

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**



TECHNOLOGIE I
TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část

**Studijní opory pro magisterskou formu studia
Doc. Ing. Anton Humár, CSc.**



2003

OBSAH

	Str.
1. Obecné pojmy a terminologie technologie obrábění	5
1.1. Obrobek	5
1.2. Nástroj	6
1.2.1. Prvky nástroje	6
1.2.2. Plochy nástroje	7
1.2.3. Ostří nástroje	7
1.3. Pohyby při obrábění	9
2. Geometrie nástroje	10
2.1. Souřadnicové soustavy	10
2.1.1. Nástrojová souřadnicová soustava	10
2.1.2. Pracovní souřadnicová soustava	11
2.2. Nástrojové úhly	13
2.2.1. Nástrojové úhly orientace (polohy) ostří	13
2.2.2. Nástrojové úhly čela	13
2.2.3. Nástrojové úhly hřbetu	13
2.2.4. Nástrojové úhly břítu	14
2.2.5. Význam nástrojových úhlů	15
2.3. Pracovní úhly	16
2.3.1. Pracovní úhly orientace (polohy) ostří	16
2.3.2. Pracovní úhly čela	17
2.3.3. Pracovní úhly hřbetu	17
2.3.4. Pracovní úhly břítu	17
2.3.5. Využití pracovních úhlů	18
2.4. Břítové diagramy	19
2.4.1. Břítový diagram čela	19
2.4.1.1. Využití břítového diagramu čela při broušení nástroje	20
2.4.2. Břítový diagram hřbetu	21
3. Fyzikální základy procesu řezání	21
3.1. Plastická deformace při ortogonálním řezání	22
3.2. Třísky a jejich technologické charakteristiky	24
3.2.1. Součinitel přechování třísky	24
3.2.2. Objemový součinitel třísek	25
3.3. Sekundární jevy procesu řezání	26
3.3.1. Mechanické vlastnosti povrchové vrstvy obrobenej plochy	26
3.3.2. Nárůstek	27
3.3.3. Práce a výkon řezání	29
3.3.4. Teplo a teplota řezání	31
3.3.4.1. Tepelná bilance řezného procesu	31
3.3.4.2. Teplota řezání	32
3.3.5. Kmitání soustavy obrábění	34
3.3.5.1. Vlastní kmitání	34
3.3.5.2. Vynucené kmitání	34
3.3.5.3. Samobuzené kmitání	35

4. Řezné prostředí	35
4.1. Technologické požadavky na řezná média	35
4.2. Řezné kapaliny	37
4.2.1. Druhy řezných kapalin	37
4.2.2. Přívod řezné kapaliny do místa řezu	38
4.3. Plynné řezné prostředí	41
5. Produktivita a hospodárnost obrábění	41
5.1. Opotřebení břitu nástroje	41
5.1.1. Fyzikální podstata opotřebení	41
5.1.2. Formy opotřebení	45
5.1.3. Kritéria opotřebení	46
5.2. Trvanlivost a životnost nástroje	47
5.3. Operační výrobní náklady	50
5.4. Optimální trvanlivost	52
5.5. Řezivost nástroje	53
5.6. Obrobitelnost materiálu	54
6. Nástrojové materiály	56
6.1. Nástrojové oceli	58
6.2. Slinuté karbidy	59
6.2.1. Povlakované slinuté karbidy	66
6.2.1.1. Metoda CVD	67
6.2.1.2. Metoda PVD	70
6.2.1.3. Moderní povlakovací metody	70
6.3. Cermety	72
6.4. Řezná keramika	74
6.5. Supertvrdé nástrojové materiály	78
7. Obráběcí stroje	81
7.1. Vodicí plochy	82
7.2. Elektrické pohony	83
7.3. Mechanické převodovky	85
7.4. Mechanizmy pro přímočaré pohyby	88
7.5. Mechanizace a automatizace obráběcích strojů	88
7.5.1. Vačky a křivkové bubny	88
7.5.2. Narážky	89
7.5.3. Kopirovací zařízení	90
7.5.4. Číslicově řízené obráběcí stroje	90
7.5.4.1. Systém stavění souřadnic	92
7.5.4.2. Pravoúhlý systém řízení	92
7.5.4.3. Souvislý systém řízení	93
7.5.4.4. Číslicové kódování informací	94
7.6. CNC obráběcí centra	95
7.6.1. Nástroje pro CNC obráběcí centra	99
7.7. Pružné výrobní systémy	101
7.8. Stroje pro velkosériovou a hromadnou výrobu	104
8. Základní metody obrábění	105
8.1. Soustružení	105
8.1.1. Řezné síly	107
8.1.2. Jednotkový strojní čas	107
8.1.3. Nástroje	108

