższa wartość cyfrowa w oznaczeniu płytki.

W sprzedaży spotyka się spieki, w postaci płytek skrawających. Producenci tych płytek dążą do poprawienia własności skrawnych swoich produktów, głównie przez:

1. nanoszenie twardych warstw na materiał węglkowy – podraża cenę wyrobu o około 30%,
2. nanoszenia warstw z kompozytów,
3. stosowanie submikronowych węglików, które mają wymiary tysięcznych części mikrometra i poprawiają wytrzymałość węglików spiekanych,
4. stosowanie obróbki cieplnej modyfikującej skład spieku, powodując wprowadzić wzrost ceny o około 20% ale możliwej do zrealizowania przez użytkownika. Trwałość ostrza wzrasta o około 100%,
5. zastępowanie drogiego wolframu i kobaltu stopami niklu i molibdenu.

Należy podkreślić, że niektóre z tych ulepszeń mają ograniczony czas oddziaływania – do pierwszego ostrzenia. Narzędzia, w których węgiel spiekany jest osadzony w sposób trwały i musi być przeostrzony, korzyści jakie daje spiek mogą być mniejsze. Wyraźnie zyskuje się jednak w przypadku narzędzi z wymiennymi ostrzami skrawającymi.

1.3.2.5. Materiały pokrywane twardymi warstwami

Aby osiągnąć lepsze własności wszystkich materiałów narzędziowych należałoby podwyższyć zawartość węgla w niektórych z nich albo doprowadzić do 100 procentowej zawartości fazy węglkowej lub innych, również twardych, związków takich jak krzemki, borki, azotki lub tlenki. Prowadzi to wówczas do wzrostu twardości i odpowiednio odporności na ścieranie, ale wywołuje spadek wytrzymałości na zginanie, wzrasta wrażliwość na obciążenia dynamiczne i podatność na pękanie. Widać wyraźnie, że nie można pogodzić tak odmiennych oczekiwań drogą jedynie prostego zwiększania zawartości składników stopu. Zrodził się przed laty pomysł nakładania na wytrzymałe rdzenie cienkich warstw o znacznej wytrzymałości, takich jak: węgliki azotu, azotki tytanu, krzemki, borki i tlenki. Warstwy są niezwykle cienkie, kilkumikronowe, gdyż z rozważań

teoretycznych wynika, że im cieńsza jest warstwa naniesiona na wytrzymałe podłoże tym mniejsze są w niej naprężenia i jest ona bardziej podatna. Wyjaśnia to zjawisko demonstrowane na przykładzie szklanej rurki. Gdy ma ona średnicę 5 mm, to przy próbie zginania łatwo pęka. Natomiast dla rurki o średnicy 0.5 mm można zaobserwować dużo większą podatność na zginanie. Wiadomo, że twardość tych warstw w temperaturze pokojowej dochodzi do 3000 μHV i dla tlenków czy borków spada do 800 do 900 μHV w temperaturze 1000°C.

Ograniczone zastosowanie pokrywanych wielostrzowych płytek skrawających dotyczy obróbki materiałów wykazujących powinowactwo z warstwą TiC i TiN, a szczególnie stopów Al, stali austenitycznych, stali tytanowych itp.

1.3.2.6. Materiały ceramiczne i cermetale

Podstawowym składnikiem tej grupy materiałów jest tlenek aluminium Al_2O_3 , który jest osnową dla tlenków innych metali wapnia, manganu, magnezu, cyrkonu. Twardość dochodzi do 90 do 95 HRA i odporność na działanie wysokich temperatur nawet do 1270°C. Materiał na ceramikę jest tani, jednak wykonanie z niego materiału narzędziowego wymaga drogiej technologii, w wyniku, czego ceny są porównywalne do cen spiekanych węglików metali trudnotopliwych, a nawet wyższe. Zachowanie materiałów ceramicznych wyróżnia się tym, że w przypadku skrawania stali nie powoduje zjawiska zespawania z wiórem. Przy nagrzewaniu nie utlenia się i nie wykazuje skłonności do tworzenia narostu w czasie skrawania większości wykorzystywanych materiałów konstrukcyjnych. Jednak, przy obróbce stopów aluminiowych, ma ograniczone zastosowanie z tego samego powodu, który zauważa się w stosunku do wykorzystania węglików spiekanych przy obróbce materiałów z zawartością węgla. Powodem jest powinowactwo chemiczne sprzyjające zjawisku adhezji, szczepianiu wzajemnym materiałów w miejscu styku, w wysokich temperaturach i znacznych naciskach.

Wykorzystanie możliwości skrawnych materiałów ceramicznych wymaga:

1. stosowania nowoczesnych obrabiarek dysponujących mocą napędu głównego przynajmniej kilkunastu kilowatów ponieważ możliwe jest, przy posuwie do około 0,5 mm i głębokości skrawania do 5 mm, stosowanie prędkości skrawania do 2 – krotnie wyższych niż dla węglików spiekanych,
2. unikania zbyt dużych naddatków, szczególnie nierównomiernych, zalecane stosowanie do obróbki wykańczającej z uwagi na fakt, że wytrzymałość na zginanie jest 2 do 3 – krotnie mniejsza niż węglików,
3. rozwiązania problemu usuwania znacznej ilości wiórów, szczególnie w postaci ciągłej, wstęgowej, którego może powstawać kilkaset metrów na minutę, a który niszczy powierzchnię obrobioną, w wyniku kilkakrotnego jej porysowania.

Obecnie światowe zapotrzebowanie na ceramiczne materiały narzędziowe ocenia się na około 5% wszystkich materiałów narzędziowych. Norma PN-93/M-01006 [48] podaje podział materiałów ceramicznych na grupy:

- CA – tlenkowe zawierające głównie Al_2O_3 ,
- CM – ceramika mieszana zawierająca oprócz Al_2O_3 dodatki innych tlenków, zwykle 30–40% TiC , a czasem także TiN , co pozwala uzyskać w porównaniu z czystą ceramiką tlenkową większą twardość i wytrzymałość na zginanie oraz mniejszą kruchość, co w efekcie zmniejsza zużycie ściernie i erozyjne,
- CN – zawierające głównie azotek krzemu Si_3N_4 , charakteryzujący się dużą przewodnością cieplną $30 \div 36 \text{ W}/(\text{m} \times \text{K})$ i bardzo małą rozszerzalnością cieplną, co zwiększa odporność na wielokrotne nagłe zmiany temperatury i pozwala na zastosowanie cieczy obróbkowej.
- CC – ceramiczne materiały powlekane.

Można spotkać na rynku gatunki ceramiki:

1. cyrkonowa Al_2O_3 +(od 3 do 15%) ZrO_2 lub prawie czysto cyrkonowa o zawartości do 90% ZrO_2
2. węglkowo–krzemowa $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$,
3. węglkowo–borowa $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{B}_4\text{C}$,
4. azotku boru $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{BN}$,
5. prawie czysta ceramika od 97 do 99,5 %
6. azotku krzemu $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Si}_3\text{N}_4$
7. czarna tytanowa Al_2O_3 +(od 10 do 40%) $\text{TiC} + \text{TiN}$.

Często wykorzystywane są trzy spośród wymienionych gatunków ceramiki: cyrkonowa, czysta ceramika oraz tytanowa. Tworzywa na bazie azotku krzemu nie wytrzymują prędkości skrawania powyżej 350 m/min, gdyż wykazują wzrost aktywności chemicznej względem żelaza. Tworzywa na bazie Al_2O_3 z dodatkiem azotków i węglików tytanu znajdują zastosowanie w skrawaniu z uwagi na dobre własności wytrzymałościowe i dobrą przewodność cieplną. Krajowe produkty oznaczone jako TA (ceramika z zawartością itru, lantanu, cyrkonu – pierwiastków ziem rzadkich – drogich dodatków) i TW (kompozytowe tworzywa węglkowo–tlenkowe na bazie Al_2O_3) są badane i ocenia się, że są porównywalne z odpowiednikami zagranicznymi. Ceramika TA wymaga, po jej spieczeniu w temperaturze około 1700°C i wcześniejszym izostatycznym sprasowaniu pod ciśnieniem 300 MPa, przeszlifowania wszystkich powierzchni płytek trójkątnych, kwadratowych i okrągłych, w takiej postaci spotykanych w handlu. Podraża to o około 20% cenę płytek surowych. Płytki TW wykonywane są w technologii spiekania próżniowego przy

zmiennym kontrolowanym ciśnieniu. Twardości ich dochodzą do 1900 μHV , są wyższe o około 200 μHV niż gatunku TA, natomiast dwukrotnie bardziej odporne na zużycie ściernie. Zalecane parametry skrawania: prędkość skrawania 300 do 500 m/min, posuw 0.3 mm/obr i głębokość skrawania do 3 mm. Płytki TW przeznaczone są do obróbki wykańczającej stali narzędziowych i stopowych o twardości do 60 HRC.

Kolejnym krokiem w rozwoju spieków ceramicznych jest **sialon** o wzorze sumarycznym Si_3AlON_7 (sialon β') i właściwościach fizycznych oraz mechanicznych zbliżonych do Si_3N_4 , a chemicznych do Al_2O_3 . Sialon zastosowany do obróbki żeliwa i stopów niklu pozwala na istotne zwiększenie prędkości skrawania (do 1000 m/min) przy posuwach w zakresie $0,25 \div 1 \text{ mm/obr}$ [29].

W połowie lat osiemdziesiątych, dzięki osiągnięciom inżynierii materiałowej, powstały spieki ceramiczne wzmocnione **wiskerami** (Whiskerit) węgla krzemu SiC [29]. *Wiskery* to nitkowate monokryształy metali lub niemetali, odznaczające się prawie bezdefektową budową krystaliczną, co powoduje, że ich wytrzymałość mechaniczna jest znacznie większa od normalnych kryształów tego materiału. Optymalna zawartość whiskerów w spieku ceramicznym wynosi 20%, a jako materiał bazowy służy Al_2O_3 , względnie Si_3N_4 .

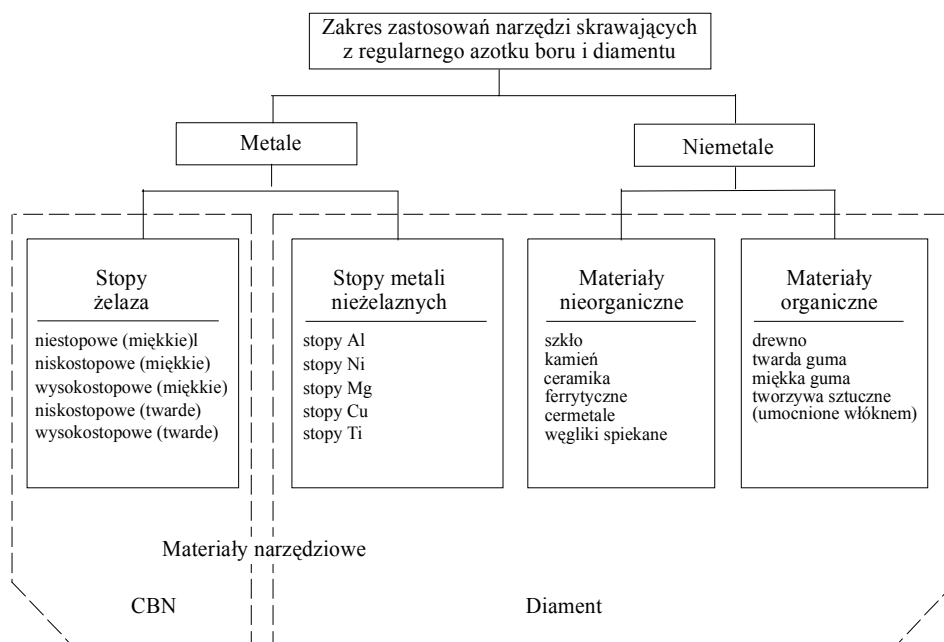
Kolejnymi materiałami narzędziowymi są **cermetale**. *Cermetal* jest materiałem spiekany złożonym z dwóch typów składników z których jeden to ceramiczny, najczęściej Al_2O_3 , z bardzo dużą kruchością i twardością około 94 HRA, odpornością w wysokich temperaturach, odpornością na utlenianie, drugi zaś, to stop metalu, podatnego, takiego jak wolfram, tytan lub innych. W wyniku otrzymuje się materiał o własnościach trochę gorszych z uwagi na odporność ścierną, ale o lepszej wytrzymałości na zginanie i zmniejszonej kruchości. Nie wykrył się jeszcze wyraźny obszar zastosowań tych materiałów. Zalecenia dotyczą raczej dokładnej obróbki stali o twardości do 60 – 65 HRC i żeliw o twardości do 550 – 600 HB z prędkościami skrawania od 750 do 1000 m/min i przekrojach warstwy skrawanej $f \cdot a_p = 0,5 \cdot 5 \text{ mm}^2$.

1.3.2.7. Materiały supertwarde

Diament oraz **regularny azotek boru** zaliczane są, według PN-93/M-01006 [48], do materiałów supertwardych. Diament polikrystaliczny oznaczono jako DP a polikrystaliczny azotek boru jako BN. Diament monokrystaliczny – stosowny jest w wyjątkowych wypadkach, gdyż w temperaturze 900°C przemienia się w grafit i reaguje z żelazem. Diament syntetyczny – polikrystaliczny, otrzymywany jest jako spiek diamentu monokrystalicznego w kobaltowej osnowie. Nie wolno stosować go do obróbki żelaza i jego stopów.

Polecane zaś są do skrawania metali nieżelaznych ich stopów, materiałów ceramicznych, organicznych (rys.1.20.).

Diamenty szczególnie zalecane są do obróbki stopów aluminium zawierających krzem. Znajdujące się w tym stopie obok siebie warstwy miękkiego roztworu krzemu w aluminium i czystego krzemu powodują, że zmiennych obciążeń krawędzi nie wytrzymują materiały narzędziowe kruche, ściernie działanie krzemu wyklucza stosowanie materiałów mało odpornych na takie zużycie. Dostarczany w postaci kształtek kilkumilimetrowych do osadzenia w płytkach ze spieków twardych.



Rys.1.20. Zakresy zastosowania materiałów supertwardych [48]

Regularny azotek boru jest otrzymywany przez spiekanie monokrystalicznego, regularnego azotku boru, otrzymywanego syntetycznie, w osnowie kobaltowej. Jest drugim (po diamencie) najtwardszym materiałem narzędziowym. Ma większą odporność chemiczną i przy ciśnieniu atmosferycznym odporny jest na utlenianie nawet do temperatury 2200°C. Warstwa azotku boru, jest łączona dyfuzyjnie z podłożem z twardych spieków i najczęściej jako dwustronna płytka, typu *sandwich*, o różnych kształtach. Zaletą jest możliwość obróbki stali (w tym nawet hartowanych do 70 HRC), żeliw o twardościach do 95 HSh po utwardzeniu. Na rys.1.20. pokazano jak szeroki jest obszar zastosowania materiałów supertwardych. Są one jednak względnie

drogie. Rośnie jednak podaż tych materiałów i należy oczekiwać, że spadać będzie ich cena.

Nową technologią wytwarzania narzędzi do obróbki twardych materiałów jest pokrywanie ostrzy warstwą *polikrystalicznego diamentu* (PKD) grubości kilku do kilkunastu mikrometrów. Stosowane jest m.in. pokrywanie metodą PVD i metodą wzrostu warstwy diamentowej [29].

Zaawansowane są również próby wytwarzania pokryć z CBN, a nawet z CBN/PKD, które określa się jako materiały narzędziowe XXI wieku.

1.3.2.8. Materiały kompozytowe

Najnowocześniejszą grupą materiałów narzędziowych są tak zwane **kompozyty**. Przykładem kompozytu jest budowa drewna, gdzie molekuly celulozy są fazą dyspersyjną. W zależności od jej rozłożenia mamy do czynienia z tym samym materiałem, ale o zdecydowanie różnej wytrzymałości mechanicznej. Nazwa ta odnosi się do takich materiałów narzędziowych, które mają roztworzone w osnowie, (jako fazy dyspersyjne) znane z bardzo dużej twardości, otrzymywane drogą techniczną, polikrystały diamentu, azotku boru (RAB 43,6% Bi i 56,4% N). Płynne, wcześniej stopione dodatki, ograniczają koncentrację naprężeń w wyniku krawędziowego nacisku dwóch, o dużej twardości, ziaren (whiskers). Dodatki te spełniają jeszcze jedno zadanie. Muszą zapewnić, przez swoją dobrą zwilżalność, połączenie z drugą warstwą kompozytu, której zadaniem jest najczęściej usztywnienie spieku oraz stworzenie możliwości przylutowania kształtki do korpusu narzędzia. Tlenek aluminium jest cięższy niż dodatki w nim rozpuszczone. Trwają prace nad wykorzystaniem zjawiska, grawitacyjnego wzbogacania w Al_2O_3 , tylko wybranych powierzchni kształtki.

Doświadczenia wskazują na korzystny wpływ na własności spieku diamentowego dodatku tytanu, z uwagi na dobre oddziaływanie na fazę diamentową oraz na intensyfikację dyfuzyjnego połączenia warstwy diamentowej z podstawą węglkową. Dla warstw z azotkiem boru wykorzystuje się podłoża z węgla wolframu z 11% zawartością kobaltu lub z molibdenu. Z powodzeniem można stosować te materiały narzędziowe do obróbki materiałów o twardości powyżej 50 HRC.

Technologia lutowania, kształtek twardych materiałów, czyni również postępy wskazujące na przyszłość i rozwój ich wykorzystania. Poważne nadzieje budzą prognozy zastosowanie, jako fazy dyspersyjnej, włókien węglowych ułożonych warstwowo. Zmieni to przewodność cieplną kompozytu oraz wytrzymałość mechaniczną.

1.3.2.9. Ogólne zasady doboru materiałów narzędziowych

Wybór na narzędzia poszczególnych materiałów narzędziowych określa z jednej strony osiągnięta podczas skrawania temperatura, – czyli wybór materiału z

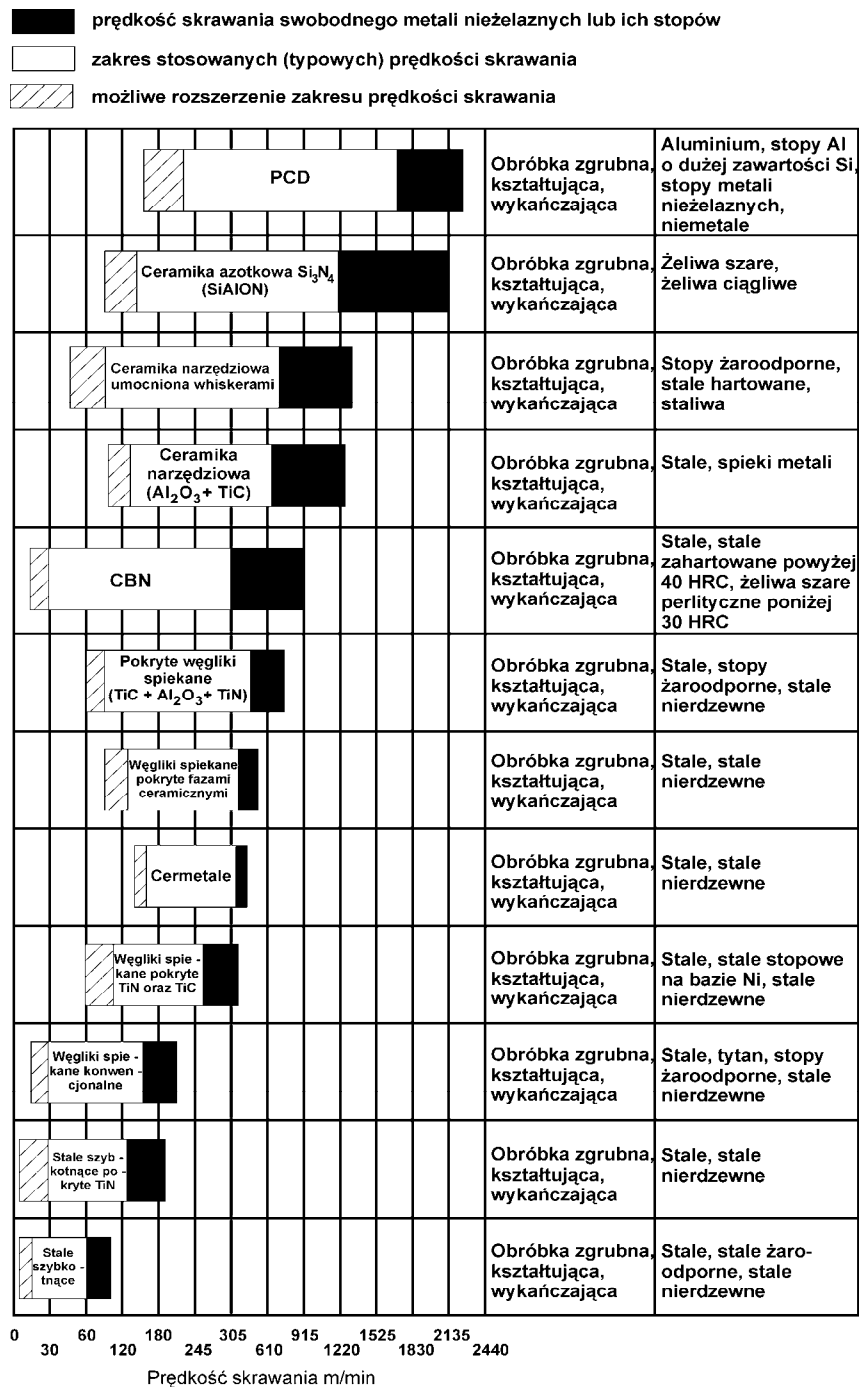
uwagi na jego właściwości i warunki skrawania, z drugiej zaś strony moce dostępne w napędach głównych obrabiarki.

Popularność narzędzi ze spieków twardych pozwala kierować się następującymi kryteriami:

- aby uniknąć wyszczerbień krawędzi należy korzystać z tych gatunków, które zawierają mniej kobaltu, ogólnie są to spieki twarde z niższą numeracją, dlatego zalecane gatunki to P10 i K10,
- zawartość węgla tantalu, korzystnie wpływa na wytrzymałość krawędzi skrawającej przy obróbce zgrubnej i dynamicznej, większa zawartość węgla tytanu zalecana jest dla ostrzy wykazujących zużycie rowkowe na powierzchni natarcia. Należy używać węglików z grupy P, w przypadku dominującego zużycia ściernego należy korzystać z węglików spiekanych K.

Nie można pominąć przy wyborze właściwego materiału na narzędzie zagadnienia ekonomiki. Koszt wykonania narzędzia lub cena jego nabycia musi uwzględniać wydajność produkcji, odporność na zużycie, czyli trwałość. Przy doborze materiału narzędziowego nie można zastosować jednej uniwersalnej zasady. W przypadku innych materiałów niż spieki twarde należy uwzględnić kilka ogólnych zasad postępowania:

- twardość materiału narzędziowego powinna być co najmniej o 30HRC większa od twardości materiału obrabianego,
- dobieranie materiału części roboczej narzędzia według danych katalogowych w których zalecane są gatunki materiałów narzędziowych pod kątem rodzaju materiału skrawanego, parametrów skrawania, jakości obróbki (rys.1.21.)
- należy sprawdzić wydajność obróbki i korygować z uwzględnieniem trwałości i zapotrzebowania mocy skrawania,
- w przypadku gdy konstruktor zastosuje nowy materiał konstrukcyjny to technolog dobiera materiał narzędziowy i warunki obróbki przez analogię do znanego materiału konstrukcyjnego o zbliżonych właściwościach.



Rys.1.21. Zalecenia dotyczące doboru materiału narzędziowego [48]

1.4. Obrabiarki i ich rola w procesie skrawania

Obrabiarki to maszyny technologiczne służące do wytwarzania elementów będących składowymi innych maszyn i urządzeń. Na obrabiarkę składa się wiele systemów oraz podsystemów technologicznych. Podsystemy te pełnią określone zadania w procesie oddzielania naddatku obróbkowego z materiału wyjściowego.

Zadania podsystemów składających się na obrabiarkę związane są, jak to definiuje się niezmiennie od dziesiętków lat (Kaczmarek [48]), z możliwościami:

1. poprawnego mocowania przedmiotu obrabianego i narzędzia i wzajemnego ich orientowania,
2. równomiernej i dokładnej realizacji ruchów głównego i pomocniczych przez czas trwania obróbki,
3. korzystnego poboru mocy przy pełnym wykorzystaniu możliwości obrabiarki.

Analizując obrabiarkę łatwo można wyróżnić układy:

1. nośny – są to elementy konstrukcji mechanicznej: łoża, ramiona łączące lub zawierające wszystkie pozostałe systemy,
2. napędowy – realizujący wykonanie ruchów głównych i pomocniczych elementów mocowania przedmiotu lub narzędzia,
3. sterowania – rozwiązanie umożliwiające wybór świadomy położenia względem siebie powierzchni przedmiotu i narzędzi, parametrów skrawania itp.,
4. pomiaru i nadzoru – służące do śledzenia przebiegu obróbki, kontroli wyrobów, wymiany zużytych narzędzi,
5. uchwytowe i przyrządy – służące do mocowania i ustalania przedmiotów obrabianych i narzędzi wraz z magazynami narzędziowymi,
6. zasilania hydraulicznego napędów i cieczy obróbkowych,
7. magazynowania gotowych elementów i usuwania odpadów produkcyjnych wiórów, końcówek i odpadków.

Nieodzownym elementem wyposażenia obrabiarki są także roboty produkcyjne – pomiarowe, podajniki transportowe itp.

Charakterystyczny jest znaczny przyrost mocy we współczesnych obrabiarkach. W napędzie głównym dochodzi on do 150 kW mocy, zaś w napędach posuwu do 5 kW i więcej. Związane to jest z dostosowaniem obrabiarek do skrawania z prędkościami dochodzącymi do 1000m/min. Napędy elektryczne pozwalają zmieniać w sposób ciągły prędkość obrotową.

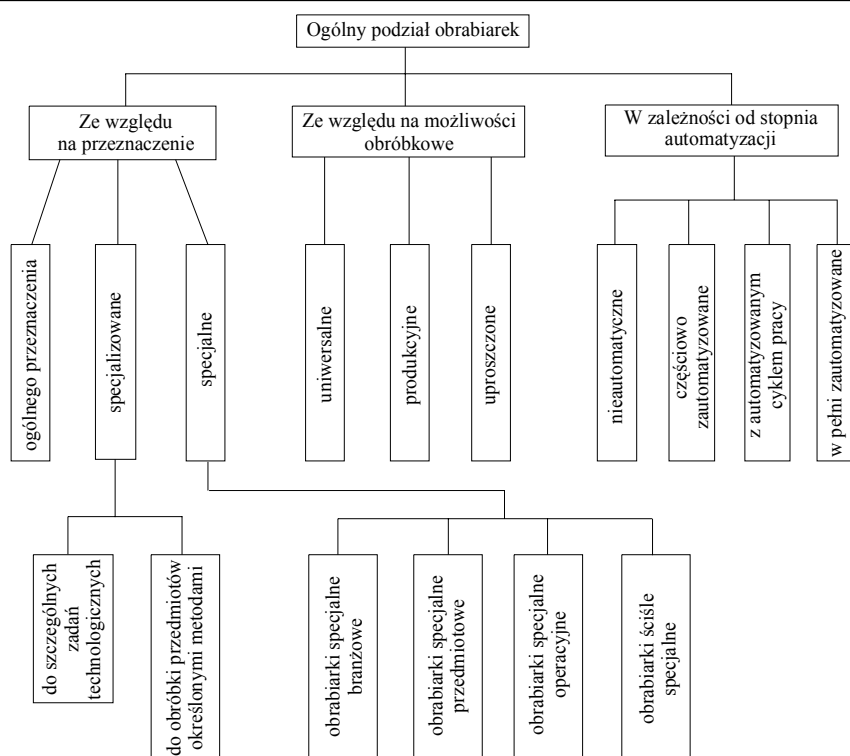
Obrabiarka ma swój udział w sumarycznym błędzie wykonania, którego miarą jest różnica pomiędzy wymiarami i właściwościami zadanymi przez

konstruktora i stwierdzonymi na gotowym wyrobie. Można zmniejszyć ten udział przez minimalizowanie:

- stereometrycznego oddziaływania błędnie wykonanych elementów obrabiarki powodujących z kolei:
 - błędy ustalania przedmiotu obrabianego względem narzędzia,
 - błędy ustalania narzędzia względem obrabiarki,
- kinematycznego oddziaływania wadliwie realizującego ruchy układu napędowego,
- cieplnych i dynamicznych przemieszczeń elementów obrabiarki spowodowanych realizacją obróbki.

Obrabiarki do metali dzieli się (rys.1.22.) według:

1. stopnia uniwersalności,
 - a) uniwersalne – przeznaczone do obróbki różnych powierzchni przedmiotów o odmiennych kształtach (uniwersalne frezarki, tokarki, wiertarki),
 - b) produkcyjne – do wykonywania określonej operacji na różnych przedmiotach (tokarki – przecinarki, tokarki wielonożowe, nakiełczarki)
 - c) specjalizowane – do obróbki przedmiotów tej samej klasy (do wałów korbowych, obróbki kół kolejowych),
 - d) specjalne – obróbka w określonej operacji (do toczenia kształtowego, gwintowania, obróbki czopów)
2. poziomu automatyzacji,
 - a) ze sterowaniem ręcznym,
 - b) półautomaty – tylko podawanie przedmiotu ręczne,
 - c) automaty,
 - d) sterowane numerycznie,
 - e) elastyczne systemy produkcyjne.



Rys.1.22. Ogólny podział obrabiarek

Coraz częściej przy omawianiu dokładności obróbki wyróżnia się obrabiarki normalne lub precyzyjne o podwyższonej dokładności – np. do toczenia diamentowego. Koncentrowanie prac skrawania pogłębia podział obrabiarek (tabela 7.) z uwagi na liczbę wyróżnionych mechanizmów wykonawczych na: jedno – i wielowrzecionowe, wielosupportowe, zespołowe – składające się z kilku jednostek obróbkowych. Dążenie do dużej elastyczności w zmianie profilu produkcji, szczególnie dla jednostkowych wyrobów, spowodowało powstanie Elastycznych Systemów Obróbki – w skrócie ESP. Wyposażone są one w pewne podstawowe obrabiarki nadzorowane o bogatych zestawach narzędziowych i sterowane za pomocą wysokiefektownego programu. Pojawiające się oprogramowania zawierają pakiety, które pozwalają wykonać rysunek wyrobu, następnie w sposób automatyczny zdetalować go i zwymiarować, opracować optymalny proces technologiczny z uwzględnieniem: narzędzi, liczby przejść i parametrów skrawania, wykonać pomiar w czasie obróbki lub po jej zakończeniu. Takie zintegrowane systemy produkcyjne przyspieszają fazę przygotowania produkcji oraz skracają czas jednostkowy potrzebny na wykonanie wyrobu.

Tabela 7. Podział obrabiarek

Obrabiarki	Podgrupy i typy							
Tokarki	Tokarki kłowe		Tokarki rewolwerowe			Tokarki tarczowe i karuzelowe		
	Tokarki produkcyjne	Tokarki uniwersalne	Z głowicą o osi pionowej	Z głowicą o osi poziomej	O skośnej osi głowicy	Z łożem wzdłużnym	Z łożem poprzecznym	Płytowe
						Jednostojakowe		Dwustojakowe
Frezarki	Frezarki wspornikowe					Frezarki bezwspornikowe		
	Poziome		Pionowe		Narzędziowe	Łożowe	wzdłużne	
	Uniwersalne	Zwykłe	Uniwersalne	Zwykłe			Jednostojakowe	Dwustojakowe
Wiertarki	Wiertarki stołowe i słupowe					Wiertarki stojakowe		
Strugarki i przeciągarki	Strugarki wzdłużne		Strugarki poprzeczne			Strugarki pionowe (dłutownice)		
	Jednostoja-kowe	Dwustoja-kowe						
Wytaczarki	Wytaczarki poziome		Wytaczarki pionowe					
	Dwuwrzecio-nowe	Trzywrzecio-nowe	Pionowe		Poziome			
			Jednostoja-kowe	Dwustoja-kowe				
Przecinarki	Przecinarki ramowe		Przecinarki taśmowe					
Obrabiarki do uzębień	Obrabiarki do kół zębatych walcowych							
	Dłutownica obwodniowa typu Fellowsa	Dłutownica obwodniowa typu Maaga	Frezarki obwodniowe			Szlifierki do uzębień		
						Typu Niles		Typu Maaga
Szlifierki	Szlifierki do wałków		Szlifierki do otworów		Szlifierki do płaszczyzn			
	Szlifierki kłowe	Szlifierki bezkłowe	Szlifierki zwykłe	Szlifierki bezkłowe	Pracujące obwodem ściernicy		Pracujące czołem ściernicy	

Tabela 7. Podział obrabiarek c.d.

Podgrupy i typy								
Tokarki uchwytowe		Półautomaty i automaty tokarskie			Tokarki wielonożowe			
Jednowrzecionowe	Wielowrzecionowe	Jednowrzecionowe		Wielowrzecionowe		Poziome	Bramowe	Piono- we
		Wzdłużne i poprzeczne	Rewolwerowe	Wielowrze- cionowe				
Frezarki kopiarki		Frezarki grawerki			Frezarki do rowków wpustowych			
Wiertarki promieniowe		Wiertarki rewolwerowe			Wiertarki wielowrzecionowe			
Przeciągarki wewnętrzne		Przeciągarki zewnętrzne			Przeciągarki uniwersalne			
Poziome	Pionowe							
Wytaczarki współrzędnościowe		Wytaczarko-frezarki						
Przecinarki tarczowe		Przecinarki cierne						
Obrabiarki do kół zębatach stożkowych								
Strugarki typu Gleasona	Frezarki Klingelnerga	Obrabiarki typu Gleasona do kół o łukowo-kołowej linii zębów		Frezarki typu Fiat- Mammano		Obrabiarki typu Oerlikon		
Oselkownice		Docierarki			Polerki			
O dużym skoku narzędzia (honownice)	O ruchu oscylacyjnym	Jednotarczowe		Dwutarczowe				

1.5. Znaczenie układu OUPN

W rozdziale omówiono wpływ obciążenia na odkształcenie elementów układu obrabiarka, przyrządy i uchwyty, przedmiot obrabiany oraz narzędzia (w skrócie OUPN). Przebiegowi obróbki towarzyszą obciążenia: siłowe, drgania oraz siły pochodzące od rozszerzalności liniowej elementów OUPN w wyniku ich nierównomiernego nagrzewania.

Wynik obróbki zależy nie tylko od pierwotnej dokładności środków wytwarzania, ale także od aktualnego stanu ich zużycia i rozregulowania. W niniejszym rozdziale omówiono udział wybranych zakłóceń w powstawaniu błędów obróbki i o ile to było możliwe wskazano na metody ograniczenia ich roli.

1.5.1. Układ obrabiarka – uchwyt – przedmiot – narzędzie

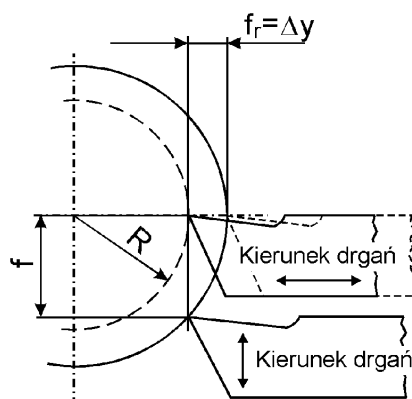
Podczas skrawania towarzyszące mu zjawiska powodują pojawienie się:

- **Sił** w układzie OUPN pochodzących od dynamiki elementów ruchomych i sił skrawania, od mocowania narzędzi i przedmiotów, od przyspieszeń, ciężaru i rozłożenia wirujących mas, a wywołujące odkształcenia plastyczne oraz sprężyste. Wszystkie one powodują odkształcenia elementów OUPN w różnych kierunkach. Kierunki odkształceń mają niejednakowy wpływ na dokładność kształtu i wymiaru. Największe zmiany wymiarów i kształtu powodują te siły, które działają prostopadle do powierzchni obrabianej. Miarą sztywności liniowej elementu jest stosunek siły F do spowodowanego nią odkształcenia f .

$$j = \frac{F}{f} \left[\frac{N}{\mu m} \right] \quad (1.11)$$

Stosunek odwrotny nazywany jest podatnością. Wiedza o działających obciążeniach statycznych i statycznej podatności OUPN – rozumianej jako suma podatności poszczególnych jego elementów w kierunku prostopadłym do osi toczenia – nie pozwala przewidzieć jego reakcji w dynamicznych warunkach pracy. Możliwa jest jednak ocena rzędu wielkości odchyłek w konsekwencji błędów wykonania.

Prostopadle do osi przemieszczenie ostrza f_r powoduje błąd o wartości $2f_r$ na średnicy, zaś w kierunku stycznym do wałka błąd średnicy można wyznaczyć, korzystając z danych na rys.1.23.



Rys.1.23. Wpływ przemieszczenia ostrza na błąd wykonania

Jak bowiem widać:

$$R^2 + f^2 = (R + \Delta y)^2 \text{ po rozwinięciu:}$$

$$f^2 - 2 \cdot R \cdot (\Delta y) - (\Delta y)^2 = 0 \quad (1.12)$$

W zdecydowanej większości przypadków $R \gg \Delta y$, dlatego można pominąć człon $(\Delta y)^2$, wtedy:

$$\Delta y = \frac{f^2}{2 \cdot R} = \frac{f^2}{D} \quad (1.13)$$

przemieszczenie o wartość 0,05 mm dla przedmiotu o średnicy 100 mm wywoła błąd średnicy około 0,00005 mm. W kierunku promieniowym takiemu samemu przemieszczeniu odpowiada błąd 0,1 mm, niezależnie od średnicy toczenia.

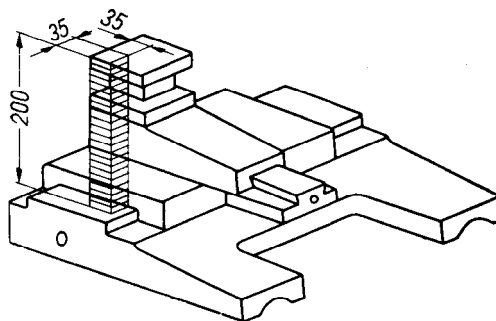
Powyższy przykład dowodzi, że w kierunku prostopadłym do powierzchni obrabianej około 2000 razy jest większy efekt błędu niż w kierunku stycznym.

- **Ciepła**, którego źródłem są silniki elektryczne i hydrauliczne napędu, trące o siebie elementy kinematyki (śruby i nakrętki) oraz proces skrawania. Różny jest udział wymienionych źródeł. Konstruktorzy obrabiarek starają się tak je rozmieszczać, aby ograniczyć wpływ cieplnych odkształceń na decydujące o dokładności obróbki węzły konstrukcyjne obrabiarek. Na przykład: w szlifierkach systemy chłodzenia i oczyszczania płynów obróbkowych umieszczono poza korpusem obrabiarki. Pozostaje jednak źródło ciepła związane ze skrawaniem. Produkty pracy narzędzi, w postaci wiórów, ogrzanych do wysokiej temperatury przekazują ciepło do elementów obrabiarki. Nagrzewanie to jest nierównomierne z uwagi na ilość powstającego ciepła zmienną w czasie. Wiadomo, że metrowy pręt ogrzany o 1°C lub wałek o

średnicy 100 mm ogrzany o 10°C zmieniają wymiary o $12\text{ }\mu\text{m}$. W wyniku elementy obrabiarki, decydujące o dokładności obróbki (wrzeciennik, wrzeciono wraz z uchwytem, konik), zajmują przypadkowe względem siebie położenie. Podobnie dzieje się z przedmiotem, który nagrzewa się w przypadku obróbki wielonarzędziowej (na nowoczesnych obrabiarkach jest to bardzo często stosowane) znacznie bardziej niż obrabiarka, a zatem musi się wydłużyć więcej niż pozwala na to rozstaw kłów. Jeśli obrabiarka nie jest wyposażona w podatny docisk konika (na przykład hydrauliczny) wystąpią wtedy siły w układzie przedmiot obrabiarka, które odkształcają konik i wrzeciono tokarki. Jedną z prostszych metod zapobiegania wpływom cieplnych odkształceń elementów obrabiarki jest obróbka po jej uprzednim nagraniu i właściwym schładzaniu strefy skrawania.

a) Podatność obrabiarki

Sztywność konstrukcyjna całej obrabiarki zależy od sztywności jej elementów składowych i sztywności stykowej. Jeżeli przyjrzeć się konstrukcji suportu tokarki to widoczna jest duża liczba ruchomych względem siebie elementów. Każdy z nich może odkształcać się, w właściwy dla siebie sposób, pod działającymi siłami. Okazało się jednak, że wskutek tak dużej liczby połączeń stykowych między widocznymi na rys.1.24. – wydawałoby się sztywnymi elementami – równoważną sztywnością charakteryzuje się graniastosłup o wymiarach $35 \times 35 \times 200$.



Rys.1.24. Konstrukcja suportu tokarki

Sumaryczne odkształcenie obrabiarki nie jest najczęściej proporcjonalne do wartości obciążenia. W połączeniach śrubowych występują często, zależnie od rozwiązania konstrukcyjnego, znaczne naprężenia wstępne o przeciwnych znakach niż kierunek obciążenia. W tym zakresie naprężeń można uważać, że sztywność obrabiarki niewiele zależy od obciążenia. Wysoka sztywność obrabiarki jest wymagana w skrawaniu dużych przekrojów wióra przy obróbce zgrubnej, a w obróbce wykańczającej przy stosowaniu narzędzi wrażliwych na

wykruszenia (np. ceramicznych), lub granicznych warunkach skrawania. Obróbka zgrubna, mimo dopuszczalnych dużych odchylek, powoduje wystąpienie znacznych bardzo zmiennych sił skrawania. Przy braku dostatecznej sztywności obrabiarka ulega szybkiemu zużyciu. Obróbce wykańczającej zaś towarzyszą zwykle znaczne prędkości skrawania, z czym związane są prędkości obrotowe dochodzące do kilku tysięcy na minutę. Występujące wtedy obciążenia dynamiczne mogą uniemożliwić uzyskanie wysokiej dokładności obróbki, w granicznych warunkach obróbki, gdy elementy wykonawcze obrabiarki zajmują skrajne położenia (np. przy maksymalnym wysunięciu pinoli z konika tokarki lub wierceniu dużych otworów na wiertarce promieniowej z krańcowo wysuniętym wrzeciennikiem).

Odkształcenia zespołów wykonawczych obrabiarki często zależą od ich położenia i zmienne są w czasie obróbki. Między ich podatnością, która bezpośrednio wpływa na wzajemne położenie przedmiotu obrabianego i narzędzia, a błędami kształtu i wymiaru wyznacza się cząstkowe zależności.

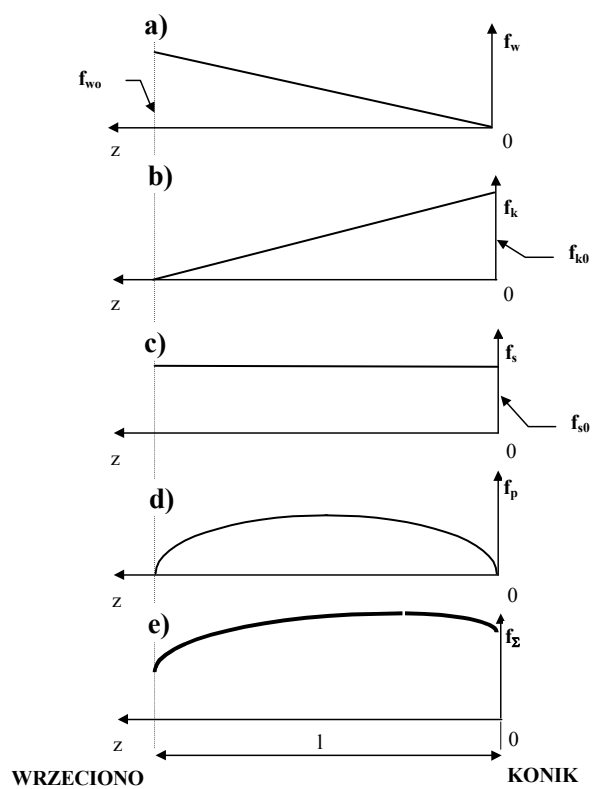
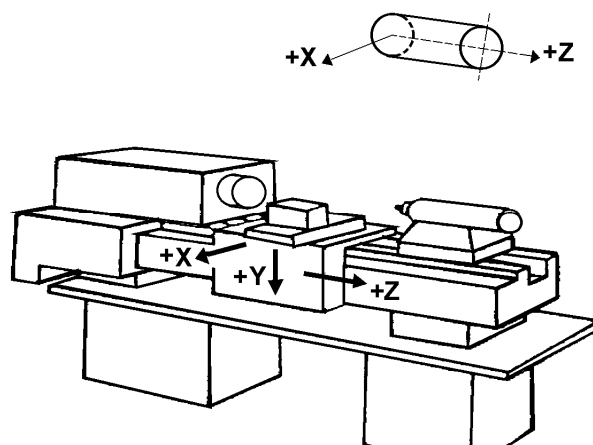
Na rys.1.25. przedstawiono wykresy przemieszczeń cząstkowych w kierunku zgodnym z kierunkiem przemieszczenia osi wrzeciona, przy stałej sile obciążającej i tak:

- a) f_w – dla wrzeciona,
- b) f_s – zespołu suportu,
- c) f_k – zespołu konika, przemieszczenie osi kła konika oraz
- d) f_p – odkształcenie sprężyste wałka o stałej średnicy – w zależności od położenia narzędzia na długości toczenia w kłach. Sumaryczne przemieszczenie pokazano na rysunku e). Jak to pokazano na przykładzie tokarki, Δd – błąd na średnicy można wyliczyć jako sumę:

$$\Delta d = 2 \cdot (f_w + f_k + f_s + f_p) \quad (1.14)$$

przemieszczeń cząstkowych, w każdym punkcie położenia siły F_p wzdłuż drogi toczenia. W uproszczeniu można zapisać je jako:

$$f_k = f_{k0} \cdot \frac{l-x}{l} = m_k \cdot F_p \cdot \frac{l-x}{l} \quad (1.15)$$



Rys.1.25. Krzywe przemieszczeń cząstkowych i sumarycznych

$$f_w = f_{w0} \cdot \frac{1-x}{1} = m_w \cdot F_p \cdot \frac{1-x}{1}, \quad (1.16)$$

gdzie:

m_w i m_k – podatności wrzeciona i konika,

f_{w0} , f_{k0} – wartości początkowe przemieszczenia, siła F znajduje się przy końcówce wrzeciona i przy kłie konika,

Odształcenie sprężyste gładkiego wałka można wyznaczyć z zależności:

$$f_p = \frac{F_p}{3 \cdot E \cdot I} \cdot \frac{(1-x)^2}{1} \cdot x^2, \quad (1.17)$$

to przy ustalonej, (niezależnej od położenia siły F_p) sztywności suportu:

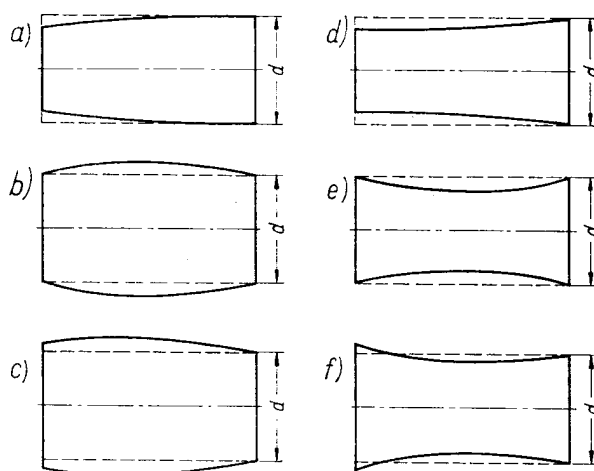
$$f_s = m_s \cdot F_p \quad (1.18)$$

otrzymuje się wyrażenie na błąd średnicowy jako sumę uwzględnionych przemieszczeń cząstkowych:

$$\Delta d = 2 \cdot F_p \cdot \left[m_w \cdot \frac{x}{1} + m_k \cdot \frac{1-x}{1} + m_s + \frac{1}{3 \cdot E \cdot I} \cdot \frac{(1-x)^2}{1} \cdot x^2 \right] \quad (1.19)$$

Widoczna jest, choć tylko teoretyczna w znacznym uproszczeniu, możliwość wyznaczenia błędu na średnicy toczenia w każdym położeniu siły F_p . Należy, jak wynika z zależności, znać podatności m_w i m_k . Opisane w literaturze (Kaczmarek [20, 21]) wnioski dotyczące przedstawionych rozważań, wskazują, że (rys.1.26.):

- gdy podatność przedmiotu jest większa niż podatność wrzeciona i konika to pojawia się skłonność do powstawania błędu beczkowatości przy czym jeżeli:
 - a) $m_k > m_w$, wtedy średnica jest mniejsza przy końcówce wrzeciona,
 - b) $m_w = m_k$, wypukłość jest symetryczna,
 - c) $m_w > m_k$, to średnica jest większa przy końcówce wrzeciona
- gdy podatność przedmiotu jest mniejsza niż podatność wrzeciona i konika to pojawia się skłonność do powstawania błędu wklęsłości przy czym jeżeli:
 - d) $m_k > m_w$, wtedy średnica jest mniejsza przy końcówce wrzeciona,
 - e) $m_w = m_k$, wklęsłość jest symetryczna,
 - f) $m_w > m_k$, to średnica jest większa przy końcówce wrzeciona.



