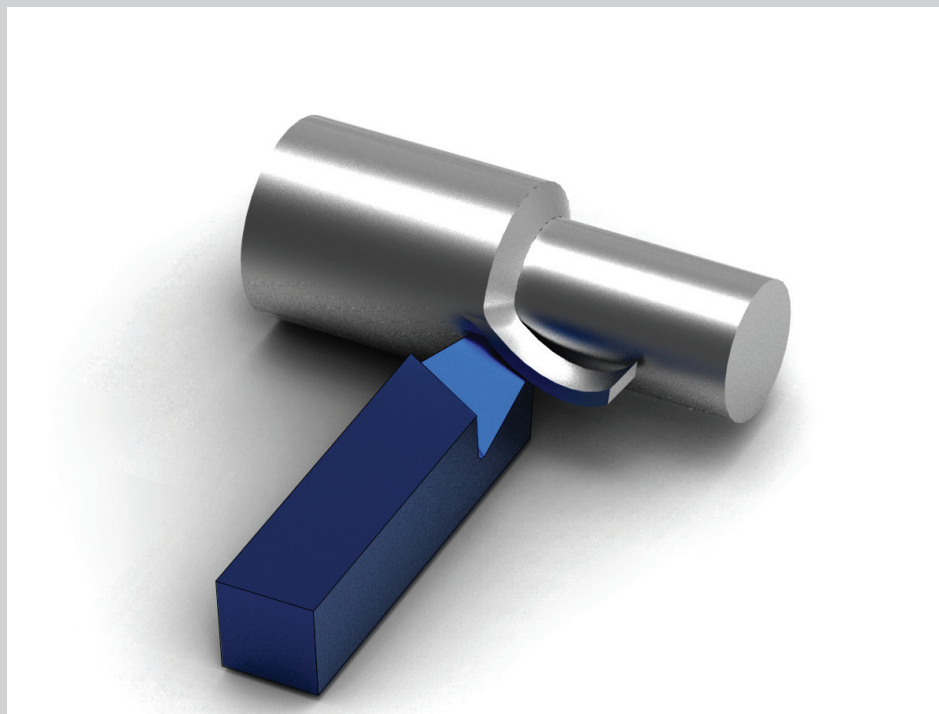




*Kazimierz Zaleski*  
*Jakub Matuszak*

# Podstawy obróbki ubytkowej



POD RĘCZNIKI

# Podstawy obróbki ubytkowej

# Podręczniki – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska  
Wydział Mechaniczny  
ul. Nadbystrzycka 36  
20-618 LUBLIN

Kazimierz Zaleski  
Jakub Matuszak

# Podstawy obróbki ubytkowej



Politechnika Lubelska  
Lublin 2016

Recenzent:  
prof. dr hab. inż. Jerzy Lipski, Politechnika Lubelska

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2016

ISBN: 978-83-7947-224-6

Wydawca: Politechnika Lubelska  
ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin  
Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej  
Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej  
ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin  
tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl  
[www.biblioteka.pollub.pl](http://www.biblioteka.pollub.pl)  
Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak  
[www.agencjatorp.pl](http://www.agencjatorp.pl)

---

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL [www.bc.pollub.pl](http://www.bc.pollub.pl)  
Nakład: 100 egz.

# Spis treści

<b>WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ .....</b>	<b>9</b>
<b>Przedmowa .....</b>	<b>11</b>
<b>1. CHARAKTERYSTYKA I PODZIAŁ OBRÓBKI UBYTKOWEJ .....</b>	<b>12</b>
<b>2. POJĘCIA PODSTAWOWE W OBRÓBCE SKRAWANIEM .....</b>	<b>16</b>
2.1. Przedmiot obrabiany .....	16
2.2. Kinematyka skrawania .....	17
2.3. Ostrze narzędzia .....	20
2.4. Układy odniesienia .....	21
2.5. Geometria ostrza w układzie narzędzia .....	21
2.6. Technologiczne parametry skrawania .....	26
2.7. Warstwa skrawana .....	28
2.8. Czas maszynowy i wydajność skrawania .....	29
<b>3. BUDOWA NARZĘDZI SKRAWAJĄCYCH .....</b>	<b>31</b>
3.1. Elementy narzędzi .....	31
3.2. Klasyfikacja narzędzi .....	31
3.3. Materiały narzędziowe .....	33
3.3.1. Właściwości i podział materiałów narzędziowych .....	33
3.3.2. Stale narzędziowe niestopowe i stopowe do pracy na zimno .....	33
3.3.3. Stale szybko tnące .....	34
3.3.4. Węglik spiekane .....	36
3.3.5. Cermetale .....	39
3.3.6. Spieki ceramiczne .....	39
3.3.7. Materiały supertwarde .....	40
<b>4. PODSTAWY FIZYKALNE OBRÓBKI SKRAWANIEM .....</b>	<b>43</b>
4.1. Tworzenie się wióra .....	43
4.2. Siły moment i moc skrawania .....	46
4.2.1. Siły w procesie skrawania .....	46
4.2.2. Moment i moc skrawania .....	49
4.3. Zjawiska cieplne w procesie skrawania i ciecze obróbkowe .....	50

4.3.1. Ciepło w procesie skrawania.....	50
4.3.2. Temperatura w strefie skrawania.....	52
4.3.3. Ciecze obróbkowe .....	53
4.4. Zużycie i trwałość ostrza .....	55
4.4.1. Rodzaje zużycia ostrza .....	55
4.4.2. Ocena zużycia ostrza.....	56
4.4.3. Trwałość ostrza .....	58
<b>5. SPOSOBY OBRÓBK WIÓROWEJ .....</b>	<b>62</b>
5.1. Toczenie .....	62
5.1.1. Charakterystyka i odmiany .....	62
5.1.2. Noże tokarskie.....	66
5.2. Dłutowanie i struganie.....	69
5.2.1. Dłutowanie.....	69
5.2.2. Struganie .....	72
5.3. Przeciąganie.....	73
5.3.1. Charakterystyka i odmiany przeciągania.....	73
5.3.2. Przeciągacze i przepychacze .....	74
5.3.3. Czas maszynowy przeciągania.....	75
5.3.4. Zastosowanie przeciągania.....	76
5.4. Wiercenie, pogłębianie i rozwiercanie .....	77
5.4.1. Wiercenie i wiertła .....	77
5.4.2. Pogłębianie i pogłębiacze.....	82
5.4.3. Rozwiercanie i rozwiertaki .....	83
5.5. Frezowanie.....	86
5.5.1. Charakterystyka i odmiany frezowania .....	86
5.5.2. Frezy.....	90
5.5.3. Geometryczne i technologiczne parametry frezowania.....	94
<b>6. SKRAWALNOŚĆ MATERIAŁÓW .....</b>	<b>99</b>
6.1. Określenie i wskaźniki skrawalności.....	99
6.2. Skrawalność wybranych materiałów .....	102
6.2.1. Skrawalność stali.....	102
6.2.2. Skrawalność żeliwa .....	104
6.2.3. Skrawalność stopów aluminium .....	105

6.2.4. Skrawalność stopów magnezu.....	107
6.2.5. Skrawalność stopów tytanu .....	108
6.2.6. Skrawalność stopów miedzi .....	109
6.2.7. Skrawalność tworzyw i kompozytów polimerowych.....	109
6.2.8. Skrawalność materiałów ceramicznych .....	111
<b>7. OBRÓBKA ŚCIERNA.....</b>	<b>112</b>
7.1. Charakterystyka obróbki ścierniej.....	112
7.2. Narzędzia do obróbki ścierniej.....	114
7.2.1. Materiały ściernie .....	114
7.2.2. Kształt i wielkość ziaren ściernych.....	116
7.2.3. Spoiwa.....	117
7.2.4. Struktura narzędzi ściernych spojonych .....	118
7.2.5. Twardość narzędzi ściernych.....	119
7.2.6. Kształt i wymiary narzędzi ściernych.....	120
7.3. Szlifowanie .....	122
7.3.1. Szlifowanie powierzchni walcowych zewnętrznych .....	123
7.3.2. Szlifowanie otworów.....	124
7.3.3. Szlifowanie płaszczyzn .....	127
7.3.4. Przecinalanie ściernicowe .....	128
7.3.5. Podstawowe zależności kinematyczne .....	129
7.4. Szlifowanie taśmami ściernymi.....	130
7.5. Przecinalanie strumieniowo-ściernie .....	132
7.6. Wybrane sposoby gładkościowej obróbki ścierniej.....	133
7.6.1. Gładzenie.....	134
7.6.2. Dogładzanie oscylacyjne .....	135
7.6.3. Docieranie mechaniczne .....	137
7.6.4. Polerowanie mechaniczno-ściernie.....	138
<b>8. OBRÓBKA EROZYJNA .....</b>	<b>140</b>
8.1. Obróbka elektroerozyjna.....	140
8.2. Obróbka elektrochemiczna .....	143
8.3. Obróbka laserowa.....	146
8.4. Obróbka jonowa.....	149
<b>9. OBRÓBKA GWINTÓW .....</b>	<b>151</b>



9.2. Nacinanie gwintów gwintownikami .....	154
9.3. Nacinanie gwintów narzynkami.....	156
9.4. Frezowanie gwintów .....	157
9.5. Nacinanie gwintów głowicami gwinciarскими.....	159
9.6. Szlifowanie gwintów .....	160
9.7. Gwintowanie elektroerozyjne .....	161
<b>10. OBRÓBKA UZĘBIEŃ KÓŁ ZĘBATYCH WALCOWYCH.....</b>	<b>162</b>
10.1. Obróbka kształtowa uzębień kół zębatach walcowych.....	162
10.2. Obróbka obwiedniowa uzębień kół zębatach walcowych.....	164
10.2.1. Dłutowanie i struganie obwiedniowe .....	164
10.2.2. Frezowanie i przeciąganie obwiedniowe .....	167
10.3. Obróbka wykończeniowa kół zębatach.....	169
10.3.1. Wiórkowanie .....	170
10.3.2. Szlifowanie, gładzenie i docieranie .....	171
<b>11. WARSTWA WIERZCHNIA OBROBIONYCH PRZEDMIOTÓW .....</b>	<b>174</b>
11.1. Właściwości stereometryczne powierzchni.....	175
11.1.1. Kierunkowość struktury geometrycznej powierzchni.....	175
11.1.2. Chropowatość i falistość powierzchni .....	176
11.1.3. Geometryczno-kinematyczny model kształtowania mikronierówności powierzchni.....	179
11.2. Właściwości fizyczne warstwy wierzchniej .....	182
<b>Literatura.....</b>	<b>184</b>

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

$A_D$	– nominalne pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej
$A_\alpha$	– powierzchnia przyłożenia
$A_\gamma$	– powierzchnia natarcia
$A_e$	– szerokość skrawania
$a_p$	– głębokość skrawania
$b$	– szerokość warstwy skrawanej
$B$	– szerokość przedmiotu obrabianego
$CBN$	– regularny azotek boru
$CVD$	– chemiczne osadzanie z fazy gazowej
$D$	– średnica przedmiotu, średnica narzędzia
$f$	– posuw
$F$	– całkowita siła skrawania
$F_c$	– siła skrawania (główna)
$F_f$	– siła posuwowa
$F_p$	– siła odporowa
$f_r$	– posuw na obrót
$f_t$	– posuw minutowy
$f_z$	– posuw na ostrze
$h$	– grubość warstwy skrawanej
$HPC$	– obróbka wysokowydajna
$HSC$	– obróbka z wysoką prędkością skrawania
$k_c$	– opór właściwy skrawania
$l_p$	– długość przejścia (drogi skrawania)
$M_c$	– moment skrawania
$MQL$	– skrawanie z minimalnym smarowaniem
$N$	– narzędzie
$n$	– prędkość obrotowa
$n_N$	– prędkość obrotowa narzędzia
$n_{PO}$	– prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego
$P_c$	– moc skrawania
$PCD$	– diament polikrystaliczny
$P_g$	– płaszczyzna największego spadku

$P_n$	– płaszczyzna normalna
$PO$	– przedmiot obrabiany
$P_o$	– płaszczyzna przekroju głównego (ortogonalna)
$P_p$	– płaszczyzna tylna
$P_r$	– płaszczyzna podstawowa
$P_s$	– płaszczyzna krawędzi skrawającej
$PVD$	– fizyczne osadzanie z fazy gazowej
$Q$	– strumień ciepła
$Ra$	– średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości
$r_n$	– promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej
$Rz$	– największa wysokość profilu
$Rz_t$	– teoretyczna wysokość profilu
$s$	– liczba podwójnych skoków w ciągu minuty
$S$	– główna krawędź skrawająca
$S'$	– pomocnicza krawędź skrawająca
$SGP$	– struktura geometryczna powierzchni
$T$	– okres trwałości ostrza
$t_m$	– czas maszynowy
$v_c$	– prędkość ruchu głównego (prędkość skrawania)
$v_{fj}$	– prędkość ruchu posuwowego
$v_j$	– prędkość ruchu jałowego
$z$	– liczba ostrzy narzędzia
$\alpha$	– kąt przyłożenia
$\beta$	– kąt ostrza
$\gamma$	– kąt natarcia
$\varepsilon_r$	– kąt naroża
$\kappa_r$	– kąt przystawienia
$\lambda_s$	– kąt pochylenia krawędzi skrawającej
$\psi_r$	– kąt odchylenia krawędzi skrawającej

## Przedmowa

Obróbka ubytkowa jest bardzo szeroko stosowaną techniką w procesie wytwarzania elementów maszyn. Duże zainteresowanie tą obróbką wynika z możliwości uzyskania dużej dokładności wymiarowo – kształtowej, małej chropowatości powierzchni i korzystnych, ze względu na trwałość eksploatacyjną, właściwości warstwy wierzchniej.

Obróbka ubytkowa umożliwia wytwarzanie elementów o bardzo zróżnicowanym kształcie i dużej rozpiętości wymiarów. Do trudniejszych zadań obróbkowych trzeba zaliczyć wytwarzanie elementów bardzo małych, elementów cienkościennych, mających duże znaczenie w lotnictwie, a także elementów integralnych, które przejmują funkcje całych zespołów części. Doskonalenie narzędzi skrawających oraz postępy w budowie maszyn technologicznych pozwalają na zwiększenie wydajności obróbki oraz jakości wytwarzanych przedmiotów. Rozwój technik erozyjnych, a także wprowadzanie nowych materiałów do wytwarzania ostrzy narzędzi skrawających umożliwiają obróbkę materiałów bardzo twardych.

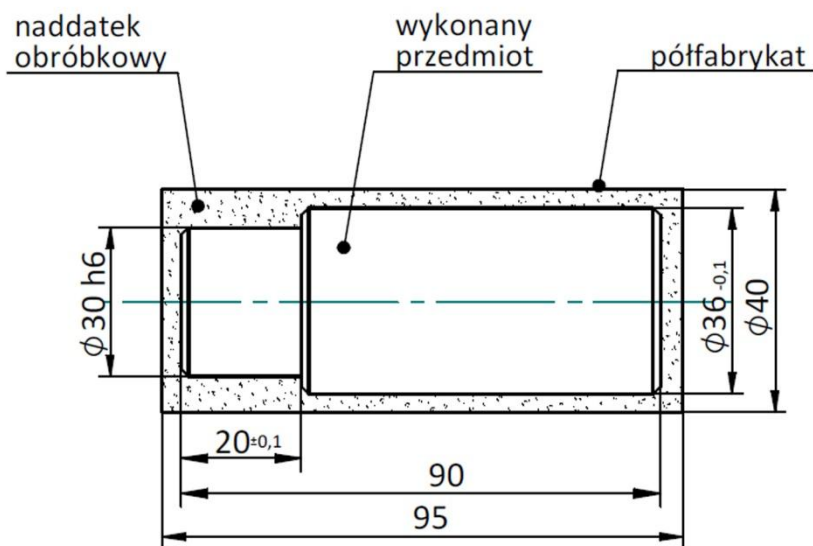
W ostatnich dziesięcioleciach obserwuje się ciągły rozwój technik obróbki ubytkowej. Według różnych prognoz znacząca rola obróbki ubytkowej w procesach wytwarzania elementów maszyn i innych urządzeń utrzyma się jeszcze przez wiele lat.

Procesy obróbki ubytkowej są przedmiotem wielu badań i wiedza na ten temat jest bardzo obszerna. Z powodu ograniczonej objętości podręcznika, scharakteryzowano, często w sposób uproszczony, podstawy fizykalne procesów skrawania i erodowania materiałów, narzędzia stosowane w obróbce ubytkowej, skrawalność wybranych materiałów oraz sposoby obróbki ubytkowej. Niektóre zagadnienia tylko zasygnalizowano, odsyłając Czytelnika do literatury.

Podręcznik przeznaczony jest dla studentów kierunków: *mechanika i budowa maszyn*, *inżynieria produkcji* oraz *zarządzanie i inżynieria produkcji*, jako pomoc do wykładu podstawowego, prowadzonego dla wszystkich studentów danego kierunku. Z podręcznika mogą również korzystać studenci kierunków *inżynieria materiałowa* oraz *transport*, po wskazaniu przez prowadzącego odpowiednich partii materiału, gdyż wykład na tych kierunkach prowadzony jest w węższym zakresie.

# 1. CHARAKTERYSTYKA I PODZIAŁ OBRÓBKI UBYTKOWEJ

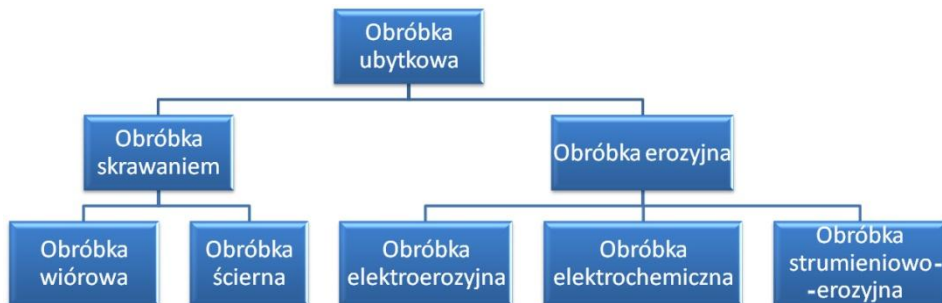
Obróbka ubytkowa obejmuje te metody kształtowania elementów maszyn i urządzeń, które wiążą się z koniecznością usunięcia pewnej objętości obrabianego materiału, zwanej nadatkiem obróbkowym. Przedmiot wyjściowy, z którego metodami obróbki ubytkowej kształtowany jest wykonywany przedmiot, nazywany jest półfabrykatem. Przykład kształtowania dwustopniowego wałka z półfabrykatu w postaci pręta walcowanego przedstawiono na rys. 1.1. Potrzeba zastosowania półfabrykatu o średnicy większej ( $\phi 40$ ) niż średnica wykonywanego przedmiotu ( $\phi 36$ ) może wynikać z braku półfabrykatu o średnicy równej średnicy przedmiotu, konieczności zapewnienia większej dokładności przedmiotu lub mniejszej chropowatości jego powierzchni, a także z powodu gorszych właściwości warstwy materiału położonej bezpośrednio pod powierzchnią półfabrykatu, którą trzeba usunąć.



Rys. 1.1. Przykład wykonania wałka z pręta walcowanego metodą obróbki ubytkowej

Obróbkę ubytkową dzieli się, w zależności od charakteru procesów powodujących usuwanie nadatku obróbkowego, na obróbkę skrawaniem i obróbkę

erozyjną. Klasyfikację obróbki ubytkowej wg J. Kaczmarka [22] przedstawiono na rys. 1.2.



Rys. 1.2. Podział obróbki ubytkowej [22]

Obróbka skrawaniem charakteryzuje się tym, że w wyniku ruchu ostrzy względem przedmiotu obrabianego usuwane są kolejne warstwy nadkładu obróbkowego i zamieniane na wióry. Obróbka skrawaniem może być realizowana jako obróbka wiórowa oraz obróbka ścierna.

Obróbkę wiórową wykonuje się narzędziami o określonej liczbie ostrzy, o znanej geometrii tych ostrzy, a powstające wióry są stosunkowo duże i widoczne „gołym okiem”.

Obróbkę ścierną wykonuje się ostrzami bardzo drobnymi, przy czym nie jest ustalona ani liczba tych ostrzy ani ich geometria. Nadkład obróbkowy usuwany jest w postaci wiórów bardzo drobnych, niewidocznych nieuzbrojonym okiem, oraz w postaci drobin wrywanych siłami tarcia.

W procesie obróbki erozyjnej usuwanie nadkładu obróbkowego odbywa się w wyniku odrywania drobnych cząstek materiału w fazie stałej, roztwarzania elektrochemicznego, topienia lub parowania materiału. W zależności od procesów zachodzących podczas danej obróbki rozróżnia się obróbkę elektroerozyjną, elektrochemiczną i strumieniowo-erozyjną.

Usunięcie nadkładu obróbkowego w procesie obróbki skrawaniem wiąże się z określonymi ruchami narzędzia i przedmiotu obrabianego. W zależności od rodzaju tych ruchów, ich skojarzenia oraz kształtu, rozróżnia się sposoby obróbki skrawaniem. Przykładowo do sposobów obróbki wiórowej zalicza się toczenie, wiercenie, frezowanie, dłutowanie, a sposobami obróbki ścierną są, między innymi, szlifowanie, gładzenie, docieranie. Poszczególne sposoby obróbki dzieli się na odmiany, np. odmianami toczenia może być toczenie wzdłużne, poprzeczne, skośne.

W zależności od osiągniętej dokładności wymiarowo-kształtowej oraz chropowatości powierzchni obrabianego przedmiotu, rozróżnia się cztery rodzaje obróbki: zgrubną, średnio dokładną, dokładną i bardzo dokładną.

Obróbka elementów maszyn prowadzona jest zwykle w kilku fazach. Kolejne fazy określa się mianem obróbki wstępnej, kształtującej i wykończeniowej. Obróbka wstępna ma na celu usunięcie z obrabianego półfabrykatu warstwy uszkodzonej w procesie odlewania, kucia, wycinania palnikiem itp. Zadaniem obróbki kształtującej jest ukształtowanie obrabianego przedmiotu z pozostawieniem niewielkiego nadatku na obróbkę wykończeniową (tylko na tych powierzchniach, które obróbce wykończeniowej będą poddawane). Celem obróbki wykończeniowej jest nadanie przedmiotowi ostatecznego kształtu z zachowaniem wymagań odnośnie dokładności, struktury geometrycznej powierzchni oraz właściwości fizycznych warstwy wierzchniej.

Przyjmując jako kryterium podziału metodę kształtowania powierzchni obrabianej rozróżnia się obróbkę punktową, kształtową i obwiedniową. Zarys powierzchni obrabianej metodą punktową jest odwzorowaniem toru ruchu naroża ostrza traktowanego jako punkt. Kształt powierzchni obrabianej metodą kształtową powstaje w wyniku odwzorowania w materiale obrabianym zarysu krawędzi skrawającej narzędzia. Podczas obróbki obwiedniowej kształtowanie powierzchni obrabianej odbywa się w wyniku ruchu względnego przedmiotu i narzędzia, jako obwiednia kolejnych położeń krawędzi skrawających ostrza. Zatem kształt obrabianego przedmiotu zależy zarówno od zarysu krawędzi skrawającej jak i ruchów narzędzia i przedmiotu.

Przemieszczenie się pracującego narzędzia względem całej powierzchni obrabianej nazywane jest przejściem. W zależności od liczby przejść rozróżnia się obróbkę jedno- i wieloprzejściową.

Jeżeli po zakończeniu przejścia narzędzie wychodzi z materiału obrabianego to skrawanie takie nazywane jest przelotowym, natomiast, gdy po zakończeniu przejścia narzędzie ma kontakt z materiałem (nie ma wybiegu), to takie skrawanie nosi nazwę nieprzelotowego.

Skrawanie może być ciągłe, jeżeli w ciągu całego przejścia ostrze narzędzia utrzymuje kontakt z materiałem obrabianym, lub przerywane, gdy ostrza okresowo wgłębiają się w materiał obrabiany i z niego wychodzą.

Ze względu na stopień zmechanizowania i zautomatyzowania procesu obróbki rozróżnia się:

- obróbkę ręczną,
- obróbkę ręczną zmechanizowaną,

- obróbkę maszynową na obrabiarkach sterowanych przez człowieka,
- obróbkę maszynową na obrabiarkach sterowanych w sposób automatyczny według opracowanego programu.

Obróbka ręczna wykonywana jest za pomocą narzędzi trzymanyh przez pracownika w rękach i napędzanych siłą ludzkich mięśni. Do częściej stosowanych sposobów obróbki ręcznej należy zaliczyć: cięcie brzeszczotem, piłowanie, ścinanie i wycinanie, skrobanie, rozwiercanie i gwintowanie ręczne, docieranie ręczne. Narzędziami najczęściej stosowanymi w obróbce ręcznej są: piłki ręczne, nożyce ręczne lub dźwigniowe, pilniki, przecinaki, wycinaki, punktaki rysiki, a także wiertła, rozwiertaki, gwintowniki i narzynki ręczne. Obróbka ręczna znajduje ograniczone zastosowanie w produkcji jednostkowej, w pracach remontowych i montażowych.

Obróbka ręczna zmechanizowana charakteryzuje się tym, że część wykonywanych ruchów jest napędzana mechanicznie, a część – siłą ludzkich mięśni. Przykładem obróbki ręcznej zmechanizowanej jest wykonywanie otworu wiertarką trzymaną w rękach, podczas którego ruch obrotowy narzędzia (wiertła) jest napędzany silnikiem elektrycznym, a ruch wzdłuż osi wierconego otworu – siłą mięśni człowieka.

Obróbka maszynowa może być wykonywana na obrabiarkach, na których wszystkie ruchy robocze są napędzane przez jeden lub więcej silników, natomiast operator maszyny wykonuje takie czynności jak zamocowanie i odmocowanie przedmiotu obrabianego, wymiana narzędzi, włączanie i wyłączenie obrabiarki, ustawianie parametrów pracy maszyny, sprawdzanie wykonanych przedmiotów. Procesy obróbki maszynowej wykonuje się na obrabiarkach, nazywanych konwencjonalnymi, do których zalicza się tokarki, wiertarki, frezarki, szlifierki itp.

Bardziej zaawansowaną formą wykonywania przedmiotów jest obróbka maszynowa na obrabiarkach sterowanych w sposób automatyczny. Zakres automatyzacji obrabiarek może być różny, od sterowania, na przykład, przesuwami poszczególnych zespołów roboczych do całkowitego sterowania pracą obrabiarki według wcześniej opracowanego programu (maszyna może pracować bez operatora). Obecnie szeroko stosowane są obrabiarki wyposażone w komputerowe systemy sterowania (CNC).

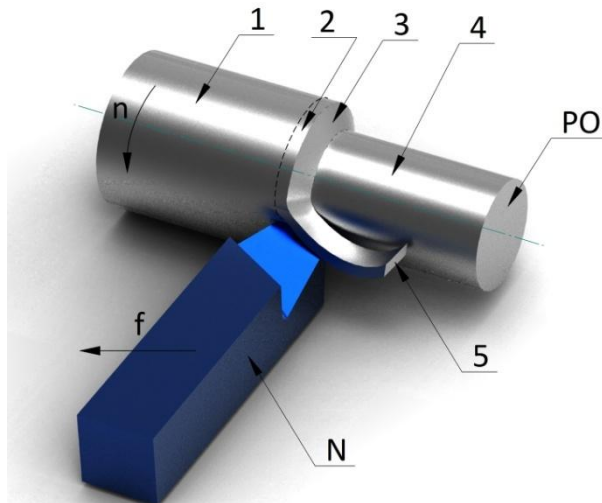


## 2. POJĘCIA PODSTAWOWE W OBRÓBCE SKRAWANIEM

### 2.1. Przedmiot obrabiany

Metodami obróbki ubytkowej wykonywane są przedmioty o różnym kształcie, np. wałki, tuleje, tarcze, korpusy, dźwignie itp., o różnej dokładności wymiarowo-kształtowej i chropowatości powierzchni. Wymiary gabarytowe wytwarzanych przedmiotów mogą zmieniać się w bardzo szerokich granicach, od kilku milimetrów (a nawet poniżej 1mm) do kilku metrów. Metodami obróbki ubytkowej mogą być wytwarzane przedmioty z różnych materiałów (metale i ich stopy, tworzywa polimerowe, kompozyty, drewno, a nawet materiały ceramiczne), w różnym stanie (wyżarzane, hartowane, przesycane itp.). Półfabrykatami mogą być wyroby walcowane, odlewy, odkuwki, pręty walcowane i ciągnięte itp. Obróbkę półfabrykatów (przedmiotów obrabianych) wykonuje się na obrabiarkach za pomocą narzędzi skrawających.

Na przedmiocie obrabianym wyróżnia się powierzchnię obrabianą 1, powierzchnię obrobioną 4 oraz powierzchnię przejściową 3 (rys. 2.1). Powierzchnia przejściowa, nazywana też powierzchnią skrawania, jest chwilową powierzchnią odwzorowywaną przez krawędź skrawającą narzędzia.



Rys. 2.1. Elementy przedmiotu obrabianego (PO) na przykładzie toczenia:  
1 – powierzchnia obrabiana, 2 – warstwa skrawana, 3 – powierzchnia przejściowa,  
4 – powierzchnia obrobiona, 5 – wiór, N – narzędzie

Warstwą skrawaną 2 nazywana jest ta część materiału obrabianego, która jest oddzielana przez ostrze narzędzia. Warstwa skrawana przekształca się w wiór 5, który jest produktem odpadowym procesu skrawania.

## 2.2. Kinematyka skrawania

W obróbce skrawaniem występują dwa ruchy, nadawane narzędziu lub przedmiotowi obrabianemu: główny i posuwowy.

Na skutek ruchu głównego ostrze narzędzia wnika w materiał obrabiany, powodując oddzielanie warstwy skrawanej, co warunkuje istnienie procesu skrawania. Ruch główny może być ruchem obrotowym lub posuwisto-zwrotnym. W przypadku, gdy ruch główny jest ruchem posuwisto-zwrotnym, to ruch powrotny jest zwykle ruchem jałowym, podczas którego nie następuje skrawanie materiału.

Ruch posuwowy warunkuje kontynuację procesu usuwania warstwy skrawanej, realizowany jest w sposób ciągły lub przerywany. Ruch ten może być prostoliniowy lub krzywoliniowy.

Ruch główny i ruch posuwowy zaliczane są do ruchów podstawowych. Oprócz ruchów podstawowych występują również ruchy pomocnicze, które są ruchami przygotowawczymi, niezbędnymi do przeprowadzenia obróbki (np. dosunięcie i odsunięcie narzędzia).

Przykłady kinematyki skrawania dla wybranych sposobów obróbki przedstawiono na rys. 2.2.

Prędkość ruchu głównego  $v_c$ , zwana też prędkością skrawania, w przypadku, gdy ruch ten jest ruchem obrotowym oblicza się z zależności:

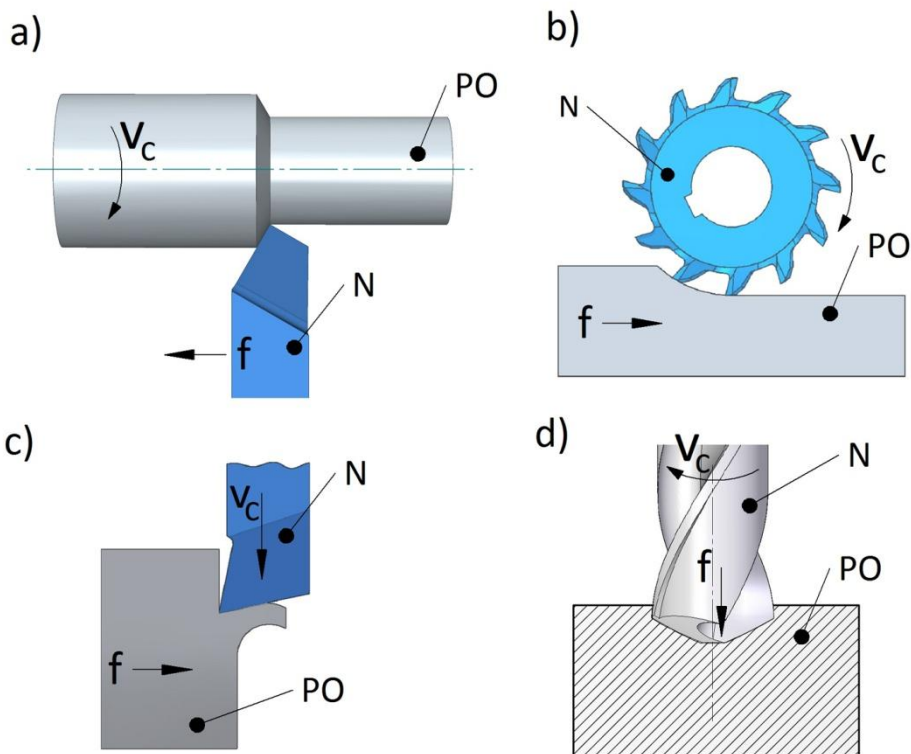
$$v_c = \frac{\pi D n}{1000} [m/min] \quad (2.1)$$

W powyższym wzorze  $D$ , wyrażone w mm, jest średnicą narzędzia, gdy narzędzie wykonuje ruch główny (np. wiercenie, frezowanie), lub przedmiotu obrabianego, gdy ruch ten wykonuje przedmiot, natomiast  $n$  [1/min] (stosuje się też zapisywanie prędkości obrotowej w obr/min) jest prędkością obrotową wrzeciona obrabiarki.

Prędkość skrawania  $v_c$  w przypadku, gdy ruch główny jest ruchem posuwisto-zwrotnym (np. dłutowanie), oblicza się ze wzoru:

$$v_c = \frac{s(1+m)l_s}{1000} \text{ [m/min]} \quad (2.2)$$

gdzie:  $s$  [1/min] – liczba podwójnych skoków narzędzia, gdy ruch główny wykonuje narzędzie, lub przedmiotu obrabianego, gdy przedmiot wykonuje ruch główny, w ciągu minuty (często  $s$  wyrażane jest jako  $2 \times \text{skok/min}$ ),  
 $l_s$  [mm] – całkowita długość skoku.



Rys. 2.2. Ruch główny  $v_c$  i posuwowy  $f$  podczas toczenia wzdłużnego (a), frezowania obwodowego (b), dłutowania (c), wiercenia (d)

Współczynnik  $m$  określany jest jako stosunek prędkości ruchu roboczego  $v_c$  do prędkości ruchu jałowego  $v_j$ :

$$m = \frac{v_c}{v_j} \quad (2.3)$$

W praktyce często prędkość ruchu jałowego jest równa prędkości ruchu roboczego, wówczas równanie (2.2) można zapisać:

$$v_c = \frac{sl_s}{500} \quad (2.4)$$

Prędkość ruchu posuwowego  $v_f$ , nazywana też posuwem minutowym i oznaczana  $f_t$ , dla tych sposobów obróbki, dla których ruch główny jest ruchem obrotowym, obliczana jest według zależności:

$$v_f = f_t = f_r n \left[ \frac{mm}{min} \right] \quad (2.5)$$

gdzie:  $f_r$  [mm] – posuw na obrót, wyrażający przemieszczenie narzędzia wzdłuż powierzchni obrobionej w czasie, gdy element wykonujący ruch główny (narzędzie lub przedmiot obrabiany) wykona jeden obrót.

Jeżeli ruch główny jest ruchem posuwisto-zwrotnym, to zależność na obliczanie posuwu minutowego jest następująca:

$$f_t = f_s s \left[ \frac{mm}{min} \right] \quad (2.6)$$

W powyższym wzorze  $f_s$  [mm] oznacza posuw przypadający na jeden podwójny skok zespołu obrabiarki realizującego ruch główny.

W czasie skrawania narzędziami wieloostrzowymi wyróżnia się posuw na ostrze  $f_z$ , rozumiany jako przemieszczenie narzędzia wzdłuż powierzchni obrobionej w czasie obrotu narzędzia o jedną podziałkę między ostrzami. Zatem można zapisać:

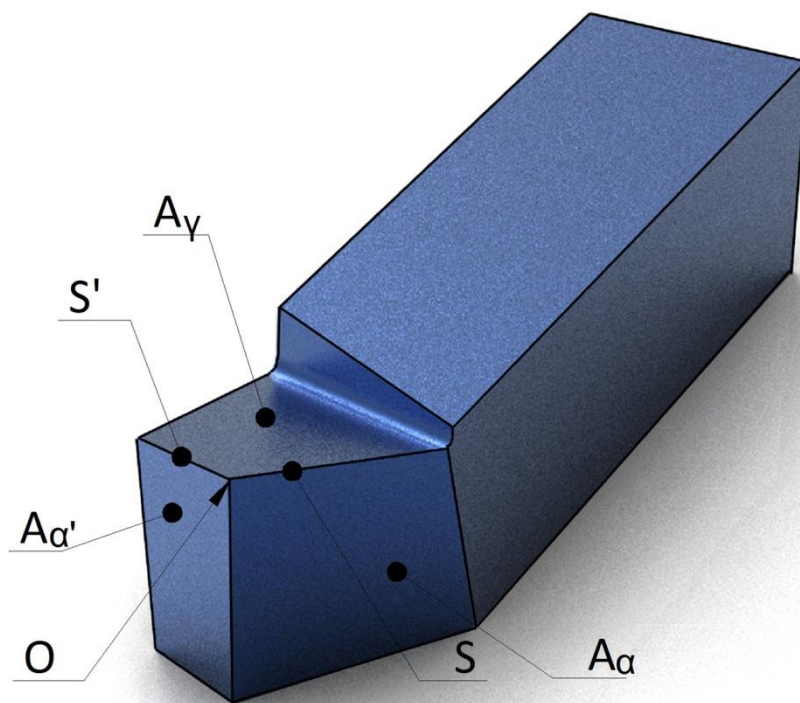
$$f_z = \frac{f_r}{z} [mm] \quad (2.7)$$

gdzie:  $z$  – liczba ostrzy narzędzia.

W zależności od sposobu, a niekiedy również odmiany, obróbki skrawaniem, zarówno ruch główny jak i posuwowy wykonuje narzędzie lub przedmiot obrabiany, albo obydwa te ruchy wykonuje narzędzie.

### 2.3. Ostrze narzędzia

Ostrze narzędzia ograniczone jest powierzchniami: natarcia, przyłożenia i pomocniczą przyłożenia. (rys. 2.3). Powierzchnia natarcia  $A_\gamma$  tym się charakteryzuje, że po niej spływają powstające w procesie skrawania wióry. Powierzchnia przyłożenia (główna)  $A_\alpha$  jest zwrócona do powierzchni przejściowej przedmiotu obrabianego (rys. 2.1), a pomocnicza powierzchnia przyłożenia  $A_{\alpha'}$  zwrócona jest do powierzchni obrobionej. Krawędź przecięcia powierzchni natarcia z powierzchnią przyłożenia nazywana jest krawędzią skrawającą główną  $S$ , a krawędź przecięcia powierzchni natarcia z pomocniczą powierzchnią przyłożenia nosi nazwę pomocniczej krawędzi skrawającej  $S'$ . Połączenie głównej i pomocniczej krawędzi skrawającej nazywane jest narożem.



Rys. 2.3. Elementy ostrza narzędzia na przykładzie noża tokarskiego:  $A_\gamma$  – powierzchnia natarcia,  $A_\alpha$  – powierzchnia przyłożenia (główna),  $A_{\alpha'}$  – pomocnicza powierzchnia przyłożenia,  $S$  – główna krawędź skrawająca,  $S'$  – pomocnicza krawędź skrawająca,  $O$  –naroże

Poszczególne powierzchnie i krawędzie ostrza mogą być położone pod różnymi kątami względem bazowych powierzchni narzędzia. Zbiór elementów geometrycznych wyznaczających kształt ostrza nazywany jest geometrią ostrza.

## **2.4. Układy odniesienia**

W celu jednoznacznego określenia poszczególnych powierzchni oraz krawędzi ostrza wprowadzone zostały układy odniesienia, stanowiące zespoły płaszczyzn przechodzących przez rozpatrywany punkt krawędzi skrawającej i ukierunkowanych według elementów bazowych narzędzia, krawędzi skrawających oraz kierunków ruchów występujących podczas skrawania.

W normie PN-ISO 3002-1+A1:1996 scharakteryzowano dwa układy odniesienia: narzędzia i roboczy [49].

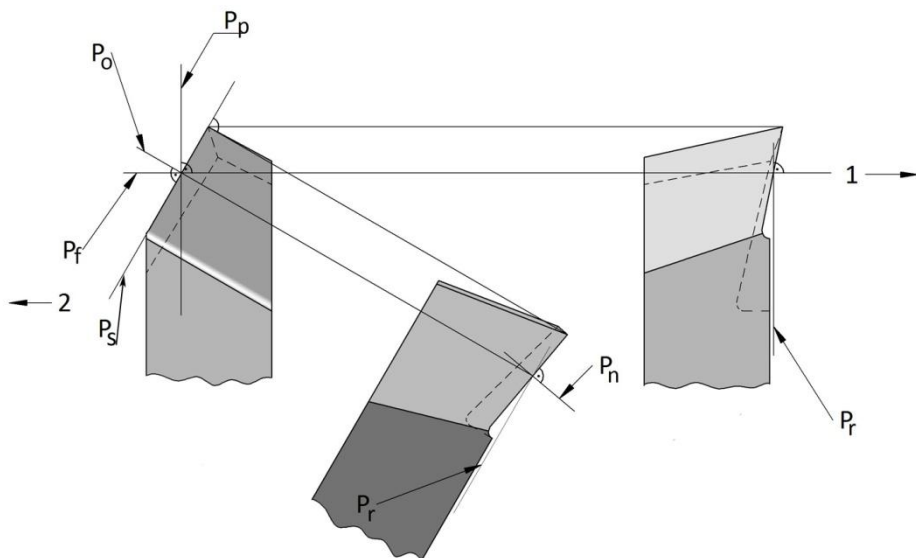
W układzie narzędzia ostrze traktowane jest jako bryła geometryczna stanowiąca całość z resztą narzędzia. W celu określenia położenia poszczególnych płaszczyzn uwzględniane są przewidywane kierunki ruchu głównego i posuwowego. Układ ten jest wykorzystywany podczas wytwarzania, ostrzenia i sprawdzania narzędzi.

W układzie roboczym określana jest geometria ostrza narzędzia w warunkach skrawania. Poszczególne płaszczyzny orientuje się uwzględniając wypadkową prędkość ruchu głównego i posuwowego.

Ponadto stosowany jest układ ustawienia, który umożliwia wyznaczenie geometrii ostrza narzędzia w odniesieniu do przedmiotu obrabianego. Układ ten jest stosowany w celu określenia wpływu zmian położenia narzędzia (przemieszczenie, skręcenie) względem przedmiotu obrabianego na geometrię ostrza.

## **2.5. Geometria ostrza w układzie narzędzia**

W celu jednoznacznego określenia geometrii ostrza zdefiniowano płaszczyzny odniesienia, które przechodzą przez rozpatrywany punkt położony na krawędzi skrawającej. Położenie płaszczyzn odniesienia w układzie narzędzia na przykładzie noża tokarskiego przedstawiono na rys. 2.4.



Rys. 2.4. Usytuowanie płaszczyzn odniesienia w układzie narzędzia na przykładzie noża tokarskiego: 1 – zamierzony kierunek ruchu głównego, 2 – zamierzony kierunek ruchu posuwowego

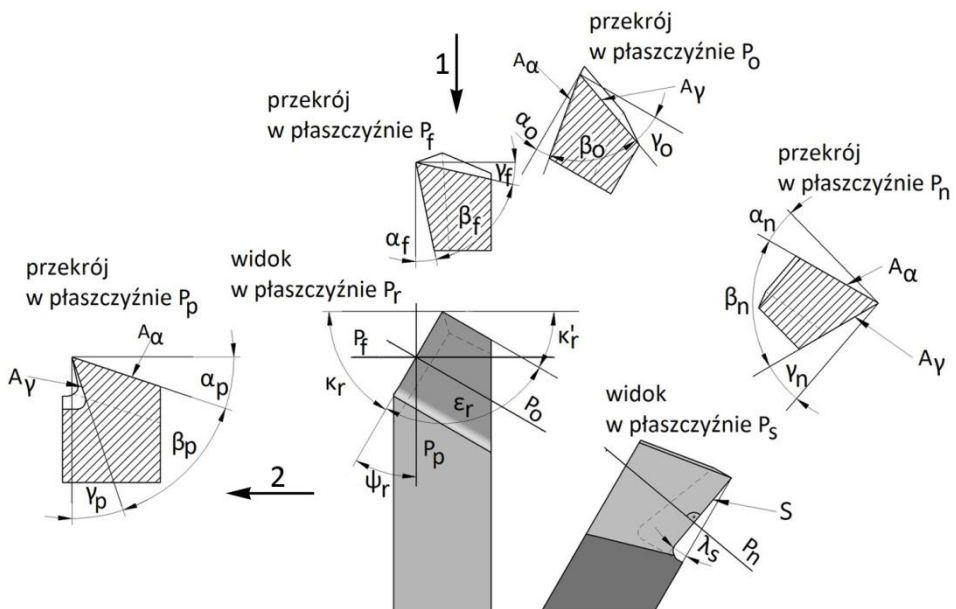
Poszczególne płaszczyzny definiowane są następująco (wszystkie płaszczyzny przechodzą przez rozpatrywany punkt krawędzi skrawającej):

1. Płaszczyzna podstawowa  $P_r$  jest równoległa lub prostopadła do płaszczyzny lub osi narzędzia, które stanowią element bazowy przy ustalaniu położenia narzędzia. Jest ona zwykle prostopadła do założonego kierunku ruchu głównego narzędzia.
2. Płaszczyzna krawędzi skrawającej  $P_s$  jest styczna do krawędzi skrawającej i prostopadła do płaszczyzny podstawowej  $P_r$ .
3. Płaszczyzna przekroju głównego (ortogonalna)  $P_o$  jest prostopadła do płaszczyzny podstawowej  $P_r$  i jednocześnie prostopadła do płaszczyzny krawędzi skrawającej  $P_s$ .
4. Płaszczyzna boczna  $P_f$  jest równoległa albo prostopadła do płaszczyzny lub osi narzędzia, stanowiących element bazowy przy ustalaniu narzędzia, i jednocześnie prostopadła do płaszczyzny podstawowej  $P_r$ . Z reguły jest równoległa do kierunku założonego kierunku ruchu posuwowego.
5. Płaszczyzna tylna  $P_p$  jest prostopadła do płaszczyzny podstawowej  $P_r$  i jednocześnie prostopadła do płaszczyzny bocznej  $P_f$ .
6. Płaszczyzna normalna  $P_n$  jest prostopadła do krawędzi skrawającej.

7. Płaszczyzna największego spadku powierzchni natarcia (ortogonalna powierzchni natarcia)  $P_g$  jest prostopadła do powierzchni natarcia  $A_\gamma$  i jednocześnie prostopadła do płaszczyzny podstawowej  $P_r$ .
8. Płaszczyzna największego spadku powierzchni przyłożenia (ortogonalna powierzchni przyłożenia)  $P_b$  jest prostopadła do powierzchni przyłożenia  $A_\alpha$  i jednocześnie prostopadła do płaszczyzny podstawowej  $P_r$ .

Jeżeli określana jest geometria ostrza w punkcie położonym na pomocniczej krawędzi skrawającej, to podane wyżej oznaczenia płaszczyzn uzupełniane są znacznikiem „prim”, np.  $P_r'$ ,  $P_o'$ ,  $P_s'$ .

Położenie poszczególnych krawędzi i powierzchni ostrza narzędzia określone jest za pomocą odpowiednich kątów. Kąty charakteryzujące ostrze narzędzia na przykładzie noża tokarskiego, którego krawędzie skrawające są prostoliniowe a powierzchnie natarcia i przyłożenia są płaszczyznami, przedstawiono na rys. 2.5.



Położenie krawędzi skrawającej określone jest za pomocą kątów: przystawienia, naroża, odchylenia krawędzi skrawającej oraz pochylenia krawędzi skrawającej. Kąty: przystawienia, naroża i odchylenia krawędzi skrawającej



mierzone są w płaszczyźnie podstawowej  $P_r$ , a kąt pochylenia krawędzi skrawającej – w płaszczyźnie krawędzi skrawającej  $P_s$ . Kąty te definiuje się w następujący sposób:

1. Kąt przystawienia  $\kappa_r$  jest zawarty między płaszczyzną krawędzi skrawającej  $P_s$  a płaszczyzną boczną  $P_f$ .
2. Kąt naroża  $\varepsilon_r$  jest zawarty między płaszczyzną krawędzi skrawającej  $P_s$  a płaszczyzną krawędzi skrawającej pomocniczej  $P_s'$ .
3. Kąt odchylenia krawędzi skrawającej  $\psi_r$  jest zawarty między płaszczyzną krawędzi skrawającej  $P_s$  a płaszczyzną tylną  $P_p$ . Kąt ten określany jest tylko dla krawędzi skrawającej głównej.
4. Kąt pochylenia krawędzi skrawającej  $\lambda_s$  zawarty jest między krawędzią skrawającą  $S$  a płaszczyzną podstawową  $P_r$ .

Położenie powierzchni natarcia określane jest za pomocą kąta natarcia  $\gamma$ , który zawarty jest między powierzchnią natarcia  $A_\gamma$  a płaszczyzną podstawową  $P_r$ . Kąt ten mierzony jest w płaszczyznach:  $P_o$ ,  $P_f$ ,  $P_p$ ,  $P_n$  oraz  $P_g$ .

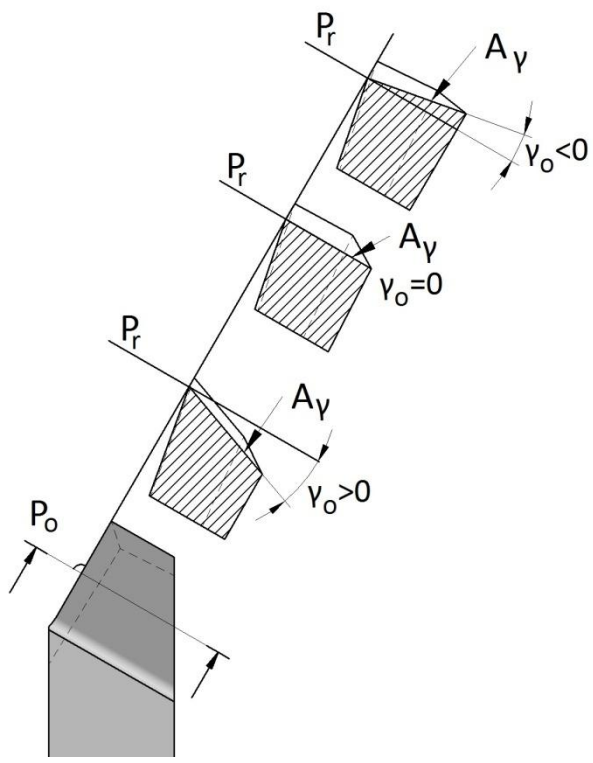
Położenie powierzchni przyłożenia określane jest za pomocą kąta przyłożenia  $\alpha$ , który zawarty jest między powierzchnią przyłożenia  $A_\alpha$  a płaszczyzną krawędzi skrawającej  $P_s$ . Kąt ten mierzony jest w płaszczyznach:  $P_o$ ,  $P_f$ ,  $P_p$ ,  $P_n$  oraz  $P_b$ .

Kąt ostrza  $\beta$ , zawarty powierzchnią natarcia  $A_\gamma$  a powierzchnią przyłożenia  $A_\alpha$ , mierzony jest w płaszczyznach:  $P_o$ ,  $P_f$ ,  $P_p$  oraz  $P_n$ .

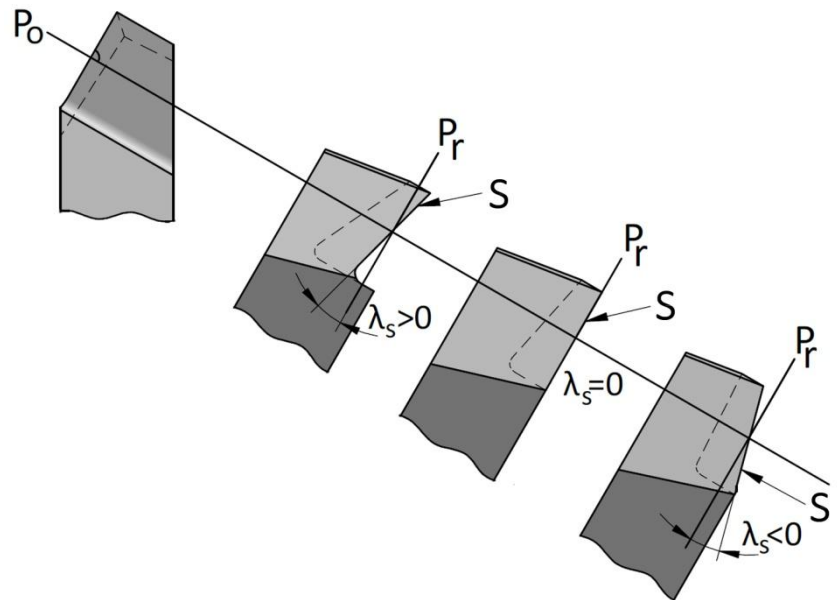
Zdefiniowane kąty (w większości) są kątami dwuściennymi, zawartymi między płaszczyznami określającymi dany kąt. Kąty płaskie mierzone w poszczególnych płaszczyznach odniesienia zawarte są między krawędziami przecięcia tych płaszczyzn z płaszczyznami definiującymi dany kąt.

Indeksy przy literach greckich, oznaczających poszczególne kąty, odpowiadają indeksom płaszczyzn, w których mierzone są te kąty, np. kąt natarcia w płaszczyźnie ortogonalnej  $P_o$  oznaczany jest  $\gamma_o$ . Kąty związane z pomocniczą krawędzią skrawającą oznacza się dodatkowo znacznikiem „prim”, np. kąt pochylenia pomocniczej krawędzi skrawającej -  $\lambda_s'$ .

Kąty natarcia oraz pochylenia krawędzi skrawającej mogą być dodatnie, ujemne bądź równe zero (rys. 2.6 i 2.7).



Rys.2.6. Konwencja znaków kątów natarcia



2.7. Konwencja znaków kątów pochylenia krawędzi skrawającej

Ostrze narzędzia, którego geometrię przedstawiono na rys. 2.5, charakteryzuje się tym, że jego krawędzie są prostoliniowe, narożem jest punkt, a poszczególne powierzchnie robocze są płaszczyznami. Obecnie wytwarzane narzędzia mają budowę bardziej złożoną, a do podstawowych modyfikacji ich kształtu należy zaliczyć:

- stosowanie naroża zaokrąglonego promieniem  $r_\epsilon$  lub ściętego,
- sfazowanie od strony powierzchni natarcia i przyłożenia,
- ukształtowanie na powierzchni natarcia rowka spełniającego funkcję łamacza lub zwijacza wióra.

Łamacze wiórów, ukształtowane na powierzchni natarcia obecnie stosowanych płytek wieloostrowych, mają bardzo skomplikowaną budowę, ustaloną na podstawie komputerowej symulacji łamania i zwijania wiórów. Kształty niektórych płytek wieloostrowych pokazano na rys. 2.8.



Rys. 2.8. Płytki wieloostrowe

Na rynku dostępny jest bardzo szeroki wybór płytek wieloostrowych różniących się kształtem, wymiarami, sposobem mocowania, składem chemicznym, rodzajem powłoki przeciwzużyciowej.