8.1.4. Soustruhy	114
8.1.4.1. Upínání nástrojů a obrobků	117
8.2. Frézování	119
8.2.1. Průřez třísky	122
8.2.2. Řezné síly	123
8.2.3. Jednotkový strojní čas	124
8.2.4. Nástroje	126
8.2.5. Frézky	130
8.2.5.1. Konzolové frézky	130
8.2.5.2. Příslušenství konzolových frézek	131
8.2.5.3. Stolové frézky	133
8.2.5.4. Rovinné frézky	134
8.2.5.5. Upínání nástrojů a obrobků	135
9. Použitá literatura	138

1. OBECNÉ POJMY A TERMINOLOGIE TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ

Technologie obrábění jako vědní obor studuje, zkoumá a analyzuje vzájemné souvislosti a faktory obráběcího procesu jako integrální složky výrobního procesu strojírenských součástí. Obráběcí proces se realizuje v obráběcím systému, který lze obecně členit na subsystémy obráběcích strojů, řezných nástrojů, manipulačních prostředků a obráběcího prostředí. Objektem obráběcího procesu je obrobek a základním výstupem obráběcího procesu jsou příslušné obrobené plochy.

Obrábění - technologický proces, kterým vytváříme povrchy obrobku určitého tvaru, rozměrů a jakosti odebráním částic materiálu účinky mechanickými, elektrickými, chemickými, případně jejich kombinací.

Řezání - obrábění, při kterém dochází k odebrání částic materiálu ve tvaru třísky břitem řezného nástroje.

Soustava obrábění: - obráběcí stroj (S).
- řezný nástroj (N),
- obrobek (O),
- přípravek (P).

Přídavek - část materiálu obrobku, kterou je třeba odstranit obráběním.

Odebíraná vrstva - část přídavku, odřezávaná z obrobku ve formě třísky.

Tříska - odříznutá a deformovaná vrstva materiálu obrobku.

1.1. OBROBEK

Obrobek jako objekt obráběcího procesu je z geometrického hlediska charakterizován *obráběnou, obrobenou a přechodovou* plochou (obr. 1.1). Obráběná plocha je plocha, která má být obrobena řezáním. Obrobená plocha je plocha získaná jako výsledek řezného procesu. Přechodová plocha je část povrchu obrobku, která je vytvořena působením ostří nástroje během zdvihu nebo otáčky nástroje nebo obrobku.

Plochy na obrobku (obr. 1.1):

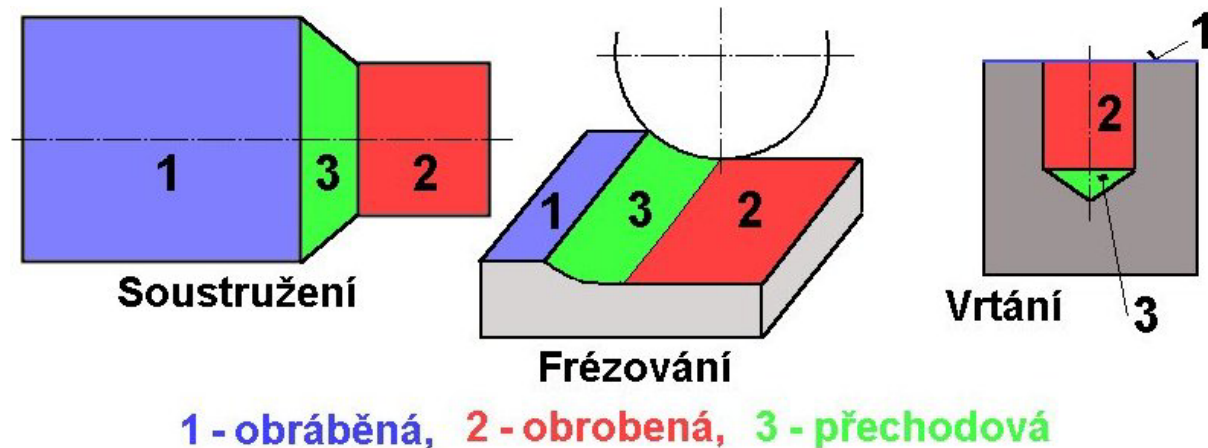
- **Obráběná plocha** - část povrchu obrobku odstraňovaná (*přetvářená*) obráběním.
- **Obrobená plocha** - plocha na obrobku, vzniklá působením řezného nástroje.