Rys.1.26. Błędy kształtu zależne od podatności konika i wrzeciona

W podobny sposób można analizować zachowanie każdej, nie tylko przykładowej tokarki, w układzie OUPN. Pamiętać jednak należy, że przeprowadzono analizę w modelu statycznym bez uwzględnienia drgań i zmiennych sił pochodzących z procesu skrawania. W ogólnych przesłankach wyjaśnia to jednak metodykę analizy udziału obrabiarki w układzie OUPN.

b) Podatność uchwytów i przyrządów

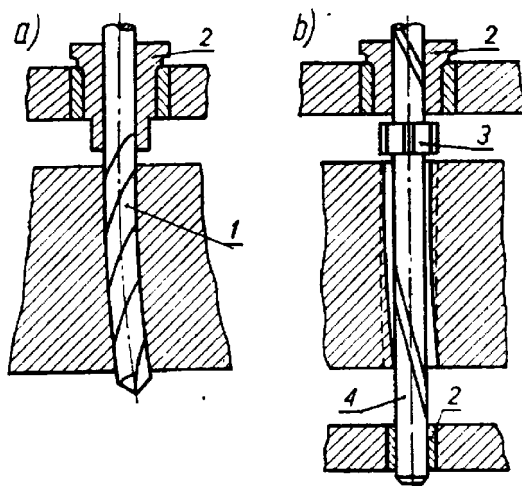
Wiadomo, że im bardziej prosta, o mniejszej liczbie elementów jest konstrukcja przyrządu czy uchwytu tym łatwiej można zapewnić dużą sztywność. Uniwersalne, składane przyrządy czy uchwyty w istocie są tańsze w wykorzystaniu jednak jest to ustępstwo na rzecz możliwej do uzyskania dokładności. Wpływ na poprawność pracy przyrządu czy uchwytu mają te same czynniki, które opisano dla obrabiarek. Odkształcenia ich zależą od sił skrawania jak również od sił i sposobów mocowania w nich przedmiotów. Odkształcenia zachodzące na styku powierzchni ustalających i mocujących przyrządu czy uchwytu oraz powierzchni przedmiotu, są dodatkowym źródłem błędu wykonania. Przy większych naciskach jednostkowych na tymże styku, pojawiają się nieliniowe, doraźne zmiany charakterystyk, które mogą zniweczyć oczekiwania związane z dokładnością wykonania przedmiotu obrabianego. Dlatego powierzchnie w przyrządach i uchwytach, szczególnie ważne, z punktu widzenia zapewnienia dokładności obróbki, wykonuje się jako nawęglane i gładko szlifowane. Powierzchnie bazowe w przedmiotach należy także przygotowywać możliwie dokładne i gładkie.

c) Podatność narzędzi

Podatność narzędzia jest ściśle związana z jego budową. Niektóre narzędzia posiadają dużą podatność i nie ma żadnej możliwości zmiany tego stanu. Dotyczy to, na przykład, większości narzędzi wykorzystywanych do obróbki otworów, szczególnie długich. Czynnikiem, które wpływają bezpośrednio na charakterystykę sztywności narzędzia są: jego kształt i wymiar, sztywność elementów mocowania oraz dodatkowych podpór.

Dla zminimalizowania wpływu podatności narzędzia na błąd obróbki przyjmuje się następujące zasady postępowania:

- stosuje się tulejki prowadzące – współpracujące z odpowiednimi powierzchniami narzędzia (rys.1.27. a),
- podtrzymki – współpracujące z obrobioną powierzchnią,
- jednoczesne prowadzenia tulejowe przednie i tylne – przez zastosowanie dodatkowych elementów prowadzących związanych z narzędziem (rys.1.27. b),
- zmniejszenie sił skrawania – przez zmniejszenie posuwu i głębokości skrawania, odpowiedni dobór kątów ostrza skrawającego.

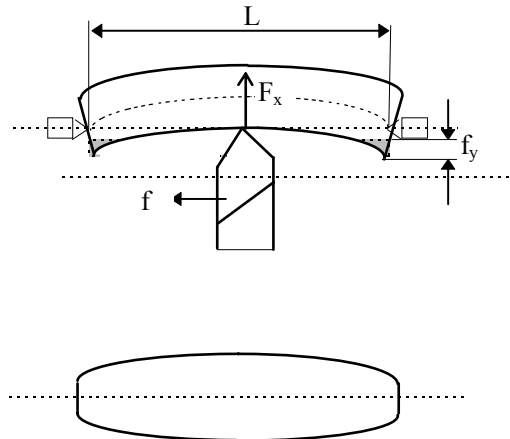


Rys.1.27. Ograniczenie podatności narzędzi
1 – wiertło, 2 – tulejka prowadząca

d) Podatność przedmiotu obrabianego

Projektant przedmiotu, kierujący się subiektywnymi zasadami związanymi z: jego doświadczeniem zawodowym, uwarunkowaniami wykonawczymi tworzy rozwiązania pod kątem ich przeznaczenia, jednak nie zawsze o największej sztywności oczekiwanej podczas obróbki. Wiadomo, że wałki, szczególnie wiotkie, uginają się podczas obróbki wzdłużnej. Wynika to ze zmiennej

szttywności przedmiotu, przy znacząco sztywniejszych podparciach we wrzecionie i koniku (patrz podpunkt a), w zależności od drogi narzędzia. Przy sztywnych podparciach i podatnym przedmiocie otrzymuje się powierzchnie wklęsłe (rys.1.28.) i przy podatnych podparciach, sztywnym zaś przedmiocie powierzchnie obrabiane wzdłużnie są wklęsłe.



Rys.1.28. Wpływ sztywności przedmiotu na błąd kształtu

- **Drgania** w procesie skrawania – jako niezamierzone przemieszczenie elementów przestrzennego układu sprężystego OUPN pod wpływem składowej dynamicznej procesu skrawania oraz sił zewnętrznych pojawiających się w łańcuchu kinematycznym napędu obrabiarki – powodują poważne zakłócenie procesu technologicznego. Wzmaga się zużycie narzędzi i elementów obrabiarki oraz widoczne jest pogorszenie stanu powierzchni obrobionej.

Drgania układu OUPN można podzielić na dwie grupy:

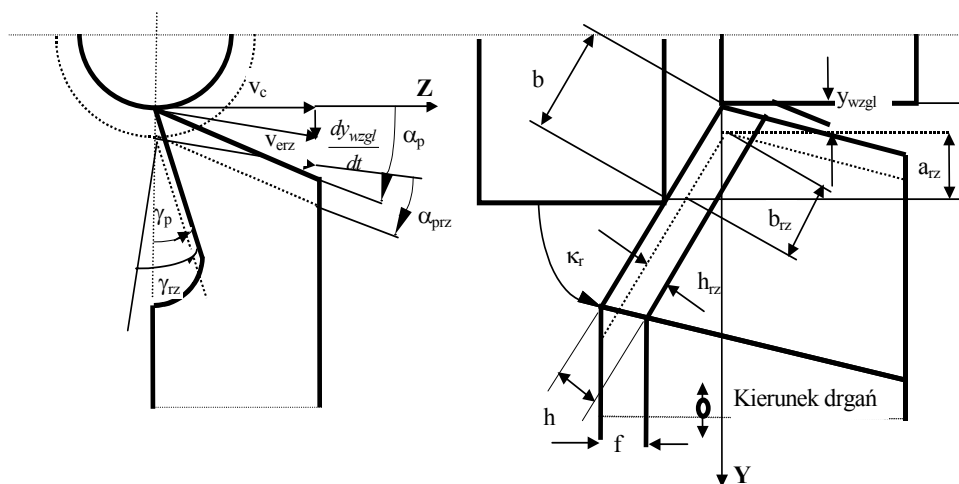
1. niezwiązane z procesem skrawania,

- swobodne – źródłem których są ruchy jałowe elementów obrabiarki podczas ich rozruchu i hamowania,
- wymuszone – związane z łańcuchem kinematycznym, najczęściej z braku dobrego wyważenia elementów ruchomych oraz przenoszonych przez fundament drgań z otoczenia,
- parametryczne – spowodowane zmiennymi sztywnościami lub błędami wykonania elementów układu napędowego,
- samowzbudne – bez udziału zmiennych obciążeń zewnętrznych pojawiające się w pewnych granicznych warunkach pracy układu OUPN,

2. wywołane procesem skrawania

- swobodne – wywołane zmianami obciążenia OUPN przez rozpoczynające i kończące pracę narzędzie,
- wymuszone – zmiennością siły skrawania spowodowanej zakłóceniami w warstwie skrawanej: wtrąceniami, zmiennością grubości warstwy skrawanej,
- samowzbudne – bez udziału zmiennych obciążeń zewnętrznych, pojawiające się w pewnych granicznych warunkach pracy narzędzia.

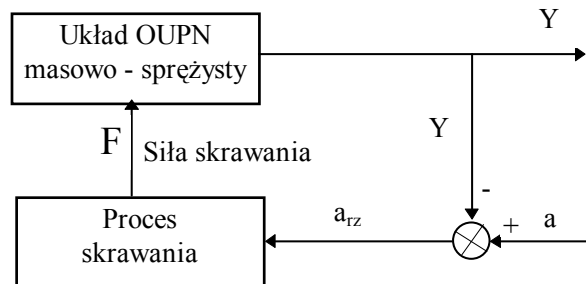
Bezpośredni wpływ na zmianę parametrów skrawania (wahania posuwu), trwałość ostrza (doraźne ubytki) oraz jakość otrzymanej powierzchni (widoczne zmiany na powierzchni) mają względne zmiany położenia wierzchołka ostrza i powierzchni obrabianej. Drgania w kierunku prostopadłym do powierzchni obrabianej powodują jak to pokazano na rys.1.29. zmniejszenie grubości i szerokości warstwy skrawanej, w kierunku przeciwnym zaś zwiększenie grubości i szerokości warstwy skrawanej.



Rys.1.29. Wpływ składowej drgań względnych y_{wzgl} na zmiany warstwy skrawanej i geometrii ostrza

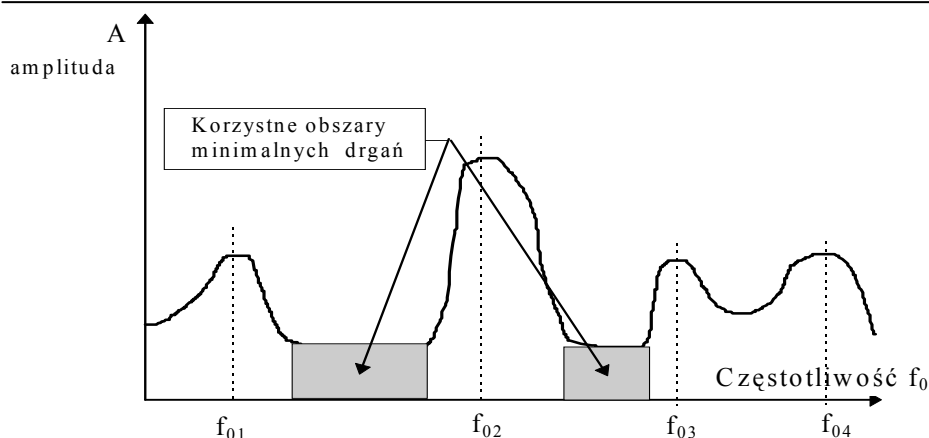
Drgania jak widać z rys.1.29., powodują, że rzeczywiste, chwilowe wartości kątów ostrza także ulegają zmianie. Dla przemieszczenia od osi toczenia w kierunku większej średnicy rośnie kąt natarcia, maleje zaś kąt przyłożenia. Łatwo można udowodnić, że gdy zwrot wektora prędkości przemieszczenia $\frac{dy_{wzgl}}{dt}$ będzie przeciwny do pokazanego na rysunku, zwrócony do osi toczenia, to zmaleje chwilowy kąt natarcia, wzrośnie zaś chwilowy kąt przyłożenia. Po wzbudzeniu drgań, w wyniku tego zmian parametrów skrawania, zachodzi

zmienność sił pochodzących z procesu skrawania. Siły te powodują dalsze drganie w układzie OUPN i wtedy pojawiają się zmienne siły skrawania i od nowa powtarza się cały mechanizm. Układ OUPN, jako masowo – sprężysty, daje sprzężenie zwrotne z procesem skrawania (rys.1.30.).



Rys.1.30. Sprzężenie zwrotne między OUPN i procesem skrawania powodujące zmiany w głębokości skrawania

Ograniczenie skutków występowania drgań, nie związanych z procesem skrawania, uzyskuje się przez stosowanie podkładek wibroizolacyjnych (dostępnych gotowych wyrobów dostosowanych do ciężaru i typu obrabiarki), dokładniejszych i poprawnie zmontowanych podzespołów kinematycznych obrabiarek (zależne to jest od ich producentów). Wpływ drgań wymuszonych, związanych z procesem skrawania, można zminimalizować przez ograniczenie w procesie technologicznym możliwości wystąpienia warstw skrawanych o zmiennej grubości, wyboru obrabiarek z bezstopniową regulacją prędkości obrotowej, wykorzystywanie tłumików hydraulicznych lub mechanicznych. W badaniach amplitudowo częstotliwościowych zachowania się obrabiarki można zarejestrować przebieg pokazany na rys.1.31. Widoczne są na nim obszary o podwyższonych wartościach amplitud. Związane jest to z takim wzbudzeniem elementów OUPN, które powoduje wystąpienie ich częstotliwości rezonansowej.



Rys.1.31. Charakterystyka amplitudowo częstotliwościowej układu OUPN

Charakterystycznymi przyczynami utraty stabilności (wibrostateczności) powodującymi drgania samowzbudne w układzie OUPN są:

- obróbka pofalowanej, w poprzedzającej obróbce lub przejściu narzędzia, powierzchni,
- przesunięcie fazowe siły skrawania (histereza) względem chwilowych rzeczywistych zmian parametrów skrawania oraz parametrów geometrycznych ostrza,
- reakcji sprężystych, bezwładnościowych i dyssypacyjnych układu OUPN.

Zwykle trudno, w użytkowanym układzie OUPN – szczególnie, gdy chodzi o obrabiarkę lub wymagania dotyczące przedmiotu, zmienić jego charakterystykę, dlatego pozostaje niewiele możliwości uniknięcia drgań samowzbudnych. Do znanych i najczęściej wykorzystywanych należą: dokładne ustalanie narzędzia tak, aby krawędź skrawająca znalazła się w osi toczenia lub poniżej w żadnym wypadku powyżej, dobór parametrów skrawania (najczęściej posuwu) tych zakresów, w których widoczne jest zanikanie drgań samowzbudnych oraz stosowanie tzw. eliminatorów drgań.

1.5.2. Czynniki wejściowe i wyjściowe w obróbce skrawaniem

Podczas obróbki skrawaniem dla przedmiotu wyróżnia się kilka powierzchni zależnie od ich usytuowania względem krawędzi skrawającej: powierzchnia obrabiana, to ta, z która w danej chwili jest zdejmowany naddatek, powierzchnia obrobiona, stworzona po jednym pełnym przejściu narzędzia. W kolejnych przejściach powierzchnia obrobiona staje się powierzchnią obrabianą. Chwilowa łącząca je powierzchnia, pozostająca w styku z krawędzią skrawającą, nazywa się powierzchnią skrawania. Warstwą skrawaną nazywa się tę część materiału, którą ostrze oddziela od przedmiotu obrabianego i zamienia w wiór.

Czynniki technologiczne związane są z organizacją procesu technologicznego, zaplecza produkcyjnego, jego jakości i stopnia wyeksploatowania oraz doborem warunków obróbki. Optymalizacja z uwzględnieniem tak wielu czynników, zmiennych w szerokim zakresie, jest bardzo złożonym problemem organizacyjnym.

Czynniki ekonomiczne odnoszą się do zewnętrznych i wewnętrznych ograniczeń na rynku produkcyjnym. Istotne zagadnienie wydajności obróbki w warunkach obniżonych kosztów jednostkowych i umiejętności sprzedaży jest permanentnym czynnikiem pobudzającym aktywność producenta.

Grupa czynników związanych z przedmiotem odnosi się do wymagań stawianych przez konstruktora, a dotyczących położenia względem siebie powierzchni przedmiotu, dokładności ich wymiarów oraz jakości WW z uwzględnieniem ergonomiczności konstrukcji.

Wymienione grupy czynników, przy ich racjonalnym wyborze, pozwalają na wytworzenie przedmiotu i dostarczenie go odbiorcy – klientowi. Ostatecznym celem działania wytwórcy jest dostarczenie wyrobu niezawodnego i taniego w użytkowaniu.

Parametry technologiczne określają ruchy narzędzia i przedmiotu i głębokość skrawania. Wpisywane są one do dokumentacji jako nastawy na obrabiarkach.

Pochodnymi parametrów technologicznych są parametry geometryczno – fizyczne. Są to wielkości charakteryzujące kształt i wymiary pola przekroju (A).

Głębokością skrawania nazywa się, prostopadle mierzoną, odległość od powierzchni obrobionej do obrabianej. W toczeniu wzdłużnym jest to połowa różnicy średnic. W przypadku toczenia poprzecznego jest to wielkość skrócenia przedmiotu. Dla wiercenia w pełnym materiale przyjmuje się połowę średnicy wiercenia, dla powiercania (wiercenia w niepełnym materiale otworu) jest to połowa różnicy średnic.

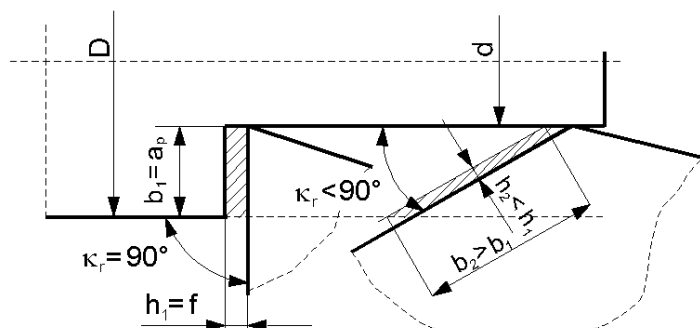
Pole nominalne przekroju poprzecznego A jest równe iloczynowi posuwu f i głębokości skrawania a_p , $A = f \cdot a_p$, wyrażone w mm^2 . Z geometrycznych relacji wynikają proste dwie zależności (rys.1.32.):

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad \text{szerokość warstwy skrawanej} \quad (1.20)$$

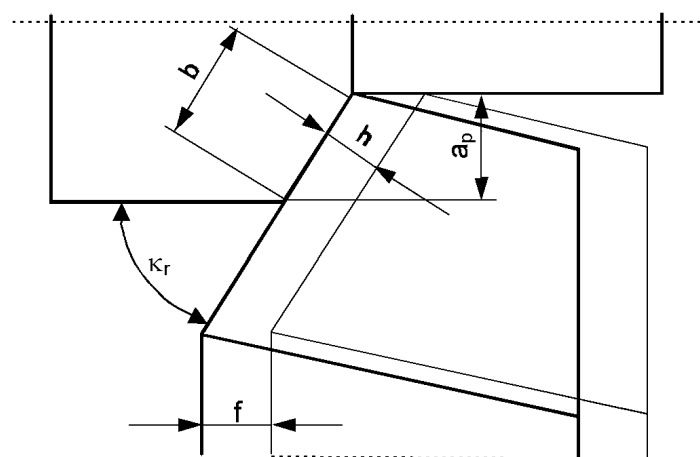
oraz

$$h = f \cdot \sin \kappa_r \quad \text{grubość warstwy skrawanej} \quad (1.21)$$

Dla przypadku, gdy wierzchołek ostrza znajduje się dokładnie w osi przedmiotu i gdy kąty opisujące położenie powierzchni natarcia $\lambda_s = 0$ i $\gamma_o = 0$, pole przekroju poprzecznego jest równe polu nominalnemu (rys.1.33.).



Rys.1.32. Zmienność parametrów geometrycznych warstwy skrawanej



Rys.1.33. Parametry technologiczne i geometryczne warstwy skrawanej

Wynika z wyprowadzonych zależności, że:

$$A = f \cdot a_p = \frac{h}{\sin \kappa_r} \cdot b \cdot \sin \kappa_r = h \cdot b \quad (1.22)$$

mimo, że z zależności tej wyrugowany został kąt κ_r , to należy pamiętać, że jest on parametrem wpływającym na wartość grubości warstwy skrawanej. Dla przykładu, przy posuwie $f = 0,10$ mm i kącie $\kappa_r = 20^\circ$, grubość warstwy

skrawanej wynosi $h = f \cdot \sin \kappa_r = 0,034 \text{ mm}$. Może to być wartość krytyczna, bo często promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n ma wartość równą wyliczonemu h . Uniemożliwia to stabilne skrawanie. I chociaż małe wartości κ_r zmniejszają obciążenie jednostkowe, co jest pożądane, to jednocześnie zbliża do niekorzystnych relacji $\frac{h}{r_n}$.

1.6. Odmiany skrawania

1.6.1. Struganie i dłutowanie

Struganiem nazywamy sposób obróbki skrawaniem, w którym zarówno ruch narzędzia, jak i ruch przedmiotu obrabianego są ruchami prostoliniowymi (rys.1.34.) [47]. Obróbkę taką często rozpatruje się jako szczególny przypadek toczenia powierzchni obrotowej o nieskończenie dużym promieniu krzywizny. Dlatego też budowa i geometria noży strugarskich jest bardzo zbliżona do budowy i geometrii noży tokarskich.

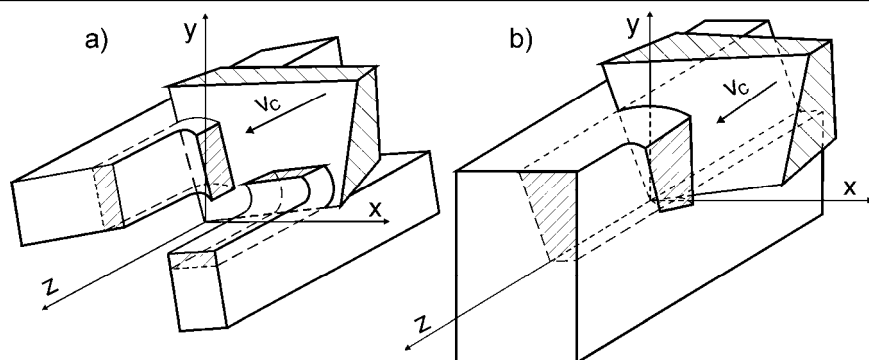
W zależności od tego, czy ruch główny wykonuje narzędzie, czy też przedmiot obrabiany wyróżnić należy dwie odmiany strugania:

- *struganie wzdłużne* – ruchem głównym jest ruch przedmiotu (wraz ze stołem strugarskim), a ruchem pomocniczym jest ruch narzędzia,
- *struganie poprzeczne* – ruchem głównym jest ruch narzędzia, a ruchem pomocniczym ruch przedmiotu (wraz ze stołem strugarskim).

Struganie poprzeczne ma dwie odmiany w zależności od kierunku ruchu głównego, a mianowicie: *poziome* lub *pionowe*. Pionowe struganie przyjęło się określać mianem **dłutowania**.

Noże dłutownicze charakteryzuje przeważnie wąska część robocza oraz wydłużona część chwytowa, której długość dochodzi niekiedy nawet do ok. 600 mm. W odniesieniu do noży strugarskich, których geometria ostrza rozważana w układzie narzędzia, nie różni się położeniem płaszczyzn odniesienia w porównaniu z nożami tokarskimi. Noże dłutownicze różnią się pod tym względem jedynie w kwestii płaszczyzny podstawowej P_r , która jest prostopadła do osi trzonka noża. Pozostałe płaszczyzny odniesienia orientujemy podobnie jak w nożach tokarskich (zobacz rys.1.9.).

Noże dłutownicze przeznaczone są przeważnie do wykonywania różnego rodzaju otworów wielokątnych, rowków wpustowych, otworów i powierzchni zewnętrznych o różnych kształtach (np. uzębień kół zębatych metodą Fellows'a lub Maaga).



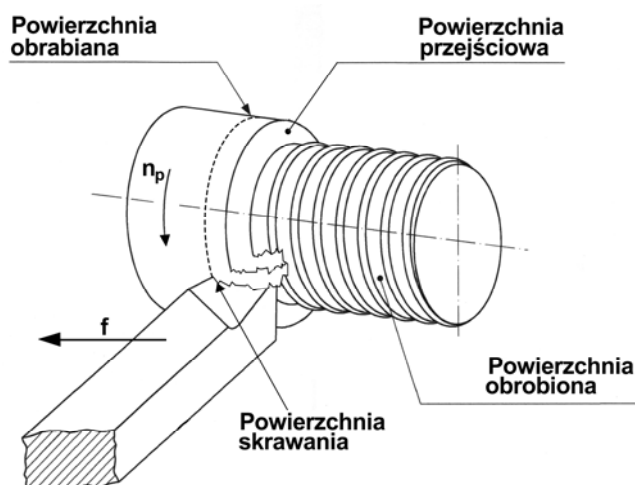
Rys.1.34. Schemat pracy ostrza noża strugarskiego

1.6.2. Toczenie

Zasadniczą cechą procesu **toczenia** (rys.1.35.) jest właściwe kojarzenie ruchu obrotowego przedmiotu obrabianego (PO) i ruchu liniowego narzędzia, aby w konsekwencji nadać PO prawidłowy kształt i wymiary w warunkach skrawania uzasadnionego technicznie i ekonomicznie.

W procesie toczenia mamy do czynienia z ruchami: *obrotowymi*, *prostoliniowymi*, *skośnymi* oraz *krzywoliniowymi*. Pod względem technologicznym dzielą się te ruchy na: *główne robocze* – w przypadku toczenia jest to ruch obrotowy przedmiotu obrabianego, *pomocnicze robocze (posuwowe)* – ruch liniowy narzędzia, *ustawcze* – zwane ruchami przygotowawczymi, których celem jest przygotowanie do ruchów wywołujących pracę skrawania.

Obróbka toczeniem odbywa się najczęściej w warunkach skrawania nieswobodnego – występującego w przypadku skrawania, w którym jednocześnie uczestniczą główna i pomocnicza krawędź skrawająca – rzadziej zaś swobodnego, w którym bierze udział tylko główna krawędź ostrza.



Rys.1.35. Toczenie

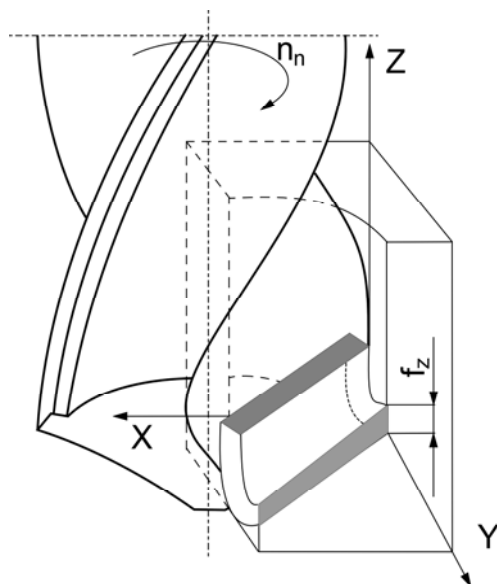
1.6.3. Wiercenie – obróbka otworów

Obróbka otworów w pełnym materiale, którym nie są stawiane specjalne wymagania, wykonywana jest przez **wiercenie** (rys.1.36.). Warunki pracy wiertła są trudniejsze i odbiegają od typowych warunków pracy np. noża tokarskiego, głowicy frezarskiej itp. Dlatego w przypadku wiercenia istotniejsza jest dokładność wymiarowo-kształtowa niż gładkość powierzchni. Wynika to stąd, że w czasie odprowadzania wióra poprzez rowki wiórowe następuje rysowanie powierzchni obrobionej. Ponadto istnieje również wpływ posuwu i „łysinki” wiertła na jakość uzyskanej powierzchni.

Rozpatrując proces wiercenia pod względem kinematyki można go podzielić na cztery główne odmiany:

- narzędzie wykonuje jednocześnie ruch obrotowy i posuwowy, przy nieruchomym przedmiocie obrabianym,
- narzędzie wykonuje tylko ruch posuwowy prostoliniowy, równoległy do osi obrotu przedmiotu, a ruch obrotowy wykonuje przedmiot obrabiany – odmiana ta stosowana jest do obróbki otworów na tokarkach, automatach tokarskich itd.,
- narzędzie wykonuje tylko ruch obrotowy, zaś przedmiot obrabiany – ruch prostoliniowy, równoległy do osi obrotu wiertła. Ta odmiana stosowana jest w czasie obróbki otworów na frezarce pionowej,
- narzędzie zamocowane jest nieruchomo, a ruch obrotowy i posuwowy równocześnie wykonuje przedmiot obrabiany. Odmiana ta nie jest stosowana.

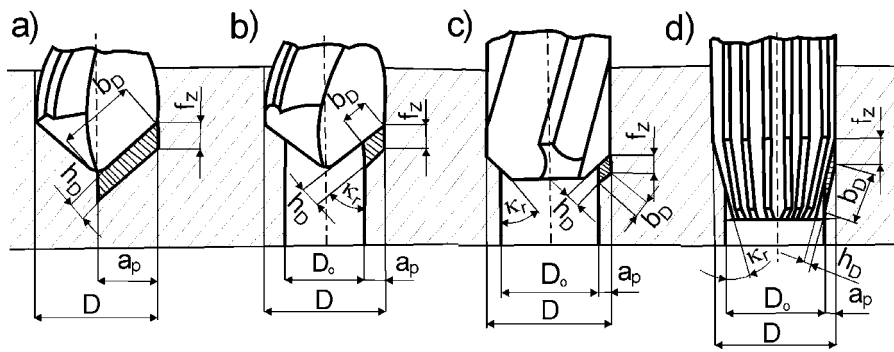
Spśród przedstawionych czterech odmian kinematycznych największe znaczenie ma pierwsza, zwana wierceniem pionowym, ze względu na jej rozpowszechnienie.



Rys.1.36. Wiercenie

Kolejne kryterium podziału wiercenia ze względu na to, czy skrawają całe krawędzie skrawające, czy też tylko ich część, pozwala rozróżnić:

- a) wiercenie w pełnym materiale, zwane krótko *wierceniem* (rys.1.37. a),
- b) wiercenie wtórne, zwane *powiercaniem* (rys.1.37. b),
- c) *rozwiercanie zgrubne* (rys.1.37. c) – powiększa średnicę otworu, pozwala uzyskać większą dokładność niż wiercenie wtórne,
- d) *rozwiercanie wykańczające* (rys.1.37. d) – stanowi końcowy zabieg obróbki otworu, przeprowadzany po wierceniu i rozwiercaniu zgrubnym.



Rys.1.37. Obróbka otworów dokładnych a) wiercenie, b) powiercanie, c) rozwiercanie zgrubne, d) rozwiercanie wykańczające

Każde z ostrzy skrawających wiertel, rozwiertaków i pogłębiaczy oddziela warstwę skrawaną w sposób zbliżony do pracy pojedynczego ostrza. Wartość posuwu jest sumą posuwów na ostrze, których liczba jest różna dla wieloostrowych narzędzi (wierteł, rozwiertaków i pogłębiaczy).

1.6.4. Frezowanie

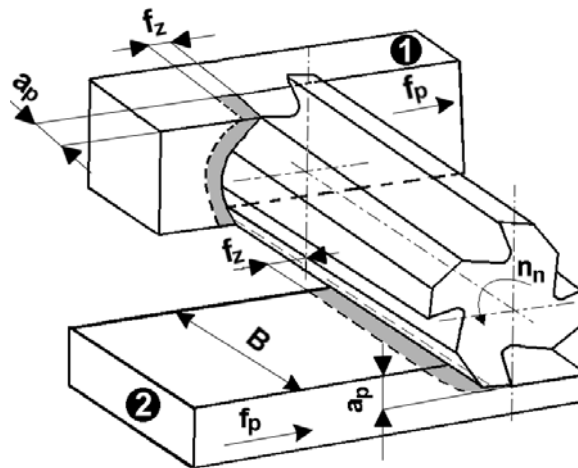
Frezowanie należy do sposobów obróbki skrawaniem, w którym narzędzie wykonuje ruch obrotowy, a przedmiot obrabiany ruch posuwowy prostoliniowy lub krzywoliniowy.

Podstawowy podział w metodach frezowania dotyczy pracy narzędzi. Pod tym względem należy wyróżnić frezowanie:

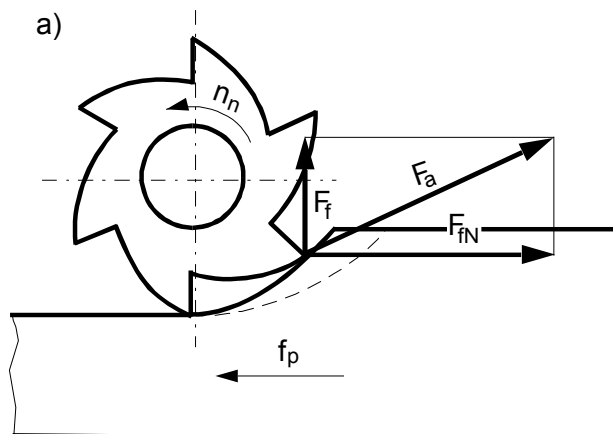
- czołowe (rys.1.38. 1), obróbka wykonywana jest ostrzami znajdującymi się od czoła freza – oś obrotu freza zajmuje położenie prostopadłe w stosunku do powierzchni obrabianej,
- obwodowe (rys.1.38. 2), gdy dominujące skrawanie wykonują ostrza umieszczone na obwodzie freza – oś obrotu freza zajmuje położenie równoległe do powierzchni obrabianej,
- obwodowo–czołowe podczas obróbki ostrzami zarówno na czole jak i obwodzie freza.

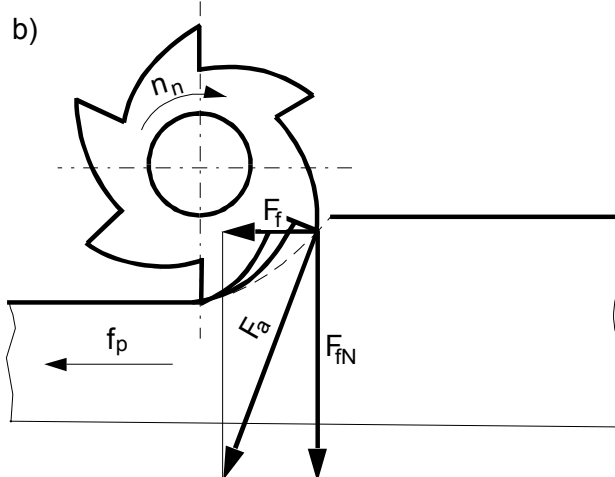
Frezowanie obwodowe (walcowe) rozpatrujemy pod względem dwójakiego układu ruchów narzędzia i przedmiotu obrabianego. W pierwszym układzie, noszącym nazwę *frezowania przeciwbieżnego* (rys.1.39. a), przedmiot obrabiany przesuwa się w kierunku przeciwnym do ruchu pracujących ostrzy freza, w drugim układzie noszącym nazwę *frezowania współbieżnego* (rys.1.39. b), przedmiot obrabiany przesuwa się w kierunku zgodnym z ruchem pracujących ostrzy freza. Wybór właściwego sposobu frezowania obwodowego ma istotny wpływ na przebieg procesu skrawania.

Fakt ten należy wiązać z siłami oddziaływania freza na materiał skrawany (rys.1.39.). Oddziaływanie siły posuwowej F_f w zależności od sposobu frezowania obwodowego oraz luzów na gwincie śruby pociągowej stołu frezarki, może przyspieszyć ruch stołu o wielkość tego luzu (frezowanie współbieżne), przyczyniając się do uszkodzeń narzędzia i obrabiarki. Działanie składowej siły F_{fN} nie jest jednakowe w obu przypadkach frezowania. W czasie frezowania przeciwbieżnego siła ta dąży do oderwania przedmiotu obrabianego od stołu frezarki. Przy frezowaniu współbieżnym siła F_{fN} zawsze dociska przedmiot do stołu frezarki.



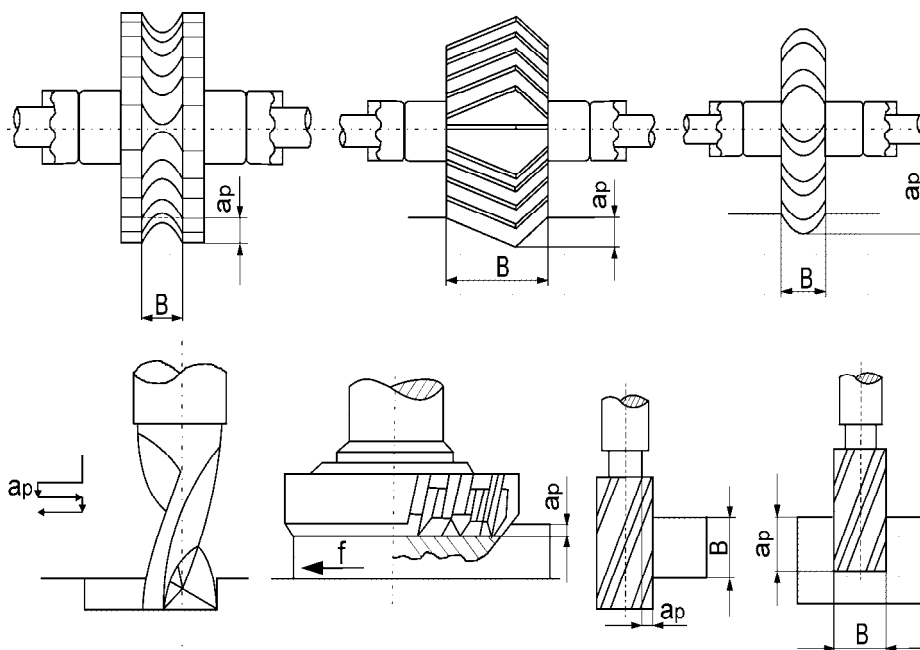
Rys.1.38. Metody frezowania: 1) czołowe, 2) walcowe





Rys.1.39. Frezowanie a) przeciwbieżne, b) współbieżne

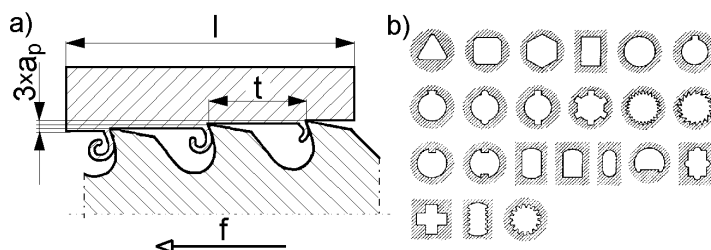
Pracę każdego z ostrzy freza należy traktować jako oddzielną i dlatego posuw na jeden obrót narzędzia jest iloczynem liczby ostrzy i posuwów każdego z nich.



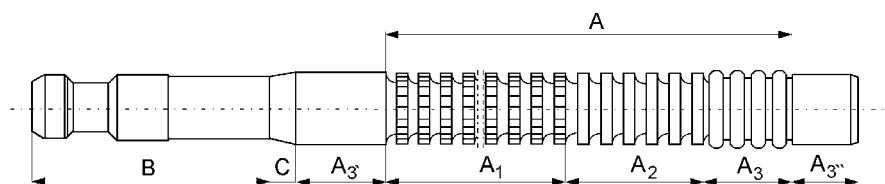
Rys.1.40. Przykłady rozwiązań frezów

1.6.5. Przeciąganie

Przeciagacz jest narzędziem o dużej liczbie ostrzy (rys.1.42.). Przy długości pojedynczego przeciagacza, tak zwanej „szpilki”, dochodzącej do 1500 mm, liczba ostrzy dochodzi do kilkuset. Każde z tych ostrzy porusza się prostoliniowo bez ruchu posuwowego. Jest to ruch główny przeciagacza. Zapewnienie ciągłości obróbki odbywa się poprzez usuwanie materiału przez kolejne sekcje ostrzy (rys.1.41. a), których krawędzie skrawające znajdują się na większej średnicy aniżeli poprzednie. Cechą szczególną przeciagaczy jest gromadzenie wiórów w przestrzeni między ostrzami. Przeciagacze należą do grupy narzędzi specjalnych, ponieważ odległość t między sąsiednimi ostrzami (podziałka) jest uzależniona od długości l przeciaganej powierzchni.



Rys.1.41. a) Zasada pracy przeciagacza, b) kształty uzyskiwanych otworów poprzez przeciąganie



Rys.1.42. Przykład konstrukcji przeciagacza

gdzie: A – część robocza, B – część chwytowa, C – stożek przejściowy, A_3' – prowadzenie przednie, A_1 – część skrawająca zgrubnie, A_2 – ostrza wykańczające, A_3 – część wygładzająca zapasowa, A_3'' – prowadzenie tylne.

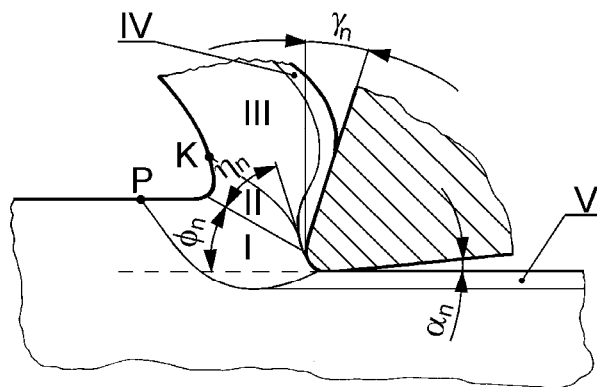
Przeciagacze znajdują zastosowanie w produkcji masowej i wielkoseryjnej i cechuje je wiele zalet:

- duża wydajność,
- duża dokładność obróbki i duża gładkość powierzchni obrobionej,
- duża trwałość ostrzy narzędzia,
- niskie koszty narzędziowe jednostkowe przypadające na jedną operację przeciagania pomimo wysokiej ceny samego narzędzia.

2. Wiadomości o oddzielaniu materiału

Proces skrawania polega na mechanicznym oddzieleniu przez ostrze narzędzia materiału warstwy skrawanej i przetworzeniu go w wiór. To oddzielenie materiału warstwy skrawanej jest procesem bardzo złożonym. Odbywa się w wyniku powstających w tym materiale odkształceń sprężystych i plastycznych, przy zmiennych i wysokich temperaturach obszaru skrawania, przy istnieniu sił tarcia, zjawiska spęczania i utwardzania wióra, ścierania się ostrza, powstającego i zanikającego narostu na ostrzu narzędzia itd.

Wszystkie te zjawiska wzajemnie na siebie oddziałują i co ważne nie zachodzą w sposób stabilny i monotoniczny. Z uzyskanych dotychczas badań wynika, że proces tworzenia wióra wykazuje okresowość narastania naprężeń i odkształceń, którym towarzyszą poślizgi dochodzące do zewnętrznej granicy obszaru odkształceń (rys. 2.1.) – linia PK.