## 2.6. Technologiczne parametry skrawania

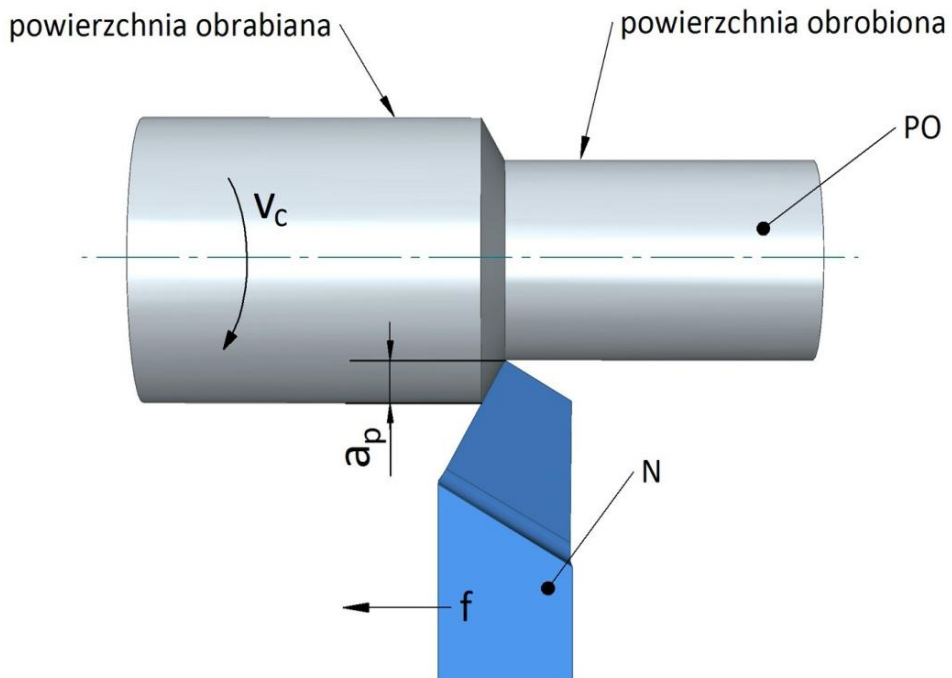
Do technologicznych parametrów skrawania zalicza się prędkość ruchu głównego (prędkość skrawania)  $v_c$ , prędkość ruchu posuwowego  $v_f$  oraz głębo-

kość skrawania  $a_p$ . Parametrem wyrażającym wartość ruchu posuwowego jest też posuw na obrót i posuw na ostrze. Parametry związane z ruchem głównym i ruchem posuwowym zostały opisane w podrozdziale 2.2.

Głębokość skrawania  $a_p$  definiowana jest jako odległość powierzchni obrabianej od powierzchni obrabianej. Przykładowo, głębokość skrawania podczas toczenia wzdłużnego można obliczyć z zależności (rys. 2.9):

$$a_p = \frac{D-d}{2} \quad (2.8)$$

gdzie:  $D$  – średnica przedmiotu obrabianego przed obróbką skrawaniem,  
 $d$  – średnica przedmiotu obrabianego po obróbce skrawaniem.

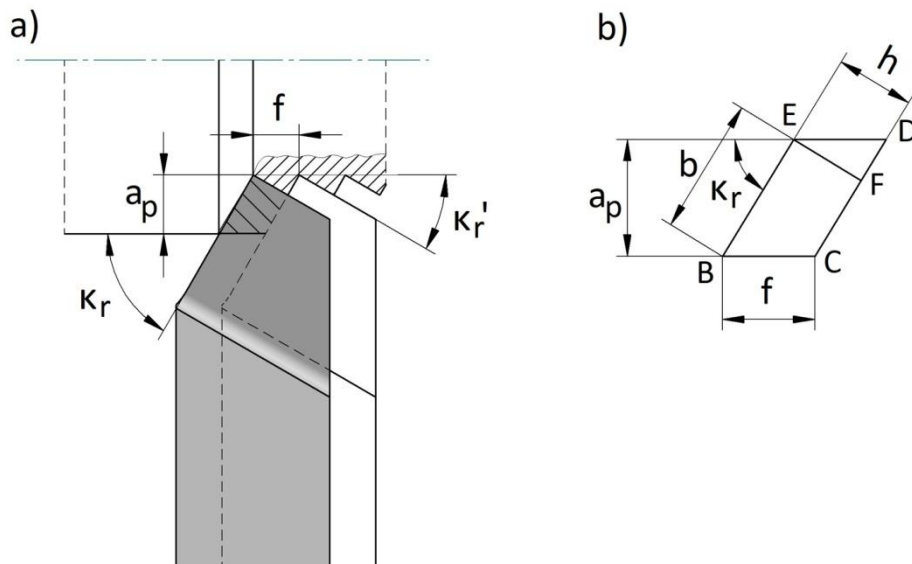


Rys. 2.9. Parametry technologiczne skrawania w procesie toczenia wzdłużnego

Parametry technologiczne skrawania mają duży wpływ na przebieg i efekty obróbki skrawaniem, ich wartość często jest optymalizowana ze względu na określone kryterium.

## 2.7. Warstwa skrawana

Warstwą skrawaną nazywana jest część materiału obrabianego ograniczona powierzchnią obrabianą, powierzchnią obrobioną oraz dwoma kolejnymi położeniami powierzchni przejściowej (rys. 2.10a).



Rys. 2.10. Geometryczne elementy warstwy skrawanej dla naroża ostrego ( $r_\epsilon=0$ )

Nominalne pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej  $A_D$  jest równe polu równoległoboku BCDE (rys. 2.10b), co można zapisać:

$$A_D = hb = a_p f \quad (2.9)$$

gdzie:  $h$  – grubość warstwy skrawanej,  
 $b$  – szerokość warstwy skrawanej,  
 $a_p$  – głębokość skrawania,  
 $f$  – posuw.

Z rys. 2.10b wynikają zależności między parametrami geometrycznymi warstwy skrawanej ( $h$ ,  $b$ ) a parametrami technologicznymi skrawania ( $a_p$ ,  $f$ ):

$$h = f \sin \kappa_r \quad (2.10)$$

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad (2.11)$$

gdzie:  $\kappa_r$  – kąt przystawienia.

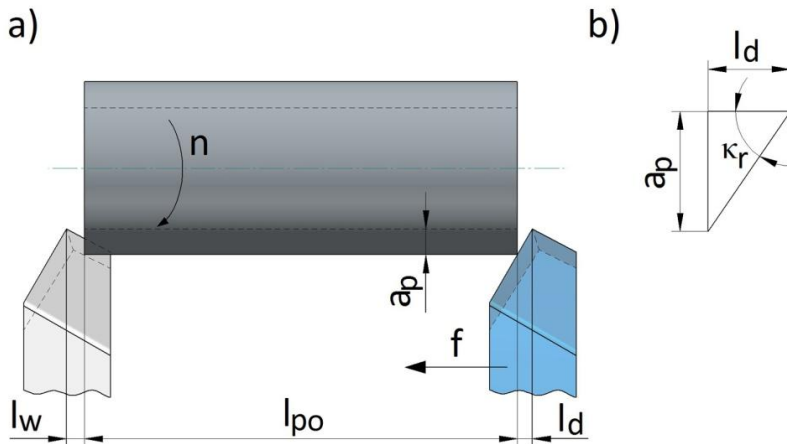
Rzeczywiste pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej jest w stosunku do pola nominalnego  $A_D$  pomniejszone o pole resztowe, równe polu trójkąta DEF (rys. 2.10b). Pole resztowe stanowi nieusuniętą część warstwy skrawanej na skutek występowania kąta przystawienia pomocniczej krawędzi skrawającej  $\kappa_r'$  (pomocnicza krawędź skrawająca nie jest równoległa do kierunku ruchu posuwowego).

## 2.8. Czas maszynowy i wydajność skrawania

Czas maszynowy  $t_m$  odpowiada czasowi trwania ruchu posuwowego i jest obliczany według zależności:

$$t_m = \frac{l_p}{v_f} i, \text{ min}, \quad (2.12)$$

gdzie:  $l_p$ , mm, – długość przejścia,  
 $v_f$ , mm/min, – prędkość ruchu posuwowego,  
 $i$  – liczba przejść.



Rys. 2.11. Rysunek pomocniczy do obliczania czasu maszynowego

Długość przejścia  $l_p$  jest sumą długości przedmiotu obrabianego  $l_{PO}$ , dobiegu narzędzia  $l_d$  i wybiegu narzędzia  $l_w$  (rys. 2.11a):

$$l_p = l_d + l_{PO} + l_w, \text{ mm}, \quad (2.13)$$

Dobieg narzędzia w przypadku toczenia zależy od głębokości skrawania  $a_p$  i kąta przystawienia  $\kappa_r$  (rys. 11b):

$$l_d = \frac{a_p}{\text{ctg } \kappa_r}, \text{ mm}, \quad (2.14)$$

Jeżeli we wzorze (2.12) pominięty zostanie czas związany z dobiegiem i wybiegiem narzędzia, to otrzymuje się czas skrawania:

$$t_s = \frac{l_{PO}}{v_f} i, \text{ min}, \quad (2.15)$$

Objętość materiału usuniętą w jednostce czasu nazywa się wydajnością objętościową skrawania  $Q_V$ , a pole powierzchni obrobionej w jednostce czasu nazywane jest wydajnością powierzchniową skrawania  $Q_A$ :

$$Q_V = 1000 a_p f v_c, \text{ mm}^3/\text{min}, \quad (2.16)$$

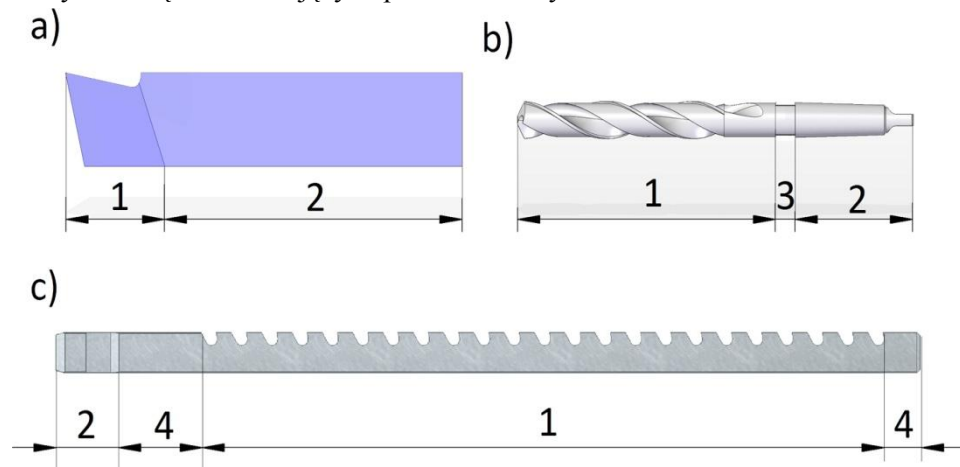
$$Q_A = 1000 f v_c, \text{ mm}^2/\text{min}, \quad (2.17)$$

W powyższych wzorach  $a_p$  (mm) oznacza głębokość skrawania,  $f$  (mm) – posuw,  $v_c$  (m/min) – prędkość skrawania.

## 3. BUDOWA NARZĘDZI SKRAWAJĄCYCH

### 3.1. Elementy narzędzi

Do podstawowych elementów narzędzia skrawającego zalicza się część roboczą, związaną z bezpośrednim wykonywaniem pracy skrawania, oraz część chwytową, służącą do ustalenia i zamocowania narzędzia. W niektórych narzędziach wyróżnia się ponadto część łączącą oraz część prowadzącą. Budowę wybranych narzędzi skrawających pokazano na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Elementy składowe narzędzi skrawających: a) noża tokarskiego, b) wiertła krętego, c) przeciągacza do rowków (1 – część robocza, 2 – część chwytowa, 3 – część łącząca, 4 – część prowadząca)

Narzędzia pracujące jednym ostrzem nazywane są jednoostrzowymi, natomiast narzędzia skrawające więcej niż jednym ostrzem (od dwóch do kilkudziesięciu) – wieloostrzowymi. Przykładem narzędzia jednoostrzowego jest nóż tokarski, a wieloostrzowych – wiertło i przeciągacz.

### 3.2. Klasyfikacja narzędzi

Klasyfikacja narzędzi skrawających może być dokonana w oparciu o różne kryteria. W wielu przypadkach podział narzędzi jest związany z podziałem obróbki ubytkowej, przedstawionym w rozdziale 1.



Poszczególnym sposobom obróbki skrawaniem odpowiadają narzędzia, np. do toczenia są noże tokarskie, do wiercenia – wiertła, do rozwiercania – rozwiertaki, do frezowania – frezy.

Inny podział narzędzi związany jest z realizowaną nimi fazą obróbki. Przykładem mogą być rozwiertaki zdzieraki, które stosowane są do rozwiercania wstępnego oraz rozwiertaki wykańczaki – do rozwiercania wykończeniowego.

Podziałowi obróbki ze względu na metodę kształtowania odpowiada podział narzędzi na punktowe, kształtowe i obwiedniowe.

Różne narzędzia stosuje się w zależności od stopnia zmechanizowania i zautomatyzowania procesu obróbki. Do obróbki ręcznej stosowane są takie narzędzia jak pilniki, przecinaki, wycinaki, skrobaki, a także piłki, gwintowniki i narzynyki ręczne. Obróbka maszynowa prowadzona jest za pomocą takich narzędzi jak noże tokarskie i dłutownicze, wiertła, pogłębiacze, frezy, przeciągacze, gwintowniki i narzynyki maszynowe. Narzędzia do obróbki maszynowej na obrabiarkach sterowanych numerycznie przystosowane są do automatycznej wymiany po zakończeniu pracy tym narzędziem przy obróbce danego przedmiotu lub po stopieniu jego ostrza.

Ze względu na sposób zamocowania, rozróżnia się narzędzia trzpieniowe i nasadzone. Część chwytowa narzędzi trzpieniowych (np. w kształcie walca lub stożka ściętego) stanowi jedną całość z częścią roboczą. W narzędziach nasadzanych rolę części chwytowej pełnią otwory osadcze.

Kolejny podział wiąże się z zakresem stosowania narzędzi. Narzędzia stosowane do obróbki różnych przedmiotów nazywane są narzędziami ogólnego przeznaczenia (np. noże do toczenia wzdłużnego, frezy do płaszczyzn). Inaczej narzędzia te określane są jako normowe lub handlowe. Drugą grupę stanowią narzędzia specjalne, które stosowane są tylko do obróbki określonych powierzchni (np. noże kształtowe, przeciągacze). Narzędzia te wykonywane są na specjalne zamówienie, najczęściej do obróbki konkretnych przedmiotów. Koszt wykonania narzędzi specjalnych jest znacznie wyższy niż handlowych, dlatego też ich stosowanie powinno być ekonomicznie uzasadnione.

W zależności od konstrukcji, narzędzia dzieli się na:

- 1) jednolite – całe narzędzie wykonane jest z jednego materiału,
- 2) łączone w sposób trwały – poszczególne elementy łączone poprzez zgrzewanie, twarde lutowanie lub klejenie,
- 3) składane – poszczególne elementy łączone w sposób rozłączny.

### **3.3. Materiały narzędziowe**

#### **3.3.1. Właściwości i podział materiałów narzędziowych**

Pojęcie „materiały narzędziowe” obejmuje materiały, z których wykonuje się część roboczą narzędzi skrawających.

Ze względu na warunki, w jakich pracują ostrza narzędzi skrawających, materiały narzędziowe powinny charakteryzować się następującymi właściwościami:

- dużą twardością (twardość ostrza w temperaturze, do jakiej nagrzewa się podczas skrawania, powinna być co najmniej o 20 HRC większa od twardości materiału obrabianego),
- dużą odpornością na zużycie ścierne, adhezyjne i dyfuzyjne,
- dużą wytrzymałością zmęczeniową i udarnośćią,
- zdolnością do zachowania swoich cech w podwyższonej temperaturze,
- dobrą przewodnością cieplną,
- małym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej.

Stosowane materiały narzędziowe charakteryzuje znaczne zróżnicowanie ich właściwości. Zastosowanie poszczególnych materiałów związane jest z obrabianym przedmiotem, sposobem i rodzajem obróbki, mocą i stanem technicznym obrabiarki. Ważne są też względy ekonomiczne, gdyż cena materiałów „lepszyc” jest na ogół znacznie wyższa.

Materiały narzędziowe można podzielić na następujące grupy:

- stale narzędziowe niestopowe i stopowe do pracy na zimno,
- stale szybko tnące,
- węgliki spiekane,
- cermetale,
- spieki ceramiczne,
- materiały supertwarde.

#### **3.3.2. Stale narzędziowe niestopowe i stopowe do pracy na zimno**

Zawartość węgla w stalach narzędziowych niestopowych waha się w granicach od 0,5% do 1,4%. Stale te zawierają też niewielkie ilości domieszek manganu, krzemu, chromu, niklu i miedzi. Znak tych stali składa się z litery C, licz-

by wyrażającej średnią zawartość węgla w setnych procenta oraz litery U, np. C70U, C90U, C105U.

Twardość stali narzędziowych niestopowych po zahartowaniu jest dość duża i wynosi 54÷62 HRC (twardość zwiększa się ze wzrostem zawartości węgla). Wadą tych stali jest spadek ich twardości w temperaturze około 200°C oraz konieczność chłodzenia w wodzie podczas hartowania, co może prowadzić do powstawania pęknięć hartowniczych.

Stale narzędziowe stopowe do pracy na zimno zawierają od 0,4% do 2,1% węgla oraz składniki stopowe, takie jak chrom, wolfram, wanad, molibden, nikiel. Zawartość składników stopowych, w zależności od gatunku stali, waha się w granicach od kilku dziesiątych do kilkunastu procent. W oznaczeniu tych stali podaje się liczbę wyrażającą zawartość węgla w setnych częściach procenta, symbole chemiczne pierwiastków stopowych i liczby podające średnią zawartość procentową głównych składników stopowych pomnożone przez odpowiednie współczynniki, np. 105V, 102Cr6, 35CrMo7. W znakach stali wysokostopowych na początku występuje litera X, np. X210CrW12, X40Cr14.

Stale narzędziowe stopowe do pracy na zimno charakteryzują się właściwościami nieco lepszymi w porównaniu ze stalami narzędziowymi niestopowymi. Jednakże spadek twardości już w temperaturze około 300°C poważnie ogranicza zastosowanie tych stali do wytwarzania narzędzi skrawających.

Ze stali narzędziowych, zarówno niestopowych jak i stopowych do pracy na zimno, wytwarzane są głównie narzędzia do ręcznej obróbki metali oraz narzędzia do obróbki drewna. Stale narzędziowe stopowe do pracy na zimno znajdują ponadto szerokie zastosowanie w budowie narzędzi pomiarowych, przyrządów obróbkowych oraz narzędzi do obróbki plastycznej.

### **3.3.3. Stale szybko tnące**

Nazwa „stale szybko tnące” związana jest z tym, że zastosowanie narzędzi z tej stali umożliwiło kilkakrotne zwiększenie prędkości skrawania w stosunku do narzędzi ze stali narzędziowych niestopowych i stopowych do pracy na zimno. Stale szybko tnące mogą być wytwarzane klasycznymi metodami metalurgicznymi oraz na drodze metalurgii proszków.

Stale szybko tnące po odlaniu wlewka poddawane są kuciu lub walcowaniu na gorąco w celu likwidacji siatki węglików stopowych. Stale te mogą zawierać 0,75%÷1,45% węgla i do 25% (łącznie) składników stopowych: chromu, wolframu, molibdenu, wanadu i kobaltu. Na świecie wytwarza się ponad 100 gatun-

ków stali szybko tnącej [28]. Znak tych stali składa się z liter HS oraz liczb, rozdzielonych kreskami, wyrażających średnią procentową zawartość pierwiastków stopowych w następującej kolejności: wolfram, molibden, wanad, kobalt. Wyróżnia się stale szybko tnące bezkobaltowe, np. HS1-4-2, HS6-5-2 oraz kobaltowe, np. HS6-5-2-5.

Jakość narzędzi ze stali szybko tnącej w bardzo dużym stopniu zależy od prawidłowo przeprowadzonej obróbki cieplnej. Po hartowaniu otrzymywana jest struktura martenzytyczna z częściowo nierozpuszczonymi węglnikami. Niektóre węglniki rozpuszczają się w austenicie w bardzo wysokiej temperaturze (bliskiej linii solidus). Przekroczenie tej temperatury może prowadzić do nadtopienia hartowanych narzędzi [26]. Po hartowaniu stosuje się zwykle kilkakrotne odpuszczanie w celu przeprowadzenia austenitu szczątkowego w martenzyt i zmniejszenia kruchości. Twardość stali szybko tnących po hartowaniu i odpuszczaniu wynosi 62–66 HRC. Stale te mogą pracować w temperaturze 550–600°C, są bardziej odporne na ścieranie w porównaniu ze stalami narzędziowymi niestopowymi i stopowymi do pracy na zimno. Dzięki możliwości hartowania w ośrodkach wolno odprowadzających ciepło (olej, sprężone powietrze) są mniej narażone na pęknięcia hartownicze.

Lepsze właściwości, w stosunku do stali szybko tnących wytwarzanych metodami konwencjonalnymi, wykazują stale szybko tnące otrzymywane metodą metalurgii proszków. Spiekane stale szybko tnące charakteryzują się, w porównaniu ze stalami konwencjonalnymi, bardziej jednorodną strukturą, większą twardością przy porównywalnej ciągliwości, większą odpornością na ścieranie. Lepsze właściwości stali szybko tnących spiekanych uwidaczniają się szczególnie podczas obróbki materiałów trudnoskrawalnych ze zwiększoną prędkością skrawania.

Wzrost trwałości ostrza narzędzi ze stali szybko tnących można uzyskać podając te narzędzia obróbce cieplno-chemicznej. Zastosowanie takich obróbek jak azotowanie, tlenoazotowanie, węgloazotowanie oraz siarkowęgloazotowanie powoduje zwiększenie trwałości ostrza w granicach od kilkudziesięciu do około czterystu procent [28].

Znacznie lepsze efekty można uzyskać w wyniku pokrywania narzędzi ze stali szybko tnącej azotkiem tytanu. Stosuje się metodę fizycznego osadzania z fazy gazowej – PVD (Physical Vapour Deposition). Proces prowadzony jest w stosunkowo niskiej temperaturze, nie przekraczającej 500°C, dzięki czemu nie następują zmiany struktury materiału narzędzia i zachowana jest jego dokładność wymiarowo-kształtowa. W wyniku obróbki powierzchnie robocze narzędzi

pokrywane są warstwą TiN o grubości nie przekraczającej 10  $\mu\text{m}$  i twardości około 2500 HV [21]. Zastosowanie PVD powoduje kilkakrotny wzrost trwałości ostrza oraz zmniejszenie oporów skrawania o 10%÷20% i wyraźny spadek ich dynamiki [28]. Wizualnie narzędzia pokryte TiN można rozpoznać po charakterystycznym złotym kolorze.

Poprawę właściwości eksploatacyjnych narzędzi ze stali szybkoobrotowych uzyskuje się także w wyniku zastosowania powłok wieloskładnikowych typu (Ti,Al)N, Ti(C,N), (Ti,Zr)N [47]. Stosowanie powłok zapewnia wzrost trwałości ostrza również narzędzi ze stali szybkoobrotowej spiekanej.

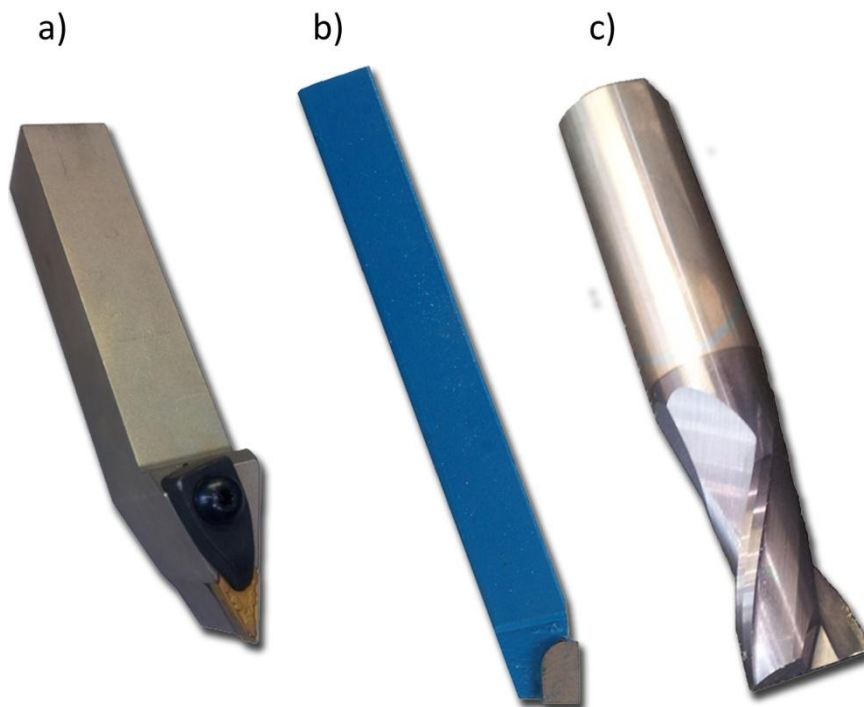
Stale szybkoobrotowe szeroko stosuje się do wytwarzania narzędzi skrawających stosowanych w obróbce maszynowej. Stale te mają zastosowanie do wytwarzania takich narzędzi jak wiertła, rozwiertaki, frezy, noże dłutownicze. Ze stali tych wytwarza się większość narzędzi specjalnych, takich jak noże kształtowe i przeciągacze.

Stal szybkoobrotowa jest znacznie droższa od pozostałych stali narzędziowych. W celu zmniejszenia kosztów narzędzia, ze stali szybkoobrotowej wykonuje się tylko część roboczą, a część chwytną wykonywana jest ze znacznie tańszych stali niestopowych do ulepszenia cieplnego (np. C45 lub C55).

### 3.3.4. Węgliki spiekane

Węgliki spiekane są materiałem bardzo szeroko stosowanym do wytwarzania części roboczej narzędzi skrawających. Najczęściej z węglików wykonywane są płytki wielostrzowe, mocowane mechanicznie w gniazdach korpusów narzędzi (rys. 3.2a). Po stąpieniu krawędzi skrawającej następuje zmiana położenia płytki w taki sposób, aby umożliwić skrawanie następną krawędzią. Rzadziej używa się płytek jednoostrzowych, trwale łączonych z korpusem narzędzia poprzez twarde lutowanie lub, rzadziej, klejenie (rys. 3.2b). Narzędzia o małych wymiarach mogą być w całości wykonywane z węglików spiekanych (rys. 3.2c).

Tak duże znaczenie węglików spiekanych w budowie narzędzi związane jest z ich właściwościami. Węgliki spiekane są dużo twardsze od stali narzędziowych (twardość węglików wynosi 1200–1650 HV), przy czym spadek twardości wraz ze wzrostem temperatury nie jest zbyt duży, dzięki czemu zachowują właściwości skrawane do temperatury około 900°C. W porównaniu ze stalą szybkoobrotową są nie tylko znacznie twardsze, ale także bardziej odporne na zużycie ścierne. Mają jednak mniejszą wytrzymałość na zginanie, ciągliwość oraz odporność na zmęczenie cieplne.



Rys. 3.2. Przykłady narzędzi z ostrzami z węglików spiekanych: a) nóż tokarski składany, b) nóż tokarski z płytką mocowaną w sposób trwały, c) frez trzpieniowy jednolity

W zależności od zastosowania, rozróżnia się trzy grupy węglików spiekanych, oznaczanych według normy ISO 513 literami P, M i K (oznaczenia według PN-81/H-89500 – odpowiednio: S, U i H).

Węglik wolframowo-tytanowy grupy P, w których skład wchodzi węgliki: WC, TiC, TaC i NbC oraz kobalt (Co), stosowane są głównie do obróbki stali, staliwa, żeliwa ciągliwego. Węglik grupy M, które również są węglkami wolframowo-tytanowymi, zalecane są do skrawania materiałów trudnoobrabialnych, jak stal nierdzewna austenityczna, stal żarowytrzymała. Natomiast zaliczane do grupy K węgliki wolframowe, składające się z węgliku wolframu i kobaltu (niektóre gatunki zawierają niewielkie ilości węgliku tantalum i niobu), stosowane są do skrawania żeliwa, stali hartowanej, stopów aluminium, stopów aluminowo-krzemowych, stopów tytanu, tworzyw polimerowych, kompozytów, ceramiki, twardej gumy.

Poszczególne gatunki węglików spiekanych oznaczane są symbolami literowo-cyfrowymi, przy czym litera informuje o przynależności do określonej grupy zastosowań, natomiast liczba związana jest ze składem chemicznym i właściwościami danego gatunku, np. P10, P20, P30, P40, K10, K20, K30. Ze wzrostem wartości liczb występujących w oznaczeniach poszczególnych gatunków węglików zwiększa się udział procentowy kobaltu w składzie chemicznym tych gatunków. Wzrost zawartości kobaltu powoduje zmniejszenie twardości i odporności na zużycie ściernie oraz zwiększenie wytrzymałości na zginanie i ciągliwości. Zatem węgliki oznaczane mniejszymi liczbami (np. P10, K10) powinno się stosować do obróbki z dużą prędkością skrawania, a gatunki oznaczane większymi liczbami – do skrawania z dużym posuwem i głębokością skrawania.

Poprawę właściwości skrawnych płytek z węglików spiekanych można uzyskać poprzez wprowadzenie twardych powłok przeciwzużyciowych. Skład chemiczny węglików spiekanych przeznaczonych do nanoszenia powłok jest inny niż skład węglików klasycznych. W osnowie kobaltowej stężenie wolframu powinno być niewielkie (<3%), a ilość TiC w granicach (0÷5)%, aby zapewnić dobrą ciągliwość [28]. Najważniejszą technologią pokrywania płytek z węglików jest metoda CVD (Chemical Vapour Deposition), która polega na chemicznym osadzeniu składników powłok z fazy gazowej. Proces ten przebiega w temperaturze około 1000°C. Płytki pokrywane są kilkumikrometrowymi warstwami TiC, TiN, TiC-Ti(CN)-TiN, TiC-Ti(CN)-TiN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i Al-O-N w różnym zestawieniu [28]. Coraz częściej w charakterze materiałów na powłoki przeciwzużyciowe na ostrza narzędzi skrawających, zwłaszcza do obróbki materiałów trudnoobrabialnych (np. kompozytów), stosowany jest diament oraz azotek boru. Twardość powłok z diamentu polikrystalicznego może osiągać twardość nawet 10000  $\mu$ HV, a z azotku boru – 5000  $\mu$ HV [25].

Płytki z węglików spiekanych pokrywane wielowarstwowo oznaczane są symbolem literowo-cyfrowym rozpoczynającym się od liter NT. Płytki z powłokami charakteryzują się znacznie szerszym zakresem zastosowań w porównaniu z płytkami klasycznymi. Przesądzają o tym korzyści, jakie można osiągnąć stosując narzędzia z powłokami, do których trzeba zaliczyć: zmniejszenie zużycia ostrza, zmniejszenie współczynnika tarcia, zwiększenie twardości warstwy wierzchniej ostrza narzędzia, stworzenie bariery dla wnikania ciepła, zmniejszenie sił skrawania, obniżenie temperatury skrawania, ułatwienie transportu wiórów w rowkach wiórowych, zwiększenie prędkości skrawania, ułatwienie wizualnej oceny stanu zużycia ostrza, gdy powłoka ma inny kolor od podłoża,

zmniejszenie chropowatości powierzchni obrabianej, zwiększenie dokładności wymiarowo-kształtowej obrabianego przedmiotu [5, 25].

### 3.3.5. Cermetale

Materiałem przejściowym od węglików wolframowych do spieków ceramicznych są cermetale, w skład których wchodzi komponenty ceramiczne (np. TiC, TiN, Mo<sub>2</sub>C, WC, (Ta,Nb)C, (Ti,Ta)N) oraz metale wiążące (np. Ni, Co). Do zalet cermetali można zaliczyć dużą twardość, znaczną odporność na zużycie oraz małą skłonność do szpiefi adhezyjnych, co korzystnie wpływa na jakość obrabianej powierzchni.

Mała przewodność cieplna cermetali (około 4-krotnie mniejsza niż węglików spiekanych) powoduje, że więcej ciepła przejmują wióry, a tym samym mniej ciepła przejmuje narzędzie [11].

Narzędzia z ostrzami cermetalowymi zalecane są do obróbki z dużą prędkością skrawania, ale przy małym przekroju warstwy skrawanej [28].

### 3.3.6. Spieki ceramiczne

W zależności od budowy i składu chemicznego spieki ceramiczne można podzielić na:

- ceramikę tlenkową,
- ceramikę tlenkowo-węglkową,
- ceramikę azotkową,
- ceramikę zbrojoną.

Podstawowym składnikiem ceramiki tlenkowej, nazywanej też ceramiką białą, jest tlenek glinu (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Materiał ten charakteryzuje się dużą twardością, która zawiera się w granicach 1650÷2400 HV [47], a także wysoką odpornością na zużycie ściernie i chemiczne. Do zalet należy zaliczyć zachowanie właściwości skrawnych w wysokiej temperaturze (nawet do 1200°C), co umożliwia skrawanie z dużą prędkością. Wadą natomiast jest duża kruchość, mała przewodność cieplna i mała odporność na zmęczenie cieplne. Dlatego należy unikać dynamicznego obciążania ostrza z ceramiki tlenkowej. Zalecane jest skrawanie bez użycia cieczy obróbkowych. Zwiększenie odporności na uderzenia można uzyskać poprzez dodatek tlenku cyrkonu.



Spieki ceramiczne stosowane są do skrawania materiałów w postaci płytek wielostrzowych. W celu zmniejszenia podatności na wykruszenia przy krawędziach skrawających, wprowadza się fazki o ujemnym kącie natarcia.

Ceramika tlenkowo-węglkowa, nazywana też ceramiką mieszaną lub, ze względu na kolor, czarną, zawiera obok tlenku glinu również węgiel tytanu (TiC), a czasem także azotek tytanu (TiN). Ceramika tlenkowo-węglkowa ma, w porównaniu do czystej ceramiki tlenkowej, większą twardość, mniejszą kruchość i lepszą przewodność cieplną. Jednakże technologia wytwarzania płytek tlenkowo-węglkowych jest bardziej złożona i wiąże się z większymi kosztami. Większa odporność na szoki termiczne pozwala na stosowanie cieczy obróbkowych w procesie skrawania ceramiką mieszaną.

Ceramikę azotkową (nazywaną też szarą) stanowią materiały oparte na azotku krzemu ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Do zalet tego materiału należy zaliczyć dużą wytrzymałość, wysoką twardość, dobrą przewodność cieplną i małą rozszerzalność cieplną. Korzystne właściwości cieplne umożliwiają stosowanie cieczy obróbkowych. Dobre właściwości materiał ten zachowuje w wysokiej temperaturze, dzięki czemu można nim obrabiać z prędkością skrawania około 1000 m/min. Jednak w wysokiej temperaturze wykazuje skłonność do zużycia chemicznego.

Kolejnym spiekem ceramicznym jest sialon, którego nazwa pochodzi od symboli chemicznych pierwiastków wchodzących w jego skład (Si, Al, O, N). Narzędzia ze sialonu umożliwiają skrawanie z dużą prędkością, a także dużym posuwem.

Ceramiką zbrojoną nazywany jest materiał charakteryzujący się tym, że w osnowie  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (często z domieszką  $\text{ZrO}_2$ ) znajduje się dodatek w postaci włókien węgla krzemu (SiC). Włókna te mają średnicę w granicach  $(0,1 \div 1) \mu\text{m}$  i długość równą  $(5 \div 50) \mu\text{m}$ , a ich zawartość wynosi około 20% wagowych. Dodatek SiC zwiększa twardość, wytrzymałość na zginanie oraz odporność na szoki termiczne tych materiałów.

### **3.3.7. Materiały supertwarde**

Do materiałów supertwardych zaliczany jest diament, a także regularny azotek boru.

Diament jest odmianą alotropową węgla krystalizującą w sieci regularnej przestrzennie centrycznej. Do wytwarzania narzędzi stosowany jest zarówno diament naturalny jak i syntetyczny.

Diament jest najtwardszym materiałem naturalnym (10 stopni w skali Mohsa), odpornym na ścieranie, dobrze przewodzącym ciepło, zachowującym właściwości skrawne do temperatury około 700°C. Jego wadą jest mała wytrzymałość na zginanie. Jako ostrza narzędzi stosowane są monokryształy diamentu naturalnego odpowiednio zorientowane ze względu na anizotropię właściwości mechanicznych i wlotowane w oprawkę.

Synteza diamentu, prowadzona w temperaturze około 1500°C i pod ciśnieniem (6÷7) GPa, umożliwia uzyskanie ziaren diamentu o wymiarach od kilku  $\mu\text{m}$  do około 1 mm. W wyniku spiekania tych ziaren z niewielką ilością materiału wiążącego powstaje materiał nazywany diamentem polikrystalicznym (PCD). Diament polikrystaliczny charakteryzuje się właściwościami izotropowymi, gdyż w procesie jego wytwarzania poszczególne ziarna monokrystaliczne (o właściwościach anizotropowych) zajmują przypadkowe położenie. Ostrza z PCD wykonywane są zwykle w ten sposób, że warstwa z polikrystalicznego diamentu o grubości (0,5÷1) mm jest spieczona z warstwą węglików spiekanych o grubości od 1 mm do kilku mm [28].

Narzędzia diamentowe stosowane są do skrawania aluminium, stopów aluminium i krzemu, stopów magnezu, stopów tytanu, miedzi, mosiądzu, brązu, kompozytów, tworzyw ceramicznych, węglików spiekanych, szkła, gumy, drewna [42]. Natomiast nie zaleca się stosowania narzędzi diamentowych do obróbki stali i stopów niklu ze względu na powinowactwo chemiczne żelaza i niklu z diamentem. W wyniku skrawania narzędziami diamentowymi uzyskuje się powierzchnie o bardzo małej chropowatości. Szczególnie dobre rezultaty można osiągnąć (wysokość chropowatości rzędu kilku setnych  $\mu\text{m}$ ) przy zastosowaniu ostrzy z monokrystalicznego diamentu naturalnego.

W porównaniu z narzędziami z węglików spiekanych, narzędzia diamentowe mają następujące zalety: większą trwałość, mniejszą chropowatość powierzchni obrobionej, mniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia narostu, mniejsze siły skrawania [20].

Regularny azotek boru (CBN), nazywany też borazonem, jest wytwarzany podobnie jak diament syntetyczny. W wysokiej temperaturze i pod dużym ciśnieniem kryształy miękkiego azotku boru o strukturze heksagonalnej przekształcają się w bardzo twardy azotek boru o sieci regularnej.

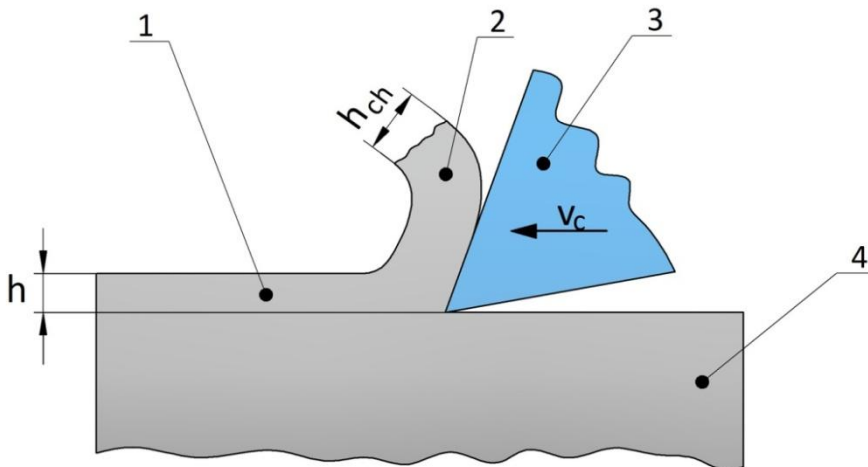
Głównymi zaletami borazonu jest, oprócz bardzo dużej twardości, odporność na wysoką temperaturę, duża przewodność cieplna i odporność na zużywanie ścierne. Ze względu na wysoką cenę, CBN stosowany jest w postaci naroży w płytkach z węglików spiekanych lub warstwy na płytce z węglika.

Narzędzia z borazonu umożliwiają skrawanie stali o twardości do 68 HRC (do obróbki stali miękkich nie są stosowane ze względów ekonomicznych), twardych żeliw, trudnoobrabialnych stopów niklu i kobaltu.

## 4. PODSTAWY FIZYKALNE OBRÓBK SKRAWANIEM

### 4.1. Tworzenie się wióra

W procesie skrawania przemieszczające się ostrze narzędzia oddziałuje z określoną siłą na materiał obrabiany, co prowadzi do oddzielania warstwy skrawanej i przekształcania jej w wiór. Na rys. 4.1 przedstawiono uproszczony model procesu skrawania jednokrawędziowym ostrzem, przy czym długość ostrza jest większa od szerokości warstwy skrawanej, a grubość warstwy skrawanej jest dużo mniejsza od jej szerokości. Skrawanie takie jest nazywane skrawaniem swobodnym.



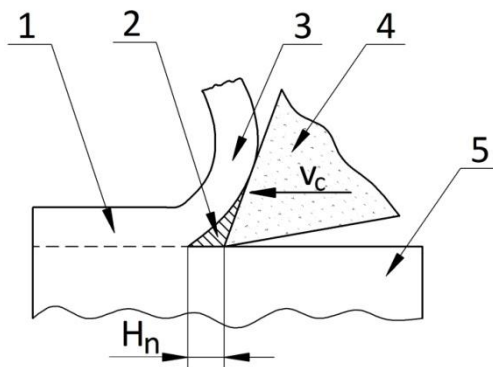
Rys. 4.1. Uproszczony model skrawania: 1 – warstwa skrawana, 2 – wiór, 3 – ostrze narzędzia, 4 – przedmiot obrabiany

W strefie skrawania występuje szereg powiązanych ze sobą zjawisk [37]:

- powstawanie naprężeń powodujących odkształcenia sprężyste i plastyczne,
- tarcie między wiórem a powierzchnią natarcia oraz między przedmiotem obrabianym a powierzchnią przyłożenia ostrza,
- tarcie wewnętrzne w obrabianym materiale,
- wydzielanie się ciepła powodującego wzrost temperatury wióra, narzędzia i przedmiotu obrabianego,
- zużywanie się ostrza narzędzia.

Odształcenia plastyczne materiału obrabianego powodują spęczenie warstwy skrawanej. Stosunek przekroju poprzecznego wióra do przekroju poprzecznego warstwy skrawanej nazywany jest współczynnikiem spęczenia wióra. Wartość współczynnika spęczenia wióra może zmieniać się w szerokich granicach (od 1,1÷1,3 dla żeliwa, do 10÷11 dla aluminium [15]) w zależności od materiału obrabianego, grubości warstwy skrawanej, geometrii ostrza, prędkości skrawania.

Duże naciski jednostkowe wióra na powierzchnię natarcia wpływają na intensyfikację adhezji materiału obrabianego do ostrza narzędzia, co sprzyja przywieraniu drobnych cząstek materiału wióra do powierzchni natarcia. Podobne zjawisko może wystąpić również na powierzchni przyłożenia. Ilość przywierających cząstek materiału obrabianego do powierzchni ostrza zwiększa się, tworząc narost (rys. 4.2). Po osiągnięciu określonej wysokości narostu  $H_n$  przemieszczający się wiór powoduje jego zerwanie, po czym rozpoczyna się ponowne powstawanie narostu. Zjawisko tworzenia się narostu powtarza się z częstotliwością od kilku do kilkudziesięciu herców. Narost powstaje głównie podczas skrawania materiałów plastycznych w określonym zakresie prędkości skrawania. Tworzenie się narostu jest zjawiskiem niekorzystnym, głównie ze względu na pogarszanie się chropowatości powierzchni.

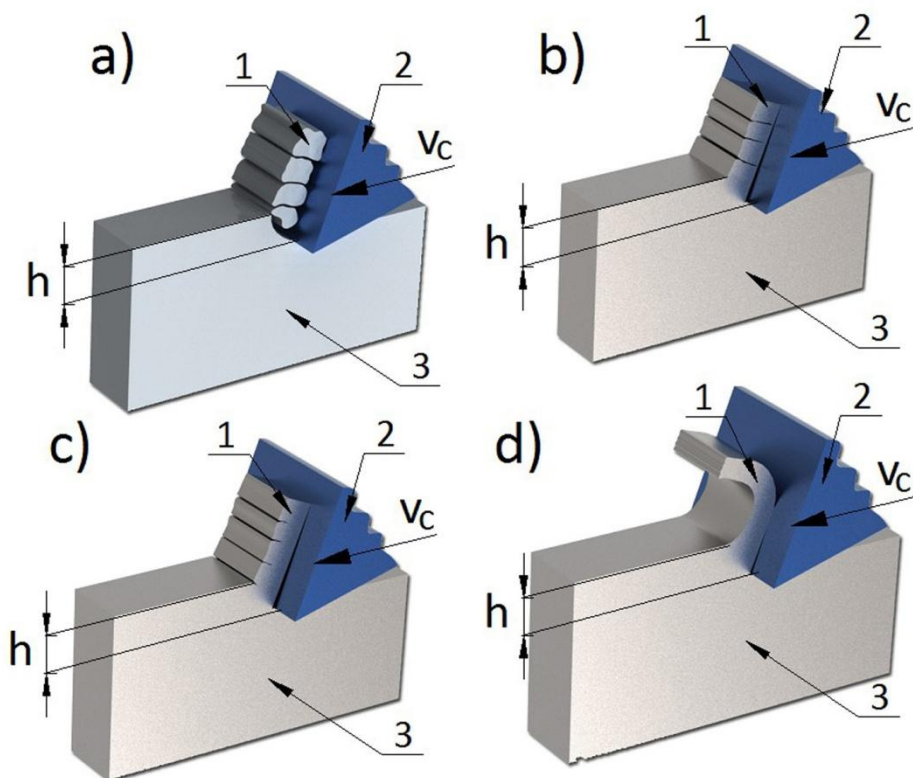


Rys. 4.2. Narost na ostrzu narzędzia: 1 – warstwa skrawana, 2 – narost, 3 – wiór, 4 – ostrze narzędzia, 5 – przedmiot obrabiany

Warunkiem zainicjowania procesu skrawania jest spełnienie warunku, że grubość warstwy skrawanej  $h$  jest większa od minimalnej grubości warstwy skrawanej  $h_{min}$ . W literaturze podaje się kilka metod obliczania wartości  $h_{min}$ ,

w przybliżeniu można przyjąć, że  $h_{min} \approx 0,1 r_n$ . W powyższym wzorze  $r_n$  jest promieniem zaokrąglenia krawędzi skrawającej.

Usuwana w procesie obróbki warstwa skrawana przekształca się w wióry. Powstające wióry można podzielić na odrywane oraz ścinane. Wióry odrywane powstają wówczas, gdy przekroczona zostanie wytrzymałość rozdzielcza, a wióry ścinane – po przekroczeniu granicy plastyczności na ścinanie [18].



Rys. 4.3. Rodzaje wiórów: a) wiór odrywany, b) wiór ścinany elementowy, c) wiór ścinany schodkowy, d) wiór ścinany ciągły (1 – wiór, 2 – ostrze narzędzia, 3 – przedmiot obrabiany)

Wióry mogą mieć różny kształt oraz długość. W zależności od kształtu wióry dzieli się na: płaskie, śrubowe zwarte, spiralne, śrubowe otwarte, śrubowe stożkowe, łukowe, elementowe i igłowe. Rozróżnia się wióry długie, krótkie i splecione [18, 37].

Wprowadzanie wiórowi jest produktem odpadowym w procesie skrawania, ale ich kształt i długość mają znaczenie ze względu na przebieg ewakuacji wiórowi ze strefy skrawania oraz ich magazynowanie i transport.

## 4.2. Siły moment i moc skrawania

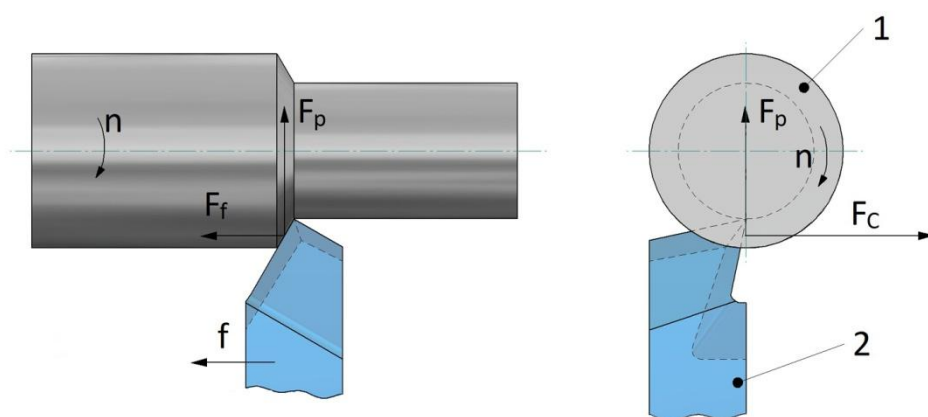
### 4.2.1. Siły w procesie skrawania

Ostrze narzędzia oddziałuje na przedmiot obrabiany z określoną siłą, konieczną do pokonania oporów skrawania związanych z usuwaniem warstwy skrawanej. Siła ta jest całkowitą siłą skrawania. Wartość i kierunek działania tej siły zależą od wielu czynników, między innymi od sposobu obróbki skrawaniem, kierunków ruchu głównego i posuwowego, geometrii ostrza, właściwości materiału obrabianego.

Całkowitą siłą skrawania  $F$  rozkłada się na siły składowe (rys. 4.4):

- siłę skrawania  $F_c$  (nazywaną też główną albo obwodową), działającą w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu głównego,
- siłę posuwową  $F_f$ , działającą w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu posuwowego,
- siłę odporową (nazywaną też bierną)  $F_p$ , której kierunek działania jest prostopadły do płaszczyzny wyznaczonej przez kierunki działania sił  $F_c$  i  $F_f$ .

Wypadkowa sił  $F_c$  i  $F_f$  nazywana jest siłą czynną i oznaczana  $F_a$ .



Rys. 4.4. Rozkład całkowitej siły skrawania podczas toczenia wzdłużnego:  
1 – przedmiot obrabiany, 2 – nóż tokarski

Całkowita siła skrawania  $F$  jest siłą wypadkową siły skrawania  $F_c$ , siły posuwowej  $F_f$  oraz siły odporowej  $F_p$ , a jej wartość można obliczyć z zależności:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (4.1)$$

W procesie zgrubnego toczenia wzdłużnego, przybliżone zależności między składowymi całkowitej siły skrawania można przedstawić [18]:

- toczenie stali

$$F_p = (0,4 - 0,6)F_c \quad (4.2)$$

$$F_f = (0,2 - 0,3)F_c$$

- toczenie żeliwa

$$F_p = (0,3 - 0,6)F_c \quad (4.3)$$

$$F_f = (0,15 - 0,3)F_c$$

Siłę  $F_c$  można wyznaczyć z zależności:

$$F_c = k_c A_D, N, \quad (4.4)$$

gdzie:  $k_c$  – opór właściwy skrawania w MPa,

$A_D$  – pole nominalne przekroju poprzecznego warstwy skrawanej w mm (wartość  $A_D$  można wyznaczyć z zależności (2.7)).

Opór właściwy skrawania (nazywany też siłą właściwą skrawania) zależy głównie od materiału obrabianego oraz posuwu. Wartości oporu właściwego skrawania  $k_c$  dla wybranych materiałów podano w tabeli 4.1.

Opór właściwy skrawania również może być obliczany z zależności [43]:

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h^m} \quad (4.5)$$

gdzie:  $k_{c1}$  – opór właściwy skrawania, gdy  $h = 1$ ,

$h$  – grubość warstwy skrawanej w mm,

$m$  – wykładnik określony doświadczalnie.



Tabela 4.1. Wartości oporu właściwego skrawania podczas toczenia [40]

Materiał obrabiany	Właściwości materiału obrabianego		Posuw na obrót w mm			
	Wytrzymałość $R_m$ , MPa,	Twardość HB	0,1	0,2	0,4	0,8
			Opór właściwy skrawania w MPa			
Stale niestopowe	Do 500		3600	2600	1900	1360
	500–600		4000	2900	2100	1520
	600–700		4200	3000	2200	1560
	700–850		4400	3150	2300	1640
	850–1000		4600	3300	2400	1720
Stale stopowe	700–850		4700	3400	2450	1760
	850–1000		5000	3600	2600	1850
	1000–1400		5300	3800	2750	2000
	1400–1800		5700	4100	3000	2150
Żeliwo szare		Do 200	1900	1360	1000	720
		200–250	2900	2080	1500	1080
Żeliwo stopowe		250–400	3200	2300	1700	1200
Mosiądz		80–120	1600	1150	850	600

Znane są również wzory doświadczalne do obliczania siły skrawania w postaci [7, 39]:

$$F_c = C_c a_p^{e_c} f_r^{u_c} K_c, N, \quad (4.6)$$

gdzie:  $C_c$  – współczynnik zależny od warunków obróbki,

$a_p$  – głębokość skrawania w mm,

$f_r$  – posuw na obrót w mm,

$e_c, u_c$  – wykładniki określone doświadczalnie,

$K_c$  – iloczyn współczynników poprawkowych uwzględniających wpływ różnych czynników na wartość siły skrawania.

Wzory na obliczanie siły posuwowej i odporowej mają podobną postać. Wartości określonych doświadczalnie współczynników i wykładników podawane są w tabelach [39]. Obecnie wzory te są rzadko stosowane.

Przedstawione powyżej wzory na obliczanie składowych całkowitej siły skrawania pozwalają na obliczanie średnich wartości tych sił. Pomiar sił dostatecznie czułymi siłomierzami wskazują, że wartości tych sił ulegają znacznym wahaniom podczas skrawania.

#### 4.2.2. Moment i moc skrawania

W dokumentacji technicznej maszyn technologicznych zwykle podawany jest dopuszczalny moment, jakim może być obciążone wrzeciono. Zatem znajomość momentu skrawania jest niezbędna przy projektowaniu procesu technologicznego elementów maszyn. Podczas toczenia moment skrawania  $M_c$  oblicza się według wzoru:

$$M_c = \frac{F_c D}{2} \quad (4.7)$$

W powyższym wzorze  $D$  jest średnicą obrabianego przedmiotu.

Podczas obróbki skrawaniem nie może być również przekroczona moc silnika (silników) maszyny technologicznej. Moc może być obliczona jako iloczyn prędkości i siły działającej w kierunku zgodnym z wektorem tej prędkości. Obróbka skrawaniem charakteryzuje się występowaniem prędkości ruchu głównego  $v_c$  i siły skrawania  $F_c$ , działającej zgodnie z kierunkiem tego ruchu. Zatem zależność na moc związaną z ruchem głównym, nazywaną mocą skrawania  $P_c$ , można zapisać:

$$P_c = F_c v_c \quad (4.8)$$

Podobnie można przedstawić zależność na moc posuwu  $P_f$ , wynikającą z występowania prędkości posuwu  $v_f$  oraz siły posuwowej  $F_f$ :

$$P_f = F_f v_f \quad (4.9)$$

Prędkość ruchu posuwowego jest dużo mniejsza od prędkości ruchu głównego, a w związku z tym moc posuwu jest tak mała w porównaniu z mocą skrawania, że można ją pominąć. W obliczeniach praktycznych korzysta się z następującego wzoru na moc skrawania:

$$P_c = \frac{F_c v_c}{60000}, \text{ kW}, \quad (4.10)$$

gdzie siła skrawania  $F_c$  jest w niutonach, a prędkość skrawania  $v_c$  w metrach na minutę.

Do obliczania mocy skrawania można zastosować również następujący wzór:

$$P_c = \frac{M_c n}{9550}, \text{ kW} \quad (4.11)$$

W powyższym wzorze moment skrawania  $M_c$  jest wyrażony w Nm, natomiast  $n$  (w 1/min) jest prędkością obrotową narzędzia, gdy narzędzie wykonuje ruch główny, lub prędkością obrotową przedmiotu obrabianego – gdy ruch główny wykonuje przedmiot.

Moc silnika napędu głównego maszyny technologicznej obliczana jest z zależności:

$$P_s = \frac{P_c}{\eta}, \text{ kW}, \quad (4.12)$$

gdzie:  $\eta$  - współczynnik sprawności napędu maszyny technologicznej.

Obliczona ze wzoru (4.12) moc  $P_s$  nie może być większa od mocy znamionowej silnika napędu maszyny technologicznej.