Obrobená plocha představuje prioritní výstup obráběcího procesu a z technologického hlediska je určena svými rozměry, tvarem, polohou, strukturou povrchu a vlastnostmi povrchové vrstvy. Obrobená plocha je identifikována souborem parametrů vztažených k jmenovité ploše, k nimž patří zejména *úchytky rozměrů* (úchylka od jmenovité hodnoty rozměru), *úchytky tvaru* (úchylka přímosti, úchylka kruhovitosti, úchylka válcovitosti), *úchylka polohy* (úchylka rovnoběžnosti, úchylka kolmosti, úchylka sousostí, obvodové házení, čelní házení), *struktura povrchu* (největší výška profilu **Rz**, průměrná aritmetická úchylka profilu **Ra**), *vlastnosti povrchové vrstvy* (druh a velikost napětí v povrchové vrstvě, trhliny a jiné povrchové vady). Parametry obrobené plochy jsou obecně funkcí souboru technologických faktorů, které souvisí s vlastnostmi obráběcího stroje, nástroje, obrobku, upínače a s hodnotami řezných podmínek.

Technologické vlivy na parametry obrobené plochy v závislosti na jejich charakteru lze členit na *systematicky konstantní* (chyba v seřízení obráběcího stroje, úchylka rozměru

a tvaru nástroje), *systematicky proměnné* (opotřebení nástroje, tepelné deformace prvků obráběcího systému), *náhodné* (rozptýlení přídavků na obrábění, rozptýlení vlastností obráběného materiálu).

- **Přechodová plocha** - okamžitá plocha obrobku, vytvářená při obrábění působením ostří řezného nástroje. (Pozn. – ve starší terminologii je tato plocha označována jako řezná plocha, nebo plocha řezu.)



Obr.1.1 Plochy na obrobku

1.2. NÁSTROJ

1.2.1. Prvky nástroje

Těleso je část nástroje, na které jsou přímo vytvořené nebo upevněné elementy ostří (obr.1.2, označeno 1).

Stopka je část nástroje určená pro upnutí.

Upínací díra je souhrn vnitřních ploch tělesa nástroje, určených pro nastavení a upnutí nástroje.

Osa nástroje je teoretická přímka s definovaným geometrickým vztahem ke stanovenému povrchu, používaná při výrobě, ostření a upnutí nástroje. Obecně je osa nástroje středová čára stopky nebo upínací díry nástroje. Obvykle je rovnoběžná nebo kolmá k danému povrchu nástroje.

Řezná část je funkční část nástroje, která obsahuje prvky tvořící třísku (obr.1.2, označeno 3). Patří sem zejména ostří, čelo a hřbet. V případě vícebřitého (vícezubého) nástroje má každý břit (zub) svou řeznou část.

Základna je plochý prvek stopky nástroje, který je zpravidla rovnoběžný nebo kolmý k základní rovině nástroje (obr.1.2, označeno 2). Slouží pro umístění a orientaci nástroje při jeho výrobě, kontrole a ostření. Ne všechny nástroje mají jednoznačně určenou základnu.

Břit je prvek řezné části nástroje ohraničený čelem a hřbetem nástroje. Může být spojený jak s hlavním, tak i vedlejším ostřím.