Rys. 2.1. Strefa tworzenia wióra

gdzie: η_n – kąt zgniotu, ϕ_n – kąt ścinania,

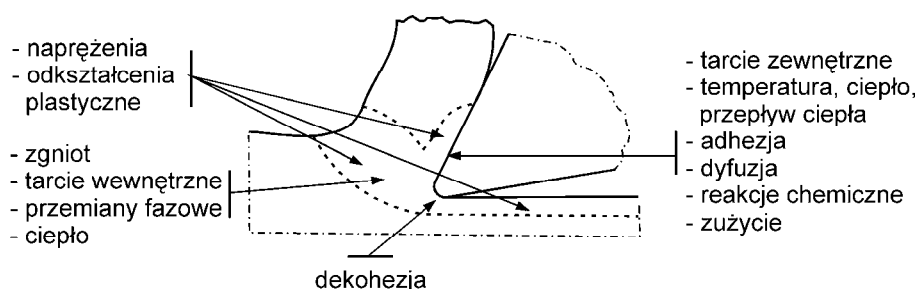
α_n – normalny kąt przyłożenia, γ_n – normalny kąt natarcia

Pod wpływem nacisku ostrza na materiał warstwy skrawanej, pojawiają się najpierw odkształcenia sprężyste tego materiału, a po przekroczeniu granicy odkształceń sprężystych odkształcenia trwałe, spowodowane zjawiskiem poślizgu.

Z punktu widzenia termodynamiki procesów nieodwracalnych, do których zaliczyć możemy odkształcenia plastyczne, przebiegają one w bardzo złożonych

warunkach niejednorodnego stanu naprężeń (rys. 2.2.), a objawia się to pojawieniem pięciu różnych strumieni energii na:

1. uwolnienie odkształceń sprężystych,
2. powstawanie mikropęknięć czyli utratę stateczności,
3. rozprawianie strumieni ciepła,
4. procesów dyfuzyjnych czyli przenoszenia mas,
5. namnażania i przemieszczania dyslokacji.



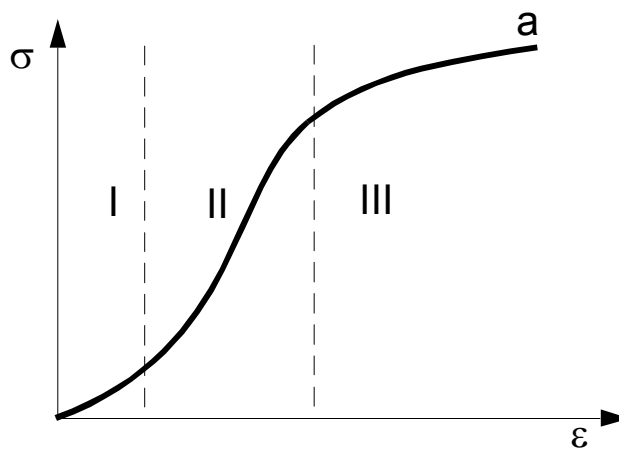
Rys. 2.2. Klasyfikacja procesów elementarnych

Wzajemne oddziaływanie tych konkurujących strumieni energii określa zapoczątkowanie i dalszy przebieg odkształceń plastycznych. Wiadomo, że prawdopodobieństwo zadziałania każdego z pięciu strumieni jest tym większe im mniej wymaga on energii i im krótszy jest czas relaksacji. Przy jednakowych wymaganiach energetycznych decyduje krótszy czas relaksacji. W obszarze niskich temperatur, od około 30 do 60 K, dominujący dla odkształcenia plastycznego jest efekt przewodnictwa cieplnego (około 100 razy wyższy aniżeli w temperaturze 293 K). Intensywne schładzanie strefy odkształceń plastycznych powoduje zahamowanie narastanie zmian plastycznych i pojawienie się zjawiska pęknięcia. Umożliwia to skrawanie cienkich warstw. Procesy rozwijania i ruchu dyslokacji są decydujące dla średnich temperatur. Zachodzące podczas odkształcenia plastycznego przemieszczania dyslokacji – defektów liniowych struktury krystalicznej – w płaszczyznach poślizgu zależą od stanu naprężeń i mogą zachodzić w dwóch różnych systemach poślizgu. System poślizgu to płaszczyzna i kierunek ruchu dyslokacji w sieci krystalicznej. Możliwy jest ruch dyslokacji w jednej płaszczyźnie a także ruch dyslokacji w kierunku prostopadłym do płaszczyzny poślizgu polegający na wspinaniu dyslokacji.

Ruch dyslokacji powoduje „kurczenie” lub „wydłużanie” płaszczyzny poślizgu w wyniku dyfuzji defektów punktowych do rdzenia dyslokacji. Wspinanie zaś umożliwia przechodzenie dyslokacji na inne płaszczyzny poślizgu. Proces jest powolny i wymaga aktywacji cieplnej. Przy obróbce wszelkich stopów, ruch dyslokacji może być hamowany przez atomy zanieczyszczeń (atmosfery Cottrell), wydzielienia dyspersyjne, bądź

przestrzenne układy sieci dyslokacji przy ich rosnącej i dużej gęstości. Zablokowanie dyslokacji objawia się umocnieniem plastycznym. Jeżeli w płaszczyźnie poślizgu znajdują się przynajmniej dwa punkty kotwiczące dyslokacje to może powstać nowe źródło dyslokacji i w wyniku prowadzi to do dalszego wzrostu gęstości dyslokacji w trakcie odkształcenia plastycznego.

Dane z literatury wskazują, że gęstość dyslokacji w próbce wyżarzona wynosi przykładowo $10^{-7} [\text{l}/\text{cm}^2]$ i wzrasta po odkształceniu metalu do $10^{12} [\text{l}/\text{cm}^2]$. W rzeczywistych warunkach proces jest bardziej złożony, ponieważ mechanika zmian w obszarze odkształcania przebiega nie tylko nieliniowo, ale także dyskretnie i należy uwzględnić przy jego opisie teorię katastrof. Taka pogłębiona analiza teorii skrawania wykracza poza ramy tego podręcznika.



Rys. 2.3. Typowe krzywe przebiegu $\sigma = f(\epsilon)$

Podczas badań wytrzymałościowych stwierdzono występowanie trzech odmiennych stanów mechanicznych, odkształcanego materiału, w zależności od stadium obciążenia (zobacz rys. 2.3.):

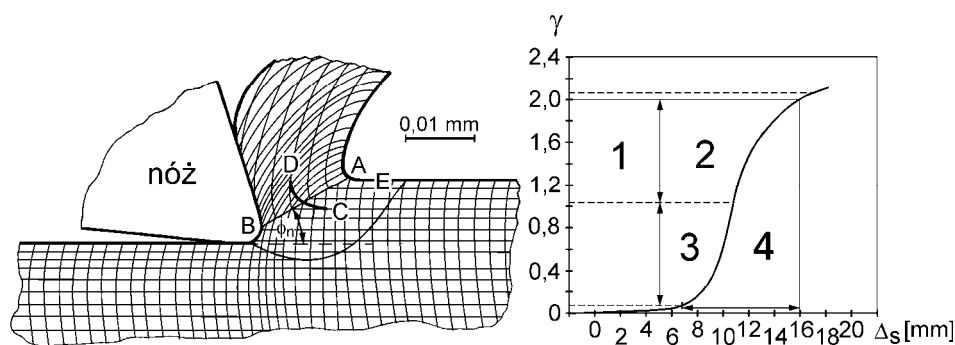
- I. Stadium, małych odkształceń plastycznych i związana z tym niska gęstość dyslokacji i zachodzących długich poślizgów w jednym systemie.
- II. Stadium, dużego umocnienia plastycznego, objawiająca się wzrostem gęstości dyslokacji z krótkimi poślizgami, hamowaniem dyslokacji oraz włączaniem się kolejnych systemów poślizgu i tworzeniem przestrzennej gęstej sieci dyslokacji.
- III. Stadium, po osiągnięciu poziomu energii wewnętrznej i niestabilności struktury prowadzącej do wspinania się dyslokacji i przechodzenie na

nieblokowane płaszczyzny poślizgu ulegając anihilacji. W nowej konfiguracji przestrzennej dyslokacji powstają nowe możliwości dalszego odkształcenia. Narastanie odkształcenia nie powoduje już tak intensywnego wzrostu gęstości dyslokacji, powodując także nieznaczne umocnienie plastyczne.

W wysokich temperaturach (bliskich $0,95T_{\text{top}}$ temperatury topnienia) decydujący jest strumień dyfuzji, która jest o kilka rzędów intensywniejsza niż przy średnich temperaturach. Odkształcenia przebiegają przy zmiennych, w wyniku przemieszczania mas składników, właściwościach materiału skrawanego.

2.1. Formowanie wiórów

Od dziesiątków lat prowadzone są obserwacje związane z przebiegiem procesu formowania wióra. Najczęściej w warunkach skrawania pokazanych na rys. 2.4. mierzono, odkształcenia naniesionej siatki lub z wykorzystaniem bardziej wyrafinowanych metod rentgenowskich zmiany w strukturze krystalicznej materiału zamienionego w wiór (rys. 2.5.)



Rys. 2.4. Odkształcenie w strefie tworzenia wióra

AB – płaszczyzna ścinania, CD – odcinek pomiaru odkształcenia, ϕ_n – kąt ścinania, E – dolna granica strefy tworzenia wióra, 1 – strefa 50% całkowitej deformacji, 2 i 3 – strefa 45% całkowitej deformacji, 4 – strefa całkowitej deformacji oraz Δs – odległości między punktami pomiaru na odcinku CD. Parametry skrawania: $\gamma_n = 20^\circ$, $h_i = 0,0254\text{mm}$, $v_c = 170\text{m/min}$.

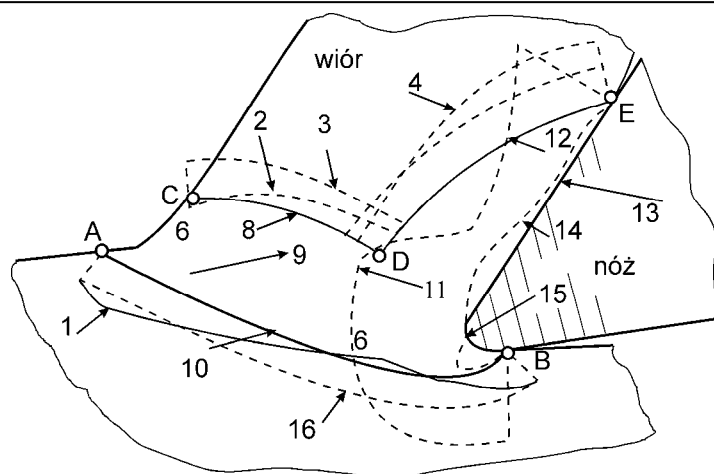
Widoczna jest odkształcona, naniesiona wcześniej na boczną powierzchnię próbki, siatka prostokątna. Przytoczone dane wartości odkształcenia postaciowego zmierzone dla punktów na odcinku CD o długości około 0,4 mm wskazują na nieliniowy przebieg jego zmian. Początek zdecydowanych zmian następuje w otoczeniu linii AB. Dla przytoczonych danych największe odkształcenie postaciowe wynosiło $\gamma = 2$. Połowa z tej wartości wystąpiła w

przekroju AB. W punktach leżących za tym przekrojem odkształcenie rosło do maksymalnego nieliniowo, ale w sposób ciągły.

Wyznaczone metodami rentgenowskimi naprężenia na granicy strefy odkształceń plastycznych i w wiórze wskazują na występowaniu wielu różnych obszarów z uwagi na wielkość jak również ich rozkład (rys. 2.5.)

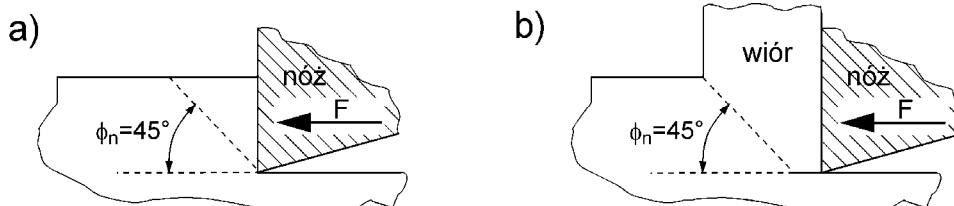
Opisane wyniki badań eksperymentalnych wymagały opracowania modelu teoretycznego i analitycznego, według którego mogło dochodzić do obserwowanych zmian w strefie skrawania. Początkowo, zdążano do wyobrażenia kolejnych etapów przechodzenia materiału do postaci wióra. Na rys. 2.6. przedstawiono takie proste wyobrażenie.

Istotnym parametrem charakteryzującym tworzenie wióra jest wielkość jego odkształcenia plastycznego i zgniot. Pojęcie odkształcenia dotyczy geometrycznej zmiany kształtu i objętości elementu, natomiast zgniot to stan fizyczny struktury odkształconego materiału. Odkształcenie powoduje wzrost twardości. Efekt zgniotu w strefie tworzenia wióra można zarejestrować drogą pomiaru mikrotwardości na powierzchni bocznej próbki nasady wióra. Linie o podobnej mikrotwardości przebiegają w większości przypadków w poprzek wióra. Charakterystyczne jest również widoczne przegięcie tych linii w kierunku stycznym do podstawy wióra.



Rys. 2.5. Naprężenia i siły na granicach strefy plastycznego formowania wióra

1 – naprężenie hydrostatyczne wzdłuż AB, 2 – naprężenie hydrostatyczne wzdłuż CD, 3 – naprężenia styczne wzdłuż CD, 4 – naprężenia hydrostatyczne wzdłuż DE, 5 – naprężenia styczne wzdłuż DE, 8 – siła działająca na CD, 9 – siła wypadkowa oporów skrawania, 10 – siła działająca na AB, 11 – naprężenia normalne na powierzchni noża, 12 – siła działająca na DE, 13 – siła działająca na powierzchni noża, 14 – naprężenia ścinania na powierzchni noża, 15 – punkt „martwy”, 16 – naprężenie styczne deformacji plastycznej wzdłuż AB



**Rys. 2.6. Płaszczyzna ścinania uskoku materiału będącego na drodze noża (a).
Powierzchnia ścinania przy tworzeniu wióra (b)**

Klasyczne podejście w teorii skrawania zakłada, że powstanie wióra jest wynikiem kolejno realizowanych procesów ściskania i ścinania (poślizgu) [17]. Przyjmuje się w konsekwencji, że stan naprężeń w pierwotnej strefie odkształceń plastycznych odpowiada prostemu ścinaniu od działania siły składowej poślizgu F_{sh} z nałożonym równomiernie ściskaniem pod wpływem siły składowej normalnej poślizgu F_{shN} (rys. 2.7.).

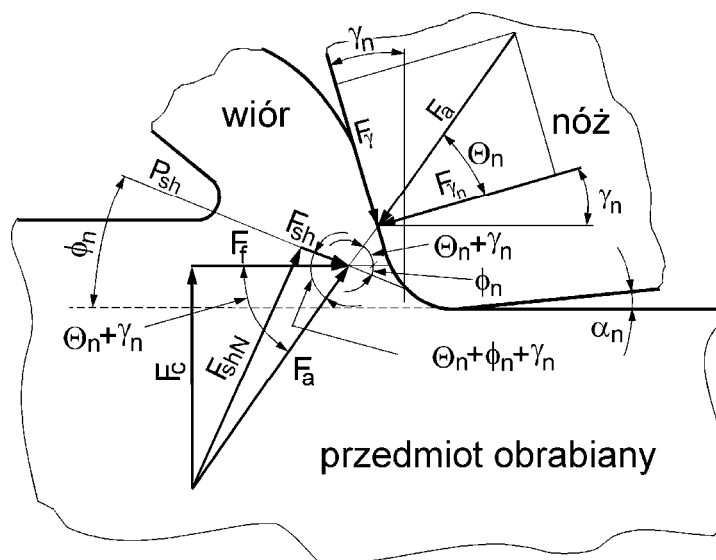
Takie przedstawienie sił wywieranych przez narzędzie na przedmiot obrabiany (PO), daje możliwość oszacowania naprężeń w strefie tworzenia się wióra w obrębie umownej płaszczyzny poślizgu P_{sh} .

$$\sigma_s = \frac{F_{shN}}{A_{sh}} = \frac{F_a \cdot \sin \phi_n \cdot \sin(\phi_n + \Theta_n + |\gamma_n|)}{A_d} \quad (2.1)$$

gdzie:

A_{sh} – pole powierzchni płaszczyzny poślizgu,

A_d – pole powierzchni przekroju poprzecznego warstwy skrawanej



Rys. 2.7. Rozkład sił tworzenia wióra

Jednak wartość naprężeń obliczona ze wzoru (2.1) okazuje się być większa o około 20%, w stosunku do wartości uzyskiwanych z pomiaru [47]. Powodem tego, jak ogólnie wiadomo jest złożony stan naprężeń w procesie skrawania. W celu wyrównania tych różnic, wprowadza się w odpowiedniej płaszczyźnie poślizgu współczynnik zmniejszający wartość kąta ścinania ϕ_n .

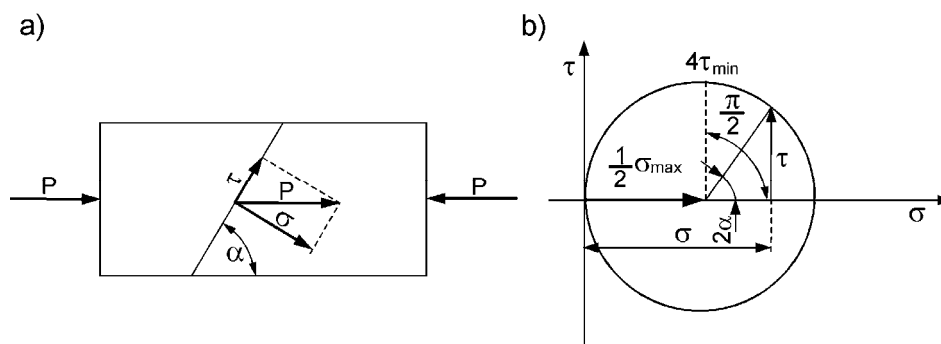
Płaszczyzny te związane są ze strefami odkształceń plastycznych (zobacz rys. 2.1.). Tak, więc z układu linii odkształceń wynika, że w obszarze tworzenia wióra istnieje nie jedna linia poślizgu, lecz jest ich wiele.

Problemy plastycznego formowania wióra

W analizach skrawania przyjmowane jest uproszczenie, że materiał jest doskonale plastyczny, czyli, że:

- materiał jest mechanicznie jednorodny i izotropowy,
- granica plastyczności jest niezależna od szybkości odkształcenia i temperatury,
- naprężenia hydrostatyczne nie zmieniają granicy plastyczności.

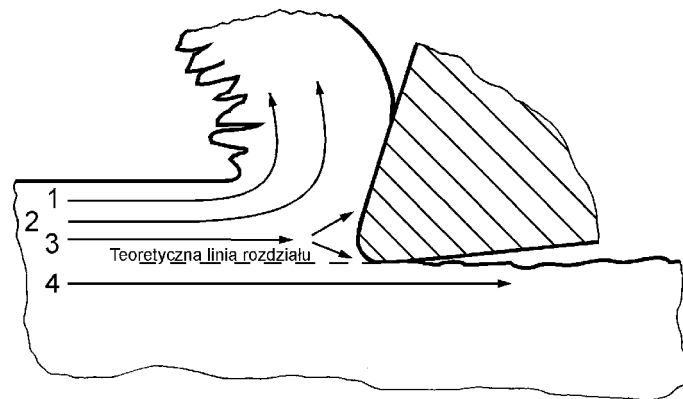
Dla wyprowadzenia modelu skrawania materiału o własnościach doskonale plastycznych, wykorzystywano przy określaniu stanu naprężeń, koło Mohra. Wyznaczone z jego pomocą maksymalne naprężenia ścinające występują w przekroju pod kątem $\frac{\pi}{4}$ do kierunku siły ściskania (rys. 2.8.). Podobnego stanu należałoby oczekiwać w obszarze ścinania w strefie tworzenia wióra (zobacz rys. 2.6.).



Rys. 2.8. Analiza naprężeń z koła Mohra

Wystąpienie jednak tylko jednej płaszczyzny, w której następowałoby ścinanie jest niemożliwe z teoretycznego punktu widzenia. Szybkość odkształceń musiałaby wynosić nieskończoność. Narastanie stopnia odkształcenia musi zachodzić zatem na określonej drodze – po której przemieszcza się przez strefę skrawania – rozpatrywany element materiału. Skrawany stop, jak wspomniano, ma własności daleko odbiegające od założeń dla materiału doskonale plastycznego – są one raczej wypadkową własności mechanicznych poszczególnych jego składników. Wszystkie te złożone uwarunkowania spowodowały, że od dziesiątków lat prowadzone prace nad stworzeniem teorii oddzielania dały jedynie modele o dużym stopniu uproszczenia. Dla każdego z czterech, wydzielonych myślowo, z warstwy skrawanej elementów leżących odpowiednio:

1. pod powierzchnią obrabianą,
 2. w środkowej części warstwy skrawanej,
 3. w bezpośrednim otoczeniu krawędzi skrawającej,
 4. pod teoretyczną linią rozdziału,
- istnieją nieco odmienne warunki towarzyszące ich przejściu przez strefę skrawania (rys. 2.9.).



Rys. 2.9. Przeszczenia wydzielonych elementów warstwy skrawanej

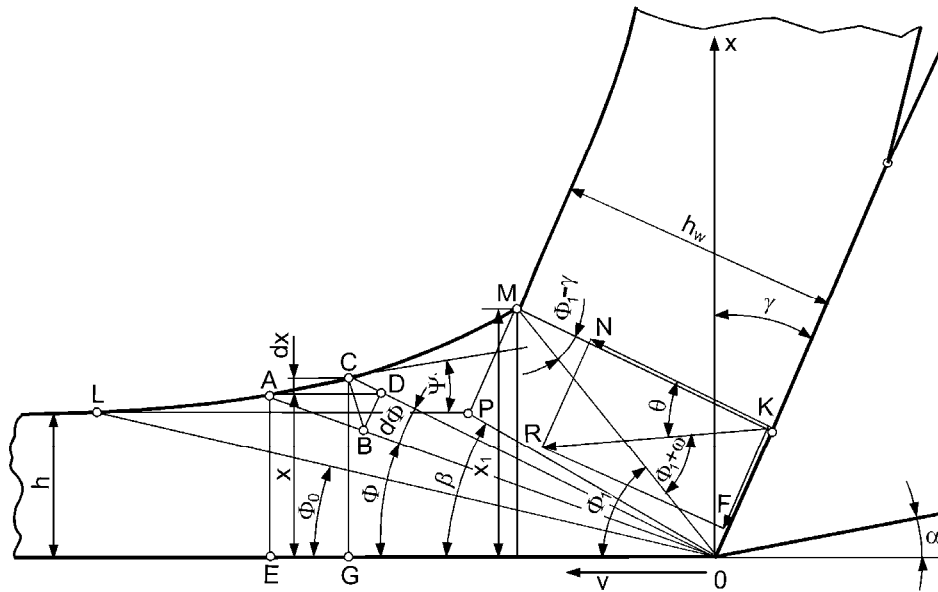
Pierwszy porusza się w warstwie, o której wiadomo, że uszkodzenia spowodowane poprzedzającymi działaniami na tę powierzchnię sprzyjają wzrostowi gęstości dyslokacji na powierzchni zewnętrznej.

Drugi zaś przepływa w środku grubości warstwy skrawanej, gdzie zjawiska odkształceń mają, intuicyjnie przewidywany, bardziej ustabilizowany przebieg.

Trzeci z nich przemieszcza się w obszarze znacznych zmian, spowodowanych obrotem i wyginaniem ziaren materiału w bezpośrednim otoczeniu krawędzi skrawającej, powodujących zaistnienie ogromnej liczby dyslokacji i poślizgów. Niestabilność zachowania się tego elementu polega na dwóch możliwych kierunkach przemieszczenia: do wióra lub w stronę powierzchni obrobionej.

Czwarty przemieszcza się do powierzchni obrobionej przedmiotu pod zaokrągleniem krawędzi skrawającej.

W jednej z prac [45] autor przedstawił analityczny model odkształceń właśnie dla pierwszego elementu w pobliżu powierzchni swobodnej warstwy skrawanej. Przyjął układ współrzędnych prostokątnych z początkiem na krawędzi skrawającej (rys. 2.10.).



Rys. 2.10. Model skrawania wg [45]

Na krawędzi skrawającej, dla uproszczenia, pominięty został promień r_n . Oś Z pokrywała się z prędkością skrawania, a oś X była prostopadła do powierzchni skrawania. Zadanie analityczne polegało na wyznaczeniu kąta ϕ , pochylenia płaszczyzny poślizgu, względem osi Z. W płaszczyźnie OA, dla dowolnego punktu $A(x, \phi)$ na krzywej LM, wyznaczono przemieszczenie ε , które przy względnie dużych odkształceniach określa tangens kąta obrotu prostej, prostopadłej do płaszczyzny poślizgu.

Odpowiednio do danych z rys. 2.9.

$$\varepsilon = \frac{CD}{BD} \quad (2.2)$$

Gdyby nie zachodziło odkształcenie plastyczne w warstwie skrawanej to krzywa LM pozostałaby prostą LP. Odkształcenie plastyczne zaś powoduje, że odcinek AD ulega obrotowi i jest krzywą AC, a prosta BD, prostopadła do OA podlega obrotowi o kąt DBC i zajmuje położenie BC.

Dalsze rozważania miały charakter uproszczony. Jeżeli punkt $C(x + dx; \phi + d\phi)$ znajduje się w odległości różniczkowalnie małej od punktu A, to można przyjąć, że ułamek CB/BD jest równy tangensowi kąta DBC. Odpowiednio do danych z rysunku otrzymujemy wyrażenia:

$$BD = OD \cdot \sin \phi \quad (2.3)$$

$$CD = \frac{dx}{\sin(\phi + d\phi)} \quad (2.4)$$

ponieważ

$$OD = \frac{x}{\sin(\phi + d\phi)} \quad (2.5)$$

to otrzymujemy wyrażenie:

$$BD = \frac{x \sin d\phi}{\sin \phi} \quad (2.6)$$

i ostatecznie

$$\varepsilon = \frac{dx}{x \cdot d\Phi} \quad (2.7)$$

po odpowiednich przekształceniach

$$\varepsilon = \operatorname{ctg} \Phi - \operatorname{tg}(\Phi - \gamma_n) \quad (2.8)$$

W innej pracy wykorzystano wiedzę o dyslokacjach do opracowania modelu strefy skrawania i przeanalizowano odkształcenie wydzielonego elementu znajdującego się w połowie grubości warstwy skrawanej. Przyjęto, że energia ścinania podczas skrawania składa się z dwóch części. Pierwszej niezależnej od własności fizycznych materiału skrawanego oraz drugiej związanej z intensywnością mechanizmu dyslokacji. Nieciągłość odkształcania i odmiennosć stanu plastycznego w obszarze umacniania oraz w otoczeniu płaszczyzny ścinania pozwala na podzielenie całkowitego odkształcenia na składowe;

ε_k – pochodzące od przechodzenia przez obszar umocnień,

ε_{shf} – dodatkowe zachodzące w płaszczyźnie ścinania.

$$\varepsilon = \varepsilon_k + \varepsilon_{shf} \quad (2.9)$$

Po uwzględnieniu w wyprowadzeniach dwóch zjawisk odkształcania: pierwsze uwzględniające odkształcenie postaciowe ziarna i drugie będące sztywnym obrotem otrzymano, że:

$$\varepsilon = \operatorname{ctg} \Phi - \operatorname{tg}(\Phi_{shf} - \gamma_n) \quad (2.10)$$

Omówione rozważania wskazują na pewne prawidłowości związane z wydatkiem energetycznym ostrza dla wytworzenia wiórów. Postać równania (2.9) jest bardzo uwikłana. Wiadomo, że kąt ścinania Φ jest funkcją tak zwanego współczynnika spęczenia oraz kąta natarcia. Zatem wyprowadzone równania można zapisać w postaci:

$$\varepsilon = \operatorname{ctg} \Phi(k_{sp}, \gamma_n) - \operatorname{tg}(\Phi_{shf}(k_{sp}, \gamma_n) - \gamma_n) \quad (2.11)$$

Z kolei k_{sp} – współczynnik spęczenia jest zależny od kąta ścinania oraz kąta natarcia. Do czasu wyznaczenia z pomocą niezależnych teoretycznych podstaw, którejkolwiek z omawianych wielkości (otrzymywanych eksperymentalnie), wyniki powyższych rozważań stosować należy ostrożnie i odnosić do warunków obróbki w których zostały wyznaczone. W ograniczonym stopniu można je przenosić na nowoczesne materiały konstrukcyjne i narzędziowe.

Przypadek trzeci i czwarty działania krawędzi skrawającej na wydzielone w jej otoczeniu elementy, opisany zostanie w dalszej części skryptu.

2.1.1. Wiór i spęczanie

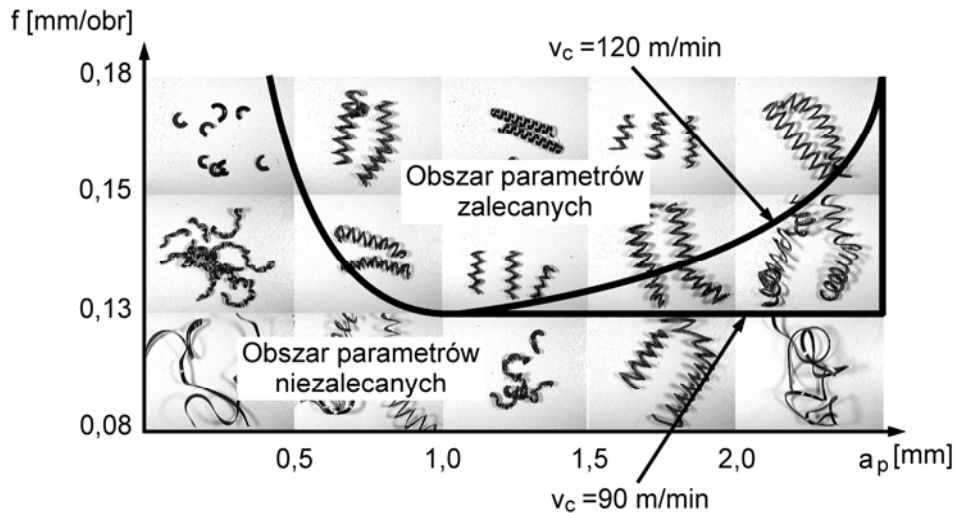
2.1.1.1. Postaci wiórów

Obserwowane zglądy przekrojów wióra wykazywały dla materiałów plastycznych pewne prawidłowości. Wiór zbudowany jest z cienkich płytek o grubości od 1 do 2 μm , choć nie zawsze przebiegających w poprzek wióra, o nasyceniu dyslokacjami odpowiadającym drugiemu stadium i poprzedzielanych cieńszymi, w trzecim stadium odkształcenia, warstewkami w których popłynął metal w płaszczyźnie ścinania. Różna orientacja ziaren względem kierunku skrawania, przy niezmiennych parametrach skrawania, powoduje zmiany kąta ścinania i współczynnika spęczenia wióra. Zauważalny jest brak wpływu parametrów skrawania na charakter budowy wióra a naprężenia ścinające w płaszczyźnie ścinania są stałe jak dla materiału doskonale plastycznego i charakterystyczne dla danego materiału.

Wiadomo także, że rozmiary ziaren w budowie krystalicznej metalu, wpływają na odkształcenie plastyczne gdyż może się ono zmieniać przy przechodzeniu krawędzi skrawającej ostrza od ziarna do ziarna. Dynamika mechanizmu skrawania powoduje, że wiór wykazuje zmienną grubość. Przy bardziej rozdrobnionej, ziarnistej budowie metalu proces skrawania stabilizuje się. Występujące w stopie fazy sprawiają, że proces oddzielania komplikuje się jeszcze bardziej przez zarodnikowanie pęknięć w fazie kruchej i pojawianie się nieciągłości w strefie odkształceń plastycznych. Rozproszona twardsza faza w plastycznej osnowie hamuje dyslokacje i doprowadza to do znacznego umocnienia materiału. Widoczne to jest przy obróbce stali wysokostopowych i austenitycznych.

W podsumowaniu należy podkreślić, że postać wióra nie jest stałą właściwością obrabianego materiału. Postać ta zależy od stanu fizykochemicznego, do jakiego zostaje on doprowadzony. Warunki te zależą od parametrów obróbki; szybkości skrawania (v_e), grubości warstwy skrawanej (h_i), geometrii ostrza (γ, α, κ_r), chłodzenia, materiału narzędzia itp. Podczas skrawania można w łatwy sposób wyróżnić obszary powstawania korzystnej postaci wiórów. Na przykład: dla parametrów wskazanych na wykresie

(rys. 2.11.) podczas skrawania stali 55 ostrzem ze spieku twardego P10, otrzymano w części wióry ciągłe – obszary niezalecane oraz segmentowe – obszary o korzystnej zalecanej ich postaci. Widoczny jest także, może w opisywanym zakresie mniej wyraźny, wpływ prędkości skrawania.

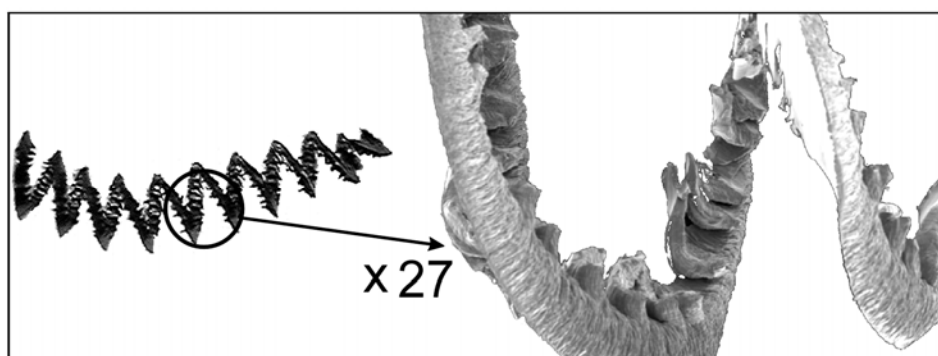


Rys. 2.11. Obszary korzystnych postaci wiórów

Obowiązuje wiele różnych klasyfikacji postaci wiórów. Przykładowa to:

- wiór ciągły – o jednorodnej odkształconej plastycznie strukturze płytkowej,
- wiór schodkowy – odkształcone plastycznie elementy są w widoczny sposób oddzielone płaszczyznami w których okresowo płynie materiał podczas tworzenia wióra (rys. 2.12.),
- wiór elementowy – zbudowany z elementów wióra słabo połączonych powstałych w wyniku pęknięcia, które okresowo dominuje nad plastycznym płynięciem materiału,
- wiór odpryskowy – w postaci oddzielnych przyskających cząstek wióra, powstałych przez kruche pęknięcia.

Właściwości materiału mogą zmieniać się zarówno w głąb warstwy skrawanej jak też wzdłuż drogi ostrza. Spowodowane to jest historią oddziaływań mechanicznych narzędzi na powierzchnię obrabianą w poprzedzających zabiegach i otrzymanymi w wyniku naprężeniami wynikowymi oraz naprężeń między składnikami strukturalnymi materiału powstałych w odkrywanej powierzchni obrobionej.



Rys. 2.12. Widok wióra pod mikroskopem elektronowym

Jak widać materiał skrawany zachowuje się różnie, w odmiennych warunkach odkształcenia i zależnie od warunków skrawania uzyskuje się wióry o różnej budowie. Dlatego wykorzystuje się różne techniki, pomagające otrzymywać korzystne postaci wiórów. Wymienione w tabeli 8 zakłócenia procesu tworzenia wióra wpływają na jego budowę, przez sposób oddziaływania. W narzędziach z wymienną płytką ze spieku twardego stosuje się łamacze wiórów. Ograniczają one długość styku podstawy wióra (zmniejszają ją w stosunku do wyliczonych z zależności 2.17) z powierzchnią natarcia. Wiór ulega wtedy zwinięciu na mniejszym promieniu. Łamacze wiórów są wymienne i dobiera się je do rodzaju materiału obrabianego oraz posuwu f .

Tabela 8. Sposób oddziaływania warunków obróbki na postać wióra [10]

SPÓSÓB ODDZIAŁYWANIA		Wydajność	Urządzenia dodatkowe	Zachowanie właściwości materiału	Skuteczność działania	Konstrukcja narzędzia	Zakres stosowania	Dynamika pracy	Jakość powierzchni
Rozdrabnianie wióra na odcinki o określonej długości	Warunki skrawania	0	3	2	1	2	1	3	2
	Skład materiału	3	3	0	1	2	0	3	3
	Stereogeometria	1	3	2	1	1	1	3	2
	Nagniatanie	1	2	3	3	3	0	2	3
	Przepal. elektr.	3	1	3	3	3	3	3	3
	Metody kinematyczne	Drgan samowzbudnych	2	2	2	2	1	1	1
		Przerywanego posuwu	1	2	3	3	0	0	2
		Wibracje	3	1	3	3	2	2	2
	WPŁYW 0 – ujemny, 1 – częściowo ujemny, 2 – dodatni z zastrz., 3 – dodatni								
	Rozdrabnianie wióra na nieregularne odcinki								

2.1.1.2. Współczynnik spęczenia

W przyjętym prostokątnym, płaskim modelu skrawania, przez krawędź ostrza przepływa materiał skrawany o grubości warstwy skrawanej równej h_D i szerokości skrawania wynoszącej b_D z prędkością skrawania v_e . Objętość materiału wynosi $V = h_D \cdot b_D \cdot v_e$ [mm^3/s]. Odształcenie plastyczne, w przypadku ściskania, powoduje spęczenie materiału. Z uwagi na ciągłą budowę materiału uwzględniającą stałość $V_{skr} = V_w$ objętości skrawanego materiału

$$V = h_D \cdot b_D \cdot v_e \quad (2.12)$$

i wióra

$$V_w = h_w \cdot b_w \cdot v_w, \quad (2.13)$$

przy założeniu, że dla płaskiego modelu sił, szerokość wióra jest równa szerokości warstwy skrawanej $b_w = b_D$, zaś iloraz drogi l i czasu skrawania t jest prędkością skrawania v_e , a prędkość spływu wióra $v_w = l_w/t$ jest ilorazem długości l_w wióra, otrzymanego w tym samym czasie t , to można zapisać, że:

$$h \cdot v_e = h_w \cdot v_w \quad (2.14)$$

i dalej:

$$k_{sp} = \frac{h_D}{h_w} = \frac{lw}{l} \quad (2.15)$$

gdzie:

k_{sp} – nazwano współczynnikiem spęczenia.

Jak widać można wyznaczyć współczynnik spęczenia albo przez pomiar grubości wióra i porównanie go z grubością warstwy skrawanej lub przez porównanie długości wióra otrzymanego na znanej drodze skrawania. W pierwszym przypadku otrzymujemy dane o chwilowych wartościach współczynnika k_{sp} , a przez porównanie długości dowiadujemy się o k_{sp} , ale o uśrednionym na drodze skrawania. Porównywanie wyznaczonych wartości współczynnika spęczenia pozwala ocenić opór skrawania materiału dla różnych warunków skrawania. Może być wykorzystany również do wyliczenia odkształcenia za pomocą znanych z literatury zależności, które dla zmiennej k_{sp} pozwalają wyliczyć kąt ścinania na przykład:

$$\phi = \arctg \frac{\cos \gamma + 0,05 \cdot k_{sp}}{0,9 \cdot k_{sp} - \sin \gamma} \quad (2.16)$$

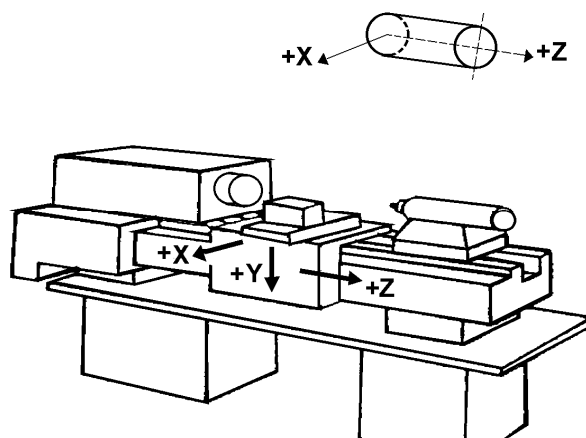
lub długość C – styku wióra z powierzchnią natarcia:

$$C = k \cdot h_w = k \cdot h_D \cdot k_{sp} \quad (2.17)$$

gdzie k jest charakterystyczną stałą, która przyjmuje wartości dla podstawowych materiałów konstrukcyjnych $1 < k < 2,5$ dla k_{sp} od 1 do 20. Wyznaczenie długości styku wióra z powierzchnią natarcia wykorzystywane jest przy projektowaniu rowków na powierzchni natarcia, ułatwiających zwijanie wiórów do korzystnej postaci oraz przy wyposażaniu narzędzi, z wymienną płytką ze spieku twardego, w tak zwane łamacze wiórów.

2.2. Siły i moc skrawania

Opór skrawania – opór odkształceń plastycznych, sprężystych oraz tarcia wewnętrznego i zewnętrznego, charakteryzujący warunki skrawania, pokonywany jest przez siłę skrawania. Przyjęto, że w obróbce skrawaniem mierzone są składowe siły skrawania. Kierunki w układzie prostokątnym, na które rzutowany jest wypadkowy wektor oporu skrawania, zorientowane są w umowny sposób, przykładowo dla tokarki przedstawia to rys. 2.13.



Rys. 2.13. Układ odniesienia dla tokarki

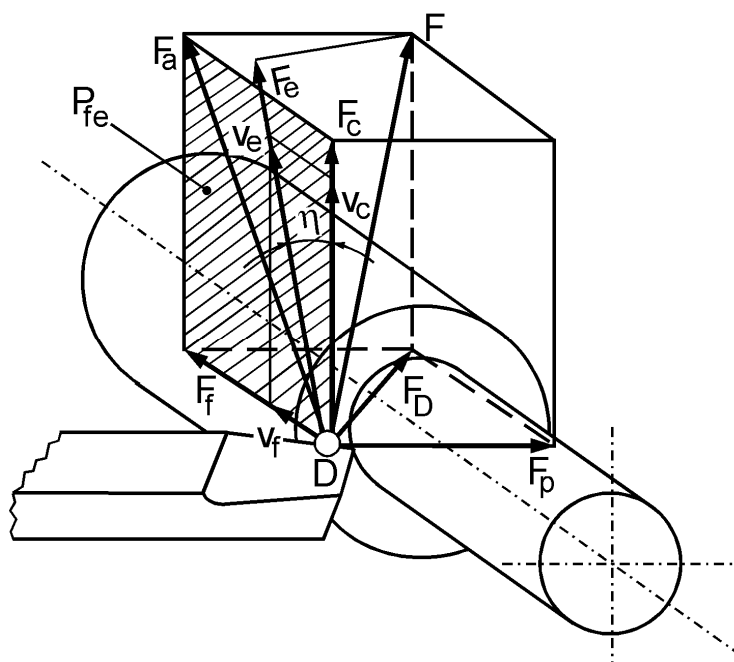
Rzut siły skrawania na kierunek (rys. 2.14.):

- zgodny z kierunkiem posuwu nazwano **posuwowym** F_f ,
- prostopadły do kierunku posuwu nazwano **odporowym** F_p ,
- prostopadły do poprzednich dwóch nazwany **stycznym** F_c .

Ta ostatnia składowa, zależnie od odmiany obróbki nosi nazwę: stycznej, obwodowej lub głównej. Dla toczenia, składowe oporu skrawania F_c, F_f, F_p w przeciętnych warunkach skrawania i gdy $\kappa_r = 45^\circ$, pozostają we względnym stosunku jak $F_c : F_f : F_p = 1 : 0,5 : 0,4$. Proporcje te zmieniają się w pewnym zakresie i dla wymienionych relacji siła skrawania F , która jest pierwiastkiem sumy kwadratów składowych wynosi:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} = \sqrt{1 + 0,5^2 + 0,4^2} = \sqrt{1,41} \approx 1,2 \quad (2.18)$$

czyli jest o około 20% większa od głównej składowej siły skrawania. Nawet dla $F_c : F_f : F_p = 1 : 1 : 1$ wskaźnik wynosi $F = \sqrt{3} \approx 1,7$. Widać z tego, że jest od 20 do 70% większy od głównej składowej oporu skrawani F_c .



Rys. 2.14. Rozkład sił przy toczeniu walcowym

Każda ze składowych oporu skrawania ma wyróżniającą ją rolę w obciążeniu układu OUPN. Najogólniej można przyjąć, że:

- **posuwowa** obciąża układ łożysk wzdłużnych wrzeciona,
- **odporowa** odkształca przedmioty, szczególnie te o cienkościennych i wiotkiej konstrukcji,
- **główna** powoduje zapotrzebowanie mocy napędu głównego obrabiarki.

Moc obrabiarki z uwzględnieniem udziału trzech składowych można wyliczyć z zależności:

$$P_s = \frac{F_c \cdot v_c}{75 \cdot 60 \cdot 1,36} + \frac{F_f \cdot v_f}{6120} + \frac{F_p \cdot v_p}{6120} [\text{kW}] \quad (2.19)$$

gdzie:

F_c, F_f, F_p – składowe siły skrawania w [kG] lub [N/10]

$$v_c = \frac{\pi \cdot D[\text{mm}] \cdot n[\text{obr/min}]}{60 \cdot 1000} \quad [\text{m/min}] \quad (2.20)$$

$$v_p = 0$$

$$v_f = \frac{f[\text{mm/obr}] \cdot n[\text{obr/min}]}{60 \cdot 1000} \quad [\text{m/min}] \quad (2.21)$$

Dla przykładowych warunków skrawania, analiza poszczególnych składników sumy, po uwzględnieniu, że dla toczenia stali:

1. prędkość skrawania dla stali szybko tnących wynosi 55 m/min, dla węglików spiekanych do 150 m/min, spieków ceramicznych do 350 m/min.
2. obrabiarki dysponują napędami dającymi kilka tysięcy obr/min,
3. prędkość w kierunku odporowym $v_p = 0$,
4. składowa odporowa F_p jest bliska zeru dla $\kappa_r = 90^\circ$,

daje wyrażenie (po wyzerowaniu drugiego ułamka ($v_p = 0$) i wyliczeniu na przykład – że dla $D=50\text{mm}$ i $v_c=100\text{m/min}$, wartość $n = 637 \text{ obr/min}$ i dla $f = 0,2 \text{ mm/obr}$ – wartość $v_f \sim 0,127 \text{ m/min}$, wynosi około 1 promila prędkości skrawania v_c , które zatem w pełni wyznacza moc skrawania:

$$P_s = \frac{F_c \cdot v_c}{6120} \quad [\text{kW}]. \quad (2.22)$$

Wyznaczenie mocy skrawania sprowadza się w związku z tym do wyznaczenia prędkości skrawania oraz składowej oporu skrawania F_c , którą opisuje ogólna zależność empiryczna:

$$F_c = C_z \cdot a_p^e \cdot f^u \cdot v_c^t \cdot K_m \cdot K_n \cdot K_r \cdot K_\kappa \cdot K_\gamma \cdot K_{VB} \cdot K_c, \quad (2.23)$$

gdzie oprócz parametrów skrawania uwzględnia się wpływ wielu czynników za pomocą współczynników poprawkowych (zebranych w poradnikach normowania prac skrawaniem). Współczynniki te uwzględniają wpływ materiału obrabianego, materiału narzędzia, promienia wierzchołka, kąta przystawienia i natarcia, zużycie ostrza i rodzaj stosowanej cieczy obróbkowej. Stała C_z uwzględnia pozostałe nie wymienione czynniki, których rola jest mniejsza. Przykładowa postać wyrażenia dla toczenia stali węglikiem spiekany przyjmuje formułę:

$$F_c = 2000 \cdot a_p \cdot f^{0.75} \cdot v_c^{-0.15} \quad [\text{N}], \quad (2.24)$$

gdzie wykładniki $e=1$, $u=0,75$ oraz $t=-0,15$. Wykładniki te są prawdziwe tylko w zakresie zmian parametrów badanych np. $a = (1 \text{ do } 3) \text{ mm}$, $f = (0.08 \text{ do } 0.2) \text{ mm/obr}$ oraz $v_c = (50 \text{ do } 150) \text{ m/min}$.