### 4.3. Zjawiska cieplne w procesie skrawania i ciecze obróbkowe

#### 4.3.1. Ciepło w procesie skrawania

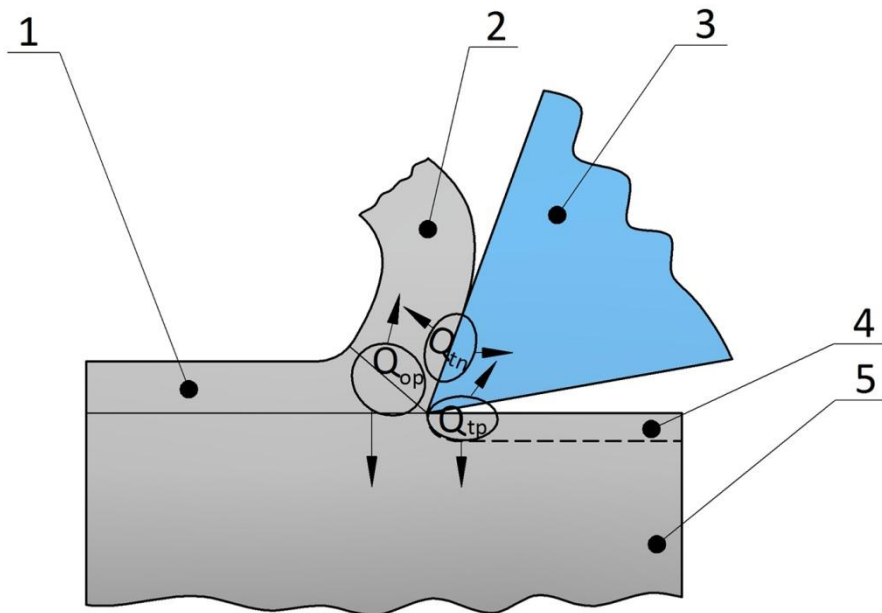
Ocena się, że ponad 99,5% pracy skrawania zamieniane jest w ciepło [18]. Strumień ciepła (ilość ciepła w jednostce czasu), wyrażony w J/s (dżul na sekundę), czyli w W (watach), można obliczyć z zależności:

$$Q = \frac{F_c v_c}{60}, \text{ W}, \quad (4.13)$$

W powyższym wzorze siła skrawania  $F_c$  jest w N, a prędkość skrawania  $v_c$  w m/min.

Można wyodrębnić kilka procesów zachodzących podczas skrawania, które są źródłami wydzielanego ciepła (rys. 4.5):

- praca odkształceń plastycznych warstwy skrawanej oraz tworzącej się warstwy wierzchniej przedmiotu oraz burzenia spójności materiału  $Q_{op}$ ,
- praca wykonana wskutek tarcia między powierzchnią natarcia a wiórem  $Q_{tn}$ ,
- praca wykonana wskutek tarcia między powierzchnią przyłożenia a powierzchnią przejściową przedmiotu obrabianego  $Q_{tp}$ .



Rys. 4.5. Źródła ciepła wydzielanego w procesie skrawania: 1 – warstwa skrawana, 2 – wiór, 3 – ostrze, 4 – warstwa wierzchnia, 5 – przedmiot obrabiany

Wydzielone ciepło przejmowane jest przez wiór –  $Q_w$ , przedmiot obrabiany –  $Q_{PO}$ , ostrze narzędzia –  $Q_N$ . Jeżeli skrawanie odbywa się z zastosowaniem cieczy obróbkowej, to ciecz ta przejmuje część ciepła ( $Q_c$ ), ponadto niewielka ilość ciepła przechodzi do otaczającej atmosfery ( $Q_a$ ).

Zgodnie z zasadą bilansu cieplnego, ilość ciepła wydzielonego jest równa ilości ciepła przejętego, co można zapisać:

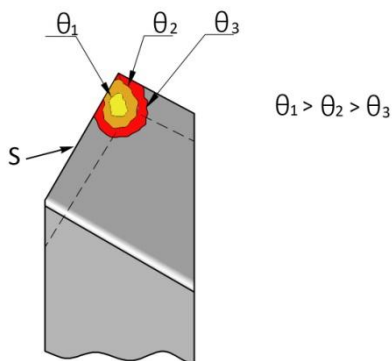
$$Q_{op} + Q_{tn} + Q_{tp} = Q_w + Q_{PO} + Q_N + Q_c + Q_a \quad (4.14)$$

Rozpływ ciepła w procesie skrawania zależy od wielu czynników, między innymi od właściwości materiału obrabianego i materiału narzędzia, geometrii ostrza, prędkości skrawania (zwykle najwięcej ciepła przejmuje wiór).

### 4.3.2. Temperatura w strefie skrawania

Ilość wydzielonego ciepła i jego rozpływ ma wpływ na temperaturę wióra, ostrza narzędzia oraz przedmiotu obrabianego. Temperatura ostrza i przedmiotu ma duże znaczenie w procesie skrawania. Ze wzrostem temperatury ostrza następuje szybsze jego zużycie, a w przypadku przekroczenia dopuszczalnej temperatury dla danego materiału części roboczej narzędzia – utrata właściwości skrawnych. Zmiany wymiarów narzędzia wskutek wahań temperatury mają wpływ na dokładność obróbki. Wzrost temperatury przedmiotu obrabianego również powoduje zmiany jego wymiarów z powodu rozszerzalności cieplnej, a tym samym pogorszenie dokładności wytwarzanych elementów, może też wpływać na pogorszenie właściwości warstwy wierzchniej przedmiotu.

W strefie skrawania powstaje złożone pole temperatury, charakteryzujące się dużymi różnicami wartości temperatury w różnych punktach wióra, ostrza narzędzia i przedmiotu obrabianego. Jeżeli podczas skrawania powstają wióry ciągłe, to temperatura na powierzchni natarcia jest  $(1,5 \div 2)$  – krotnie wyższa niż na powierzchni przyłożenia. Temperatura na powierzchni natarcia jest największa w pewnej odległości od krawędzi skrawającej, w przybliżeniu – w połowie styku wióra z powierzchnią natarcia [18]. Jest to zjawisko korzystne ze względu na zużycie ostrza. Na rys. 4.6 przedstawiono typowy rozkład temperatury na powierzchni natarcia ostrza.



Rys. 4.6. Typowy rozkład izoterm na powierzchni natarcia ostrza podczas skrawania materiału tworzącego wióry ciągłe ( $\theta$  – temperatura, S – główna krawędź skrawająca)

Określenie rozkładu temperatury w ostrzu narzędzia, przedmiocie obrabianym i wiórze sprawia duże trudności. Używane jest umowne pojęcie „temperatura skrawania”, które należy interpretować jako średnią temperaturę styku ostrza narzędzia z wiórem i powierzchnią skrawania [18].

### 4.3.3. Ciecze obróbkowe

Podczas obróbki skrawaniem zwykle stosowana jest ciecz obróbkowa, nazywana też cieczą chłodząco - smarującą (skrawanie na sucho stosuje się zdecydowanie rzadziej). Do podstawowych celów wprowadzania cieczy obróbkowej należy zaliczyć:

- chłodzenie, polegające na przejmowaniu przez ciecz części ciepła wydzielającego się podczas skrawania, co powoduje obniżenie temperatury narzędzia i przedmiotu obrabianego,
- smarowanie, polegające na zmniejszeniu tarcia między wiórem a powierzchnią natarcia oraz między powierzchnią przejściową a powierzchnią przyłożenia,
- ułatwienie ewakuacji wiórów oraz zmywanie drobnych cząstek materiału obrabianego i zużywającego się narzędzia.

Poza zdolnością do chłodzenia i smarowania ciecze obróbkowe powinny charakteryzować się wieloma innymi właściwościami, takimi jak [6, 37]:

- brak oddziaływania korodującego (do cieczy dodawane są inhibitory korozji),
- niepalność,
- niska temperatura krzepnięcia,
- wysoka temperatura wrzenia,
- dobra zwilżalność powierzchni,
- duża prędkość penetracji,
- odporność na rozwój bakterii,
- przezroczystość i mała skłonność do pienienia,
- duża stabilność i trwałość,
- brak negatywnego wpływu na zdrowie człowieka,
- brak nieprzyjemnego zapachu,
- łatwość przygotowania,
- łatwość utylizacji.

Ciecze stosowane w obróbce skrawaniem dzieli się na następujące grupy [6, 16, 37]:

- ciecze olejowe,
- ciecze emulsyjne,
- ciecze wodorozcieńczalne (syntetyczne).

Cieczami olejowymi są oleje mineralne, roślinne, a także ciekłe tłuszcze zwierzęce. Oleje te charakteryzują się głównie właściwościami smarnymi; efekt lepszego chłodzenia można uzyskać poprzez zwiększenie intensywności przepływu cieczy przez strefę skrawania.

Ciecze emulsyjne są mieszaniną oleju emulsyjnego i wody, przy czym olej nie rozpuszcza się w wodzie, tylko drobne kropelki oleju, o średnicy kilku mikrometrów, są rozproszone w wodzie. Ciecze te wykazują zarówno dobre właściwości chłodzące (woda) jak i smarujące (olej).

Ciecze wodorozcieńczalne są roztworami różnych związków syntetycznych z wodą (niekiedy z małą ilością olejów emulsyjnych). Ciecze te wykazują głównie właściwości chłodzące.

Ciecze obróbkowe zawierają różnego rodzaju dodatki, do których należą inhibitory korozji, środki zmniejszające skłonność do pienienia się, substancje bakteriobójcze i grzybobójcze, związki zmniejszające napięcie powierzchniowe, a także dodatki powierzchniowo aktywne, powodujące uplastycznienie materiału obrabianego i poprawiające właściwości smarne w wysokiej temperaturze i przy dużym nacisku.

Na rynku dostępne są liczne gatunki cieczy obróbkowych. Przy doborze cieczy należy kierować się głównie sposobem i rodzajem obróbki skrawaniem oraz rodzajem materiału obrabianego.

W ostatnich latach coraz większym zainteresowaniem użytkowników cieczy się skrawaniem z minimalnym smarowaniem, często określane akronimem MQL (od słów angielskich: minimum quantity lubrication), które polega na podawaniu do strefy skrawania małych kropli środka smarnego, albo strumienia sprężonego powietrza z rozproszonym środkiem smarnym, tzw. mgły olejowej [2, 24, 38].

## 4.4. Zużycie i trwałość ostrza

### 4.4.1. Rodzaje zużycia ostrza

Ostrza narzędzi skrawających eksploatowane są w specyficznych warunkach, charakteryzujących się bardzo dużymi naciskami na powierzchniach ostrza, zmiennością sił działających na ostrze, tarciami w niejednorodnym i zmiennym polu temperatury, zmiennością geometrii ostrza (wskutek zużycia), możliwością pojawiania się narostu. Można wyodrębnić dwa rodzaje zużycia ostrza:

- zużycie ciągłe, gdy następuje sukcesywne usuwanie materiału z powierzchni ostrza narzędzia,
- zużycie nagłe (skokowe), nazywane katastroficznym, gdy w bardzo krótkim czasie następuje całkowita utrata właściwości skrawnych, np. w wyniku złamania narzędzia albo dużego wykruszenia.

Ze względu na fizyczne przyczyny zużywania się ostrza, wyróżnia się rodzaje zużycia:

- mechaniczne,
- adhezyjne,
- dyfuzyjne,
- chemiczne,
- cieplne.

Zużycie mechaniczne może następować w wyniku ścierania powierzchni ostrza (zużycie ściernie) lub przekroczenia wytrzymałości ostrza (zużycie wytrzymałościowe). Zużycie ściernie polega na usuwaniu materiału ostrza wskutek tarcia. Duży wpływ na intensywność ścierania mają twarde wtrącenia w materiale obrabianym. Zużycie wytrzymałościowe może mieć charakter doraźny lub zmęczeniowy. Zużycie wytrzymałościowe doraźne następuje wskutek przekroczenia wytrzymałości narzędzia (np. złamanie wiertła) lub fragmentu ostrza (wyłamanie, wykruszenie). Zużycie wytrzymałościowe zmęczeniowe związane jest ze zmiennością sił działających na ostrze.

Zużycie adhezyjne występuje w warunkach dużych nacisków jednostkowych. Wskutek przyciągania się cząsteczek materiału ostrza i materiału obrabianego dochodzi do szepień, których zrywanie prowadzi do ubytku materiału.



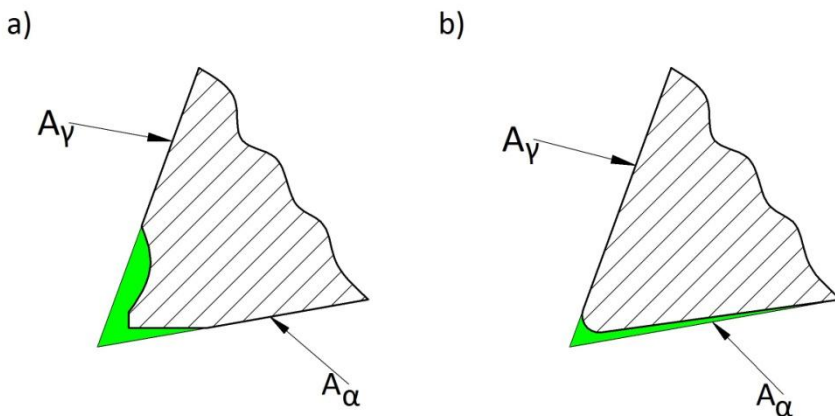
Zużycie dyfuzyjne może wystąpić w wysokiej temperaturze. Wskutek ruchów cieplnych atomów następuje przenikanie atomów materiału ostrza do materiału przedmiotu obrabianego, co prowadzi do ubytku materiału ostrza.

Zużycie chemiczne polega na łączeniu się materiału ostrza z innymi pierwiastkami i tworzeniu się związków chemicznych, które są łatwo usuwalne z powierzchni ostrza poprzez ścieranie. Zużycie chemiczne występuje w wysokiej temperaturze, a główną przyczyną tego zużycia jest utlenianie.

Zużycie cieplne następuje wskutek przekroczenia temperatury przemian strukturalnych materiału ostrza, prowadzące do powstawania struktur o gorszych właściwościach mechanicznych, oraz w wyniku odkształceń plastycznych materiału w pobliżu krawędzi skrawających.

#### 4.4.2. Ocena zużycia ostrza

Ostrza, które ulegają zużyciu ciąglemu, mogą mieć po zużyciu różny kształt, w zależności od rodzaju tworzącego się wióra (rys. 4.7).

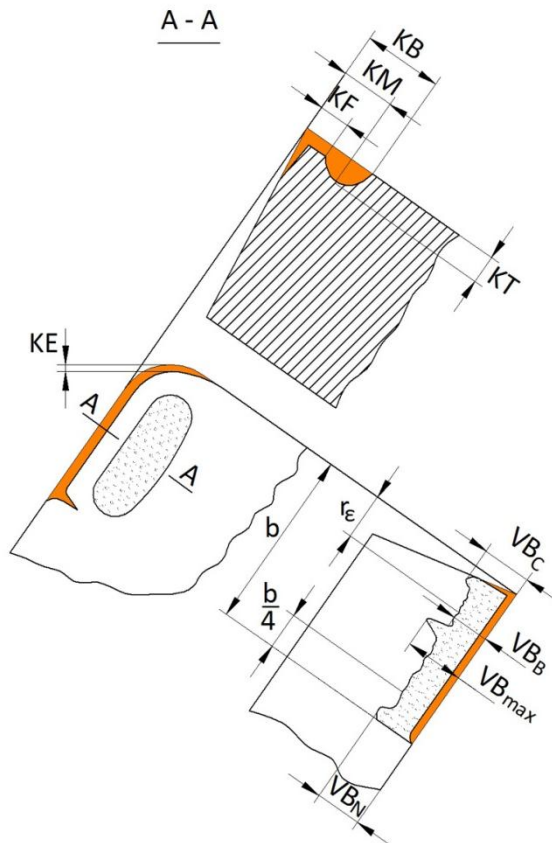


Rys. 4.7. Kształt zużytego ostrza w zależności od rodzaju wióra tworzącego się podczas skrawania: a) wiór ciągły, b) wiór odrywany

Jeżeli podczas skrawania powstają dostatecznie sztywne wióry ciągłe, to największe naciski występują w pewnej odległości od krawędzi skrawającej i przemieszczający się wiór wyciera krater (żłobek) na powierzchni natarcia (rys. 4.7a). Natomiast, gdy powstają wióry krótkie, np. odrywane, to obserwuje się zaokrąglenia krawędzi skrawającej. Niezależnie od kształtu powstających

wiórów następuje zużycie powierzchni przyłożenia wskutek tarcia między tą powierzchnią a powierzchnią przejściową przedmiotu obrabianego.

Ocena ilościowa zużycia ostrza powinna być dokonywana na podstawie wskaźników zużycia, określonych w normie PN-ISO 3685: 1996 (rys. 4.8). Wskaźniki te pozwalają na ocenę zużycia geometrycznego zarówno powierzchni przyłożenia jak i natarcia.



Rys. 4.8. Wskaźniki zużycia ostrza

Na powierzchni przyłożenia wyróżnia się następujące wskaźniki zużycia:

- średnia szerokość pasma zużycia  $VB_B$ ,
- maksymalna szerokość pasma zużycia  $VB_{max}$ ,
- szerokość pasma zużycia naroża  $VB_C$ ,
- szerokość wyżłobienia na powierzchni przyłożenia  $VB_N$ .

Wskaźniki zużycia na powierzchni natarcia związane są z wyłobionym kraterem, są to:

- odległość między brzegiem krateru a pierwotnym położeniem krawędzi skrawającej  $KF$ ,
- największa głębokość krateru  $KT$ ,
- odległość miejsca pomiaru wskaźnika  $KT$  od początkowego położenia krawędzi skrawającej  $KM$ ,
- maksymalna odległość tylnej krawędzi krateru od początkowego położenia krawędzi skrawającej  $KB$ .

Ponadto używany jest wskaźnik  $KE$ , oznaczający cofnięcie naroża. Wskaźnik ten ma duże znaczenie ze względu na dokładność obróbki. Wszystkie wskaźniki mierzone są od pierwotnego położenia krawędzi skrawającej.

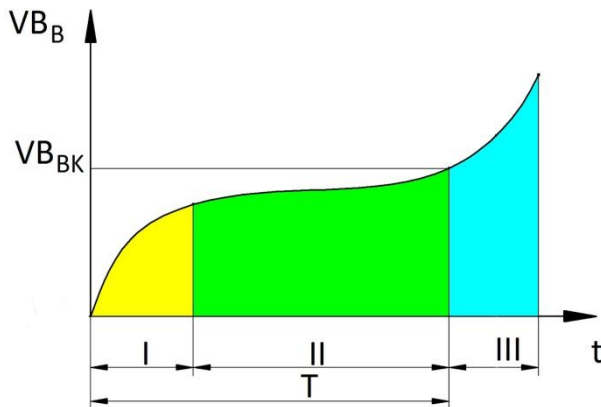
Zużycie ostrza wpływa na przebieg i wyniki obróbki skrawaniem. Wraz z narastającym zużyciem ostrza następuje wzrost chropowatości powierzchni obrobionej, zmiana wymiarów przedmiotu obrabianego, zmiana kształtu wiórow. Zużycie ostrza powoduje też wzrost składowych całkowitej siły skrawania, mocy skrawania i amplitudy drgań, wzrost temperatury skrawania, a także zmiany sygnału emisji akustycznej.

Zmiany wielu wielkości fizycznych towarzyszących obróbce skrawaniem wykorzystuje się w diagnostyce stanu narzędzia. Potrzeba stosowania diagnostyki stanu ostrza narzędzi występuje szczególnie w nowoczesnych systemach obróbkowych, gdzie nadzór operatora jest bardzo ograniczony. Do wielkości najczęściej wykorzystywanych w diagnostyce narzędzi należy zaliczyć siły i moc skrawania, drgania oraz emisję akustyczną [21, 23].

#### **4.4.3. Trwałość ostrza**

Typowy przebieg zużycia ostrza, wyrażonego wskaźnikiem  $VB_B$ , w funkcji czasu  $t$ , przedstawiono na rys. 4.9. Zużycie ostrza zwykle podawane jest w milimetrach, a czas skrawania w minutach.

Można wyróżnić trzy charakterystyczne okresy pracy ostrza. W okresie I, nazywanym okresem docierania ostrza, zużycie ostrza zwiększa się dość szybko, co jest spowodowane ścieraniem z powierzchni ostrza nierówności pozostałych po ostrzeniu narzędzia. Okres II jest okresem stabilnego używania ostrza narzędzia, charakteryzuje się wzrostem wartości wskaźnika zużycia w przybliżeniu proporcjonalnym do czasu skrawania. W okresie III następuje gwałtowny wzrost prędkości zużywania ostrza, co prowadzi do jego zniszczenia.



Rys. 4.9 Typowa krzywa zużycia ostrza ( $VB_B$ ) w funkcji czasu skrawania ( $t$ )

Z analizy krzywej przebiegu zużycia ostrza wynika, że należy przerwać proces skrawania zanim rozpocznie się III okres użytkowania ostrza. Przyjęty wskaźnik zużycia osiąga wówczas dopuszczalną wartość, którą określa się mianem kryterium stępienia ostrza [37]. Wartości wskaźników zużycia odpowiadających kryterium stępienia ostrza najbardziej zależą od materiału ostrza, przykładowo, wartość wskaźnika  $VB_B$  dla ostrzy ze stali szybko tnącej waha się w granicach  $(0,2 \div 1)$  mm, dla ostrzy z węglików spiekanych –  $(0,3 \div 0,5)$  mm, a dla ostrzy z ceramiki narzędziowej –  $(0,15 \div 0,3)$  mm [18].

Czas pracy ostrza narzędzia nowego lub naostrzonego, przy zachowaniu stałych warunków technologicznych, po którego upływie wartość przyjętego wskaźnika zużycia odpowiada kryterium stępienia, nazywana jest okresem trwałości ostrza. Zwykle okres trwałości ostrza oznaczany jest symbolem  $T$  (rys. 4.9) i podawany w minutach.

Okres trwałości ostrza zależy od wielu czynników, do najważniejszych można zaliczyć:

- właściwości materiału obrabianego,
- właściwości materiału ostrza narzędzia,
- właściwości powłoki przeciwzużyciowej (gdy na powierzchniach ostrza jest powłoka),
- stan powierzchni ostrza,
- geometria ostrza,

- warunki chłodzenia i smarowania,
- parametry skrawania.

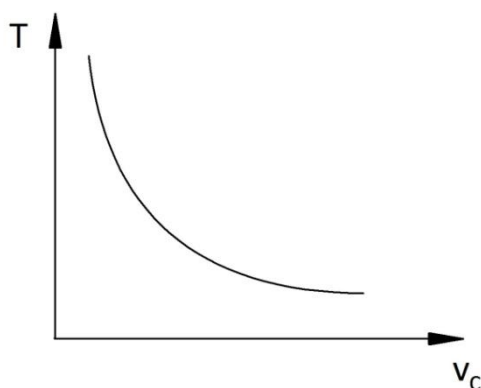
Spośród parametrów skrawania w największym stopniu na trwałość ostrza wpływa prędkość skrawania, a w dalszej kolejności posuw i głębokość skrawania. Wpływ prędkości skrawania na trwałość ostrza wyrażany jest zależnością:

$$T = \frac{C_T}{v_c^s} \quad (4.5)$$

gdzie:  $C_T$  – współczynnik zależny głównie od materiału obrabianego,

$s$  – wykładnik potęgowy zależny głównie od materiału ostrza.

Wartości wykładnika  $s$  zmieniają się w szerokich granicach i mogą wahać się od 1,25 do 12, przy czym największe są dla stali szybko tnącej, mniejsze – dla węglików spiekanych, a najmniejsze – dla ceramiki narzędziowej [37], na przykład, według [31] dla narzędzi o ostrzach ze stali szybko tnącej  $s = 8$ , z węglików spiekanych  $s = 5$ , a z ceramiki narzędziowej  $s = 2$ . Typowy przebieg zależności trwałości ostrza od prędkości skrawania dla ostrzy ze stali szybko tnących przedstawiono na rys. 4.10.



Rys. 4.10. Przebieg zależności  $T = f(v_c)$  dla narzędzi ze stali szybko tnących

Narzędziom jednolitym i łączonym w sposób trwały po zużyciu ostrza właściwości skrawne przywracane są poprzez ostrzenie, które polega na zeszlifowaniu warstwy materiału, aby zapewnić właściwą geometrię ostrza, wymaganą chropowatość powierzchni natarcia i przyłożenia oraz dobrą jakość krawędzi skrawających. Narzędzia zwykle poddawane są wielokrotnemu ostrzeniu.

Całkowity czas pracy danego narzędzia (z uwzględnieniem liczby ostrzeń) nazywany jest żywotnością narzędzia  $Z$ :

$$Z = \sum_{i=1}^{i_o} T_i \quad (4.6)$$

gdzie:  $i_o$  – liczba ostrzeń narzędzia,

$T_i$  – kolejne okresy trwałości ostrza.

Jeżeli narzędzie w całym czasie eksploatacji (żywotności) pracuje z zachowaniem jednakowych warunków technologicznych, to wzór (4.6) można zapisać:

$$Z = i_o T \quad (4.7)$$

Niekiedy czas pracy ostrza jest ograniczony z powodu konieczności utrzymania wymaganej dokładności wymiarowo-kształtowej. Maksymalny czas pracy narzędzia (o ile w tym czasie nie zostanie przekroczone kryterium stopienia ostrza), w którym zużycie ostrza nie spowoduje przekroczenia tolerancji wykonania przedmiotu nazywany jest trwałością wymiarową.

## 5. SPOSOBY OBRÓBKI WIÓROWEJ

### 5.1. Toczenie

#### 5.1.1. Charakterystyka i odmiany

Toczenie jest sposobem obróbki wiórowej, w którym ruchem głównym jest ruch obrotowy przedmiotu obrabianego, a ruch posuwowy wykonuje narzędzie. Prędkość ruchu głównego oblicza się na podstawie wzoru (2.1), a prędkość ruchu posuwowego – ze wzoru (2.5).

W zależności od sposobu kształtowania powierzchni obrobionej przedmiotu, rozróżnia się<sup>1</sup>:

- toczenie punktowe, które charakteryzuje się tym, że zarys powierzchni obrobionej kształtowany jest wskutek ruchu posuwowego naroża narzędzia (punktem krawędzi przemieszczającym się po zarysie powierzchni obrobionej),
- toczenie kształtowe, które charakteryzuje się tym, że zarys powierzchni obrobionej jest otrzymywany w wyniku skrawania narzędziem o odpowiednio dobranym zarysie krawędzi skrawającej.

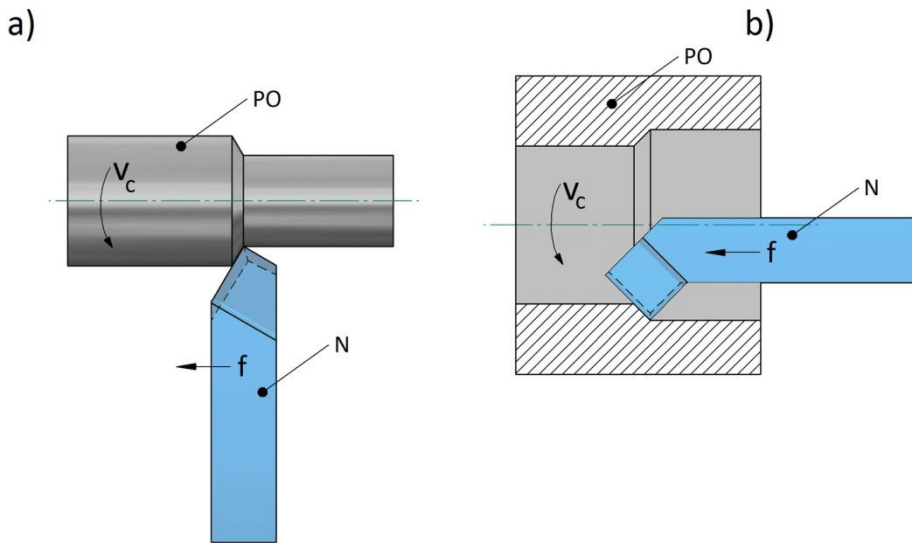
Toczenie punktowe może być:

- wzdłużne,
- poprzeczne,
- skośne (stożkowe).

Podczas toczenia wzdłużnego kierunek ruchu posuwowego jest równoległy do osi przedmiotu obrabianego. Toczenie wzdłużne może być stosowane do obróbki powierzchni walcowych zewnętrznych (rys. 5.1a) lub wewnętrznych (rys. 5.1b). Toczenie powierzchni zewnętrznych nazywane jest też obtaczaniem, a powierzchni wewnętrznych – wytaczaniem albo roztaczaniem.

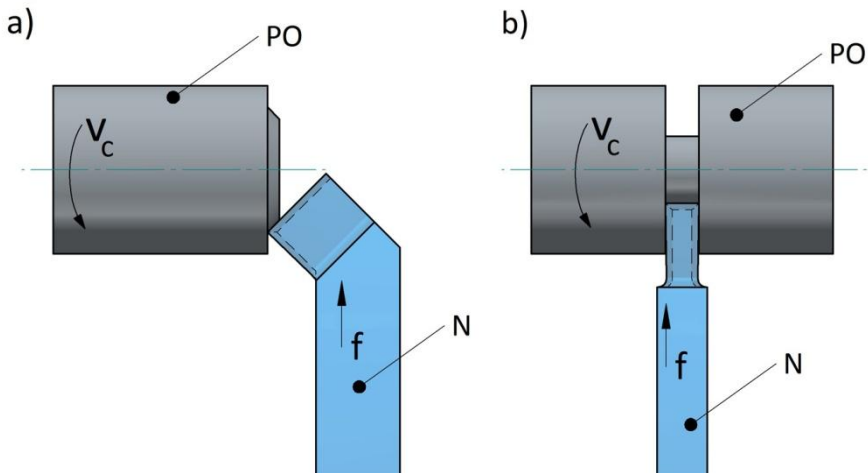
---

<sup>1</sup> Toczenie obwiedniowe zostało pominięte, gdyż jest bardzo rzadko stosowane w praktyce.



Rys. 5.1. Toczenie wzdłużne: a) zewnętrzne, b) wewnętrzne

Podczas toczenia poprzecznego kierunek ruchu posuwowego jest prostopadły do osi przedmiotu obrabianego. Toczeniem poprzecznym można obrabiać powierzchnie czołowe (rys. 5.2a) lub przecinać materiał (rys. 5.2b).

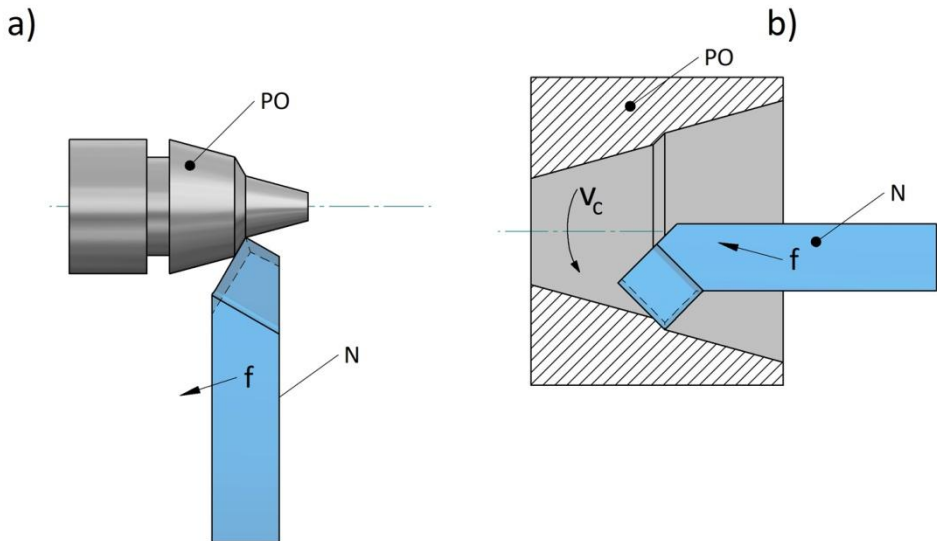


Rys. 5.2. Toczanie poprzeczne: a) czołowe, b) przecinanie

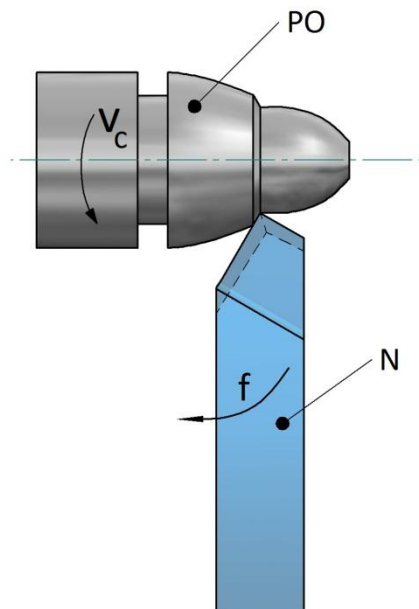
Toczenie nazywane jest skośnym lub stożkowym, gdy kierunek ruchu posuwowego przecina się z osią przedmiotu obrabianego, ale nie jest prostopadły.



Toczenie skośne umożliwia wykonywanie stożków, zarówno zewnętrznych (rys. 5.3a) jak i wewnętrznych (rys. 5.3b).

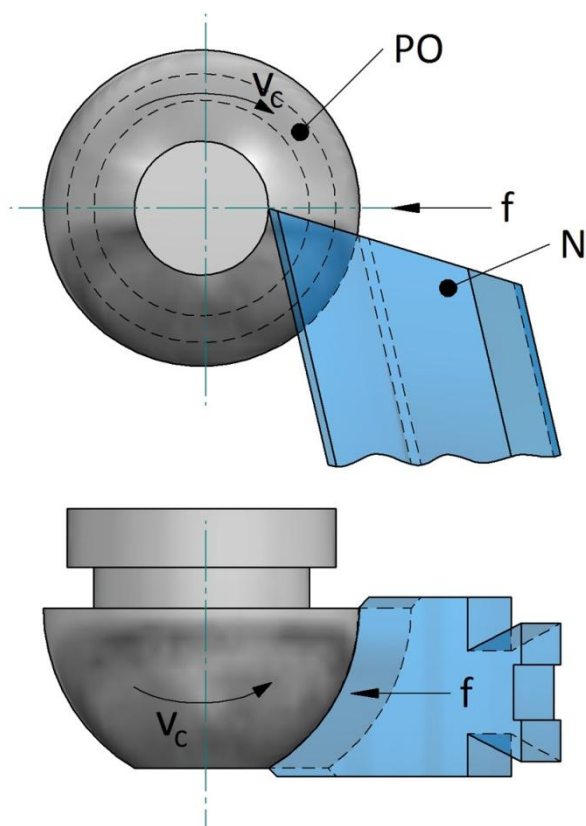


Rys. 5.3. Toczenie skośne (stożkowe): a) zewnętrzne, b) wewnętrzne



Rys. 5.4. Toczenie punktowe powierzchni kulistej

Oprócz powierzchni walcowych, płaskich i stożkowych toczenie punktowe umożliwia również kształtowanie innych powierzchni, bardziej złożonych, np. kulistych (rys. 5.4). W takim przypadku kąt między kierunkiem ruchu posuwowego a osią przedmiotu zmienia się w czasie toczenia. Toczenie powierzchni może być realizowane za pomocą urządzenia kopiującego (kształt powierzchni obrabianej otrzymywany jest na podstawie odtwarzania kształtu wzornika przez urządzenie kopiujące), albo, obecnie częściej, na obrabiarkach sterowanych numerycznie.



Rys. 5.5. Toczenie powierzchni kulistej nożem kształtowym

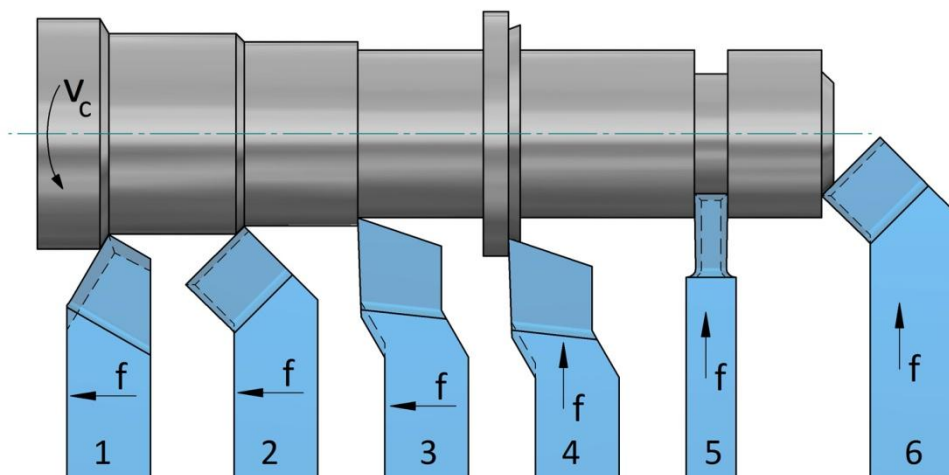
Przedmioty osiowo symetryczne o złożonym kształcie mogą być obrabiane toczeniem kształtowym. Przykład toczenia powierzchni kulistej nożem kształtowym pokazano na rys. 5.5. Nóż kształtowy wykonuje ruch posuwowy wzdłuż promienia przedmiotu obrabianego; dlatego takie toczenie kształtowe nazywane

jest promieniowym (toczenie kształtowe może też być styczne [5]). Toczenie kształtowe pozwala na uzyskanie większej wydajności, w porównaniu z toczeniem punktowym, dużej powtarzalności kształtu przedmiotów obrabianych, nie wymaga drogich obrabiarek ze sterowaniem numerycznym. Jednakże noże kształtowe są narzędziami specjalnymi, projektowanymi i wykonywanymi do obróbki konkretnego przedmiotu, a w związku z tym ich cena jest większa niż noży ogólnego przeznaczenia. Toczenie kształtowe stosowane jest głównie w produkcji wielkoseryjnej i masowej (wówczas koszt drogich narzędzi rozkłada się na dużą liczbę wytwarzanych przedmiotów).

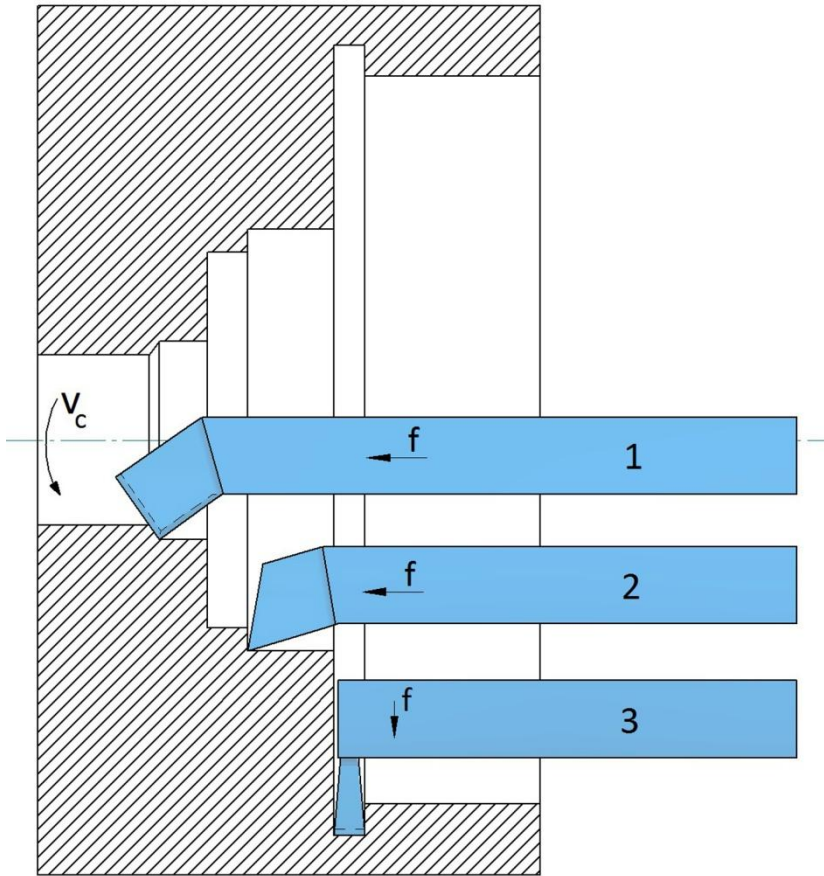
W zależności od położenia osi przedmiotu obrabianego rozróżnia się toczenie poziome i pionowe.

### 5.1.2. Noże tokarskie

Narzędzia do obróbki toczeniem nazywane są nożami tokarskimi. Noże przeznaczone do toczenia punktowego nazywane są punktowymi, a do toczenia kształtowego – kształtowymi. Na rynku dostępny jest szeroki asortyment noży tokarskich punktowych. Przykłady noży tokarskich do obróbki powierzchni zewnętrznych oraz ich zastosowanie przedstawiono na rys. 5.6, a do powierzchni wewnętrznych – na rys. 5.7.

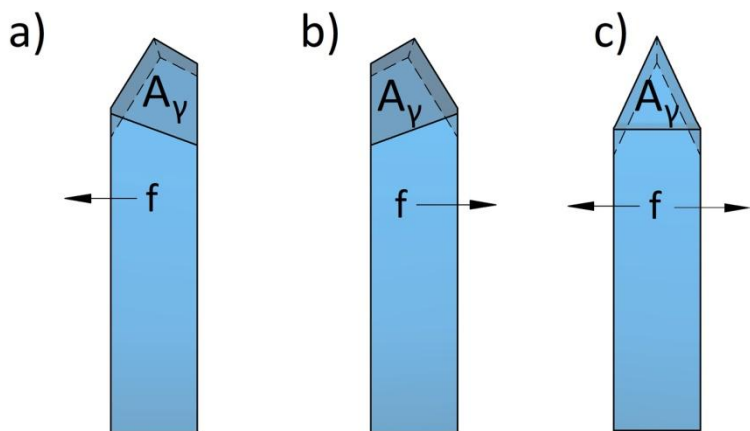


Rys. 5.6. Noże tokarskie punktowe do obróbki powierzchni zewnętrznych: 1 – prosty, 2 – wygięty zastosowany do toczenia wzdłużnego, 3 – odsadzone zastosowany do toczenia wzdłużnego, 4 – odsadzony zastosowany do toczenia poprzecznego, 5 – przecinak, 6 – wygięty zastosowany do toczenia poprzecznego



Rys. 5.7. Noże tokarskie punktowe do obróbki powierzchni wewnętrznych: wytaczak prosty (do otworów przelotowych), 2 – wytaczak spiczasty (do otworów nieprzelotowych), 3 – wytaczak hakowy

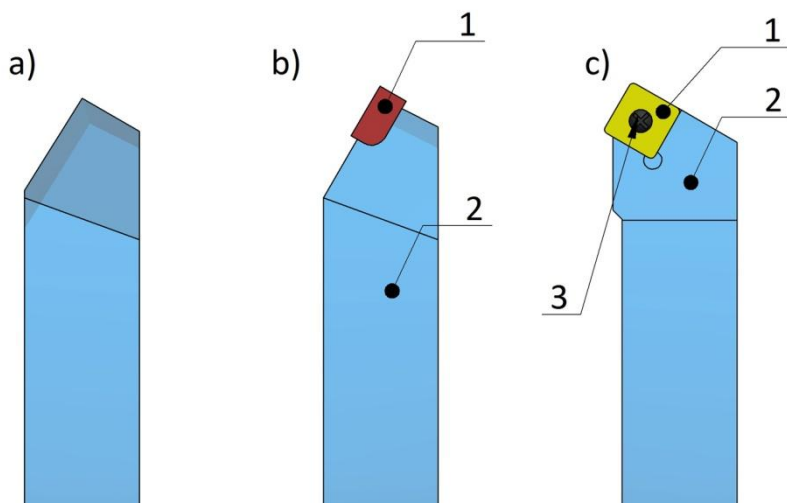
Ze względu na kierunek skrawania rozróżnia się noże prawe, lewe i obustronne (rys. 5.8). Jeżeli nóż jest w położeniu powierzchnią natarcia „u góry”, to nóż prawy dla patrzącego od strony naroża wykonuje ruch posuwowy w prawo, a nóż lewy – w lewo.



Rys. 5.8. Podział noży ze względu na kierunek skrawania: a) prawy, b) lewy, c) obustronny

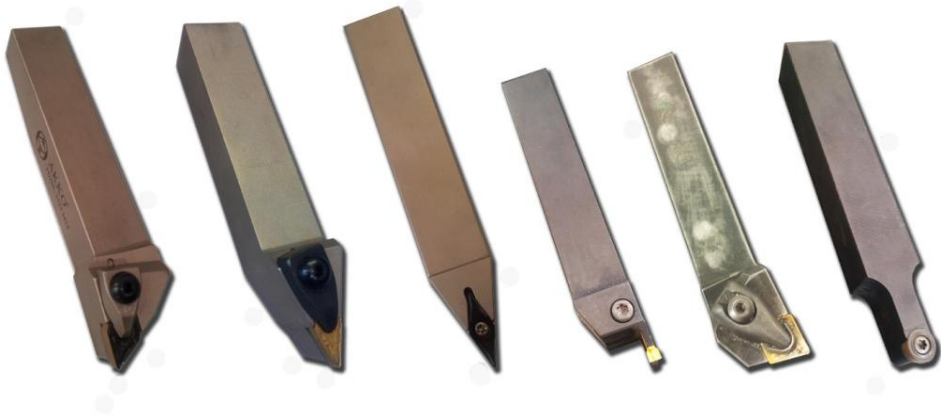
Ze względu na budowę noże tokarskie dzieli się następująco (rys. 5.9):

- jednolite, które w całości wykonane są z jednego materiału,
- łączone w sposób trwały, których część robocza jest zgrzewana z częścią chwytową, albo płytką skrawającą jest łączona z korpusem narzędzia poprzez twarde lutowanie,
- składane, charakteryzujące się tym, że płytką skrawającą wieloostrową jest połączona mechanicznie z korpusem noża.



Rys. 5.9. Podział noży ze względu na budowę: a) jednolity, b) łączony w sposób trwały, c) składany (1 – płytką skrawającą, 2 – korpus noża, 3 – śruba mocująca)

Najczęściej stosowane są noże składane, których zaletą jest możliwość zmiany położenia płytki po zużyciu krawędzi skrawającej, a po zużyciu wszystkich krawędzi – wymiana płytki. Przykłady noży tokarskich składanych pokazano na rys. 5.10. Produkowane są noże składane przeznaczone do obróbki różnych powierzchni, np. do toczenia wzdłużnego, poprzecznego, przecinaki, wytaczaki, a także w dość szerokich granicach zmieniają się wymiary tych noży. Płytki mocowane w korpusie noży składanych mogą różnić się kształtem, np. trójkątne, kwadratowe, rombowe, pięciokątne, wymiarami, ukształtowaniem powierzchni natarcia, geometrią ostrza, materiałem, z którego są wykonane (węgliki spiekane, ceramika narzędziowa, materiały supertwarde).



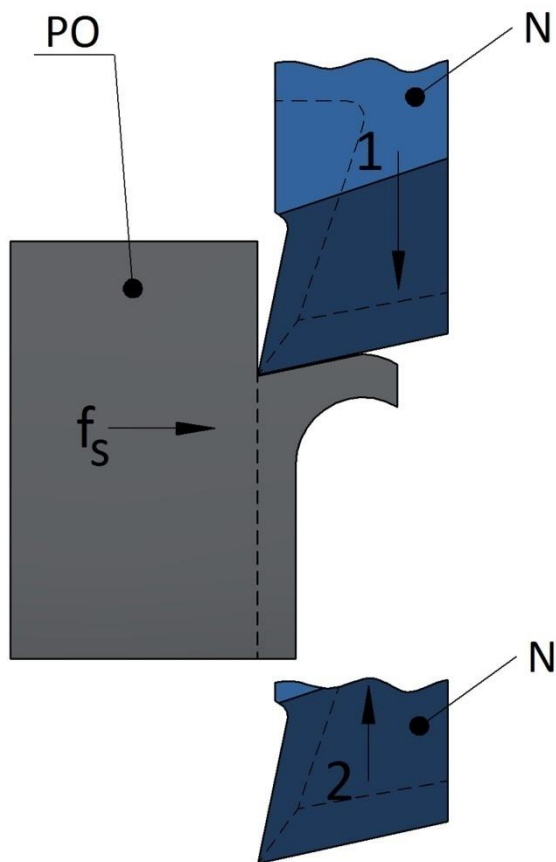
Rys. 5.10. Widok noży tokarskich składanych

## 5.2. Dłutowanie i struganie

### 5.2.1. Dłutowanie

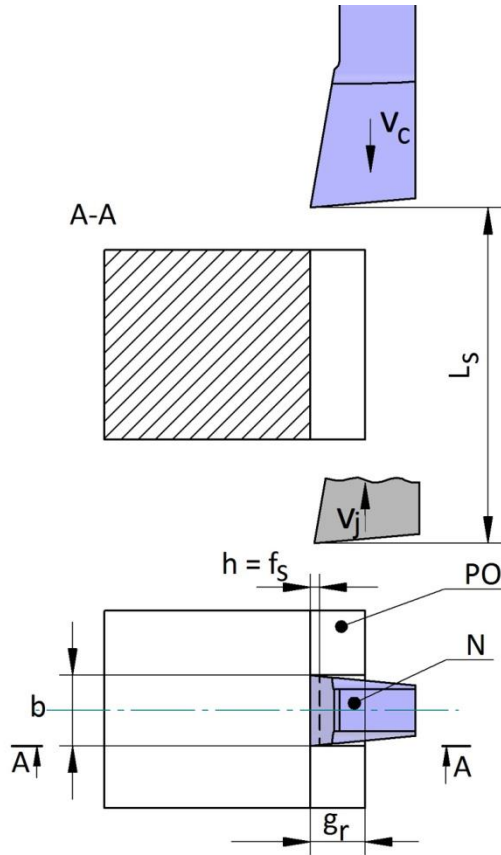
Dłutowanie charakteryzuje się tym, że ruch główny, wykonywany przez narzędzie, którym jest nóż dłutowniczy, nazywany także dłutakiem, jest ruchem nieciągłym (rys. 5.11), wykonywanym w kierunku pionowym. Nóż dłutowniczy wykonuje suw roboczy (1), podczas którego usuwa warstwę materiału obrabianego, a następnie wraca do położenia wyjściowego, wykonując suw jałowy (2). Prędkość ruchu roboczego  $v_r$  jest równa prędkości skrawania  $v_c$ . Ruch posuwo-

wy, wykonywany przez przedmiot obrabiany, jest również ruchem nieciągłym, wykonywanym cyklicznie po każdym ruchu skrawania. Wartość posuwu  $f_s$  jest przemieszczeniem przedmiotu obrabianego, przypadającym na jeden podwójny skok narzędzia (suw roboczy plus suw jałowy).



Rys. 5.11. Kinematyka dłutowania

Prędkość skrawania, która jest średnią prędkością suwu roboczego, oblicza się na podstawie wzoru (2.2), a posuw minutowy ze wzoru (2.5). Parametry geometryczne i kinematyczne dłutowania rowka przedstawiono na rys. 5.12.



Rys. 5.12. Parametry geometryczne i kinematyczne dłutowania rowka prostokątnego:  $b$  – szerokość warstwy skrawanej,  $h$  – grubość warstwy skrawanej, równa posuwowi na podwójny skok  $f_s$ ,  $g_r$  – głębokość dłutowanego rowka,  $l_s$  – długość skoku

Czas maszynowy dłutowania rowka można obliczyć z zależności:

$$t_m = \frac{l_d + g_r}{f_s n_s}, \text{ min}, \quad (5.1)$$

gdzie:  $l_d$  – droga dobiegu w mm,

$g_r$  – głębokość rowka w mm,

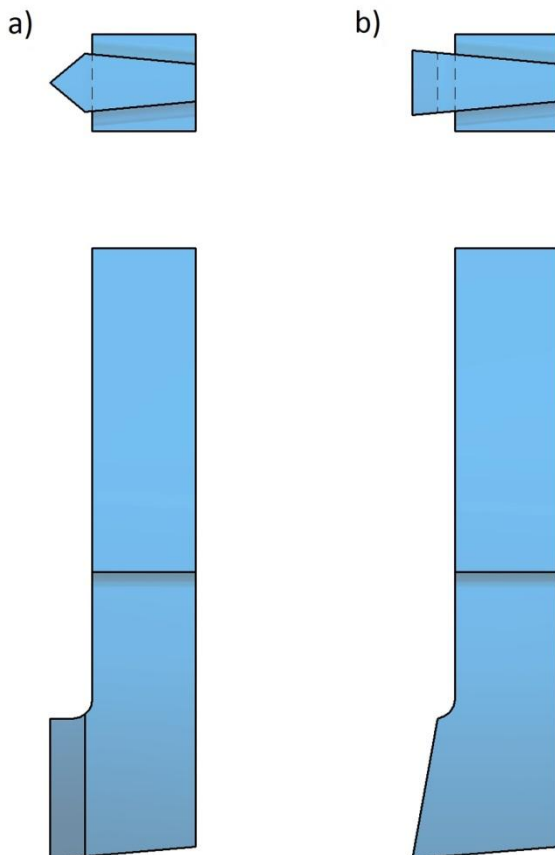
$f_s$  – posuw na podwójny skok w mm,

$n_s$  – liczba podwójnych skoków na minutę w 1/min.

We wzorze (5.1) nie ma drogi wybiegu, ponieważ dłutowanie musi zakończyć się po osiągnięciu głębokości rowka  $g_r$ , a także jest jedno przejście ( $i = 1$ ).



Przykłady noży dłutowniczych pokazano na rys. 5.13.



Rys. 5.13. Noże dłutownicze: a) wykańczak spiczasty, b) zacinak do rowków

Dłutowanie stosuje się głównie do wewnętrznych powierzchni nieobrotowych, takich jak rowki na wpusty i kliny, otwory kwadratowe, sześciokątne, prostokątne itp. Dłutowanie kształtowe lub obwiedniowe stosowane jest też do obróbki kół zębatach, zarówno o uzębieniu zewnętrznym jak i wewnętrznym.

### 5.2.2. Struganie

Kinematyka strugania jest podobna do kinematyki dłutowania, z tą różnicą, że w obróbce struganiem kierunek ruchu głównego i posuwowego tworzą płaszczyznę poziomą.

Struganie dzieli się na:

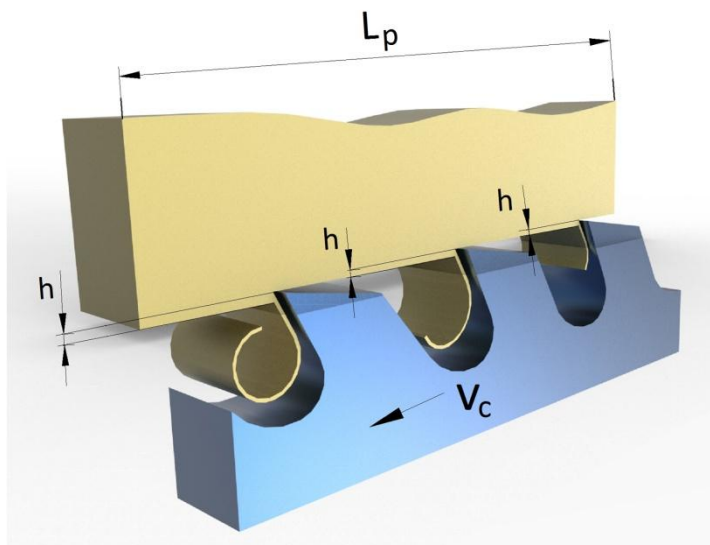
- wzdłużne, gdy ruch główny wykonuje przedmiot obrabiany, a narzędzie – ruch posuwowy,
- poprzeczne, gdy narzędzie wykonuje ruch główny, a przedmiot obrabiany – posuwowy.

Struganiem mogą być obrabiane rowki o różnym kształcie, długie płaszczyzny, albo kilka przedmiotów, zamocowanych szeregowo na stole strugarki, jednocześnie. Obecnie struganie stosowane jest bardzo rzadko.

## 5.3. Przeciąganie

### 5.3.1. Charakterystyka i odmiany przeciągania

Przeciąganie jest sposobem obróbki wiórowej, charakteryzującym się tym, że naddatek obróbkowy jest usuwany narzędziem wieloostrowym, nazywanym przeciągaczem, ukształtowanym tak, że poszczególne ostrza są wysunięte względem poprzedzających i w czasie obróbki usuwają kolejne warstwy materiału. W procesie przeciągania nie ma ruchu posuwowego, a ruchem głównym jest ruch roboczy przeciągacza względem przedmiotu obrabianego. Zasadę obróbki przeciąganiem przedstawiono na rys. 5.14 (przyjęto jednakowe grubości warstwy skrawanej  $h$ ):



Rys. 5.14. Zasada obróbki przeciąganiem

Ze względu na kinematykę procesu skrawania mogą być różne odmiany przeciągania:

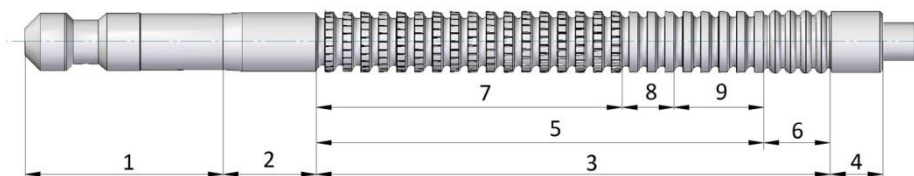
- przedmiot obrabiany jest nieruchomy, przeciągacz wykonuje ruch prostoliniowy, albo prostoliniowy i obrotowy jednocześnie,
- przeciągacz jest nieruchomy, przedmiot obrabiany wykonuje ruch prostoliniowy, albo prostoliniowy i obrotowy jednocześnie.