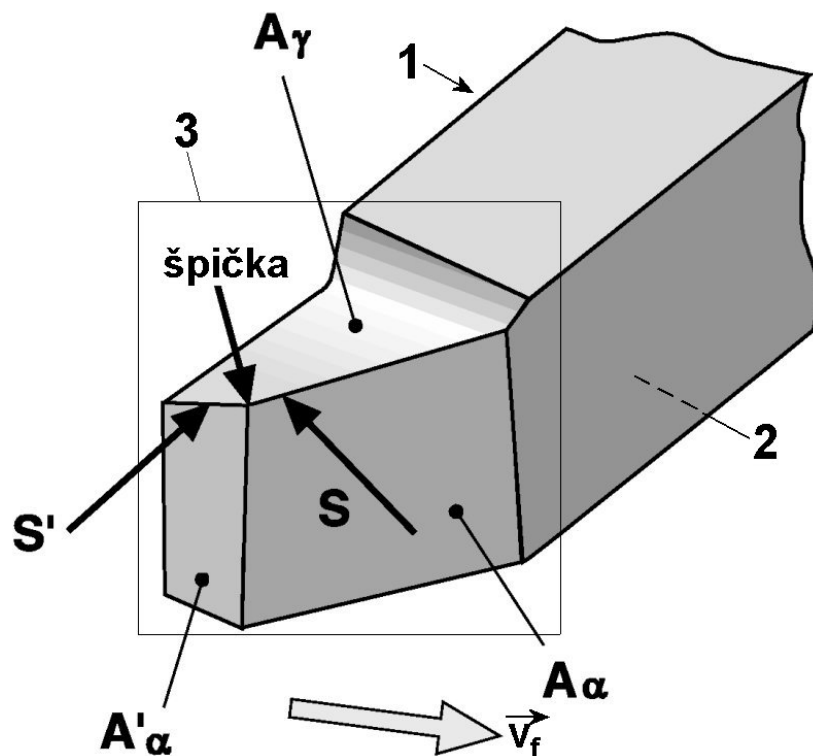
1.2.2. Plochy nástroje

Nástroj v interakci s obrobkem umožňuje realizaci řezného procesu. Z geometrického hlediska je nástroj identifikován svými prvky, plochami, ostřími a rozměry ostří. Každá plocha povrchu řezné části nástroje se označuje symbolem skládajícím se z písmene **A** a z indexu řecké abecedy, který určuje druh plochy (např. A_γ - čelo). Plochy přiřazené k vedlejšímu ostří se označují s čárkou (např. A'_α - vedlejší hřbet).

Čelo A_γ je plocha nebo souhrn ploch, po kterých odchází tříska (obr.1.2). Pokud čelo tvoří několik protínajících se ploch, určí se označení tak, že k indexu se připsí pořadové číslo, začínající od ostří (např. $A_{\gamma 1}$, $A_{\gamma 2}$). **Tvar čela** určuje křivka vytvořená průřezem plochy čela A_γ s požadovanou rovinou, přičemž je tento tvar obvykle definovaný a měřený v nástrojové rovině ostří P_n (pokud je definovaný v jiných rovinách, musí být jednoznačně specifikován).

Utvařec třísky je část čelní plochy určená na lámání nebo svinování třísky. Realizuje se vhodným tvarováním čela, nebo přiloženým utvařecem.

Hřbet (A_α , A'_α) je plocha nebo souhrn ploch, které při řezném procesu směřují k ploše obrobku (obr.1.2). Pokud hřbet tvoří několik protínajících se ploch, určí se označení tak, že k indexu se připsí pořadové číslo, začínající od ostří (např. $A_{\alpha 1}$, $A_{\alpha 2}$). **Hlavní hřbet A_α** směřuje k přechodové ploše obrobku, **vedlejší hřbet A'_α** směřuje k obrobené ploše obrobku.



Obr.1.2 Prvky a plochy nástroje

1.2.3. Ostří nástroje

Ostří je prvek řezné části nástroje, kterým se realizuje vlastní proces řezání.

Hlavní ostří S je část ostří, která začíná v bodě, kde nástrojový úhel nastavení hlavního ostří κ_r je rovný nule a která má sloužit k vytvoření přechodové plochy na obrobku (obr.1.2).

V případě, že nástroj má ostrou špičku, hlavní ostří začíná na této špičce. V případě, kdy hodnota κ_r není nulová v žádném bodě, je celé ostří hlavním ostřím (např. při rovinném frézování).

Vedlejší ostří S' je část ostří, kde nástrojový úhel nastavení ostří κ_r je rovný nule, ale ve směru od hlavního ostří (obr.1.2). Vedlejší ostří provádí dokončovací práci na obrobené ploše, ale nezúčastňuje se při vytváření přechodové plochy. Některé nástroje mohou mít několik vedlejších ostří (např. upichovací nože).

Pracovní hlavní ostří S_e je část ostří, která začíná v bodě, kde pracovní úhel nastavení κ_{re} je rovný nule a která má sloužit pro vytváření přechodové plochy na obrobku. V případě, že nástroj má ostrou špičku, pracovní hlavní ostří začíná na této špičce. V případě, kdy hodnota κ_{re} není nulová v žádném bodě, je celé ostří pracovním hlavním ostřím (např. při rovinném frézování).