Metoda eksperymentalna wyznaczania wykładników potęgowych polega na tym, że rejestruje się wartości siły wywołane zmianami obserwowanego

parametru przy ustalonych pozostałych. Funkcję wykładniczą można zlogarytmować:

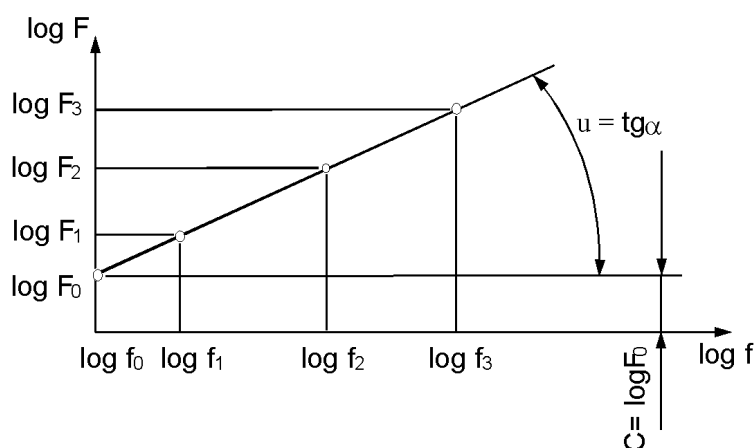
$$\log F_c = \log C_z + e \cdot \log a_p + u \cdot \log f + t \cdot \log v_c \quad (2.25)$$

dla stałych wartości a_p i v_c funkcja dla zmiennej f przyjmuje postać:

$$\log F_c = \log C + u \cdot \log f \quad (2.26)$$

którego graficzną ilustracją w układzie współrzędnych logarytmicznych jest linia prosta $Y = A \cdot x + B$ (rys. 2.15.). Tangens kąta pochylenia linii w układzie podwójnie logarytmicznym jest wartością wykładnika funkcji. Takie postępowanie dla trzech wartości składowych oporu skrawania F_c, F_f, F_p z uwzględnieniem dowolnej liczby parametrów skrawania pozwala wyznaczyć wszystkie niezbędne wartości wykładników potęgowych. Po podstawieniu wszystkich danych do zależności wyznacza się wartość stałej, na przykład

$$C = \frac{F}{f^u}. \quad (2.27)$$



Rys. 2.15. Ilustracja graficzna funkcji wykładniczej $F = C \cdot f^u$

Dla narzędzi dwustrzowych, jakimi są wiertła, zależność na moc skrawania można przekształcić do postaci:

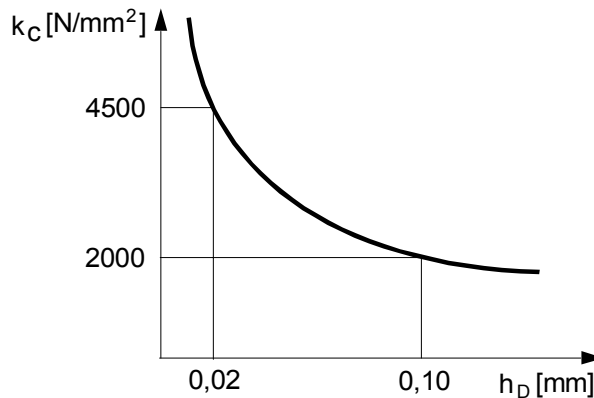
$$P_s = \frac{F_c \cdot v_c}{1000} = \frac{F_c \cdot D_z \cdot \omega}{2 \cdot 1000} = \frac{\pi \cdot M_s \cdot n}{2 \cdot 1000} \quad [\text{kW}] \quad (2.28)$$

gdzie:

D_z [m] – średnica zastępcza na której działa moment od pary sił F_c ,

F_c [N] – wypadkowa siła obwodowa działająca na każdym ostrzu.

Po zmierzeniu wartości składowej siły F_c i podzieleniu przez pole przekroju warstwy skrawanej $A_{skr} = h_D \cdot b_D$ [mm²], otrzymuje się umowną wartość zwaną oporem właściwym. Jest to jednostkowy opór k_c [N/mm²], który jest jednak charakterystyczny tylko dla warunków, w których został wyznaczony. Dla ustalonej szerokości skrawania $b_D = 1$ mm, zmianom grubości warstwy skrawanej h_D towarzyszą zmiany oporu właściwego k_c , jak przykładowo dla obróbki stali pokazano na rys. 2.16. W przypadku obróbki otworów, dla narzędzi do tego wykorzystywanych, charakterystyczna jest zmiana prędkości skrawania od $v_{min} = 0$ do $v_{max} = \pi \cdot D \cdot n$ (rys. 2.17.). Wartości sił zmieniają się w zależności od prędkości skrawania w sposób właściwy dla danej pary materiału skrawanego i narzędziowego. Dla stali obrabianej węglikiem spiekającym ze wzrostem prędkości skrawania do $v_c = (60 - 70)$ mm/min siły rosną, a dla wyższych prędkości maleją z wykładnikiem około $t \approx -15$.

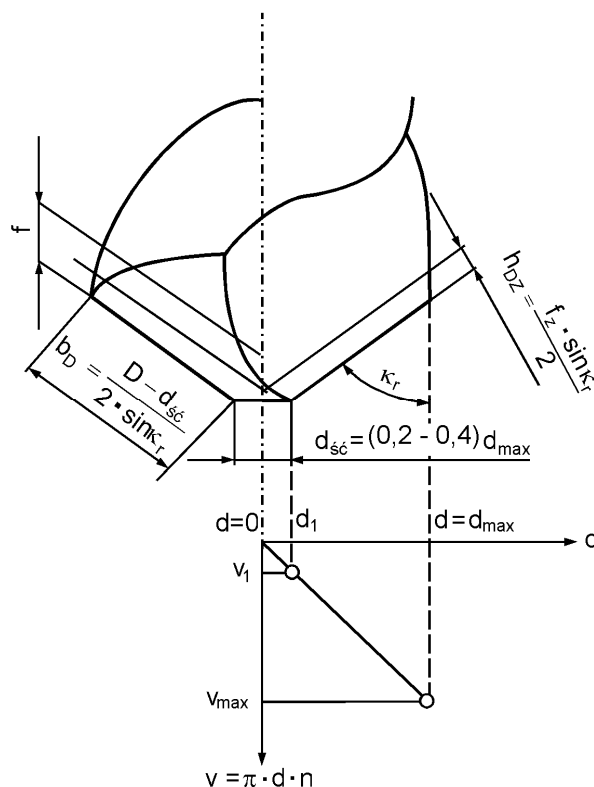


Rys. 2.16. Opór właściwy skrawania

Tak, więc, w omawianym przykładzie moment skrawania, przy przyjętych następujących uproszczeniach, że:

- siła skrawania działa w połowie szerokości warstwy skrawanej przez każde z ostrzy $d_{\acute{s}\acute{c}} + 0,25 \cdot (D - d_{\acute{s}\acute{c}})$,
- wartość siły skrawania jest iloczynem grubości warstwy skrawanej $h_D = \frac{f_z \cdot \sin \kappa_r}{2}$, szerokości warstwy skrawanej $b_D = \frac{0,5 \cdot (D - d_{\acute{s}\acute{c}})}{\sin \kappa_r}$ i oporu właściwego k_c ,

- c) ramię na którym działa moment pary sił pochodzących od obu krawędzi skrawanych jest równe $r = d_{\dot{s}c} + 0,5(D - d_{\dot{s}c})$,
jest iloczynem siły skrawania wyliczonej według b) i ramienia wyliczonego z c)



Rys. 2.17. Zmienność prędkości skrawania w funkcji średnicy wiercenia

Udział ścina w mocy skrawania jest pomijalny z uwagi na bardzo małe ramie działania sił na ścinie. Moment od dwu pomocniczych krawędzi skrawających, często zwanych łysinkami, choć działa na maksymalnej średnicy, to przy niewielkich siłach na nich działających jest także mały.

Omówione zagadnienie skrawania wiertłem wskazuje, że trudne, a może niecelowe jest zbyt precyzyjne analizowanie pracy narzędzia z uwagi na zagadnienie zapotrzebowania mocy skrawania. Do opisu zużycia, chropowatości powierzchni ważna jest jednak wiedza o rozkładzie sił na powierzchniach roboczych ostrza.

2.3. Ciepło skrawania

Szybkie odkształcanie oraz tarcie wióra o powierzchnię natarcia ostrza powodują wydzielanie dużych ilości ciepła. Pomiar temperatury polega najczęściej na rejestracji siły termoelektrycznej STE, wywołanej przez zjawisko termoelektryczne pary metali tworzącej termoelement. Wyróżnia się pomiary metodami:

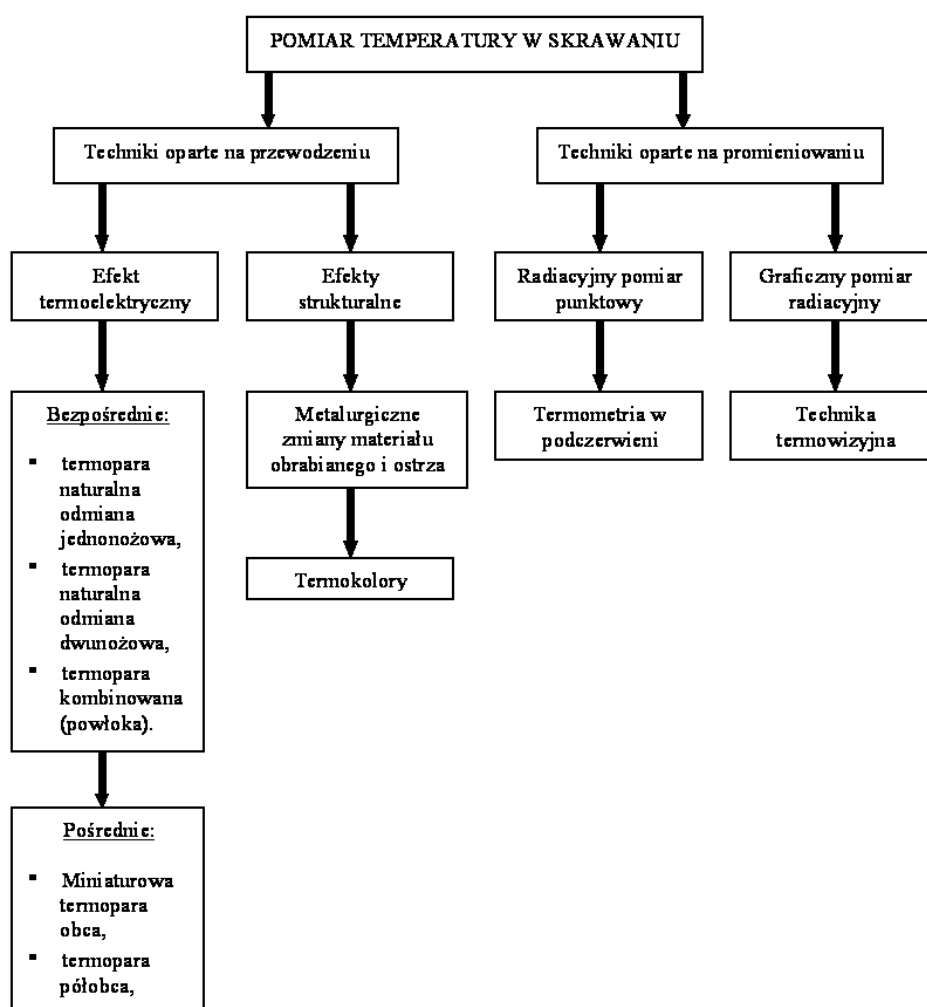
- naturalnymi – termoelementem jest styk materiału obrabianego i narzędzia,
- sztucznymi – termoelementem jest zestaw dwóch różnych, specjalnie dobranych materiałów,
- półsztucznymi – jednym termoelementem jest materiał narzędzia drugim jest na przykład konstantan.

Pomiar siły termoelektrycznej STE jest tym dokładniejszy, im mniejsza jest powierzchnia termoelementu. W praktyce jest to duża powierzchnia około $0,5\text{mm}^2$. Niemożliwa jest dokładna interpretacja wyniku otrzymanego z pomiarów termoparami. Podsumowując, należy stwierdzić, że otrzymany sygnał elektryczny informuje jedynie o tym, że dla:

- termopary, która ma zmienne wymiary,
- ciepła, które ma zmienny gradient przepływu zależny od różnicy i poziomu temperatur,
- zróżnicowanego rozprzysięgu strumieni ciepła,

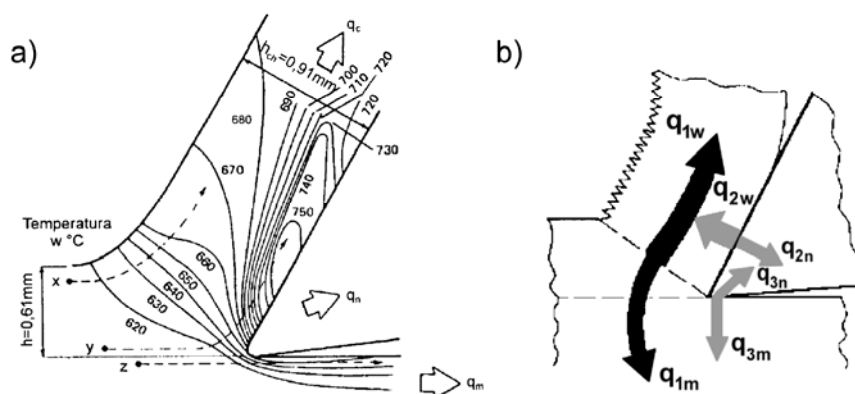
na zimnych końcach termoelementu otrzymano napięcie w mV, które charakteryzuje całość zdarzeń towarzyszących procesowi skrawania – w bezpośrednim otoczeniu powierzchni skrawania.

W warunkach laboratoryjnych często wykorzystywane są metody kalorymetryczne. Wykorzystuje się w nich zjawisko wzrostu temperatury, na przykład wody znajdującej się w termosie, do której oddaje ciepło wpadający wiór. Wyrafinowane metody pomiaru temperatury skrawania polegają na ścinaniu termopar ukrytych w materiale obrabianym. Do porównania ciepła w skrawaniu wykorzystywane są metody termowizji – specjalnych kamer ciepłoczułych oraz metody noktowizyjne – rejestrujące strumień ciepła w podczerwieni.



Rys. 2.18. Klasyfikacja metod pomiaru temperatury w skrawaniu [18]

Pomiar temperatur w różnych punktach strefy skrawania pozwolił na opracowanie rozkładu linii stałych temperatur w strefie tworzenia wióra. Taki, jak na rys. 2.19.; rozkład izoterm pozwala na wyciągnięcie pewnych wniosków o przebiegu tych zjawisk. Najwyższa temperatura, w strefie skrawania, występuje w pewnej odległości od krawędzi skrawającej w punkcie położonym nad powierzchnią natarcia. Temperatura wyznaczona w otoczeniu linii ilustrującej płaszczyznę ścinania ma w przybliżeniu wartość stałą, wyższą zaś obserwuje się w wiórze i narzędziu.



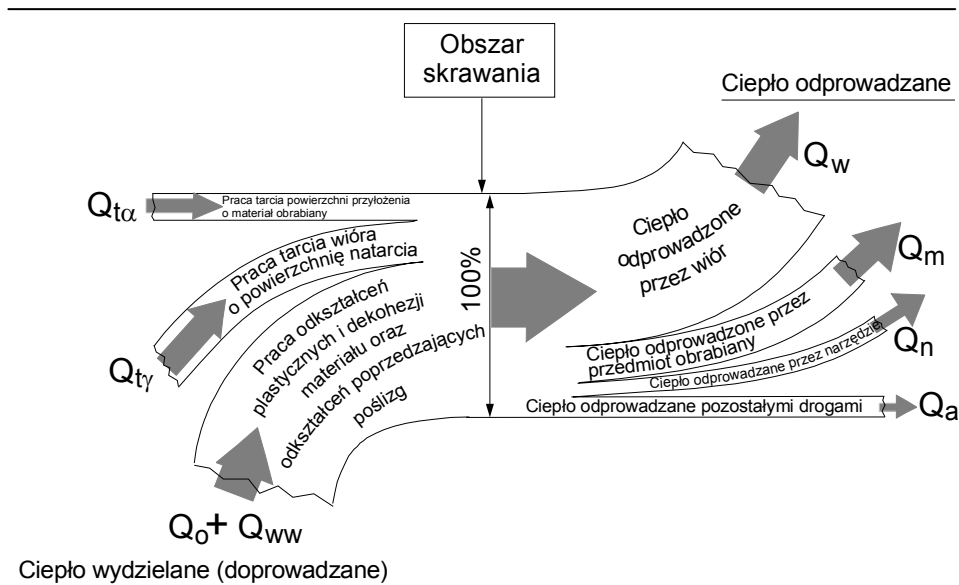
Rys. 2.19. Rozkład a) temperatury w wiórze i przedmiocie obrabianym b) ciepła w strefie tworzenia wióra 7

Mając na uwadze sumaryczną ilość strumienia ciepłego (rys. 2.19. b) decydującego o temperaturach kontaktowych, możemy zapisać że:

$$\begin{aligned} q_w &= q_{1w} + q_{2w}, \\ q_n &= q_{2n} + q_{3n}, \\ q_m &= q_{1m} + q_{3m}. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Badania doświadczalne dowodzą, że intensywność strumieni ciepłych q_w , q_n , q_m zależy w głównej mierze od: przewodności i pojemności cieplnej materiału obrabianego i narzędziowego, sposobu chłodzenia i parametrów skrawania.

Ilość ciepła wydzielonego w jednostce czasu (strumień ciepła) odpowiada w przybliżeniu mocy skrawania, która to moc wynika bezpośrednio z pracy skrawania. Określając składniki pracy skrawania można wydzielić składowe źródła ciepła i charakterystyczne sposoby jego odprowadzania ze strefy skrawania. (rys. 2.20.).



Rys. 2.20. Źródła ciepła i rozprzewodzenie w strefie skrawania

1. odkształcenia materiału [18],
 - praca odkształceń plastycznych i dekohezji materiału zużywana na tworzenie wióra Q_o
 - praca odkształceń plastycznych poprzedzających poślizg i przenikających do warstwy wierzchniej Q_{ww} ,
2. tarcia
 - praca sił tarcia na powierzchni natarcia Q_{ty} ,
 - praca sił tarcia na powierzchni przyłożenia $Q_{t\alpha}$.

W ocenach ilości ciepła należy uwzględnić postać otrzymywanych wiórów. Dla wiórów odpryskowych, elementowych charakterystycznych dla materiałów kruchych odpada ciepło plastycznych odkształceń stąd w bilansie cieplnym materiałów kruchych dominujące znaczenie ma ciepło tarcia.

Wymienione główne źródła dostarczają sumę ciepła Q_D :

$$Q_D = Q_o + Q_{ww} + Q_{ty} + Q_{t\alpha} [\text{kJ}] \quad (2.30)$$

Wytworzone ciepło Q_D jest rozprzewodzane przez:

1. Przenikanie do materiału
 - narzędzia – $Q_n \sim (2-8)\%Q_D$,
 - przedmiotu obrabianego – $Q_m \sim (10-50)\%Q_D$,

- wióra – $Q_w \sim (25-85)\%Q_D$,

2. Unoszenie

- w płynach obróbkowych lub do atmosfery Q_a

Ciepło odprowadzane Q_{OD} jest sumą wymienionych strumieni:

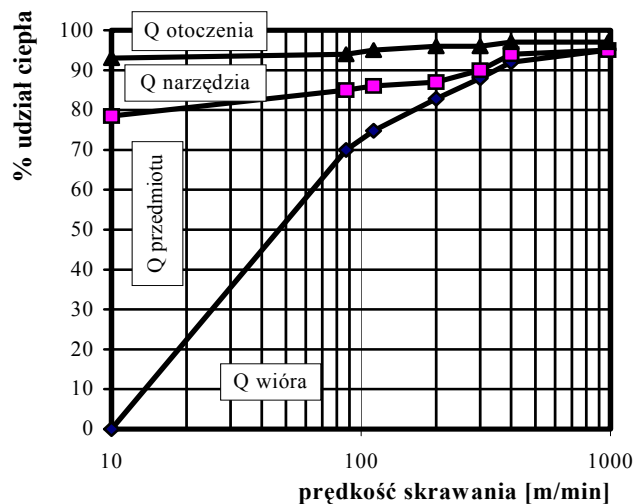
$$Q_{OD} = Q_n + Q_m + Q_w + Q_a. \quad (2.31)$$

Bilans cieplny dla strefy skrawania musi być zrównoważony, czyli:

$$Q_D - Q_{OD} = 0 \quad (2.32)$$

Udział poszczególnych składników bilansu jest zmienny i zależy od bardzo wielu czynników, związanych z własnościami wytrzymałościowymi i konstrukcyjnymi materiału obrabianego i narzędzia oraz parametrami skrawania. Wiadomo z literatury, że podczas skrawania stali zwykłej jakości z prędkością skrawania $v_c = 50 \text{ m/min}$ ciepło Q_o wynosi około 75% całkowitego ciepła, przy $v_c > 200 \text{ m/min}$ udział tego ciepła maleje do 25%. Ogólnie wiadomo, że ze wzrostem prędkości skrawania ilość ciepła odprowadzana przez przedmiot maleje, a do wióra rośnie.

Doświadczalnie wyznaczone udziały ciepła odprowadzanego wahają się w szerokim zakresie i zależą one w głównej mierze od prędkości skrawania (rys. 2.21.)



Rys. 2.21. Udziały ciepła cząstkowego w zależności od prędkości skrawania

Temperatura narzędzia dochodzi do 800°C i więcej, mimo, że udział ciepła przez nie odprowadzanego jest stosunkowo niewielki. Następuje kumulowanie ciepła z cienkich trących się intensywnie warstw pary materiału oraz częściowo przenikającego ciepła odkształceń sprężystych i plastycznych.

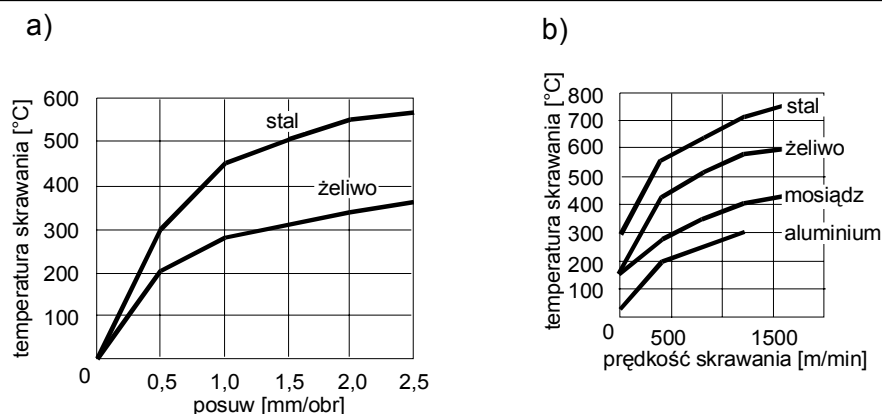
Całkowite ciepło powstające w skrawaniu odniesione do jednostki czasu można określić ze wzoru:

$$Q = \frac{F_c \cdot v_c}{427} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{min}} \right] \quad \text{lub} \quad Q = F_c \cdot v_c \left[\frac{\text{J}}{\text{min}} \right], \quad (2.33)$$

gdzie: F_c – [N] – obwodowa siła skrawania, v_c – [m/min] – prędkość skrawania.

Można, zatem po wyliczeniu całkowitego ciepła Q z tego wyrażenia i wykonaniu pomiarów ciepła w wiórze, obliczeniu ciepła przejętego przez przedmiot wyliczyć ciepło odprowadzone przez narzędzie. Choć tak otrzymane wyniki mają charakter przybliżony, to jednak są bardzo przydatne w badaniach porównawczych, na przykład: obciążenia cieplnego ostrza podczas skrawania aluminium i stali, lub badania wpływu parametrów skrawania v_c i f na temperaturę skrawania Θ . Na rys. 2.22. zilustrowano charakter zależności temperatury skrawania od podstawowych parametrów technologicznych.

Pomiar temperatury skrawania (najwyższej temperatury ostrza) wykazał, że zwiększanie prędkości skrawania v do 400 m/min powoduje jej szybki przyrost do wartości 200 do 600°C zależnie od rodzaju materiału obrabianego (rys. 2.22. b). Charakterystyczne jest to, że wszystkie krzywe temperatur wykazują mniej dynamiczny przebieg mimo zwiększania (znaczaco) prędkości skrawania. Najwyższą temperaturą skrawania jest temperatura topnienia materiału skrawanego.



Rys. 2.22. Zależność temperatury skrawania od a) posuwu, b) prędkości skrawania

Głębokość skrawania ma najmniejszy wpływ na temperaturę skrawania. Interpretuje się to w ten sposób, że z jej wzrostem rośnie wprost proporcjonalnie długość czynnej krawędzi skrawającej i ciepło wzdłuż niej przypadające na jednostkę długości krawędzi jest stałe. Należy jednak uwzględnić zakłócenia w odprowadzaniu ciepła – nie tylko ostrze jest upustem ciepła – spowodowane postacią wióra, nagrzewaniem się przedmiotu i w wyniku mniejszych różnic temperatur, schładzaniem tylko określonych obszarów strefy skrawania o nie krawędzi skrawającej itd. Prowadzi to w konsekwencji do pojawienia się pewnego jąderka ciepła o podwyższonej temperaturze w środkowej części szerokości skrawania, dlatego temperatura wzdłuż krawędzi skrawającej może być nierównomierna zwłaszcza dla krawędzi krzywoliniowej.

Ciepło w narzędziu powoduje zjawiska niekorzystne, dlatego, że zmniejsza jego twardość sprzyjając utracie zdolności skrawnych oraz powoduje błędy obróbki w wyniku przyrostu wymiarów liniowych. Przy obróbce otworów otrzymuje się nieraz otwory większe od wymiarów narzędzi. Wymiary przedmiotu rozgrzewanego ciepłem skrawania są większe i zmniejszają się w miarę stygnięcia. Prowadzi to do błędów pomiaru, a w przypadku przedmiotów o małej masie i większych wymiarach liniowych (cienkościenne tuleje, pręty), które rozgrzewają się do kilkuset stopni jest to źródłem poważnych błędów wykonania.

Podczas toczenia czołowego (planowanie czół), można skrawać na dwa sposoby. Od średnicy zewnętrznej ku środkowi lub odwrotnie. W pierwszym przypadku ostrze rozgrzewa się szybko i wydłuża, ponieważ rozpoczyna skrawanie od maksymalnej prędkości skrawania, w miarę upływu czasu skrawania zużywa się, przez co powierzchnia czołowa nie jest płaska a raczej wklęsła. Odwrotny ruch, od środka ku zewnętrznej powierzchni, powoduje

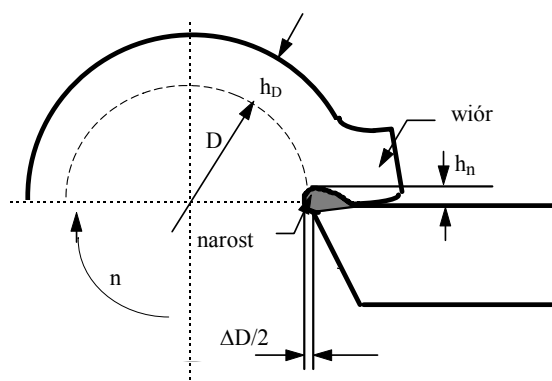
przyrost zużycia przy niewielkich temperaturach (małe v) i w wyniku wypukłość powierzchni czoła przedmiotu.

Temperaturowe błędy obróbkowe powinny być uwzględniane przy doborze warunków technologicznych, nastawianiu obrabiarek oraz pomiarach gotowych wyrobów.

Wynika z tego, że do wióra odprowadzane jest ciepło tarcia podstawy wióra o powierzchnię natarcia. W narzędziu kumulowane jest więcej ciepła z uwagi na utrudnione warunki do jego odprowadzenia.

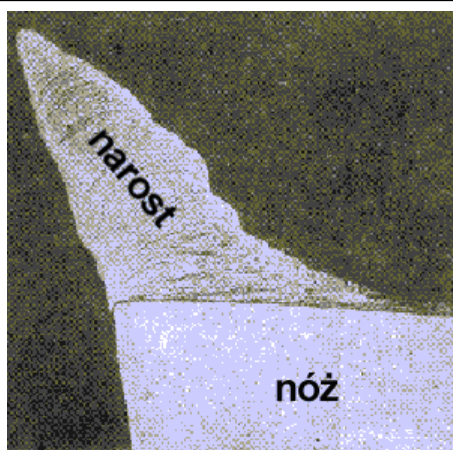
2.4. Zjawisko narostu

Obserwacje poczynione przed laty ujawniły obecność wtrąceń na powierzchni obrobionej i w podstawie wióra. W określonych warunkach skrawania była widoczna ich większa liczba na powierzchni jednostkowej – w innych zaś mniejsza. Przy obróbce materiałów plastycznych wtrącenia te były większe, choć o zmiennym rozmiarze dla różnych przedziałów prędkości skrawania.



Rys. 2.23. Obecność narostu i jego wymiary charakterystyczne

Badania procesu skrawania polegające na szybkim wycofywaniu ostrza ze strefy skrawania przez; odstrzelenie za pomocą materiału wybuchowego, mechaniczne ścięcie kołka utrzymującego oprawkę ostrzową, wykazały obecność warstwy metalu bezpośrednio przylegającą do powierzchni natarcia ostrza (rys. 2.24.).

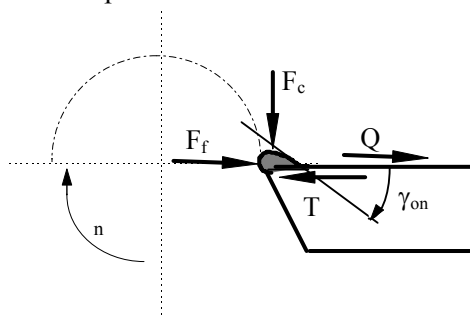


Rys. 2.24. Fotografia przedstawiająca narost na ostrzu noża

Okazało się, że wokół krawędzi skrawającej narastała warstwa o:

1. wymiarach h_n dochodzących do 0,4 mm,
2. charakterystycznej strukturze pasmowej,
3. mniej lub bardziej stabilnej postaci,
4. zmiennej częstości powstawania.

Na ukształtowany narost działa układ sił, przedstawiony na rys. 2.25., obejmujący siłę styczną F_c , posuwową F_f pojawiające się w wyniku tworzenia wióra, siłę tarcia podstawy wióra o powierzchnię narostu $Q = F_c \cdot \mu$ oraz siłę tarcia utrzymującą narost na powierzchni natarcia T .



Rys. 2.25. Schemat sił działających na narost

Układ równowagi tych sił zapewniający stabilność narostu czyli trwałą jego obecność na powierzchni natarcia można zapisać w postaci:

$$T \geq Q + F_f, \quad (2.34)$$

która oznacza, że póki siła tarcia T jest przynajmniej równa sumie dwóch sił dążących do usunięcia narostu z powierzchni natarcia, to mamy do czynienia z jego stabilną formą którą można nazwać nalepką. Ta postać narostu ma szereg wad i zalet.

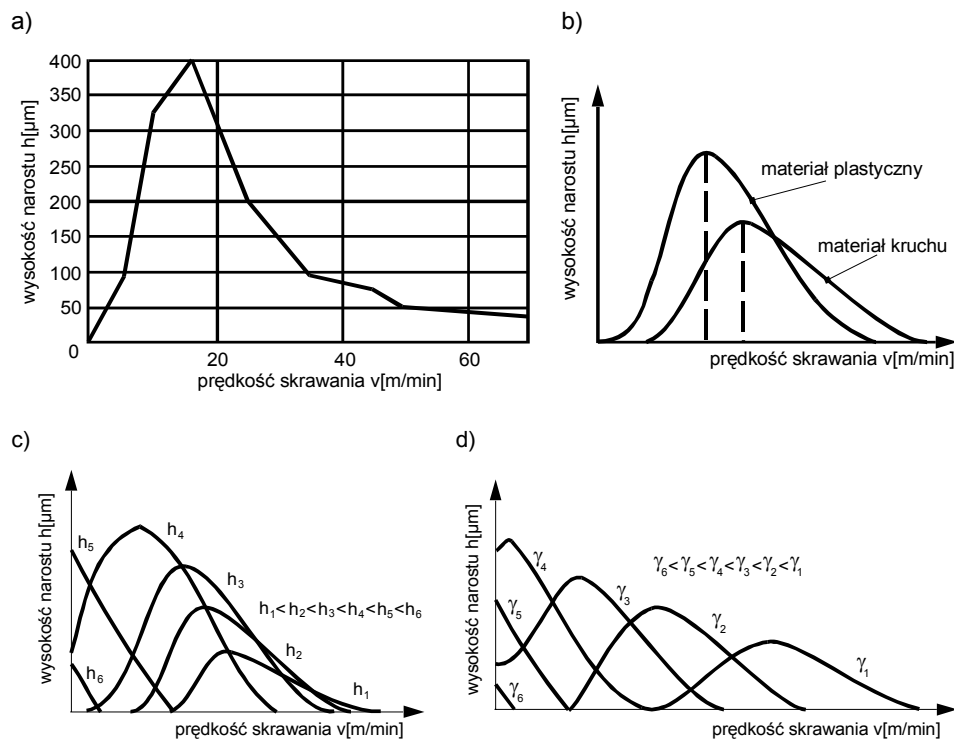
Do zalet zaliczane są następujące jego właściwości:

1. zmienia on kształt powierzchni natarcia,
2. zmniejsza siły skrawania przez zwiększenie kąta natarcia,
3. z uwagi na 3 do 4-krotnie wyższą twardość niż materiał obrabiany wykonuje pracę skrawania zamiast ostrza,
4. zmienia się układ sił przy krawędzi skrawającej w taki sposób, że odsuwa się od niej miejsce najwyższych nacisków,
5. chroni materiał ostrza od tarcia i zużycia krawędzi skrawającej,
6. obniża się temperatura w materiale ostrza.

Wady polegają głównie na tym, że:

1. rośnie chropowatość powierzchni obrobionej,
2. cząstki twardego narostu pozostając na powierzchni przedmiotu zachowują się jak ścierniwo, powodując w połączeniach ruchowych nadmierne zużycie i luzy,
3. wystający za krawędź skrawającą narost zmienia wymiary przedmiotu tak, że przy obróbce powierzchni zewnętrznych zmniejsza średnicę powodując błąd na średnicy równy ΔD , dla wewnętrznych powierzchni średnicę zwiększa.

Nalepek w wyniku zmiany warunków skrawania może stać się niestabilny, gdy okresowo warunek z równania (2.34) nie jest spełniony. Mamy wówczas do czynienia z klasycznym narostem. Częstość jego pojawiania się i znikania przy prędkościach skrawania charakterystycznych dla obróbki nożami ze stali szybkoobrotowej wynoszącymi około 50 m/min osiąga rząd 50 do 70 Hz.

**Rys. 2.26. Wpływ parametrów skrawania na zachowanie narostu**

a) prędkości skrawania b) plastyczności materiału c) grubości warstwy skrawanej d) kąta natarcia

Dla obróbki spiekami twardymi zaobserwowano jego pojawianie z częstością do 300Hz – 400Hz. Takie pulsujące działanie narostu powoduje zmienne obciążenie wszystkich elementów układu OUPN i pogarsza falistość oraz chropowatość obrobionej powierzchni. Zjawisko narostu można uznać za dopuszczalne podczas obróbki zgrubnej, wówczas gdy zmniejszamy siły skrawania i ochronimy ostrze przed wydzielaniem dużych ilości ciepła, które towarzyszą tej obróbce. Niedopuszczalna jest zaś jego obecność podczas obróbki wykańczającej, gdy zabiegamy o otrzymanie powierzchni obrobionej o najlepszych parametrach.

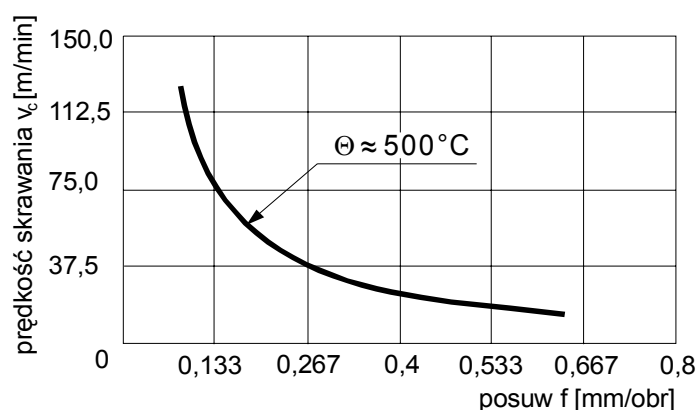
Intensywny narost powstaje podczas obróbki materiałów wiążkich, dla stali konstrukcyjnej o wytrzymałości około 550MPa wysokość jego dochodzi do 0,4 mm (zobacz rys. 2.26. a). Ogólnie można stwierdzić, że narost nie pojawia się dla prędkości skrawania do 10–12m/min i ponad 50–70m/min praktycznie nie tworzy się. Skłonność do tworzenia narostu stała się podstawą do podziału materiałów konstrukcyjnych na: podatne do tworzenia narostu, stale konstrukcyjne węglowe, stopowe, żeliwo szare, stopy aluminium oraz

niepodatne takie jak: stopy miedzi, ołów, stopy tytanowe, żeliwo białe, stal hartowana, stale stopowe z dużą zawartością chromu i niklu. Dla tej drugiej grupy materiałów rosną wymiary narostu, gdy materiały te są o mniejszej twardości.

Warunki sprzyjające powstawaniu narostu w zakresie prędkości skrawania 18 do 30 m/min spowodowane są naciskami jednostkowymi – dochodzącymi do 2800 MPa.

W literaturze podaje się, że maksymalna wysokość narostu występuje przy takiej prędkości skrawania, dla której temperatura skrawania wynosi $\Theta = 573\text{K}$, zanika zaś przy prędkości skrawania, dla której $\Theta = 873\text{K}$.

Uzyskanie określonej temperatury skrawania jest możliwe przez dobór odpowiednich par kombinacji posuwu i prędkości skrawania. Zilustrowano to na rys. 2.27.



Rys. 2.27. Zmiany posuwu f i prędkości skrawania v_c dla stałej temperatury skrawania Θ

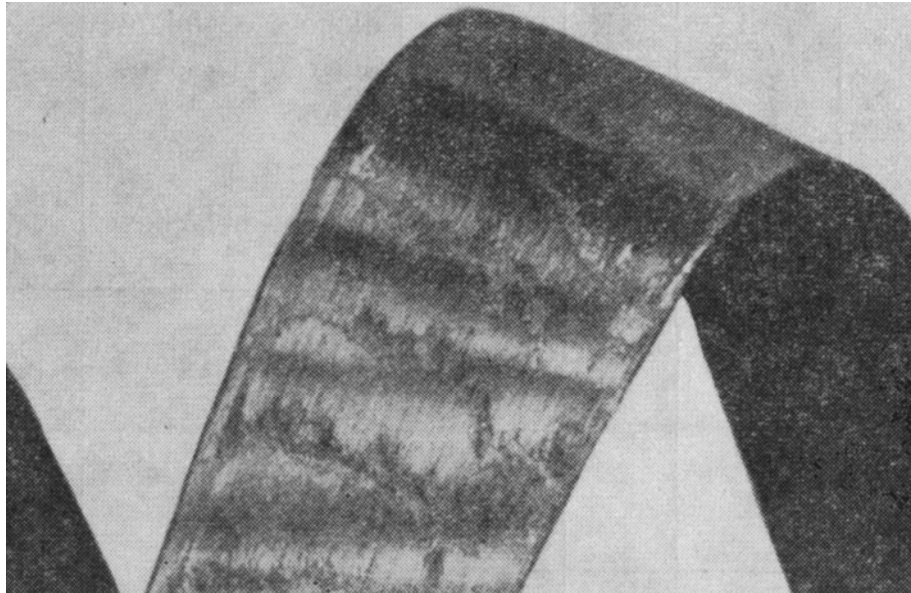
Dla danych z rys. 2.27. można zestawić przykładowe pary f i v_c (0,08; 110), (0,4; 30), z których pierwsza jest charakterystyczna dla obróbki wykańczającej druga zaś dla zgrubnej. Głębokość skrawania w niewielkim stopniu zmienia przedstawione zależności, w takim samym jak wpływa na temperaturę skrawania.

Do ogólnych spostrzeżeń można zaliczyć i to, że dla mniejszych grubości warstwy skrawanej podwyższa się wartość prędkości skrawania odpowiadająca maksymalnym rozmiarom narostu, które ulegają jednak zmniejszeniu (zobacz rys. 2.26. c). Szerokość warstwy skrawanej wpływa podobnie, choć nie jest to tak znaczący wpływ.

Niewątpliwie istotny wpływ na wielkość narostu ma zmiana kąta natarcia – jest to wynik zmniejszania sił skrawania w konsekwencji temperatury skrawania, która jest podstawowym parametrem fizycznym zjawiska narostu. Mniejszym wartościom kąta natarcia odpowiadają większe wymiary narostu, które wypadają dla mniejszych prędkości skrawania (zobacz rys. 2.26. d).

Zupełnie innym zagadnieniem jest pojawienie się mikronarostu. Zaobserwować go można najłatwiej przy obróbce przeciąganiem na bardzo dokładnie wykonanych ostrzach przeciągaczy. Z uwagi na ograniczenia mocy w napędzie przeciągarek stosowane są także niewielkie prędkości skrawania sprzyjające tworzeniu narostu. Uchwycenie jego stabilnej formy geometrycznej może zostać świadomie wykorzystane dla wykonywania przez niego głównej pracy skrawania i przedłużenia w ten sposób trwałości narzędzia.

Cykliczne rozpadanie narostu powoduje, że jego fragmenty zostają wciśnięte w podstawę wióra (rys. 2.28.). Fragmenty te przemieszczając się po powierzchni natarcia ostrza przyspieszają pogłębianie żłobka. Te elementy narostu, które dostaną się do powierzchni skrawania przesuwając się przez powierzchnię przyłożenia intensywnie ją zużywają.



Rys. 2.28. Widok narostu na podstawie wióra

Pogarsza się jakość powstającej powierzchni, która uzbrojona jest bardzo twardymi wtrąceniami. W kolejnych przejściach ostrza ulega ono dalszemu, przyspieszonemu zużyciu, gdyż ostrze skrawa również mocno osadzone

wtrącenia, których wymiary są porównywalne z grubością skrawanej warstwy, ale mające kilkakrotnie wyższą twardość. Szkodliwe działanie zjawiska narostu można zminimalizować przez:

- właściwy dobór materiału narzędzia i geometrii ostrza skrawającego,
- stosowanie parametrów skrawania z obszaru gdzie narost jest w zaniku,
- chłodzenie i smarowanie strefy skrawania.

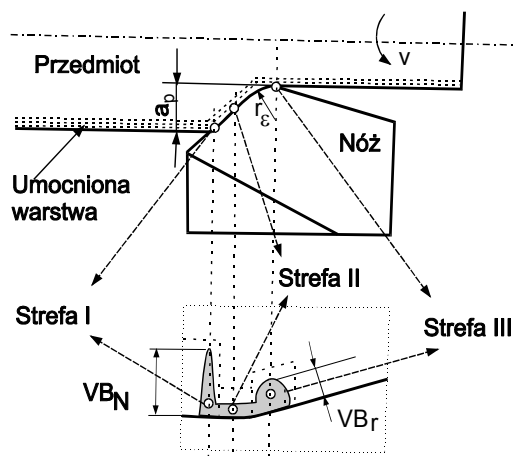
2.5. Zużycie i trwałość ostrza

W technologii obróbki wiórowej tworzenie powierzchni jest wynikiem złożenia ruchów głównego i posuwowego. Obróbka ostrzami zdefiniowanymi, jak w toczeniu, frezowaniu itp. powoduje, że powstająca powierzchnia to wynik powtarzalnego oddziaływania zużytego naroża z powierzchnią obrobioną, podtrzymywanego przez posuw.

[..\Filmy ze SKRAWANIA\Trwalosc_ostrza.avi](#)

2.5.1. Model zużycia pomocniczej powierzchni przyłożenia

Z upływem czasu skrawania na powierzchniach czynnych ostrza pojawiają się ślady zużycia. Obraz śladów zależy od tego jak zostanie geometrycznie ukształtowane naroże ostrza (zobacz tabela 5.). Dla przypadku ostrza z narożem zaokrąglonym wycinkiem okręgu o promieniu $r_\epsilon > 0$ oraz $\kappa_r > 90^\circ$, na powierzchniach przyłożenia zużytego ostrza obserwuje się trzy zdecydowanie różniące się strefy, charakteryzujące się odmienną mechaniką i obrazem powstawania tych śladów [5,9]. Jeżeli pominie się zawsze możliwe niejednorodności mechaniczne w strukturze materiału ostrza to rys. 2.29. przedstawia często spotykaną postać śladów zużycia.