Połączenie ruchu prostoliniowego i obrotowego ma miejsce podczas przeciągania otworów z rowkami śrubowymi.

Jeżeli siła powodująca ruch narzędzia względem przedmiotu obrabianego jest przyłożona w taki sposób, że narzędzie jest rozciągane, to taka obróbka nazywana jest przeciąganiem, natomiast, gdy przyłożona siła powoduje ściskanie narzędzia, to taką obróbkę nazywa się przepychaniem.

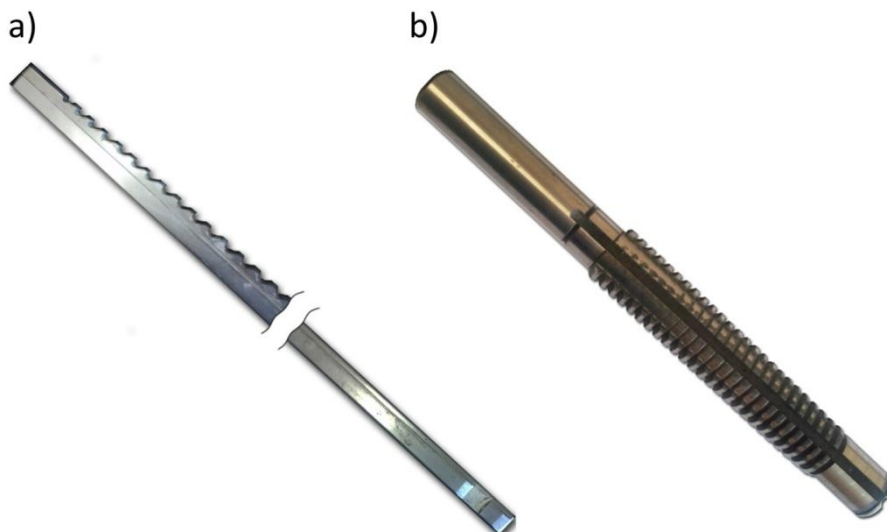
### 5.3.2. Przeciągacze i przepychacze

Narzędziami do przeciągania są przeciągacze, a do przepychania – przepychacze. Są to narzędzia kształtowe. Budowę przeciągacza do otworów przedstawiono na rys. 5.15. Przeciągacz składa się z: chwytu 1, prowadzenia przedniego 2, części roboczej 3 i prowadzenia tylnego 4. Część robocza składa się z części skrawającej 5 i części nagniatącej 6. W części skrawającej wyróżnia się ostrza zdzierające 7, wykończeniowe 8 i zapasowe 9. Zadaniem ostrzy zdzierających jest usunięcie nadmiaru obróbkowego, natomiast ostrza wykończeniowe, które usuwają warstwę skrawaną o mniejszej grubości niż ostrza zdzierające, służą do zapewnienia wymaganej dokładności i chropowatości powierzchni. Ostrza zapasowe umożliwiają wielokrotne ostrzenie przeciągacza. Część nagniatąca (nie w każdym przeciągaczu występuje) powoduje zmniejszenie chropowatości powierzchni i umocnienie warstwy wierzchniej. W przeciągaczach bardzo długich może być zastosowane podparcie tylne.



Rys. 5.15. Budowa przeciągacza do otworów (opis w tekście)

Widok przeciągacza do rowków oraz przepychacza pokazano na rys. 5.16.



Rys. 5.16. Przeciągacz do rowków (a) i przepychacz (b)

Widoczny jest brak chwytu w przepychaczu, natomiast znajdujący się za prowadzeniem tylnym trzpień służy do przepchnięcia części roboczej narzędzia przez cały otwór i jego długość zależy od długości otworu.

### 5.3.3. Czas maszynowy przeciągania

W procesie przeciągania stosuje się małe prędkości skrawania, co podyktowane jest potrzebą utrzymania dużej trwałości ostrza ze względu na wysoką cenę przeciągacza. Mimo to, czas przeciągania jest stosunkowo krótki, ponieważ obróbka danej powierzchni zwykle odbywa się podczas jednego suwu przeciągacza (tylko w przypadku bardzo dużych nadadków stosuje się komplety przeciągaczy). Czas maszynowy przeciągania można obliczyć z zależności:

$$t_m = \frac{l_{sp} K_{pp}}{1000 v_c}, \text{ min}, \quad (5.2)$$

gdzie:  $l_{sp}$  – długość suwu przeciągacza w mm,

$K_{pp}$  – współczynnik uwzględniający ruch powrotny przeciągacza (zwykle

$K_{pp} = 1,2 \div 1,5$ ),

$v_c$  – prędkość skrawania w m/min.

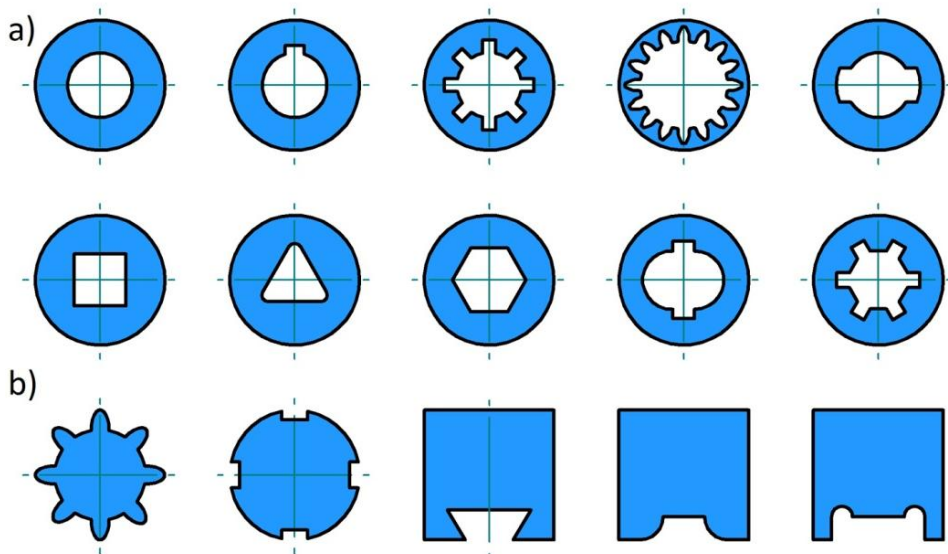
Długość suwu przeciągacza jest sumą długości przeciąganej powierzchni  $l_p$ , długości części roboczej przeciągacza  $l_{rp}$  oraz dobiegu  $l_d$  i wybiegu  $l_w$  narzędzia:

$$l_{sp} = l_p + l_{rp} + l_d + l_w \quad (5.3)$$

Suma drogi dobiegu i wybiegu przyjmowana jest w granicach  $(10 \div 20)$  mm.

### 5.3.4. Zastosowanie przeciągania

Przeciąganiem obrabia się zarówno powierzchnie wewnętrzne (części) jak i zewnętrzne. Przykłady kształtów obrabianych powierzchni przedstawiono na rys. 5.17.



Rys. 5.17. Przykładowe kształty powierzchni wewnętrznych (a) i zewnętrznych (b) obrabianych przeciąganiem

Przeciąganie zwykle stosuje się jako obróbkę wykończeniową powierzchni wstępnie obrobionych. W przypadku przeciągania odlewów i odkuwek naddatek obróbkowy dzieli się na szerokości warstwy skrawanej, co umożliwia zwiększenie grubości tej warstwy do takiej wartości, żeby krawędź skrawająca znajdowała się poniżej naskórka. Wówczas poszczególne ostrza usuwają cały naskórek

(krawędzie skrawające nie „pracują” w trudnoskrawalnym materiale naskórka), co pozwala uniknąć nadmiernego zużycia ostrza.

Do zalet przeciągania należy zaliczyć:

- dużą dokładność oraz powtarzalność wymiarów i kształtu obrabianych przedmiotów,
- małą chropowatość powierzchni obrabianej,
- dużą wydajność,
- prostą obsługę maszyny technologicznej.

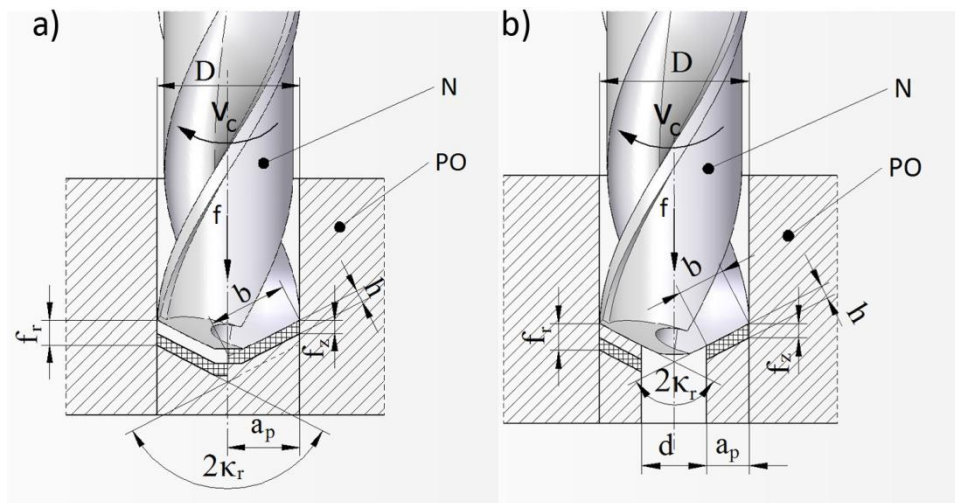
Przeciąganie jest opłacalne tylko wtedy, gdy koszty drogiego przeciągacza rozkładają się na dużą liczbę obrabianych przedmiotów. Dlatego przeciąganie stosuje się w produkcji wielkoseryjnej i masowej.

## **5.4. Wiercenie, pogłębianie i rozwiercanie**

### **5.4.1. Wiercenie i wiertła**

Wiercenie jest sposobem wiórowej obróbki otworów, za pomocą narzędzi nazywanych wiertłami, charakteryzującym się tym, że ruchem głównym jest ruch obrotowy narzędzia albo przedmiotu obrabianego, a ruchem posuwowym – ruch prostoliniowy, który również może być wykonywany przez narzędzie lub przedmiot obrabiany, przy czym kierunek ruchu posuwowego jest równoległy do osi wiertła, będącej zarazem osią wykonywanego otworu. Wierceniem wykonywane są otwory w pełnym materiale. Powiększanie, za pomocą wiertła o większej średnicy, istniejącego otworu nazywane jest wierceniem wtórnym albo powiercaniem.

Kinematykę skrawania oraz geometrię przekroju poprzecznego warstwy skrawanej podczas wiercenia i powiercania przedstawiono na rys. 5.18. Narzędzie N, zwane wiertłem krętym, wykonuje ruch obrotowy, który jest ruchem głównym ( $v_c$ ) oraz ruch posuwowy ( $f$ ). Wiertło kręte jest narzędziem dwustrzowym (wiertła o większej liczbie ostrzy są rzadko stosowane). Można dostrzec analogię między pracą wiertła krętego i pracą dwóch ostrzy noży tokarskich. Zatem głębokość skrawania może być wyrażona:



Rys. 5.18. Kinematyka skrawania oraz przekrój poprzeczny warstwy skrawanej w procesie wiercenia (a) i powiercania (b)

1) wiercenie pełne

$$a_p = \frac{D}{2} \quad (5.4)$$

2) powiercanie

$$a_p = \frac{D-d}{2} \quad (5.5)$$

gdzie:  $D$  – średnica otworu po wierceniu we wzorze (5.4) i po powiercaniu we wzorze (5.5),

$d$  – średnica otworu przed powiercaniem.

Posuw na ostrze  $f_z$  jest równy połowie posuwu na obrót  $f_r$ :

$$f_z = \frac{f_r}{2} \quad (5.6)$$

Grubość warstwy skrawanej (przez jedno ostrze)  $h$  zależy od posuwu  $f_z$  i kąta przystawienia  $\kappa_r$ .

$$h = f_z \sin \kappa_r \quad (5.7)$$

Natomiast szerokość warstwy skrawanej  $b$  można obliczyć:

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad (5.8)$$

Pole poprzecznego przekroju poprzecznego warstwy skrawanej (przez jedno ostrze wiertła) oblicza się ze wzorów:

1) wiercenie pełne:

$$A_D = f_z a_p = \frac{f_r D}{4} \quad (5.9)$$

2) powiercanie:

$$A_D = f_z a_p = \frac{f_r (D-d)}{4} \quad (5.10)$$

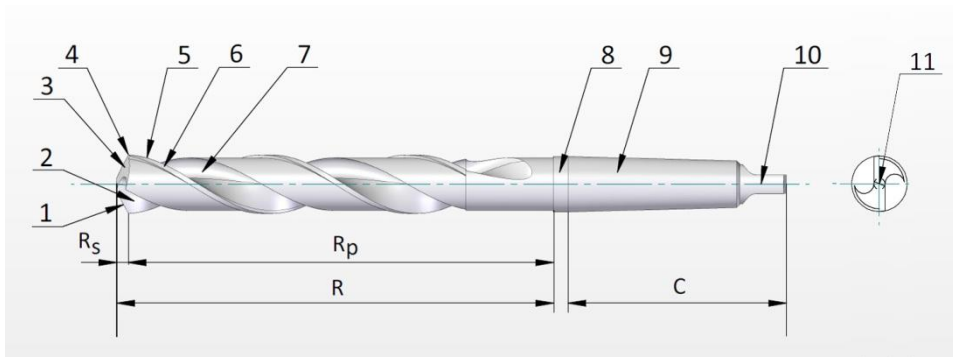
Prędkość skrawania w obróbce wierceniem należy obliczać z zależności (2.1), podstawiając za  $D$  średnicę wiertła. Czas maszynowy wiercenia oblicza się na podstawie wzorów (2.10) i (2.11), przyjmując  $l_p$  równe długości wierconego otworu, a liczbę przejść  $i = 1$ . Moc skrawania można wyznaczyć według wzoru (4.11). Zależność empiryczna na moment skrawania oraz siłę posuwową, wraz z tabelami współczynników uwzględniających warunki skrawania, podane są w literaturze [39, 40].

Do wykonywania otworów stosuje się różne odmiany wiertel [5, 37]:

- wiertła kręte,
- wiertła piórkowe, używane do wiercenia otworów o bardzo małych średnicach, otworów o nietypowych średnicach i otworów o specjalnie ukształtowanym dnie,
- wiertła trepanacyjne (rurowe), które usuwają materiał z przestrzeni w kształcie pierścienia, pozostawiając w środku rdzeń materiału,
- wiertła do głębokich otworów.

Najczęściej do wykonywania otworów używane są wiertła kręte. Budowę takiego wiertła przedstawiono na rys. 5.19.





Rys. 5.19. Budowa wiertła krętego (opis w tekście)

Wiertło składa się z części roboczej R oraz części chwytowej C, które często, chociaż nie zawsze, połączone są częścią łączącą 8, nazywaną szyjką. Część robocza składa się z części skrawającej  $R_s$  oraz części prowadzącej  $R_p$ . W części skrawającej występują dwie powierzchnie przyłożenia 3 oraz dwie powierzchnie natarcia 2. Krawędź przecięcia powierzchni natarcia z powierzchnią przyłożenia jest główną krawędzią skrawającą 1. W części prowadzącej znajdują się dwa śrubowe rowki wiórowe 7, które służą do usuwania wiórów z wierconego otworu. Na obwodzie wiertła znajdują się dwie wąskie, śrubowe powierzchnie, nazywane łysinkami prowadzącymi 6. Linie przecięcia powierzchni łysinek z powierzchniami rowków wiórowych stanowią pomocnicze krawędzie skrawające 5. Punkt przecięcia głównej i pomocniczej krawędzi skrawającej jest narożem 4. Linia przecięcia obydwu powierzchni przyłożenia jest poprzeczną krawędzią skrawającą 11, nazywaną ścinem. Część prowadząca ma niewielką zbieżność w kierunku chwytu w celu zmniejszenia tarcia i zabezpieczenia wiertła przed zakleszczeniem. Część chwytowa składa się ze stożka 9 i płetwy 10. Stożek, który ma zbieżność 1:20 (Morse'a lub metryczny), tworzy z gniazdem wrzeciona samohamowne połączenie rozłączne. Podczas pracy wiertła siły tarcia na powierzchni stożka przenoszą moment skrawania. Płetwa służy do wybijania wiertła z gniazda wrzeciona. Oprócz chwytów stożkowych stosowane są chwytów walcowych, które mogą być z zabierakiem lub bez zabieraka. Chwyty walcowe bez zabieraka mają wiertła o małej średnicy. Wiertło kręte w widoku pokazano na rys. 5.20.



Rys. 5.20. Widok wiertła krętego

W porównaniu do toczenia lub dłutowania proces przekształcania materiału obrabianego w wiór podczas wiercenia odbywa się w znacznie trudniejszych warunkach. Do głównych przyczyn występujących utrudnień można zaliczyć:

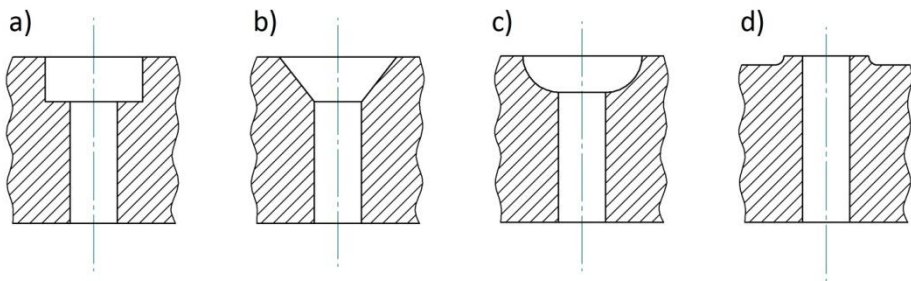
- dużą zmienność prędkości skrawania wzdłuż krawędzi skrawającej (wióry szybciej tworzą się na obwodzie niż w pobliżu osi wiertła),
- trudne warunki skrawania ścinem,
- utrudnione warunki odprowadzania ciepła, które wydziela się w procesie skrawania,
- trudniejsze doprowadzenie cieczy obróbkowej do strefy skrawania,
- utrudniona ewakuacja wiórów,
- tarcie między łysinkami a powierzchnią obrabianą.

Wymienione czynniki powodują szybsze zużywanie się ostrzy wiertła. Aby zapewnić odpowiednią trwałość ostrzy, w obróbce wierceniem stosuje się mniejsze prędkości skrawania niż przy toczeniu.

- Wiercenie może być realizowane na różnych maszynach technologicznych:
- na wiertarkach, wówczas wiertło wykonuje ruch obrotowy i posuwowy,
  - na tokarkach, na których przedmiot obrabiany wykonuje ruch obrotowy, a narzędzie – posuwowy,
  - na frezarkach i centrach obróbkowych, wówczas wiertło wykonuje ruch obrotowy, a przedmiot obrabiany – posuwowy.

### 5.4.2. Pogłębianie i pogłębiacze

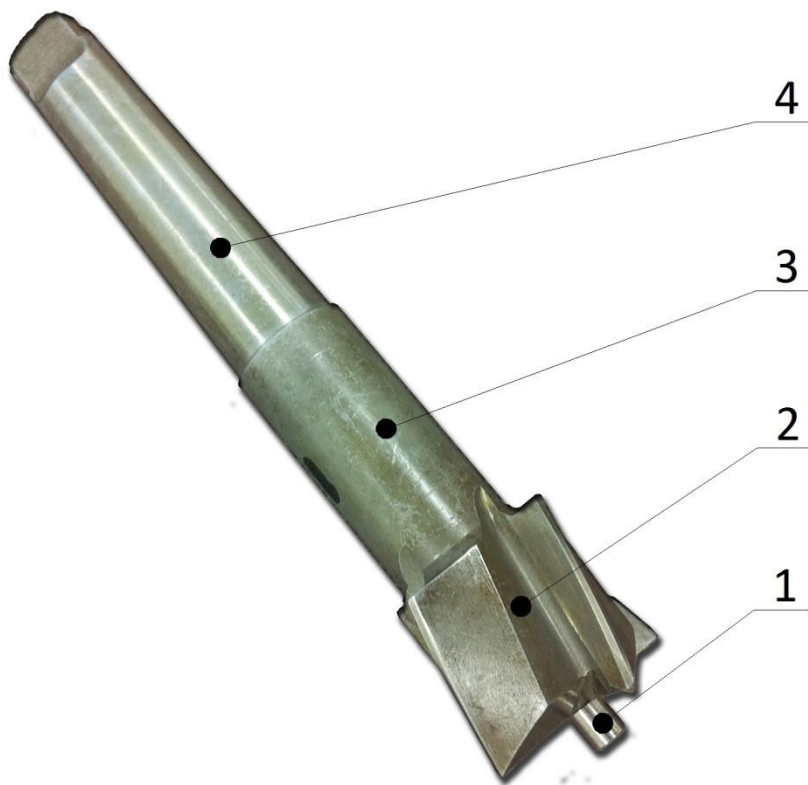
Pogłębianie jest sposobem obróbki, polegającym na zwiększaniu średnicy albo zmianie kształtu otworu na części jego długości, jak i obróbce czołowej części otworu. Kinematyka skrawania w procesie pogłębiania jest taka sama jak w obróbce wierceniem. Przykłady kształtu powierzchni najczęściej obrabianych pogłębianiem przedstawiono na rys. 5.21.



Rys. 5.21. Kształt powierzchni najczęściej obrabianych pogłębianiem

W zależności od kształtu obrabianych powierzchni pogłębianie może być: walcowo-czołowe (rys. 5.21a), stożkowe (rys. 5.21b), kształtowe (rys. 5.21c), płaskie (rys. 5.21d).

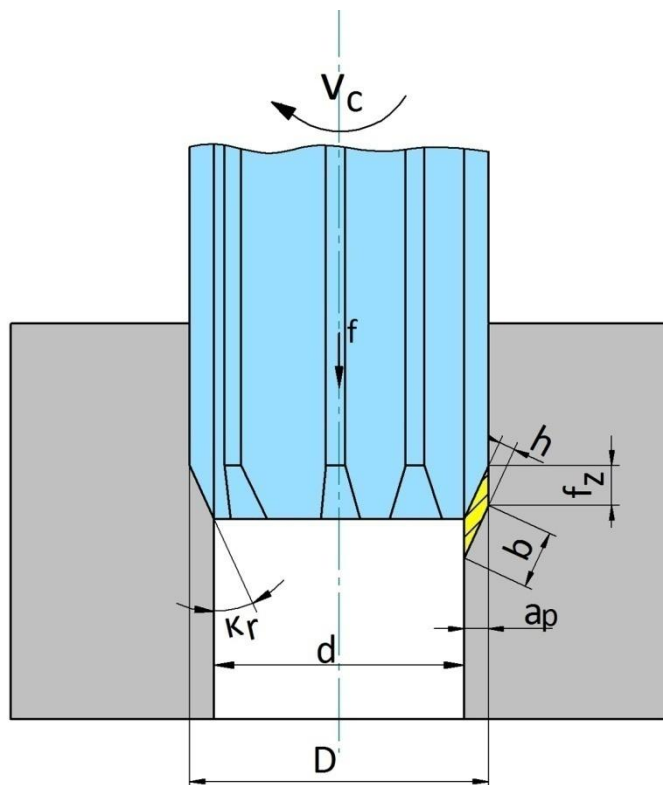
Narzędzia do pogłębiania, nazywane pogłębiaczami, są narzędziami wielostrzowymi. Widok pogłębiacza walcowo-czołowego przedstawiono na rys. 5.22. Pogłębiacz składa się z części prowadzącej 1, nazywanej też „pilotem”, która służy do ustawienia pogłębiacza w osi otworu, części roboczej 2, części łączącej 3, i części chwytowej 4. Przeznaczenie części 2÷4 jest takie jak w wiertłach.



Rys. 5.22. Widok pogłębiacza walcowo – czołowego: 1 – część prowadząca, 2 – część robocza, 3 – część łącząca, 4 – część chwytowa

### 5.4.3. Rozwiercanie i rozwiertaki

Rozwiercanie jest sposobem obróbki wykończeniowej otworów, zwykle wykonanych wierceniem, której celem jest poprawa dokładności kształtu i uzyskanie dużej dokładności średnicy otworu, a także zmniejszenie chropowatości powierzchni. Rozwiercane są zarówno otwory cylindryczne jak i stożkowe. Kinematyka skrawania oraz przekrój poprzeczny warstwy skrawanej w procesie rozwiercania są podobne jak dla wiercenia wtórnego (rys. 5.23).



Rys. 5.23. Kinematyka skrawania i przekrój poprzeczny warstwy skrawanej w procesie rozwiercania

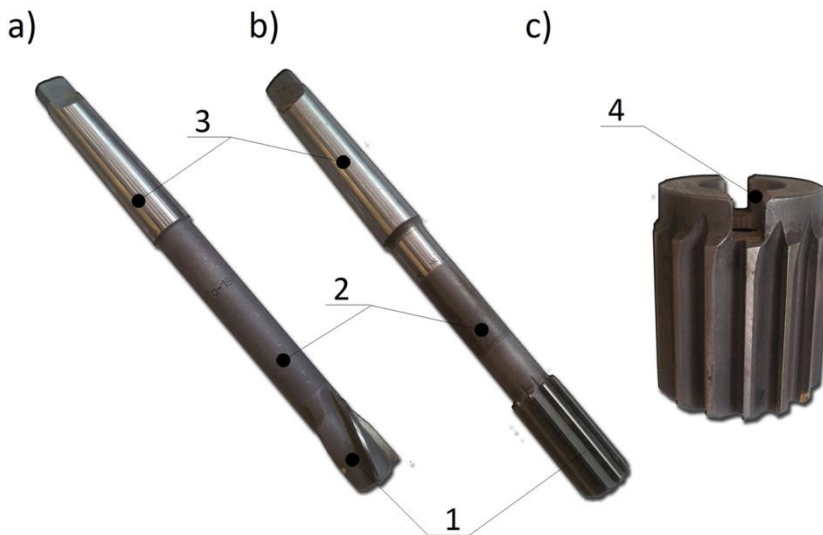
Prędkość skrawania w obróbce rozwiercaniem oblicza się na podstawie zależności (2.1), posuw na obrót i posuw minutowy – odpowiednio z zależności (2.4) i (2.6), a czas maszynowy ze wzorów (2.10) i (2.11).

Rozróżnia się rozwiercanie wstępne i wykończeniowe. Po rozwiercaniu wstępnym uzyskuje się dokładność otworów w klasie IT9 ÷ IT11, a po rozwiercaniu wykończeniowym – IT6÷IT8. Naddatek na stronę w rozwiercaniu wstępnym otworów o średnicy nie większej od 100 mm w stali i żelazie przyjmuje się w granicach (0,15÷1) mm, a w rozwiercaniu wykończeniowym – (0,05÷0,5) mm [16]. Ze wzrostem średnicy otworu zwiększają się naddatki obróbkowe. Różnica średnic kolejnych narzędzi stosowanych w obróbce otworu jest równa podwójnej wartości naddatku na stronę. Chropowatość powierzchni po rozwiercaniu wstępnym wynosi  $Ra = (2,5 \div 10) \mu m$ , a po rozwiercaniu wykończeniowym –  $Ra = (0,32 \div 1,25) \mu m$  [37].

Narzędzia do rozwiercania nazywane są rozwiertakami. Do rozwiercania wstępnego służą rozwiertaki zdzieraki, a do wykończeniowego – wykańczaki. Rozwiertaki można klasyfikować, biorąc pod uwagę różne kryteria:

- ze względu na kształt obrabianego otworu, rozróżnia się rozwiertaki do otworów walcowych i rozwiertaki do otworów stożkowych,
- ze względu na możliwość zmiany średnicy, rozwiertaki dzieli się na stałe i nastawne (przeważnie rozprężne),
- ze względu na postać rowka wiórowego, są rozwiertaki z rowkami prostymi i śrubowymi,
- ze względu na sposób mocowania, rozróżnia się rozwiertaki trzpieniowe i nasadzane (o średnicy powyżej 32 mm),
- ze względu na stopień mechanizacji pracy, rozwiertaki dzieli się na ręczne i maszynowe.

Przykładowe rozwiertaki pokazano na rys. 5.24.



Rys. 5.24. Widok rozwiertaka zdzieraka trzpieniowego (a), rozwiertaka wykańczaka trzpieniowego (b) i rozwiertaka nasadzanego (c): 1 – część robocza, 2 – część łącząca, 3 – część chwytna, 4 – gniazdo

Klasyczne rozwiertaki są narzędziami wieloostrzowymi. Jednak coraz większym zainteresowaniem cieszą się rozwiertaki jednoostrzowe, w których

można bardzo dokładnie ustalić położenie ostrza w kierunku promieniowym, co zapewnia dużą dokładność rozwiercanego otworu.

## 5.5. Frezowanie

### 5.5.1. Charakterystyka i odmiany frezowania

Frezowanie jest sposobem obróbki wiórowej, charakteryzującym się tym, że wieloostrowe narzędzie, zwane frezem, wykonuje ruch obrotowy, a ruch posuwowy wykonuje najczęściej przedmiot obrabiany, rzadziej narzędzie. Ruch posuwowy może być prostoliniowy lub krzywoliniowy.

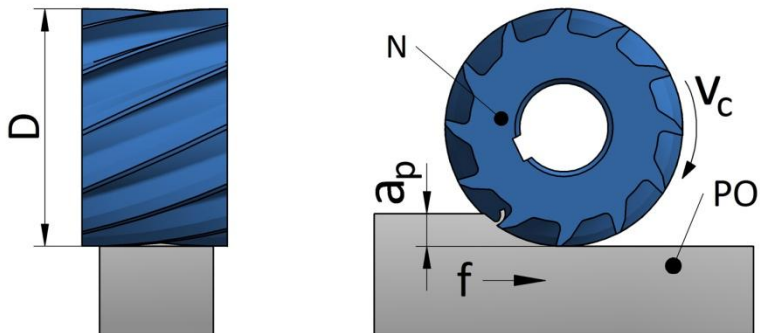
W procesie frezowania ostrza narzędzia skrawają tylko na części obwodu frezu, co oznacza, że skrawanie poszczególnymi ostrzami jest cyklicznie przerywane. Wadą takiej pracy ostrza są zmienne siły skrawania, które wywołują zmienne naprężenia w materiale ostrza, co może prowadzić do przyspieszonego zużycia ostrza wskutek zmęczenia materiału, a także do występowania drgań w układzie OUPN<sup>2</sup>. Pozytywnym skutkiem okresowej pracy ostrza jest obniżenie jego temperatury wskutek chłodzenia w czasie, gdy ostrze nie skrawa, jednakże wahania temperatury mogą spowodować zmęczenie cieplne materiału ostrza. Warstwa skrawana frezowaniem charakteryzuje się zmiennością przekroju poprzecznego na jej długości.

W zależności od położenia osi frezu względem powierzchni obrobionej różni się:

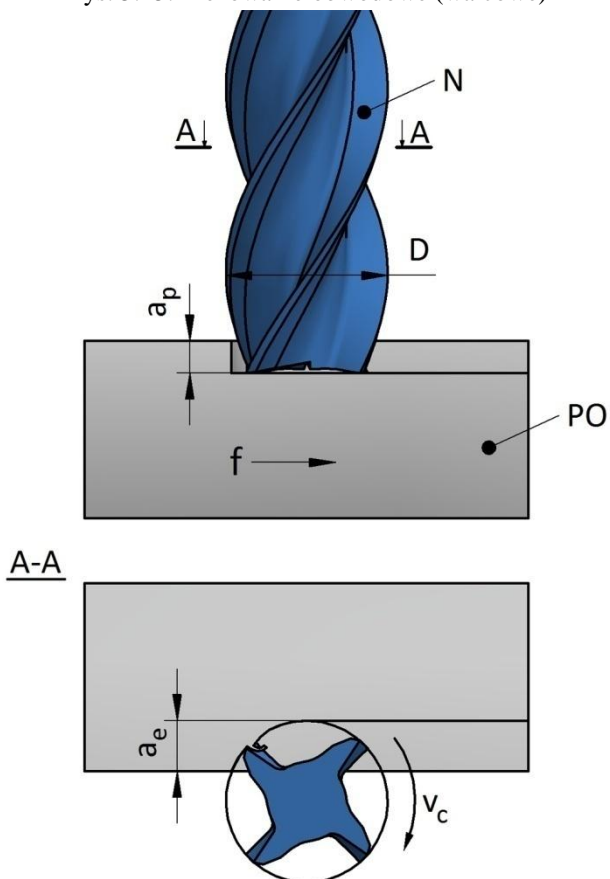
- frezowanie obwodowe (walcowe), gdy oś frezu jest równoległa do powierzchni obrobionej (rys. 5.25),
- frezowanie czołowe, gdy oś frezu jest prostopadła do powierzchni obrobionej (rys. 5.26),
- frezowanie skośne, gdy kąt między osią frezu a obrobioną powierzchnią jest większy od  $0^\circ$  a mniejszy od  $90^\circ$  (rys. 5.27).

---

<sup>2</sup> Skrót od słów: Obrabiarka-Uchwyt-Przedmiot-Narzędzie

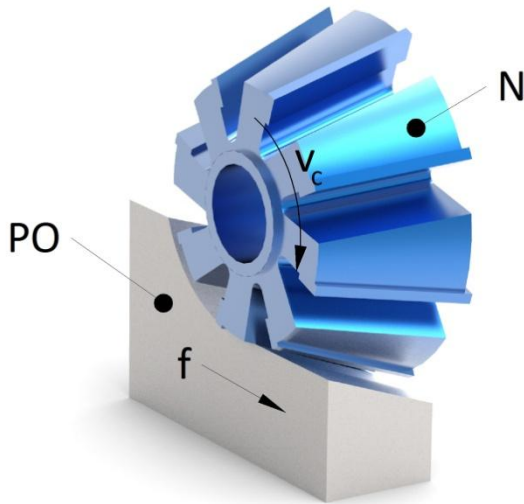


Rys. 5.25. Frezowanie obwodowe (walcowe)



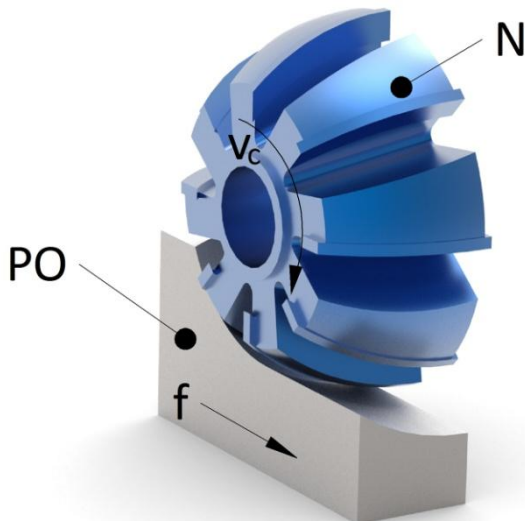
Rys. 5.26. Frezowanie czołowe





Rys. 5.27. Frezowanie skośne

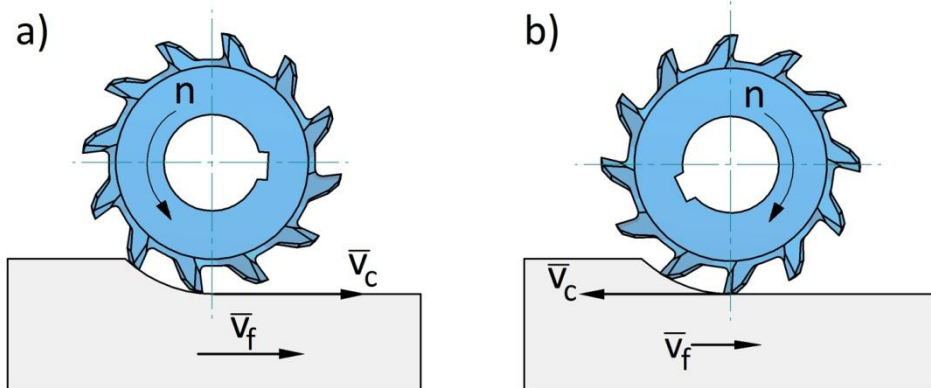
Przedstawiona klasyfikacja dotyczy frezowania płaszczyzn. W przypadku frezowania powierzchni kształtowych kąt między osią frezu a stycznymi do linii przecięcia powierzchni obrabianej z płaszczyzną przechodzącą przez oś frezu i prostopadłą do kierunku ruchu posuwowego jest różny dla poszczególnych punktów tej linii (rys. 5.28).



Rys. 5.28. Frezowanie kształtowe

W zależności od skojarzenia ruchu głównego i posuwowego frezowanie dzieli się na:

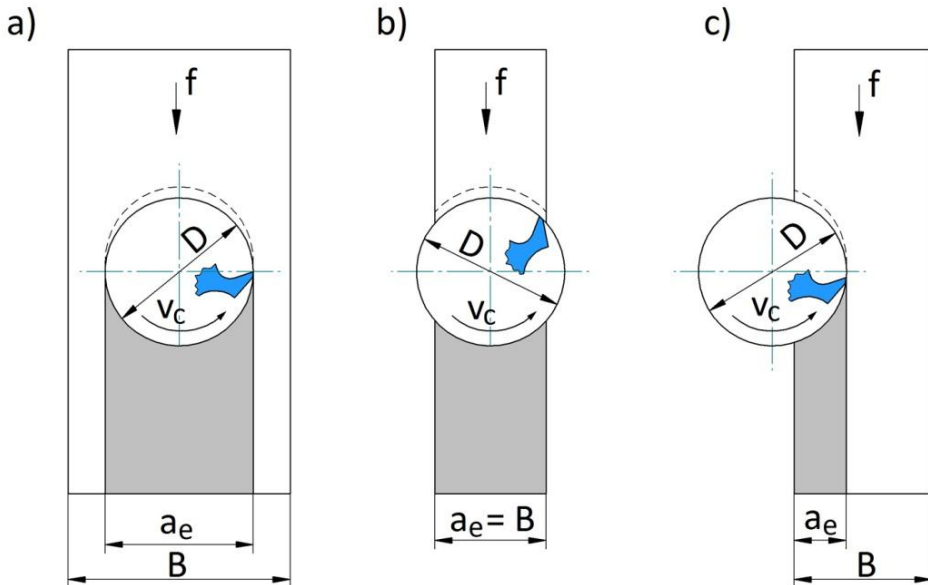
- współbieżne, gdy zwrot wektora prędkości skrawania  $v_c$  w punkcie położonym na linii przecięcia powierzchni przejściowej z powierzchnią obrabianą jest zgodny ze zwrotem wektora prędkości ruchu posuwowego  $v_f$  (rys. 5.29a),
- przeciwbieżne, gdy zwrot wektora prędkości skrawania  $v_c$  w punkcie położonym na linii przecięcia powierzchni przejściowej z powierzchnią obrabianą jest przeciwny do zwrotu wektora prędkości ruchu posuwowego  $v_f$  (rys. 5.29b).



Rys. 5.29. Frezowanie: a) współbieżne, b) przeciwbieżne

Ze względu na położenie frezu względem przedmiotu obrabianego frezowanie czołowe może być:

- pełne, gdy szerokość skrawania  $a_e$  jest równa średnicy frezu  $D$ , a szerokość przedmiotu obrabianego  $B$  jest nie mniejsza od średnicy frezu (rys. 5.30a),
- niepełne symetryczne, gdy szerokość skrawania  $a_e$  jest mniejsza od średnicy frezu  $D$ , położenie frezu jest symetryczne względem przedmiotu obrabianego, a szerokość przedmiotu obrabianego  $B$  jest równa szerokości skrawania (rys. 5.30b),
- niepełne niesymetryczne, gdy szerokość skrawania  $a_e$  jest mniejsza od średnicy frezu  $D$ , położenie frezu jest niesymetryczne względem przedmiotu obrabianego, a szerokość przedmiotu obrabianego  $B$  jest większa od szerokości skrawania (rys. 5.30c).



Rys. 5.30. Frezowanie czołowe: a) pełne, b) niepełne symetryczne, c) niepełne niesymetryczne

### 5.5.2. Frezy

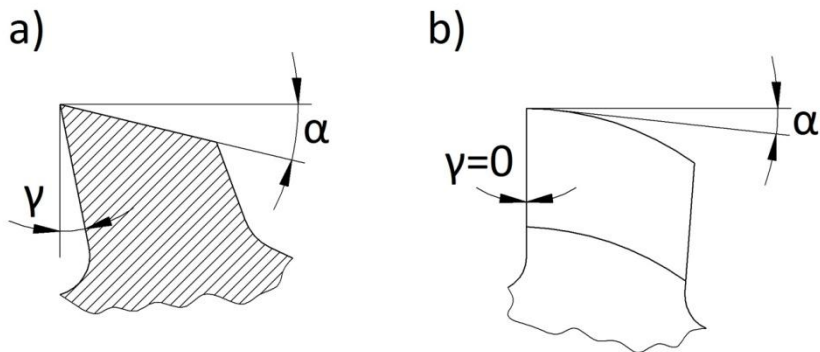
Frezy są narzędziami o bardzo zróżnicowanej budowie, a w związku z tym, można wyodrębnić liczne odmiany tych narzędzi. Podziału frezów można dokonać stosując różne kryteria:

1. Ze względu na budowę, frezy dzieli się na :

- jednolite (monolityczne) – wykonane w całości z jednego materiału, na ogół ze stali szybko tnącej lub węglików spiekanych (najczęściej są to frezy nasadzone lub trzpieniowe o małej średnicy),
- łączone w sposób trwały – są frezy, których część robocza ze stali szybko tnącej jest zgrzewana z częścią chwytową ze stali konstrukcyjnej, albo płytki z węglików spiekanych są lutowane w gniazdach korpusu narzędzia,
- składane – są to frezy z wymiennymi płytkami z węglików spiekanych (najczęściej), a także z cermetali, ceramiki narzędziowej i materiałów super twardych, mocowanymi mechanicznie w korpusie albo w głowicy frezowej.

2. Ze względu na kształt ostrza, rozróżnia się:

- frezy ścinowe (rys. 5.31a),
- frezy zataczane, których powierzchnia przyłożenia najczęściej ukształtowana jest według spirali Archimedesesa (rys. 5.31b).



Rys. 5.31. Ostrze frezu ścinowego (a) i zataczanego (b)

3. Ze względu na kierunek pracy, frezy o śrubowej linii ostrza mogą być:

- prawotnące, gdy kierunek zwojów głównej krawędzi skrawającej jest taki jak w śrubie prawozwójnej,
- lewotnące, gdy kierunek zwojów głównej krawędzi skrawającej jest taki jak w śrubie lewozwójnej.

4. Ze względu na rozmieszczenie ostrzy, rozróżnia się:

- frezy walcowe – ostrza rozmieszczone na powierzchni obwodowej frezu,
- frezy czołowe – ostrza położone na powierzchni czołowej (do frezowania wglębnego),
- frezy walcowo – czołowe, których ostrza usytuowane są zarówno na powierzchni obwodowej jak i czołowej, przy czym krawędzie na obwodzie są głównymi krawędziami skrawającymi.

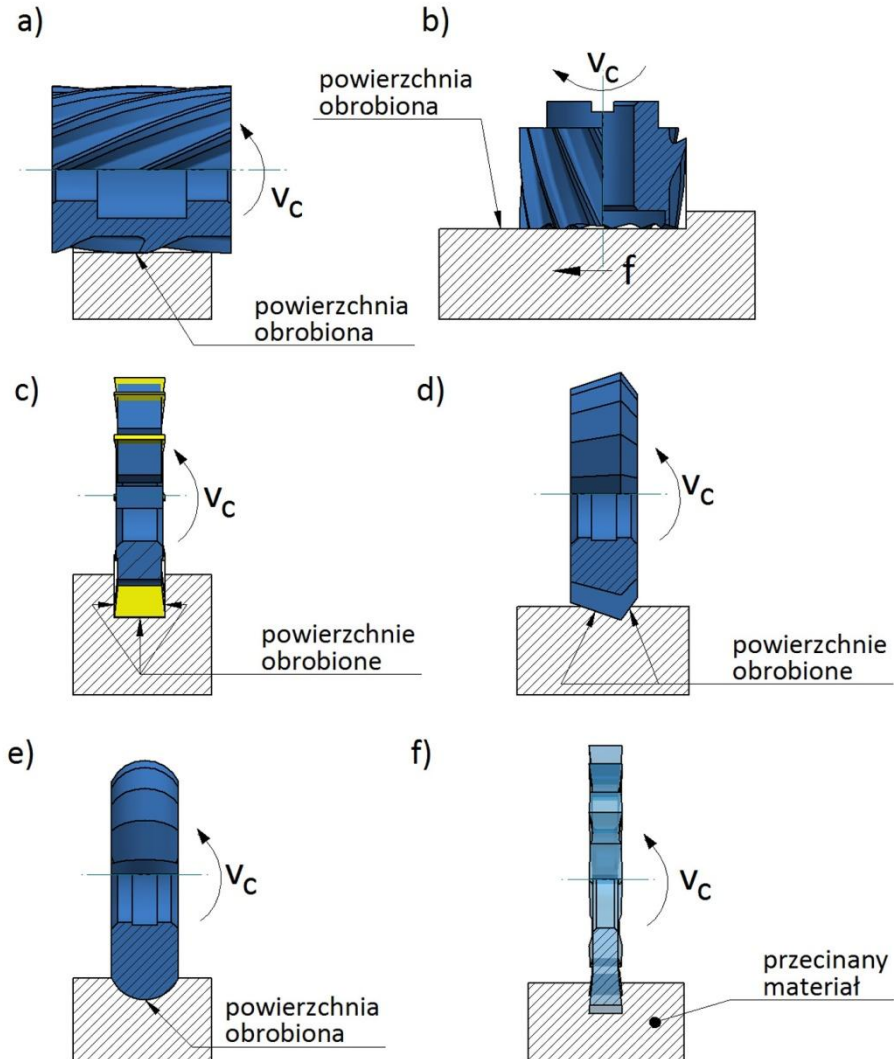
5. Ze względu na sposób mocowania, frezy mogą być:

- trzpieniowe – z chwytem walcowym lub stożkowym,
- nasadzone (o dużych średnicach).

Na rys. 5.32 przedstawiono przykłady obróbki różnych powierzchni frezami nasadzonymi:

- płaszczyzn – frezem walcowym (rys. 5.32a) lub walcowo-czołowym (rys. 5.32b),

- rowków prostokątnych – frezem tarczowym trzystronnym z ostrzami prostymi (rys. 5.32c),
- rowków trójkątnych – frezem kątowym niesymetrycznym (rys. 32d),



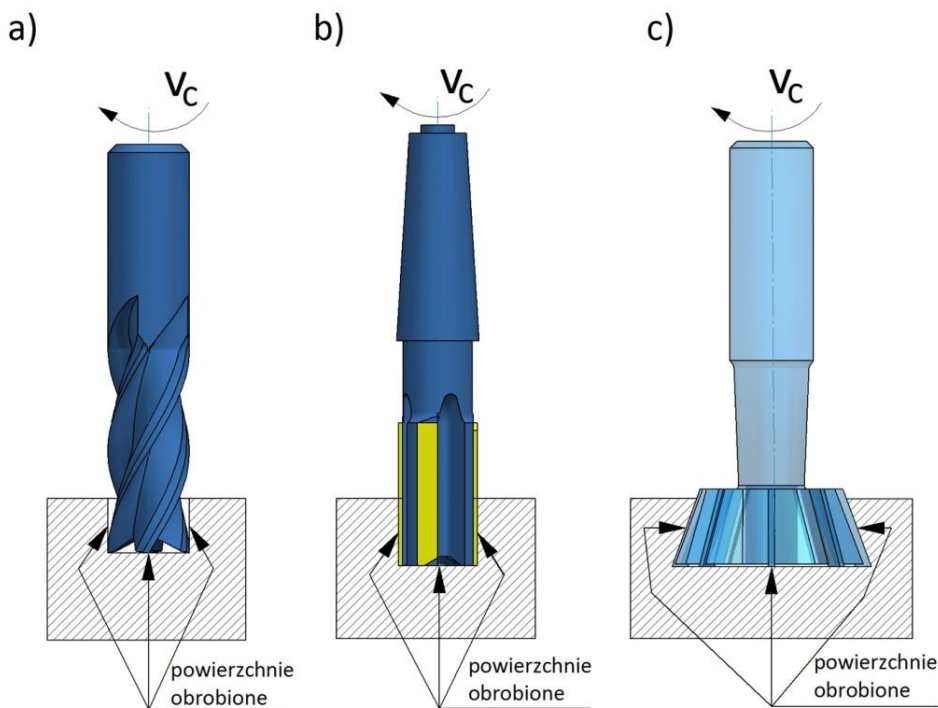
Rys. 5.32. Przykłady obróbki różnych powierzchni frezami nasadzonymi (opis w tekście)

- rowków półokrągłych – frezem krążkowym półokrągłym wypukłym (rys. 32e),
- przecinanie materiału – frezem tarczowym piłkowym (rys. 32e).

Natomiast przykłady obróbki różnych powierzchni frezami trzpieniowymi uwidoczniiono na rys. 5.33:

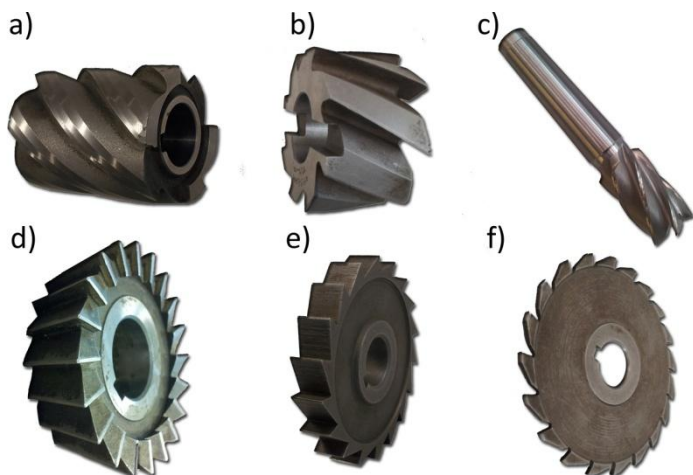
- rowków prostokątnych – frezem trzpieniowym walcowo-czołowym monolitycznym z chwytem walcowym (rys. 5.33a) oraz frezem trzpieniowym z ostrzami z węglików spiekanych z chwytem stożkowym (rys. 5.33b),
- rowków trapezowych – frezem trzpieniowym kątowym wewnętrznym (rys. 5.33c).

Kierunek ruchu posuwowego, wykonywanego przez przedmiot obrabiany, w przykładach przedstawionych na rys. 5.32a, c – f oraz 5.33, jest prostopadły do płaszczyzny rysunku.



Rys. 5.33. Przykłady obróbki różnych powierzchni frezami trzpieniowymi (opis w tekście)

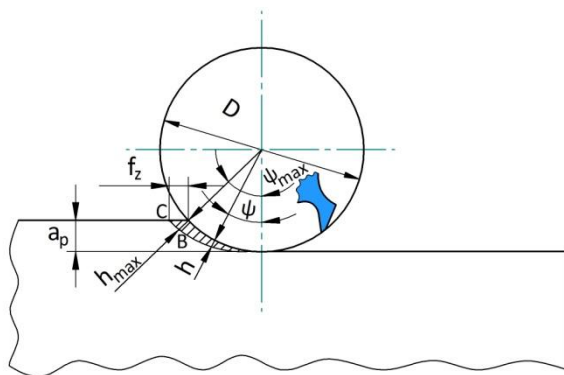
Widok wybranych frezów nasadzanych i trzpieniowych przedstawiono na rys. 5.34.



Rys. 5.34. Przykładowe frezy: a) walcowy nasadzany, b) walcowo – czołowy nasadzany, c) walcowo – czołowy trzpieniowy, d) kątowy nasadzany, e) tarczowy nasadzany, f) piłkowy nasadzany

### 5.5.3. Geometryczne i technologiczne parametry frezowania

W procesie frezowania grubość warstwy skrawanej jednym ostrzem zmienia się wraz ze zmianą położenia ostrza narzędzia względem powierzchni przejściowej obrabianego przedmiotu. Geometrię warstwy skrawanej w procesie frezowania obwodowego frezem o prostej linii ostrza przedstawiono na rys. 5.35. Podczas frezowania przeciwbieżnego w miarę usuwania warstwy skrawanej jej grubość zwiększa się, a przy frezowaniu współbieżnym – zmniejsza się.



Rys. 5.35. Geometria warstwy skrawanej w obróbce frezowaniem obwodowym

Przyjęto, że tory sąsiednich ostrzy narzędzia mają kształt łuków okręgów o średnicy równej średnicy frezu  $D$  (jest to uproszczenie, gdyż w rzeczywistości tory te są cykloidami). W każdym cyklu skrawania danym ostrzem kąt pracy ostrza  $\psi$  wzrasta od zera do wartości maksymalnej  $\psi_{max}$ , nazywanej kątem styku. Podczas frezowania przeciwbieżnego wzrostowi kąta  $\psi$  odpowiada zwiększanie się grubości warstwy skrawanej  $h$  do osiągnięcia wartości maksymalnej  $h_{max}$  dla kąta  $\psi_{max}$ . Przyjmując odcinek łuku BC za prostą (rys. 5.35) można napisać, że:

$$h_{max} = f_z \sin \psi_{max} \quad (5.11)$$

gdzie:  $f_z$  – posuw na ostrze.

Podobnie dla dowolnego kąta  $\psi$  chwilową grubość warstwy skrawanej  $h$  można obliczyć z zależności:

$$h = f_z \sin \psi \quad (5.12)$$

Korzystając z zależności geometrycznych widocznych na rys. 5.35, wzór (5.11) można przekształcić do postaci:

$$h_{max} = 2f_z \sqrt{\frac{a_p}{D} \left(1 - \frac{a_p}{D}\right)} \quad (5.13)$$

gdzie:  $a_p$  – głębokość skrawania.

Podczas skrawania frezem o prostej linii ostrza szerokość warstwy skrawanej  $b$  jest równa szerokości frezowania  $a_e$ . Zatem pole przekroju warstwy skrawanej jednym ostrzem można wyrazić zależnością:

$$A = bh = a_e f_z \sin \psi \quad (5.14)$$

Pole przekroju warstwy skrawanej przez wszystkie ostrza jednocześnie skrawające  $A_c$  jest sumą pól warstwy skrawanej poszczególnymi ostrzami  $A_i$  (w danej chwili):

$$A_c = \sum_{i=1}^k A_i \quad (5.15)$$

gdzie:  $k$  – liczba ostrzy jednocześnie skrawających.



Obróbka frezami o prostej linii ostrza wiąże się ze znacznymi wahaniami sił skrawania. Aby te wahania zmniejszyć stosuje się frezy o ostrzach śrubowych. W takim przypadku we wzorach na pole przekroju warstwy skrawanej musi być uwzględniony kąt pochylenia krawędzi skrawającej  $\lambda_s$  [7, 22, 37].

Podobną analizę geometrii warstwy skrawanej można przeprowadzić również dla frezowania czołowego [7, 22, 37].

Podstawowymi parametrami technologicznymi, które należy dobrać podczas projektowania warunków obróbki frezowaniem są: głębokość skrawania  $a_p$ , szerokość skrawania  $a_e$ , prędkość skrawania  $v_c$ , posuw na ostrze  $f_z$ . Ponadto parametrami pracy maszyny technologicznej jest prędkość obrotowa wrzeciona  $n$  oraz posuw minutowy  $f_t$ . Wartość prędkości obrotowej można obliczyć na podstawie wzoru (2.1), a posuw minutowy można wyznaczyć z zależności:

$$f_t = f_z z n, \text{ mm/min} \quad (5.16)$$

gdzie:  $z$  – liczba ostrzy frezu.