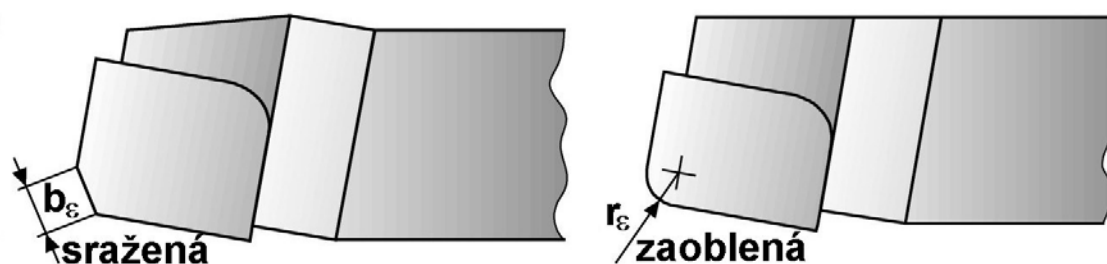
Pracovní vedlejší ostří S_e' je část ostří, kde pracovní úhel nastavení hlavního ostří κ_{re} je rovný nule, ale ve směru od pracovního hlavního ostří. Nezúčastňuje se při vytváření přechodové plochy na obrobku. Některé nástroje mohou mít několik pracovních vedlejších ostří (např. upichovací nože).

Aktivní ostří je část ostří, která bezprostředně realizuje řezání.

Aktivní hlavní ostří S_a je část aktivního ostří, která je měřena podél ostří z bodu, kde se hlavní ostří protíná s povrchem obrobku, až po bod na pracovním ostří, ve kterém je pracovní úhel nastavení hlavního ostří κ_{re} považován za nulový.

Aktivní vedlejší ostří S_a' je část aktivního ostří, která je měřena podél ostří z bodu, ve kterém je pracovní úhel nastavení hlavního ostří κ_{re} rovný nule, až do bodu, kde se pracovní vedlejší ostří protíná s již obrobeným povrchem.

Špička je relativně malá část ostří, nacházející se na spojnici hlavního a vedlejšího ostří (obr.1.2). Může být přímá (sražená) nebo zaoblená (viz obr.1.3).



Obr.1.3 Špička nástroje

Uvažovaný bod ostří je bod, nacházející se na libovolném místě hlavního nebo vedlejšího ostří, ve kterém se nachází počátek souřadnicového systému.

Zaoblené ostří je ostří, které je vytvořené zaobleným přechodem mezi čelní plochou A_γ a hřbetní plochou A_α .

Přerušované ostří je ostří, které je přerušené a v důsledku toho nedochází ke vzniku nevhodně tvarované třísky. Často se používá u válcových fréz pro frézování rovinných ploch.

Tvar nástroje je dán křivkou vytvořenou ortogonálním průmětem nástrojového hlavního ostří S do specifikované nástrojové roviny. Všeobecně je tvar nástroje definovaný a měřený v nástrojové základní rovině P_r .

1.3. POHYBY PŘI OBRÁBĚNÍ

- **Hlavní pohyb** je vzájemný pohyb mezi nástrojem a obrobkem, který realizuje obráběcí stroj. Při soustružení je to rotační pohyb obrobku, při vrtání a frézování je to rotační pohyb nástroje, při hoblování je to přímočarý pohyb obrobku.

Směr hlavního pohybu je definován jako směr okamžitého hlavního pohybu uvažovaného bodu ostří vzhledem k obrobku.

Řzná rychlost v_c je vyjádřena jako okamžitá rychlost hlavního pohybu uvažovaného bodu ostří vzhledem k obrobku.

- **Posuvový pohyb** je realizovaný obráběcím strojem jako další relativní pohyb mezi nástrojem a obrobkem. Posuvový pohyb společně s hlavním pohybem umožňuje plynulé nebo přerušované odřezávání třísky z obráběného povrchu. Posuvový pohyb může být postupný nebo plynulý. Při některých obráběcích procesech není posuvový pohyb potřebný (protahování).

Směr posuvového pohybu je určen směrem okamžitého posuvového pohybu uvažovaného bodu ostří vzhledem k obrobku.