Rys. 2.29. Ślady zużycia na powierzchniach przyłożenia noża tokarskiego

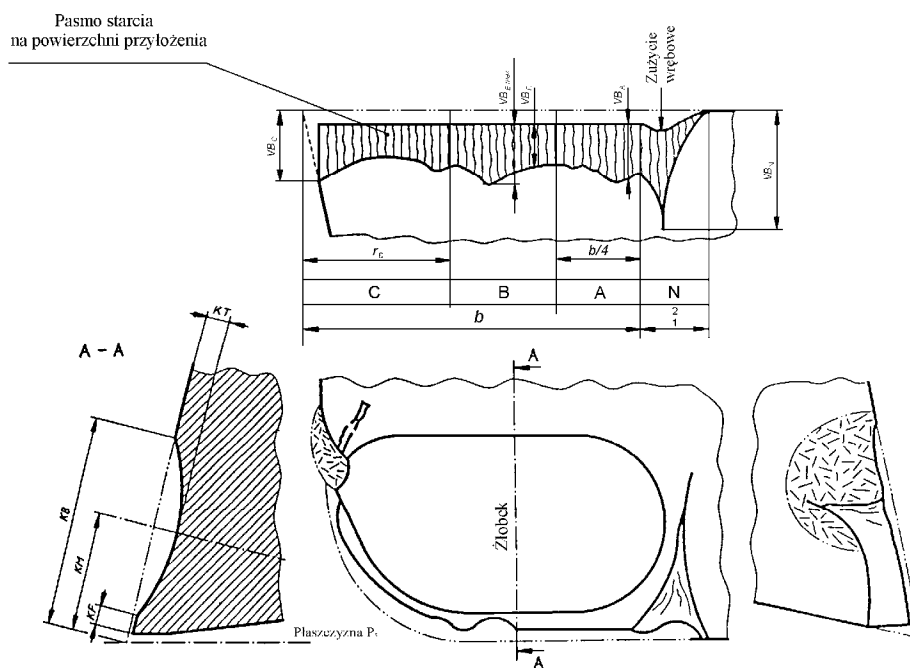
Możliwe są pewne odstępstwa, dostrzegalne w obszarze każdej z trzech stref, przy obróbce różnych materiałów. Wymienić tu można zużycie skoncentrowane na powierzchni przyłożenia lub brak żłobkowego śladu na powierzchni natarcia.

W strefie I, w miarę jak zużycie wzrasta, pojawia się charakterystyczny punkt, w którym krawędź skrawająca przecina odkształconą warstwę. Położenie tego punktu wyznacza głębokość skrawania a_p . Wokół tego punktu zaś pojawia się skoncentrowany ślad zużycia, którego szerokość związana jest z głębokością umocnionej warstwy. Podwyższona w tej strefie temperatura oraz dostęp powietrza od swobodnej strony ostrza intensyfikują narastanie zużycia, co ujawnia się długim lokalnym śladem wytarcia.

W strefie II wytarcie to przyjmuje ślad w formie paska, który zwiększa swoją szerokość w miarę upływu czasu skrawania.

W strefie III obraz zużycia jest wynikiem złożonych mechanizmów. Dla ostrza z promieniem $r_e > 0$ zmienia się grubość warstwy skrawanej h_D tak, że $h < h_{min}$ szczególnie, gdy posuw jest niewielki, charakterystyczny dla obróbki wykańczającej.

Do oceny zużycia wykorzystuje się wartości różnych wskaźników zużycia pokazane na rys. 2.30.



Rys. 2.30. Wskaźniki zużycia ostrza

Uproszczony model układu nóż – przedmiot

Ogólny model pracy wierzchołka ostrza w materiale skrawanym można sobie wyobrazić jako przenikanie walca, który jest graficznym przedstawieniem przedmiotu toczzonego o średnicy $2R$ oraz walca – wpisanego w wierzchołek ostrza i obróconego w przestrzeni o dwa kąty przyłożenia α_p , α_f – o promieniu równym r_ϵ .

Z uwagi na złożoną postać równań ogólnych, uwzględniających powyższe założenia, czyli krzywiznę przedmiotu o promieniu R oraz promienia zaokrąglenia wierzchołka r_ϵ :

$$\begin{aligned} Z^2 + Y^2 &= R^2 \\ (X + Z \cdot \operatorname{tg} \alpha_f)^2 + (Y + Z \cdot \operatorname{tg} \alpha_p - R - r_\epsilon + KE + Y_s) &= r_\epsilon^2 \end{aligned} \quad (2.35)$$

oraz bez zaokrąglenia czyli gdy $r_\epsilon = 0$

$$\left. \begin{aligned} Z^2 + Y^2 &= R^2 \\ (X + Z \cdot \operatorname{tg} \alpha_f)^2 + (Y + Z \cdot \operatorname{tg} \alpha_p - R + KE + Y_s) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

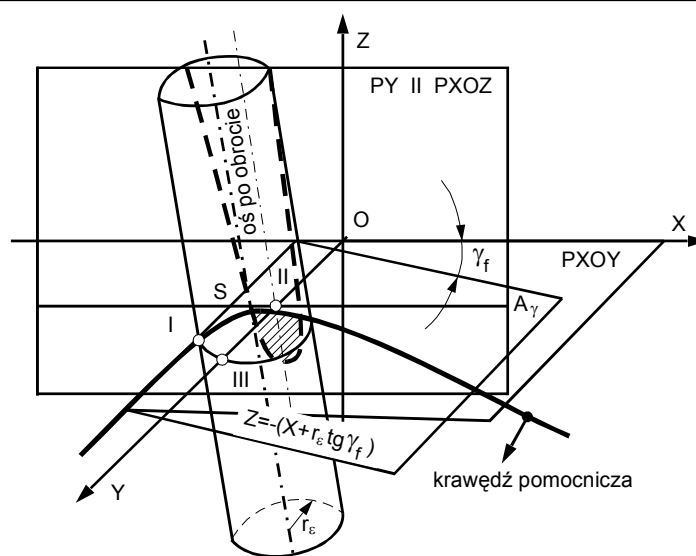
gdzie:

X, Y, Z – współrzędne prostokątne,

KE – skrócenie wierzchołka ostrza [mm],

Y_s – dosunięcie ostrza spowodowane zmiennością kąta natarcia [mm],

przyjmuje się model geometryczny układu nóż – przedmiot przedstawiony na rys. 2.31. Gdy promień zaokrąglenia wierzchołka r_ϵ jest dużo mniejszy od promienia przedmiotu R , czyli $r_\epsilon \ll R$, to walec o promieniu r_ϵ , opisany na promieniu naroża i obrócony o kąty przyłożenia α_p i α_f , przecięty jest płaszczyzną przedmiotu.



Rys. 2.31. Model geometryczny przenikania walców, gdy promień $R = \infty$

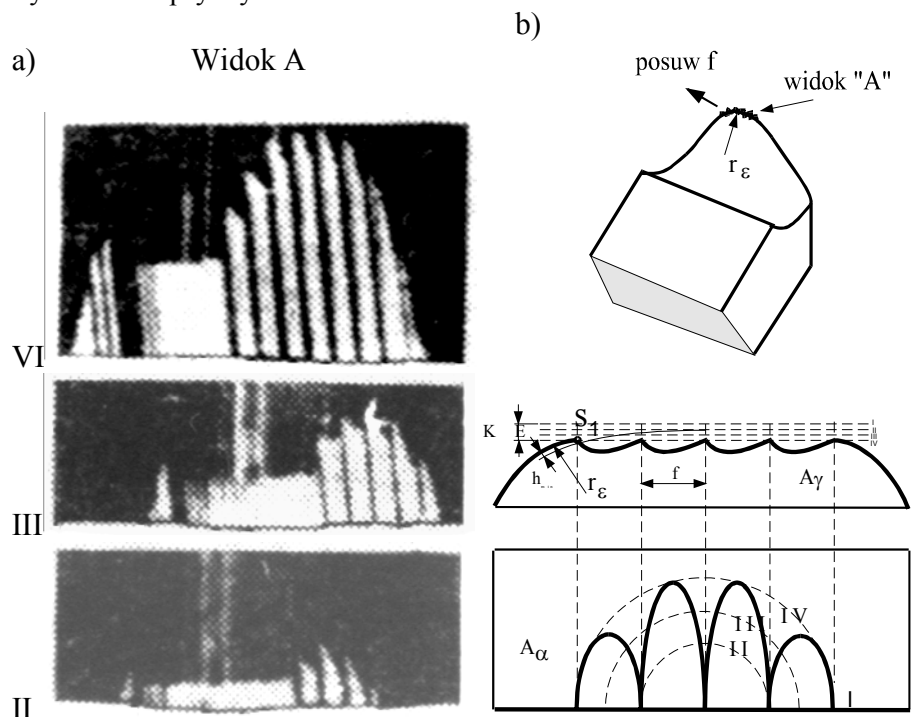
Otrzymaną krzywą przenikania opisuje równanie rzeczywistej elipsy.

$$(X + Z \cdot \tan \alpha_f)^2 + (Z \cdot \tan \alpha_p - r_e + KE + Ys)^2 = r_e^2 \quad (2.37)$$

W ten sposób można, z równania (2.37), wyznaczyć teoretyczne wymiary śladu zużycia na pomocniczej powierzchni przyłożenia. Rozwiązaniem jest wycinek elipsy, który wyznacza obszar, w którym przy założonych parametrach obróbki i geometrii ostrza mieszczą się narastające rzeczywiste ślady zużycia. Przykładowy wymiar poprzecznej szerokości elipsy, dla $r_e = 1\text{mm}$ i skróceniu $KE = 0,04\text{mm}$, odpowiadającemu zużyciu $VBr = 0,7\text{mm}$, wynosi około $0,5\text{ mm}$. Wynika z tego, że jest ona przykładowo 5 – krotnie większa od posuwu $f = 0,1\text{ mm}$. Dlatego można wysnuć wniosek, że wyobrażalny punkt lub nierówność z powierzchni obrobionej przesunie się przez powierzchnię zużycia przynajmniej dwa razy. Po upływie dowolnego przyrostu czasu Δt następuje spływanie tych wytarć na wycinku elipsy, które pochodzą z fazy poprzedzającej, a jednocześnie zarysowują się nowe o maksymalnym wymiarze ślady na zużytej powierzchni. Na rys. 2.32. pokazano cztery kolejne fazy skracania naroża. W miarę postępującego zużycia naroże ulega starciu o wielkość KE . Przesuwanie się w kierunku posuwu krawędzi „ścierającej” to rezultat ciągłego wędrowania punktu początkowego S_1 , związanego z przekrojem, w którym grubość warstwy skrawanej $h = h_{\min}$. Promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n rośnie

w skutek postępującego zużycia. Zwiększanie, zatem jego wartości powoduje odpowiedni przyrost wartości minimalnej grubości warstwy skrawanej h_{\min} .

Stosownie do tego na kolejnych elipsach z rys. 2.32., oznaczonych od I do IV, wrysowano położenie mikrorys linią przerywaną. Długości ich ograniczono wymiarem elipsy wytarcia.



Rys. 2.32. „Przerysowania” powierzchni przyłożenia w obszarze wytarcia naroża ostrza

Ulegają one wydłużeniu wraz z powiększaniem się rozmiarów wycinka elipsy w miarę upływu czasu skrawania. Nakładające się ślady wycierają i spływają te, które powstały w fazie poprzedzającej. Tak ukształtowany zużyciem wycinek powierzchni przyłożenia przesuwa się z każdym obrotem przedmiotu o wartość posuwu f . Można w ten sposób stwierdzić, że chropowatość tworzonej powierzchni jest zdeterminowana powierzchnią zużycia oraz wartością posuwu.

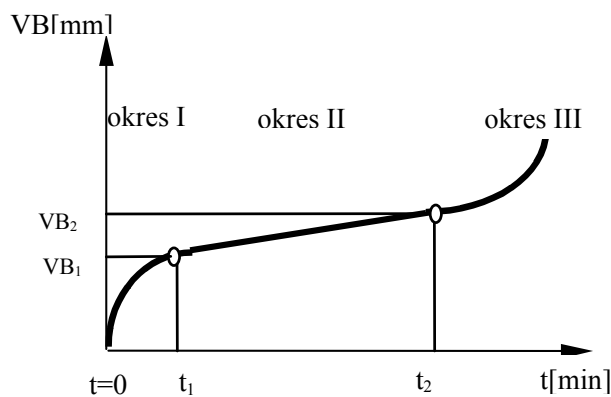
Szerokie badania wykazały, że:

1. Zużycie na pomocniczej powierzchni przyłożenia przebiega tak, że granice widocznego śladu są zbliżone w kształcie do wycinka elipsy.
2. Zdecydowane podobieństwo śladu teoretycznego i zmierzonego ujawnia się dla dłuższych czasów skrawania.

3. Przebiegi zużycia na powierzchni przyłożenia naroża ostrza są bardziej regularne aniżeli na głównej powierzchni przyłożenia.

Z uwagi na fakt, że ta część ostrza bierze bezpośredni udział w tworzeniu chropowatości powstającej powierzchni, to opisany mechanizm nabiera szczególnego znaczenia w opisie mechaniki skrawania. Mechanika tworzenia wióra ma znaczenie, gdy chodzi o siły obciążające ostrze, powstające pole naprężeń, temperaturę skrawania (będącą miarą ilości wydzielonego ciepła, prowadzącego do zmian strukturalnych WW) oraz drgania OUPN. Jest jednak wtórna, jeśli zajmujemy się mechaniką powstającej powierzchni. Wióry są odpadem procesu.

Badania przebiegu zużycia ostrza wykazały, że obserwowane parametry, które je charakteryzują, zachowują się w sposób zilustrowany na rys. 2.33. Tę krzywą spotyka się w literaturze pod nazwą krzywej Lorenza. Wyróżnia ona trzy różne okresy zmian wielkości wskazujących na zużycie.



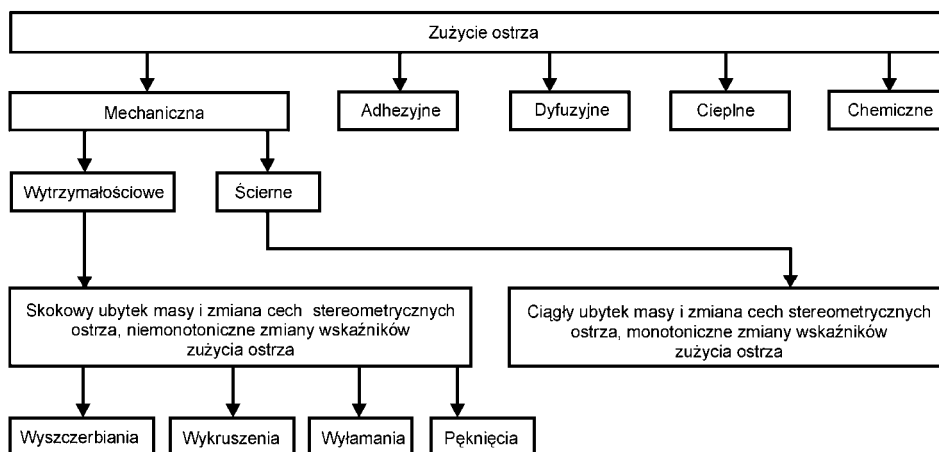
Rys. 2.33. Przebieg typowej krzywej zużycia

W pierwszym okresie obserwuje się dynamiczny przyrost wartości VB do czasu równego t_1 . Tłumaczy się to szybkim docieraniem powierzchni roboczych ostrza. Okres ten trwa tylko kilka minut, a odpowiadające mu zużycie wynosi dziesiąte części milimetra. Postępujące zużycie od tej chwili, przez cały okres II, zaczyna przyrastać niemal liniowo. W okresie III następuje gwałtowny przyrost zużycia i utrata zdolności skrawnych ostrza.

Wiadomo, że kształt krzywej zmienia się w zależności od parametrów skrawania, stosowanych płynów obróbkowych, własności plastycznych materiału obrabianego oraz stabilności własności wytrzymałościowych ostrza. Najkorzystniejszą wartością dopuszczalnego zużycia VB_{dop} jest to, które osiągnięte jest po czasie t_2 , odpowiadającym końcowi II okresu. Dopuszczenie

do nadmiernego zużycia w III okresie wymaga usunięcia przez ostrzenie zbyt dużego nadkładu materiału ostrza dla przywrócenia pełnych własności skrawnych.

Zużycie jest wynikiem nakładania się wielu rodzajów zużycia, które przebiegają z różną intensywnością zależnie od ciepła skrawania, na które największy wpływ ma prędkość skrawania (rys. 2.34.).



Rys. 2.34. Podział rodzajów zużycia

Zużycie mechaniczne związane jest z wzajemnym oddziaływaniem materiału skrawanego i narzędzia. Występują dwie postacie tego zużycia:

1. *Ścieranie* – usuwanie materiału w wyniku przenikania nierówności trących powierzchni,
2. *Zużycie wytrzymałościowe* – w wyniku przekroczenia granicy wytrzymałości doraźnej i zmęczeniowej, a objawami może być wyszczerbienie lub gdy ubytki materiału są większe – wykruszenie. Zmęczeniowe zużycie przebiega bezobjawowo aż do chwili gdy nastąpi nagle wyszczerbienie.

Zużycie ciepłne ostrza, przekroczenie dopuszczalnej temperatury przez określony czas powoduje zmiany strukturalne materiału w warstwie wierzchniej. W wyniku następuje odhartowanie, spadek twardości i w skrajnym przypadku, przy początkowo utajonym przebiegu, nagle upalenie ostrza.

Zużycie dyfuzyjne, w wyniku masowego przemieszczania na styku materiałów składników stopowych. Mechanizm ten intensyfikuje się przy określonej, dla danego pierwiastka, temperaturze aktywacji. Dla nowoczesnych materiałów narzędziowych temperatura skrawania osiąga

wartość 1200°C. Początki dyfuzji obserwuje się już dla temperatury ostrza wynoszącej połowę temperatury jego topnienia.

Zużycie adhezyjne, w wyniku tworzenia i rozrywania chwilowych złączeń, których wystąpienie jest uwarunkowane zbliżeniem powierzchni na odległość wymiarów siatki krystalicznej oraz osiągnięcie dla pary trącej odpowiedniego progu aktywności energetycznej. Objawem tego zjawiska jest powstawanie narostu.

Zużycie chemiczne ostrza, przy podwyższonych temperaturach skrawania zachodzą reakcje chemiczne składników płynów obróbkowych z atmosferą, w wyniku powstają tlenki i azotki, które są usuwane w wyniku ruchu narzędzia. Wysoka aktywność nowopowstałej powierzchni sprzyja wybitnie przebiegom reakcji chemicznych.

Zużycie plastyczne ostrza, przy bardzo wysokich temperaturach i znacznych naciskach następuje uplastycznienie warstwy na powierzchni roboczej ostrza.

Widać także, z przedstawionego podziału, że wspólnym, fizycznym parametrem sterującym większością procesów jest ciepło, którego miarą jest temperatura skrawania. Trudno określić udział poszczególnych rodzajów zużywania, gdyż wpływają one na siebie i wykazują bardzo uwikłane związki.

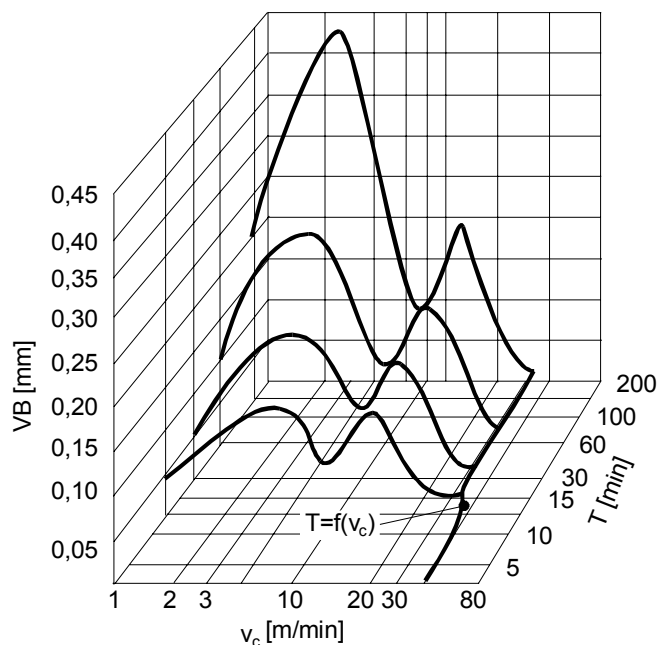
Sumaryczne oddziaływanie wszystkich rodzajów zużycia powoduje po jakimś czasie utratę zdolności skrawnych.

Wskaźnik (zobacz rys. 2.30.), który służy do wykazania, że osiągnięto ten stan i że dalsze skrawanie nie powinno być wykonywane. Przyjmuje się jako kryterium stępienia. Jego wartość liniowa (bywa również objętościowa) może być różna, zależnie od podstawy oceny. Wskaźnik może mieć sens:

- fizyczny, wielkość obserwowana w chwili kończącej drugi okres z krzywej Lorentza, do oceny wykorzystuje cosinusy składowych sił, drgania, hałas itp.,
- geometryczny, charakteryzujący zmiany wymiaru ostrza, skrócenie, wytarcie, głębokość żłobka itp.,
- technologiczny, wyznaczany w tym momencie gdy następuje widoczne pogorszenie chropowatości powierzchni, utrata dokładności wymiaru i kształtu,
- ekonomiczny, związany już z optymalizacją w której wybiera się uzasadnioną wartość zużycia z uwagi na koszt związany z przywróceniem skrawności narzędzia (najmniejszy) i zapewnieniem niezmiennie poprawnej jego pracy w okresie żywotności.

W przypadku drogiego narzędzia kształtowego, jakim jest przeciągacz łatwiej to zilustrować. Utrata stateczności wymiarowej przez nadmierne zużycie fizyczne powoduje, w konsekwencji, usuwanie dużego naddatku dla

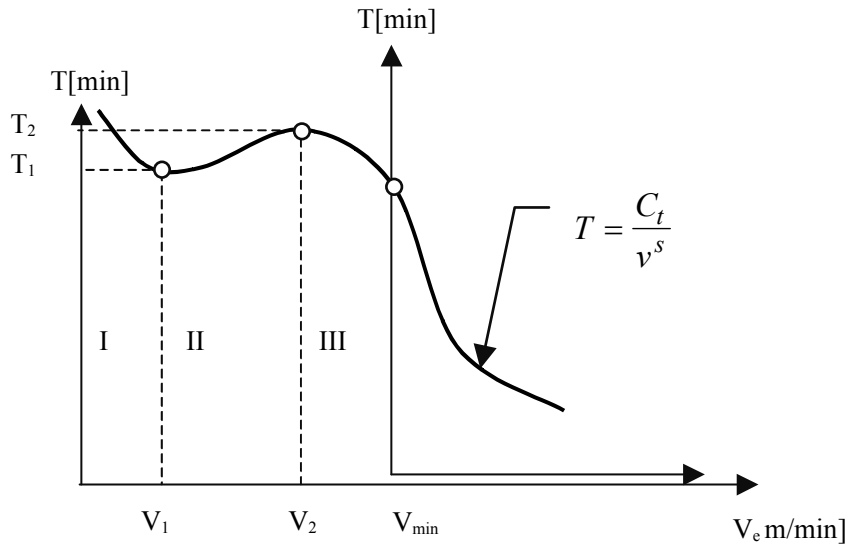
przywrócenia zdolności skrawnej ostrza i zmniejszenie dopuszczalnej liczby przeostrzeń w okresie żywotności przeciągacza. Oznacza to także mniejszą liczbę wykonanych elementów.



Rys. 2.35. Zależność zużycia w funkcji prędkości i czasu skrawania

W zależności od prędkości skrawania v_c oraz czasu skrawania, ograniczonego trwałością T , przebiegi parametru zużycia VB mają charakter nieliniowy (zobacz rys. 2.35.). Złożony mechanizm tarcia w obszarze zużycia powoduje pojawienie się dwóch maksimów. Pierwsze związane jest z przejściem do tarcia płynnego. Drugie związane jest z występowaniem narostu.

Po przyjęciu, że skrawanie powinno odbywać się z prędkościami omijającymi narost można do optymalizacji przyjmować wycinek przebiegu jak pokazano na rys. 2.36.



Rys. 2.36. Zależność trwałości od prędkości skrawania

Badania zużycia w szerokim zakresie prędkości skrawania wykazują charakterystyczny nieliniowy przebieg. Przedziały prędkości I i II dotyczą niskich prędkości skrawania. Praktyczne zainteresowanie dotyczy III przedziału gdyż związane to jest z najwyższą wydajnością obróbki. Przesunięcie początku układu współrzędnych do v_{\min} pozwala opisać ten fragment przebiegu za pomocą wyrażenia:

$$v = \frac{C_v}{T^m}, \quad (2.38)$$

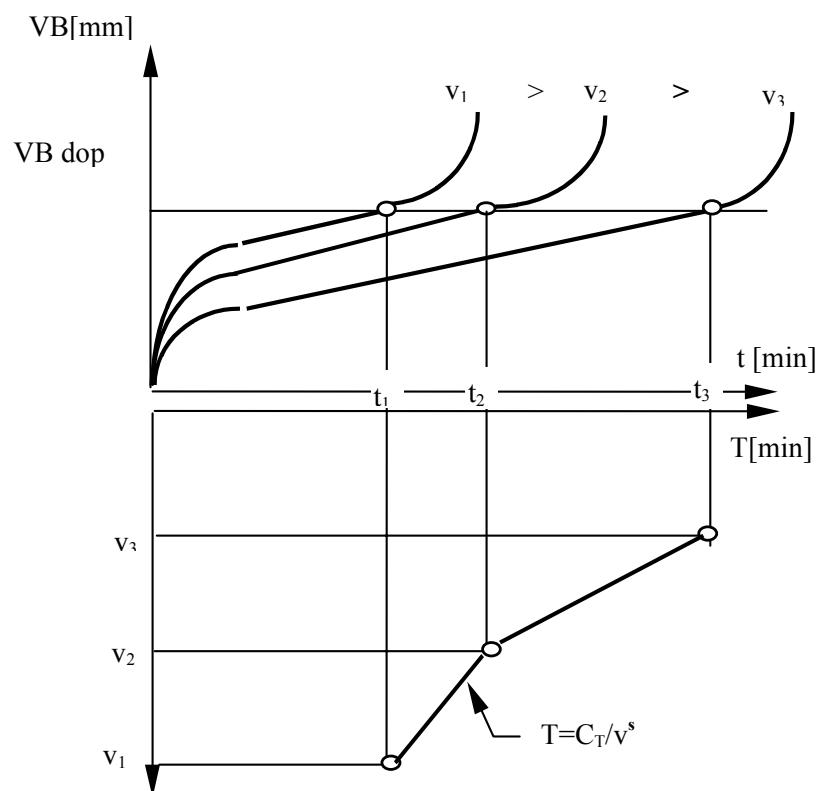
lub

$$T = \frac{C_T}{v^s}. \quad (2.39)$$

Dla $C_v = C_T^m$

obejmującej wszystkie pozostałe warunki skrawania, m lub $s = \frac{1}{m}$ są współczynnikami charakteryzującymi materiał skrawany, materiał narzędzia oraz rodzaj obróbki i warunki chłodzenie. Wykładnik m zmienia się w przedziale od 0,1 (dla stali obrabianej na sucho) do 0,3 (dla żeliwa obrabianego spiekami ceramicznymi). Wielkość T (w minutach) nazywana jest trwałością lub okresem trwałości i jest to czas niezbędny do osiągnięcia założonego kryterium zużycia.

Przebiegi zużycia dla trzech umownych prędkości skrawania v_1 do v_3 większych od v_{\min} (zobacz rys. 2.36.), zmieniają się według krzywych pokazanych na rys. 2.37. Dla wyższej prędkości skrawania, czas obróbki t_1 niezbędny do osiągnięcia dopuszczalnej wartości przyjętego wskaźnika zużycia VB jest krótszy niż dla mniejszej prędkości skrawania.



Rys. 2.37. Zasada tworzenia krzywej trwałości

W zależności od prędkości skrawania czasy niezbędne do doprowadzenia zużycia VB do określonej wartości układają się według krzywej trwałości T . Współczynniki C_T i C_v uwzględniają wszystkie pozostałe zmienne, które pozostają na ustalonym poziomie przy wyznaczaniu krzywej. Z uwagi na największy wpływ na trwałość właśnie prędkości skrawania, stosuje się w praktyce uproszczony wzór 2.38 lub 2.39.

2.6. Płyny obróbkowe – chłodzące i smarujące

Skrawanie metali odbywa się w warunkach dostępu powietrza, którego skład zależy od zanieczyszczeń wydzielanych przez urządzenia z otoczenia. Powietrze umożliwia odprowadzanie powstającego ciepła a jego składniki, w podwyższonych temperaturach i przy wysokiej aktywności fizycznej i chemicznej powstałej powierzchni, tworzą na niej różne związki chemiczne o nie zawsze korzystnym działaniu. Wysokim temperaturom skrawania towarzyszy intensywne zużycie powierzchni roboczych ostrza, w wyniku obniżenia odporności termicznej i utraty własności skrawnych. Ogólnie należy stwierdzić, że wysoka temperatura i duże ilości ciepła wydzielone w strefie skrawania wpływają negatywnie na wyniki obróbki. Chłodzenie strefy skrawania jest nieodzowne.

Wysokie naciski w otoczeniu krawędzi skrawającej (dla stali ponad 2000 MPa) uniemożliwiają tworzenie klina z cieczy między powierzchnią ostrza i materiału obrabianego. Możliwe jest jednak wytworzenie takich, wytrzymałych na wysokie ciśnienia i temperatury, warstewek dzięki dodatkom, zawartym w cieczy obróbkowej, wchodzącym w reakcje chemiczne ze składnikami materiału obrabianego oraz związkami wcześniej powstałymi na powierzchni obrobionej. Warstewki te zachowywać się będą jak stałe lub plastyczne, nie dopuszczając do metalicznego styku powierzchni narzędzia i przedmioty obrabianego. Przy podwyższonej wytrzymałości warstewki na ścinanie można zmniejszyć tarcie między tymi elementami, co prowadzi do zmniejszenia ilości wydzielonego ciepła, a przez to zmniejszenia zużycie ostrza.

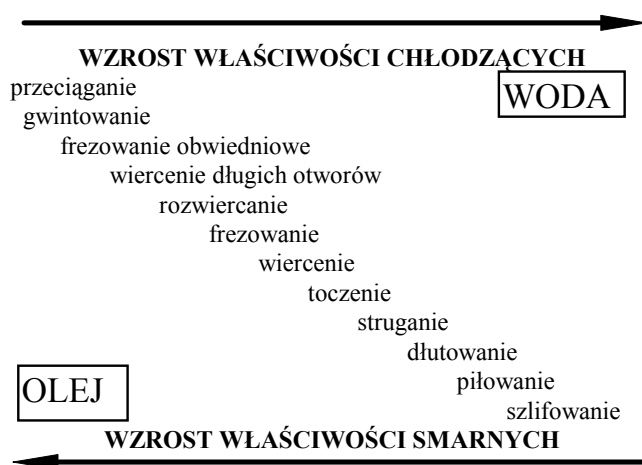
Dwie podstawowe funkcje cieczy obróbkowych: chłodzenie i smarowanie rys. 2.38. mają za zadanie zminimalizowanie energochłonności obróbki, zmniejszenie oporów skrawania, ułatwienie tworzenia wiórów i ich postaci łatwej do usuwania, ochronę antykorozyjną; przedmiotów, narzędzi, uchwytów i obrabiarki, zwiększenie trwałości narzędzi i obrabiarki oraz utrzymanie dobrej jakości wykonanych powierzchni i dokładności wymiarowo-kształtowej.

Funkcje te osiągane są przez:

- poprawę intensywności odprowadzania ciepła ze strefy skrawania, chłodzenie strefy skrawania i przedmiotu obrabianego, podwyższenie zdolności do przejmowania dużej ilości ciepła oraz zwiększenie przewodności cieplnej, w celu zmniejszenia jego szkodliwego wpływu na zużycie dyfuzyjne i cieplne,
- zminimalizowanie skutków działania tarcia przez smarowanie trących powierzchni narzędzia i powstającej powierzchni, prowadzące do zmniejszenia jej chropowatości i ułatwieniu przez swoją obecność na powierzchni obrabianej, przebiegu plastycznych odkształceń, zmniejszające zużycie oraz zapotrzebowanie na moc skrawania o 10 do 15%,

- otrzymanie korzystnej postaci wiórów, przez zmiany własności plastycznych materiału obrabianego (w wyniku obniżenia temperatury i ułatwienie ich usuwania przez otrzymywanie drobnych form elementowych),
- zmywanie metalicznego pyłu z powierzchni narzędzia i przedmiotu, pojawiającego się jak to wcześniej wykazano, w wyniku ograniczonych możliwości pracy wierzchołka ostrza,
- ochronne zabezpieczenie przed korozją i uszlachetnianie powierzchni obrobionej, polegające na tworzeniu powłok na powierzchni metalu, uniemożliwiających korozję przedmiotu, narzędzi i obrabiarki.

Spełnienie jednocześnie, w zadawalającym stopniu, wszystkich wymagań jest trudne. Poprawiając jedno z oczekiwań tracimy możliwość wpływu na inne.



Rys. 2.38. Potrzeby chłodzenia i smarowania w operacjach

Najlepszym nośnikiem cechy chłodzenia jest woda. Olej skuteczniej smaruje (tabela 9.). Skład cieczy do poszczególnych operacji powinien być odpowiednio dobrany. Parametry fizyczne wody i oleju zestawiono w tabeli 9.

Tabela 9. Zdolności chłodzące oleju i wody

Ciecz	ciepło parowania	ciepło właściwe	przewodność cieplna
	$\text{J} \cdot \text{kg} \cdot 10^5$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 10^3$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
olej mineralny	1.68÷3.14	1.68÷2.1	0.17
woda	24.6	4.19	0.63

Widoczne jest kilkukrotnie wyższe ciepło parowania w $[\text{J} \cdot \text{kg} \cdot 10^5]$ wody w porównaniu z olejem. Pozostałe cechy: ciepło właściwe w $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 10^3]$ oraz przewodność cieplna w $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ są także wyższe dla wody w porównaniu do oleju.

Otrzymane po wymieszaniu cieczy obróbkowe można podzielić:

1. Olejowe,
2. Emulsyjne,
3. Chemiczne (syntetyczne) – inna nazwa, wodorozcieńczalne.

2.6.1. Ciecze obróbkowe olejowe

Wyróżnia się w tej grupie cieczy obróbkowych:

1. oleje mineralne, stosowane do obróbki stali miękkich, miedzi i jej stopów, oraz stopów aluminium i łatwoskrawalnych, do powtarzalnych operacji o niewielkim obciążeniu przy niewielkiej prędkości skrawania i bardzo obfitym przepływie aby zapewnić chłodzenie strefy skrawania,
2. oleje roślinne i ciekłe tłuszcze zwierzęce, stosowane rzadko z uwagi na utlenianie i wysoką cenę. Częściej traktowane są one jako dodatki "polarne",
3. oleje mineralne z dodatkami polarnymi, nasyconymi i nienasyconymi kwasami i alkoholami tłuszczowymi oraz innymi związkami organicznymi o wysokich zdolnościach adsorpcyjnych w stosunku do wielu metali. Działanie ich polega na tworzeniu adsorpcyjnych mono- i polimolekularnych warstewek – na powierzchni metalu – odpornych na rozrywanie, lub mogą one reagować chemicznie z metalem tworząc warstwę mydeł metalicznych, pełniących rolę stałego smaru, mało odpornych na ścinanie. Smarują one powierzchnie trące mimo ich uszkodzenia w wyniku wysokich ciśnień. Przy temperaturze 120°C , w wyniku ich topnienia, tracą własności smarne. Stosowane powinny być przy średnich prędkościach skrawania i posuwach podczas skrawania stali o średniej zawartości węgla, miedzi i jej stopów, aluminium oraz innych metali kolorowych i lekkich. Zalecane jest ich stosowanie do obróbki brązu. Łatwo ulegają utlenianiu i wtedy nieprzyjemnie pachną,
4. oleje mineralne z dodatkami EP (Extreme Pressure), związków chemicznych łatwo reagujących chemicznie z metalem, w wysokiej temperaturze i znacznych ciśnieniach. Pod wpływem wysokich temperatur i ciśnień dodatek EP ulega rozkładowi na proste związki chemiczne lub wydziela się wolny pierwiastek zdolny do wchodzenia w reakcje chemiczne z obrabianym materiałem, tworząc warstewki ich związków o małej odporności na ścinanie. Praktyczne zastosowania dotyczą czystej siarki i jej związków, chloru, fosforu.

Siarka w postaci „wolnej”, rozpuszczona w oleju nadaje się do obróbki metali żelaznych. Nie używa się ich do obróbki miedzi i niklu, ponieważ tworzą na obróbiej powierzchni czarne plamy siarczków miedzi lub niklu. Siarka w postaci związanej chemicznie, głównie siarczków metali, zmniejsza, o około 60%, współczynnik tarcia. Może być stosowana do obróbki miedzi i jej stopów, bo nie zawiera wolnej siarki. Dobre zachowanie przy znacznych wartościach siły skrawania spowodowało powszechne ich stosowanie do frezowania uzębień, szlifowania gwintów itp.

Chlor, sprzyja tworzeniu chlorków metalu, pięciokrotnie słabszych na ścinanie aniżeli stal. Zalecane są do obróbki niklu, szczególnie przeciągania. W obecności wody tworzy chlorowodór sprzyjający korozji.

Fosfor reaguje z metalami w niskiej temperaturze. Zalecany głównie do obróbki stali z małymi prędkościami skrawania. Z miedzią i aluminium nie wchodzi w reakcje. Używa się do obróbki stopów niklu, stali stopowych, żaroodpornych utwardzających się podczas obróbki.

5. oleje mineralne z dodatkami polarnymi i dodatkami EP, wykazujące właściwości, zalety i wady, dla obydwu grup.

Zbyt aktywne dodatki EP, mogą powodować szybsze zużycie mechaniczne ostrza. Za małą aktywność nie spełnia założonych oczekiwań, powodując także nadmierne zużycie. Dobór cieczy obróbkowych olejowych wymaga wielokrotnych prób sporządzania składu i proporcji udziału dodatków z uwagi na rodzaj obróbki, materiały narzędzia i obrabianego.

2.6.2. Emulsyjne ciecze obróbkowe

Stanowią one mieszaninę wody z olejem emulgującym (najczęściej mineralny). Dla składu emulsji ważny jest stosunek ilości emulgatora (jonowe kationowe i anionowe) do oleju. Im jest go więcej, tym większa musi być powierzchnia oleju, a przy ograniczonej jego objętości powoduje to dalsze rozdrobnienie kropelek oleju. Dla ustalonej objętości oleju większa liczba mniejszych kulek ma większą powierzchnię niż mniejsza liczba kulek o dużym promieniu. Do olejów emulgujących wchodzić mogą dodatki poprawiające lub stabilizujące ich właściwości:

1. roztwory antykorozyjne i ułatwiające zwilżalność emulsji,
2. roztwory związków powierzchniowo aktywnych (mydła) myjące i bakteriobójcze,
3. zwiększające lepkość oraz przeciwpienne.

Główne zalety dotyczą:

1. dobrych właściwości chłodzących,

2. dobrych właściwości smarnych,
3. podwyższenia wydajności obróbki,
4. stosowania do różnych operacji obróbki skrawaniem,
5. podniesienia jakości powierzchni obrabianej,
6. stabilnych właściwości emulsji przez czas jej użytkowania.

Z wadami łączy się następujące utrudnienia dotyczące:

1. przygotowania emulsji: czysta woda, racjonowanie proporcji, sprawdzanie itp.,
2. zachowania czystości pojemników i otoczenia zbiorników,
3. zbiorników do przechowania i składowania,
4. możliwość zarażenia bakteriami i grzybami.

W tej grupie mieszczą się także emulsje tak zwane inwersyjne. Polega to na rozproszeniu wody w oleju. Jako emulgatory stosowane są mydła metali wielowartościowych, kauczuk, lanolina. Przy zawartości 80% rozproszonych kropli wody w oleju i dzięki jej wysokiemu ciepłu parowania uzyskano wysokie własności użytkowe, lepsze niż dla cieczy olejowych.

Właściwy dobór składu płynu obróbkowego jest wciąż sztuką. Emulsje wodne, które mają około 70÷80% udział całej masy cieczy obróbkowych, są wykorzystywane, gdy chodzi głównie o schładzanie strefy skrawania, a jakości powierzchni obrabianej nie są stawiane specjalne wymagania.

Przy wykańczającej obróbce – duża gładkość powierzchni – zalecane są emulsje roślinne, mineralne, zwierzęce, ich mieszaniny z zawartością siarki jako środka aktywnego. Do obróbki stopów aluminium polecana jest na przykład terpentyna lub nafta. W praktyce, przy pracy narzędziami ze stali węglowych i szybko tnących, stosowane są płyny obróbkowe we wszystkich sposobach obróbki. Z ograniczeniami stosowane są one przy skrawaniu ostrzami z węglików spiekanych. Można je stosować, z dużą intensywnością, tylko przy skrawaniu ciągłym (w toczeniu, wierceniu i rozwiercaniu), gdyż chwilowa przerwa strugi powoduje pękanie krawędzi ostrza.

2.6.3. Wodorozcieńczalne ciecze obróbkowe

Dzieli się je na trzy postacie:

- rzeczywiste roztwory wodne substancji nieorganicznych lub organicznych,
- roztwory z dodatkami – w postaci koloidalnej – zmniejszającymi napięcie powierzchniowe i zwiększającymi zwilżalność wody,
- kombinacje cieczy emulsyjnych i rozpuszczalnych w wodzie substancji syntetycznych.

Ponieważ można tworzyć ich kompozycje specjalizowane, to określono z góry ich przydatność. Przykładowo:

- dobrze chłodzące do operacji skrawania niezdefiniowanym ostrzem: szlifowania.

Przykładem jest roztwór sody – jako inhibitora korozji – w wodzie. Dobra przezroczystość pozwala nadzorować na bieżąco stan powierzchni obrabianej. Po rozcieńczeniu w wodzie, w proporcjach 99% wody i 1% dodatków, mają one niską zdolność smarną. Dla uzyskania oczekiwanych własności można dodawać środki myjące, ułatwiające penetrację, zwiększające zwilżalność itd.

- do operacji skrawania zdefiniowanym ostrzem: toczenie, wiercenie, frezowanie itd.

Szeroko stosowane przy koncentracji 20:1 i 50:1, zawierają o około 10 do 45% mniej olejów mineralnych niż ciecz emulsyjne a znacznie więcej emulgatora lub dodatków powierzchniowo czynnych. Są przezroczyste. Zalety polegają głównie na tym, że

- doskonale chłodzą,
- nie brudzą obrabiarki olejem – dobra ich stabilność,
- są przezroczyste,
- są odporne na zarażenie bakteriami i grzybami,
- pozwalają na stosowanie twardej wody i można je usuwać do ujęć ściekowych.

Do wad zalicza się:

- słabe zdolności smarne,
- zdolność do zateżnienia w czasie pracy,
- wypłukiwanie innych substancji smarujących węzły obrabiarki,
- zmywanie farb z powierzchni oraz tworzenie lepkich osadów.

2.6.4. Lotne środki obróbkowe

Przy prędkościach skrawania powyżej 100m/min, typowe ciecz są mało skuteczne, ponieważ zniszczeniu ulega film smarowy. Pozytywne rezultaty uzyskano przy stosowaniu powietrza, jego mieszanin z gazami (na przykład spalinowymi), czystych gazów (np. azotu) oraz tak zwanych aerozoli – zawiesin w powietrzu rozpylonej wody w ilości 2g/min. Wykazują one zdolność do intensywnego chłodzenia, dlatego uzasadnione jest ich stosowanie do skrawania materiałów trudnoobrabialnych. Ostrze ze spieku twardego, skrawające z prędkością skrawania 300 do 400m/min, chłodzone strumieniem rozprężanego powietrza, ma temperaturę zbliżoną do pokojowej przy sześciokrotnym wzroście trwałości. Dysze mają średnice od 1 do 5mm i dają natężenie przepływu 100 do 400l/min przy ciśnieniu 0.2 do 1MPa. Istotnym problemem jest chłodzenie żeliwa podczas jego obróbki. Opilki, zwykle silnie rozdrobnione, destabilizują

strumień cieczy, dlatego w tym przypadku skuteczniejszy jest strumień powietrza pod wysokim ciśnieniem.

Na zakończenie tematu stosowania cieczy obróbkowych należy wspomnieć, że:

1. Na rynku dostępne są koncentraty cieczy obróbkowych, które należy rozcieńczać zgodnie z zaleceniami producentów. Podstawowe parametry techniczne dotyczą składu i wydatku strugi płynu. Skład zawiera informacje o:

- **emulgatorach** – początkowo powszechnie stosowano alkaliczne sole kwasów tłuszczowych. W zetknięciu z twardą wodą wytrącały się w postaci nierozpuszczalnych soli: wapniowych, cynkowych, magnezowych lub barowych. Współcześnie stosowane są nie mające tych wad: sole kwasów naftenowych, sulfonowych, etoksyłowane fenole, i glikole w różnych połączeniach z olefinami i hydrofobowymi związkami.

- **dodatkach powierzchniowo czynnych** – jedne z nich wykazują aktywność na granicy faz woda – powietrze obniżając napięcie powierzchniowe i w wyniku poprawiając zwilżalność, zdolności penetrujące i myjące. Są to związki polarne, które według kryterium ich dysocjacji w wodzie dzielone są one na:

anionowe – dysocjują one w wodzie z utworzeniem ujemnie naładowanych jonów,

kationowe – dysocjują one w wodzie z utworzeniem dodatnio naładowanych jonów organicznych,

niejonowe – rozpuszczają się w wodzie nie dysocjując.

Kationy i aniony związków organicznych w wodnych roztworach łączą się w agregaty zwane micellami.

Drugie zaś aktywne są na granicy faz ciecz – metal. Działają podobnie jak EP. Są to głównie chlorowane i siarkowane węglowodory i tłuszcze a ponadto wiele innych związków fosforoorganicznych, przy doborze których należy zwracać uwagę na możliwości rozpuszczania i ich reakcji z wodą.

- **inhibitory korozji** – zapobiegające korozji powierzchni metalicznych i utlenianiu oleju emulgującego. Są to sole nieorganiczne (azotyn sodowy), związki kompleksowe organicznych ligandów, z metalami, fosforanu trójkrezyłu, organiczne aminy, nitrozwiązki i fenole.

- **dodatki bakteriobójcze** – zapobiegające rozwarstwieniu emulsji, która zachodzi w wyniku mikrobiologicznego rozkładu emulgatora. Zaliczają się do nich fenole, chlorofenole, krezole, nitroparafiny, pirydyny dodaje się także do nich środki zapachowe – różne estry.