Czas maszynowy frezowania oblicza się, korzystając z zależności (2.10) i (2.11). Dobięg narzędzia  $l_d$  oblicza się dla poszczególnych odmian frezowania z zależności geometrycznych wynikających z położenia narzędzia względem przedmiotu obrabianego. Wzory na dobięg narzędzia dla wybranych odmian frezowania mają postać:

- dla frezowania obwodowego (rys. 5.36a):

$$l_d = \sqrt{a_p(D - a_p)} \quad (5.17)$$

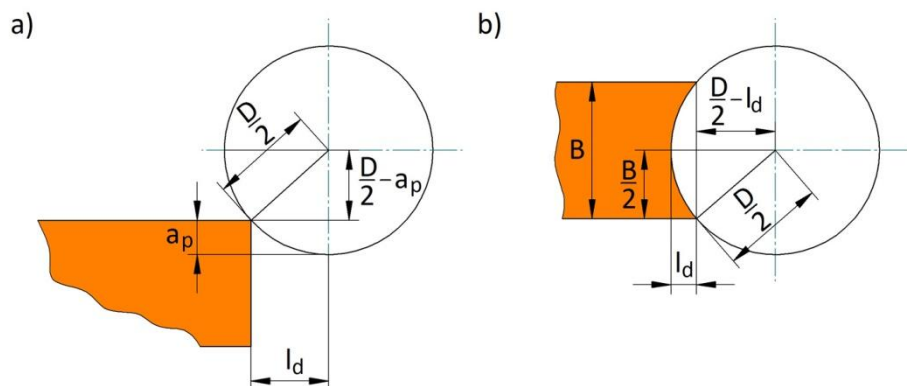
- dla frezowania czołowego niepełnego symetrycznego (rys. 5.36b):

$$l_d = \frac{D - \sqrt{D^2 - B^2}}{2} \quad (5.18)$$

gdzie:  $D$  – średnica frezu,

$a_p$  – głębokość skrawania,

$B$  – szerokość przedmiotu obrabianego.



Rys. 5.36. Rysunek pomocniczy do obliczania dobiegu w obróbce frezowaniem obwodowym (a) oraz czołowym niepełnym symetrycznym (b)

Frezowanie jest jednym z najczęściej stosowanych sposobów obróbki wiórowej (obok toczenia). Szerokie zastosowanie frezowania wynika z licznych zalet tej obróbki, do których można zaliczyć:

- możliwość obróbki różnych powierzchni: płaszczyzn, różnego rodzaju rowków (np. prostokątnych, trójkątnych, półokrągłych), powierzchni walcowych (frezotoczenie), powierzchni o złożonym kształcie, także możliwość obróbki gwintów i kół zębatych<sup>3</sup> oraz przecinania materiału,
- bardzo dużą wydajność,
- dużą dokładność i małą chropowatość obrobionej powierzchni (frezowanie dokładne i bardzo dokładne).

Zastosowanie wieloosiowych maszyn technologicznych sterowanych numerycznie umożliwia wytwarzanie (głównie frezowaniem) elementów o bardzo złożonym kształcie, tzw. elementów integralnych, które w czasie eksploatacji spełniają funkcję zespołów składających się z kilkadziesiątu, a nawet z kilkuset części. Obróbka elementów integralnych wymaga usunięcia dużej objętości materiału. Aby zwiększyć wydajność objętościową skrawania, a tym samym, skrócić czas obróbki, stosuje się obróbkę wysokowydajną, określaną akronimem HPC (skrót od ang. High Performance Cutting).

<sup>3</sup> Frezowanie gwintów i kół zębatych będzie omówione w dalszych rozdziałach.

Wzrost dokładności i zmniejszenie chropowatości powierzchni, przy jednoczesnym wzroście wydajności powierzchniowej skrawania, można uzyskać stosując obróbkę z dużą prędkością skrawania, zwykle określaną jako HSC – od słów angielskich High Speed Cutting [18, 37, 38].

W obróbce HSC stosowane są prędkości skrawania kilkakrotnie większe niż w obróbce konwencjonalnej, co jest możliwe przy zastosowaniu narzędzi o zwartej konstrukcji i wykonanych z nowoczesnych materiałów narzędziowych oraz obrabiarek wyposażonych w szybkoobrotowe wrzeciona. Metody HPC oraz HSC są stosowane najczęściej w obróbce frezowaniem.

## 6. SKRAWALNOŚĆ MATERIAŁÓW

### 6.1. Określenie i wskaźniki skrawalności

Materiały do wytwarzania różnych przedmiotów dobierane są na podstawie zespołu właściwości tych materiałów istotnych z punktu widzenia spełniania przez te przedmioty funkcji eksploatacyjnych, a także ze względu na łatwość wykonania tych przedmiotów. W przypadku przedmiotów wytwarzanych metodami obróbki skrawaniem ważną cechą materiałów, z których przedmioty te są wykonane, jest ich podatność na obróbkę wiórową („łatwość” skrawania), która jest określana mianem skrawalności. Stosowanie materiałów charakteryzujących się dobrą skrawalnością często umożliwia zmniejszenie czasu obróbki, a tym samym – zwiększenie wydajności, a także zmniejszenie kosztów wytwarzania.

Skrawalność materiału zależy od jego składu chemicznego oraz struktury. Czynniki te wpływają na właściwości materiału mające istotne znaczenie w procesie skrawania, takie jak wytrzymałość doraźna, granica plastyczności, twardość, podatność na umocnienie, przewodność cieplna, ciepło właściwe i inne. Analizując skrawalność danego materiału należy uwzględnić sposób obróbki skrawaniem, materiał i kształt ostrza narzędzia, stan techniczny obrabiarki oraz warunki technologiczne obróbki.

Do oceny ilościowej skrawalności danego materiału stosuje się wskaźniki skrawalności. Rozróżnia się wskaźniki bezwzględne i względne.

Do podstawowych bezwzględnych wskaźników skrawalności należy zaliczyć:

- prędkość skrawania (okresową) przy założonym okresie trwałości ostrza lub trwałość ostrza przy założonej prędkości skrawania,
- opory skrawania, określane przy pomocy siły, momentu lub mocy skrawania,
- jakość powierzchni obrobionej, zwykle określanej za pomocą parametrów chropowatości powierzchni,
- kształt powstających wiórów.

Jednym z najważniejszych wskaźników skrawalności jest okres trwałości ostrza, z którym związane jest zużywanie się narzędzi skrawających, co ma znaczący wpływ na koszty wytwarzania. W warunkach przemysłowych często zamiast okresu trwałości ostrza, jako wskaźnik skrawalności, przyjmowana jest okresowa prędkość skrawania, tj. prędkość, z jaką można skrawać dany materiał,

w określonych warunkach technologicznych, przy założonym okresie trwałości ostrza, np. sześćdziesięciu minut (po tym czasie następuje zużycie ostrza).

Kolejnymi wskaźnikami skrawalności, związanymi z oporem skrawania, są: składowe całkowitej siły skrawania, moment skrawania i moc skrawania. Wskaźniki te mają duże znaczenie ze względu na wytrzymałość narzędzia, wytrzymałość poszczególnych zespołów obrabiarki (na przykład, żeby nie był przekroczony dopuszczalny moment na wrzecionie), sztywność układu OUPN oraz energię zużywaną na usunięcie określonej objętości obrabianego materiału.

Jakość obrobionej powierzchni jest pojęciem obejmującym chropowatość i falistość powierzchni oraz wady powierzchniowe. W praktyce najczęściej jakość powierzchni ocenia się na podstawie parametrów chropowatości powierzchni  $R_a$  i  $R_z$ .

Kształt wiórów jest również ważnym wskaźnikiem skrawalności ze względu na zagrożenie uszkodzeniem narzędzia i przedmiotu obrabianego, niebezpieczeństwo spowodowania wypadku przy pracy oraz koszty magazynowania i transportu wiórów. W zależności od postaci i długości, wióry dzielone są na niekorzystne, dopuszczalne i pożądane [28].

Uzserowanie poszczególnych wskaźników skrawalności pod względem ich znaczenia zależy od rodzaju i stopnia automatyzacji obróbki skrawaniem. Przykładowo, w obróbce zgrubnej najważniejszy jest okres trwałości ostrza i opory skrawania a w obróbce dokładnej – jakość obrobionej powierzchni. Kształt wiórów większe znaczenie ma w obróbce zautomatyzowanej, która wymaga sprawnego odprowadzania wiórów ze strefy skrawania, niż w obróbce maszynowej niezautomatyzowanej, podczas której operator może ręcznie „wspomagać” odprowadzanie wiórów.

Poza wymienionymi podstawowymi wskaźnikami skrawalności (użytkowymi) stosowane są również dodatkowe bezwzględne wskaźniki skrawalności, do których można zaliczyć:

- temperaturę skrawania,
- współczynnik tarcia,
- współczynnik spęczenia wióra,
- amplitudę i częstotliwość drgań,
- właściwości warstwy wierzchniej.

Względne wskaźniki skrawalności są liczbami niemianowanymi (mogą być wyrażone w procentach), które umożliwiają ocenę skrawalności badanego materiału ze względu na określony wskaźnik bezwzględny w odniesieniu do wartości

tego wskaźnika dla materiału wzorcowego. Wskaźniki te oblicza się na podstawie wzorów [29, 37]:

- względny wskaźnik okresowej prędkości skrawania:

$$k_{v_{cT}} = \frac{v_{cT}}{v_{cT_w}} \quad (6.1)$$

- względny wskaźnik siły skrawania:

$$k_{F_c} = \frac{F_{c_w}}{F_c} \quad (6.2)$$

- względny wskaźnik momentu skrawania:

$$k_{M_c} = \frac{M_{c_w}}{M_c} \quad (6.3)$$

- względny wskaźnik mocy skrawania:

$$k_{P_c} = \frac{P_{c_w}}{P_c} \quad (6.4)$$

- względny wskaźnik chropowatości powierzchni obrobionej:

$$k_R = \frac{R_w}{R} \quad (6.5)$$

We wzorach (6.1)÷(6.5) symbole  $v_{cT}$ ,  $F_c$ ,  $M_c$ ,  $P_c$ ,  $R$  oznaczają odpowiednio okresową prędkość skrawania, siłę skrawania, moment skrawania, moc skrawania i parametr chropowatości powierzchni dla materiału badanego, a symbole  $v_{cT_w}$ ,  $F_{c_w}$ ,  $M_{c_w}$ ,  $P_{c_w}$ ,  $R_w$  – te same wielkości ale dla materiału wzorcowego.

Jeżeli wskaźnik skrawalności  $k > 1$ , to oznacza, że badany materiał ma skrawalność lepszą niż materiał wzorcowy, natomiast gdy  $k < 1$  – gorszą.

Orientacyjne wartości względnego wskaźnika skrawalności, przyjmując jako kryterium okresową prędkość skrawania, dla wybranych materiałów, przedstawiono w tabeli 6.1. Jako materiał wzorcowy została przyjęta stal niestopowa C45.

Tabela 6.1. Względny współczynnik skrawalności  $k_{vcT}$  dla wybranych materiałów [7, 14]

Materiał obrabiany	Względny współczynnik skrawalności $k_{vcT}$
Stal C45	1,0
Stale automatowe	1,2÷1,5
Stale niestopowe konstrukcyjne	0,8÷1,0
Stale austenityczne	0,4÷0,6
Odporne na korozję stale wysokochromowe ferrytyczne i martenzytyczne	0,65
Żeliwo szare	0,9÷1,0
Żeliwo ciągliwe	0,7÷0,9
Żeliwo sferoidalne	0,8÷1,5
Mosiądz	2,0÷3,0
Brązy	0,7÷8,0
Duraluminium	4,0÷6,0
Stopy tytanu	0,15÷0,4
Żarowytrzymałe stopy do przeróbki plastycznej na osnowie Fe – Ni oraz Ni	0,075÷0,16

## 6.2. Skrawalność wybranych materiałów

### 6.2.1. Skrawalność stali

Głównymi czynnikami wpływającymi na skrawalność stali, która jest stopem żelaza z węglem (do 2,06%) i innymi pierwiastkami, jest skład chemiczny i struktura. Od czynników tych uzależnione są właściwości stali, takie jak wytrzymałość, twardość czy przewodnictwo cieplne, które oddziałują na skrawalność.

Skrawalność stali w dużym stopniu zależy od zawartości węgla. Wzrost zawartości węgla wpływa na zwiększenie wytrzymałości i twardości stali, co powoduje pogorszenie skrawalności ze względu na szybsze zużywanie się ostrza i wzrost sił skrawania oraz poprawę skrawalności ze względu na zmniejszenie chropowatości powierzchni. Podobnie jak węgiel na właściwości wytrzymało-

ściowe stali wpływa mangan. Niewielki dodatek manganu do stali niskowęglowych powoduje poprawę ich skrawalności.

Niekorzystnie na skrawalność stali wpływa krzem ze względu na powstawanie twardej krzemionki ( $\text{SiO}_2$ ), co przyspiesza zużycie ostrzy narzędzi. Tylko niewielki dodatek krzemu (do 1%) może poprawić skrawalność stali poprzez zmniejszenie jej plastyczności.

Poprawę skrawalności stali powoduje dodatek siarki, która zwiększa łamliwość wiórów i zmniejsza chropowatość powierzchni. Korzystnie na skrawalność oddziałuje też obecność w składzie chemicznym stali niewielkiej ilości ołowiu i cynku; pierwiastki te zmniejszają tarcie w strefie skrawania.

Dodatki stopowe, takie jak nikiel, chrom, wanad, wolfram i molibden, pogarszają skrawalność stali, ponieważ tworzą twarde węgliki i roztwory w ferrycie. Również niekorzystnym ze względu na skrawalność dodatkiem jest aluminium, które tworzy twardy tlenek  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Zmiany właściwości stali następują wskutek obróbki cieplnej, są one konsekwencją przemian strukturalnych. Powstające składniki strukturalne charakteryzują się różnymi właściwościami, co ma wpływ na skrawalność.

Składnikiem dobrze skrawalnym ze względu na trwałość ostrza i opory skrawania jest ferryt (roztwór stały węgla w żelazie  $\alpha$ ), który odznacza się małą twardością i dużą ciągliwością. Duże odkształcenia plastyczne skrawanego materiału powodują powstawanie narostu na ostrzu narzędzia, co ujemnie wpływa na chropowatość obrobionej powierzchni. Ferryt wpływa też niekorzystnie na kształt wiórów, gdyż tworzy wióry długie, trudne do łamania.

Składnikiem strukturalnym często występującym w stalach jest perlit, który jest eutektoidalną mieszaniną, składającą się z płytek cementytu rozmieszczonych w osnowie ferrytu. W zależności od grubości płytek cementytu rozróżnia się perlit gruby i drobny. Perlit gruby, w porównaniu z drobnym, jest lepszy do skrawania ze względu na siły skrawania, a gorszy ze względu na chropowatość obrobionej powierzchni.

Martenzyt, który jest silnie przesyconym roztworem węgla w żelazie  $\alpha$ , charakteryzuje się bardzo złą skrawalnością. Przedmioty o strukturze martenzytycznej obrabia się głównie szlifowaniem. Metodami wiórowymi można skrawać martenzyt narzędziami o ostrzach ceramicznych lub z regularnego azotku boru, stosując małą głębokość skrawania i posuw.

Stale zawierające austenit, który jest roztworem stałym międzywęzłowym węgla w żelazie  $\gamma$ , są źle skrawalne. W temperaturze otoczenia austenit występuje tylko w stalach zawierających duże ilości niklu, chromu i manganu. Austenit



jest bardzo plastyczny i wykazuje skłonność do umacniania się oraz ma małe przewodnictwo cieplne. Właściwości te są przyczyną złej skrawalności stali austenitycznych. Do źle skrawalnych składników strukturalnych zalicza się również sorbit i troostyt.

Cementyt (węglík żelaza), który jest fazą międzymetaliczną żelaza z węglem, charakteryzuje się bardzo dużą twardością i kruchością, co przesądza o jego bardzo złej skrawalności. Składnik ten występuje w większości stali; wielkość jego ziaren oraz ich rozmieszczenie ma wpływ na skrawalność, a głównie na zużywanie się ostrza i chropowatość powierzchni.

### 6.2.2. Skrawalność żeliwa

Żeliwo, które jest stopem żelaza z węglem i innymi pierwiastkami o większej niż w stalach zawartości węgla (około 2÷4%), charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem właściwości, a w związku z tym, również duże są różnice skrawalności poszczególnych gatunków żeliwa.

W zależności od postaci, w jakiej występuje węgiel, żeliwo dzieli się na:

- szare – węgiel w postaci grafitu,
- połowiczne (pstre) – węgiel w postaci grafitu jak i cementytu,
- białe – węgiel w postaci cementytu.

Najlepszą skrawalność wykazuje żeliwo szare, w którym płytki grafitu znacznie ułatwiają poślizg w strefie skrawania, wskutek czego siły skrawania są ponad dwukrotnie mniejsze niż przy skrawaniu stali [21]. Wióry są krótkie (krucho materiał), powierzchnia obrobiona jest matowa.

Żeliwo białe skrawa się dużo gorzej w porównaniu z żeliwem szarym ze względu na obecność w jego strukturze bardzo twardego cementytu. Jeżeli jest konieczna obróbka to należy stosować narzędzia ceramiczne lub borazonowe. Skrawalność żeliwa połowicznego jest gorsza niż szarego a lepsza niż białego.

Wskutek celowych zabiegów technologicznych grafit może być doprowadzony do postaci kulistej, co pozwala otrzymać żeliwo sferoidalne, o lepszych właściwościach w porównaniu z żeliwem szarym. Skrawalność żeliwa sferoidalnego jest o około 30% gorsza niż szarego [21].

Na skrawalność żeliwa wpływa również wielkość ziarna. Żeliwa o strukturze gruboziarnistej są lepiej skrawalne w porównaniu z drobnoziarnistymi ze względu na lepszą łamliwość wióra i mniejsze siły skrawania, ale gorzej – ze względu na większą chropowatość powierzchni.

W żeliwach stopowych dodatek takich pierwiastków, jak nikiel, miedź, krzem, molibden, chrom, mangan, aluminium, kobalt, chrom, wolfram, siarka, wanad, wpływa na właściwości mechaniczne i strukturę osnowy. Skrawalność żeliw o strukturze osnowy perlitycznej i perlityczno – ferrytycznej jest dobra, o strukturze austenitycznej – średnia, a o strukturze martenzytycznej, bainitycznej oraz różnej z węglnikami – bardzo zła [8, 29].

Żeliwa stosowane są głównie do wytwarzania odlewów elementów maszyn. Odlewy charakteryzują się występowaniem naskórka odlewniczego, którego właściwości różnią się od właściwości rdzenia odlewu. Naskórek odlewniczy zwykle zanieczyszczony jest masą formierską lub rdzeniową oraz żużłem, a ponadto zawiera wtrącenia twardych składników, jak ledeburyt czy cementyt. Skrawanie naskórka odlewniczego jest znacznie trudniejsze niż warstw materiału pod naskórką z powodu bardzo intensywnego zużywania ostrza narzędzi.

### **6.2.3. Skrawalność stopów aluminium**

Ocenia się, że aluminium jest drugim metalem pod względem zastosowań technicznych (po żelazie) [8]. Czyste aluminium ma małe zastosowanie w budowie maszyn ze względu na małą wytrzymałość i twardość. Natomiast do wytwarzania elementów maszyn szeroko stosowane są stopy aluminium, które mają znacznie większą, w porównaniu z czystym aluminium, wytrzymałość i dobre właściwości plastyczne.

Najogólniej stopy aluminium dzieli się na:

- do obróbki plastycznej, w których zawartość pierwiastków stopowych zwykle nie przekracza 5% (najczęściej miedź, magnez, mangan, cynk, krzem),
- odlewnicze, w których zawartość pierwiastków stopowych jest znacznie większa i wynosi od 5% do 25% (głównie krzem, miedź, magnez, cynk, nikiel).

Zawartość składników stopowych oraz stan materiału znacząco wpływa na właściwości stopów aluminium, również na ich skrawalność. Ze względu na skrawalność stopy aluminium dzieli się na trzy grupy [24, 36]:

- I. Czyste aluminium i materiały niskostopowe do obróbki plastycznej.
- II. Umacniane zgniotem lub utwardzane wydzieleniowo stopy do obróbki plastycznej oraz stopy odlewnicze o zawartości krzemu poniżej 12%.
- III. Stopy odlewnicze zawierające ponad 12% krzemu.

Stopy aluminium grupy I i II są dobrze skrawalne ze względu na małe siły skrawania i niską temperaturę skrawania. Na obniżenie temperatury w strefie

skrawania wpływa szybkie odprowadzanie ciepła dzięki dużemu współczynnikowi przewodzenia ciepła, co ma też korzystny wpływ na trwałość ostrza.

Materiały grupy I cechuje mała twardość, duża ciągliwość, podatność na umocnienie zgniotem, skłonność adhezyjna do materiału narzędziowego. Podczas skrawania, zwłaszcza z małą prędkością, materiały te wykazują skłonność do tworzenia narostu na powierzchniach roboczych narzędzia i „mazania się”, co wpływa negatywnie na chropowatość obrobionej powierzchni. W przypadku narzędzi z rowkami wiórowymi są trudności z ewakuacją wiórów. Zalecane jest stosowanie dużych kątów natarcia, skrawanie z dużą prędkością i dobre smarowanie.

Stopy grupy II uważane są za najlepiej skrawalne. Wykazują mniejszą skłonność do „mazania się”, co korzystnie wpływa na chropowatość obrobionej powierzchni. Niewielki dodatek krzemu poprawia łamliwość wiórów, co ułatwia ich ewakuację.

Najtrudniej skrawalne są stopy aluminium o dużym stężeniu krzemu (nawet do 25%), zaliczane do grupy III. Duża zawartość krzemu wpływa na wzrost wytrzymałości, co powoduje szybsze zużywanie się ostrzy. Negatywny wpływ na skrawalność ma również naskórek odlewniczy, zwłaszcza w przypadku odlewów piaskowych. Obecność w naskórku jam skurczowych i różnych wtrąceń powoduje znaczne zmniejszenie trwałości ostrza, nawet do  $\frac{1}{4}$  trwałości ostrza przy skrawaniu bez naskórka [12].

Do obróbki stopów aluminium o małej zawartości krzemu stosowane są narzędzia ze stali szybko tnącej i węglików spiekanych, a do skrawania stopów wysokokrzemowych konieczne są narzędzia o ostrzach z węglików spiekanych, diamentu polikrystalicznego lub z powłokami diamentowymi. W przypadku skrawania z dużą prędkością frezami o niewielkiej średnicy zalecane są narzędzia monolityczne z węglików spiekanych.

Niekorzystnie na skrawalność stopów aluminium wpływa mały współczynnik sprężystości wzdłużnej, co powoduje duże odkształcenia przedmiotu obrabianego pod wpływem sił skrawania i sił zamocowania, oraz duży współczynnik rozszerzalności liniowej, co jest przyczyną dużych wahań wymiarów obrabianego przedmiotu pod wpływem zmian temperatury. Wymienione czynniki należy wziąć pod uwagę przy obróbce dokładnych elementów.

Ze stopów aluminium często wykonywane są elementy, zwłaszcza w przemyśle lotniczym, wymagające usunięcia nawet powyżej 90% objętości materiału półfabrykatu. W tej sytuacji intensywnie rozwijane są metody skrawania stopów aluminium z dużą wydajnością (HPC) oraz z dużą prędkością skrawania (HSC).

Wymagania konstruktorów, np. samolotów czy śmigłowców, często idą w kierunku maksymalnego zmniejszenia masy wytwarzanych części. Aby te wymagania spełnić stosowane są elementy cienkościenne, o grubości ścianek nawet mniejszej od 1 mm. W takich przypadkach niezbędna jest odpowiednia strategia obróbki, uwzględniająca podatność obrabianych elementów na odkształcenia i konieczność zapewnienia stabilności procesu skrawania [24].

#### 6.2.4. Skrawalność stopów magnezu

Magnez w czystej postaci jest bardzo rzadko stosowany, natomiast stopy magnezu (główne składniki stopowe to aluminium i cynk), które charakteryzują się bardzo małą masą właściwą (około  $1,8 \text{ g/cm}^3$ ) i korzystnymi właściwościami mechanicznymi, znajdują zastosowanie, między innymi, w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym. Stopy magnezu można uznać za dobrze skrawalne ze względu na:

- małe siły skrawania,
- dużą trwałość ostrza,
- małą chropowatość obrobionej powierzchni,
- tworzenie łatwo łamiących się wiórów.

Jednakże podczas obróbki skrawaniem stopów magnezu występują zagrożenia związane z:

- niebezpieczeństwem zapalenia się, szczególnie drobnych wiórów, z powodu niskiej temperatury zapłonu stopów magnezu ( $480\div 645^\circ\text{C}$ ),
- możliwością wystąpienia eksplozji pyłów magnezowych, wskutek reakcji magnezu z tlenem,
- możliwością wybuchu mieszaniny wodoru, wydzielającego się podczas reakcji magnezu z wodą, z tlenem z powietrza (należy unikać kontaktu magnezu z wodą).

Do skrawania stopów magnezu używane są narzędzia o ostrzach ze stali szybko tnącej, węglików spiekanych, polikrystalicznego diamentu oraz węglików spiekanych powlekanych diamentem [36], o dużym kącie natarcia i przyłożenia. Można stosować dość dużą prędkość skrawania i posuw, pamiętając, że temperatura skrawania nie może przekroczyć temperatury zapłonu magnezu. Stopy magnezu mogą być skrawane „na sucho”, z zastosowaniem bezwodnych cieczy obróbkowych oraz w środowisku mgły olejowej (technologia MQL) [24].

### 6.2.5. Skrawalność stopów tytanu

Stopy tytanu charakteryzują się bardzo dużą wytrzymałością właściwą (stosunek wytrzymałości do masy właściwej), dużą odpornością na korozję, dużą żarowytrzymałością, bardzo dobrą kompatybilnością biomedyczną. Jako dodatki w stopach tytanu stosuje się aluminium, wanad, molibden, chrom, wolfram, żelazo. Dzięki korzystnym właściwościom, stopy tytanu są cennym materiałem konstrukcyjnym, stosowanym w przemyśle lotniczym, stoczniowym, chemicznym i energetyce, a także do wytwarzania implantów.

Stopy tytanu są materiałem trudnoskrawalnym. Ocenia się, że pracochłonność obróbki skrawaniem stopów tytanu jest (2÷2,5) razy większa niż stali niestopowych [4]. Do przyczyn złej skrawalności stopów tytanu należy zaliczyć:

- małą przewodność cieplną, wynoszącą około 10%÷20% przewodności cieplnej stali [36],
- mały moduł sprężystości wzdłużnej, blisko dwukrotnie mniejszy niż dla stali,
- dużą energię powierzchniową, sprzyjającą powstawaniu narostu i zrostów tarciovych [29].

W procesie skrawania stopów tytanu następuje szybkie zużywanie się ostrza, spowodowane małą przewodnością cieplną tych stopów. Wydzielające się ciepło jest w małym stopniu przejmowane przez przedmiot obrabiany i wiór, tylko koncentruje się na krawędzi skrawającej i powierzchni natarcia, powodując wzrost temperatury ostrza.

Mały moduł sprężystości wzdłużnej niekorzystnie wpływa na dokładność obróbki, co jest szczególnie widoczne podczas obróbki przedmiotów cienkościennych. Podczas skrawania warstw o małej grubości, odkształcenia materiału obrabianego mogą spowodować, że ostrze nie będzie skrawać, tylko trzeć o powierzchnię przejściową.

Do skrawania stopów tytanu używane są głównie narzędzia o ostrzach z węglików wolframowych (grupy K), mogą być też z materiałów supertwardych (wówczas trzeba się liczyć z dużymi kosztami takich narzędzi). Prędkość skrawania stopów tytanu, która zależy od ich składu chemicznego, obróbki cieplnej, warunków chłodzenia i pozostałych parametrów technologicznych, może się wahać od około 20 m/min do ponad 160 m/min [36]. Podczas skrawania stopów tytanu powinno być stosowane obfite chłodzenie.

### **6.2.6. Skrawalność stopów miedzi**

Miedź, w związku z jej dużą przewodnością cieplną i elektryczną oraz dużą odpornością na korozję atmosferyczną, jest stosowana głównie w elektrotechnice, energetyce, przemyśle chemicznym i budownictwie. W budowie maszyn stosowane są stopy miedzi: z cynkiem (mosiądze) oraz z cyną, aluminium, berylem, ołowiem (brązy).

Podczas skrawania miedź wykazuje dużą skłonność do umacniania się, tworzy wióry długie, wstęgowe, trudne do łamania i odprowadzania. Dlatego uznawana jest za trudniej skrawalną od jej stopów [1].

Mosiądz zaliczany jest do materiałów o dobrej skrawalności. Korzystnie na łamliwość wiórów wpływa dodatek ołowiu, zatem takie stopy powinny być stosowane w produkcji zautomatyzowanej. Mosiądze z większą zawartością cynku umożliwiają uzyskanie mniejszej chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego.

Brązy uważane są za materiały o bardzo dobrej skrawalności. Uzyskiwana jest mała chropowatość powierzchni, szczególnie po obróbce z dużą prędkością skrawania. Podczas skrawania z bardzo dużą prędkością (powyżej 1500 m/min) brązów ołowiowych jak i mosiądzu, następuje samoczynne rozdrobnienie wiórów, zatem obróbka jest możliwa wyłącznie na obrabiarkach wyposażonych w osłony zabezpieczające przed wyrzucanymi wiórami [29].

Miedź i jej stopy można obrabiać narzędziami o ostrzach z węglików spiekanych jak i ze stali szybko tnącej. Skrawanie ostrzami ze stali szybko tnącej umożliwia uzyskanie mniejszej chropowatości powierzchni. Jednak nie zaleca się stosowania narzędzi ze stali szybko tnącej do obróbki odlewów piaskowych ze względu na szybkie zużywanie się ostrza.

### **6.2.7. Skrawalność tworzyw i kompozytów polimerowych**

Nazwa tworzywa polimerowe obejmuje materiały, których podstawowym składnikiem są syntetyczne lub naturalne polimery. Zwykle tworzywa te zawierają różne dodatki, np. barwniki, katalizatory, napelniacze. Tworzywa polimerowe mają szerokie zastosowanie, w tym również w budowie maszyn.

Wyroby z tworzyw polimerowych wytwarzane są głównie metodami przetwórstwa, ale niekiedy też są poddawane obróbce skrawaniem. Można zauważyć szereg różnic przebiegu skrawania tworzyw polimerowych w porównaniu ze stopami metali.

Podczas skrawania tworzyw polimerowych przeważającą ilość ciepła przejmuje narzędzie, co jest spowodowane bardzo małym współczynnikiem przewodzenia ciepła tworzyw (500÷600 razy mniejszej niż metali) [14]. Maksymalna temperatura, w jakiej mogą być eksploatowane tworzywa polimerowe, zwykle nie przekracza 200°C. Jeżeli temperatura ostrza wzrośnie powyżej tej wartości, to może nastąpić gwałtowne pogorszenie jakości obrobionej powierzchni. Temperatura skrawania wzrasta w miarę zużywania się ostrzy narzędzi, a w związku z tym, ograniczeniem wartości wskaźników zużycia ostrza mogą być nadtopienia i uszkodzenia powierzchni obrobionej, spowodowane wysoką temperaturą.

Tworzywa polimerowe mają znacznie mniejszą wytrzymałość i twardość w porównaniu z metalami, dlatego siła skrawania podczas obróbki tworzyw jest znacznie mniejsza, np. przy toczeniu tworzyw wartość siły  $F_c$  jest (10÷20) razy mniejsza w porównaniu z obróbką stopów metali [14].

Tworzywa polimerowe mogą być obrabiane narzędziami o ostrzach ze stali szybko tnącej, węglików spiekanych, a także diamentu. Zastosowanie narzędzi diamentowych, z racji mniejszego współczynnika tarcia i większej przewodności cieplnej w porównaniu z innymi materiałami narzędziowymi, powoduje obniżenie temperatury skrawania i zmniejszenie sił skrawania.

Tworzywa złożone przynajmniej z dwóch komponentów, przy czym każdy z nich spełnia inną rolę, nazywane są kompozytami. Kompozyty polimerowe składają się z osnowy polimerowej i włókien lub cząsteczek wzmacniających. Włóknami zbrojeniowymi mogą być włókna szklane, węglowe i aramidowe.

Kompozyty polimerowe uważane są za materiały trudnoskrawalne. Podczas obróbki kompozytów polimerowych następuje szybkie zużywanie się ostrzy narzędzi, co jest spowodowane przez skrawanie twardych i wytrzymałych włókien oraz małym współczynnikiem przewodzenia ciepła kompozytu. Na obrobionej powierzchni często powstają wady, takie jak wyrwania włókien, wykruślenie osnowy, czy rozwarstwianie kompozytu.

Podczas skrawania kompozytów polimerowych ostrza z węglików spiekanych szybko się zużywają. Znacznie lepsze rezultaty, pod względem trwałości ostrza, osiąga się stosując narzędzia z węglików spiekanych powlekane diamentem polikrystalicznym.

Podczas obróbki o charakterze ciągłym, np. toczeniem, tworzyw polimerowych kłopotliwe jest powstawanie długich, ciągłych wiórów, które owijają się na przedmiocie obrabianym. Wymusza to przerywanie obróbki w celu ich usunięcia, stałą kontrolę operatora, zmianę strategii lub sposobu obróbki. Ponadto

wióry, które owijają się przedmiocie obrabianym, mogą powodować pogorszenie jakości obrobionej powierzchni.

### **6.2.8. Skrawalność materiałów ceramicznych**

Materiały ceramiczne definiowane są jako materiały nieorganiczno-niemetaliczne, które swoje typowe właściwości uzyskały podczas wytwarzania w wysokiej temperaturze, przeważnie powyżej 800°C, co najmniej w 30% krystaliczne [35]. Materiały ceramiczne stosowane są w technice i medycynie, m. in. do wytwarzania komór spalania, dysz, elementów silników spalinowych, elementów łożysk tocznych i przewodnic, narzędzi skrawających i endoprotez.

Takie właściwości, jak bardzo duża twardość, duża wytrzymałość w wysokiej temperaturze, izolacyjność termiczna, sprawiają, że materiały ceramiczne są bardzo trudne do skrawania.

Mechanizm skrawania materiałów ceramicznych jest inny niż skrawania metali [35]. Pod wpływem pola naprężeń wywołanych oddziaływaniem ostrza narzędzia na materiał obrabiany następuje inicjacja mikropęknięć, które rozprzestrzeniają się w mirę kontynuacji procesu obróbkowego. Mogą powstawać dwa typy wiórów będące efektem kruchego pęknięcia materiału:

- wióry zeskrwane, które powstają pod wpływem bezpośredniego oddziaływania ostrza,
- wióry odłupane, powstające wskutek propagacji pęknięć.

Materiały ceramiczne obrabiane są toczeniem, frezowaniem i wierceniem. Ze względu na duże zużycie ostrza stosowane są narzędzia z materiałów super-twardych, najczęściej z polikrystalicznego diamentu [35].



## 7. OBRÓBKA ŚCIERNA

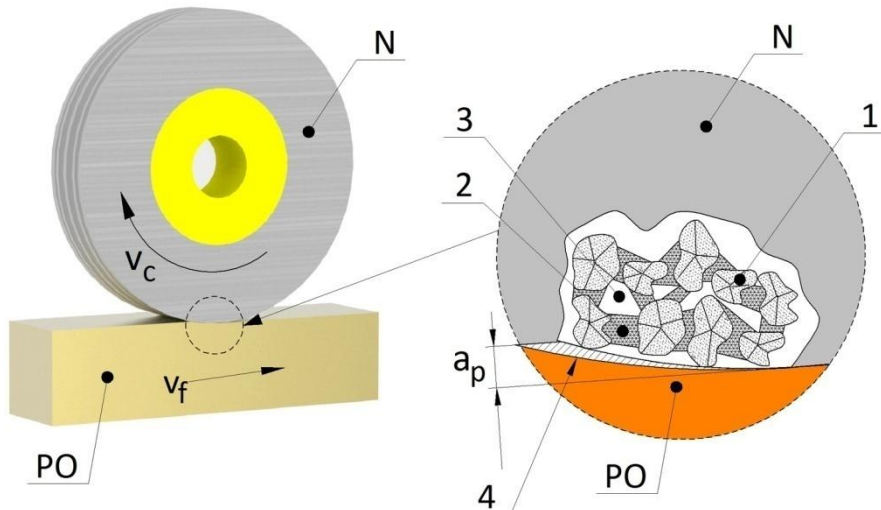
### 7.1. Charakterystyka obróbki ścierniej

Obróbka ścierna od obróbki wiórowej różni się głównie stosowanymi narzędziami. W narzędziach do obróbki ścierniej nie określa się liczby ostrzy ani geometrii ostrzy. Elementami bezpośrednio oddziałującymi na obrabiany materiał i usuwającymi nadmiar obróbkowy są bardzo twarde ziarna ściernie.

Ze względu na rodzaj używanych w obróbce ścierniej narzędzi wyróżnia się:

- obróbkę narzędziami spojonymi,
- obróbkę narzędziami nasypowymi,
- obróbkę luźnymi ziarnami ściernymi.

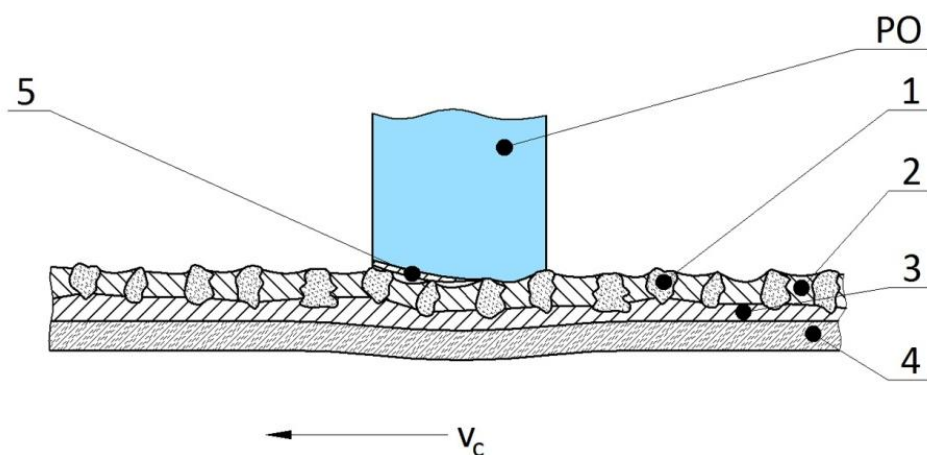
Strukturę narzędzia ściernego spojenego oraz kinematykę obróbki tym narzędziem przedstawiono na rys. 7.1. Osiowo-symetryczne narzędzie (ściernica) zbudowane jest z ziaren ściernych 1, połączonych spoiwem 2, przy czym spoiwo nie wypełnia całkowicie przestrzeni między ziarnami, pozostawiając pory 3. Po połączeniu poszczególne ziarna ściernie zachowują stałe położenie względem siebie. Usuwanie nadmiaru obróbkowego następuje w wyniku skojarzenia ruchu obrotowego narzędzia  $N$ , który jest ruchem głównym (prędkość skrawania  $v_c$ )



Rys. 7.1. Obróbka ścierna narzędziem spojonym: 1 – ziarna ściernie, 2 – spoiwo, 3 – pory, 4 – warstwa skrawana

z ruchem posuwowym przedmiotu obrabianego PO, który jest wykonywany z prędkością  $v_f$ . Ostrza, którymi są krawędzie ziaren ściernych, usuwają warstwy skrawane o bardzo małej grubości. Należy zaznaczyć, że nie wszystkie ostrza skrawają, niektóre odkształcają plastycznie materiał, inne – tylko trą o materiał odkształcając go sprężystością, a jeszcze inne nie mają kontaktu z materiałem.

Obróbkę narzędziem ściernym nasypowym oraz budowę narzędzia nasypowego przedstawiono na rys. 7.2. W narzędziach ściernych nasypowych ziarna ścierna 1 są związane z elastycznym podłożem 4, którym może być, na przykład, papier lub płótno, za pomocą spoiwa, przy czym rozróżnia się spoiwo podkładowe 3 i zalewowe 2. Elastyczność podłoża umożliwia sprężyste przemieszczenia ziaren ściernych w kierunku zgodnym z siłami skrawania, dzięki czemu narzędzie dostosowuje się do kształtu obrabianego przedmiotu PO.



Rys. 7.2. Budowa narzędzia ściernego nasypowego: 1 – ziarna ścierna, 2 – spoiwo zalewowe, 3 – spoiwo podkładowe, 4 – podłoże, 5 – warstwa skrawana

Obróbka ścierna luźnymi ziarnami ściernymi polega na oddziaływaniu na obrabianą powierzchnię niespojonymi ziarnami ściernymi, które w czasie obróbki mogą przemieszczać się względem innych ziaren. Obróbka ścierna luźnymi ziarnami ściernymi może odbywać się metodami:

- dociskową, polegającą na tym, że ziarna ściernie są dociskane do obrabianego przedmiotu za pomocą elementu spełniającego funkcję części chwytowej (w elemencie tym następuje chwilowe zamocowanie ziaren),
- kinetyczną, polegającą na tym, że ziarna ściernie wprawiane są w ruch, a uzyskana energia kinetyczna jest wykorzystywana do wykonania pracy skrawania przy zderzeniu ziaren z przedmiotem obrabianym.

## 7.2. Narzędzia do obróbki ścierniej

### 7.2.1. Materiały ściernie

Materiały ziaren ściernych nazywane są materiałami ściernymi lub ścierniwem. Materiały te powinny spełniać następujące wymagania [37, 45]:

- duża twardość, co najmniej  $(1,5 \div 2)$  razy większa od twardości obrabianych materiałów,
- odporność na wysoką temperaturę (temperatura topnienia ponad  $1600^{\circ}\text{C}$ ),
- duża odporność na ścieranie,
- duża wytrzymałość statyczna i dynamiczna,
- duża odporność na zmęczenie cieplne,
- zdolność do wykruszania się części ziarna i tworzenia nowych ostrych krawędzi,
- duża odporność chemiczna w wysokiej temperaturze.

Ze względu na pochodzenie rozróżnia się materiały ściernie naturalne oraz sztuczne:

Do naturalnych materiałów ściernych zalicza się:

- diament naturalny, który jest alotropową odmianą węgla,
- korund – minerał, którego podstawowym składnikiem jest  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,
- szmergiel, zawiera ok.  $2/3$  korundu i  $1/3$  magnetytu z innymi domieszkami,
- krzemień – odmiana skały kwarcowej ( $\text{SiO}_2$ ) z różnymi domieszkami,
- granat – minerał o bardzo zróżnicowanym składzie chemicznym.

Naturalne materiały ściernie, które mają mniejsze zastosowanie niż materiały sztuczne, używane są do wytwarzania niektórych papierów i płócien ściernych; mogą też być wykorzystywane jako luźne ziarna ściernie.

Do sztucznych materiałów ściernych, które są otrzymywane w procesach przemysłowych, zalicza się (w nawiasie oznaczenia):

- elektrokorund (A),
  - węglik krzemu (C),
  - węglik boru (BC),
  - regularny azotek boru (B),
- diament syntetyczny (DS.).

Elektrokorund, którego głównym składnikiem jest tlenek glinu  $\alpha$  –  $Al_2O_3$ , otrzymywany jest z naturalnych rud boksytowych. W zależności od zawartości dodatków uszlachetniających a także zanieczyszczeń, rozróżnia się następujące gatunki elektrokorundu:

- zwykły (97A), zawierający, oprócz tlenku glinu, także tlenki żelaza, tytanu, krzemu, wapnia i magnezu,
- półszlachetny (97A), o mniejszej ilości zanieczyszczeń,
- szlachetny (99A),
- monokorund (MA), charakteryzujący się wysokim stopniem czystości i izometrycznym kształtem ziaren,
- spiekany (96SA), składający się z agregatów mikroziaren, o ostrych krawędziach i wierzchołkach,
- stopowy, który może być cyrkonowy (ZrA), tytanowy (TiA), chromowy (CrA).

Elektrokorund jest bardzo szeroko stosowanym materiałem ściernym, głównie do szlifowania i docierania stali, żeliw ciągliwych, metali kolorowych.

Węglik krzemu SiC, nazywany też karborundem, jest uważany za drugi (po elektrokorundzie) pod względem zastosowania, materiał ścierny. Jest znacznie twardszy od elektrokorundu, odznacza się dużą kruchością i dobrą przewodnością cieplną. W zależności od stopnia czystości wytwarzany jest w dwóch odmianach:

- zielony (99C), o mniejszej zawartości domieszek,
- czarny (98C).

Stosowany jest do szlifowania stali szybko tnącej, węglików spiekanych, materiałów ceramicznych, szkła, żeliwa, a także do obciążania ściernic.

Węglik boru  $B_4C$  charakteryzuje się dużą twardością (twardszy jest tylko diament i regularny azotek boru), wytrzymałością mechaniczną, ściernością, odpornością na wysoką temperaturę i odpornością chemiczną. Stosowany jest do docierania narzędzi ze stali narzędziowych i z węglików spiekanych.

Regularny azotek boru CBN, nazywany też borazonem, elborem i kubonitem, pod względem właściwości niewiele ustępuje diamentowi. Jest bardzo twardy i odporny na wysoką temperaturę (do 1400°C), jest też obojętny na kontakt z żelazem, niklem i kobaltem w wysokiej temperaturze. Można nim szlifować trudno szlifowalne stale szybko tnące i inne wysokostopowe.

Diament syntetyczny, podobnie jak regularny azotek boru zaliczany do materiałów syntetycznych, z racji bardzo dużej twardości i odporności na zużycie, stosowany jest nie tylko w obróbce wiórowej, ale również w obróbce ścierniej. Reaguje z żelazem, wobec czego nie może być stosowany do szlifowania stali i żeliw. Diament syntetyczny wykorzystuje się do szlifowania i cięcia węglików spiekanych, wyrobów ceramicznych, betonu, marmuru.

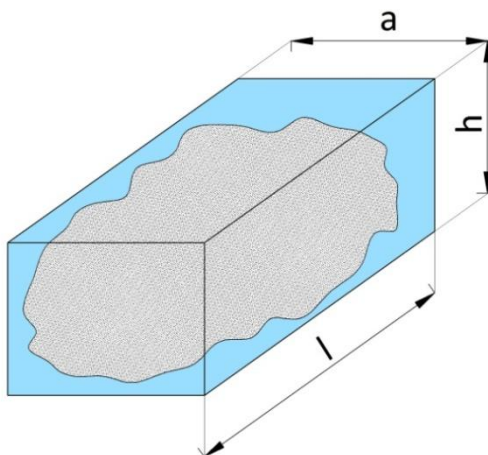
### 7.2.2. Kształt i wielkość ziaren ściernych

Ziarna ścierna charakteryzują się nieregularnym i zróżnicowanym kształtem. W związku z tym klasyfikacja ziaren ściernych przeprowadzana jest na podstawie wymiarów prostopadłościanu opisanego na danym ziarnie ściernym (rys. 7.3), przy czym spełniony jest warunek:

$$l \geq a \geq h \quad (7.1)$$

gdzie:  $l$ ,  $a$ ,  $h$  – długość krawędzi prostopadłościanu.

Wymiar  $a$  w zależności (7.1) przyjmowany jest jako wymiar charakteryzujący wielkość ziarna ściernego.



Rys. 7.3. Sposób oceny wielkości ziarna ściernego

Kształt ziaren ściernych określany jest na podstawie wzajemnych relacji między długościami krawędzi opisanego na tym ziarnie prostopadłościanu. Jeżeli stosunek  $l:a:h$  w przybliżeniu odpowiada:

- 1:1:1, to ziarna takie nazywane są izometrycznymi,
- 1:1:0,33 – blaszkowatymi,
- 1:0,33:0,33 – iglastymi.

Ziarna izometryczne stosowane są głównie do wytwarzania ściernic, a ziarna iglaste – do narzędzi ściernych nasypowych.

Klasyfikacja ziaren ściernych, których wymiar  $a$  jest nie mniejszy od 53  $\mu\text{m}$ , dokonywana jest poprzez przesiewanie przez kolejne sита o malejących wymiarach oczek. Ocena wymiarów ziaren ściernych może być dokonywana również na podstawie numeru sита, na którym dane ziarna są zatrzymywane. Numer sита jest określany jako liczba oczek tego sита przypadających na długość jednego cala.

### 7.2.3. Spoiwa

Spoiwem w narzędziach ściernych spojonych nazywany jest materiał wiążący ziarna ściernic, jednocześnie pozostawiający niewypełnione przestrzenie między tymi ziarnami (pory).

Do najczęściej stosowanych można zaliczyć następujące rodzaje spoiw (w nawiasie oznaczenia):

- ceramiczne (V) – powstają z surowców mineralnych i stopionych składników szkliwa, mogą pracować w wysokiej temperaturze, są odporne chemicznie, wykazują znaczną wytrzymałość, ale są kruche i wrażliwe na gwałtowne zmiany temperatury;
- żywiczne naturalne (E), nazywane też szelakowymi – wytwarzane są z żywicy naturalnej, są miękkie i elastyczne, stosuje się je do wytwarzania narzędzi szlifierskich (polerskich) do obróbki gładkościowej;
- żywiczne sztuczne (B, KZ) – są to głównie sztuczne żywice termoutwardzalne (bakelity), charakteryzujące się dużą wytrzymałością i elastycznością, ale temperatura ich pracy nie może przekraczać  $(170\div 200)^\circ\text{C}$ , stosowane w narzędziach spojonych (B) i nasypowych (KZ);

- gumowe (R) – wykonane z kauczuku naturalnego lub syntetycznego, bardzo elastyczne, wytrzymałe, ale wrażliwe na wysoką temperaturę, używane głównie do wyrobu ściernic służących do przecinania (tzw. „gumówek”);
- metalowe – mogą być spiekane (M) lub galwaniczne (G), stosuje się je głównie w narzędziach z materiałów supertwardych w postaci cienkiej warstwy naniesionej wraz z ziarnami na korpus metalowy;
- klejowe (KS), np. glutynowe – stosowane są do wytwarzania narzędzi ściernych nasypowych.

Spojwa żywiczne oraz gumowe mogą być wzmacniane siatką metalową lub tkaniną z włókien naturalnych albo sztucznych.

#### 7.2.4. Struktura narzędzi ściernych spojonych

Pojęcie struktury narzędzia ściernego spojonego związane jest z udziałem procentowym ziaren ściernych w objętości tego narzędzia. Jeżeli symbolami  $V_z$ ,  $V_s$ ,  $V_p$  oznaczy się udział procentowy objętości odpowiednio ziaren ściernych, spojwa i porów w objętości narzędzia ściernego  $V$ , to traktując objętość  $V$  jako 100% można napisać:

$$V_z + V_s + V_p = 100\% \quad (7.2)$$

Struktura narzędzia ściernego spojonego wyrażana jest w postaci numeru  $N$ , zgodnie z zależnością:

$$V_z = (62 - 2N)\% \quad (7.3)$$

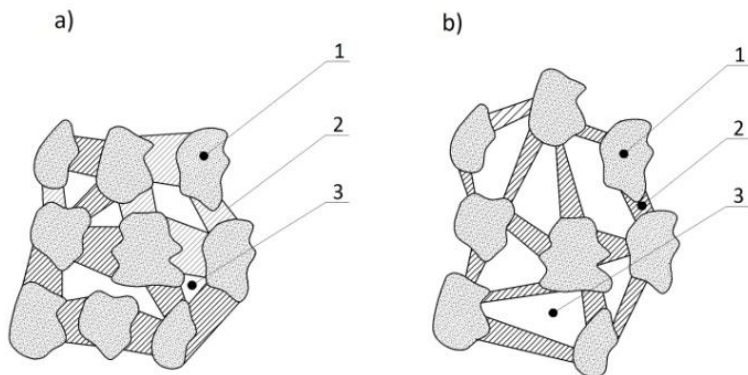
Numer struktury  $N$  jest liczbą całkowitą nie mniejszą od 0 i nie większą od 14.

Przedstawiona metoda określania struktury narzędzi ściernych nie obejmuje narzędzi z materiałów supertwardych. Podział narzędzi ściernych konwencjonalnych ze względu na strukturę podano w tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Klasyfikacja narzędzi ściernych ze względu na strukturę

Nazwa struktury	zwarta	średnia	otwarta
Numer struktury $N$	0÷4	5÷8	9÷14

Na rys. 7.4 pokazano schematycznie różnice w budowie narzędzi ściernych o różnej strukturze.



Rys. 7.4. Przykłady narzędzi ściernych o strukturze: a) zwartej, b) otwartej (1 – ziarna ścierna, 2 – spoiwo, 3 – pory)

Strukturę narzędzi ściernych dobiera się w zależności od materiału obrabianego, rodzaju obróbki, nacisków narzędzia na obrabianą powierzchnię.

### 7.2.5. Twardość narzędzi ściernych

Twardość narzędzi ściernych jest miarą oporu stawianego siłom zewnętrznym, których działanie powoduje wrywanie ziaren ściernych. Zatem twardość narzędzi ściernych jest pojęciem zupełnie różnym od twardości ziaren ściernych.

Twardość narzędzi ściernych oznaczana jest wielkimi literami alfabetu łacińskiego, przy czym kolejne litery oznaczają narzędzia o większej twardości (tabela 7.2).

Tabela 7.2. Klasyfikacja narzędzi ściernych ze względu na twardość

Nazwa narzędzia ze względu na twardość	Oznaczenia twardości
Nadzwyczaj miękkie	A, B, C, D
Bardzo miękkie	E, F, G
Miękkie	H, I, J, K
Średnie	L, M, N, O
Twarde	P, Q, R, S
Bardzo twarde	T, U, W, Z
Nadzwyczaj twarde	X, Y, Z



Decydujący wpływ na twardość narzędzi ściernych ma wytrzymałość spoiwa, przyczepność spoiwa do ziaren ściernych oraz przekrój mostków spoiwa łączącego ziarna ściernie. Większą twardość mają narzędzia ściernie o większej zawartości spoiwa, a zatem o mniejszej objętości porów (przy założeniu, że pozostałe właściwości narzędzia są jednakowe).

Dobierając twardość narzędzi ściernych należy uwzględnić twardość i ciągliwość materiału obrabianego, wielkość ziaren ściernych, kształt i wymiary narzędzi ściernych, rodzaj obróbki, warunki chłodzenia.

### **7.2.6. Kształt i wymiary narzędzi ściernych**

Wytwarzany jest bogaty asortyment narzędzi ściernych spojonych, które różnią się nie tylko rodzajem i wielkością ziaren ściernych, rodzajem spoiwa, strukturą i twardością, ale również kształtem i wymiarami. Kształt i wymiary narzędzi ściernych dobiera się w zależności od kształtu i wymiarów obrabianego przedmiotu oraz sposobu i odmiany obróbki.

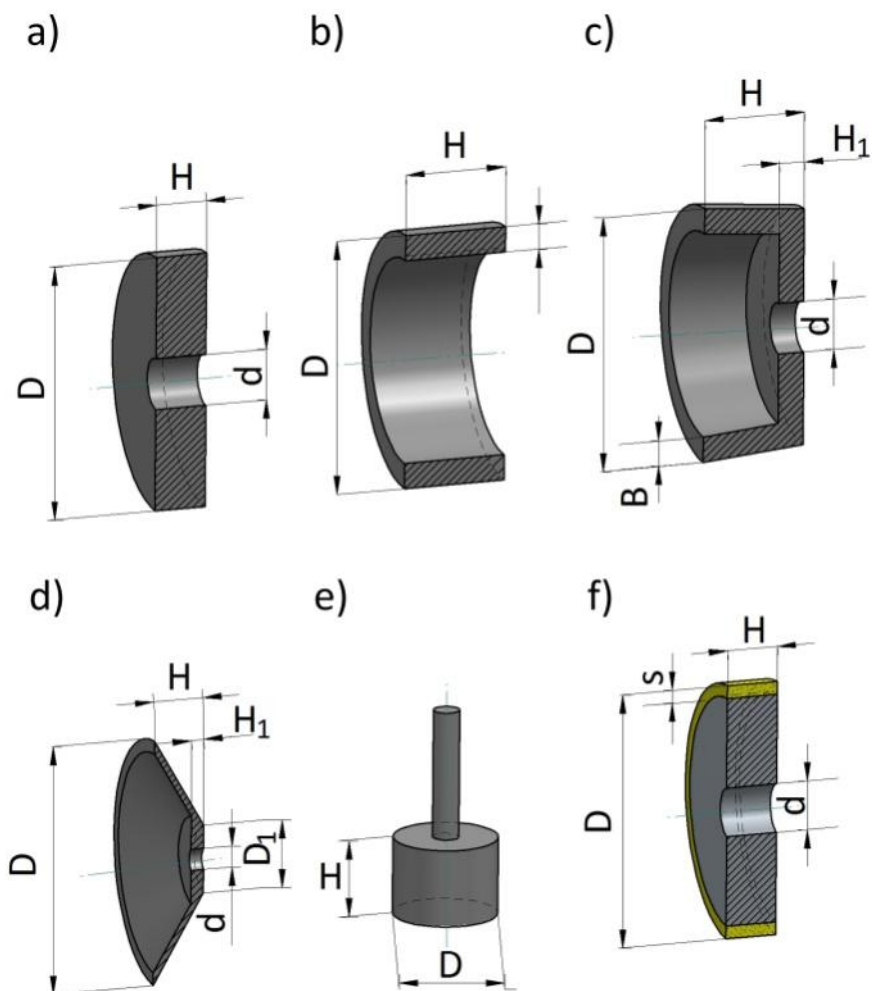
Do narzędzi ściernych spojonych zalicza się:

- ściernice,
- segmenty ściernie,
- oselki ściernie.