Úhel posuvového pohybu φ se vyjádří jako úhel mezi směry současného posuvového a hlavního pohybu, který je měřený v pracovní boční rovině P_{fe} . Pro některé obráběcí procesy není tento úhel definovaný (hoblování, protahování).

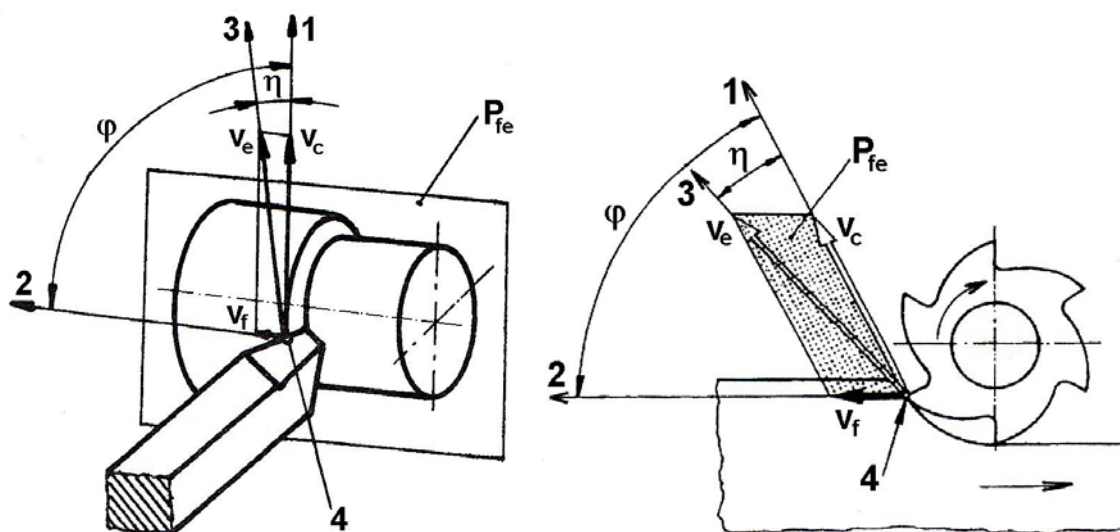
Posuvová rychlost v_f je určena jako okamžitá rychlost posuvového pohybu v uvažovaném bodě ostří vzhledem k obrobku. V případě přerušovaného posuvu není jeho rychlost definována (hoblování, obrážení).

- **Řzný pohyb** je pohyb vycházející ze současného hlavního a posuvového pohybu (výsledný vzájemný pohyb nástroje vůči obrobku, který vznikne součtem vektorů hlavního a posuvového pohybu).

Směr řzného pohybu je dán směrem okamžitého řzného pohybu uvažovaného bodu ostří vzhledem k obrobku.

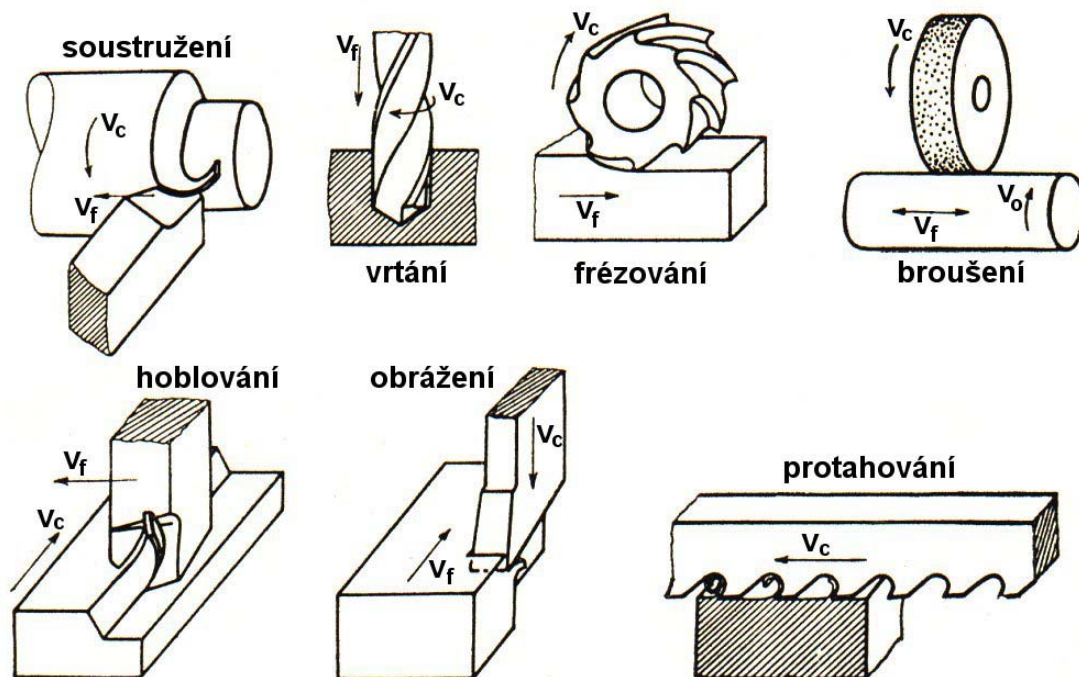
Úhel řzného pohybu η je dán úhlem mezi směrem hlavního pohybu a směrem řzného pohybu, měřený v pracovní boční rovině P_{fe} .