- **dodatki przeciwpienne** – zapobiegające tworzeniu piany związki polimerowe do których można zaliczyć: glikole polietylenowe, polimery silikonowe polichlorek winylu, alkohol poliwinylowy, kazeina i inne podobne. Nie zawsze zalecany skład jest optymalny z uwagi na warunki obróbki.

2. Ilość cieczy podawanej do strefy skrawania waha się od 5 do 50 l/min. Kilka podstawowych sposobów podawania płynów obróbkowych do obszaru skrawania obejmuje:

- polewanie wąską strugą pod ciśnieniem około 0,1 MPa od strony powierzchni natarcia na powierzchnię wióra,
- stosowanie bardzo wysokich ciśnień (dochodzących do 100 MPa) przy znacznym wydatku płynu obróbkowego podczas skrawania ostrzami z węglików, ceramiki,
- dostarczanie płynu od strony powierzchni przyłożenia, szczególnie gdy powstaje dużo wstęgowego wióra ograniczającego polewanie od strony powierzchni natarcia,
- tworzenie mgły i aerozoli z płynu obróbkowego za pomocą pulweryzatorów (dysza rozpylająca), w których powietrze pod ciśnieniem około 1MPa unosi cząsteczki i omywa strefę skrawania od strony powierzchni przyłożenia,

Ciecz po przejściu przez strefę skrawania ogrzewa się. Powoduje to intensywne utlenianie jego składników. Rozwiązaniem są zbiorniki o dużej pojemności z rozbudowanym systemem stabilizującym temperaturę i skład płynu. Pominięcie tych wymagań powoduje, że wątpliwa może być skuteczność właściwego oddziaływania poszczególnych składników cieczy. Powtórne użycie cieczy – recykling, wymaga jego schłodzenia, zregenerowania składu i oczyszczenia z zanieczyszczeń metalowych.

Poszukuje się możliwości schładzanie ciekłymi gazami, na przykład polewania strefy skrawania względnie tanim azotem, który nie skaża środowiska, wymaga jednak zachowania ostrożności. Możliwe jest schładzanie przedmiotów, po zanurzeniu w ciekłym gazie, przed ich obróbką lub w przerwach międzyopracyjnych. Kierunki rozwoju cieczy obróbkowych, uwzględniają:

- stabilne i trwałe ich zachowanie przy wysokich prędkościach skrawania,
- trwałość mikrobiologiczną i brak przykrych zapachów – odporność na rozwój bakterii,
- higieniczność i zupełną obojętność w stosunku do organizmu ludzkiego, ograniczenie szkodliwego działania na skórę, oczy i drogi oddechowe,
- przezroczystość i ograniczone pienienie w czasie ich wykorzystywania,
- odporność na ich rozkład w temperaturach 20 – 60 °C przy dostępie powietrza,

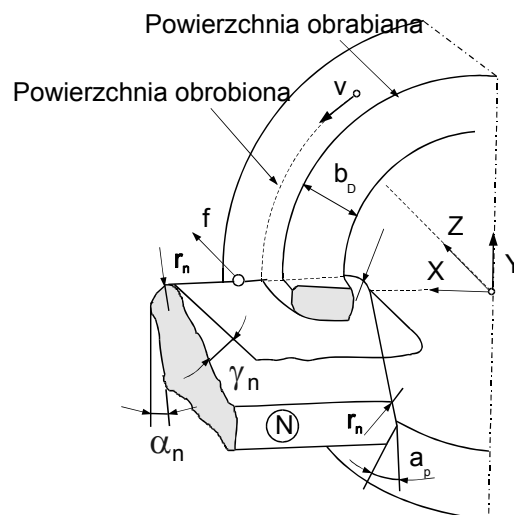
- brak skłonności do tworzenia osadów w układzie zasilania oraz możliwość łatwego ich splukiwania gdy się pojawiają,
- obojętne reakcje na zabezpieczenia antykorozyjne i uszczelnienia OUPN,
- łatwe przygotowanie, szeroki zakres modyfikowania składu i uniwersalne zastosowanie,
- zdolność do szybkiej penetracji i dobrą zwilżalność powierzchni obrabianej,
- niską temperaturę krzepnięcia i wysoką temperaturę wrzenia,
- niepalność.
- możliwość recyklingu i ekologiczność.

2.7. Zjawiska przykrawędziowe

Istotne w opisie przebiegu skrawania jest odróżnienie tej części zjawisk, które związane są z tworzeniem wióra od tych, które bezpośrednio wpływają na powstającą powierzchnię obrobioną przedmiotu. Podzielono, z tego punktu widzenia, skrawanie na swobodne – grubość wióra stała i nieswobodne – zmienna grubość wióra wzdłuż krawędzi skrawającej. Gdy skrawanie odbywa się w warunkach takich, że krawędź skrawająca jest prostopadła do wektora posuwu f to nazwano je prostokątnym, w innych przypadkach ukośnokątnym. Techniczne ostrze ma zawsze zaokrągloną krawędź skrawającą promieniem r_n . Pracy krawędzi towarzyszą rozmaite zjawiska przykrawędziowe, które zostaną przybliżone w kolejnych podrozdziałach.

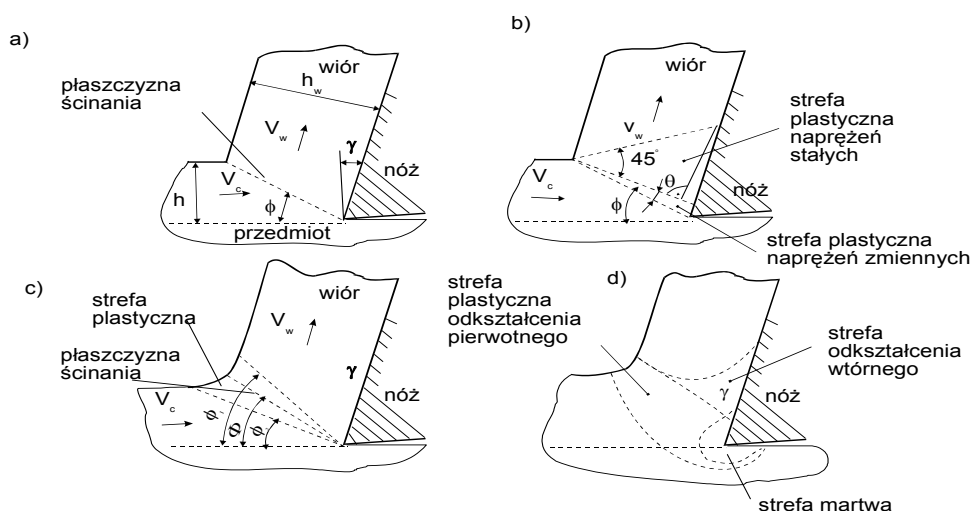
2.7.1. Skrawanie prostokątne – model skrawania

Warunki skrawania swobodnego, prostokątnego pokazano na rys. 2.39.



Rys. 2.39. Skrawanie swobodne, prostokątne

Do takich warunków skrawania opracowano wiele modeli skrawania. Zebrane na rys. 2.40. modele skrawania prostokątnego i swobodnego ukazują jak różnorakie było podejście ich twórców. W modelach tych pomijano udział promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej.

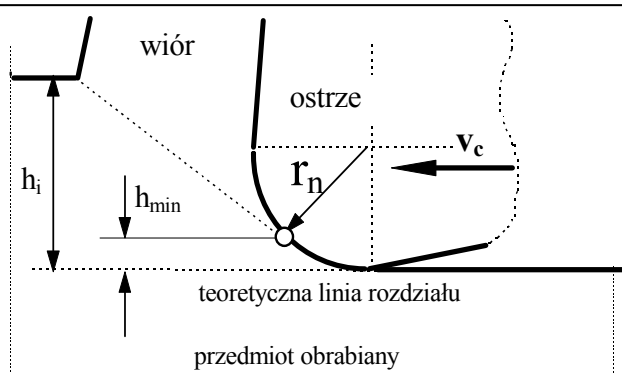


Rys. 2.40. Modele skrawania a) z pojedynczą płaszczyzną ścinania, b), c) ze strefą odkształceń plastycznych, d) w procesie rzeczywistym

Autorzy modeli tworzenia wiórów oparli je na założeniach, że mechanizm tworzenia wiórów z warstwy skrawanej jest:

- jakościowo podobny przy różnych grubościach warstwy skrawanej,
- obowiązuje w każdym przekroju normalnym do tej krawędzi.

Z czasem zaczęto uwzględniać w skrawaniu udział powierzchni zaokrąglenia krawędzi skrawającej jak między innymi w pracach [29,40,41] (rys. 2.41.). Analiza strefy skrawania swobodnego, z udziałem zaokrąglenia krawędzi skrawającej jako powierzchni walcowej o promieniu równym r_n wymusza stwierdzenie, że gdy grubość warstwy skrawanej h jest kilkakrotnie większa od promienia $h \gg r_n$ oraz gdy wartości te są prawie porównywalne, rola i znaczenie tego zaokrąglenia będzie inna [1,2]. Logiczne jest spostrzeżenie, że jego rola rośnie, gdy mamy do czynienia z obróbką dokładną i wykańczającą.



Rys. 2.41. Schemat skrawania krawędzią ostrza,

r_n – promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej, h_{\min} – minimalna grubość warstwy skrawanej, h_i – grubość warstwy skrawanej

Twórcy modeli teoretycznych skrawania starali się znaleźć wyjaśnienie, jakie siły uczestniczą w tworzeniu wióra? Analizowali oni uproszczone modele skrawania, gdy ostrze pracowało jedną, prostoliniową krawędzią skrawającą. Wymienić tu należy takich badaczy jak Merchant, który w 1945 roku na podstawie prostego modelu, w którym siły działały tylko na styku wióra z narzędziem, czyli na powierzchni natarcia oraz w płaszczyźnie ścinania, rozwiązał równania dla tych sił. Pomiął jednak siły działające na krawędzi skrawającej oraz na powierzchni przyłożenia [32]. Zorev opisał wyniki badań modelu, uwzględniającego również siły na powierzchni przyłożenia, pominął jednak siły na powierzchni zaokrąglenia krawędzi skrawającej [46,47]. Masuko i Albrecht [29,3] uwzględnili w modelach siły na krawędzi skrawającej, pominęli jednak siły działające na powierzchni przyłożenia. Albrecht wprowadził siłę tzw. „płującą”, która była wypadkową z zaokrąglenia krawędzi skrawającej; z kolei zaś Masuko przyjął równomierny rozkład sił jednostkowych.

Praca Albrechta zamknęła etap rozwoju teorii skrawania, w którym starano się określić grupy podstawowych czynników, wpływających na rozkład sił w strefie skrawania. Badania dowiodły, że na ostrze działają trzy grupy sił związanych kolejno z powierzchnią ścinania, natarcia i zaokrąglenia krawędzi skrawającej. W badaniach prowadzonych do 1974 roku przez Roth'a i Oxley'a [37], a dotyczących analizy rozkładu linii poślizgów, ujawniono szereg istotnych wniosków odnośnie do roli krawędzi skrawającej i jej udziału w tworzeniu wióra. Szczególnie istotne są dwa:

- na krawędzi skrawającej znajduje się charakterystyczny punkt, w którego otoczeniu pole odkształceń jest takie jak przy ściskaniu,

- strefa odkształceń plastycznych w pobliżu bezpośredniego otoczenia powierzchni zaokrąglenia krawędzi skrawającej ma istotne znaczenie dla opisu zagadnień naprężeń wynikowych w warstwie wierzchniej.

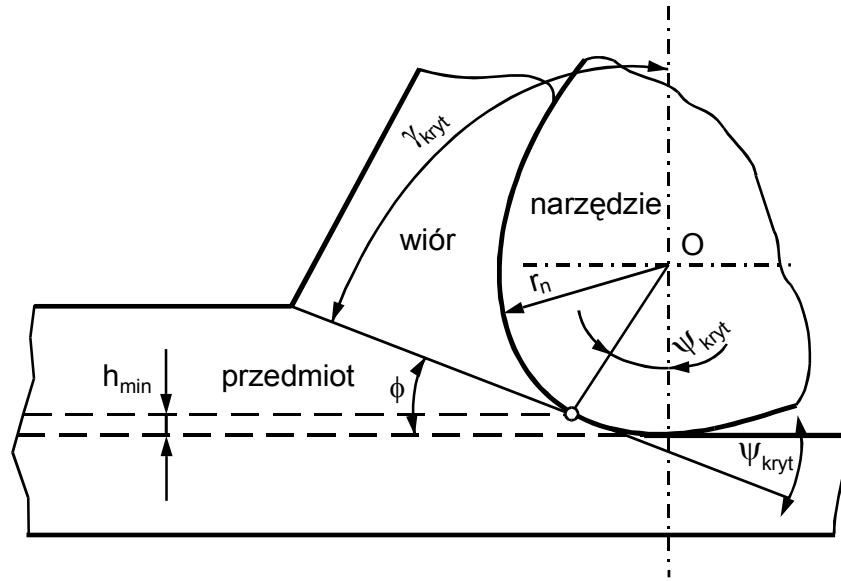
Niektórzy badacze [24,36] stwierdzali, że podczas toczenia różnych materiałów, w odmiennych warunkach skrawania, pole odkształceń jest jakościowo niezmiennie, a przebieg linii płynięcia przemieszczających się cząstek materiału zdejmowanej warstwy jest taki sam. Kravcenko [24] twierdził, wprost, że pole naprężeń nie zależy od materiału obrabianego.

Ten syntetyczny przegląd wyników świadczy o stopniu trudności przy rozwiązywaniu zagadnienia pola sił wokół powierzchni zaokrąglenia krawędzi skrawającej. Charakterystyczne jest i to, że wspomniane metody nie dawały możliwości określenia odkształcenia plastycznego ani stopnia umocnienia obrabianego materiału [35]. W modelach kąt tarcia był jedyną – obok kąta natarcia – wielkością wchodzącą do równania, które za pomocą kąta ścinania charakteryzowało skrawalność badanego materiału.

Współczynnik tarcia nazywano średnim i najczęściej zakładano, że jest on taki sam na powierzchni przyłożenia jak i natarcia [19,47]. W 1975 roku Bailey [4] przedstawił pracę, w której przeanalizował wyniki z około stu pozycji literaturowych. Najważniejszym wnioskiem tego opracowania było stwierdzenie, że warunki tarcia na krawędzi skrawającej zależą w znacznej mierze od prędkości skrawania oraz od geometrii tej części ostrza. Współczynnik tarcia podawany w tych pracach zmieniał się w szerokim zakresie wartości zarówno na powierzchni natarcia, jak i przyłożenia. Stopień skomplikowania opisu tworzenia powstającej powierzchni wzrasta gdy w rozważaniach uwzględnia się postępujące zużycie ostrza.

Podczas toczenia swobodnego wzdłużnego, jak dla przypadku toczenia rury (zobacz rys. 2.39.), powierzchnia obrobiona tworzona jest przez krawędź skrawającą poruszającą się według linii śrubowej.

Gdy wyłączy się posuw, to narzędzie dalej skrawa przez około jeden obrót przedmiotu do momentu, gdy grubość warstwy skrawanej osiągnie wartość h_{min} , poniżej której ostrze nie jest w stanie formować wióra. W dalszym etapie powierzchnia przyłożenia odkształca sprężysto i plastycznie powierzchnię skrawania. Przebieg tych etapów jest możliwy do wyznaczenia przez pomiar składowych siły skrawania. Po wyłączeniu posuwu następuje szybkie zmniejszanie siły skrawania do momentu zaniku wióra, siła jednak nie osiąga wartości zerowej. Dalsza jej rejestrowana (malejąca) wartość jest wynikiem oddziaływania – po ustaniu wskutek umocnienia odkształceń plastycznych – tylko sprężystych i ciernych zjawisk stykowych, aż do ich zupełnego zaniku. Opisane rozumowanie ilustruje rys. 2.42.



Rys. 2.42. Model pracy zaokrąglania krawędzi skrawającej

Wynika z niego, że występuje taka graniczna grubość warstwy skrawanej h_{\min} , dla której kąt $\psi = \psi_{\text{kryt}}$, a więc i odpowiednio kąt natarcia $\gamma = \gamma_{\text{kryt}}$, dla których wzajemną zależność wyznaczyć można z geometrycznej równości:

$$\psi_{\text{kryt}} + \gamma_{\text{kryt}} = \frac{\pi}{2} \quad (2.40)$$

Trygonometryczną wartość kąta można zapisać jako:

$$\cos \psi_{\text{kryt}} = 1 - \left(\frac{h_{\min}}{r_n} \right). \quad (2.41)$$

Po podstawieniu równania (2.40) do (2.41) i po prostych przekształceniach otrzyma się zależność

$$\cos \psi_{\text{kryt}} = \cos \left(\frac{\pi}{2} - \gamma_{\text{kryt}} \right) = \sin \gamma_{\text{kryt}} \quad (2.42)$$

wtedy, ze względu na przyjęty umownie sposób oznaczenia kąta natarcia

$$-\gamma_{\text{kryt}} = \arcsin \left(1 - \left(\frac{h_{\min}}{r_n} \right) \right) \quad (2.43)$$

Promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n jest większy od zera i zależy przy poprawnej technologii ostrzenia głównie od materiału ostrza oraz kąta klina ostrza β_n , najczęściej według zależności wykładniczej:

$$r_n = A \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\beta_n}{2}\right) \quad (2.44)$$

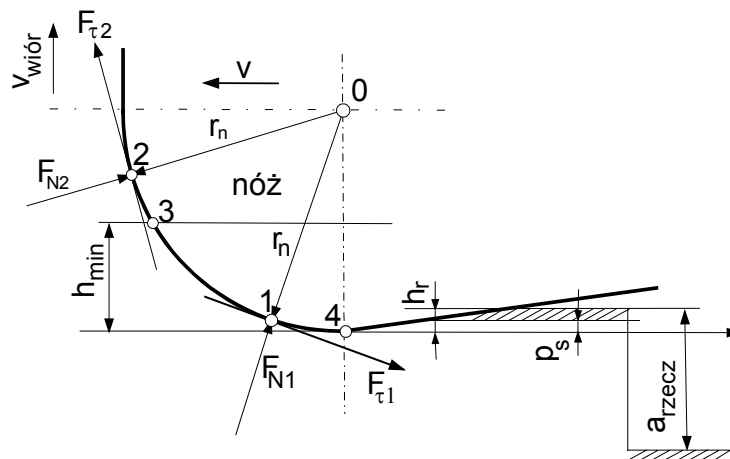
przykładowo dla spieku twardego:

$$r_n = A \cdot \operatorname{tg}^{1,6}\left(\frac{\beta_n}{2}\right) [44] \quad (2.45)$$

Po podstawieniu przykładowych wartości kąta β_n z przedziału od 50° do 70° otrzymuje się, oczekiwane dla nowej krawędzi z twardego spieku, wartości promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n ; od około $6 \mu\text{m}$ do $11 \mu\text{m}$. W praktyce uzyskuje większe wartości w granicach około $15 \mu\text{m}$. Rosną one z postępującym zużyciem.

Wynika stąd, że w równaniu (2.43), gdy h_{\min} dąży do zera, to krytyczny kąt natarcia wynosi minus $\frac{\pi}{2}$. W drugim przypadku, gdy h_{\min} wzrasta do r_n , kąt natarcia wyniesie 0.

Sens fizyczny punktu, w którym kąt natarcia osiąga wartość γ_{kryt} można przedstawić graficznie, jak to ujmuje rys. 2.43. Wynika z niego, że gdy $h < h_{\min}$, to siły styczne do zaokrąglenia krawędzi skrawającej mogą mieć zwrot tylko zgodny z kierunkiem spływu materiału skrawanego wokół powierzchni zaokrąglenia. Jeśli przyjmie się, że to ostrze wykonuje ruch, to z ruchów względnych wynikają zwroty sił stycznych i normalnych w punkcie 1 i punkcie 2; w punkcie 1 siły – F_{N1} normalna i $F_{\tau1}$ styczna, w punkcie 2 siły F_{N2} normalna i $F_{\tau2}$ styczna. Zgodnie ze schematem na rys. 2.43. nóż nie wykonuje ruchu prostopadłego do prędkości skrawania, jednak wiór musi się przemieścić ku górze i stąd taki przyjęty kierunek siły stycznej $F_{\tau2}$. Aby możliwe było jednoczesne przemieszczanie się elementów warstwy skrawanej, zarówno w stronę powierzchni przyłożenia jak i powierzchni natarcia, musi być taki punkt 3 lub jego otoczenie, w którym następuje rozdzielenie warstwy skrawanej.



Rys. 2.43. Siły i składowe ruchu wokół zaokrąglenia krawędzi skrawającej

Odpowiadającą temu punktowi grubość warstwy skrawanej nazwano umownie minimalną grubością warstwy skrawanej h_{\min} i jest to teoretyczna warstwa, znajdująca się przed najniższym położonym punktem 4 na zaokrągleniu krawędzi skrawającej. Warstwa ta, o grubości h_{\min} , musi więc przesunąć się jeszcze pod punktem 4, a po rozdzieleniu się warstw w punkcie 3, ulega ona bardzo znacznemu odkształceniu plastycznemu.

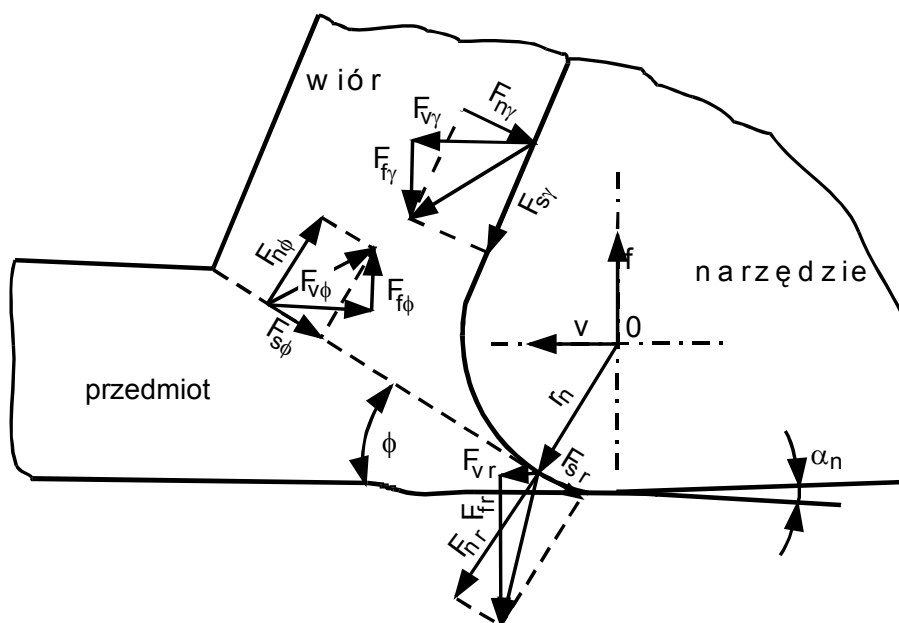
Wymiar a_{rzecz} – którego nie można zmierzyć żadną metodą bezpośredniego pomiaru – jest różnicą głębokości pomiędzy bazową powierzchnią i nowopowstałą po przejściu ostrza. Na wymiar a_{rzecz} składa się: reszkowa, plastycznie odkształcona grubość warstwy skrawanej h_r oraz P_s , powrót sprężystości odkształconych, pod nią leżących, warstw przedmiotu. Plastycznie odkształcona warstwa h_r i powracająca sprężystość, głębiej położona część materiału, jest składową wartości błędu obróbki, gdyż nastawiona głębokość skrawania – a_p , różni się od a_{rzecz} . Z uwagi na brak metody wyznaczenia wartości powrotu sprężystego P_s , nie można wyliczyć reszkowej grubości warstwy skrawanej h_r .

W pracy [17] przedstawiono rezultaty badań, poświęconych minimalnej grubości warstwy skrawanej h_{\min} . Dla różnych materiałów skrawanego i narzędzia, kąt Ψ_{kryt} przyjmował wartości 5° oraz 90° . Przedstawione rozważania o pracy zaokrąglenia krawędzi skrawającej obejmują ostrza, które oddzielają wiór niezależnie od tego, jakiej odmiany obróbki dotyczą. Założenia te są szczególnie istotne. Odnoszą się zarówno do mechaniki oddzielania

materiału w toczeniu swobodnym, jak i nieswobodnym. Podobieństwo zjawisk, zachodzących wokół powierzchni zaokrąglenia krawędzi skrawającej, dla obu odmian toczenia, wyjaśnienia kilka zagadnień, związanych z rozkładem sił oraz tworzeniem profilu chropowatości powierzchni.

2.7.1.1. Model sił w strefie skrawania swobodnego

Podstawowym założeniem dla skrawania prostokątnego i swobodnego jest to, że zjawiska związane z mechaniką oddzielania przebiegają tak samo we wszystkich przekrojach prostopadłych do krawędzi skrawającej. Do rozważań wystarczy, zatem znajomość mechaniki oddzielania w jednym przekroju. Do analizy zjawisk w strefie skrawania swobodnego przyjęto uproszczony model pokazany na rys. 2.44.



Rys. 2.44. Model sił w skrawaniu prostokątnym

W modelu tym uwzględniane są trzy grupy sił, a to;

- na powierzchni natarcia,
- w płaszczyźnie ścinania,
- na powierzchni zaokrąglenia krawędzi skrawającej.

Dla uproszczenia nie rozdziela się także sił działających na powierzchni zaokrąglenia krawędzi skrawającej na część przynależną do powierzchni przyłożenia oraz powierzchni natarcia.

Dla tego modelu można wyznaczyć układ dwóch równań, dla których suma rzutów sił, działających w kierunku f , jest składową posuwową F_f , a w kierunku v – składową główną siły skrawania F_v , zatem;

$$F_f = F_{f\phi} + F_{f\gamma} + F_{fr} \quad (2.46)$$

$$F_v = F_{v\phi} + F_{v\gamma} + F_{vr} \quad (2.47)$$

gdzie indeksy dotyczą:

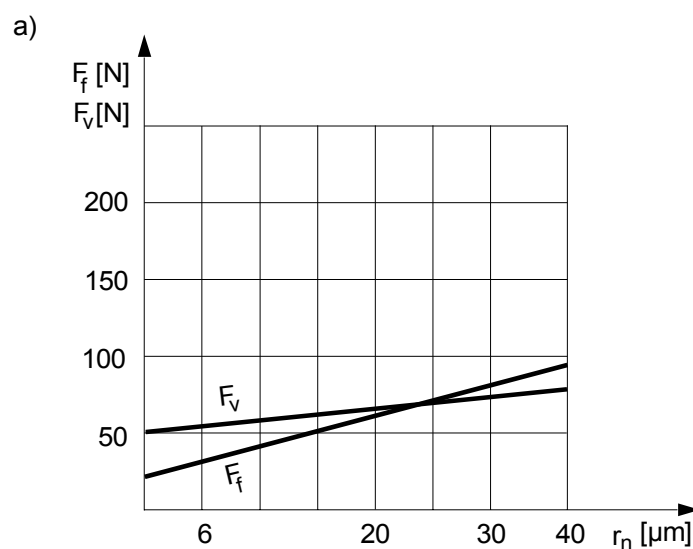
ϕ – płaszczyzny ścinania,

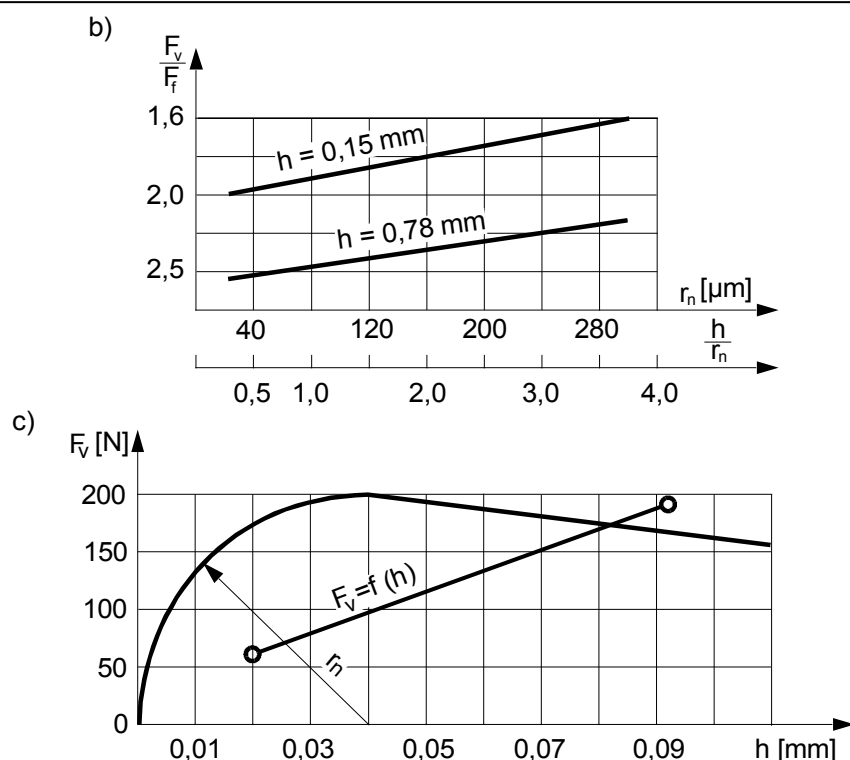
γ – powierzchni natarcia,

r – powierzchni zaokrąglenia krawędzi skrawającej.

W równaniach tych występuje sześć niewiadomych składowych sił. Wartości sił wypadkowych F_f i F_v można wyznaczyć przy użyciu siłomierza, co jednak nie daje możliwości wyznaczenia 6-ciu składowych, zarówno metodami analitycznymi jak i doświadczalnymi. Złożonego stanu naprężeń materiału w strefie skrawania nie daje się również opisać wychodząc z teorii plastyczności z tego względu, że zjawiska odkształceń w skrawaniu zachodzą przy tak znacznych przyspieszeniach i prędkościach, iż zmianie ulegają właściwości mechaniczne, a więc i skrawalność, materiału obrabianego.

W pracach, gdzie opisano efekty badań nad siłami zmierzonymi dla grubości warstw mniejszych od promienia r_n , otrzymano nieliniowe przebiegi sił w obszarze małych grubości warstwy skrawanej, a ilustracją tego są wykresy na rys. 2.45. a) [12,23].





Rys. 2.45. Przebiegi składowych sił skrawania w zakresie małych grubości warstwy skrawanej

a) według [14], b) według [9], c) według [37]

Przeciwnym przykładem są wykresy na rys. 2.45. b), c), na których przebiegi mają charakter liniowy [9, 14, 37]. Podobne wyniki otrzymali także inni badacze [10, 24, 27]. W przypadku nieliniowych przebiegów nie zachowano warunku stałości temperatury skrawania. Inną przyczyną jest rodzaj materiału obrabianego. Wynika to stąd, iż podatność na zmiany właściwości obrabianego materiału, spowodowane zmianami temperatury, są różne. Lierath [27], podkreślił w swojej pracy, że właściwości materiału nie tylko zależą od temperatury skrawania, ale mogą także – przy pewnych jej wartościach – zmieniać się skokowo. Dla przykładu mosiądz w stosunku do stali wykazuje większe wahania zmian właściwości, a zwłaszcza w niższych temperaturach. Następną przyczyną może być prowadzenie eksperymentu przy tak wysokim zakresie prędkości skrawania, przy którym zmiana wartości posuwu wykazuje już niewielki wpływ na wzrost temperatury.

Tak więc, jeśli przebieg jest liniowy, to można zależności na siły skrawania w funkcji grubości warstwy skrawania przedstawić jako:

$$F_v = A_v h + B_v \quad (2.48)$$

$$F_f = A_f h + B_f \quad (2.49)$$

a wtedy, jak sugerowali niektórzy autorzy, po podstawieniu $h = 0$, wolne wyrazy są siłami działającymi na powierzchni przyłożenia. Również w pracach [9, 10, 14, 24, 37] pokazano, że zależności siły $F_v = f(h)$ oraz $F_f = f(h)$ są liniowe zarówno, gdy warstwy skrawane są mniejsze od promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej, czyli $h < r_n$, jak i dla $h > r_n$ i nie wykazują żadnych zmian przebiegu tych funkcji przy przejściu z jednego przypadku do drugiego.

2.7.1.2. Rozkład naprężeń i przemieszczeń w materiale obrabianym

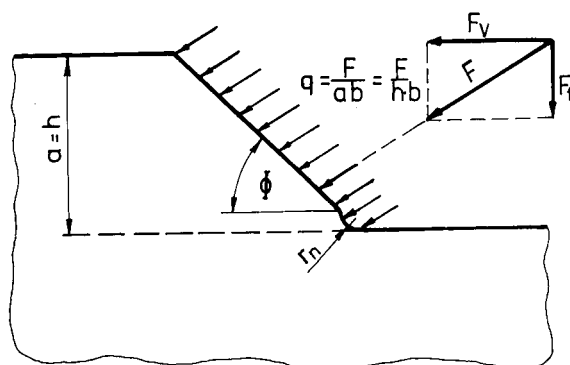
Bardzo ważne jest, z punktu widzenia powstającej powierzchni, zagadnienie zachowania się materiału w warstwie skrawanej pod działaniem klina ostrza.

Do wyznaczenia rozkładu naprężeń, wykorzystano model strefy skrawania dla toczenia swobodnego prostokątnego, dla którego słuszne jest założenie, że w każdym przekroju normalnym do krawędzi skrawającej jest płaski stan naprężeń. Założenie to jest słuszne dla przekrojów odpowiednio oddalonych w głąb materiału od powierzchni zaokrąglenia krawędzi skrawającej gdyż na bezpośrednim styku powierzchni roboczych ostrza z materiałem skrawanym ujawniają się osobliwości, których nie wyjaśnia teoria plastyczności. Brak możliwości wyliczenia naprężeń w miejscu przyłożenia obciążenia jest znanym ograniczeniem, które leży u podstaw wszystkich metod liczenia naprężeń. W przykładzie wyznaczenia obciążenia na granicach strefy skrawania skorzystano z równań sił:

$$F_c = 1802,8 h_i + 88,5[N] \quad , \quad (2.50)$$

$$F_f = 735,2 h_i + 52,8[N] \quad , \quad (2.51)$$

wyznaczonych dla stali 55, toczonej ostrzem ze stali SW7M. Siły te, zgodnie z równaniami równowagi, są wypadkowymi z sił działających na trzech różnych powierzchniach; natarcia, ścinania i zaokrąglenia krawędzi skrawającej. Na wydzielony, dla tak sformułowanych warunków, dowolny przyrost grubości warstwy skrawanej Δh_i , działają siły ΔF_c oraz ΔF_f . Są one w tym układzie przyrostami wypadkowymi, opisującymi stan równowagi wszystkich sił działających na taki wydzielony element warstwy skrawanej. Rozłożenie sił ΔF_c i ΔF_f , wzdłuż powierzchni roboczych ostrza noża, jest niemożliwe ze względu na zmienność współczynnika tarcia. Zmodyfikowany model strefy skrawania polega na odrzuceniu wióra i zastąpieniu go naciskami w płaszczyźnie ścinania pochylonej pod kątem $\phi = 20^\circ$ (rys. 2.46.).



Rys. 2.46. Założenia do obliczeń

Przeprowadzono obliczenia dla grubości warstwy skrawanej równej $h=0,19\text{mm}$, a procentowy udział promienia r_n w całkowitych wartościach sił nie przekraczał 15%. Wykorzystano założenie o stałości naprężeń w płaszczyźnie ścinania. Obliczenia przeprowadzono, dla dwóch przykładów:

- z uwzględnieniem rozkładu sił na zaokrągleniu krawędzi (dla $r_n > 0$) oraz,
- z jego pominięciem (dla $r_n = 0$).

Model strefy skrawania przyjęty do obliczeń naprężeń i przemieszczeń przedstawiono na rys. 2.46. Rozwiązywanie zadań płaskich i przestrzennych teorii sprężystości sprowadza się do rozwiązania układu równań różniczkowych opisujących stan równowagi ciała:

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} = 0 \quad (2.52)$$

$$\frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} = 0 \quad (2.53)$$

gdzie:

σ_{ij} – składowe naprężeń w prostokątnym układzie współrzędnych,

x_i – współrzędne układu odniesienia.

Do rozwiązania układów równań (2.52) i (2.53) zastosowano opisaną w literaturze, tak zwaną numeryczną metodę całki brzegowej [6,8,11], która ma następujące zalety:

1. Punkty węzłowe są konieczne jedynie na powierzchni a nie wewnątrz obszaru (tzn. na obrysie rozpatrywanego zadania płaskiego, a na powierzchni przy zadaniu przestrzennym).

2. Numeryczne przybliżenia, wynikające z metody obliczania całek i różniczek, ograniczają się tylko do powierzchni ciała.
3. Naprężenia i przemieszczenia wewnątrz ciała można określić w dowolnym punkcie, a nie jak w metodzie elementów skończonych tylko w punktach węzłowych.
4. Sformułowanie równań całkowych i ich redukcja do równań algebraicznych nie podlega żadnym ograniczeniom wynikającym z geometrii ciała.
5. Zagadnienia o jednorodnych (zadane tylko przemieszczenia lub tylko obciążenia) i mieszanych warunkach brzegowych rozwiązuje się z równą łatwością.
6. Naprężenia wewnątrz ciała wylicza się bezpośrednio ze wzorów, bez potrzeby numerycznego różniczkowania.

Metoda ta pozwala rozwiązać równania (2.52) i (2.53) przy wykorzystaniu rozwiązań podstawowych w postaci:

$$U_{ij} = \frac{1}{8 \cdot \pi \cdot G \cdot (1 - \nu)} \cdot \left[\frac{\partial r}{\partial n} \cdot (3 - 4\nu) \cdot \ln \frac{1}{r} \cdot \delta_{ij} + \frac{\partial r}{\partial x_i} + \frac{\partial r}{\partial x_j} \right] \quad (2.54)$$

$$T_{ij} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot G \cdot (1 - \nu)} \cdot \left[\frac{\partial r}{\partial n} \cdot (1 - 2\nu) \cdot \delta_{ij} + 2 \cdot \frac{\partial r}{\partial x_i} + \frac{\partial r}{\partial x_j} + (1 - 2\nu) \cdot \left(\frac{\partial r}{\partial x_i} \cdot n_j + \frac{\partial r}{\partial x_j} \cdot n_i \right) \right] \quad (2.55)$$

gdzie:

U_{ij} – tensor przemieszczeń,

T_{ij} – tensor sił jednostkowych,

G, ν – stałe materiałowe,

r – położenie rozpatrywanego punktu we współrzędnych prostokątnych,

n_{ij} – wektor normalny.

Błąd obliczeń zależy od sposobu obciążenia (stałe, zmienne wzdłuż brzegu) oraz gęstości punktów przyjętego obciążenia i wynosi od 2 do 30 procent [45].

Obliczenia rozkładu przemieszczeń i naprężeń w strefie skrawania przeprowadzono dla siatki 324 punktów wewnętrznych, z uwzględnieniem położenia punktów w stosunku do zaokrąglenia krawędzi skrawającej i zmiennej ich gęstości – mniejszej dla leżących w głębi materiału, większej zaś dla obszaru przyległego do teoretycznej płaszczyzny ścinania.

W punktach tych obliczono:

- dwie składowe przemieszczenia u_x , u_y ,
- trzy składowe naprężenia s_x , s_y , t_{xy} ,

oraz dodatkowo wprowadzono:

- wypadkowe przemieszczenie u a także kąt α_1 , odchylenia u od osi OY,

- składowe naprężeń głównych s_1, s_2 i kąt α , liczonych według

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.56)$$

$$2 \cdot \alpha = \arctg\left(\frac{2 \cdot \tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}\right) \quad (2.57)$$

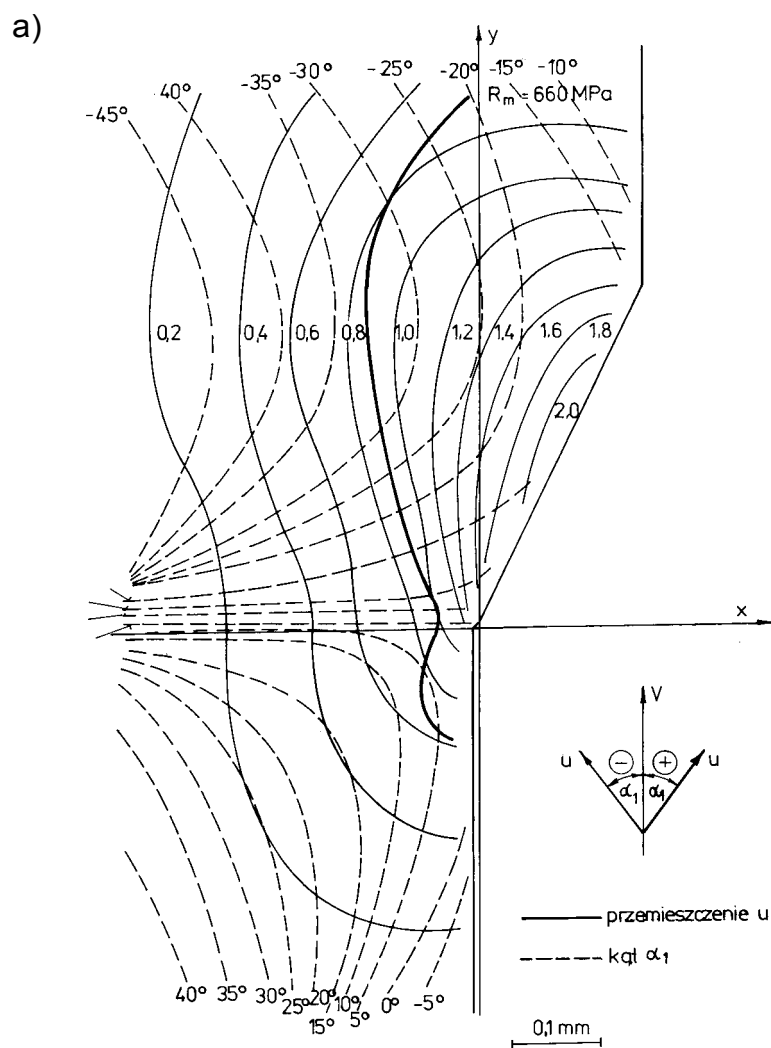
- naprężenie zredukowane według hipotezy Hubera:

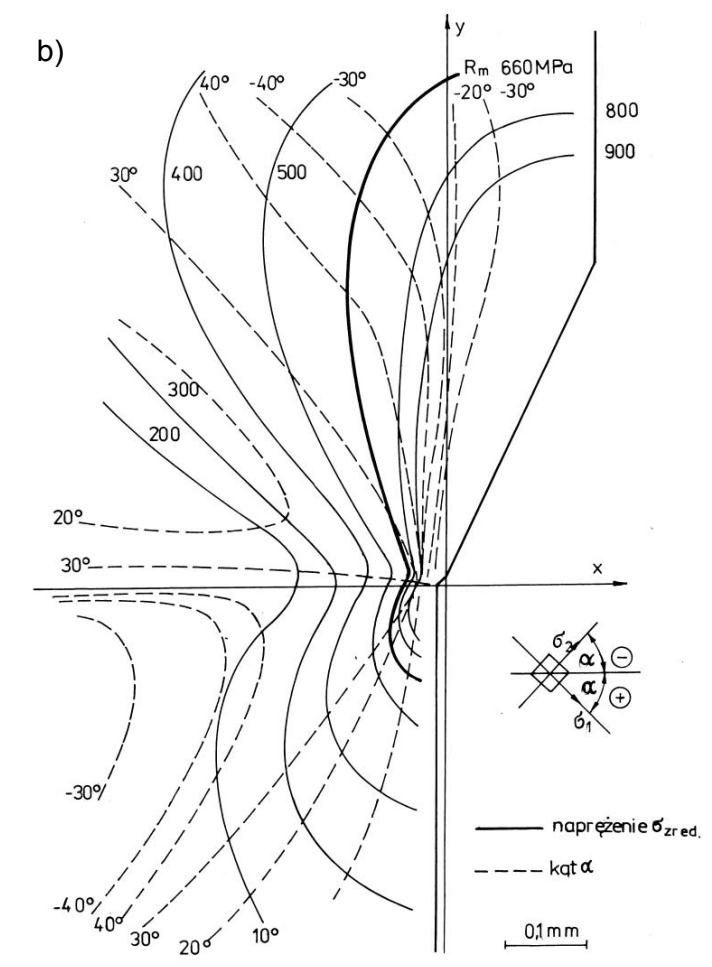
$$\sigma_{zred} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2} \quad (2.58)$$

Otrzymane wyniki z obliczeń zilustrowano wykresami. Na rys. 2.47. a) przedstawiono plan warstwiczny przemieszczeń, a na rys. 2.47. b) plan warstwiczny naprężeń w warstwie skrawanej. Na obu rysunkach krzywą pogrubioną zaznaczono wartość naprężenia zredukowanego, odpowiadającego granicy wytrzymałości $R_m = 660$ MPa dla stali 55.

Przemieszczenia osiągają większe wartości w obszarze przed zaokrągleniem krawędzi skrawającej. Kierunki przemieszczeń wypadkowych u odpowiadają kierunkowi wektora prędkości skrawania, przy czym w obszarze przed zaokrągleniem krawędzi skrawającej odchylają się w głąb materiału obrabianego, a w obszarze za zaokrągleniem krawędzi skrawającej, odchylają się w stronę przeciwną (rys. 2.47. a). Wskazuje to na sprężysty powrót materiału obrabianego.

Do analizy zaś rozkładu naprężeń użyto ich wartości zredukowanych według hipotezy Hubera, gdyż naprężenia te odzwierciedlają wyężenie materiału obrabianego poddanego obciążeniu siłami skrawania. W przekroju odpowiadającym zaokrągleniu krawędzi skrawającej występuje największy gradient naprężeń (na rys. 2.47. b linie stałych wartości σ zagęszczają się). Odpowiada to największemu wyężeniu materiału obrabianego pod zaokrągleniem krawędzi skrawającej.