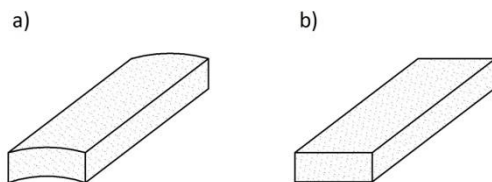
Najczęściej stosowanymi narzędziami ściernymi spojonymi są ściernice, które dzielą się na:

- płaskie,
- pierścieniowe,
- garnkowe,
- talerzowe,
- trzpieniowe.

Przykłady narzędzi ściernych spojonych o różnym kształcie pokazano na rys. 7.5 i 7.6.



Rys. 7.5. Wybrane kształty ściernic: a) płaska, b) pierścieniowa, c) garnkowa, d) talerzowa, e) trzpieniowa, f) z materiałów supertwardych



Rys. 7.6. Wybrane kształty segmentów i oselek ściernych: a) segment pierścieniowy, b) oselka prostokątna

Przedstawiony podział nie obejmuje wszystkich rodzajów narzędzi ściernych, np. ściernice płaskie mogą być prostokątne, z jednostronnym ścięciem, z zaokrągleniem, segmenty ściernie – pierścieniowe, prostokątne, trapezowe, oselki ściernie – kwadratowe, prostokątne, trójkątne, okrągłe, półokrągłe, owalne [7].

### 7.3. Szlifowanie

Szlifowanie<sup>4</sup> jest sposobem obróbki ścierniej, charakteryzującym się tym, że narzędziem jest ściernica, która wykonuje ruch główny, będący ruchem obrotowym, a ruch posuwowy może wykonywać przedmiot obrabiany, ściernica, albo jednocześnie przedmiot obrabiany i ściernica.

Szlifowanie może mieć różne zastosowanie, takie jak:

- oczyszczanie powierzchni przedmiotów, które polega na usunięciu warstwy materiału uszkodzonej we wcześniejszych operacjach, takich jak odlewanie, kucie, walcowanie, spawanie,
- zwiększenie dokładności wymiarowo-kształtowej obrabianych przedmiotów,
- zmniejszenie chropowatości obrabianej powierzchni,
- przecinanie materiału,
- ostrzenie, które polega na nadaniu lub przywróceniu narzędziom właściwości skrawanych poprzez szlifowanie ich powierzchni roboczych.

Szlifowaniem mogą być obrabiane przedmioty wykonane z różnych materiałów, również takich, których obróbka wiórowa jest bardzo trudna lub niemożliwa. Do materiałów tych można zaliczyć stal hartowaną, żeliwo białe, węgliki spiekane, materiały ceramiczne.

Ze względu na kształt obrabianych powierzchni można wyróżnić:

- szlifowanie zewnętrzne brył obrotowych, np. wałków, stożków,
- szlifowanie wewnętrzne brył obrotowych, np. otworów walcowych, stożkowych,
- szlifowanie brył nieobrotowych, np. płaszczyzn.

Szlifowanie może być wykorzystane również jako metoda przecinania materiałów.

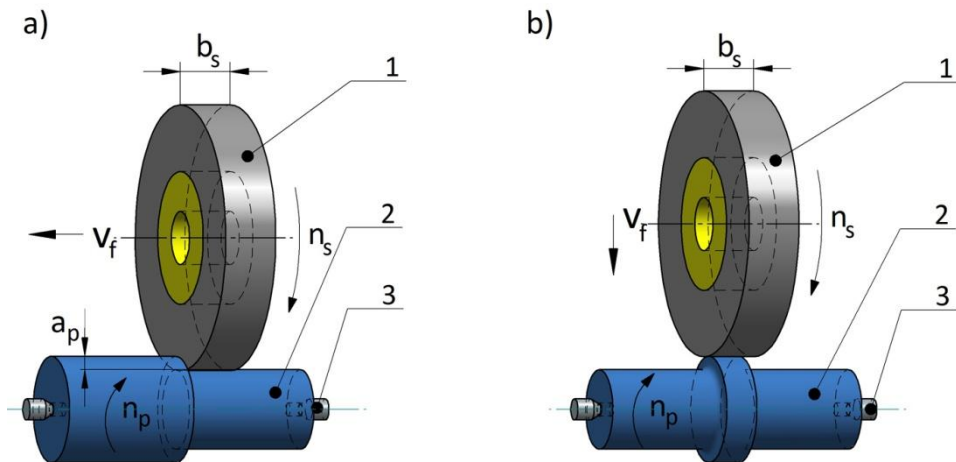
---

<sup>4</sup> Używana jest też nazwa szlifowanie ściernicowe

### 7.3.1. Szlifowanie powierzchni walcowych zewnętrznych

Powierzchnie walcowe zewnętrzne mogą być szlifowane metodą kłową i bezkłową.

Szlifowanie kłowe może być wzdłużne, gdy kierunek ruchu posuwowego jest równoległy do osi obrabianego przedmiotu, oraz wgłębne, gdy kierunek posuwu jest prostopadły do tej osi (rys. 7.7).



Rys. 7.7. Szlifowanie kłowe wałka obwodem ściernicy: a) wzdłużne, b) wgłębne  
(1 – ściernica, 2 – przedmiot obrabiany, 3 – kły)

Ściernica 1 wykonuje ruch główny z prędkością obrotową  $n_s$ , 1/min. Ruch posuwowy składa się z:

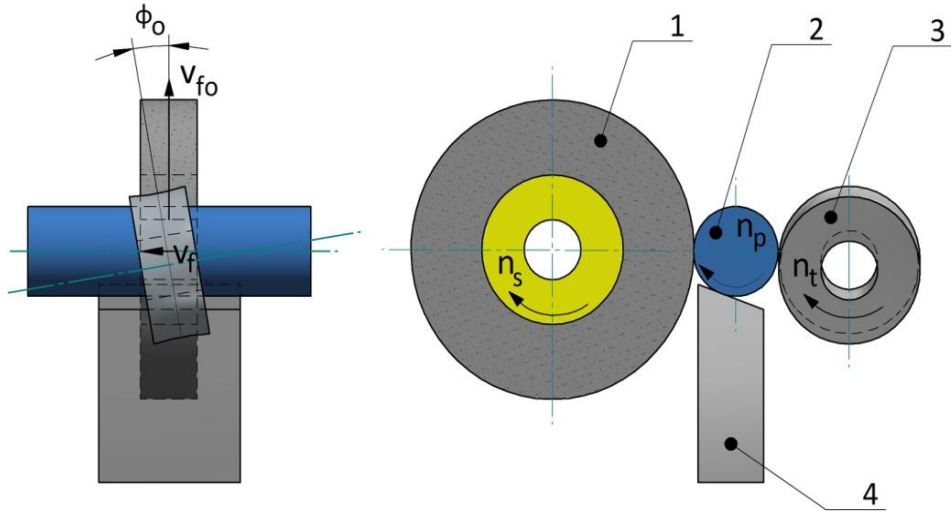
- posuwu obwodowego oraz
- posuwu osiowego w szlifowaniu wzdłużnym lub posuwu promieniowego w szlifowaniu wgłębnym.

Posuw obwodowy jest efektem ruchu obrotowego obrabianego przedmiotu z prędkością  $n_p$ , 1/min. Prędkość ruchu posuwowego osiowego należy dobrać taką, aby posuw przypadający na jeden obrót przedmiotu był mniejszy od szerokości ściernicy  $b_s$ .

Szlifowaniem wzdłużnym obrabia się wałki, zarówno bezstopniowe jak i stopniowe (o różnej średnicy). Szlifowaniem wgłębnym można obrabiać po-

wierzchnie walcowe, a także powierzchnie osiowo symetryczne o złożonym zarysie, przy czym długość obrabianej powierzchni nie może być większa od szerokości ściernicy.

Zasadę szlifowania wałka metodą bezkłową przedstawiono na rys. 7.8.



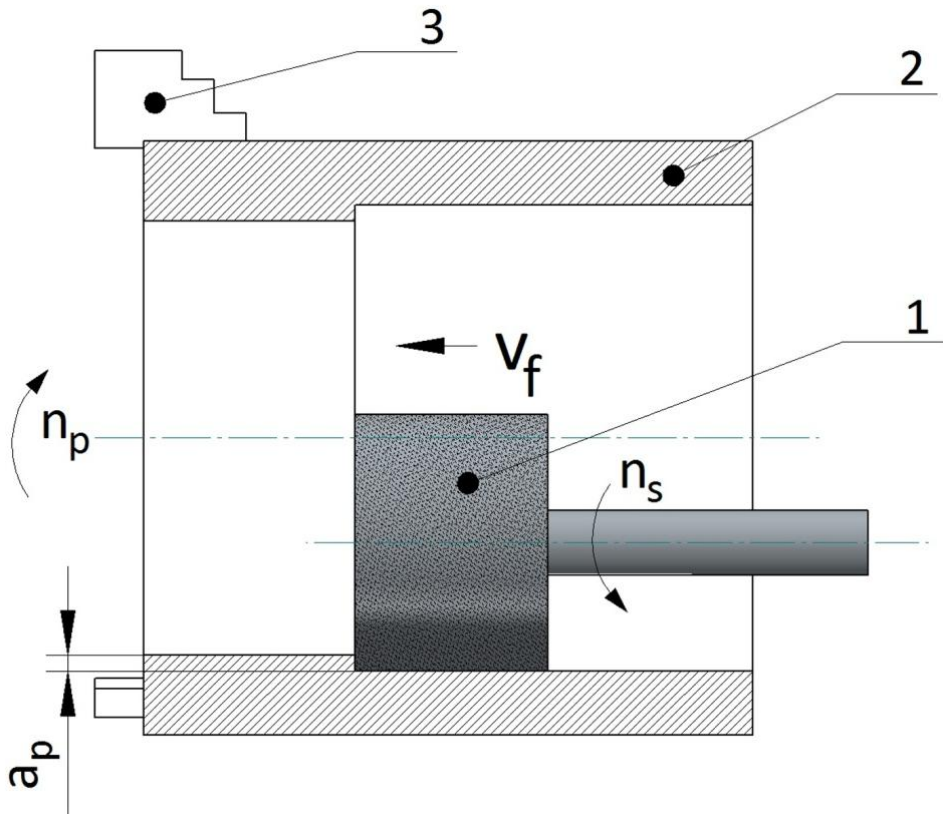
Rys. 7.8. Szlifowanie bezkłowe wałka: 1 – ściernica, 2 – przedmiot obrabiany, 3 – tarcza napędzająca, 4 – podtrzymka

Przedmiot obrabiany (wałek) 2 znajduje się między ściernicą 1 a tarczą napędzającą 3, natomiast od spodu oparty jest na podtrzymce 4. Tarcza napędzająca obraca się z prędkością  $n_t$ , a jej oś jest pochylona względem osi przedmiotu i osi ściernicy o kąt  $\phi_0$ , przyjmowany w granicach  $1^\circ \div 5^\circ$ , przy czym mniejsze wartości dobierane są przy szlifowaniu wykończeniowym, a większe – przy wstępnym. Pochylenie osi tarczy prowadzącej umożliwi nadanie przedmiotowi obrabianemu zarówno ruchu obrotowego z prędkością  $n_p$  jak i ruchu posuwowego wzdłuż jego osi. W celu zapewnienia przylegania obrabianego przedmiotu do tarczy prowadzącej na całej jej szerokości, powierzchnia obwodowa tarczy napędzającej profilowana jest diamentem (wyrównywana przy skośnym położeniu tarczy).

### 7.3.2. Szlifowanie otworów

Szlifowanie otworów w przedmiotach osiowo symetrycznych przedstawiono na rys. 7.9. Przedmiot obrabiany 2, który jest zamocowany w uchwycie sa-

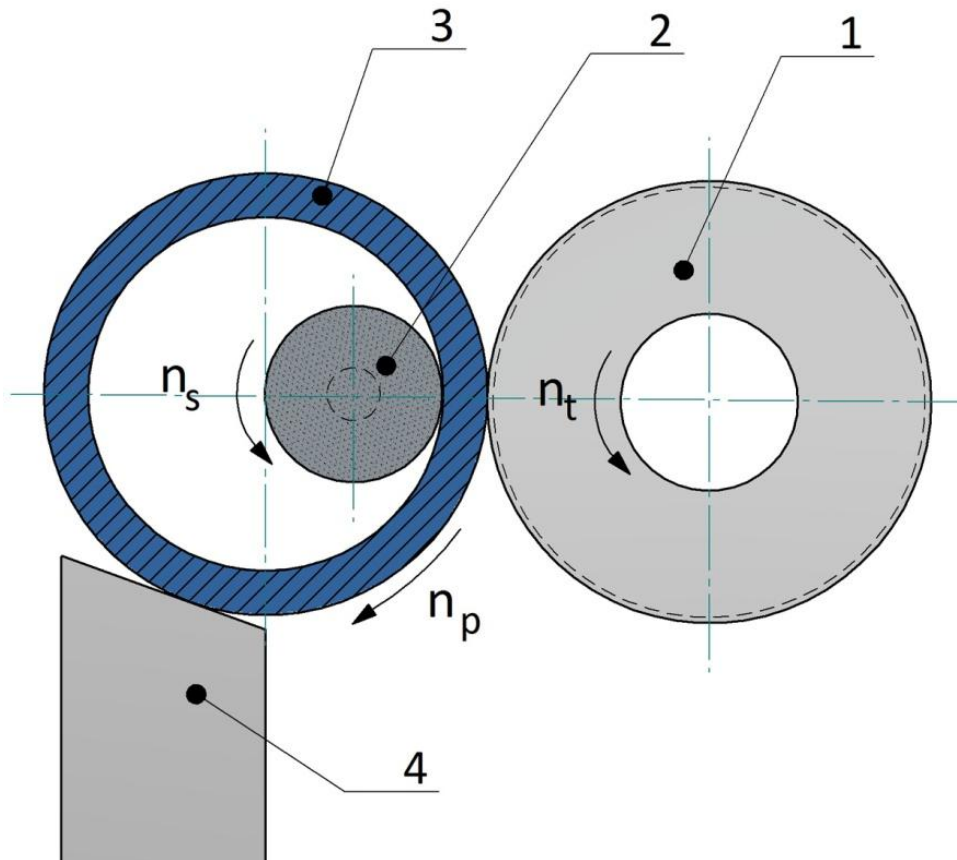
mocentrującym 3, wykonuje ruch obrotowy z prędkością  $n_p$ . Ściernica 1 wykonuje ruch obrotowy z prędkością  $n_s$ , który jest ruchem głównym, oraz ruch posuwowy z prędkością  $v_f$ . Otwory mogą być szlifowane wzdłużnie, gdy kierunek ruchu posuwowego  $v_f$  jest równoległy do osi przedmiotu obrabianego, albo wstępnie, gdy kierunek  $v_f$  jest prostopadły do osi przedmiotu. Przedmioty o skomplikowanym kształcie mogą być mocowane w uchwytach specjalnych.



Rys. 7.9. Szlifowanie wzdłużne otworu walcowego w przedmiocie zamocowanym w uchwycie: 1 – ściernica, 2 – przedmiot obrabiany, 3 – uchwyt

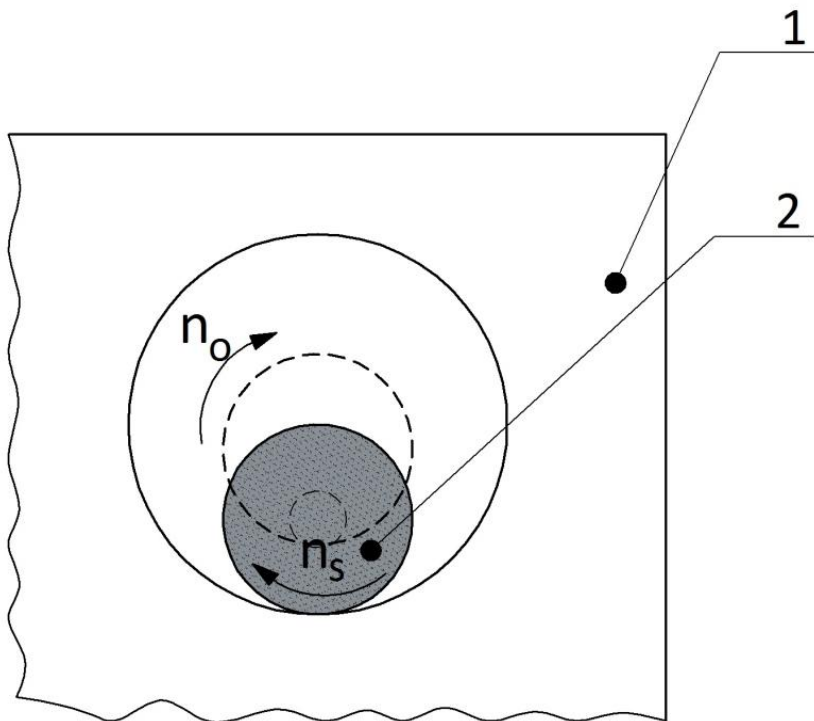
Szlifowanie powierzchni wewnętrznych przedmiotów w kształcie pierścieni i tulei cienkościennych o dokładnie obrobionej powierzchni zewnętrznej można przeprowadzić metodą bezuchwytową (rys. 7.10). Przedmiot obrabiany 3, który podparty jest podtrzymałą stałą 4, wprawiany jest w ruch obrotowy z prędkością  $n_p$  przez tarczę napędzającą 1. Powierzchnia otworu szlifowana jest za pomocą ściernicy 2, która wykonuje ruch główny z prędkością obrotową  $n_s$ .

W szlifowaniu bezuchwytowym, zamiast podtrzymki stałej, mogą być zastosowane również podtrzymki obrotowe (rolki) [17, 37].



Rys. 7.10. Szlifowanie bezuchwytowe otworu: 1 – tarcza napędzająca, 2 – ściernica, 3 – przedmiot obrabiany, 4 – podtrzymka

W przypadku szlifowania otworów w przedmiotach nie będących bryłami obrotowymi, które trudno jest wprawić w ruch obrotowy wokół osi obrabianego otworu, można zastosować szlifowanie obiegowe, nazywane też planetarnym (rys. 7.11). Przedmiot obrabiany 1 jest nieruchomy, zwykle zamocowany na stole szlifierki planetarnej, natomiast ściernica 2 wykonuje ruch obrotowy wokół własnej osi z prędkością  $n_s$  (ruch główny) oraz ruch obiegowy dookoła osi szlifowanego otworu z prędkością  $n_o$ .

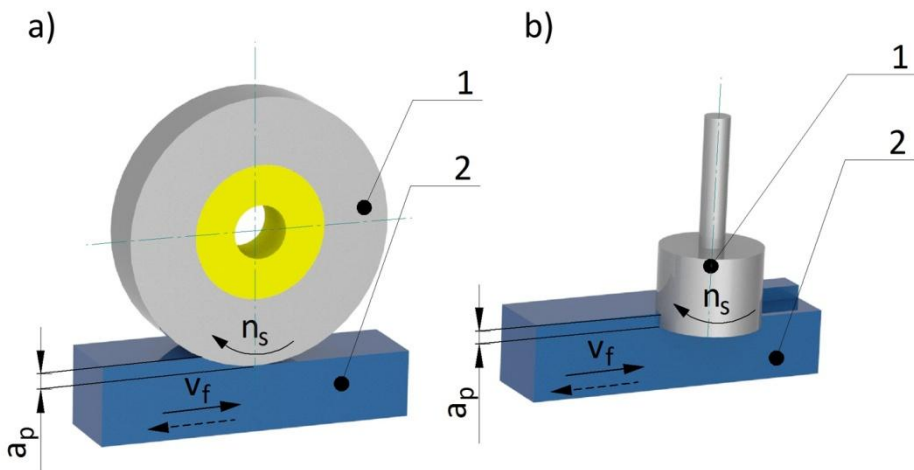


Rys. 7.11. Szlifowanie otworu metodą obiegową (planetarną): 1 – przedmiot obrabiany, 2 – ściernica

### 7.3.3. Szlifowanie płaszczyzn

Płaszczyzny mogą być szlifowane obwodem albo czołem ściernicy (rys. 7.12). Do szlifowania obwodem najczęściej stosowane są ściernice płaskie, a do szlifowania czołem – ściernice garnkowe. Ściernica 1 wykonuje ruch główny z prędkością obrotową  $n_s$ , a przedmiot obrabiany 2 – ruch posuwowy z prędkością  $v_f$ . Gdy ściernica znajduje się w położeniu poza przedmiotem obrabianym następuje okresowy dosuw wgłębny, po czym przedmiot wykonuje powrotny ruch posuwowy, podczas którego następuje usunięcie kolejnej warstwy obrabianego materiału.



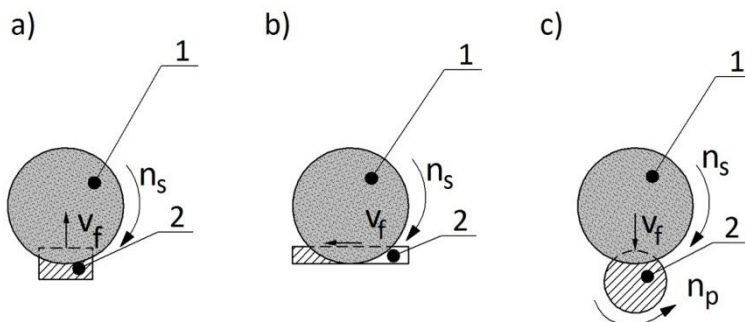


Rys. 7.12. Szlifowanie płaszczyzn: a) obwodowe, b) czołowe (1 – ściernica, 2 – przedmiot obrabiany)

### 7.3.4. Przecinanie ściernicowe

W procesie przecinania ściernicowego (rys. 7.13) ruchem głównym jest ruch obrotowy ściernicy 1, natomiast ze względu na kinematykę ruchu posuwowego, wykonywanego z prędkością  $v_f$ , można wyróżnić:

- przecinanie wglębne (rys.7.13a),
- przecinanie styczne (rys. 7.13b),
- przecinanie obrotowe, nazywane też rotacyjnym (rys. 7.13c).



Rys. 7.13. Kinematyka przecinania ściernicowego: a) wglębne, b) styczne, c) obrotowe (1 – ściernica, 2 – przedmiot przecinany)

Do zalet przecinania ściernicowego można zaliczyć dużą wydajność oraz możliwość przecinania materiałów bardzo twardych (przy użyciu ściernic diamentowych lub z regularnego azotku boru), takich jak węgliki spiekane, szkło, materiały ceramiczne.

### 7.3.5. Podstawowe zależności kinematyczne

Przyjmuje się, że prędkość skrawania  $v_c$  w szlifowaniu jest równa prędkości stycznej punktu leżącego na obwodzie ściernicy. Prędkość skrawania w szlifowaniu jest na ogół znacznie większa niż w obróbce wiórowej, dlatego prędkość ta wyrażana jest w m/s, a obliczyć ją można według zależności:

$$v_c = \frac{\pi D_s n_s}{60000}, \text{ m/s} \quad (7.4)$$

gdzie:  $D_s$ , mm, – średnica ściernicy,

$n_s$ , 1/min, – prędkość obrotowa ściernicy.

Dla szlifowania powierzchni walcowych, zewnętrznych i wewnętrznych, prędkość posuwu obwodowego oblicza się według wzoru:

$$v_{fo} = \frac{\pi D_p n_p}{1000}, \frac{\text{m}}{\text{min}}, \quad (7.5)$$

gdzie:  $D_p$ , mm, – średnica szlifowanego wałka w przypadku szlifowania powierzchni walcowych zewnętrznych lub średnica otworu, gdy szlifowana jest walcowa powierzchnia wewnętrzna,

$n_p$ , 1/min, – prędkość obrotowa szlifowanego przedmiotu.

Prędkość posuwu osiowego i promieniowego oblicza się na podstawie zależności:

$$v_f = f_r n_p, \frac{\text{mm}}{\text{min}}, \quad (7.6)$$

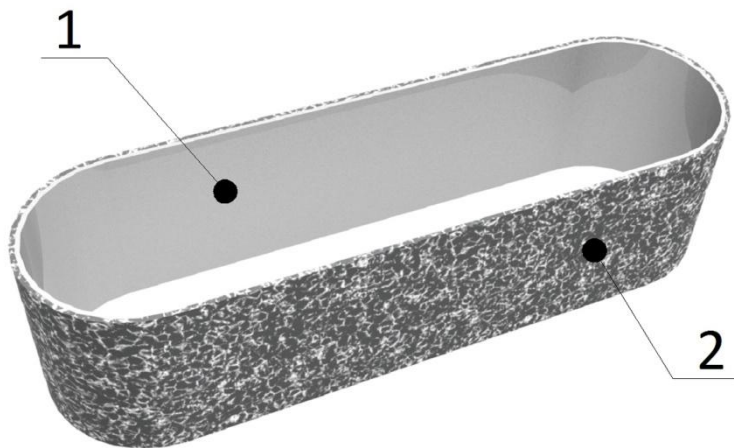
gdzie:  $f_r$ , mm, – posuw na jeden obrót przedmiotu (w kierunku osiowym w szlifowaniu wzdłużnym oraz w kierunku promieniowym w szlifowaniu w głębnym).

W zależności od prędkości szlifowania i dosuwu (głębokości) rozróżniane jest szlifowanie konwencjonalne i niekonwencjonalne. Dla szlifowania konwen-

cyjonalnego prędkość skrawania przyjmowana jest w granicach od około 15 m/s do około 80 m/s, a dosuw – od kilku mikrometrów do około 0,2 mm [37]. Do bardziej znanych metod szlifowania niekonwencjonalnego można zaliczyć szlifowanie z dużą prędkością obwodową ściernicy, określane akronimem HSG (od angielskiego High Speed Grinding), szlifowanie z dużą prędkością przedmiotu (SSG – Speed Stroke Grinding), szlifowanie głębokie (DCG – Deep Cut Grinding), szlifowanie wysokowydajne (HGG – High Productivity Grinding) [32].

#### 7.4. Szlifowanie taśmami ściernymi

Jednym z najczęściej stosowanych w produkcji sposobów obróbki ścierniej narzędziami nasypowymi jest szlifowanie taśmami ściernymi. Jako narzędzia w tej obróbce używane są bezkońcowe taśmy ścierne ogólnego przeznaczenia (rys. 7.14).



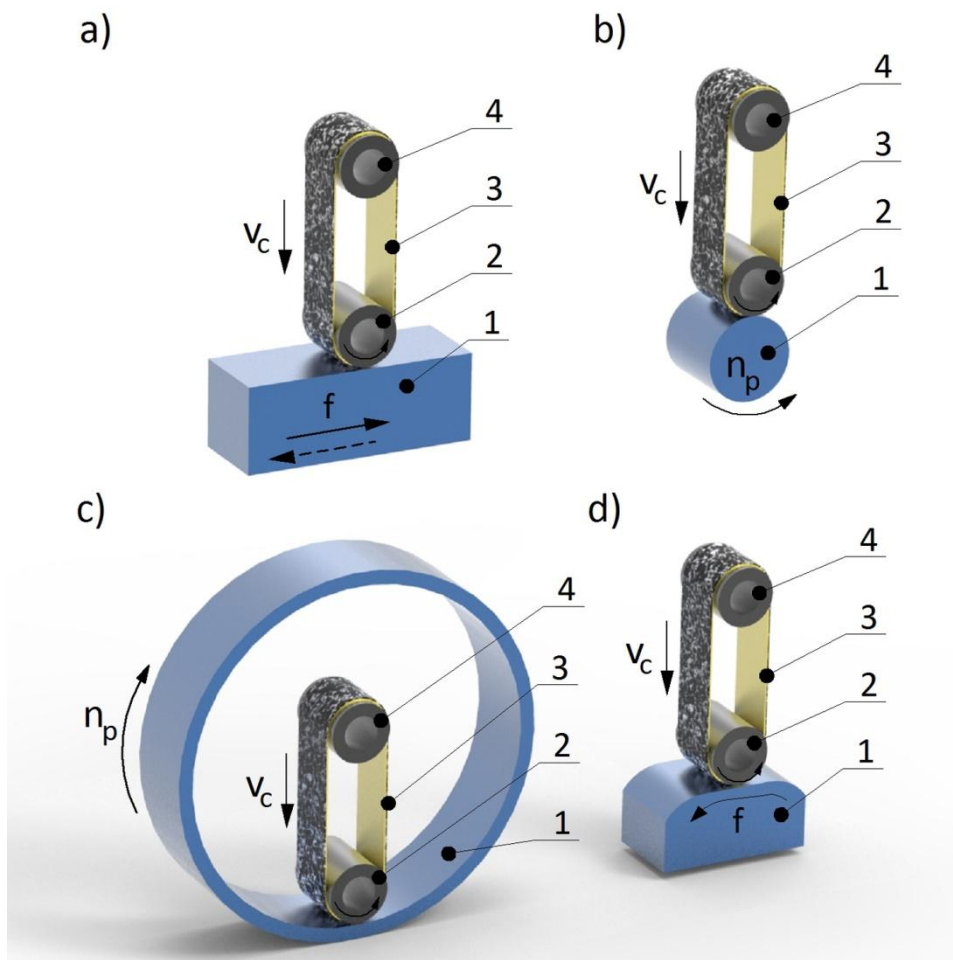
Rys. 7.14. Taśma ścierna bezkońcowa: 1 – podłoże, 2 – nasyp

Nasyp ziaren ściernych 2 na podłoże 1 może być nakładany grawitacyjnie lub w polu elektrostatycznym. W zależności od stopnia pokrycia powierzchni podłoża ziarnami ściernymi rozróżnia się taśmy ścierne [41]:

- z nasypem otwartym – pokrycie (50÷70)%,
- z nasypem półotwartym – pokrycie (70÷90)%,
- z nasypem zamkniętym – pokrycie 100%.

Nasyp ziaren ściernych może być jednowarstwowy i wielowarstwowy.

Podczas szlifowania taśmą ścierną jest napięta zwykle na dwóch rolkach, z których jedna jest napędzana a druga napina taśmę. Za pomocą taśm ściernych można szlifować powierzchnie walcowe zewnętrzne i wewnętrzne, płaszczyzny oraz powierzchnie o złożonym kształcie (rys. 7.15).



Rys. 7.15. Przykłady szlifowania taśmą ścierną bezkońcową: a) płaszczyzny, b) wałka, c) otworu, d) powierzchni o złożonym kształcie (1 – przedmiot obrabiany, 2 – rolka dociskająca, 3 – taśma ścierna, 4 – rolka napędzająca)

Taśmami ściernymi szlifuje się przedmioty wytwarzane z różnych materiałów, takich jak stale niestopowe i stopowe, żeliwo, stopy miedzi, tytanu, aluminium, magnezu, cynku, tworzywa sztuczne, ceramika, szkło, drewno. W zależ-

ności od materiału obrabianego dobiera się taśmy ścierne oraz warunki obróbki [12, 41].

Dokładność przedmiotów po szlifowaniu taśmowym jest na ogół mniejsza niż po szlifowaniu ściernicowym, natomiast chropowatość powierzchni jest podobna. Do zalet szlifowania taśmowego, w porównaniu ze ściernicowym, można zaliczyć:

- lepsze wykorzystanie ziaren ściernych,
- większą wydajność,
- krótszy czas wymiany narzędzi,
- niższą temperaturę przedmiotu obrabianego ze względu na lepsze odprowadzanie ciepła,
- prostszą budowę, a zatem i niższą cenę, maszyn technologicznych,
- większe bezpieczeństwo pracy ze względu na brak zagrożenia rozerwania ściernicy.

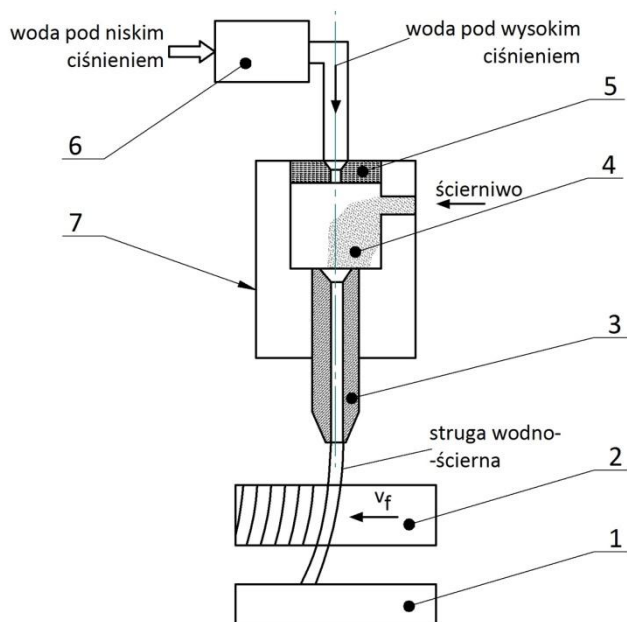
Szlifowanie taśmowe daje szerokie możliwości obróbki powierzchni kształtowych, którą można realizować wykorzystując profil rolki dociskającej taśmę ścierną do przedmiotu obrabianego, sterowanie numeryczne złożonym ruchem posuwowym oraz elastyczność swobodnej taśmy ścierniej.

## 7.5. Przecinanie strumieniowo-ścierne

Jednym ze sposobów kształtowania elementów maszyn jest obróbka strugą wodno – ścierną, która polega na burzeniu spójności materiału wskutek oddziaływania wysokociśnieniowym strumieniem wody zawierającym ziarna ścierne. Zasadę pracy urządzenia do przycinania strugą wodno-ścierną przedstawiono schematycznie na rys. 7.16.

Wysokie ciśnienie wody, do wartości rzędu 400 MPa, jest uzyskiwane w intensyfikatorsze ciśnienia 6, który jest zespołem pomp tłokowych. Woda pod wysokim ciśnieniem wypływa z dyszy wodnej 5 z dużą prędkością, rzędu 1000 m/s [37]. W komorze mieszania 4 wysokociśnieniowy strumień cieczy przyspiesza doprowadzone do tej komory ziarna ścierne i przez dyszę ogniskującą - przyspieszającą 3 wypływa w postaci strugi wodno-ścierniej, która kierowana jest na obrabiany przedmiot 2. Struga wodno-ścierna, przycinając przedmiot, zwykle nie wytraca całkowicie energii kinetycznej, dlatego potrzebny jest wychwytywacz strugi 1. W zależności od prędkości posuwu  $v_f$  oraz głębokości wnikania

strugi w materiał następuje zmiana kierunku ruchu strugi, co ma wpływ na dokładność obróbki.



Rys. 7.16. Schemat ilustrujący zasadę działania urządzenia do przecinania strugą wodno-ścierną: 1 – wychwytywacz strugi, 2 – precyzyjnie przycinany przedmiot, 3 – dysza ogniskująco-przyspieszająca, 4 – komora mieszająca, 5 – dysza wodna, 6 – intensyfikator ciśnienia wody, 7 – głowica narzędziowa

Obróbkę strugą wodno-ścierną stosuje się do przecinania i wycinania przedmiotów z różnych materiałów, takich jak: stopy metali, ceramika, szkło, tworzywa polimerowe, kompozyty, marmur.

Do zalet przecinania strugą wodno-ścierną można zaliczyć małe siły cięcia, niską temperaturę, niewielkie zmiany właściwości fizycznych warstwy wierzchniej, łatwość automatyzacji procesu cięcia.

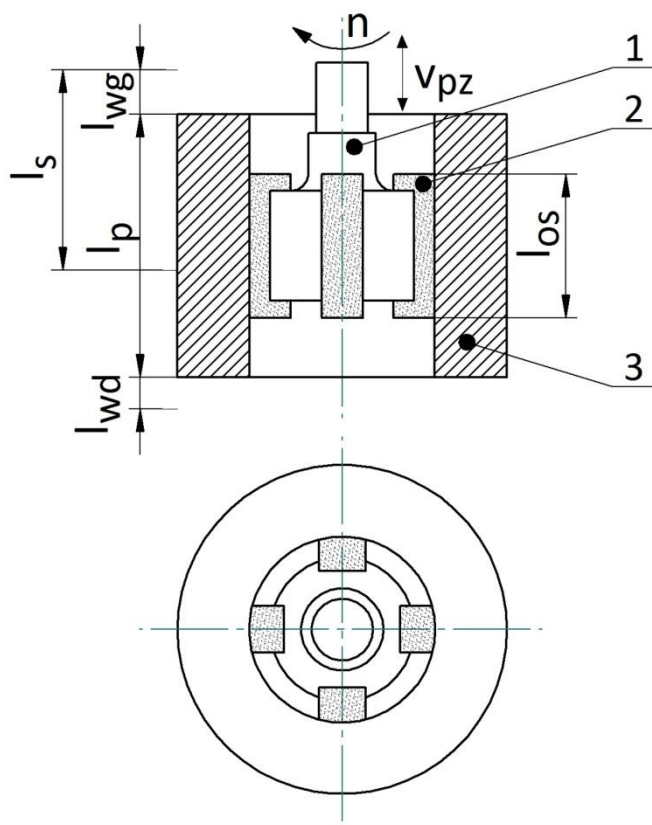
## 7.6. Wybrane sposoby gładkościowej obróbki ścierniej

Gładkościowa obróbka ścierna może być stosowana w celu poprawienia dokładności geometrycznej, zmniejszenia chropowatości powierzchni oraz po-

prawienia stanu warstwy wierzchniej obrabianych przedmiotów. Znane są liczne sposoby gładkościowej obróbki ścierniej [15, 19, 37]. W treści podręcznika scharakteryzowano niektóre z nich, a mianowicie: gładzenie, dogładzanie oscylacyjne, docieranie mechaniczne i polerowanie mechaniczno-ściernie.

### 7.6.1. Gładzenie

Gładzenie, nazywane też honowaniem (ang. honing), jest sposobem ścierniej obróbki wykończeniowej, głównie otworów. Zasadę gładzenia przedstawiono na rys. 7.17.



Rys. 7.17. Zasada gładzenia otworów: 1 – głowica gładzarska, 2 – ośelki, 3 – przedmiot obrabiany

Narzędzie, którym jest głowica gładzarska 1, wykonuje ruch obrotowy z prędkością  $n$  oraz ruch posuwisto-zwrotny ze średnią liniową prędkością wzdłużną  $v_{pz}$ , natomiast przedmiot obrabiany 3 nie wykonuje ruchów roboczych.

Na obwodzie głowicy rozmieszczone są oselki ściernie 2, które są elastycznie dociskane do powierzchni otworu. Maszynami technologicznymi do gładzenia są honownice (gładzarki).

Długość skoku głowicy  $l_s$  jest mniejsza od długości obrabianej powierzchni  $l_p$  i wynosi:

$$l_s = l_p + l_{wd} + l_{wg} - l_{os} \quad (7.7)$$

gdzie:  $l_{wd}$  – wybieg dolny oselki ścierniej,

$l_{wg}$  – wybieg górny oselki ścierniej,

$l_{os}$  – długość oselki ścierniej.

Prędkość skrawania można obliczyć z zależności:

$$v_c = \sqrt{v_{ob}^2 + v_{pż}^2} \quad (7.8)$$

gdzie:  $v_{ob}$  – prędkość obwodowa głowicy.

Połączenie ruchu obrotowego głowicy z ruchem posuwisto-zwrotnym sprawia, że ślady ziaren na obrabianej powierzchni przecinają się. Parametry obróbki dobiera się w taki sposób, aby poszczególne ziarna nie poruszały się po swoich wcześniejszych śladach.

W porównaniu ze szlifowaniem powierzchnia styku narzędzia z obrabianym przedmiotem jest dużo większa, dzięki czemu znacznie wzrasta, nawet kilkaset razy, liczba ziaren, które biorą udział w procesie obróbki. Mała prędkość skrawania oraz małe naciski jednostkowe wpływają na obniżenie temperatury obrabianego przedmiotu, co korzystnie wpływa na stan jego warstwy wierzchniej.

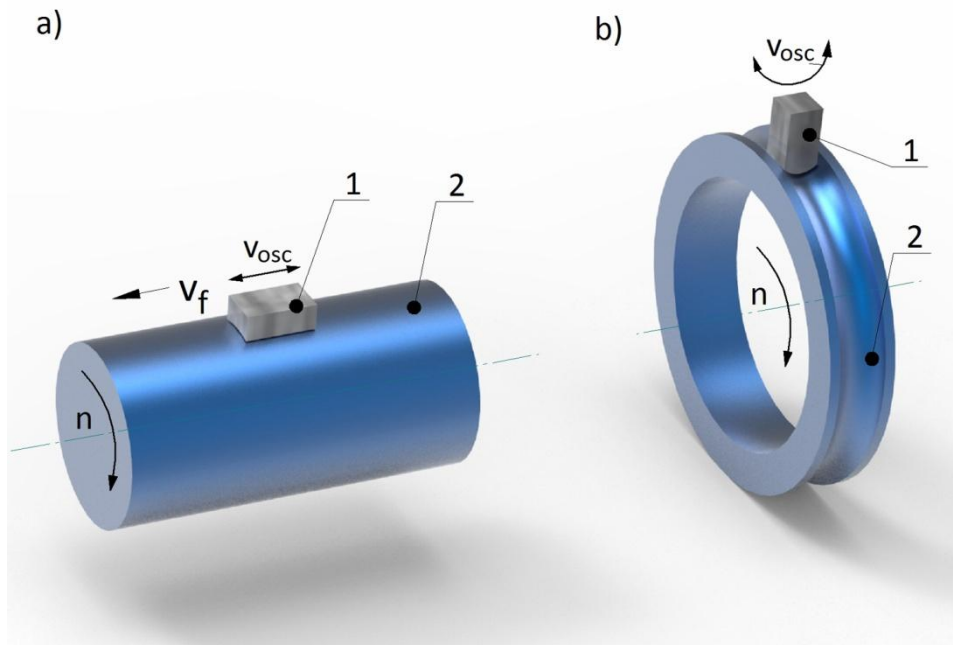
Gładzenie pozwala na uzyskanie dużej dokładności wymiarowo-kształtowej obrabianych otworów oraz małej chropowatości powierzchni. Przykładem zastosowania gładzenia może być wykończeniowa obróbka otworów w tulejach silników spalinowych, w cylindrach hydraulicznych i pneumatycznych.

### 7.6.2. Dogładzanie oscylacyjne

Dogładzanie oscylacyjne, nazywane też krótko dogładzaniem lub superfiniszem, jest sposobem ścierniej obróbki wykończeniowej, w której narzędzie wykonuje ruch oscylacyjny, charakteryzujący się, w porównaniu do gładzenia,



mniejszym skokiem a większą częstotliwością. Do dogładzania najczęściej używa się osełek ściernych, rzadziej ściernic garnkowych. Przykłady dogładzania oscylacyjnego przedstawiono na rys. 7.18.



Rys. 7.18. Kinematyka dogładzania oscylacyjnego: a) walcowej powierzchni zewnętrznej z posuwem wzdłużnym, b) bieżni pierścienia łożyska tocznego (1 – osełka ścierna, 2 – przedmiot obrabiany)

W procesie dogładzania oscylacyjnego wałka (rys. 7.18a) ośelka 1 wykonuje ruch oscylacyjny ze średnią prędkością  $v_{os}$  oraz ruch posuwowy z prędkością  $v_f$ , a przedmiot obrabiany 2 – ruch obrotowy z prędkością  $n$ . Podczas dogładzania bieżni pierścienia łożyska tocznego (rys. 7.18 b) przedmiot obrabiany 2 wykonuje ruch obrotowy, a ruchem oscylacyjnym jest ruch wahadłowy ośelki 1.

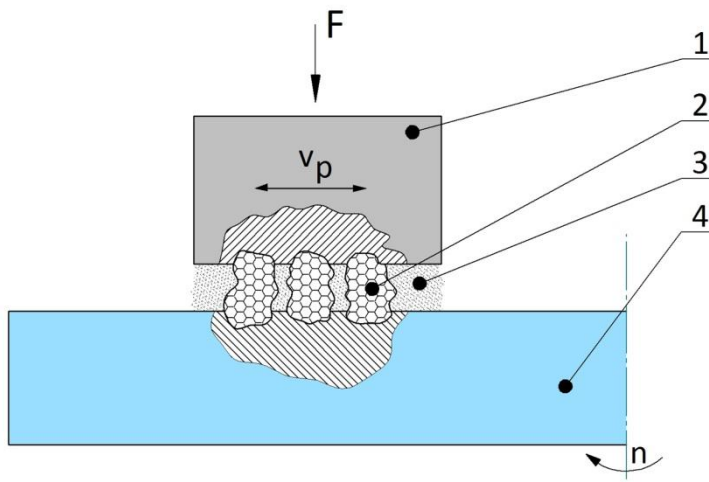
W obróbce dogładzaniem stosuje się ośelki drobnoziarniste, niewielkie naciski jednostkowe ośelki na obrabiany przedmiot, obficie podawaną ciecz obróbkową. Ważne są właściwości cieczy obróbkowej, której zadaniem jest, oprócz chłodzenia, smarowania, usuwania wykruszonych ziaren i drobnych wiórów, przerwanie kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym po osiągnięciu określonej chropowatości powierzchni.

Dogładzanie oscylacyjne umożliwia uzyskanie bardzo małej chropowatości powierzchni, poprawę udziału materiałowego powierzchni, a także poprawę

właściwości fizycznych warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu. Dogładaniem obrabia się powierzchnie walcowe zewnętrzne i wewnętrzne, powierzchnie stożkowe, płaszczyzny, powierzchnie kształtowe. Obróbce tej poddawane są przedmioty wykonane z różnych materiałów, takich jak: stal, żeliwo, węgliki spiekane, stopy metali nieżelaznych, ceramika, tworzywa polimerowe. Do typowych zastosowań dogładania oscylacyjnego można zaliczyć obróbkę czopów wałów korbowych i wałków rozrządu oraz bieżni pierścieni łożysk tocznych.

### 7.6.3. Docieranie mechaniczne

Docieranie mechaniczne jest sposobem ścierniej obróbki powierzchniowej za pomocą luźnych ziaren ściernych. Docieranie powierzchni płaskiej przedstawiono na rys. 7.19.



Rys. 7.19. Przykładowa kinematyka docierania mechanicznego powierzchni płaskiej:

1 – przedmiot obrabiany, 2 – ziarna ściernie, 3 – ciecz smarna, 4 – docierak

Przedmiot obrabiany 1 dociskany jest siłą  $F$  do docieraka 4. Między przedmiotem a docierakiem znajdują się ziarna ściernie 2, tworzące zawieszinę lub pastę z cieczą smarną 3. Docierak w kształcie tarczy obraca się wokół swojej osi z prędkością obrotową  $n$ , a przedmiot obrabiany wykonuje ruchy w płaszczyźnie równoległej do powierzchni roboczej docieraka z prędkością  $v_p$ . Pod wpływem

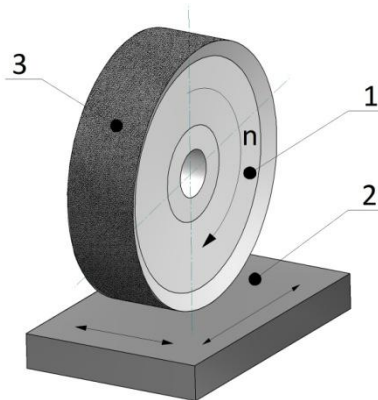
siły  $F$  ziarna ściernie częściowo zagłębiają się zarówno w materiał docieraka jak i przedmiotu obrabianego. Twardość docieraka jest mniejsza od twardości przedmiotu obrabianego, co jest przyczyną większego zagłębiania się ziaren ściernych w materiał docieraka. Wzajemny ruch docieraka i przedmiotu powoduje, że ziarna ściernie skrawają i bruzdzą materiał obrabiany (niektóre ziarna tylko trą o powierzchnię obrabianą). Docieranie może być przeprowadzone również za pomocą docieraków z ziarnami ściernymi wciśniętymi w ich powierzchnię roboczą przed docieraniem. Docieraki te nazywane są zbrojonymi.

Cechą docierania jest duża różnorodność kierunków wzajemnych ruchów docieraka i przedmiotu obrabianego. Docierane są powierzchnie płaskie walcowe zewnętrzne i wewnętrzne, stożkowe, kształtowe. Rozróżnia się docieranie ręczne, maszynowo – ręczne i maszynowe.

Docieranie umożliwia uzyskanie bardzo dużej dokładności obrabianych przedmiotów i małej chropowatości powierzchni. Dobre efekty można uzyskać stosując docieranie stopniowe, polegające na stosowaniu coraz drobniejszych ziaren ściernych. Docieraniem obrabia się przedmioty z różnych materiałów, takich jak: stal, żeliwo, stopy metali nieżelaznych, materiały spiekane i ceramiczne, tworzywa polimerowe, szkło.

#### 7.6.4. Polerowanie mechaniczno-ściernie

Polerowanie mechaniczno – ściernie jest sposobem wykończeniowej obróbki gładkościowej za pomocą tarcz lub taśm polerskich. Polerowanie powierzchni płaskiej za pomocą tarczy polerskiej przedstawiono na rys. 7.20.



Rys. 7.20. Przykład polerowania mechaniczno-ściernego: 1 – tarcza polerska, 2 – przedmiot obrabiany, 3 – pasta lub zawiesina polerska

Tarcza polerska 1, której powierzchnia robocza jest nasycona pastą lub zawiesiną polerską 3, wykonuje ruch obrotowy z prędkością  $n$ . Tarcza jest dociskana do przedmiotu obrabianego 2, który wykonuje ruch posuwowy.

Materiały tarcz polerskich, które oddziałują na powierzchnię obrabianą, zwykle są materiałami miękkimi, na przykład filc, sukno, skóra. W skład past i zawiesin polerskich wchodzi ziarna ściernie oraz osnowa. Do materiałów ściernych stosowanych w polerowaniu można zaliczyć: tlenek glinu ( $Al_2O_3$ ), róż polerski ( $Fe_2O_3$ ), ziemia krzemkowa ( $SiO_2$ ), wapno wiedeńskie ( $CaO$ ,  $MgO$ ). W charakterze osnowy past i zawiesin polerskich stosuje się stearynę (główne składniki: kwas stearynowy i palmitynowy), parafinę (węglowodory o ogólnym wzorze  $C_nH_{2n+2}$ ), cerezynę (oczyszczony wosk ziemny), kalafonię (kwas abietynowy i jego izomery), naftę, wodę [19, 37].

Polerowanie jest procesem złożonym. Efekt zmniejszenia wysokości chropowatości powierzchni wyjaśniany jest występowaniem podczas polerowania procesów mechanicznych i chemicznych.

W strefie oddziaływania powierzchni roboczej narzędzia (tarczy lub taśmy) polerskiego na materiał obrabiany dominują procesy tarcia z racji małej twardości stosowanych ziaren ściernych. Przy dużej prędkości narzędzia polerskiego następuje nagrzewanie wierzchołków mikronierówności do temperatury powodującej uplastycznienie materiału. Pod wpływem nacisku narzędzia polerskiego następuje płynięcie materiału wierzchołków i wypełnianie zagłębień mikronierówności, w rezultacie czego uzyskuje się zmniejszenie chropowatości powierzchni.

Chemiczne oddziaływanie na chropowatość powierzchni jest związane z powstawaniem na obrabianej powierzchni tlenków wskutek reakcji obrabianego materiału z aktywnymi składnikami past polerskich. Ruch narzędzia polerskiego względem obrabianej powierzchni powoduje usuwanie warstwy tlenków głównie z wierzchołków mikronierówności. Powtarzające się procesy powstawania i usuwania tlenków z wierzchołków mikronierówności przyczyniają się do zmniejszenia chropowatości powierzchni.

Polerowanie mechaniczno-ściernie nie przyczynia się do poprawy dokładności wymiarowo-kształtowej obrabianych przedmiotów, ale umożliwia uzyskanie bardzo małej chropowatości powierzchni obrobionej oraz połysku tej powierzchni.

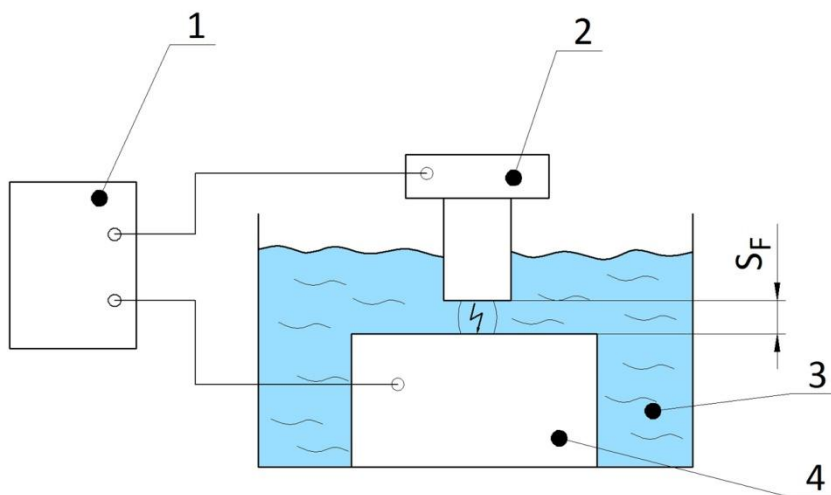
## 8. OBRÓBKA EROZYJNA

Do usuwania nadmiaru obróbkowego, oprócz energii mechanicznej, wykorzystywana jest energia związana z wyładowaniami elektrycznymi, roztwarzaniem chemicznym i elektrochemicznym, wiązką laserową, strumieniem jonów i elektronów, wysokociśnieniowym strumieniem cieczy. Do najszerzej stosowanych sposobów obróbki erozyjnej można zaliczyć:

- obróbkę elektroerozyjną,
- obróbkę elektrochemiczną,
- obróbkę laserową,
- obróbkę jonową.

### 8.1. Obróbka elektroerozyjna

Obróbka elektroerozyjna polega na usuwaniu nadmiaru obróbkowego poprzez zastosowanie erozji elektrycznej. Uproszczony schemat obróbki elektroerozyjnej przedstawiono na rys. 8.1.



Rys. 8.1. Zasada obróbki elektroerozyjnej: 1 – generator impulsów, 2 – elektroda robocza, 3 – ciecz dielektryczna, 4 – przedmiot obrabiany

Z generatora 1 doprowadzone jest napięcie do dwóch elektrod, z których jedna jest elektrodą roboczą 2 (narzędzie), a druga – przedmiotem obrabianym 4. Elektroda robocza nie może stykać się z przedmiotem obrabianym, pozostawiając szczelinę międzyelektrodową  $S_F$ . Przestrzeń między elektrodą a przedmiotem wypełniona jest cieczą dielektryczną (nieprzewodzącą prądu elektrycznego). Doprowadzenie napięcia powoduje występowanie tzw. zimnej emisji elektronów z katody. Po przekroczeniu określonej wartości natężenia wytworzonego pola elektrycznego (ok.  $10^7 \div 10^8$  V/m [30]) między elektrodą roboczą a przedmiotem powstaje zjonizowany kanał, przez który następuje impulsowe wyładowanie elektryczne. Przepływający prąd powoduje wydzielanie się ciepła, czego skutkiem jest gwałtowny wzrost temperatury do wartości przekraczającej temperaturę topnienia a nawet temperaturę wrzenia materiału elektrod. W tych warunkach następuje topnienie i wrzenie materiału w strefie wyładowania elektrycznego. Na powierzchni elektrod tworzą się zagłębienia, nazywane kraterami, z których wyrzucane są strumienie ciekłego metalu i pary tego metalu. Następuje też gwałtowne wrzenie cieczy dielektrycznej i tworzenie się pęcherzy gazowych. Ciekły metal wyrzucany z krateru krzepnie w cieczy dielektrycznej, powodując zanieczyszczenie tej cieczy produktami erozji. Zanieczyszczenia powodują pogorszenie właściwości dielektrycznych cieczy, zatem ciecz musi ciągle przepływać przez szczelinę międzyelektrodową i być poddana procesowi filtracji. Napływająca do szczeliny ciecz ma niższą temperaturę i powoduje szybkie chłodzenie materiału elektrod, co prowadzi do powstawania dużych naprężeń, które mogą wywoływać mikropęknięcia i odrywanie materiału.