Rychlost řzného pohybu v_e je okamžitá rychlost řzného pohybu uvažovaného bodu ostří vzhledem k obrobku.



Obr.1.4 Pohyby při soustružení a frézování

P_{fe} - pracovní boční rovina, 1 - směr hlavního pohybu, 2 - směr posuvového pohybu, 3 - směr řzného pohybu, 4 - uvažovaný bod ostří



Obr.1.5 Hlavní a posuvový pohyb u vybraných metod obrábění

- **Přísuv** - pohyb nástroje nebo obrobku, kterým se nástroj nastavuje do pracovní polohy na požadovanou šířku záběru ostří a_p (ve starší terminologii na hloubku řezu h). Po dosažení předepsané hodnoty a_p se tento pohyb zastaví.

2. GEOMETRIE NÁSTROJE

2.1. SOUŘADNICOVÉ SOUSTAVY

Pro jednoznačnou identifikaci úhlů řezné části nástroje se definují souřadnicové soustavy - nástrojová a pracovní. Tyto soustavy slouží k definici geometrie řezné části nástroje ve statickém pojetí a v procesu řezání.

2.1.1. Nástrojová souřadnicová soustava

V nástrojové souřadnicové soustavě se definuje geometrie řezné části nástroje ve statickém pojetí a uplatní se zejména při konstrukci, výrobě, kontrole a ostření. Roviny používané v nástrojové souřadnicové soustavě se nazývají *nástrojové roviny* (obr.2.1).

Nástrojová základní rovina P_r - rovina procházející uvažovaným bodem ostří, kolmá na předpokládaný směr hlavního pohybu.

Nástrojová boční rovina P_f - rovina procházející uvažovaným bodem ostří, ve které leží vektory všech pohybů $\langle v_c, v_f, v_e \rangle$ a která je kolmá na nástrojovou základní rovinu P_r (všeobecně je tato rovina orientována ve směru posuvového pohybu).

Nástrojová zadní rovina P_p - rovina procházející uvažovaným bodem ostří, kolmá na nástrojovou boční rovinu P_f a nástrojovou základní rovinu P_r .