Rys. 2.47. Zmiany przemieszczeń i naprężeń

W obszarze przed zaokrągleniem krawędzi skrawającej dominują naprężenia ściskające, w obszarze zaś za zaokrągleniem naprężenia rozciągające. Przeprowadzone obliczenia (dla porównania modelu, uwzględniającego siły na zaokrągleniu krawędzi z modelem, w którym je pominięto) wykazały, że różnice są bardzo niewielkie i nie zmieniają przebiegu linii charakterystycznych na rys. 2.47. Otrzymane z obliczeń rozkłady naprężeń i przemieszczeń w głąb materiału obrabianego, wokół skrawającego ostrza, wskazują na znamienne zjawiska. Są one bardzo pomocne do wyjaśnienia niektórych istotnych obserwacji. Wyraźnie dostrzegalne jest przemieszczanie się krawędzi skrawającej we wcześniej plastycznie odkształconej warstwie. Przednia granica

tej warstwy wyprzedza znacznie przekrój, w którym znajduje się krawędź skrawająca. Materiał obrabiany zbliża się do krawędzi skrawającej już odkształcony plastycznie i w jej polu nacisków jak to wcześniej opisano ulega rozdzielaniu. Właściwości materiału skrawanego mogą modyfikować ten mechanizm przez skłonność do umocnienia przy odkształceniu plastycznym lub kruchych pęknięć. Ujawniona obecność, charakterystycznie rozciągniętych włókien na powierzchni skrawania, jest uzasadniona tak znacznym odkształceniem plastycznym materiału. Potwierdza niewielki udział sił na zaokrągleniu krawędzi skrawającej w całkowitej sile skrawania, jednak o podstawowym ich znaczeniu w tworzeniu powierzchni obrobionej, w tym i chropowatości.

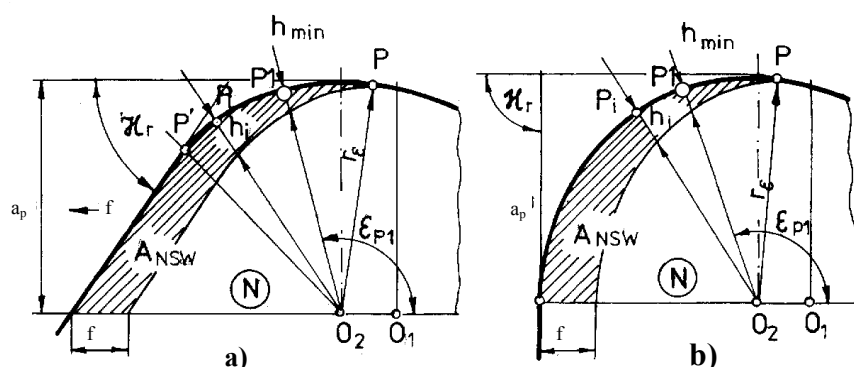
Omówione wyniki wyjaśniają brak zależności między naprężeniami w warstwie wierzchniej i wartością promienia r_n , gdyż jak to widać: o naprężeniu w głównej mierze decyduje obciążenie z płaszczyzny ścinania. Zaokrąglenie zaś krawędzi skrawającej konstituuje powierzchnię obrobioną. Przebieg naprężeń wyjaśnia też stwierdzaną w badaniach stałość siły stycznej na części powierzchni przyłożenia, bowiem pracuje ona w warstwie plastycznego materiału o ustabilizowanych okresowo właściwościach.

Powyższe wyniki potwierdzają następujące stwierdzenia:

- w wyraźny sposób, o około dwie grubości warstwy skrawanej, linia określająca granicę wyężenia materiału, wyprzedza płaszczyznę w której pracuje krawędź skrawająca,
- głębokość położenia linii, odpowiadającej naprężeniu równemu granicy wytrzymałości materiału obrabianego, jest znaczna i wynosi dziesiątne części milimetra.

2.7.2. Skrawanie nieswobodne. Model skrawania

W praktyce dominuje przypadek skrawania, w którym krawędź skrawająca jest łukowa i tworzenie wióra jest nieswobodne, ograniczone są możliwości jego tworzenia w otoczeniu powstającej powierzchni obrobionej. Wiór tworzony jest wówczas z nieliniowej, malejącej do zera, wzdłuż krawędzi skrawającej, grubości warstwy skrawanej. Jest to prawdziwe niezależnie od kąta przystawienia κ_r (rys. 2.48.).



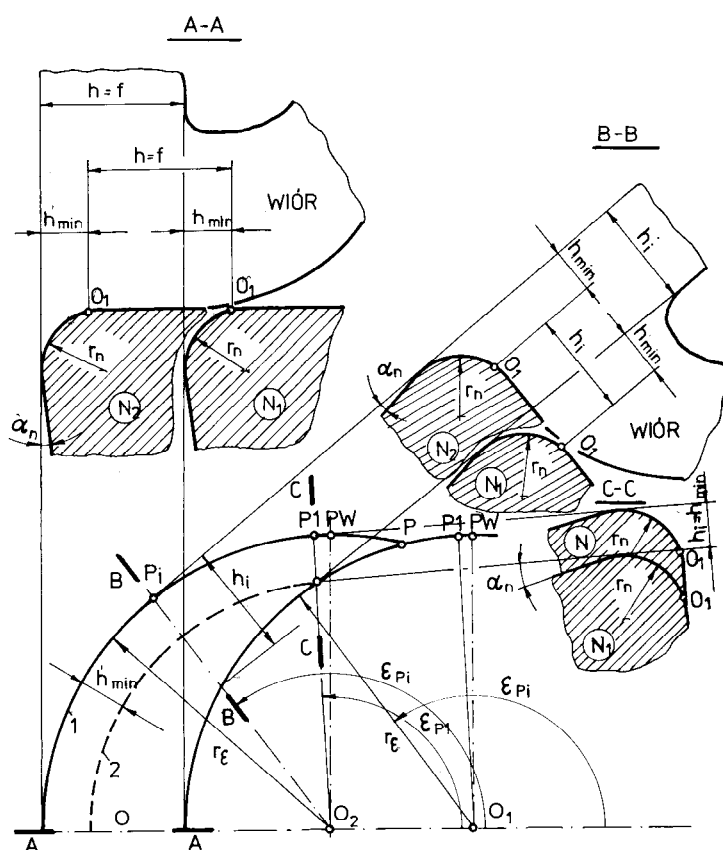
Rys. 2.48. Geometria wierzchołka ostrza dla a) $\kappa_r < 90^\circ$ b) $\kappa_r = 90^\circ$

Innym zupełnie zagadnieniem jest rola zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n w takim skrawaniu, gdy przekrój warstwy skrawanej ma zmienną wzdłuż szerokości skrawania grubość warstwy. Takim skrawaniem jest toczenie z zaokrąglonym narożem zwane nieswobodnym, dla którego grubość warstwy skrawanej zmienia się w przedziale $0 < h_i < f$ (rys. 2.49.). W trzech przykładowych przekrojach zilustrowano rolę promienia r_n w skrawaniu zaokrąglonym wierzchołkiem ostrza. Chociaż zgodnie z umową takie narzędzie nazywane jest „punktowym” [12, 22, 25, 43], jest to jednak – w zależności od wartości promienia naroża r_n – wycinek powierzchni a nie jeden punkt styku. Zagadnienie to należy traktować jako geometryczne przejście do skali makro, w którym to przejściu podlegają zmianie definicje związane z takimi pojęciami jak:

- kąty przystawienia, natarcia i przyłożenia,
- powierzchnie natarcia, przyłożenia lub nowa powierzchnia, zwana zaokrągleniem krawędzi skrawającej.

W odróżnieniu od toczenia swobodnego, w nieswobodnym biorą udział krawędzie: główna, przejściowa oraz pomocnicza.

Przejściowa powierzchnia przyłożenia kształtowana bywa przez producentów, dla uproszczenia technologii wykonania, jako płaskie ścięcia na powierzchni przyłożenia, polegające na zastąpieniu łuku, prostymi krawędziami zwanymi ścinami, a powoduje to skrócenie trwałości z uwagi na zmianę rozkładu i wzrost koncentracji naprężeń na krawędzi.



Rys. 2.49. Model skrawania nieswobodnego

Poprawne ukształtowanie tej krawędzi powinno być zawsze według łuku okręgu o promieniu r_ϵ , a krawędzie główna i pomocnicza łączyć się z nią jak styczne z okręgiem.

Wzdłuż przejściowej krawędzi skrawającej o promieniu r_n zmienia się wartość kąta przystawienia κ_r , a wraz z nią grubość warstwy skrawanej h_i (zobacz rys. 2.49.). Grubość tę, w dowolnym przekroju krawędzi skrawającej, wyliczyć można z zależności wyprowadzonej z układu dwóch równań okręgów o promieniu r_ϵ , przesuniętych w kierunku posuwu o wartość f i równania prostej wychodzącej ze środka O_2 okręgu. Z założenia tego wzór na h_i otrzyma postać:

$$h_i = r_\epsilon - f \cdot \cos \epsilon_{Pi} - \sqrt{r_\epsilon^2 - f^2 \cdot \sin^2 \epsilon_{Pi}}, \quad (2.59)$$

gdzie:

ε_{pi} – kąt pomocniczy, wyznaczający położenie przekroju dla którego wyliczana jest grubość warstwy skrawanej h_i .

Jeśli do równania (2.59) wprowadzi się minimalną grubość warstwy h_{min} – zdefiniowaną w podrozdziale 2.7.1.2, to po przekształceniu kąt ε_{pi} , wyznaczający położenie takiego przekroju na zaokrągleniu naroża, w którym grubość warstwy h_i jest równa h_{min}

$$\cos \varepsilon_{pi} = \frac{f^2 - 2 \cdot r_e \cdot h_{min} + h_{min}^2}{2 \cdot f \cdot (r_e - h_{min})} \quad (2.60)$$

Równanie to zwanym Opitz'a [33], nie precyzowało jednak, jaką wartość należy wstawić w miejsce h_{min} . Uwzględnienie wyprowadzonej zależności (2.60) na h_{min} – z uwagi na przyjęte założenie o podobieństwie pracy zaokrąglenia krawędzi skrawającej podczas toczenia swobodnego i nieswobodnego – w równaniu (2.61) daje nowe wyrażenie na pomocniczy kąt ε_{pi} .

$$\cos \varepsilon_{pi} = \frac{f^2 - 2 \cdot r_e \cdot r_n \left[1 - \frac{A_f/A_v}{\sqrt{1 + (A_f/A_v)^2}} \right] + r_n^2 \cdot \left[1 - \frac{A_f/A_v}{\sqrt{1 + (A_f/A_v)^2}} \right]^2}{2 \cdot f \cdot \left[r_e - r_n \cdot \left(1 - \frac{A_f/A_v}{\sqrt{1 + (A_f/A_v)^2}} \right) \right]} \quad (2.61)$$

Wyrażenie to uwzględnia geometryczne parametry procesu skrawania oraz stałe wyznaczone w badaniach. Można się nim posługiwać tylko przy ograniczonym zużyciu ostrza, gdy zmiany parametrów ostrza r_e i r_n nie są zbyt duże, czyli gdy ostrze jest zużyte niezauważalnie, z punktu widzenia zmian siły i temperatury skrawania.

Trudne jest jednoznaczne określenie, właściwego w każdym przypadku, momentu granicznego jego zastosowania, ale należy zwrócić uwagę na to, że dotyczy to krótkotrwałego, początkowego okresu pracy ostrza. Pojawienie się wyraźnych śladów zużycia spowoduje tak istotne zmiany geometryczne naroża ostrza, że należy opracować odpowiedni, nowy model strefy skrawania.

Rozpatrując zależności w równaniu (2.61) można sformułować następujące stwierdzenia.

1. Położenie charakterystycznego punktu P1, leżącego na wierzchołku naroża ostrza, można opisać wyliczoną wartością kąta pomocniczego ε_{pi} . Punkt ten rozdziela warstwę przewidzianą do zeskrwania na dwie części:

- przechodzącą w wiór,
 - pozostającą na powierzchni materiału obrabianego.
2. Położenie punktu P1 zależy od wielkości geometrycznych i ilorazu A_f i A_c , które zależą od wielu, w danym momencie działających, zmiennych procesu skrawania.

Dla mniejszych wartości ilorazu A_f/A_v wpływ jest bardzo silny na zmiany wartości rozwiązań. Dla większej z przyjętych wartości ilorazu oddziaływanie to jest mniej istotne. Prócz tego, wyróżnić można odmienne, co do ich przebiegu obszary rozwiązań. Pierwszy, dla którego przebiegi wyników dla ε_p podlegają bardzo dużym wahaniom przy niewielkich nawet zmianach posuwu i drugi, dla posuwów f większych od 0,2 mm/obr, o względnie proporcjonalnych zmianach przebiegu tej funkcji. Jest to szczególnie istotne dla zakresu zmian posuwu jednego z podstawowych czynników sterowalnych – mieszczącego się dokładnie w obszarze najsilniejszych zmian funkcji (2.61).

Przekrój P1 znajduje się zawsze pod kątem ε_{p1} większym od kąta ε_p , który można wyliczyć z równania

$$\varepsilon_p = \arccos \frac{f}{2 \cdot r_\varepsilon} \quad (2.62)$$

Kąt ε_p jest zawsze większy od 80° i ograniczony, niezależnie od wielkości promienia r_ε , jego największą możliwą wartością równą 90° . Wynika stąd, że na części krawędzi skrawającej ograniczonej kątami $\varepsilon_{p(h=0)}$ oraz $\varepsilon_{p1(h=h_{\min})}$ brak jest warunków dla tworzenia wiórów.

2.7.2.1. Rozkład sił na narożu ostrza

Podobieństwo skrawania swobodnego i nieswobodnego, które polega na:

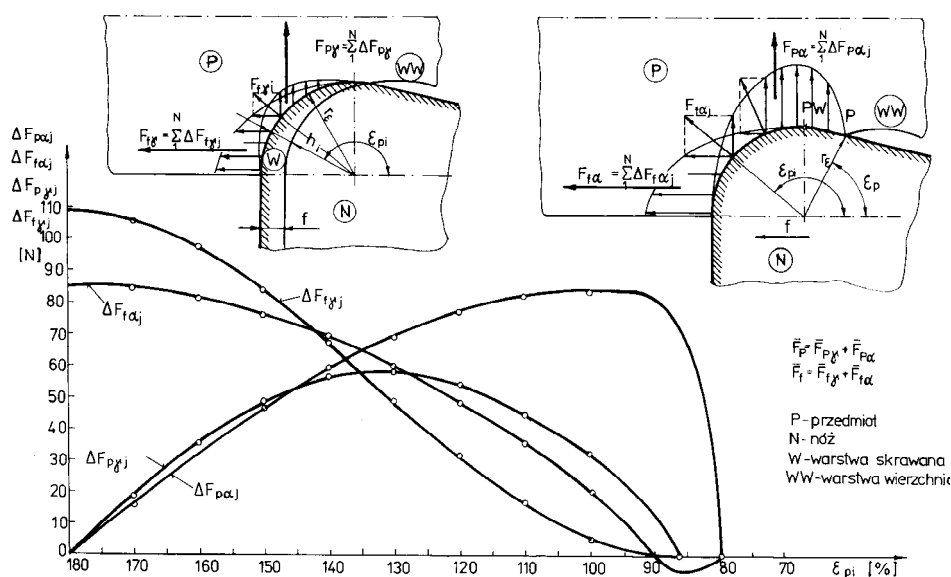
1. tworzeniu wióra z tego samego materiału skrawanego tym samym narzędziem,
 2. niezmienną prędkości skrawania,
 3. udziale zaokrąglenia krawędzi skrawającej tego samego ostrza w tworzeniu wióra w obu przypadkach,
 4. utrzymywaniu podobnej temperatury skrawania,
- pozwala wartości h_i , zmiennej na zaokrągleniu wierzchołka ostrza, o szerokości warstwy elementarnej Δb_i przyporządkować odpowiadający jej przyrost siły:

$$\Delta F_i = F(h_i) \cdot \Delta b_i, \quad (2.63)$$

gdzie:

$F(h_i)$ – oznacza całkowitą siłę skrawania warstwy o grubości h_i i szerokości $b = 1\text{mm}$.

Odnosi się zarówno do składowej F_c jak i F_f . Przyrost siły ΔF_i można wyliczyć dla każdej z grubości warstwy skrawanej h_i przekroju oddzielanego nieswobodnie, należy jednak znać zależność siły $F = f(h_i)$. Elementarne siły na zaokrągleniu wierzchołka ostrza, wyznaczone w płaszczyźnie bocznej, działające na powierzchni przyłożenia $\Delta F_{f\alpha_j}$, i na powierzchni natarcia $\Delta F_{f\gamma_j}$ oraz wyznaczone w płaszczyźnie tylnej działające na powierzchni przyłożenia $\Delta F_{p\alpha_j}$ i na powierzchni natarcia $\Delta F_{p\gamma_j}$ pokazano na rys. 2.50. Na osi odciętych podano współrzędne kątowe przekroju na zaokrągleniu wierzchołka ostrza.



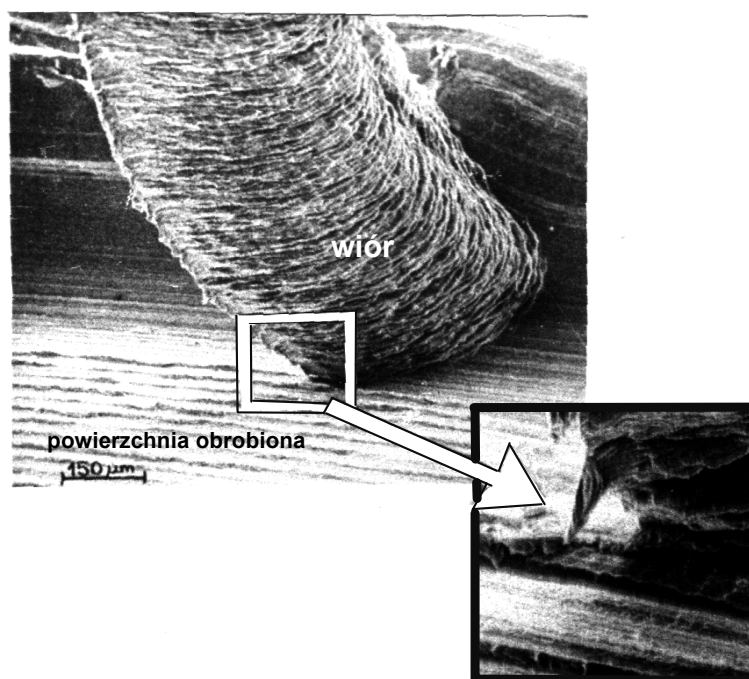
Rys. 2.50. Rozkład sił jednostkowych na zaokrągleniu wierzchołka ostrza

Przebiegi wyznaczonych sił elementarnych pozwalają sformułować dwie interpretacje:

1. Wszystkie przebiegi dla sił jednostkowych z rys. 2.50. są nieliniowe. Charakterystyczną właściwością jest to, że siły $\Delta F_{f\alpha_j}$ w przedziale ograniczonym kątem ϵ_p i 90° czyli pomiędzy punktami P i PW – punktem wierzchołkowym na narożu – przyjmują wartości ujemne. Dla

kątów mniejszych od 90° rzut siły $\Delta F_{f_{\gamma j}}$ – przyrostu jednostkowego siły ΔF_f – na kierunek f daje w wyniku siły jednostkowe, działające na powierzchni przyłożenia $\Delta F_{f_{\alpha j}}$, ale ze znakiem przeciwnym, przeciwnie niż dla tej części krawędzi, dla której kąt $\varepsilon_{pi} > 90^\circ$.

2. Dla kąta $\varepsilon_{pi} = 90^\circ$ rzut siły $\Delta F_{f_{\alpha j}}$ wynosi 0 i działa w tym punkcie tylko siła jednostkowa $\Delta F_{p_{\alpha j}}$. Taki układ sił jednostkowych wskazuje, że na tym odcinku krawędzi skrawającej ostrze odsuwa część nie zdjętego materiału ($h < h_{\min}$) w prawo od najdalej wysuniętego punktu na narożu ostrza (rys. 2.51.). Na fotografii widoczne są charakterystyczne nieregularne pozostałości materiału na powierzchni obrobionej, podobne z wyglądu do cienkich wywiniętych "blaszek", układających się wzdłuż śladu pozostającego po przejściu naroża. Zjawisko to nosi nazwę "efekt rozmiarowy" (size effect), czyli że jest wynikiem proporcji wymiarów geometrycznych ostrza i parametrów przekroju warstwy skrawanej. Dalszym skutkiem tego efektu jest odrywanie się podczas toczenia drobnych cząstek metalu – w postaci szkodliwego pyłu lub igiełek, które łatwo obserwuje się podczas toczenia, a które są niebezpieczne dla zdrowia.
3. Siły jednostkowe $\Delta F_{p_{\gamma j}}$, $\Delta F_{f_{\gamma j}}$, działające na powierzchni natarcia A_γ , w przekroju, dla którego kąt ε_{pi} jest równy ε_{p1} , mają wartość równą zero. W przekroju tym grubość warstwy skrawanej jest równa teoretycznej h_{\min} i od tego miejsca są warunki sprzyjające tworzeniu wióra. Krzywa przyrostów $\Delta F_{p_{\gamma j}}$ osiąga maksimum dla kąta $\varepsilon_{pi} = 135^\circ$. Ten charakterystyczny przebieg odznacza się występowaniem na powierzchni natarcia siły działającej w kierunku p , a powodującej odpychanie wióra od powierzchni skrawania.



Rys. 2.51. Fotografie nierówności na powierzchni obrobionej

2.7.2.2. Tworzenie nierówności powierzchni obrobionej

Ostrze podczas pracy, przez krótki czas, zachowuje swoją formę geometryczną mimo postępującego zużycia. Jest ono na tyle małe, że można je pominąć w rozważaniach. Brak jest technicznej możliwości obserwacji – bezpośredniej – zjawisk zachodzących na powierzchni zaokrąglenia oraz wzdłuż krawędzi skrawającej w otoczeniu naroża ostrza. O przebiegu tworzenia pojedynczej nierówności w zbiorze nazwanym chropowatością powierzchni obrobionej dowiadujemy się jedynie drogą pośrednią.

Część warstwy skrawanej, której grubość jest zbyt mała, aby oddzieliło ją ostrze o promieniu $r_n > 0$, przemieszcza się zawsze w stronę powierzchni przyłożenia. Pozwala to wyznaczyć maksymalną teoretyczną nierówności w sposób zilustrowany na trzech rzutach przekrojów warstwy skrawanej (rys. 2.52.). Linia teoretyczna wyznacza rozdział idealny, gdy $r_n = 0$ stąd i $h_{\min} = 0$. Linia 2 określa położenie grubości warstwy równej h_{\min} dla $r_n > 0$. Pomiedzy tymi liniami mieści się rzeczywista linia rozdziału warstwy skrawanej. Rzuty naroża na płaszczyznę bazową (rys. 2.52.), wskazują na to, że uzyskuje się wartości kąta ε_{p1} z przedziałów zmienności:

$$a) \quad 90^\circ < \varepsilon_{p1} \quad (\text{dla bardzo dużych posuwów}) \quad (2.64)$$

$$b) \quad \varepsilon_{p1} = 90^\circ \quad (2.65)$$

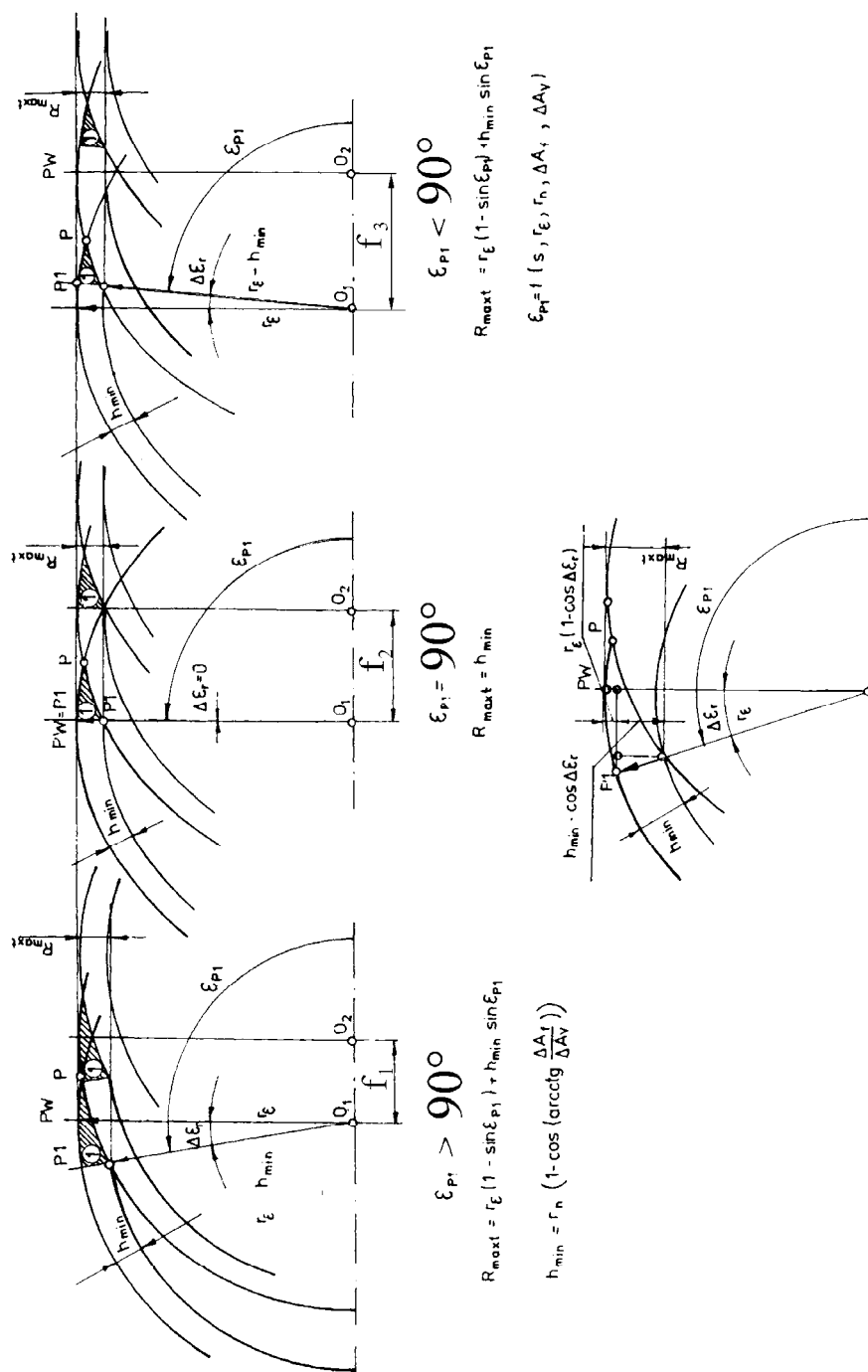
$$c) \quad \varepsilon_p < 90^\circ \quad (\text{dla małych posuwów, obróbka wykańczająca}) \quad (2.66)$$

Geometryczne wyrażenie dla teoretycznej nierówności maksymalnej $R_{\max t}$ można wyznaczyć jako sumę: $R_{\max t} = r_\varepsilon \cdot (1 - \sin \varepsilon_{p1}) + h_{\min} \cdot \sin \varepsilon_{p1}$ składników pochodzących od:

1. $r_\varepsilon \cdot (1 - \sin \varepsilon_{p1})$ – strzałki łuku wierzchołka oraz,
2. $h_{\min} \cdot \sin \varepsilon_{p1}$ – rzutu minimalnej grubości warstwy skrawanej na normalną do powierzchni obrobionej,

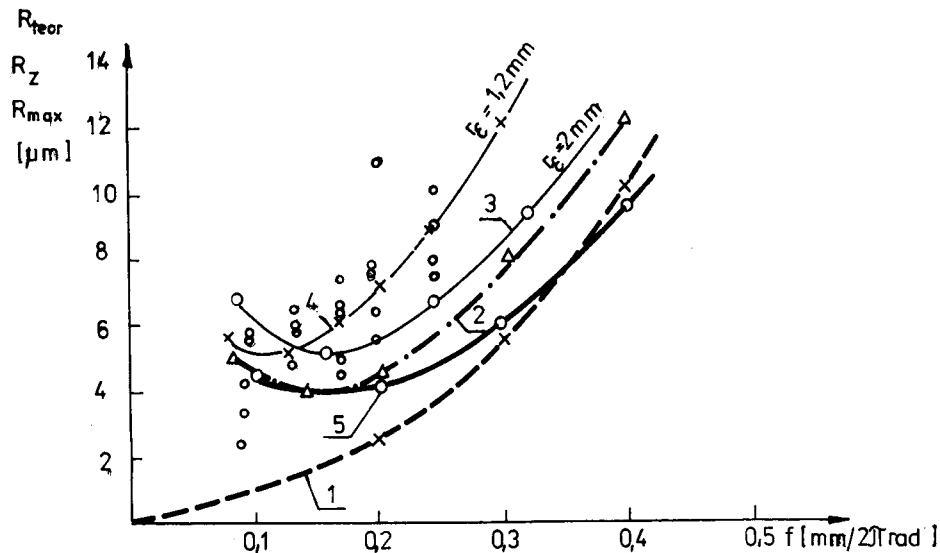
Wartość $\varepsilon_{p1} = f(f, r_n, r_\varepsilon, \Delta F_c, \Delta F_f)$ można wyliczyć z równania (2.61). Na rys. 2.52. pokazano równania na $R_{\max t}$. Dla przypadku a) i c) zależności są identyczne. Należy jednak zwrócić uwagę na rzecz następującą: dla przypadku a) pole zakreskowane i oznaczone "1", przy ruchu naroża zgodnym z kierunkiem posuwu, przemieści się jeszcze dodatkowo pod najdalej wysuniętym punktem PW na narożu. Niezeskrawana warstwa, której obrazem jest pole "1", poddana jest więc dodatkowemu odkształceniu. Natomiast w przypadku c), pole "1", przemieszcza się już bez kontaktu z powierzchnią przyłożenia otoczenia naroża. Szczególny przypadek b) wyróżnia się tym, że $R_{\max t}$ nie zależy od promienia naroża r_ε , a jedynie od promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n .

Wyniki z prac [7, 28] wykazują charakterystyczne przebiegi parametru chropowatości R_{\max} w zależności od posuwu, które pokazano na rys. 2.53. Badania przeprowadzono przy stałej prędkości skrawania 200 m/min, wyniki zaś aproksymowano, wykorzystując odpowiednią zależność z pracy [7]. Analiza wyników z rys. 2.53. wykazuje typowe przebiegi, wszystkie krzywe mają



Rys. 2.52. Schemat dla wyliczenia wysokości nierówności

podobny przebieg. Ze wzrostem posuwu od 0,08 mm/obr układają się w stronę coraz mniejszych wartości parametrów chropowatości R_{\max} . Po osiągnięciu minimum dla f około 0,13 mm/obr dla $r_e = 1,2$ mm oraz około $f = 0,16$ mm/obr dla $r_e = 2$ mm, z dalszym wzrostem posuwu uwidacznia się zdecydowany przyrost wartości parametru R_{\max} .



Rys. 2.53. Przebiegi wysokości nierówności w funkcji posuwu

Linia 1 wyliczona dla danych bez udziału h_{\min} , linia 2 pokazuje wyniki z pracy [27] przeliczone według metodyki w pracy [7]. Linie 3 i 4 są rezultatami obliczeń z danych z pracy [27] według zależności (2.48). Linia 5 dla danych w pracy [27].

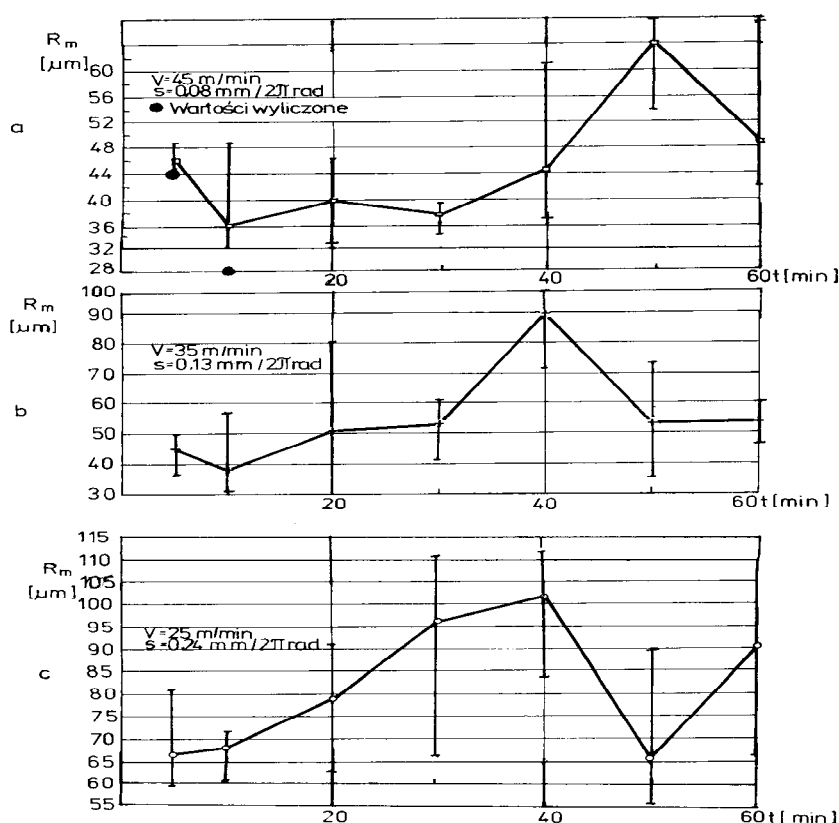
Wyniki z analitycznych rozważań dają wartości wyższe, aniżeli otrzymane z badań eksperymentalnych. Ujawnia się dogładowanie działanie ostrza dla mniejszych posuwów. Nierówność $R_{\max t}$ musi przemieścić się dodatkowo pod powierzchnią przyłożenia. Także dla większych posuwów różnice te są bardziej zdecydowane. Należy wziąć pod uwagę także wniosek, wyprowadzony w opisie rozkładu sił jednostkowych, odnoszący się do powstającej "blaszki" na powierzchni obrobionej (zobacz rys. 2.51.). Wysokość teoretycznej nierówności nie uwzględnia tego zjawiska, gdyż jest ono z zupełnie innego obszaru zagadnień fizykalnych podstaw procesu konstytuowania warstwy wierzchniej.

Praktyczny wniosek wynikający z powyższych danych to fakt, że dla posuwu około 10-krotnie mniejszego od pierwiastka z wartości promienia r_e powinno się otrzymywać najmniejszą chropowatość powierzchni.

Wpływ chłodzenia, przez zmianę warunków fizycznych w strefie skrawania może zmienić wartość najkorzystniejszego posuwu. Pamiętać należy jednakże o tym, że omawiane ostrze nie jest jeszcze zużyte, a praca takiego ostrza trwa zaledwie kilka minut.

Zużycie na powierzchniach roboczych ostrza zmienia mechanikę tworzenia chropowatości. Obserwuje się trzy różne tendencje zmian parametrów profilu chropowatości przedmiotu w zależności od czasu skrawania (rys. 2.54.):

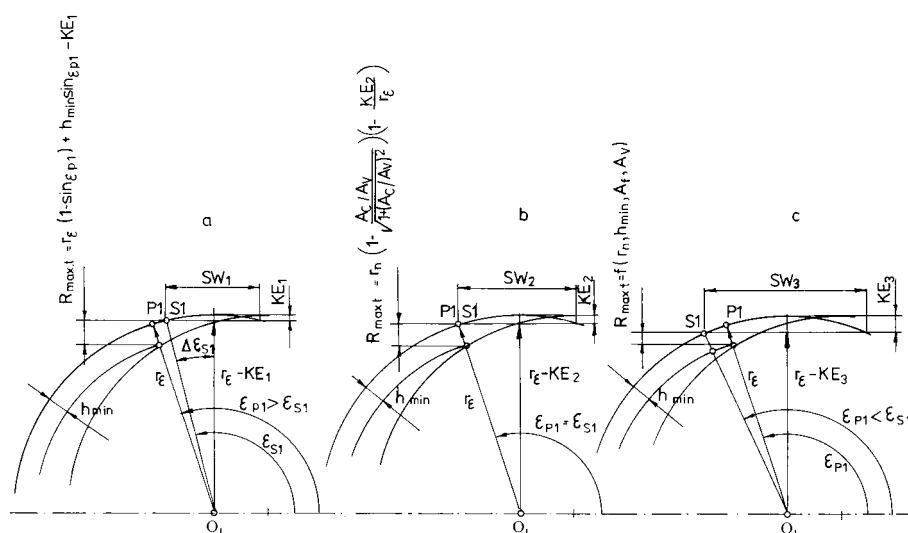
- w I okresie chropowatość maleje od wartości odpowiadającej R_z dla nowego ostrza, do innej wartości charakterystycznej dla danych warunków skrawania,
- w II okresie – z różnymi wahaniami – wartości parametrów chropowatości utrzymują się w określonym przedziale,
- w III okresie następuje zdecydowany wzrost chropowatości, aż do momentu zniszczenia ostrza.



Rys. 2.54. Przykładowe zmiany wysokości nierówności w zależności od czasu skrawania

Zdarza się, że w miarę postępującego zużycia chropowatość tylko wzrasta (zobacz rys. 2.54. c). Promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n od momentu rozpoczęcia skrawania, ma wartość zbliżoną do tej, którą przyjmuje on w II okresie zużycia.

Gdy coraz dłuższe staje się starcie SW, to kąt $\varepsilon_{P1} > 90^\circ$, a punkt P1, znajduje się zawsze przed osią symetrii naroża (rys. 2.55.). Gradient zaś zmian ocenić należy, jako bardzo podobny do wpływu KE na SW. Początkowo niewielki wzrost KE – strzałki wycinka koła, powoduje względnie duże przyrosty SW – jego cięciwy. Zmiana przykładowo, KE od 0,001 do 0,009 mm powoduje zwiększenie SW od wartości 0,08 do 0,24 mm (dla $r_\varepsilon = 1$ mm). W drugim okresie dynamika wzrostu szerokości SW maleje, chociaż ubytki ścieranego materiału są coraz większe, ze względu na większą powierzchnię wzajemnego oddziaływania.



Rys. 2.55. Model tworzenia nierówności ostrzem zużyтым

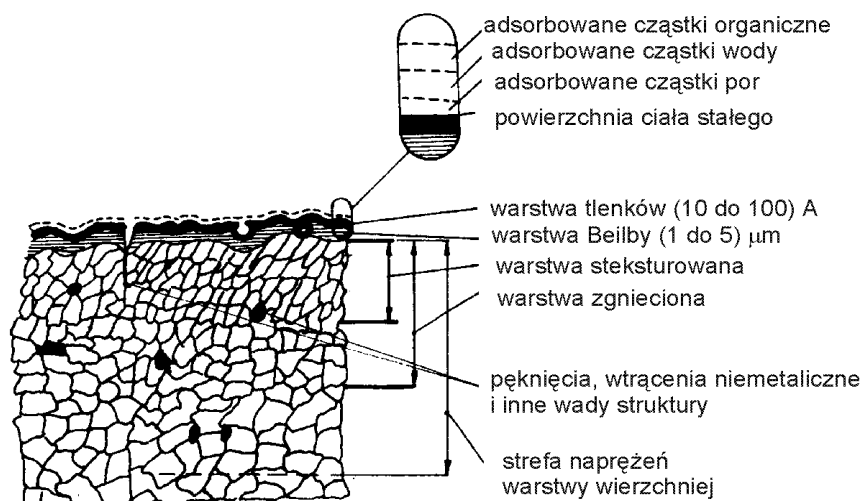
Dla każdych przyjętych warunków skrawania jest inna charakterystyczna wartość SW, od której ulega pogorszeniu chropowatość powierzchni obrobionej. W strefie skrawania, wskutek wzrostu KE i zmiany promienia r_n , zależnych od zużycia – punkty P1 i S1 będą zmieniały położenie względem siebie. Sytuację tę przedstawiono na rys. 2.55. Wynika z niego, że jeżeli początkowe starcie KE – rysunek a) – jest bardzo małe, to punkt S1 znajduje się przed punktem P1, czyli do tej chwili kąt $\varepsilon_{P1} > \varepsilon_{S1}$. W miarę narastania zużycia ostrza następuje moment, gdy KE_2 osiągnie taką wartość, dla której punkt P1

pokryje się z punktem S1 – rysunek b) – czyli $\varepsilon_{P1} = \varepsilon_{S1}$. Dalsze zwiększanie zużycia do KE powoduje przejście punktu S1 poza P1 – rysunek c).

Oznacza to, że nierówności powinny się początkowo zmniejszać zależnie od KE. Jest to słuszne tylko do chwili, gdy $SW < f$, przy dalszym zwiększaniu szerokości wytarcia SW, na pierwotnie utworzony profil powierzchni obrobionej, nałoży się oddziaływanie starcia naroża podczas wtórnego jego styku z powierzchnią obrobioną. Dlatego o chropowatości powierzchni obrobionej decyduje bardzo złożony mechanizm współpracy części zużytego naroża ostrza z nowoutworzoną powierzchnią, a które to w każdej chwili wzajemnie siebie tworzą i zmieniają.

3. Charakterystyka warstwy wierzchniej

Na powierzchniach przedmiotu, po obróbce ubytkowej pojawia się powierzchnia rzeczywista – oddzielająca przedmiot od otaczającego ośrodka oraz warstwa wierzchnia – część materiału znajdująca się pod tą powierzchnią, a która wykazuje zmienione cechy fizyczne i niekiedy chemiczne w stosunku do materiału rdzenia (rys. 3.2.) [15]. Zmienione własności fizyczne w głąb od powierzchni geometrycznej, pod wpływem działania ostrza, pozwoliły wyróżnić charakterystyczne strefy. Częścią strefy zgniecionej, sięgającej od paru setnych do kilku dziesiątych milimetra, jest strefa włóknista rozciągniętych – steksturowana – w wyniku bezpośrednich oddziaływań powierzchni ostrza i przedmiotu obrabianego. Jednocześnie w wyniku powstającego ciepła zachodzą rozmaite zmiany w strukturze materiału, sięgają one najczęściej do granicy strefy zgniecionej.



Rys. 3.1. Model wizualny warstwy wierzchniej



Rys. 3.2. Model technologicznej warstwy wierzchniej [31]

Przyjęto, że dla przedstawienia charakterystyki warstwy wierzchniej podawane są niezbędne dane: profilogram z podaniem: l_n – długości odcinka pomiarowego, powiększenia pionowego i poziomego, krzywa nośności profilu chropowatości t_p , fotografia powierzchni z podaniem wad struktury, wykresy naprężeń w WW.

Struktura geometryczna powierzchni (SGP) opisuje powierzchnię rzeczywistą – jest zbiorem wszystkich nierówności powierzchni rzeczywistej – odchyłki kształtu, falistość i chropowatość. Chropowatość powierzchni jest zbiorem nierówności, które pozostają po obróbce, których wysokość zmienia się od angstromów do milimetrów, którą ocenia się na podstawie zarejestrowanego profilu.

3.1. Charakterystyka chropowatości 2D

W obróbce skrawaniem struktura geometryczna powierzchni – SGP, stanowi sumę: odwzorowania nierówności powierzchni przyłożenia naroża (zależne od zużycia narzędzia), odkształcenia plastycznego i odwracalnych procesów odkształcenia sprężystego warstw materiału powierzchni obrabianej, zmian w głąb warstwy materiału na powierzchni obrabianej wskutek tarcia wewnętrznego i stykowego.

Przy definiowaniu parametrów chropowatości 2D ważną rolę spełnia linia odniesienia – linia średnia. Wyróżniono blisko czterdzieści parametrów, rozkładów i funkcji opisujących cechy profilu chropowatości, które w zależności

od własności klasyfikowane są następująco: cechy wysokościowe i horyzontalne, kształt nierówności, rozkłady statystyczne, parametry rozkładów, funkcje częstotliwościowe.

W praktyce projektowej oznacza się na rysunkach najczęściej kilka z nich. Interpretacją graficzną parametru R_a jest prostokąt o wysokości równej R_a . Wykazuje on wyraźny związek z odpornością na zużycie ścierne. Wysokość profilu chropowatości R_z wylicza się z 10 punktów dla których wyznacza się średnią odległość między pięcioma najniższymi i najwyższymi punktami profilu. Maksymalna wysokość profilu chropowatości – R_m odpowiada odległości między najwyższym wzniesieniem, a najniższym wgłębieniem mierzonej prostopadłe do linii średniej. Długość nośną oblicza się sumy elementarnych odcinków z nierówności na długości profilu.

3.2. Charakterystyka stereometryczna 3D

Jeśli dla profilu 2D, wyznacza się linię średnią, to w analizie 3D układem odniesienia jest płaszczyzna średnia. Opisując cechy stereometryczne chropowatości stosowane jest dodatkowe oznaczenie 3D w odróżnieniu od parametrów charakteryzujących profil. Przykładowo R_a oraz parametr stereometryczny R_{a-3D} [20, 21, 33].

Nie daje się przypisać trójwymiarowym cechom chropowatości powierzchni wartości liczbowych dwuwymiarowych parametrów profilu. Tylko niektóre z nich dają się zastosować w opisie trójwymiarowym: wartości średnie i odchylenia standardowe.

Za najistotniejsze cechy chropowatości trójwymiarowej uznaje się: wysokość wierzchołków, udział nośny, ale policzony dla całej powierzchni, gęstość wierzchołków oraz stopień niejednorodności ich rozmieszczenia, promienie krzywizny wierzchołków. Parametry zdefiniowane są w czterech podstawowych grupach: parametry amplitudowe, parametry przestrzenne, parametry mieszane, parametry funkcjonalne.

Anizotropię charakteryzuje współczynnik wyglądu tekstury oraz współczynnik kierunkowości tekstury powierzchni.

4. Dobór warunków skrawania

Jednym z ważniejszych zagadnień w obróbce jest dobór warunków skrawania. Z uwagi na jednoczesność oczekiwań najlepszych efektów obróbki: dokładności, kosztów i wydajności należy godzić niejednokrotnie zupełnie sprzeczne warunki. Przykładowo, z uwagi na dokładność obróbki wskazany jest wybór małych posuwów, a z tym związany jest spadek wydajności. Metodą kompromisu zwaną optymalizacją wielokryterialną dobiera się warunki optymalne, co nie oznacza, że są to najkorzystniejsze dla każdego z kryteriów oddzielnie.

4.1. Ogólne zasady i tok doboru warunków obróbki.

Obróbka narzędziem jednoostrzowym, przykład toczenia, pozwala otrzymywać przedmioty, które mają dokładność wymiarów i kształtu w granicach od 13 do 6 klasy dokładności według PN. Uzyskiwane chropowatości mieszczą się w granicach $R_z = 0,8 \div 320 \mu\text{m}$. Jak to omówiono w rozdziale 1.2 (zobacz rys.1.2.), podział na umowne rodzaje obróbki; dokładnej, kształtującej i wykańczającej dotyczy wszystkich odmian skrawania.