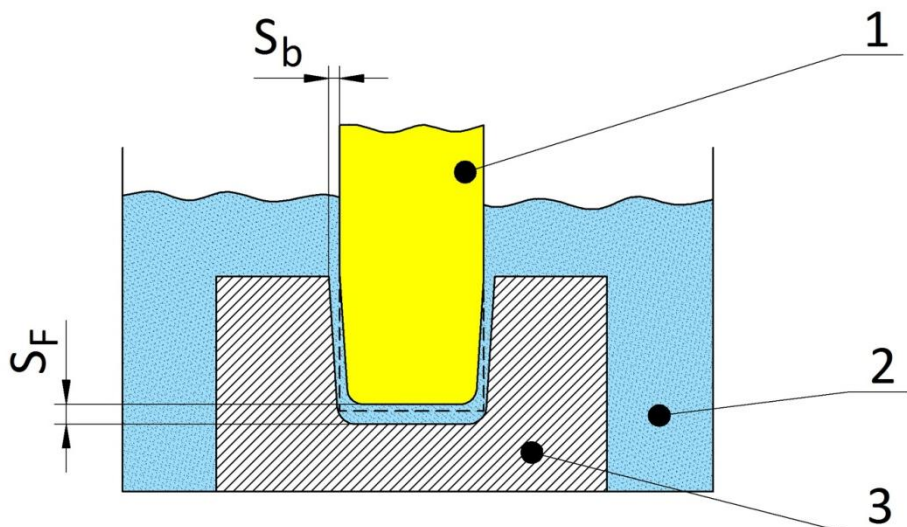
W rezultacie kolejnych wyładowań elektrycznych na powierzchni przedmiotu powstają nowe kratery, których kształt jest zbliżony do czaszy kulistej. W wyniku zagęszczania i „nakładanie się” kraterów następuje usuwanie naddatku obróbkowego.

W przemyśle przede wszystkim stosowane są dwie odmiany obróbki elektroerozyjnej:

- drażnienie elektroerozyjne, nazywane też obróbką wgłębną,
- elektroerozyjne wycinanie elektrodą drutową, nazywane też obróbką drutową.

W procesie drażnienia elektroerozyjnego następuje odwzorowanie kształtu elektrody roboczej przedmiocie obrabianym (rys. 8.2). Elektroda robocza 1 wykonuje ruch wzdłuż swojej osi, zagłębiając się w przedmiot obrabiany 3. Prędkość tego ruchu dostosowana jest do prędkości erodowania materiału. Między elektrodą roboczą a przedmiotem obrabianym zachowana jest szczelina czołowa  $S_F$  oraz szczelina boczna  $S_b$ . Szczeliny wypełnione są cieczą dielektryczną 2.

Podczas drążenia następuje zużywanie się elektrody roboczej (kształt elektrody przed obróbką pokazano linią przerywaną).

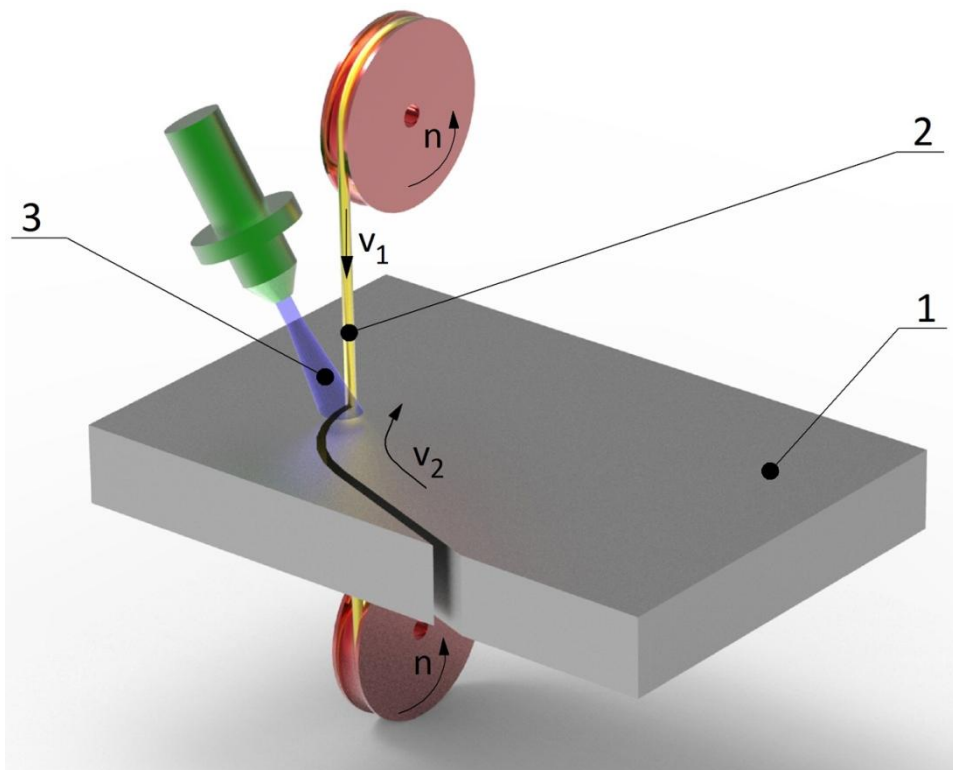


Rys. 8.2. Schemat drążenia elektroerozyjnego: 1 – elektroda robocza, 2 – ciecz dielektryczna, 3 – przedmiot obrabiany,  $S_F$  – szczelina czołowa,  $S_b$  – szczelina boczna

W procesie elektroerozyjnego wycinania elektrodą drutową (rys. 8.3) narzędziem jest drut, którego średnica wynosi od kilku setnych milimetra do ok. 0,3 mm. Obróbka ta zwykle realizowana jest na obrabiarkach sterowanych numerycznie. Elektroda drutowa 2 wykonuje ruch wzdłużny z prędkością  $v_1$ , co zapobiega rozerwaniu cienkiego drutu z powodu jego zużycia, oraz ruch poprzeczny z prędkością  $v_2$ , którego tor jest dostosowany do kształtu wycinanego przedmiotu 1. Do strefy drążenia podawana jest ciecz dielektryczna 3. Zaletą wycinania elektrodą drutową jest znacznie mniejsza objętość wyerodowanego materiału w porównaniu z drążeniem elektroerozyjnym.

Obróbce elektroerozyjnej poddawane są przedmioty przewodzące prąd elektryczny (w przypadku materiałów nieprzewodzących prądu elektrycznego przedmiot musi być pokryty warstwą metalu). Zaletą obróbki elektroerozyjnej jest możliwość kształtowania przedmiotów z materiałów bardzo twardych, np. ze stali zahartowanej lub z węglików spiekanych, a także niewystępowanie sił działających na przedmiot obrabiany (przedmiot się nie odkształca). Obróbka elektroerozyjna może być stosowana do drążenia otworów o różnym kształcie,

np. walca, prostopadłościanu, graniastosłupa oraz bardziej złożonych brył a także, przecinania, wycinania przedmiotów o różnym kształcie, wykonywania gwintów.

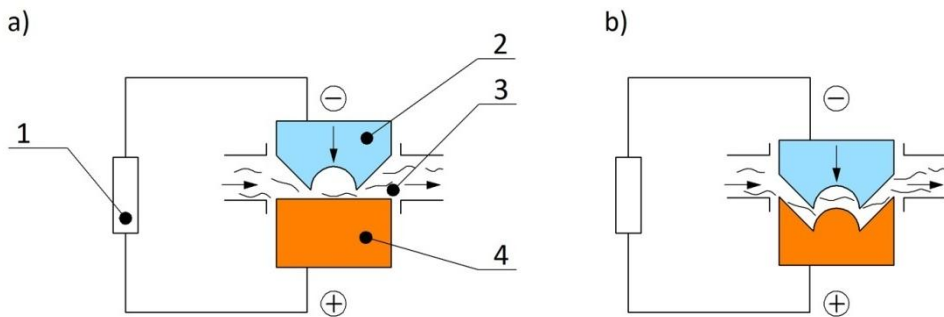


Rys. 8.3. Schemat elektroerozyjnego wycinania elektrodą drutową: 1 – przedmiot obrabiany, 2 – elektroda drutowa, 3 – ciecz dielektryczna

## 8.2. Obróbka elektrochemiczna

Obróbka elektrochemiczna jest sposobem obróbki erozyjnej polegającym na roztwarzaniu anodowym materiału obrabianego. W obróbce tej, podobnie jak w obróbce elektroerozyjnej, elektroda robocza (narzędzie) nie ma kontaktu z przedmiotem obrabianym. Schemat obróbki elektrochemicznej przedstawiono na rys. 8.4.





Rys. 8.4. Zasada obróbki elektrochemicznej: a) początek obróbki, b) zakończenie obróbki (1 – źródło prądu stałego, 2 – elektroda robocza, 3 – elektrolit, 4 – przedmiot obrabiany)

Elektroda robocza 2 połączona jest z ujemnym biegunem źródła prądu stałego 1, a przedmiot obrabiany 4 – z dodatnim. Między elektrodą roboczą a przedmiotem obrabianym zachowana jest szczelina, zwykle wynosząca  $(0,1 \div 0,6)$  mm, przez którą przepływa elektrolit (ciecz przewodząca prąd elektryczny). W miarę roztworzenia metalu przedmiotu obrabianego (anody), elektroda robocza (katoda) przesuwa się w głąb przedmiotu. Na rys. 8.4a przedstawiono położenie elektrody roboczej i kształt obrabianego przedmiotu przed rozpoczęciem obróbki, a na rys. 8.4b – po zakończeniu.

Elektrody robocze wykonuje się z materiałów dobrze przewodzących prąd elektryczny, odpornych na korozję i łatwo obrabialnych, np. ze stopów miedzi. Elektrolitem są dobrze przewodzące prąd elektryczny roztwory wodne, np. roztwór chlorku sodu (sól kuchenna). Jeżeli obróbce poddawany jest przedmiot stalowy, a elektrolitem - wodny roztwór chlorku sodu, to zachodzące reakcje chemiczne można przedstawić następująco [15]:

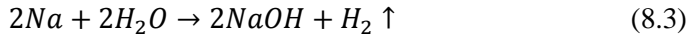
- następuje dysocjacja elektrolitu



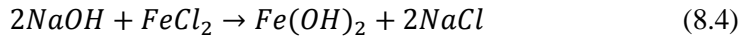
- napięcie między elektrodą roboczą a przedmiotem obrabianym powoduje przemieszczanie się kationów sodu do katody a anionów chloru do anody i następuje ich zobojętnienie,
- cząsteczki chloru reagują z cząsteczkami żelaza (na anodzie), powodując roztwarzanie przedmiotu obrabianego



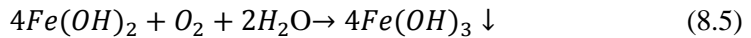
- sód reaguje z wodą w elektrolicie a w wyniku reakcji powstaje wodorotlenek sodu i ulatnia się wodór



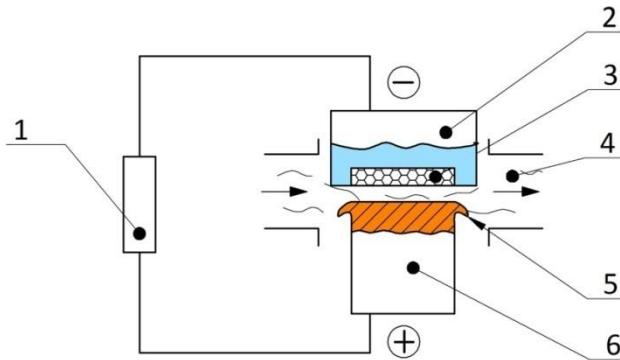
- wodorotlenek sodu reaguje z chlorkiem żelaza



- pod wpływem tlenu wodorotlenek żelazawy reaguje z wodą tworząc wodorotlenek żelazowy, który wytrąca się w postaci nierozpuszczalnego w wodzie osadu:



Proces roztrawiania elektrochemicznego może być również wykorzystany do usuwania zadziorów (rys. 8.5). Elektroda robocza 2 ma wbudowaną wkładkę izolacyjną 3 w miejscu, gdzie nie powinno następować roztrawianie przedmiotu obrabianego 6 (roztrawiane powinny być tylko zadziory 5).

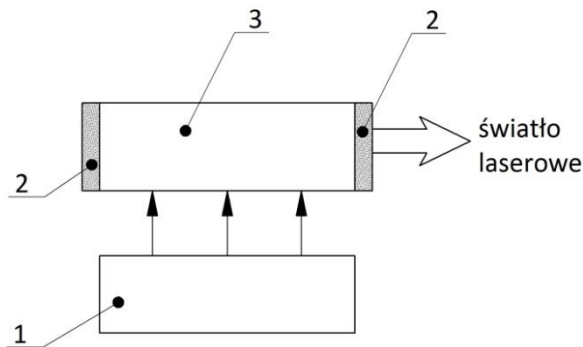


Rys. 8.5. Schemat elektrochemicznego usuwania zadziorów: 1 – źródło prądu stałego, 2 – elektroda robocza, 3 – wkładka izolacyjna, 4 – elektrolit, 5 – zadziór, 6 – przedmiot obrabiany

Metodami obróbki elektrochemicznej można obrabiać przedmioty z materiałów przewodzących prąd elektryczny, niezależnie od ich twardości i skrawalności. Do zalet obróbki elektrochemicznej można zaliczyć: dużą wydajność, bardzo dużą trwałość elektrod roboczych, stosunkowo małą chropowatość obrabianej powierzchni, możliwość obróbki przedmiotów o skomplikowanym kształcie. Brak oddziaływania siłowego między elektrodą roboczą a obrabianym przedmiotem pozwala na obróbkę materiałów o małej wytrzymałości.

### 8.3. Obróbka laserowa

Dynamicznie rozwijającym się sposobem obróbki erozyjnej jest obróbka materiałów za pomocą lasera. Obróbka laserowa oparta jest na wykorzystaniu energii promieniowania świetlnego o jednakowej długości fali. Główne elementy składowe lasera pokazane zostały na rys. 8.6.



Rys. 8.6. Zasadnicze elementy składowe lasera: 1 – układ pobudzenia, 2 – zwierciadło, 3 – ośrodek czynny

Działanie lasera oparte jest na zjawisku emisji wymuszonej [9, 10]. Przykładem ośrodka czynnego 1 może być rubin z domieszką  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , granat itrowo-glinowy z domieszką jonów neodymu (Nd:YAG), dwutlenek węgla ( $\text{CO}_2$ ). Laser musi być pobudzany (inaczej – pompowany) energią z zewnątrz. Metoda pobudzenia zależy od atomów ośrodka czynnego, np. w laserach rubinowych do pobudzenia stosowana jest lampa błyskowa. Laser z obydwu stron zamknięty jest przez zwierciadła 2, z których jedno jest całkowicie refleksowe, a drugie – nieco prze-

puszczające (transmisyjne). Fotony poruszające się wzdłuż osi lasera są wielokrotnie odbijane pomiędzy zwierciadłami ulegając wzmocnieniu. Po osiągnięciu pewnego poziomu wzmocnienia fotony wydostają się na zewnątrz przez zwierciadło transmisyjne, stanowiąc promieniowanie użyteczne. Wiązka fotonów emitowana przez laser skupiana jest za pomocą układu soczewek i ogniskowana na obrabianym przedmiocie.

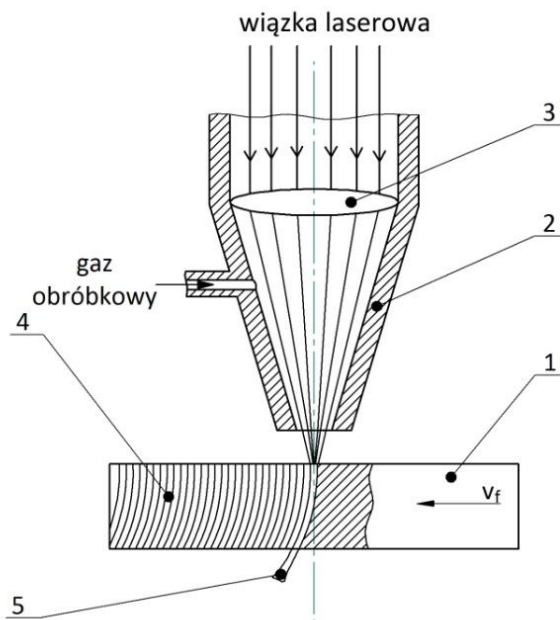
Promieniowanie laserowe cechuje się następującymi właściwościami:

- lasery mogą pracować w sposób ciągły lub impulsowy, praca impulsowa umożliwia uzyskanie większej mocy (dla pracy ciągłej gęstość mocy nie przekracza  $10^8 \text{ W/cm}^2$ , a dla pracy impulsowej wynosi  $10^8 \div 10^{12} \text{ W/cm}^2$ ),
- kąt rozbieżności wiązki laserowej jest mały, rzędu miliradianów,
- po zogniskowaniu wiązki laserowej uzyskuje się plamkę o małej średnicy, zwykle od 10 do 300  $\mu\text{m}$  [44],
- lasery stosowane w obróbce materiałów emitują promieniowanie o długości fali w zakresie około 200 nm ÷ 11  $\mu\text{m}$  [44].

W obróbce ubytkowej lasery najczęściej stosowane są do cięcia materiałów i wykonywania otworów. Używa się głównie laserów CO<sub>2</sub>, Nd:YAG i ekscimerowych. W laserach CO<sub>2</sub> emitującym składnikiem ośrodka czynnego jest dwutlenek węgla. Substancja czynna w tych laserach złożona jest z mieszaniny gazów CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> i He. Lasery CO<sub>2</sub> mogą pracować w sposób ciągły lub impulsowy, a ich zaletą jest duża wydajność oraz możliwość wytwarzania dużych energii. Lasery Nd:YAG, działające na granacie itrowo-glinowym domieszkowanym trójwartościowymi jonami neodymu, również mogą pracować w sposób impulsowy lub ciągły. Lasery ekscimerowe, które działają na mieszaninie gazu szlachetnego (Ar, Kr, Xe) oraz gazu halogenkowego (F<sub>2</sub> lub HCl), pracują w sposób impulsowy.

Schematycznie pokazano cięcie laserowe na rys. 8.7. Wiązka laserowa, skupiona przez soczewkę 3, wychodzi z dyszy głowicy laserowej 2 i ogniskuje się na przedmiocie obrabianym 1. Do dyszy głowicy laserowej dostarczany jest też gaz obróbkowy, który umożliwia zwiększenie prędkości cięcia oraz zmniejszenie szerokości szczeliny cięcia. W charakterze gazu obróbkowego może być stosowane powietrze, tlen, azot, hel, argon. W miejscu oddziaływania wiązki laserowej materiał nagrzewa się do bardzo wysokiej temperatury, co może powodować topnienie, parowanie i spalanie przecinanego materiału. Strumień gazu obróbkowego, przepływający współosiowo do wiązki laserowej, usuwa ze szczeliny cięcia ciekły materiał 5 lub pary tego materiału. Na powierzchni 4 po cięciu laserem widoczne są charakterystyczne prążki, tworzące się wzdłuż wią-

ki laserowej. Za pomocą zautomatyzowanych i skomputeryzowanych urządzeń laserowych mogą być wykonane przedmioty o bardzo złożonym kształcie. Za pomocą lasera można przecinać różne materiały, takie jak stal, stopy aluminium, stopy tytanu, materiały ceramiczne, tworzywa polimerowe, guma, drewno.



Rys. 8.7. Schemat cięcia laserowego: 1- przedmiot obrabiany, 2 – dysza głowicy, 3 – soczewka skupiająca, 4 – powierzchnia przedmiotu po przecięciu, 5 – ciekły materiał usunięty ze szczeliny cięcia

Urządzenia laserowe stosowane są też do drążenia otworów. Usuwanie materiału z drążonego otworu odbywa się głównie poprzez parowanie, co zapewnia dobrą jakość otworu. Obróbka laserowa umożliwia wykonywanie otworów w materiałach bardzo twardych, takich jak diament, rubin, szafir, ceramika. Wykonuje się otwory o średnicy od kilku mikrometrów. Stosunek głębokości do średnicy drążonych otworów zwykle zawiera się w granicach od 10 do 30, a może osiągać nawet 50 [10].

Ubytkowa obróbka laserowa charakteryzuje się tym, że:

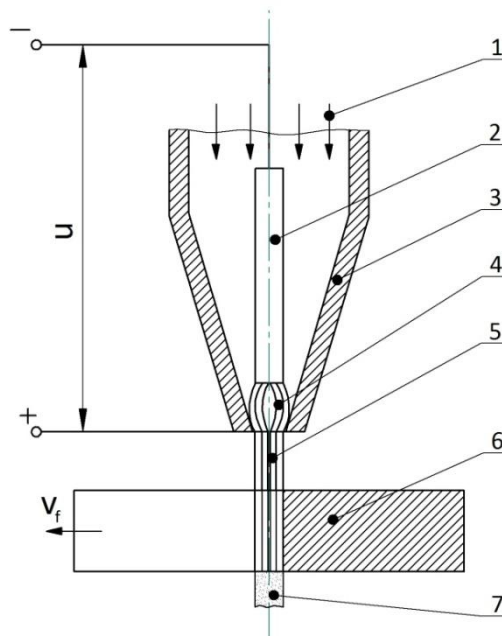
- nie występuje oddziaływanie sił powodujących odkształcenia przedmiotu obrabianego,
- nie występuje konieczność wymiany narzędzi,

- przebiega bez hałasu,
- zwykle jest w pełni zautomatyzowana,
- nie wymaga specjalnego oprzyrządowania,
- łatwe jest przestawienie produkcji na wykonywanie innego elementu,
- wymaga dużych nakładów inwestycyjnych związanych z zakupem urządzeń technologicznych.

## 8.4. Obróbka jonowa

Obróbka jonowa, nazywana też plazmową, polega na usuwaniu materiału za pomocą strumienia plazmy. Plazma jest to zjonizowany gaz, składający się z cząstek obojętnych, jonów dodatnich i swobodnych elektronów, w którym liczba ładunków dodatnich jest równa liczbie ładunków ujemnych.

Obróbka strumieniem plazmy stosowana jest głównie do cięcia materiałów. Schematycznie proces cięcia za pomocą palnika plazmowego przedstawiono na rys. 8.8.



Rys. 8.8. Schemat cięcia strumieniem plazmy: 1 – gaz roboczy, 2 – katoda, 3 – dysza palnika plazmowego (anoda), 4 – łuk elektryczny, 5 – strumień plazmy, 6 – przecinany przedmiot, 7 – ciekły metal usunięty ze szczeliny cięcia

Wskutek przyłożonego napięcia pomiędzy znajdującą się wewnątrz palnika katodą 2 a anodą, którą stanowi obudowa dyszy palnika plazmowego 3 powstaje łuk elektryczny 4. Do dyszy doprowadzany jest gaz roboczy, w którym, pod wpływem łuku elektrycznego, zachodzą silnie egzotermiczne reakcje. Wydzielające się ciepło powoduje wzrost temperatury strumienia plazmy 5 do około 25000 K [15]. Strumień plazmy, oddziałując na przedmiot, powoduje topienie i parowanie materiału w szczelinie cięcia.

Cięcie strumieniem plazmy znajduje szerokie zastosowanie do przecinania różnych materiałów, a także do wycinania z blachy przedmiotów o dowolnym kształcie. Do zalet tej metody cięcia można zaliczyć:

- dużą wydajność,
- możliwość przecinania materiałów o dużej grubości,
- stosunkowo niskie koszty eksploatacyjne.

Jednakże, w porównaniu z cięciem laserowym, gorsza jest jakość przeciętej powierzchni, mniejsza dokładność wycinanych elementów, a podczas obróbki występuje większy hałas.

## 9. OBRÓBKA GWINTÓW

Połączenia gwintowe można zaliczyć do najczęściej stosowanych połączeń w budowie maszyn. Elementy maszyn mogą być łączone bezpośrednio, po nacięciu gwintu w tych elementach (w jednym – wewnętrznego, w drugim – zewnętrznego), lub za pośrednictwem łączników gwintowych. Typowymi łącznikami z gwintem zewnętrznym są śruby i wkręty, a z gwintem wewnętrznym – nakrętki.

Powierzchnie gwintowe łączonych elementów tworzą grzbiety i bruzdy gwintowe położone na linii śrubowej. Linia śrubową (walcową, prostą) nazywany jest tor punktu poruszającego się po okręgu a jednocześnie poruszającego się w kierunku prostopadłym do płaszczyzny wyznaczonej przez ten okrąg. W zależności od kształtu zarysu rozróżnia się gwinty trójkątne, trapezowe, prostokątne, okrągłe. Jeżeli wymiary liniowe gwintu wyrażone są w milimetrach, to gwint taki nazywany jest metrycznym, a gdy w calach – calowym.

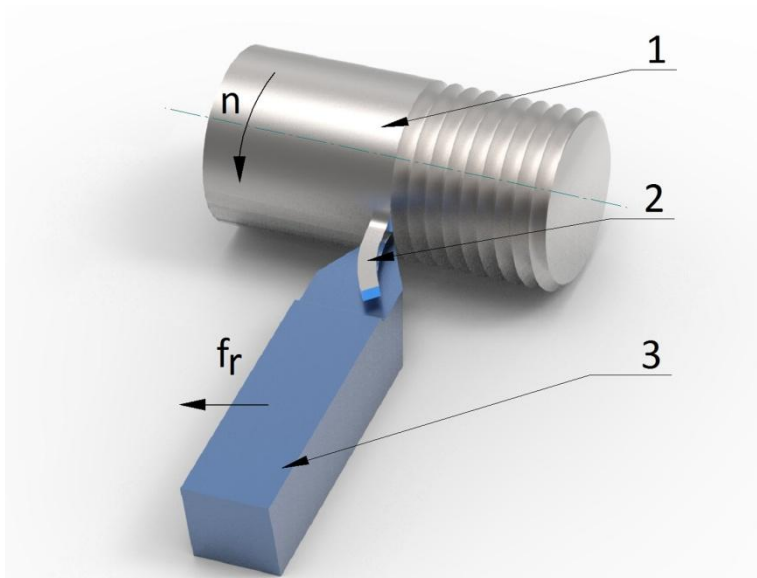
Gwinty najczęściej wykonywane są metodami obróbki ubytkowej oraz obróbki plastycznej (walcowanie, wygniatanie). Przy wyborze metody obróbki gwintu bierze się pod uwagę jego zarys, wymiary, dokładność, materiał obrabiany, wielkość produkcji. Ubytkowa obróbka gwintów może być wykonywana kilkoma sposobami, takimi jak:

- toczenie,
- nacinanie narzynkami,
- nacinanie gwintownikami,
- frezowanie frezami pojedynczymi i wielokrotnymi,
- nacinanie głowicami gwinciarскими,
- szlifowanie,
- gwintowanie elektroerozyjne.

### 9.1. Toczenie gwintów

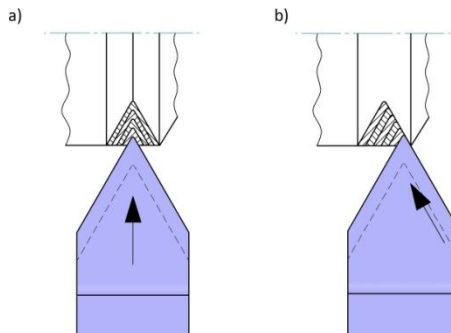
Gwint w procesie obróbki toczeniem otrzymywany jest w wyniku skojarzenia ruchu obrotowego  $n$  przedmiotu obrabianego 1, który jest ruchem głównym, oraz ruchu posuwowego  $f_r$  narzędzia 3 (rys. 9.1). Wartość posuwu na obrót jest równa skokowi gwintu.





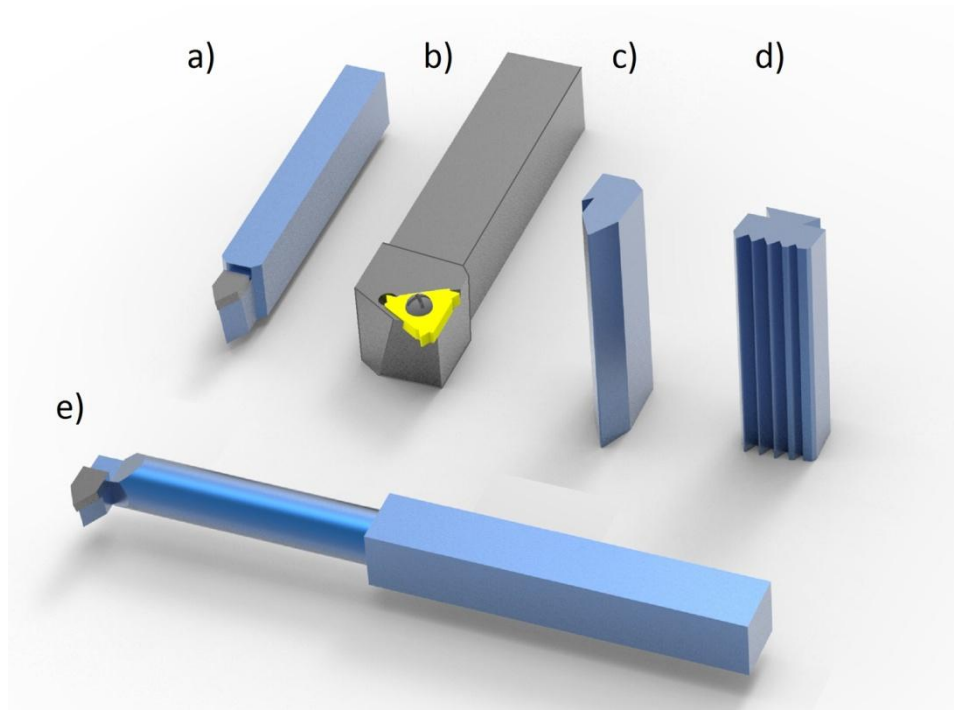
Rys. 9.1. Kinematyka toczenia gwintu: 1 – przedmiot obrabiany, 2 – wiór, 3 – nóż do gwintów

Nadatek obróbkowy, czyli materiał z bruzdy gwintu, usuwany jest w kilku lub kilkunastu przejściach. W przypadku gwintu z niewielkim skokiem kierunek dosuwu noża może być prostopadły do osi obrabianego przedmiotu (rys. 9.2a). Wadą takiego rozwiązania jest niekorzystny kształt przekroju poprzecznego warstwy skrawanej, powodujący silne obciążenie krawędzi skrawających. W przypadku nacinania gwintów o dużym skoku (powyżej 2,5 mm) stosuje się skośny dosuw noża (styczny do jednego z boków zarysu gwintu), co pokazano na rys. 9.2b. Przy takim dosuwie jest korzystniejszy kształt przekroju poprzecznego warstwy skrawanej, co umożliwia zmniejszenie liczby przejść.



Rys. 9.2. Schemat dosuwu noża do toczenia gwintu w kolejnych przejściach: a) dosuw prostopadły do osi przedmiotu, b) dosuw skośny

Noże do toczenia gwintów są narzędziami kształtowymi, których kształt części roboczej jest dostosowany do zarysu gwintu. Przykładowe noże do toczenia gwintów przedstawiono na rys. 9.3.



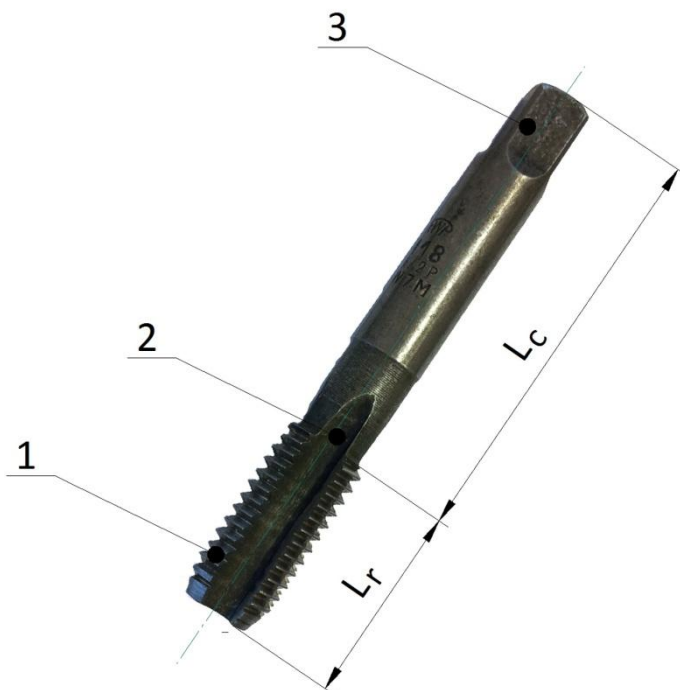
Rys. 9.3. Noże do toczenia gwintów: a) imakowy do gwintów zewnętrznych, b) imakowy składany, c) oprawkowy (słupkowy) pojedynczy, d) oprawkowy (słupkowy) wielokrotny, e) imakowy do gwintów wewnętrznych

Ze względu na budowę wyróżnia się noże do toczenia gwintów jednolite (rys. 9.3c,d), łączone w sposób trwały (rys. 9.3a,e), oraz składane (rys. 9.3b). Noże jednolite wykonywane są na ogół ze stali narzędziowych, noże łączone w sposób trwały mają płytki lutowane z węglików spiekanych lub część roboczą ze stali szybko tnącej zgrzewaną z częścią chwytową ze stali konstrukcyjnej, a noże składane skrawają wielostrzowymi płytkami z węglików spiekanych mocowanymi mechanicznie. W zależności od zarysu krawędzi skrawającej noże do gwintów dzieli się na pojedyncze (rys. 9.3a,b,c,e) oraz wielokrotne (rys. 9.3d), natomiast pod względem sposobu mocowania rozróżnia się noże imakowe (rys. 9.3a,b,e) i oprawkowe (rys. 9.3c,d). Metodą toczenia można wykonywać zarówno gwinty wewnętrzne jak i zewnętrzne. Przykłady noży do gwintów zewnętrz-

nych pokazano na rys. 9.3a – d, a do gwintów wewnętrznych – na rys. 9.3e. Ze względu na kształt zarysu gwintu różni się noże do gwintów trójkątnych (metrycznych i calowych), trapezowych itp.

## 9.2. Nacinanie gwintów gwintownikami

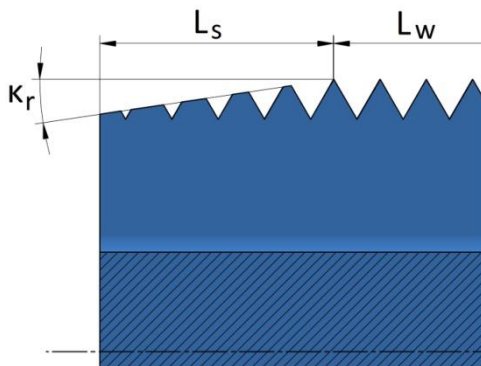
Gwintownikami są wieloostrzowe narzędzia kształtowe, przeznaczone do nacinania gwintów wewnętrznych o małych i średnich średnicach. W gwintownikach (rys. 9.4) wyróżnia się część roboczą ( $L_r$ ) oraz część chwytową ( $L_c$ ).



Rys. 9.4. Gwintownik do gwintów metrycznych:  $L_r$  – część robocza,  $L_c$  – część chwytowa, 1 – krawędź skrawająca, 2 – rowek wiórowy, 3 – zabierak

Część robocza gwintownika ma kształt śruby z wyfrezowanymi rowkami wzdłużnymi, służącymi do odprowadzania wiórów z gwintowanego otworu. Krawędzie przecięcia zwojów gwintu z powierzchniami rowków wiórowych są krawędziami skrawającymi 1. Rowki wiórowe 2 mogą być proste lub śrubowe. W części chwytowej wyodrębnia się zabierak 3, który służy do przekazywania ruchu obrotowego gwintownikowi.

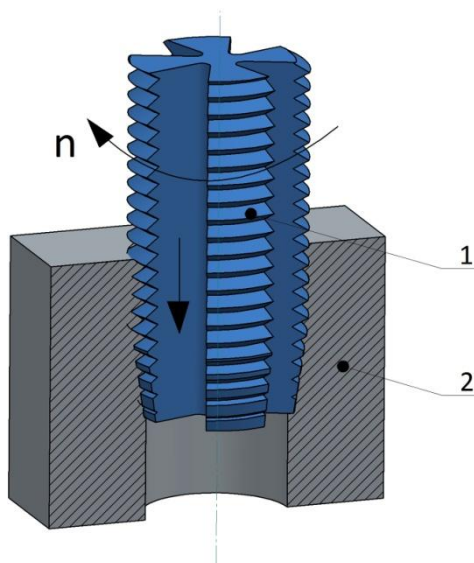
Na długości  $L_s$  część robocza gwintownika jest zaszlifowana pod kątem przystawienia  $\kappa_r$  (rys. 9.5), tworząc część skrawającą, która wykonuje zasadniczą pracę skrawania.



Rys. 9.5. Część robocza gwintownika:  $L_s$  część skrawająca,  $L_w$  – część wykończeniowa

W części roboczej wyodrębnia się też część wykończeniową ( $L_w$ ), która służy nadania gwintowi ostatecznych wymiarów, a także do prowadzenia gwintownika.

Kinematykę nacinania gwintu gwintownikiem uwidoczniono na rys. 9.6. Ruchem głównym jest ruch obrotowy gwintownika 1 względem przedmiotu obrabianego 2.



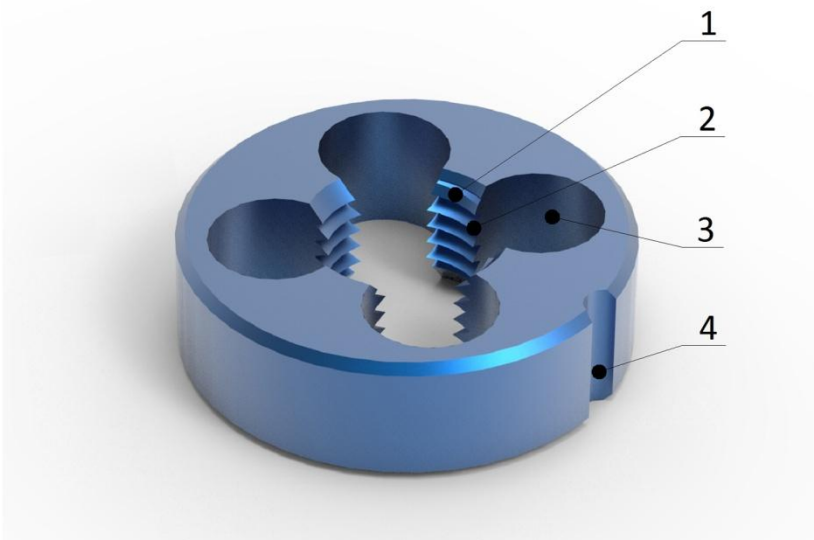
Rys. 9.6. Schemat nacinania gwintu gwintownikiem: 1 – narzędzie, 2 – przedmiot obrabiany

Ruch posuwowy gwintownika w kierunku równoległym do osi jest wynikiem połączenia ruchu obrotowego oraz ukształtowania poszczególnych ostrzy na linii śrubowej.

Za pomocą gwintowników mogą być wykonywane gwinty walcowe i stożkowe. Gwinty mogą być nacinane ręcznie oraz maszynowo. Podczas gwintowania ręcznego ruch obrotowy wykonuje zwykle gwintownik, a podczas gwintowania maszynowego (na tokarkach) – przedmiot obrabiany. Do nacinania ręcznego zwykle używa się trzech gwintowników (wstępny, zdzierak, wykańczak), a w przypadku gwintów drobnozwojowych – dwóch. Nacinanie maszynowe odbywa się za pomocą jednego gwintownika.

### 9.3. Nacinanie gwintów narzynkami

Zasada pracy narzynek jest podobna jak gwintowników, z tą różnicą, że narzynki służą do nacinania gwintów zewnętrznych. Praca narzynki przebiega podobnie jak nakręcanie nakrętki na śrubę. Krawędzie skrawające 2 narzynki (rys. 9.7) powstają w wyniku przecięcia wewnętrznej powierzchni gwintowej 1, stanowiącej powierzchnię przyłożenia, z otworami wiórowymi 3. Gniazda 4, rozmieszczone na obwodzie narzynki, służą do zamocowania jej w oprawce.



Rys. 9.7. Narzynka gwintowa ręczna: 1 – powierzchnia gwintowa, 2 – krawędź skrawająca, 3 – otwór wiórowy, 4 – gniazdo do mocowania

W części roboczej narzynki znajdują się dwie części skrawające, po obydwu stronach narzynki, oraz część wykończeniowa (prowadząca), która jest położona między częściami skrawającymi. Długość części wykończeniowej jest równa  $(3\div 5)$  – krotnej długości skoku gwintu. Usunięcie materiału z bruzdy gwintu następuje w wyniku skrawania kolejnych warstw materiału przez ostrza części skrawającej.

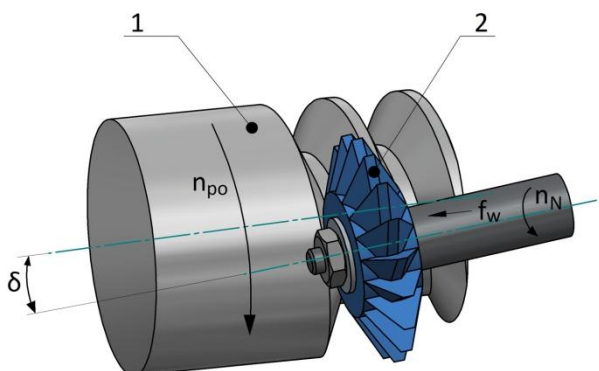
Nacinanie gwintów narzynkami może odbywać się ręcznie oraz maszynowo. Ujemną stroną nacinania gwintów narzynkami jest niewielka dokładność gwintu oraz mała wydajność.

## 9.4. Frezowanie gwintów

Frezowaniem można wykonywać zarówno gwinty zewnętrzne jak i wewnętrzne o większych średnicach. Wyróżnia się dwie odmiany frezowania gwintów:

- frezowanie frezem pojedynczym (krążkowym),
- frezowanie frezem wielokrotnym (grzebieniowym).

Kinematykę frezowania gwintu frezem pojedynczym przedstawiono na rys. 9.8. Przedmiot obrabiany 1 wykonuje powolny ruch obrotowy  $n_{pO}$ , a frez 2 – dużo szybszy ruch obrotowy  $n_N$ , który jest ruchem głównym. Posuw wzdłużny  $f_w$  musi być zsynchronizowany z ruchem obrotowym przedmiotu obrabianego. Kąt pochylenia osi frezu względem osi przedmiotu  $\delta$  jest równy kątowi wzniosu linii śrubowej gwintu.

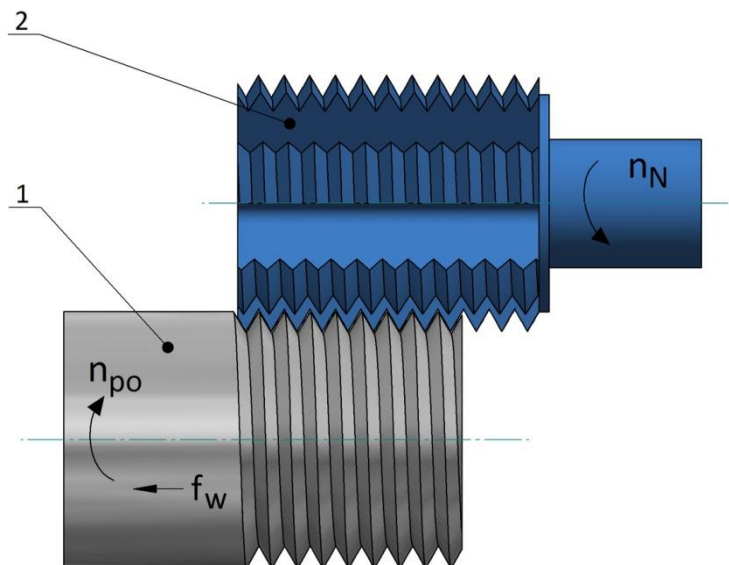


Rys. 9.8. Kinematyka frezowania gwintu frezem pojedynczym: 1 – przedmiot obrabiany, 2 – frez

Frezami pojedynczymi obrabia się gwinty długie, najczęściej o zarysie trapezowym. Ze względu na skażenie zarysu, frezowanie frezami pojedynczymi stosowane jest do wykonywania gwintów mało dokładnych, albo jako obróbka zgrubna.

Frezy wielokrotne stosowane są do obróbki gwintów krótkich. Długość nacinanego gwintu powinna być o co najmniej  $(1 \div 2)$  podziałki mniejsza od długości frezu.

Kinematyka frezowania gwintu frezem wielokrotnym przedstawiona została na rys. 9.9. Frez 2 wykonuje ruch obrotowy z prędkością  $n_N$ , który jest ruchem głównym, natomiast przedmiot obrabiany 1 wykonuje powolny ruch obrotowy z prędkością  $n_{PO}$  oraz posuw wzdłużny  $f_w$ , który jest skorelowany z prędkością obrotową przedmiotu.



Rys. 9.9. Kinematyka frezowania gwintu frezem wielokrotnym: 1 – przedmiot obrabiany, 2 – frez

W początkowej fazie obróbki przedmiot wykonuje ruch poprzeczny w celu wejścia frezu w materiał na pełną wysokość gwintu (przedmiot w tym czasie wykonuje  $(1/6 \div 1/4)$  obrotu. Oś frezu jest równoległa do osi przedmiotu obrabianego.

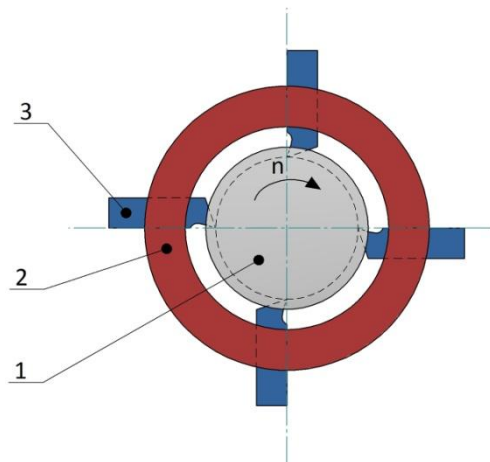
Frezy wielokrotne do gwintów wykonywane są jako trzpieniowe oraz nasadzane. Widok frezu wielokrotnego nasadzanego przedstawiono na rys. 9.10.



Rys. 9.10. Frez do gwintów wielokrotny nasadzany

## 9.5. Nacinanie gwintów głowicami gwinciarскими

Głowicami pracującymi podobnie jak narzynki są głowice gwinciarские. W głowicy 2, przedstawionej na rys. 9.11 osadzone są cztery noże 3. Przedmiot obrabiany 1, który znajduje się wewnątrz głowicy, wykonuje ruch obrotowy z prędkością  $n$ . Ruch posuwowy wykonuje głowica.



Rys. 9.11. Kinematyka nacinania gwintu głowicą gwinciarскими na tokarce: 1 – przedmiot obrabiany, 2 – głowica gwinciarська, 3 – nóż głowicy

Według przedstawionej kinematyki gwinty głowicami gwinciarскими są nacinane na tokarkach. Mogą być też stosowane inne rozwiązania kinematyczne, np. na gwinciarzkach ruch główny wykonuje głowica, a ruch posuwowy – przedmiot.

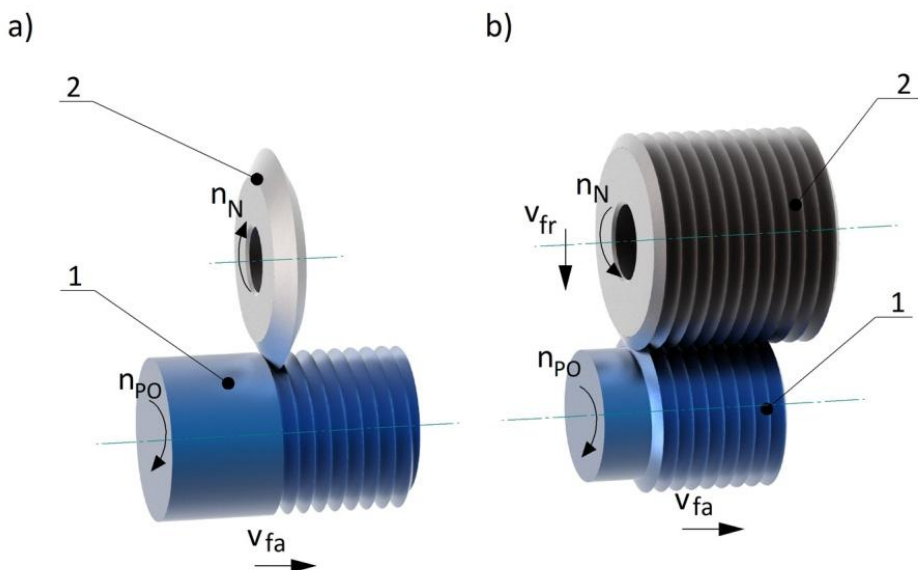


Zaletą głowic gwinciarских jest możliwość promieniowego odsuwania się noży od przedmiotu obrabianego po zakończeniu obróbki gwintu, co pozwala na szybkie przemieszczenie głowicy do pozycji wyjściowej. Czas nacinania gwintu głowicami jest krótszy w porównaniu zarówno z toczeniem jak i nacinaniem narzynkami.

## 9.6. Szlifowanie gwintów

Sposobem dokładnej obróbki gwintów jest szlifowanie. Szlifuje się bardzo dokładne gwinty w elementach maszyn, narzędzia do wykonywania gwintów oraz sprawdziany do gwintów. Szlifowanie może być zastosowane jako obróbka wykończeniowa gwintów obrobionych wstępnie innym sposobem (np. frezowaniem lub toczeniem). W przypadku gwintów drobnych (o małym skoku) lub wykonywanych w materiale charakteryzującym się dużą twardością szlifuje się gwinty w pełnym materiale.

Do szlifowania stosowane są ściernice kształtowe o zarysie dostosowanym do zarysu szlifowanego gwintu. Gwinty szlifuje się ściernicami pojedynczymi oraz wielokrotnymi (rys. 9.12).



Rys. 9.12. Kinematyka szlifowania gwintu: a) ściernicą pojedynczą, b) ściernicą wielokrotną (1 – przedmiot obrabiany, 2 – ściernica)

Zarówno przedmiot obrabiany 1 jak i ściernica 2 wykonują ruch obrotowy, ale prędkość obrotowa ściernicy  $n_N$  jest dużo większa od prędkości obrotowej przedmiotu  $n_{PO}$ . Posuw wzdłużny (w kierunku równoległym do osi przedmiotu) jest równy przesunięciu ściernicy na jeden obrót przedmiotu obrabianego.

Szlifowanie ściernicami pojedynczymi prowadzone jest w kilku przejściach. Oś ściernicy jest skrzyżowana względem osi przedmiotu o kąt wzniosu gwintu. Szlifowanie ściernicami pojedynczymi najczęściej stosowane jest jako obróbka wykończeniowa gwintów dokładnych.

Ściernicami wielokrotnymi często szlifowane są gwinty drobne w pełnym materiale. Przedmioty o długości mniejszej od szerokości ściernicy są szlifowane z posuwem wgłębnym (promieniowym) jednocześnie na całej długości. Szlifowanie ściernicami wielokrotnymi jest bardziej wydajne ale mniej dokładne.

## 9.7. Gwintowanie elektroerozyjne

Wykonanie gwintu metodą elektroerozyjną wymaga znacznie dłuższego czasu w porównaniu z obróbką wiórową. Dlatego gwintowanie elektroerozyjne stosowane jest w wyjątkowych sytuacjach, głównie do wykonywania gwintów wewnętrznych w materiałach bardzo twardych, których nie można obrabiać sposobami wiórowymi.

Elektrody robocze do wykonywania gwintów wewnętrznych mają kształt śruby o wymiarach pomniejszonych w stosunku do wymiarów wykonywanego gwintu o wymiar szczeliny iskrowej. Elektroda robocza w czasie gwintowania wykonuje ruch obrotowy i skorelowany z nim ruch wzdłuż osi gwintu.

## **10. OBRÓBKA UZĘBIEŃ KÓŁ ZĘBATYCH WALCOWYCH**

Koła zębate są ważnymi elementami przekładni zębatych, które służą do przenoszenia ruchu z jednego wału na drugi. Uzębieniem kół zębatych nazywane są występy o określonym kształcie (zęby) rozmieszczone równomiernie na wieńcu koła zębatego. W kołach zębatych z uzębieniem zewnętrznym zęby rozmieszczone są na zewnętrznej stronie wieńca, a w kołach z uzębieniem wewnętrznym – na stronie wewnętrznej.

Rozróżnia się koła zębate walcowe, gdy zęby rozmieszczone są na powierzchni walca, koła zębate stożkowe – zęby rozmieszczone są na powierzchni stożka, a także koła ślimakowe – zęby rozmieszczone są na wklęsłej powierzchni pierścieniowej. W dalszej części podręcznika przedstawione będą metody obróbki uzębień kół zębatych walcowych (informacje na temat obróbki kół zębatych stożkowych i ślimakowych można znaleźć w książkach [34, 40, 46]).

Uzębienie kół zębatych walcowych może być wykonywane metodami: kopiową, kształtową i obwiedniową.

Metody kopiowe, polegające na odwzorowaniu kształtu kopiału w obrabianym przedmiocie, są bardzo rzadko stosowane (niekiedy obrabia się tą metodą koła zębate o dużych modułach).

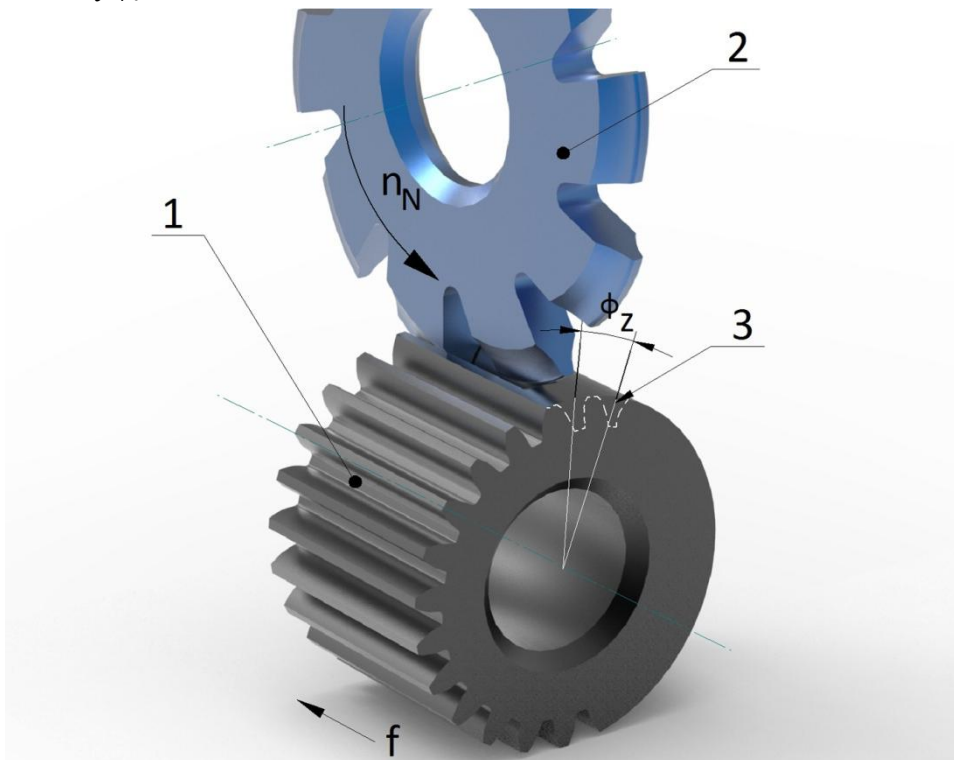
Metody kształtowe polegają na odwzorowaniu w obrabianym przedmiocie zarysu krawędzi skrawających narzędzia. Obróbka kształtowa uzębień może być realizowana jako dłutowanie, frezowanie, przeciąganie, przepychanie oraz szlifowanie.