Wiadomo, że chropowatości uzyskiwane podczas skrawania najnowocześniejszymi materiałami narzędziowymi dochodzą do wartości około $R_z = 1 \mu\text{m}$ i mniej i odpowiadają wynikom uzyskiwanym po szlifowaniu.

Objętość V_0 materiału, usuwana jest w jednym lub kilku przejściach. Dla określonej długości powierzchni obrabianej, objętość jest iloczynem różnicy kwadratów średnic przed i po toczeniu i długości toczenia (rys. 4.1.).

$$V_0 = \frac{\pi}{4} \cdot L \cdot (D^2 - d^2) \quad (4.1)$$

gdzie:

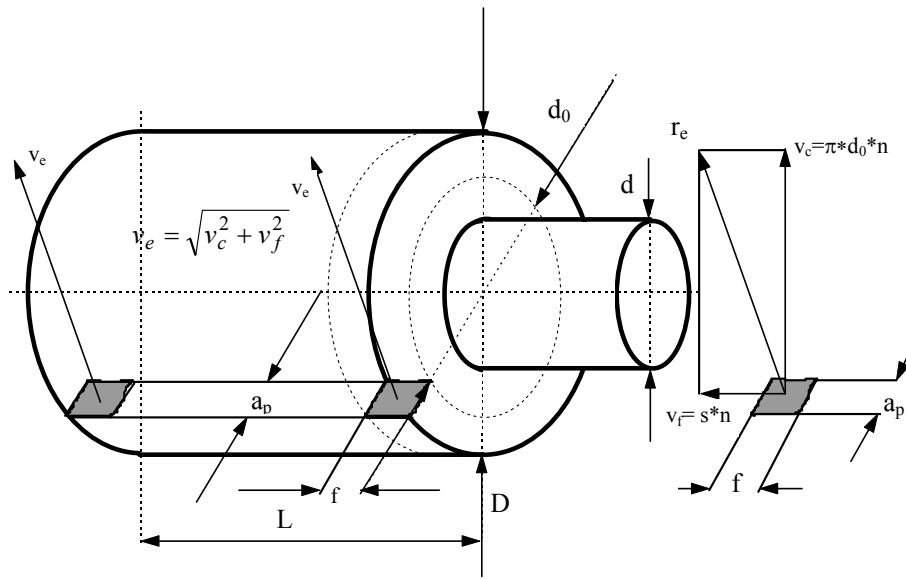
L – długość powierzchni toczonej,

D – średnica powierzchni obrabianej,

d – średnica powierzchni obrobionej.

Objętość materiału V_j zdejmowanego w jednym przejściu jest iloczynem prędkości skrawania v_c , posuwu f oraz głębokości skrawania a_p i czasu skrawania t_s :

$$V_j = t_s \cdot v_c \cdot h \cdot b = t_s \cdot v_c \cdot f \cdot a_p \quad [\text{mm}^3] \quad (4.2)$$



Rys. 4.1. Schemat do obliczeń nadatku skrawanego materiału

gdzie:

$$h = f \cdot \sin \kappa_r \quad (4.3)$$

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad (4.4)$$

 v_e – wypadkowa prędkość skrawania

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} = \sqrt{(\pi \cdot d_0 \cdot n)^2 + (f \cdot n)^2} = n \cdot \sqrt{(\pi \cdot d_0)^2 + f^2} \quad [\text{mm/min}] \quad (4.5)$$

 $f \cdot a_p$ – pole przekroju warstwy skrawanej [mm^2], t_s – czas skrawania w jednym przejściu powierzchni o długości L [min] bez dobiegu i wybiegu, wymiany narzędzi i ruchów pomocniczych,

$$t_s = \frac{L}{f \cdot n} \quad (4.6)$$

stąd

$$V_j = L \cdot \frac{(D - d_0)}{2} \cdot \sqrt{(\pi \cdot d_0)^2 + f^2} \quad [\text{mm}^3] \quad (4.7)$$

liczbę przejść i_p liczymy ze stosunku objętości nadatku materiału do usunięcia do objętości warstwy usuwanej w jednym przejściu lub – z uwagi na stałą

wartość L – praktycznie wylicza się ze stosunku całkowitego naddatku do usunięcia do głębokości skrawania w jednym przejściu:

$$i_p = \frac{V_0}{V_j} = \frac{D-d_0}{2 \cdot a_p} \quad (4.8)$$

Dla przyjętych: f – posuwu, a_p – głębokości skrawania czas maszynowy t_{mc} można wyliczyć z iloczynu liczby przejść (4.8) oraz czasu skrawania w jednym przejściu (4.9):

$$t_m = i_p \cdot t_s = \frac{D \cdot d \cdot L}{a_p \cdot f \cdot n} \quad (4.9)$$

$$n = \frac{v_{ci}}{\pi \cdot d_i} \text{ prędkość obrotowa,}$$

stąd:

$$t_m = \frac{\pi \cdot d_i \cdot (D-d) \cdot L}{v_{ci} \cdot a_p \cdot f} \quad (4.10)$$

Ponieważ po każdym przejściu średnica maleje o $2a_p$, to przy stałych obrotach n zmienia się prędkość skrawania v_c . Przy małych naddatkach i dużej średnicy D

Widoczne jest, że czas maszynowy zależy w równym stopniu od każdego z parametrów skrawania v_c , f , a_p , znajdujących się w mianowniku ułamka.

Inaczej mówiąc, z punktu widzenia wydajności skrawania jest to bez znaczenia, który z parametrów będziemy zwiększali. Zwiększenie dwukrotne któregośkolwiek z nich powoduje skrócenie czasu maszynowego o połowę. Wiadomo jednak, że wybór warunków skrawania ograniczony jest zadaną trwałością ekonomiczną lub trwałością największej wydajności, dokładnością obróbki, dynamiką skrawania itp.. Ograniczając się do zagadnienia trwałości można zapisać ogólnie, że zależy ona od parametrów skrawania:

$$T = \frac{C_T}{v_c^s \cdot f^n \cdot a_p^l} \quad (4.11)$$

można także, dla przypadków, gdy $a_p > f$ przyjąć (na podstawie badań laboratoryjnych) następujące przybliżone relacje $s : n : l = 4 : 2 : 1$

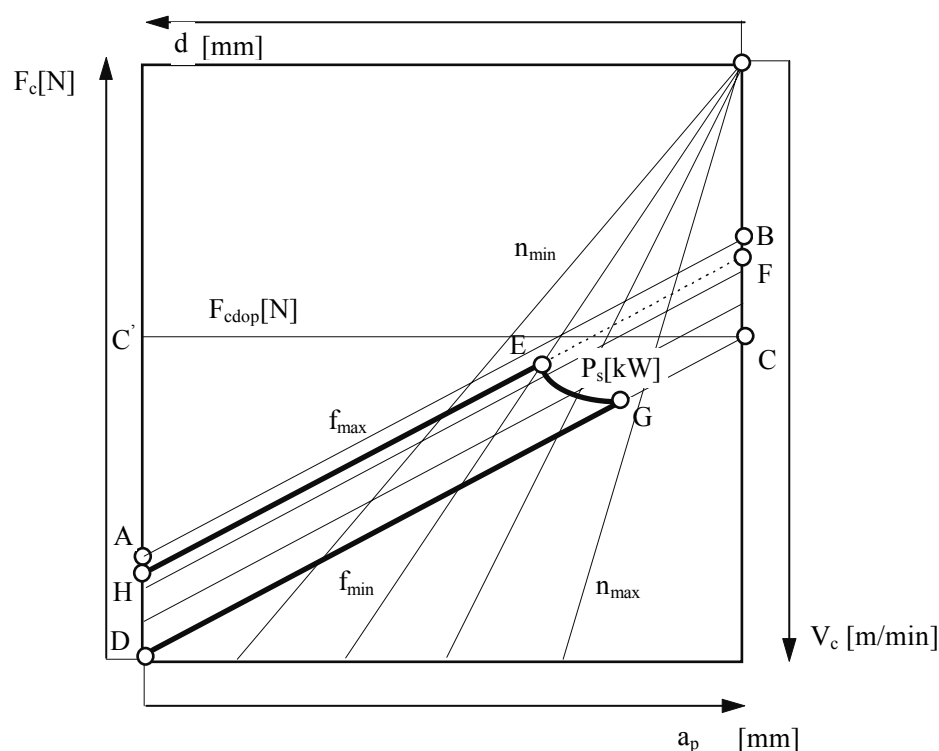
$$T = \frac{C_T}{v_c^4 \cdot f^2 \cdot a_p} \quad (4.12)$$

Widoczne jest wtedy, że wspomniane podwojenie któregośkolwiek z parametrów powoduje istotne różnice w trwałości ostrza. Prędkość skrawania 16 razy zmniejszy trwałość ostrza przy niezmiennym posuwie i głębokości skrawania. Zwiększenie dwukrotne wartości posuwu, przy pozostałych ustalonych parametrach, spowoduje około 4 razy mniejszy okres trwałości. Głębokość skrawania wpływa odwrotnie proporcjonalnie.

Dla opisanych warunków techniczno-ekonomicznych procesu obróbki można przyjąć następujący algorytm doboru parametrów skrawania:

1. wybór największej, w danych warunkach obróbki, głębokości skrawania, z uwagi na najmniejszą liczbę przejść,
2. wybór największego, w danych warunkach, posuwu,
3. wyznaczenie, dla wybranych wartości głębokości skrawania i posuwu, zalecanej prędkości skrawania.

Na rys. 4.2. pokazano przykład, jednego z możliwych przypadków ograniczeń w doborze głębokości skrawania i posuwu, ograniczonych dopuszczalną mocą skrawania P_{sdop} oraz maksymalną siłą skrawania F_{cdop} .



Rys. 4.2. Ograniczenia doboru parametrów skrawania

Na rys. 4.2. widoczny jest wielobok ABCDA, który w przypadku braku ograniczeń, przedstawia sobą wszystkie możliwe rozwiązania parametrów f i a_p .

Wybór głębokości skrawania dokonywany według zaleceń technicznego normowania naddatków obróbkowych może zmieniać się od $a_{p\min}$ do $a_{p\max}$. Wiadomo, że dla ustalonej wartości posuwu, wprost proporcjonalnie do wzrostu głębokości skrawania rośnie siła skrawania F_c . Dla najmniejszej głębokości skrawania $a_{p\min}$ można stosować wszystkie posuwy od f_{\min} do f_{\max} bez jakichkolwiek ograniczeń. Często jednak występuje ograniczenie z uwagi na zalecaną wartość posuwu, związaną z rodzajem obróbki. Dla wykańczającej nie powinien być posuw większy od 0.2 mm/obr – linia HEF. Wartości posuwu f (pochylone pod kątem linie), zmieniają się skokowo od f_{\min} do f_{\max} zgodnie z ciągiem realizowanym przez skrzynkę posuwów obrabiarki. Wartości posuwu zależą głównie od wymagań związanych z chropowatością powierzchni obrobionej, dokładnością obróbki czy też warunków ograniczających wielkość posuwu dla danej głębokości skrawania. Do najczęściej spotykanych ograniczeń zalicza się:

- dopuszczalne siły i momenty skrawania ze względu na wytrzymałość elementów obrabiarki i narzędzi,
- moc silnika,
- dopuszczalne odkształcenia układu OUPN,
- dostępne zakresy posuwów oraz
- wymaganą gładkość powierzchni.

Z uwagi na sztywność; trzonka noża, imaka narzędziowego, przedmiotu możliwe jest ograniczenie z uwagi na maksymalną siłę F_{cdop} (pozioma linia CC'). Widoczne jest także na wykresie ograniczenie z uwagi na moc skrawania, która zależy od średnicy toczenia d , prędkości obrotowej n oraz siły F_c . Znając średnicę toczenia można, dla wartości dopuszczalnej mocy skrawania silnika obrabiarki, wyliczyć siłę F_c dla maksymalnej prędkości skrawania v_c – która musi być mniejsza od F_{cdop} . Możliwy jest dobór z poradników, dla przyjętych parametrów technologicznych warstwy skrawanej, siły skrawania F_c i wyznaczenie maksymalnej prędkości obrotowej z warunku ograniczenia mocy skrawania. Warunek ten spełniony jest na odcinku EG. W wyniku działania ograniczeń otrzymuje się rozwiązanie w postaci ograniczonego pola HEGDH.

Obrabiarki są konstruowane tak, że dla zalecanych zakresów parametrów obróbki, nie powinno wystąpić graniczne obciążenie siłami F_{cdop} .

Jeśli dąży się do optymalnego zestawu parametrów obróbki, ze względu na minimum kosztu jednostkowego, to należy:

1. Wybrać głębokość skrawania,
2. Dobrać posuw,
3. Wyznaczyć zalecaną prędkość skrawania,

$$v_e = \frac{C_v}{T^m \cdot a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \quad (4.13)$$

4. Wyliczyć lub wyznaczyć prędkość obrotową napędu głównego, odpowiadającą zalecanej prędkości skrawania, dobrać najbliższą wartości obliczonej, prędkość obrotową z dostępnych na obrabiarce,
5. Ustalić rzeczywistą prędkość skrawania dla wyznaczonej prędkości obrotowej,
6. Wyliczyć okres trwałości ostrza według wzoru:

$$T_2 = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^s \cdot T_1 \quad (4.14)$$

gdzie:

n_1, T_1 – wartości przyjęte, a n_2, T_2 – wartości skorygowane,

s – wykładnik równy $1/m$, z zależności na trwałość.

7. Ustalić zapotrzebowaną moc skrawania,
8. Wybrać odpowiednią, z uwagi na ograniczenia, obrabiarkę,
9. Obliczyć czas maszynowy obróbki.

Kolejne działania projektującego proces obróbki powinny polegać na wyznaczeniu optymalnych, z uwagi na różne przyjmowane kryteria, parametrów skrawania.

4.2. Optymalizacja z uwagi na największą wydajność

Osobnym zagadnieniem analitycznym jest wyznaczenie trwałości odpowiadającej największej wydajności obróbki. Wydajność obróbki:

$$W = \frac{1}{t_j} \text{ [szt/min]} \quad (4.15)$$

gdzie:

t_j – czas jednostkowy obróbki [min],

Gdy t_j maleje, to wydajność obróbki W rośnie. Zmieniając tylko prędkość skrawania można sterować trwałością tak, aby otrzymać najkrótszy czas jednostkowy obróbki.

Ogólnie czas jednostkowy obróbki opisuje równanie:

$$t_j = t_m + \frac{t_z}{i_o} + t_p \quad (4.16)$$

gdzie:

t_m – czas maszynowy jednozabiegowej operacji [min],

t_z – czas wymiany zużytego ostrza [min],

i_o – liczba operacji wykonanych w okresie trwałości,

t_p – czas pomocniczy, niemaszynowy obejmujący przebiegi luzem, zakładanie i zdejmowanie przedmiotów, który dla konkretnej operacji przyjmuje się jako stały $t_p = \text{const}$ [min]

Czas maszynowy t_m wylicza się z liczby przejść i czasu skrawania:

$$t_m = i_p \cdot t_s = i_p \cdot \frac{L}{f \cdot n} \quad (4.17)$$

gdzie:

L – długość przejścia [mm],

i_p – liczba przejść,

$f \cdot n$ – posuw minutowy [mm/min].

Jeżeli wyznaczy się:

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot C_v}{\pi \cdot D \cdot T^m} \quad (4.18)$$

gdzie:

D – średnica toczenia w [mm],

v_c – prędkość skrawania w [m/min]

to otrzymuje się, że:

$$t_m = i_p \cdot \frac{L}{f} \cdot \frac{\pi \cdot D}{1000 \cdot C_v} \cdot T^m = C_m \cdot T^m \quad (4.19)$$

a jest wartością ustaloną dla przyjętego zakresu warunków obróbki. Liczbę operacji i_o wykonanych w okresie trwałości wyliczyć można z zależności

$T = i_o \cdot t_s$ przyjmując, że $t_s = \tau \cdot t_m$ jest ułamkiem czasu maszynowego.

Widoczne to jest w wyrażeniu (4.17), że kilkakrotne przejście narzędzia wymaga przerw, odpowiednich dosuwów zatem czyste skrawanie jest częścią czasu maszynowego. Po podstawieniu do wyrażenia na i_o otrzymujemy równanie:

$$i_o = \frac{T}{t_s} = \frac{T}{\tau \cdot t_m} = \frac{1}{\tau \cdot C_m \cdot T^{m-1}} \quad (4.20)$$

które po podstawieniu do 4.16 daje równanie:

$$t_j = C_m \cdot T^m + t_z \cdot \tau \cdot C_m \cdot T^{m-1} + t_p \quad (4.21)$$

które po zróżniczkowaniu:

$$\frac{dt_j}{dT} = m \cdot C_m \cdot T^{m-1} + (m-1) \cdot \tau \cdot C_m \cdot T^{m-2} \cdot t_z = 0 \quad (4.22)$$

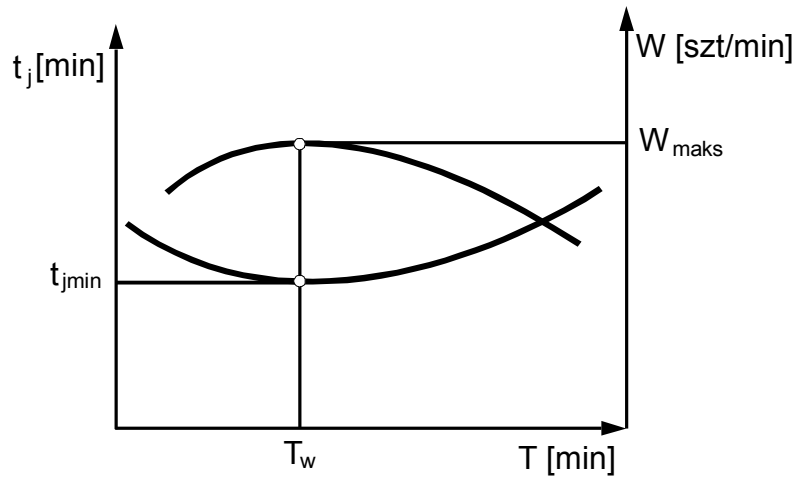
daje ekstremum funkcji T_w

$$T_w = \tau \cdot \left(\frac{1-m}{m} \right) \cdot t_z \quad (4.23)$$

oraz gdy $s = \frac{1}{m}$ to:

$$T_w = \tau \cdot (s-1) \cdot t_z, \quad (4.24)$$

dla którego druga pochodna jest $\frac{d^2 t_j}{dT^2} > 0$, stąd powyższe wyrażenie posiada minimum funkcji, czyli minimum czasu jednostkowego operacji a więc i maksimum wydajności obróbki (rys. 4.3.).



Rys. 4.3. Zmiany wydajności i czasu jednostkowego obróbki

4.3. Optymalizacja z uwagi na trwałość ekonomiczną

Pod pojęciem trwałości ekonomicznej rozumiana jest trwałość, przy której najmniejsze są koszty operacji. Polega to na szukaniu relacji między czynnikami zmiennymi kosztu operacji i trwałością. Równanie obejmujące koszty jednozabiegowej operacji (np. toczenia wzdłużnego) można zapisać w postaci:

$$K_j = t_m \cdot K_m + t_z \cdot \frac{K_m}{i_o} + \frac{K_n}{i_o} \quad (4.25)$$

gdzie:

K_j – koszt operacji jednozabiegowej,

K_m – koszt pracy obrabiarki przez 1 minutę (amortyzacja, wyposażenie PU, koszty pośrednie i obsługa),

K_n – koszty narzędziowe dla jednego okresu trwałości (cena zakupu lub wykonania z kosztami ostrzenia),

t_m – czas maszynowy,

t_z – czas wymiany zużytego ostrza,

i_o – liczba operacji w okresie trwałości.

Po uproszczeniu:

$$\frac{K_j}{K_m} = t_m + \frac{t_z}{i_o} + \frac{K_n}{i_o \cdot K_m} \quad (4.26)$$

lub

$$\frac{K_j}{K_m} = t_m + \frac{1}{i_o} \left(t_z + \frac{K_n}{K_m} \right) \quad (4.27)$$

dla:

$$t_m = \frac{L}{f} \cdot \frac{\pi \cdot D}{1000 \cdot C_v} \cdot T^m = C_m \cdot T^m \quad (4.28)$$

oraz gdy czas skrawania t_{skr} jest tylko częścią czasu maszynowego t_m oznaczoną jako $0 < \tau < 1$

$$i_o = \frac{T}{t_s} = \frac{T}{\tau \cdot t_m} = \frac{T}{\tau \cdot C_m \cdot T^m} = \frac{1}{\tau \cdot C_m \cdot T^{m-1}} \quad (4.29)$$

$$\frac{K_j}{K_m} = C_m \cdot T^m + \tau \cdot C_m \cdot T^{m-1} \cdot \left(t_z + \frac{K_n}{K_m} \right) \quad (4.30)$$

pochodna po trwałości, z tej funkcji:

$$\frac{d\left(\frac{K_j}{K_m}\right)}{dT} = m \cdot C_M \cdot T^{m-1} + \tau \cdot (m-1) \cdot C_m \cdot T^{m-2} \cdot \left(t_z + \frac{K_n}{K_m}\right) = 0 \quad (4.31)$$

po przyrównaniu do zera daje w wyniku wartość punktu T_{EK} , w postaci zależności od zmiennych $T_{EK} = f(\tau, m, t_z, K_n, K_m)$:

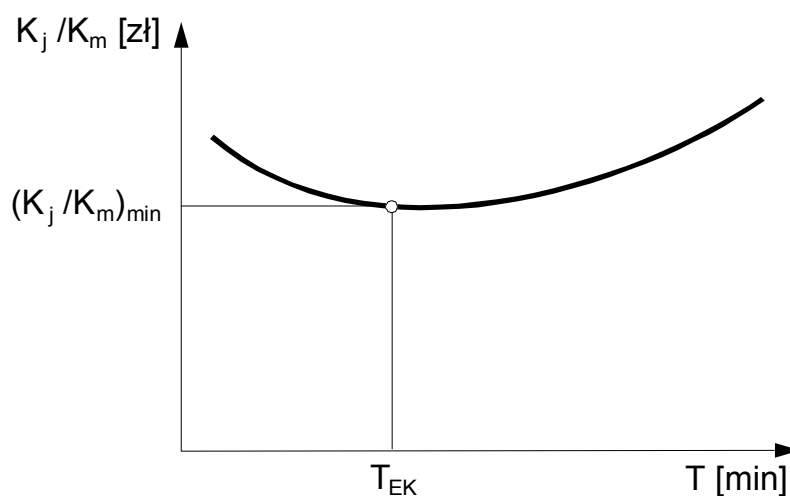
$$T_{EK} = \tau \cdot \left(\frac{1-m}{m}\right) \cdot \left(t_z + \frac{K_n}{K_m}\right) = \tau \cdot (s-1) \cdot \left(t_z + \frac{K_n}{K_m}\right) \quad (4.32)$$

gdzie $s = 1/m$.

Widoczne jest, że o trwałości ekonomicznej decydują tylko składniki kosztu nabycia i eksploatacji narzędzia. Druga pochodna z funkcji $\frac{K_j}{K_m} = f(\tau, m, t_z, K_n, K_m)$ jest większa od zera w punkcie ekstremalnym T_{EK} :

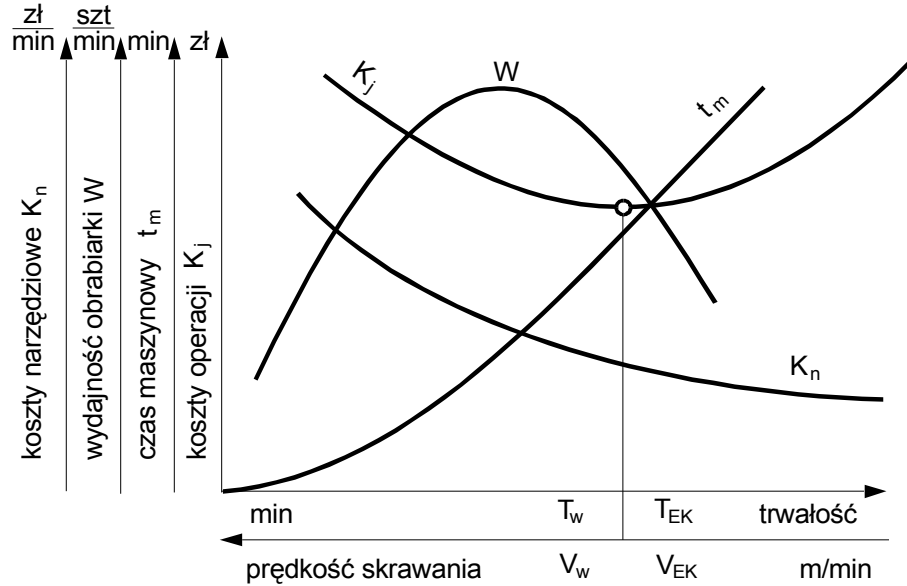
$$\frac{d\left(\frac{K_j}{K_m}\right)}{dT} > 0 \text{ zawsze,} \quad (4.33)$$

dlatego wiadomo, że w ekstremum jest minimum funkcji kosztów operacji, wyznaczona zaś trwałość ekonomiczna T_{EK} odpowiada ich najniższym wartościom.



Rys. 4.4. Trwałość ekonomiczna dla minimum funkcji kosztu operacji

Można przy tak ograniczonym rachunku wykazać, że minimalnemu kosztowi i najwyższej wydajności, odpowiadają dwa różne rozwiązania trwałości (rys. 4.5.):



Rys. 4.5. Przebiegi funkcji trwałości

Ponieważ wyrażenia na wartości optymalne mają podobne składniki:

$$T_{EK} = \tau \cdot \left(\frac{1-m}{m} \right) \cdot \left(t_z + \frac{K_n}{K_m} \right) \quad (4.34)$$

$$T_W = \tau \cdot \left(\frac{1-m}{m} \right) \cdot t_z$$

to po ich porównaniu otrzymuje się wyrażenia:

$$\frac{T_{EK}}{T_W} = \frac{\tau \cdot \left(\frac{1-m}{m} \right) \cdot t_z + \tau \cdot \left(\frac{1-m}{m} \right) \cdot \frac{K_n}{K_m}}{\tau \cdot \left(\frac{1-m}{m} \right) \cdot t_z} = 1 + \tau \cdot \left(\frac{1-m}{m} \right) \cdot \frac{K_n}{K_m} \quad (4.35)$$

Ekonomiczna trwałość i trwałość największej wydajności mogą być sobie równe:

$$\tau \cdot \left(\frac{1-m}{m} \right) \cdot \frac{K_n}{K_m} = 0 \text{ jeżeli} \quad (4.36)$$

czyli gdy $1 - m = 0$, a stąd wynika, że musi być $m = 1$, w praktyce nie znajduje to potwierdzenia oznacza to, że nigdy nie pokryją się wartości T_{EK} i T_w .

Znając wyrażenie na T_w i T_{EK} można łatwo wyliczyć prędkość skrawania v_w i v_{EK} , n_w i n_{EK} z odpowiednich zależności:

$$v_i = \frac{C_v}{T_i^m}; \quad n_i = \frac{v_i}{\pi \cdot D} \quad (4.37)$$

gdzie:

i – oznacza wielkości wyliczone dla trwałości zależnej od największej wydajności oraz trwałości ekonomicznej.

D – średnica toczenia w [m].

5. Spis literatury

1. Abdelmoinem M. Es., Scrutton R. F.: The Tribology of Cutting Tools During Finish Machining. Part I. Wear 1973. 25
2. Abdelmoinem M. Es., Scrutton R. F.: The Tribology of Cutting Tools During Finish Machining. Part II. Wear 1973. 25
3. Albrecht P.: New Developments of the Metal–Cutting Process. Trans. Of the ASME. Journ. Of Eng. For Ind. Nov.1960
4. Bailey J. A.: Friction in Metal Machining – Mechanical Aspects. Wear 1975, 31
5. Betanelli A. J.: Procnost i nadeznost rezušcego instrumenta. Izd. Sabcota Sakartvelo. Tbilisi 1973
6. Bijak–Żochowski M.: Numeryczne zastosowania metody całkowania brzegowego do zagadnień sprężystości i plastyczności. Archiwum Budowy Maszyn. Tom XXII. 1975. 4
7. Brammertz P. H.: Die Entstehung der Oberflächeneraucheit beim Feindrehen. Industrie Anzeiger 1961. 2
8. Brebia C.: The boundary Element Methods for Engineering. Pentech Press. London. Plymouth 1980
9. Chaet S. A.: Procnost rezušcego instrumenta. Mašinostroenie. Moskva 1975
10. Choroszy B.: Badania zużycia ostrza oraz jego wpływu na opory skrawania i strukturę powierzchni stali 55. Praca nie publikowana. Biblioteka Instytutu Technologii Budowy Maszyn Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1975
11. Cruse T.A.:Application of the Boundary–Integral Equation Method to Three Dimensional Stress Analyses, Computers and Structures, Pregamon Press 1973, 3
12. Degner W., Ham N.C.: Untersuchungen beim Spannen mit Kleinen Spannungsdicken, Fertigungstechnik und Betrieb 1973, 23
13. Diacenko P.E., Jakobson M.O.: Kacestwo poverchnosti pri obrabotke metallov rezaniem, Mašgiz, Moskva 1951
14. Furrer J.: Influence du rayen du trachand de l’outil en coupe orthegonale, Annals of the CIRP 1973, 22
15. Górecka R., Polański Z.: Metrologia warstwy wierzchniej, Warszawa WNT, 1983
16. Górski E.: Obróbka gładkościowa, Warszawa, WNT, 1963
17. Grzesik W.: Uogólniony model swobodnego skrawania nieortogonalnego. WSI w Opolu, Studia i Monografie, Opole 1987, 18
18. Grzesik W.: Podstawy skrawania materiałów metalowych, Warszawa WNT, 1998
19. Husein A.B., Dovries M.F., Wu S.M.: Analysis of Force Components in Bar Turning. Trans. Of the ASME. Journ. of Eng. for Ind., Nov.1973

20. Kaczmarek J., Klimczak T.: Dwu- i trójwymiarowa charakterystyka nierówności powierzchni. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*. Polska Akademia Nauk. Komitet Budowy Maszyn. Z. 1 (65) 1986
21. Kaczmarek J., Klimczak T.: Porównanie dwuwymiarowej oceny chropowatości powierzchni z oceną trójwymiarową. V Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna – Forum Prac Badawczych. *Metrologia w procesach wytwarzania*. Kraków 1994
22. Kawalec M.: Fizyczne i technologiczne zagadnienia przy obróbce z małymi grubościami warstwy skrawanej. *Pol. Pozn.*, seria: Rozprawy, Poznań 1979, 106
23. Keinio Uehara, Fumiyata Kiyosawa: Automatic Tool Wear Monitoring in NC Turning, *Annals of the CIRP* 28, 1979, 1
24. Kravcenko B.A.: Sily, ostateczne naprężenia i tarcie pri rezani metallov. Kujbyševskoe Kniznoe Izd., Kujbyšev 1962
25. Kunstetter St.: Narzędzia skrawające do metali, Konstrukcja, wyd. III, Warszawa WNT 1967
26. L'vov N.P.: Opredelenie minimal'no vazmozhnoj toleščiny srezaemogo sloja, *Stanki i Instrument* 1969, 4
27. Lierath F.: Zusammenhang zwischen Schnittkraft, Spanbildung und Temperatur beim Drehen mit Schnellarbeitsstahl-Werkzeugen, *Wiss. Zeit. Techn. Hochschule, Magdeburg* 11, 1967, 2
28. Luthe H., Pretsch H.U.: Beeinflussung der Komponenten der Zerspankraft und der Oberflächengüte beim Drehen durch Eckenradius und Nebenscheide des Drehmeißels, *Fertigungstechnik und Betrieb*, 1971, 11 i 12
29. Masuko M.: Fundamental Researches on the Metal Cutting, *Trans. Japan Soc. Mech. Engr.* Vol. 19, 1953, 18
30. Meldner Bogdan, Darlewski Jan: Narzędzia skrawające w zautomatyzowanej produkcji. WNT Warszawa 1991
31. Merchant E.: Mechanics of the Metal Cutting Process. *Journ. Of Appl. Phys.* Vol. 16, 1945, 5
32. Nowicki B.: Struktura geometryczna. Chropowatość i falistość. WNT. Warszawa 1991
33. Optiz H., Brammertz P., Untersuchung der Ursachen für Form- und Messfehler bei der Feinbearbeitung, *Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen* Nr. 1008. Westdeutscher Verlag Köln und Opladen 1961.
34. Praca zbiorowa, Razvitie nauki o rezanii metalovv, Mašgiz, Moskva 1973.
35. Praca zbiorowa, Rezanie zaroprcnych i titanovyvh splavov, Mašinostroenie, Moskva 1972.
36. Richter A., Jacobs J., Der Einfluß der Schneidkantenrundung am Absapnwerkzeug auf die einheitliche Darstellung der Schnittkräfte. *Annals of the CIRP*. 1971, 1.

37. Roth R. N., Oxley P., Analiza prjamougol 'nogo rezanija s pomoščju polja linii skolzenia eksperimentalno polucennego na osonovanii polej tecenia materjala. W: E. I. Rezušcie Instrumenty 1972, 36.
38. Storch B., Rozkład sił podczas toczenia na zaokrągleniu krawędzi skrawającej, IV ogólnopolska konferencja nt. Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej. Ośrodek Badań i Konsultacji TWWP, Gorzów Wlkp. 1981.
39. Storch B., Szubert Z., Badania zależności zjawisk i mechanizmów w oddzielaniu materiału w czasie skrawania od rozkładu sił na powierzchniach roboczych ostrza tokarskiego. Etap I: Analityczne i doświadczalne podstawy wyznaczania sił na roboczych powierzchniach ostrza noża tokarskiego wykonanego ze stali SW7M, Raport serii SFR Nr 24/82 Inst. Technol. Bud. Masz. PWr., Wrocław 1982.
40. Storch B.: Analityczne i doświadczalne podstawy wyznaczania sił na roboczych powierzchniach ostrza noża tokarskiego, praca nie publ., Bibl. Inst. Technol. Bud. Masz. PWr., Wrocław 1979.
41. Storch B.: Stale szybko tnące kobaltowe na narzędzia skrawające ze szczególnym uwzględnieniem noży tokarskich. Sympozjum XXV lat produkcji noży tokarskich, Pabianice 1977, 35–40
42. Storch B.: Wzajemne oddziaływanie naroża ostrza i materiału skrawanego. Prace Naukowe ITBM PWr 40, Seria Monografie 1989,8
43. Uzarowicz A., Zbadanie celowości zastosowania dogładzania oscylacyjnego do narzędzi skrawających z węglików spiekanych, praca nie publ., Bibl. Pol. Warsz., Warszawa 1965.
44. Wojnarowski R., Analityczno–doświadczalna metoda wyznaczania naprężeń w warstwie skrawanej, praca nie publ., Bibl. Inst. Technol. Bud. Masz. PWr. Wrocław 1986.
45. Zorev N.N., O vzaimozavisimosti processov v zone struzkoobrazovanija i v zone kontakta perednej poverchnosti instrumenta, Vestnik Mašinostroenija 1963, 12.
46. Zorev N.N., Voprosy mechaniki processa rezanija metallov, Mašgiz. Moskva 1956.
47. Wykład z okazji nadania tytułu Honoris Causa Doctoris profesorowi Wiesławowi Olszakowi, Szczecin 96,
48. Podręczniki akademickie:
 - Brodowicz W.: Skrawanie i narzędzia,
 - Górski E.: Obróbka skrawaniem,
 - Kaczmarek J.: Podstawy obróbki wiórowej, ścierniej i erozyjnej,
 - Klipcera U.: Überwachung des Werkzeugverschleißes mit Hilfe der Zerspankraftichtung,
 - Kornberger Z.: Technologia obróbki skrawaniem i montażu,

Praca zbiorowa: Podstawowe techniki wytwarzania w przemyśle maszynowym.

49. Polskie Normy:

PN 92/M-01002/01 Geometria części roboczej narzędzi skrawających, Terminologia ogólna, układy odniesienia, kąty narzędzia i kąty robocze oraz łamacze wióra,

PN 92/M-01002/02 Geometria części roboczej narzędzi skrawających, Ogólne wzory konwersji kątów narzędzia i kątów roboczych,

PN 92/M-01002/03 Wielkości geometryczne i kinematyczne w obróbce skrawaniem,

PN 92/M-01002/04 Siły, energia i moc,

PN 93/M-01006 Zastosowanie twardych materiałów skrawających, Oznaczenie głównych grup obróbki wiórowej i grup zastosowania.

PN 87/M-04250 Warstwa wierzchnia, Terminologia,

PN 87/M-04251 Chropowatość powierzchni, Wartości liczbowe parametrów,

PN 85/M-04254 Porównawcze wzorce chropowatości powierzchni obrabianych,

PN 87/M-04256/01 Struktura geometryczna powierzchni, Terminologia ogólna,

PN 87/M-04256/02 Chropowatość powierzchni, Terminologia ogólna,

PN 87/M-04256/03 Pomiary chropowatości powierzchni, Terminologia,

PN 89/M-04256/04 Falistość powierzchni, Terminologia,

PN 86/H-85021 Stal narzędziowa stopowa do pracy na gorąco,

PN 86/H-85022 Stal szybko tnąca

PN 86/H-85023 Stal narzędziowa stopowa do pracy na zimno oraz stal narzędziowa węglowa,

Spis rysunków

Rozdział 1.

Rys.1.1 Podział w technologii maszyn.....	9
Rys.1.2 Podział obróbki ubytkowej	10
Rys.1.3 Podział w rodzajach kształtowania.....	10
Rys.1.4 Wzrost dokładności obróbki.....	12
Rys.1.5 Przykłady obróbki metodą punktową.....	14
Rys.1.6 Przykłady obróbki kształtowej	15
Rys.1.7 Przykłady obróbki obwiedniowej.....	17
Rys.1.8 Krawędzie skrawające i powierzchnie części roboczej	18
Rys.1.9 Płaszczyzny układu narzędzia	21
Rys.1.10 Podstawowe płaszczyzny w układzie roboczym.....	22
Rys.1.11 Kąty w układzie narzędzia. Nóż tokarski	23
Rys.1.12 Kąty w układzie roboczym. Nóż tokarski	26
Rys.1.13 Związki geometryczne w układzie ustawienia	27
Rys.1.14 Cosinusy kierunkowe	29
Rys.1.15 Obrót elementarny wokół osi X	30
Rys.1.16 Wymiary warstwy skrawanej przy toczeniu.....	35
Rys.1.17 Sterownie za pomocą kątów γ_n , λ_s kierunkiem spływu wiórów	36
Rys.1.18 Wpływ kątów γ_n i α_n na wytrzymałość ostrza.....	37
Rys.1.19 Kierunki rozwoju materiałów narzędziowych.....	39
Rys.1.20 Zakresy zastosowania materiałów supertwardych	50
Rys.1.21 Zalecenia dotyczące doboru materiału narzędziowego	53
Rys.1.22 Ogólny podział obrabiarek	56
Rys.1.23 Wpływ przemieszczenia ostrza na błąd wykonania	60
Rys.1.24 Sztywność suportu	61
Rys.1.25 Krzywe przemieszczeń cząstkowych i sumarycznych	63
Rys.1.26 Błędy kształtu zależne od podatności konika i wrzeciona	65
Rys.1.27 Ograniczenie podatności narzędzi.....	66
Rys.1.28 Wpływ sztywności przedmiotu na błąd kształtu	67
Rys.1.29 Wpływ składowej drgań względnych y_{wzgl} na zmiany warstwy skrawanej i geometrii ostrza.....	68
Rys.1.30 Sprzężenie zwrotne między OUPN i procesem skrawania powodujące zmiany w głębokości skrawania.....	69
Rys.1.31 Charakterystyka amplitudowo częstotliwościowej układu OUPN.....	70
Rys.1.32 Zmienność parametrów geometrycznych warstwy skrawanej	72
Rys.1.33 Parametry technologiczne i geometryczne warstwy skrawanej	72
Rys.1.34 Schemat pracy ostrza noża strugarskiego.....	74
Rys.1.35 Toczenie.....	75
Rys.1.36 Wiercenie.....	76

6. Spis rysunków

Rys.1.37 Obróbka otworów dokładnych a) wiercenie, b) powiercanie, c) rozwiercanie zgrubne, d) rozwiercanie wykańczające	77
Rys.1.38 Metody frezowania: 1) czołowe, 2) walcowe.	78
Rys.1.39 Frezowanie a) przeciwbieżne, b) współbieżne.	79
Rys.1.40 Przykłady rozwiązań frezów.	79
Rys.1.41 a) Zasada pracy przeciągacza, b) kształty uzyskiwanych otworów poprzez przeciąganie.	80
Rys.1.42 Przykład konstrukcji przeciągacza	80

Rozdział 2.

Rys. 2.1 Strefa tworzenia wióra.....	81
Rys. 2.2 Klasyfikacja procesów elementarnych	82
Rys. 2.3 Typowe krzywe przebiegu $\sigma = f(\epsilon)$	83
Rys. 2.4 Odkształcenie w strefie tworzenia wióra.....	84
Rys. 2.5 Naprężenia i siły na granicach strefy plastycznego formowania wióra	86
Rys. 2.6 Płaszczyzna ścinania uskoku materiału będącego na drodze noża (a). Powierzchnia ścinania przy tworzeniu wióra (b).	86
Rys. 2.7 Rozkład sił tworzenia wióra.....	87
Rys. 2.8 Analiza naprężeń z koła Mohra.	88
Rys. 2.9 Przemieszczenia wydzielonych elementów warstwy skrawanej.....	89
Rys. 2.10 Model skrawania wg [45].	90
Rys. 2.11 Obszary korzystnych postaci wiórów.....	93
Rys. 2.12 Widok wióra pod mikroskopem elektronowym	94
Rys. 2.13 Układ odniesienia dla tokarki.....	97
Rys. 2.14 Rozkład sił przy toczeniu walcowym.....	98
Rys. 2.15 Ilustracja graficzna funkcji wykładniczej $F = C \cdot f^n$	100
Rys. 2.16 Opór właściwy skrawania	101
Rys. 2.17 Zmienność prędkości skrawania w funkcji średnicy wiercenia	102
Rys. 2.18 Klasyfikacja metod pomiaru temperatury w skrawaniu	104
Rys. 2.19 Rozkład a) temperatury w wiórze i przedmiocie obrabianym [7] b) ciepła w strefie tworzenia wióra.....	105
Rys. 2.20 Źródła ciepła i rozprzeczanie w strefie skrawania	106
Rys. 2.21 Udziały ciepła cząstkowego w zależności od prędkości skrawania.	107
Rys. 2.22 Zależność temperatury skrawania od a) posuwu, b) prędkości skrawania	109
Rys. 2.23 Obecność narostu i jego wymiary charakterystyczne	110
Rys. 2.24 Fotografia narostu	111
Rys. 2.25 Schemat sił działających na narost.....	111
Rys. 2.26 Wpływ parametrów skrawania na zachowanie narostu.....	113
Rys. 2.27 Zmiany posuwu f i prędkości skrawania v_c dla stałej temperatury skrawania Θ	114
Rys. 2.28 Widok narostu na podstawie wióra	115

6. Spis rysunków

Rys. 2.29 Ślady zużycia na powierzchniach przyłożenia noża tokarskiego.....	116
Rys. 2.30 Wskaźniki zużycia ostrza	117
Rys. 2.31 Model geometryczny przenikania walców, gdy promień $R = \infty$	119
Rys. 2.32 „Przerysowania” powierzchni przyłożenia w obszarze wytarcia naroża ostrza	120
Rys. 2.33 Przebieg typowej krzywej zużycia	121
Rys. 2.34 Podział rodzajów zużycia	122
Rys. 2.35 Zależność zużycia w funkcji prędkości i czasu skrawania	124
Rys. 2.36 Zależność trwałości od prędkości skrawania	125
Rys. 2.37 Zasada tworzenia krzywej trwałości	126
Rys. 2.38 Potrzeby chłodzenia i smarowania w operacjach	128
Rys. 2.39 Skrawanie swobodne, prostokątne	135
Rys. 2.40 Modele skrawania a) z pojedynczą płaszczyzną ścinania, b), c) ze strefą odkształceń plastycznych, d) w procesie rzeczywistym.....	136
Rys. 2.41 Schemat skrawania krawędzią ostrza,	137
Rys. 2.42 Model pracy zaokrąglenia krawędzi skrawającej	139
Rys. 2.43 Siły i składowe ruchu wokół zaokrąglenia krawędzi skrawającej ...	141
Rys. 2.44 Model sił w skrawaniu prostokątnym	142
Rys. 2.45 Przebiegi składowych sił skrawania w zakresie małych grubości warstwy skrawanej	144
Rys. 2.46 Założenia do obliczeń.....	146
Rys. 2.47 Zmiany przemieszczeń i naprężeń.....	150
Rys. 2.48 Geometria wierzchołka ostrza dla a) $\kappa_r < 90^\circ$ b) $\kappa_r = 90^\circ$	152
Rys. 2.49 Model skrawania nieswobodnego	153
Rys. 2.50 Rozkład sił jednostkowych na zaokrągleniu wierzchołka ostrza	156
Rys. 2.51 Fotografie nierówności na powierzchni obrabianej	158
Rys. 2.52 Schemat dla wyliczenia wysokości nierówności	160
Rys. 2.53 Przebiegi wysokości nierówności w funkcji posuwu	161
Rys. 2.54 Przykładowe zmiany wysokości nierówności w zależności od czasu skrawania	162
Rys. 2.55 Model tworzenia nierówności ostrzem zużytym	163
Rozdział 3.	
Rys. 3.1 Model technologicznej warstwy wierzchniej [31]	166
Rozdział 4.	
Rys. 4.1 Schemat do obliczeń naddatku skrawanego materiału	169
Rys. 4.2 Ograniczenia doboru parametrów skrawania	171
Rys. 4.3 Zmiany wydajności i czasu jednostkowego obróbki	175
Rys. 4.4 Trwałość ekonomiczna dla minimum funkcji kosztu operacji	177
Rys. 4.5 Przebiegi funkcji trwałości	178

Spis tabel

Tabela 1. Odmiany skrawania z uwagi na wykonywane ruchy.....	12
Tabela 2. Zależności między kątami w układzie narzędzia	24
Tabela 3. Zasada opisywania kątów transformacji.....	28
Tabela 4. Kosinusy kątów pomocniczych	28
Tabela 5. Ukształtowanie ostrza	37
Tabela 6. Gatunki stali szybko tnących	43
Tabela 7. Podział obrabiarek	57
Tabela 8. Sposób oddziaływania warunków obróbki na postać wióra [10]	94
Tabela 9. Zdolności chłodzące oleju i wody	128