Metody obwiedniowe obróbki uzębień charakteryzują się tym, że kształt zębów uzyskiwany jest w wyniku nałożenia się kolejnych położeń krawędzi skrawających narzędzi, które wraz z przedmiotem obrabianym symulują pracę przekładni składającej się z dwóch kół zębatych albo koła zębatego i zębatki. Obróbka obwiedniowa uzębień jest realizowana następującymi sposobami: dłutowaniem, struganiem, frezowaniem, przeciąganiem i szlifowaniem.

### **10.1. Obróbka kształtowa uzębień kół zębatych walcowych**

Najczęściej stosowaną metodą kształtową obróbki uzębień zewnętrznych jest frezowanie. Stosuje się frezy kształtowe modułowe krążkowe oraz trzpieniowe.

Kinematykę frezowania uzębienia frezem modułowym krążkowym przedstawiono na rys. 10.1. Frez 2 wykonuje ruch obrotowy  $n_N$ , natomiast koło obrabiane 1 – ruch posuwowy  $f$ . Aby wyfrezować kolejny wręb 3 (usunąć materiał z przestrzeni między kolejnymi zębami), obrabiane koło jest obracane o kąt podziałowy  $\phi_z$ .



Rys. 10.1. Schemat frezowania uzębienia metodą kształtową frezem modułowym krążkowym: 1 – obrabiane koło, 2 – frez, 3 – wręb

Zarys wrębu koła zębatego zależy od liczby zębów, zatem zmiana liczby zębów obrabianego koła powinna wiązać się ze zmianą narzędzia. Aby zmniejszyć liczbę narzędzi przyjęto, że jednym frezem obrabia się koła o liczbie zębów mieszczącej się w pewnym przedziale. Widok frezu modułowego krążkowego do uzębienia przedstawiono na rys. 10.2.

W przypadku obróbki kół zębatych o dużych modułach stosuje się frezowanie zgrubne i wykończeniowe. Frezy zdzieraki mają łamane krawędzie w celu lepszego rozdzielania wiórów. Do obróbki zgrubnej stosowane są też frezy składowane z płytkami z węglików spiekanych [5].



Rys. 10.2. Frez kształtowy modułowy krążkowy do uzębień

Frezy kształtowe modułowe, zarówno krążkowe jak i trzpieniowe, służą głównie do obróbki uzębień zewnętrznych. Frezem trzpieniowym można naciąć nie tylko zęby proste, ale również śrubowe. Uzębienia wewnętrzne wykonuje się dłutowaniem, za pomocą dłutaków kształtowych, oraz przeciąganiem (są też specjalne przystawki umożliwiające frezowanie uzębień wewnętrznych [5]).

Metody kształtowe stosowane są do obróbki kół zębatych o niewielkiej dokładności lub jako obróbka zgrubna, z pozostawieniem nadatku na obróbkę wykończeniową. Do przyczyn małej dokładności kół zębatych wykonywanych metodami kształtowymi można zaliczyć niedokładność zarysu narzędzi oraz błędy ustawienia narzędzi względem obrabianych przedmiotów.

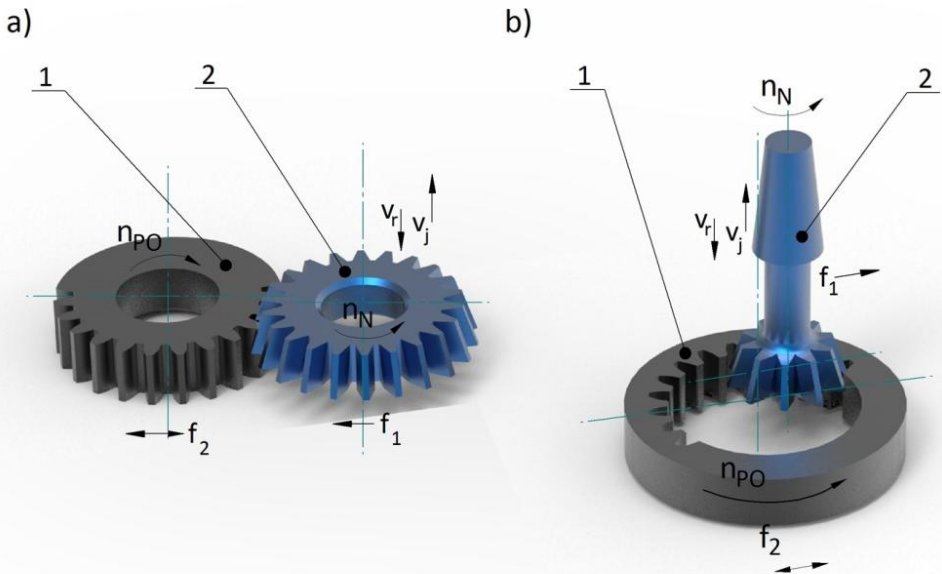
## **10.2. Obróbka obwiedniowa uzębień kół zębatych walcowych**

### **10.2.1. Dłutowanie i struganie obwiedniowe**

Dłutowanie obwiedniowe uzębień wykonuje się metodą Fellowsa lub Maga, a struganie metodą Sunderlanda.

Kinematykę nacinania uzębień metodą Fellowsa przedstawiono na rys. 10.3. Metodą tą można naciąć zarówno uzębienia zewnętrzne (rys. 10.3a) jak i wewnętrzne (rys. 10.3b). Narzędzie, którym jest dłutak Fellowsa 2, wyko-

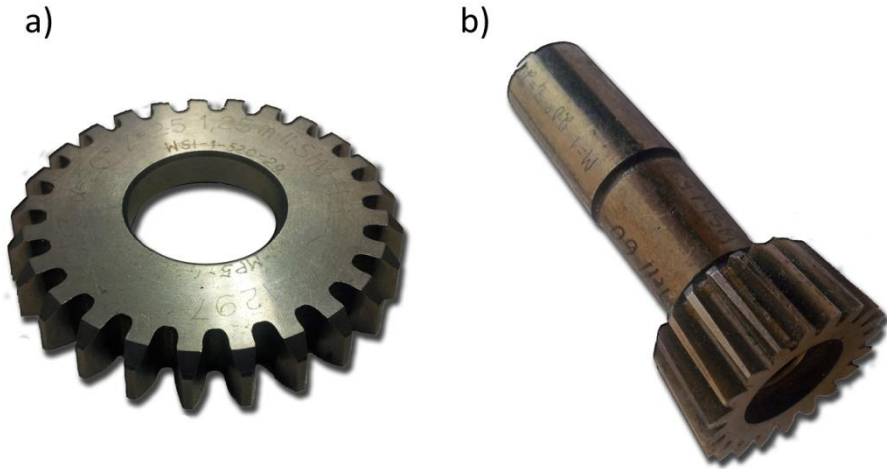
nuje ruch roboczy z prędkością  $v_r$  oraz ruch jałowy z prędkością  $v_j$  (ruch roboczy jest ruchem głównym a prędkość  $v_r$  jest prędkością skrawania) oraz ruch obrotowy z prędkością  $n_N$ . W początkowej fazie pracy dłutak wykonuje też ruch promieniowy  $f_1$ , którego celem jest wprowadzenie ostrzy na pełną głębokość wrębu. Przedmiot obrabiany wykonuje ruch obrotowy z prędkością  $n_{PO}$ , który jest skorelowany z prędkością obrotową  $n_N$ , oraz ruch poprzeczny  $f_2$ , polegający na odsuwaniu obrabianego koła od dłutaka w czasie ruchu jałowego, co przyczynia się do zmniejszenia tarcia między dłutakiem a przedmiotem obrabianym.



Rys. 10.3. Schemat nacinania uzębienia metodą Fellowsa: a) zewnętrznego, b) wewnętrznego (1 – obrabiane koło, 2 – dłutak Fellowsa)

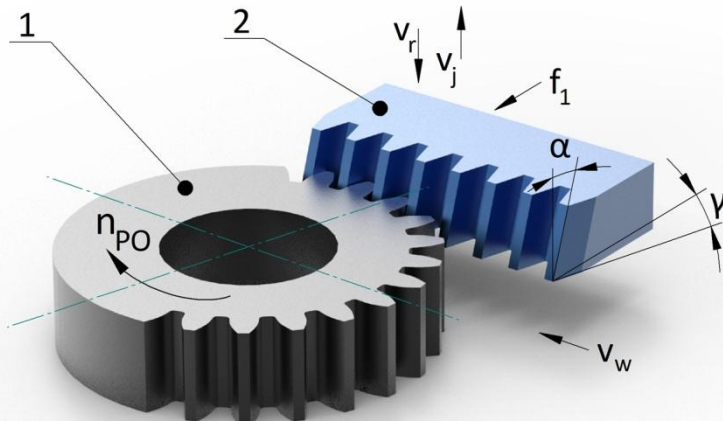
Metodą Fellowsa można obrabiać koła zębate zarówno o zębach prostych jak i śrubowych. Dłutaki do obróbki kół zębatach o zębach śrubowych mają także ostrza śrubowe. Dłutaki te podczas obróbki wykonują dodatkowy ruch obrotowo-zwrotny.

Dłutaki Fellowsa (modułowe) służą do obróbki kół zębatach o określonym module, ale jednym dłutakiem można obrabiać koła o różnej liczbie zębów. Ze względu na sposób mocowania wyróżnia się dłutaki trzpieniowe i nasadzone. Dłutaki nasadzone dzielą się na płaskie, garnkowe i z gwintem. Widok dłutaka nasadzanego i trzpieniowego przedstawiono na rys. 10.4.



Rys. 10.4. Dłutaki Fellowsa do obróbki kół zębatach o zębach prostych: a) nasadzany (płaski), b) trzpieniowy

Kinematykę nacinania uzębienia metodą Maaga przedstawiono na rys. 10.5. Narzędzie, nazywane nożem zębatkowym (Maaga), ma kształt listwy zębatej (zębatki), a zatem podczas obróbki symulowana jest współpraca koła zębatego (obrabiany przedmiot) z zębatką. Metodą tą można nacinąć tylko uzębienia zewnętrzne.



Rys. 10.5. Schemat nacinania uzębienia metodą Maaga: 1 – obrabiane koło, 2 – nóż zębatkowy

Nóż zębatkowy 2 wykonuje ruchy posuwisto-zwrotne w kierunku pionowym (dłutowanie), przy czym ruch z prędkością  $v_r$  jest ruchem roboczym, a ruch z prędkością  $v_j$  – ruchem jałowym. Obrabiane koło 1 wykonuje ruch obrotowy wokół własnej osi z prędkością  $n_{PO}$  oraz przesuwny ( $v_w$ ) wzdłuż noża zębatkowego. Podobnie jak w metodzie Fellowsa, ostrza noża Maaga w początkowym okresie pracy zagłębiają się w materiał obrabiany (ruch  $f_I$ ). Zwykle długość noża zębatkowego jest mniejsza od obwodu nacinanego koła, co wymusza powrót koła do położenia wyjściowego po nacięciu określonej liczby wrębów, zależnej od długości noża.

Kinematyka nacinania kół zębatych metodą Sunderlanda jest podobna jak metodą Maaga. Noże Sunderlanda również mają kształt zębatki i podczas obróbki symulowana jest współpraca koła zębatego z zębatką, natomiast metoda Sunderlanda różni się od metody Maaga tym, że:

- ruch główny wykonuje narzędzie w płaszczyźnie poziomej, a zatem obróbka metodą Sunderlanda jest struganiem,
- w metodzie Sunderlanda ruch przesuwny z prędkością  $v_w$  wykonuje narzędzie,
- noże dłutownicze Maaga mają płaską powierzchnię natarcia i kąt natarcia w układzie narzędzia równy zeru (w celu uzyskania dodatniego kąta natarcia nóż pochyla się w suporcie obrabiarki), natomiast noże strugarskie Sunderlanda mają dodatni kąt natarcia w układzie narzędzia.

### 10.2.2. Frezowanie i przeciąganie obwiedniowe

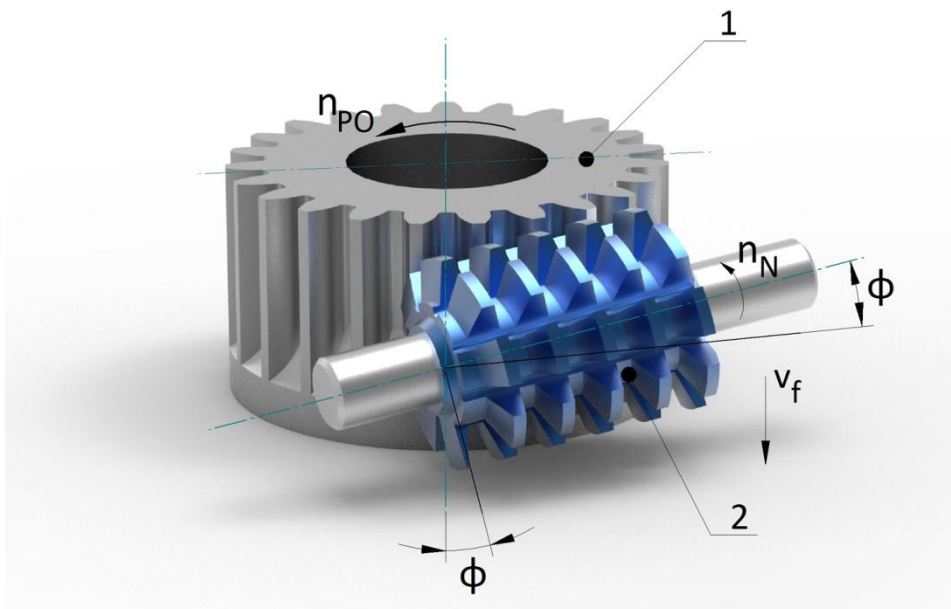
Rozróżnia się dwie metody frezowania obwiedniowego uzębień kół zębatych walcowych:

- frezowanie konwencjonalne,
- frezowanie diagonalne.

Kinematykę frezowania obwiedniowego uzębień metodą konwencjonalną przedstawiono na rys. 10.6.

Narzędzie, którym jest frez ślimakowy modułowy 2, wykonuje ruch obrotowy z prędkością  $n_N$  oraz ruch posuwowy z prędkością  $v_f$  w kierunku równoległym do osi obrabianego koła 1. Ruch obrotowy frezu jest ruchem głównym. Obrabiane koło 1 wykonuje ruch obrotowy z prędkością  $n_{PO}$ . Prędkości obrotowe frezu  $n_N$  i obrabianego koła  $n_{PO}$  są sprzężone ze sobą tak, aby na jeden obrót frezu przypadało  $k/z$  obrotu nacinanego koła zębatego ( $k$  – krotność frezu,  $z$  – liczba zębów nacinanego koła).





Rys. 10.6. Schemat nacinania uzębienia konwencjonalną metodą frezowania obwiedniowego: 1 – obrabiane koło, 2 – frez ślimakowy modułowy

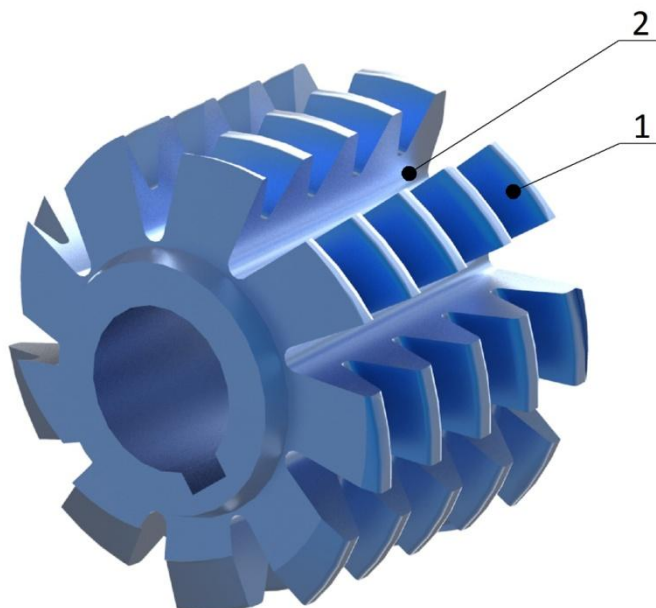
Frezem modułowym ślimakowym można nacinąć koła zębate walcowe o zębach prostych oraz śrubowych. Podczas obróbki kół o zębach prostych oś frezu jest pochylona względem płaszczyzny prostopadłej do osi nacinanego koła pod kątem  $\phi$ , który jest równy kątowi wzniosu linii śrubowej zwojów frezu. W czasie nacinania zębów śrubowych wartość kąta  $\phi$  jest równa różnicy kąta pochylenia linii śrubowej nacinanych zębów oraz kąta wzniosu linii śrubowej zwojów frezu, gdy kierunek zwojności frezu i zębów koła jest jednakowy, lub sumie tych kątów, gdy kierunki zwojności frezu i zębów są przeciwne.

Frezowanie diagonalne charakteryzuje się tym, że posuw jest wypadkową posuwu wzdłuż osi nacinanego koła i posuwu wzdłuż osi narzędzia.

Frezy ślimakowe, w zależności od kształtu obrabianego przedmiotu, dzieli się na:

- frezy do kół zębatach walcowych,
- frezy do ślimacznicy,
- frezy do kół zębatach stożkowych.

Widok frezu ślimakowego modułowego do obróbki kół zębatych przedstawiono na rys. 10.7. Ostrza frezu 1 powstają w wyniku przecięcia zwojów ślimaka rowkami wiórowymi 2.



Rys. 10.7. Frez ślimakowy modułowy do obróbki kół zębatych: 1 – ostrze frezu, 2 – rowek wiórowy

Frezowanie obwiedniowe jest jednym z najczęściej stosowanych sposobów obróbki uzębień.

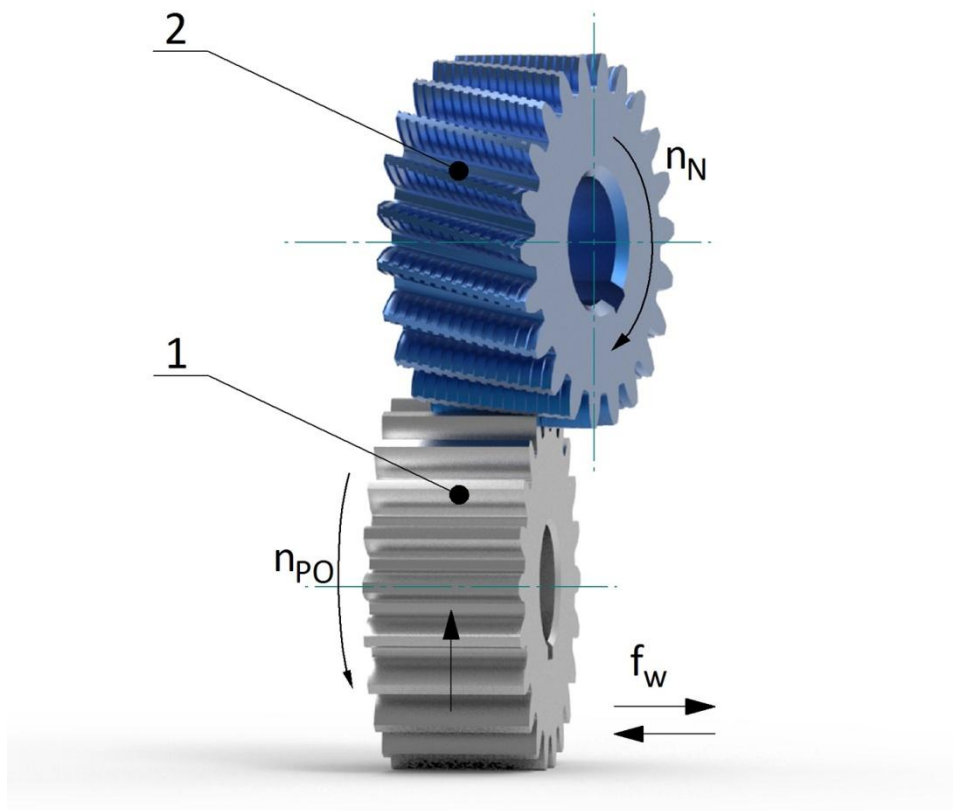
Przeciąganie obwiedniowe uzębień wykonywane jest na obrabiarkach pracujących jak przeciągarki łańcuchowe, przy czym musi występować sprzężenie kinematyczne ruchu obrotowego nacinanego koła zębatego z ruchem kształtującym umieszczonych na łańcuchu uzębionych segmentów [40]. Zaletą przeciągania obwiedniowego jest duża wydajność.

### 10.3. Obróbka wykończeniowa kół zębatych

W wielu przypadkach wysokie wymagania odnośnie dokładności kół zębatych oraz jakości powierzchni zębów sprawiają, że konieczna jest obróbka wykończeniowa tych kół. Koła zębate walcowe mogą być obrabiane wykończeniowo takimi metodami jak: wiórkowanie, szlifowanie, gładzenie, docieranie.

### 10.3.1. Wiórkowanie

Wiórkowaniem mogą być obrabiane wykończeniowo koła zębate, których twardość nie przekracza 40 HRC. Schematycznie obróbkę wiórkowaniem krążkowym przedstawiono na rys. 10.8.



Rys. 10.8. Schemat wiórkowania koła zębatego: 1 – obrabiane koło zębate, 2 – wiórkownik krążkowy

Narzędzie, którym jest wiórkownik krążkowy 2, tworzy z obrabianym kołem 1 przekładnię zębatą o wchrowatych osiach. Prędkość obrotowa wiórkownika  $n_N$  jest skorelowana z prędkością obrotową obrabianego koła  $n_{PO}$ . Obrabiane koło wykonuje też ruchy posuwisto – zwrotne  $f_w$  w kierunku równoległym do osi koła. Oś wiórkownika jest odchylna o kąt równy  $(10 \div 15)^\circ$ , co powoduje po-

ślizg boków zębów wiórkownika i obrabianego koła. Wiórkownik ma nacięte rowki 1 (rys. 10.9), które z powierzchnią boczną zęba tworzą krawędzie 2. Ostre krawędzie wiórkownika, przemieszczające się, przy dużym docisku, po bocznych powierzchniach obrabianego koła, powodują usuwanie bardzo cienkich warstwek materiału.



Rys. 10.9. Ząb wiórkownika: 1 – rowek, 2 – krawędź

Do wiórkowania stosowane są też wiórkowniki zębatkowe, mające kształt zębatki, której zęby zostały ukształtowane podobnie jak w wiórkowniku krążkowym. Wiórkownik zębatkowy w czasie pracy wykonuje ruchy posuwisto – zwrotne.

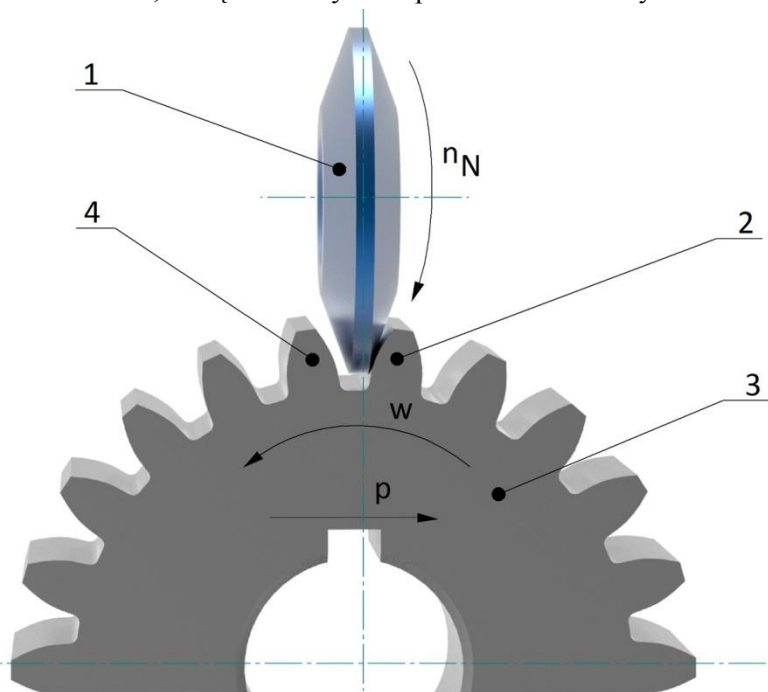
### 10.3.2. Szlifowanie, gładzenie i docieranie

Szlifowaniem można obrabiać wykończeniowo koła zębate w stanie twarde. Koła zębate mogą być szlifowane metodą kształtową i obwiedniową.

Szlifowanie kształtowe polega na obróbce powierzchni bocznej zębów za pomocą ściernicy o profilu odpowiadającym zarysowi boku szlifowanego zęba. Zaletą szlifowania kształtowego jest krótki czas obróbki, natomiast do wad trzeba zaliczyć łatwość popełnienia błędu podczas profilowania ściernicy oraz jej ustawienia względem przedmiotu obrabianego, a także nagrzewanie się zębów do wysokiej temperatury.

Szlifowanie obwiedniowe zębów kół walcowych polega na symulowaniu współpracy obrabianego koła z zębatką. Rozróżnia się szlifowanie obwiedniowe podziałowe i ciągłe.

Znane są różne metody szlifowania kół zębatych [34, 40]. Jedną z tych metod jest metoda Nilesa, którą schematycznie przedstawiono na rys. 10.10.



Rys. 10.10. Schemat szlifowania koła zębatego metodą Nilesa: 1 – ściernica, 2 – ząb prawy, 3 – obrabiane koło zębate, 4 – ząb lewy

Funkcję zęba zębatki pełni odpowiednio zaprofilowana ściernica 1, obracająca się z prędkością  $n_N$ . Szlifowanie powierzchni bocznej zęba prawego 2 odbywa się w ten sposób, że obrabiane koło zębate 3 wykonuje ruch wahliwy (w) oraz ruch przesuwny (p) w kierunkach pokazanych strzałkami. Szlifowanie przebiega od dna wrębu do wierzchołka zęba. W kolejnej fazie, w podobny sposób, szlifowana jest powierzchnia boczna zęba lewego 4 (ruch wahliwy (w) i przesuwny (p) wykonuje się w kierunku przeciwnym w stosunku do pokazanego na rys. 10.10). Szlifowanie następnego wrębu wymaga wycofania ściernicy i obrotu koła zębatego.

Szlifowanie ciągłe uzębień przebiega podobnie jak frezowanie obwiedniowe. Narzędziem jest ściernica ślimakowa, ukształtowana jak ślimak jednokrotny.

Gładzenie uzębień następuje w wyniku współpracy obrabianego koła zębatego z narzędziem, którym może być koło zębate wykonane z mieszaniny ścierniwa karborundowego i żywicy syntetycznej lub koło stalowe z naniesioną warstwą proszku karborundowego [40]. Obrabiane koło zębate i koło – narzędzie tworzą przekładnię wchrowatą, dzięki czemu następuje poślizg na powierzchniach bocznych zębów.

Docieranie uzębień może odbywać się w wyniku współpracy docieranego koła zębatego z kołem – docierakiem lub na skutek współpracy kół zębatych tworzących przekładnię. Do docierania stosowane są pasty ścierne. Docieranie umożliwia zmniejszenie chropowatości powierzchni bocznych zębów oraz uzyskanie beczkowatego kształtu zębów.

## 11. WARSTWA WIERZCHNIA OBROBIONYCH PRZEDMIOTÓW

Celem obróbki ubytkowej jest nadanie obrabianym elementom maszyn odpowiedniego kształtu z zachowaniem wymaganej dokładności wymiarowo – kształtowej, a także uzyskanie założonego stanu warstwy wierzchniej. Warstwa wierzchnia (WW) definiowana jest, zgodnie z normą PN - 87/M – 04250, jako warstwa materiału ograniczona rzeczywistą powierzchnią przedmiotu, obejmująca tę powierzchnię oraz część materiału leżącą w głąb od powierzchni rzeczywistej, która wykazuje zmienione cechy fizyczne, a niekiedy i chemiczne w stosunku do cech tego materiału w głąbi przedmiotu (w rdzeniu) [50].

Rozróżnia się warstwę wierzchnią technologiczną oraz eksploatacyjną. Technologiczna warstwa wierzchnia (TWW) rozumiana jest jako warstwa wierzchnia przedmiotu bezpośrednio po jego wytworzeniu. Natomiast pojęcie eksploatacyjnej warstwy wierzchniej (EWW) wiąże się z warstwą wierzchnią w czasie procesu eksploatacji lub po jego zakończeniu. Przedmioty, których TWW została w sposób celowy ukształtowana w procesie ich wytwarzania, podczas eksploatacji narażone są na różne wymuszenia, takie jak: tribologiczne, korozyjne, zmęczeniowe i inne, które wpływają na kształtowanie EWW [27].

TWW elementów maszyn ma duży wpływ na cechy użytkowe tych maszyn, takie jak:

- niezawodność działania,
- trwałość, czyli czas działania,
- estetyczny wygląd.

Budowa WW elementów maszyn, ukształtowana w procesie obróbki ubytkowej, zależy od rodzaju materiału obrabianego, materiału i geometrii ostrza narzędzia, parametrów technologicznych, rodzaju i intensywności podawania cieczy obróbkowej itp. Znane są różne modele WW, w których wyodrębnia się strefy: przypowierzchniową, ukierunkowania ziaren, efektów cieplnych, sterowania, zgniotu, naprężeń własnych i inne [3, 18].

Stan warstwy wierzchniej charakteryzowany jest za pomocą jej właściwości, które dzieli się na:

- właściwości stereometryczne powierzchni, określane też jako struktura geometryczna powierzchni (SGP),
- właściwości fizyczne WW.

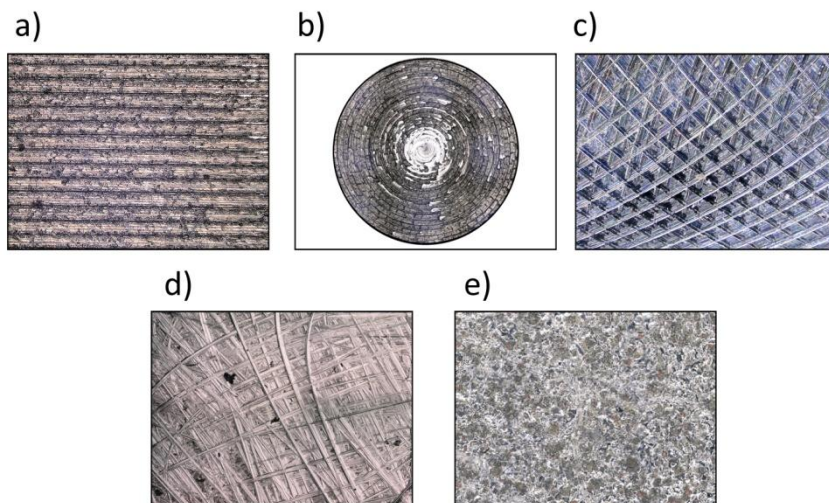
## 11.1. Właściwości stereometryczne powierzchni

### 11.1.1. Kierunkowość struktury geometrycznej powierzchni

W procesie obróbki oraz w czasie eksploatacji na powierzchniach elementów maszyn powstają mikronierówności, których wzajemny układ określany jest mianem kierunkowości struktury geometrycznej powierzchni. Rozróżnia się następujące rodzaje kierunkowości (w nawiasach podano symbole stosowane do oznaczania kierunkowości na rysunkach):

- równoległa do linii przedstawiającej daną powierzchnię na rysunku ( $\parallel$ ),
- prostopadła do linii przedstawiającej daną powierzchnię na rysunku ( $\perp$ ),
- współśrodkowa względem środka danej powierzchni (C),
- skrzyżowana – mikronierówności położone są w dwóch ukośnych (krzyżujących się) kierunkach (X),
- promieniowa – mikronierówności położone są w przybliżeniu promieniowo względem środka danej powierzchni (R),
- wielokierunkowa nieuporządkowana (M),
- punktowa – bez określonego kierunku.

Widok przykładowych powierzchni o różnej kierunkowości SGP przedstawiono na rys. 11.1.



Rys. 11.1. Kierunkowość struktury geometrycznej wybranych powierzchni:

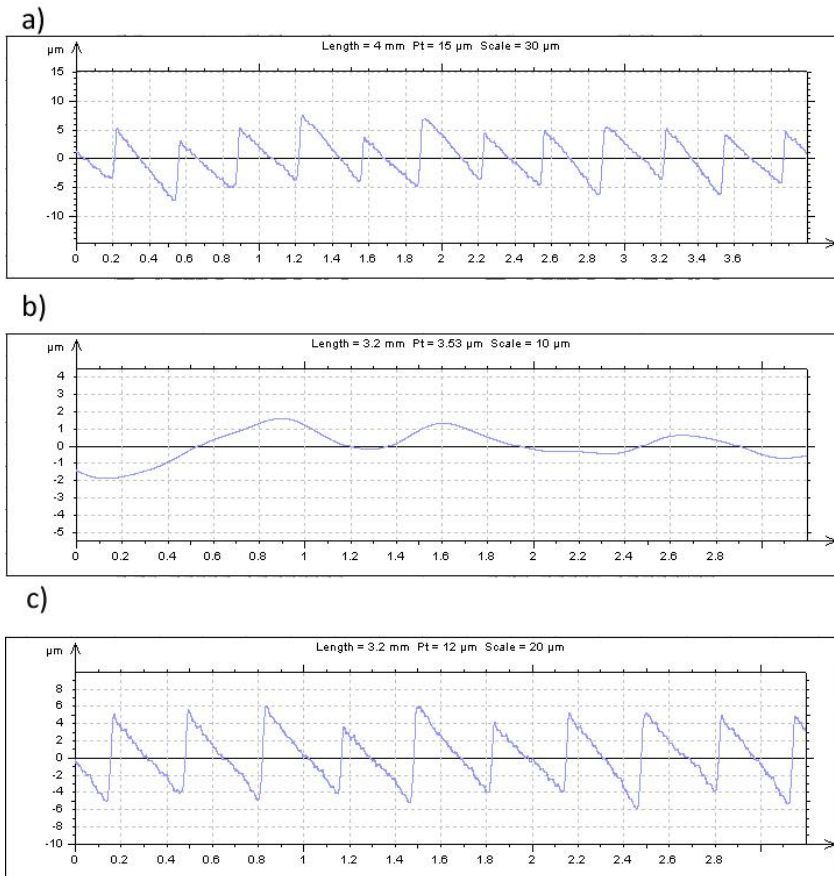
- a) równoległa, b) współśrodkowa, c) skrzyżowana,  
d) wielokierunkowa nieuporządkowana, e) punktowa



Na zdjęciach widoczne są powierzchnie po toczeniu wzdłużnym (a), toczeniu poprzecznym (b), frezowaniu czołowym (c), skrobaniu (d), drążeniu elektroerozyjnym (e).

### 11.1.2. Chropowatość i falistość powierzchni

Struktura geometryczna powierzchni obejmuje zbiór wszystkich nierówności powierzchni. Badania SGP w układzie 2D prowadzone są na podstawie profilu powierzchni, który powstaje w wyniku przecięcia nierówności płaszczyzną prostopadłą do badanej powierzchni. Otrzymany profil, nazywany profilem pierwotnym, rozdziela się na profile: falistości i chropowatości (rys. 11.2) [51].



Rys. 11.2. Profil powierzchni po toczeniu: a) pierwotny, b) falistości, c) chropowatości

Do oceny SGP stosowane są parametry profilu pierwotnego (oznaczane „P”), falistości („W”) i chropowatości („R”).

Do najczęściej stosowanych parametrów profilu można zaliczyć (nazwy i definicje parametrów wg normy PN – EN ISO 4287):

- największą wysokość profilu, która jest sumą wysokości najwyższego wzniesienia i głębokości największego wgłębienia profilu ( $Pz$ ,  $Wz$ ,  $Rz$ ),
- średnią arytmetyczną rzędnych profilu, która określana jest zależnością:

$$Pa, Wa, Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (11.1)$$

gdzie:  $Z(x)$  – równanie profilu,

$l$  – długość odcinka elementarnego (w zależności od mierzonego parametru  $l$  jest równe  $lp$ ,  $lw$  lub  $lr$ ),

- średnią szerokość rowków elementów profilu, określaną wzorem:

$$PSm, WSm, RSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{Si} \quad (11.2)$$

gdzie:  $X_{Si}$  – szerokość  $i$  – tego elementu profilu.

Chropowatość powierzchni po obróbce ubytkowej zależy od wielu czynników, między innymi od właściwości materiału obrabianego, charakterystyki narzędzi, parametrów technologicznych, cieczy obróbkowej, sztywności układu OUPN.

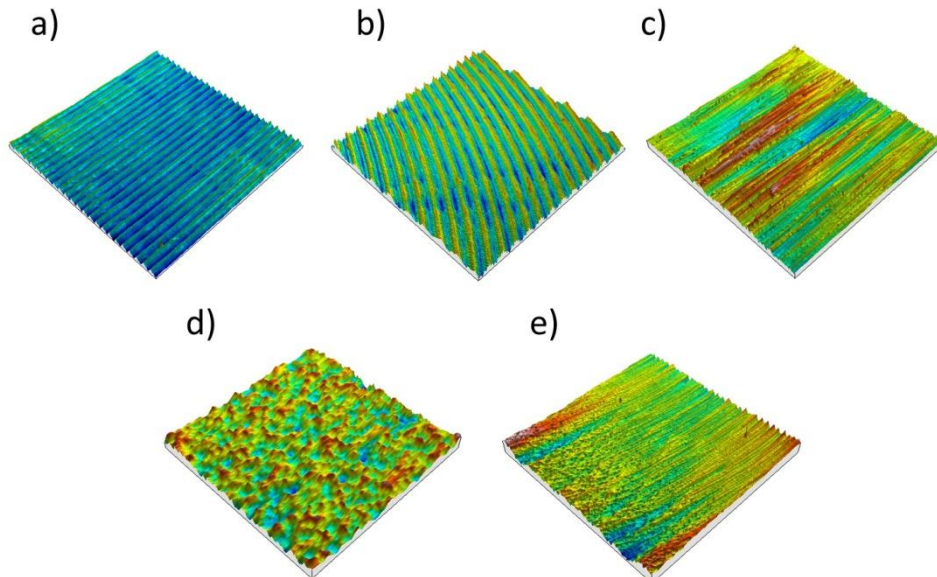
Orientacyjne wartości parametru  $Ra$  chropowatości powierzchni otrzymane po wybranych sposobach obróbki skrawaniem przedstawiono w tabeli 11.1.

Tabela 11.1. Orientacyjne zakresy wartości parametru  $Ra$  chropowatości powierzchni po wybranych sposobach obróbki skrawaniem [33, 37]

Sposób obróbki	Parametr $Ra$ , $\mu\text{m}$
Toczenie zgrubne	10÷25
Toczenie średnio dokładne	2,5÷16
Toczenie dokładne	0,8÷2,5
Toczenie bardzo dokładne	0,1÷0,8
Wiercenie	3,2÷12,5
Pogłębianie zgrubne	3,2÷12,5
Pogłębianie dokładne	1,25÷3,2

Rozwiercanie dokładne	0,32÷1,25
Przeciąganie dokładne	0,32÷1,25
Frezowanie czołowe zgrubne	5÷12
Frezowanie czołowe dokładne	1,25÷5
Frezowanie czołowe bardzo dokładne	0,32÷1,25
Szlifowanie wstępne	1,25÷3,2
Szlifowanie dokładne	0,2÷1,25
Szlifowanie gładkościowe	0,05÷0,25
Dogładzanie oscylacyjne	0,032÷0,25
Gładzenie	0,012÷0,4
Docieranie	0,02÷0,8
Polerowanie ręczne	0,012÷0,4
Skrobanie	0,8÷6,3

Struktura geometryczna powierzchni może być analizowana również w układzie 3D (przestrzennym). Topografia powierzchni po wybranych sposobach obróbki uwidoczniła została na rys. 11.3.



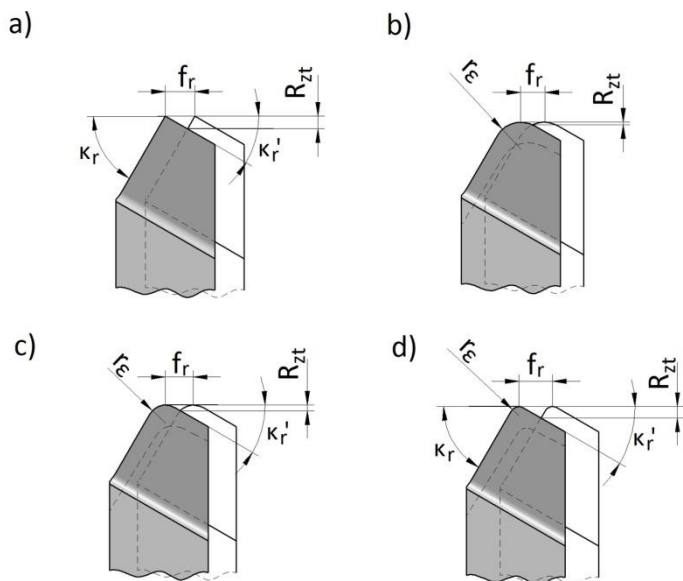
Rys. 11.3. Topografia powierzchni przedmiotów obrabianych: a) toczeniem wzdłużnym, b) frezowaniem czołowym, c) szlifowaniem, d) drążeniem elektroerozyjnym, e) cięciem strugą wodno-ścierną

### 11.1.3. Geometryczno-kinematyczny model kształtowania mikronierówności powierzchni

Na podstawie geometryczno – kinematycznego odwzorowania naroża narzędzia w materiale obrabianym można obliczyć teoretyczną wysokość mikronierówności powierzchni jako wysokość resztowych pól przekroju poprzecznego warstwy skrawanej.

W zależności od promienia naroża narzędzia  $r_\epsilon$ , kątów przystawienia  $\kappa_r$  i  $\kappa_r'$  oraz posuwu  $f$  rozróżnia się następujące rodzaje geometryczno - kinematycznego odwzorowania ostrza narzędzia w materiale obrabianym (rys. 11.4):

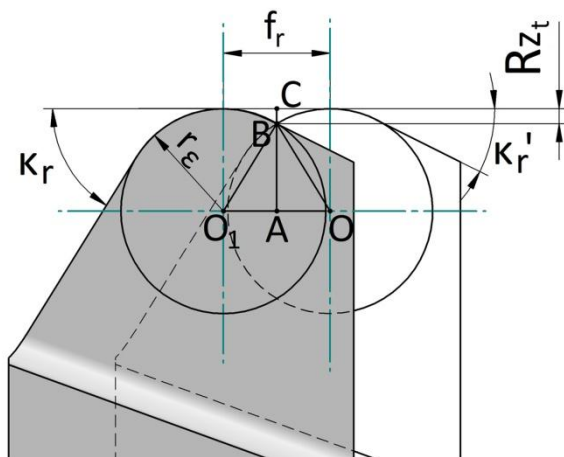
- odwzorowanie liniowe, gdy promień naroża  $r_\epsilon = 0$ ,
- odwzorowanie łukowe, gdy promień naroża  $r_\epsilon > 0$  i w materiale obrabianym odwzorowuje się tylko krzywoliniowa część krawędzi skrawającej,
- odwzorowanie łukowo – liniowe typu I, gdy promień naroża  $r_\epsilon > 0$  i w materiale obrabianym odwzorowuje się część krzywoliniowej krawędzi skrawającej oraz część prostoliniowej pomocniczej krawędzi skrawającej,
- odwzorowanie łukowo – liniowe typu II, gdy promień naroża  $r_\epsilon > 0$  i w materiale obrabianym odwzorowuje się krzywoliniowa krawędź skrawająca oraz prostoliniowe części głównej i pomocniczej krawędzi skrawającej.



Rys. 11.4. Rodzaje odwzorowania ostrza w materiale obrabianym: a) liniowe, b) łukowe, c) łukowo-liniowe typu I, d) łukowo-liniowe typu II

Dla poszczególnych rodzajów odwzorowania ostrza, pokazanych na rys. 11.4, zaznaczono parametry geometryczne ostrza mające wpływ na teoretyczną wysokość profilu  $Rz_t$ . Wartość  $Rz_t$  obliczana jest zwykle dla obróbki wykończeniowej, która charakteryzuje się małym posuwem.

Poniżej wyznaczono teoretyczną wysokość profilu  $Rz_t$  w funkcji posuwu i promienia naroża w procesie skrawania jednoostrzowym narzędziem punktowym (np. toczeniem), przy założeniu odwzorowania łukowego:



Rys. 11.5. Rysunek pomocniczy do wyznaczania teoretycznej wysokości profilu [48]

Z rys. 11.5 wynika, że teoretyczną wysokość profilu można wyrazić:

$$Rz_t = AC - AB \quad (11.3)$$

Z trójkąta ABO wynika, że:

$$AB = \sqrt{OB^2 - OA^2} \quad (11.4)$$

Po uwzględnieniu, że AC oraz OB są równe promieniowi naroża ostrza  $r_\epsilon$ , a AO jest równe połowie posuwu  $f_r$  oraz pominięciu  $Rz_t^2$  jako wielkości bardzo małej, wzór na obliczanie  $Rz_t$  można zapisać:

$$Rz_t = \frac{f_r^2}{8r_\epsilon} \quad (11.5)$$

Łukowe odwzorowanie ostrza w materiale obrabianym, a tym samym zasadność stosowania wzoru (11.5), zachodzi wówczas, gdy spełniony jest warunek:

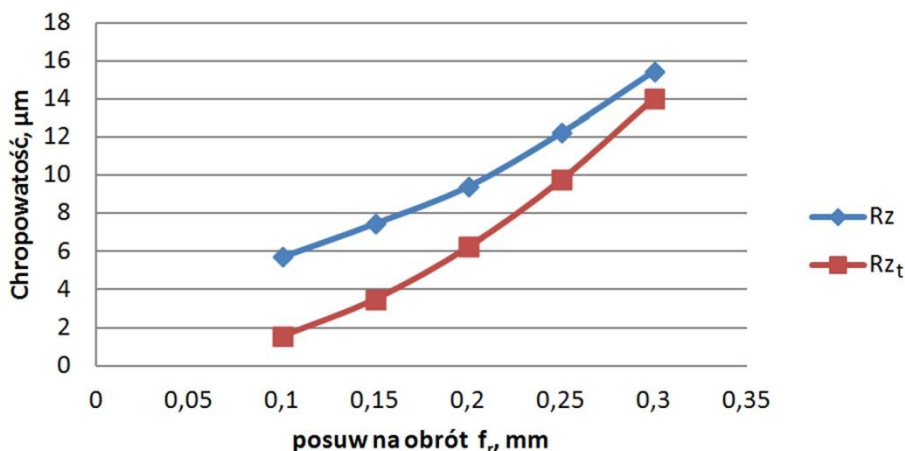
$$f_r \leq 2r_\epsilon \sin \kappa'_r \quad (11.6)$$

gdzie:  $\kappa'_r$  – pomocniczy kąt przystawienia.

Wartości teoretyczne wysokości profilu  $Rz_t$  zwykle różnią się od wartości parametru  $Rz$  zmierzonego za pomocą profilometru (na ogół  $Rz$  jest większe od  $Rz_t$ ). Powodem tych różnic są inne czynniki wpływające na chropowatość powierzchni po obróbce wiórowej (poza odwzorowaniem geometryczno-kinematycznym), do których można zaliczyć:

- błędy wykonania ostrza,
- zużycie ostrza,
- wyszczerbienia krawędzi skrawającej,
- odkształcenia sprężyste i plastyczne materiału obrabianego i narzędzia,
- tarcie między materiałem obrabianym a ostrzem,
- występowanie narostu,
- drgania układu OUPN.

Przykładowo, na rys. 11.6 pokazano wpływ posuwu na teoretyczną wysokość profilu  $Rz_t$  oraz na zmierzoną wartość parametru  $Rz$  po obróbce toczeniem.



Rys. 11.6. Teoretyczna wysokość profilu  $Rz_t$  oraz parametr chropowatości  $Rz$  w funkcji posuwu (materiał obrabiany: stop aluminium EN AW-7075, ostrze o promieniu naroża  $r_\epsilon = 0,8$  mm i pomocniczym kącie przystawienia  $\kappa'_r = 30^\circ$ )

Można zauważyć, że wartości parametru  $R_z$  są większe od wartości teoretycznej wysokości profilu  $R_{z_t}$ .

Chropowatość obrobionej powierzchni można zmniejszyć poprzez odpowiedni dobór parametrów obróbki (np. zmiana prędkości skrawania może wpłynąć na powstawanie narostu), zastosowanie sztywniejszej obrabiarki i/lub narzędzia, zmianę geometrii ostrza, zastosowanie cieczy obróbkowych (zmniejszenie tarcia), zastosowanie tłumików drgań.

## 11.2. Właściwości fizyczne warstwy wierzchniej

Obróbka ubytkowa powoduje zmiany właściwości fizycznych warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu, które mogą obejmować:

- przemiany strukturalne,
- utwardzenie WW,
- kształtowanie naprężeń własnych.

Podczas obróbki skrawaniem temperatura w warstwie wierzchniej obrabianego przedmiotu może przekraczać 1000°C [22]. Temperatura wielokrotnie wyższa towarzyszy procesom obróbki elektroerozyjnej, laserowej i plazmowej. W tych warunkach w WW obrabianego przedmiotu następują przemiany strukturalne, np. często występującą przemianą podczas obróbki stali jest przemiana martenzytyczno – perlityczna (hartowanie lub odpuszczanie). Obróbka może też powodować zmiany wielkości oraz kształtu ziaren.

Utwardzenie warstwy wierzchniej może następować w wyniku odkształceń plastycznych albo wskutek przemian strukturalnych (np. przemiana perlitu w martenzyt). Warstwa utwardzona charakteryzuje się też większą wytrzymałością i granicą plastyczności, a zatem następuje też umocnienie WW. Utwardzenie WW ocenia się na podstawie pomiarów mikrotwardości na obrabianej powierzchni albo na zglądach. Pomiarzy na zglądach umożliwiają sporządzenie topografii mikrotwardości, co pozwala ocenić głębokość utwardzenia.

Naprężeniami własnymi nazywane są naprężenia, które występują w danym przedmiocie mimo braku obciążenia zewnętrznego. Naprężenia te równoważą się wzajemnie wewnątrz pewnej objętości przedmiotu (np. warstwy wierzchniej). Rozróżnia się następujące przyczyny powstawania naprężeń własnych po obróbce ubytkowej:

- mechaniczne, związane z nierównomiernymi odkształceniami plastycznymi w różnych warstwach materiału,
- ciepłe, powodowane nierównomiernym nagrzewaniem poszczególnych warstw materiału,
- strukturalne, wynikające z przemian strukturalnych materiału WW.

Naprężenia własne ukształtowane w WW obrabianego przedmiotu zależą też od stanu naprężeń własnych w półfabrykacie.

Dąży się do wytworzenia takiego stanu naprężeń własnych, aby bezpośrednio pod powierzchnią były naprężenia ściskające, które w głębszych warstwach przechodzą w naprężenia rozciągające.

Grubość warstwy wierzchniej ukształtowanej w procesach obróbki ubytkowej zwykle zawiera się w granicach od kilku setnych do kilku dziesiątych milimetra. Właściwości WW zależą głównie od rodzaju materiału obrabianego, sposobu obróbki oraz warunków technologicznych.



## Literatura

1. Białek M, Kupść O.: *Obróbka skrawaniem*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1982.
2. Boothroyd G., Knight W.A.: *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London - New York, 2006.
3. Burakowski T., Wierzchoń T.: *Inżynieria powierzchni metali*, WNT, Warszawa 1995.
4. Bylica A., Sieniawski J.: *Tytan i jego stopy*. PWN, Warszawa 1985.
5. Cichosz P.: *Narzędzia skrawające*, WNT Warszawa 2006.
6. Dąbrowski J. R., Firkowski A., Gierzyńska – Dolna M.: *Ciecze obróbkowe do skrawania metali*, WNT, Warszawa 1988.
7. Dmochowski J.: *Podstawy obróbki skrawaniem*. PWN, Warszawa 1978.
8. Dobrzański L. A.: *Metalowe materiały inżynierskie*, WNT, Warszawa 2004.
9. Domański R.: *Promieniowanie laserowe – oddziaływanie na ciała stałe*, WNT, Warszawa 1990.
11. Dul – Korzyńska B.: *Obróbka skrawaniem i narzędzia*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów 2009.
12. Feld M.: *Obróbka skrawaniem stopów aluminium*, WNT, Warszawa 1984.
13. Feld M., Szpunar A.: *Szlifowanie materiałów konstrukcyjnych taśmami ściernymi*, WNT, Warszawa 1977.
14. Feldshtein E.: *Wybrane zagadnienia obróbki skrawaniem*, Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra 2013.
15. Filipowski R., Marciniak M.: *Techniki obróbki mechanicznej i erozyjnej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
16. Górski E.: *Poradnik narzędziowca*, WNT, Warszawa 2015.
17. Górski E. *Technologia maszyn. Podstawy skrawania*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1970.
18. Grzesik W.: *Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych*, WNT, Warszawa 2010.
19. Harasymowicz J., Wantuch E.: *Obróbka gładkościowa*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1994.
20. Jaworska L.: *Diament. Otrzymywanie i zastosowanie w obróbce skrawaniem*. WNT, Warszawa 2007.
21. Jemielniak K.: *Obróbka skrawaniem*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
22. Kaczmarek J.: *Obróbka wiórowa, ścierna i erozyjna*, WNT Warszawa, 1970.
23. Kosmol J. (red.): *Monitorowanie ostrza narzędzia skrawającego. Metody konwencjonalne i sieci neuronowe*, WNT, Warszawa 1996.
24. Kuczmaszewski J., Zaleski K.: *Obróbka skrawaniem stopów aluminium i magnezu*, Politechnika Lubelska, Lublin 2015.

25. Kupczyk M.: *Wytwarzanie i eksploatacja narzędzi skrawających z powłokami przeciwwyżyciowymi*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2009.
26. Leda H.: *Współczesne materiały konstrukcyjne i narzędziowe*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1996.
27. Legutko S., Nosal S.: *Kształtowanie technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej części maszyn*, Ośrodek Wydawnictw Naukowych. Polska Akademia Nauk, Poznań 2004.
28. Meldner B., Darlewski J.: *Narzędzia skrawające w zautomatyzowanej produkcji*, WNT Warszawa 1991.
29. Miernik M.: *Skrawalność metali. Metody określania i prognozowania*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
30. Miernikiewicz A.: *Doświadczalno – teoretyczne podstawy obróbki elektroerozyjnej (EDM)*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2000.
31. Nekrasov S. S.: *Obróbka materialov reżaniem*, Agropromizdat, Moskwa 1988.
32. Nizankowski C.: *Niekonwencjonalne techniki szlifowania ściernicowego*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2016.
33. Nowicki B.: *Struktura geometryczna. Chropowatość i falistość powierzchni*, WNT, Warszawa 1991.
34. Ochęduszek K.: *Koła zębate*, WNT Warszawa 1971.
35. Oczó K.: *Kształtowanie ceramicznych materiałów technicznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 1996.
36. Oczó K. E., Kawalec A.: *Kształtowanie metali lekkich*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
37. Olszak W.: *Obróbka skrawaniem*, WNT, Warszawa, 2008.
38. Pająk E.: *Zaawansowane technologie współczesnych systemów produkcyjnych*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2000.
39. Parol A., Łozak M., Zaleski K.: *Metodyka doboru warunków obróbki wiórowej*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 1979
40. *Poradnik inżyniera, obróbka skrawaniem*, tom 1, WNT, Warszawa, 1991.
41. Pszczołowski W., Rosienkiewicz P.: *Obróbka ścierna narzędziami nasypowymi*, WNT Warszawa 1995.
42. Storch B.: *Podstawy obróbki skrawaniem*, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2001.
43. Weber H., Loladze T. N.: *Grundlagen des Spanens*, VEB Verlag Technik, Berlin 1986.
44. Woliński W.: *Laser – właściwości promieniowania, parametry*, [W:] Materiały VIII Krajowej Szkoły Optoelektroniki nt. „Lasery i technologie obróbki materiałów”, Gdańsk 1994
45. Woźniak K.: *Materiały ściernicze. Wytwarzanie i własności*, WNT, Warszawa 1982.

46. Wójcik Z.: *Przekładnie stożkowe. Konstrukcja i technologia*, WNT Warszawa 1984.
47. Wysiecki M.: *Nowoczesne materiały narzędziowe*. WNT, Warszawa 1997.
48. Zaleski K.: *Laboratorium obróbki ubytkowej*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2001.
49. PN – EN – ISO 3002-1:1996 Podstawowe pojęcia w obróbce wiórowej i ściernej – Geometria części roboczej narzędzi skrawających – Terminologia ogólna, układy odniesienia, kąty narzędzia i kąty robocze oraz łamacze wióra.
50. PN – 87/M – 04250 Warstwa wierzchnia. Nazwy i określenia.
51. PN – EN – ISO 4287: 1999 Specyfikacja geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.