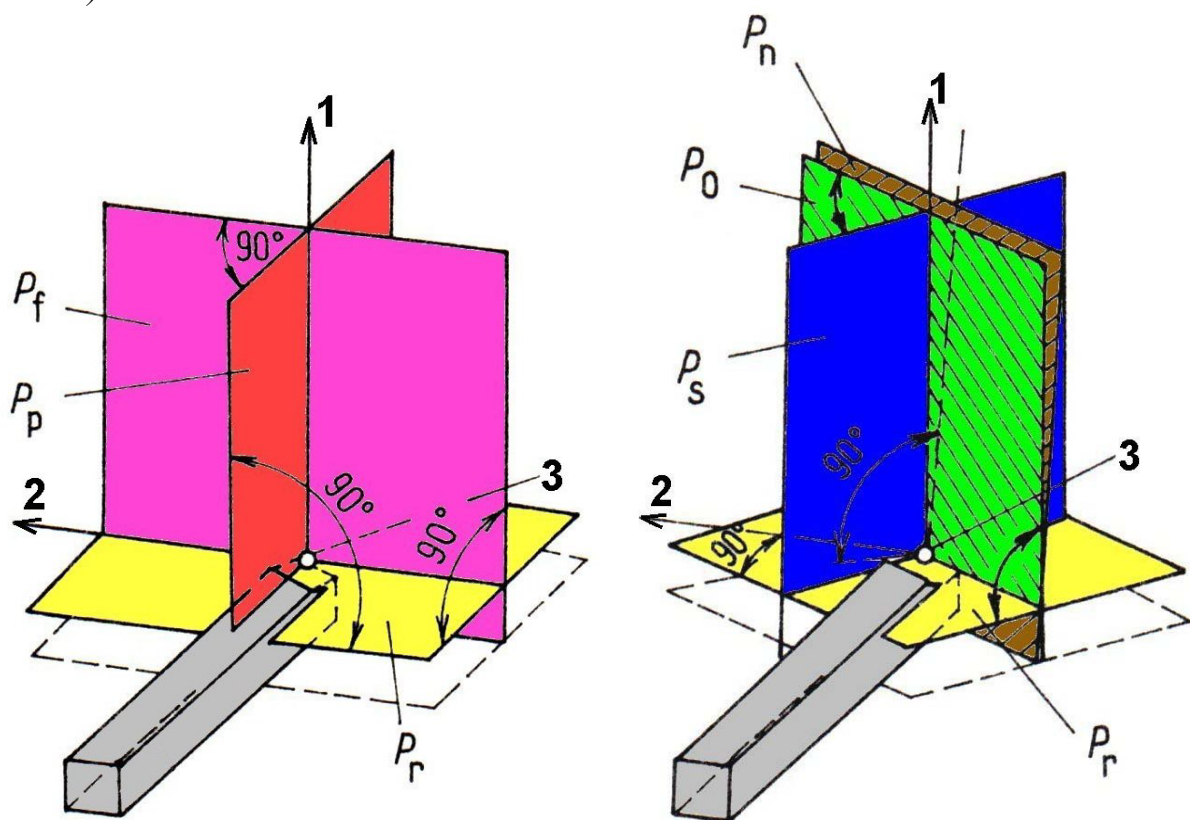
Nástrojová rovina ostří P_s - rovina tečná k ostří v uvažovaném bodě a kolmá na nástrojovou základní rovinu P_r .

Nástrojová ortogonální rovina P_o - rovina procházející uvažovaným bodem ostří, kolmá na nástrojovou rovinu ostří P_s a nástrojovou základní rovinu P_r .

Nástrojová normální rovina P_n - rovina kolmá na ostří v uvažovaném bodě (jediná z nástrojových rovin, která není obecně kolmá k P_r , pouze v případě, když $\lambda_s=0$).

Nástrojová rovina největšího spádu čela P_g - rovina procházející uvažovaným bodem ostří, kolmá na čelo nástroje A_γ a nástrojovou základní rovinu P_r . Tato rovina se vyznačuje tím, že nástrojový úhel čela v ní měřen je ze všech nástrojových úhlů čela největší (γ_g - maximální).

Nástrojová rovina největšího spádu hřbetu P_b - rovina procházející uvažovaným bodem ostří, kolmá na hřbet nástroje A_α a nástrojovou základní rovinu P_r . Tato rovina se vyznačuje tím, že nástrojový úhel hřbetu v ní měřen je ze všech nástrojových úhlů hřbetu nejmenší (α_b - minimální).



Obr.2.1 Roviny nástrojové souřadnicové soustavy

1 - předpokládaný směr hlav. pohybu, 2 - směr posuvového pohybu, 3 - uvažovaný bod ostří

2.1.2. Pracovní souřadnicová soustava

V pracovní (efektivní, kinetické) souřadnicové soustavě se identifikuje geometrie řezné části nástroje v procesu řezání. Roviny používané v pracovní souřadnicové soustavě se nazývají *pracovní roviny* (obr.2.2).

Pracovní základní rovina P_{re} - rovina procházející uvažovaným bodem ostří, kolmá na směr řezného pohybu.

Pracovní boční rovina P_{fe} - rovina procházející uvažovaným bodem ostří, ve které leží vektory všech pohybů $\langle v_c, v_f, v_e \rangle$ a která je kolmá na pracovní základní rovinu P_{re} (všeobecně je tato rovina orientována ve směru posuvového pohybu).

Pracovní zadní rovina P_{pe} - rovina procházející uvažovaným bodem ostří, kolmá na pracovní boční rovinu P_{fe} a pracovní základní rovinu P_{re} .

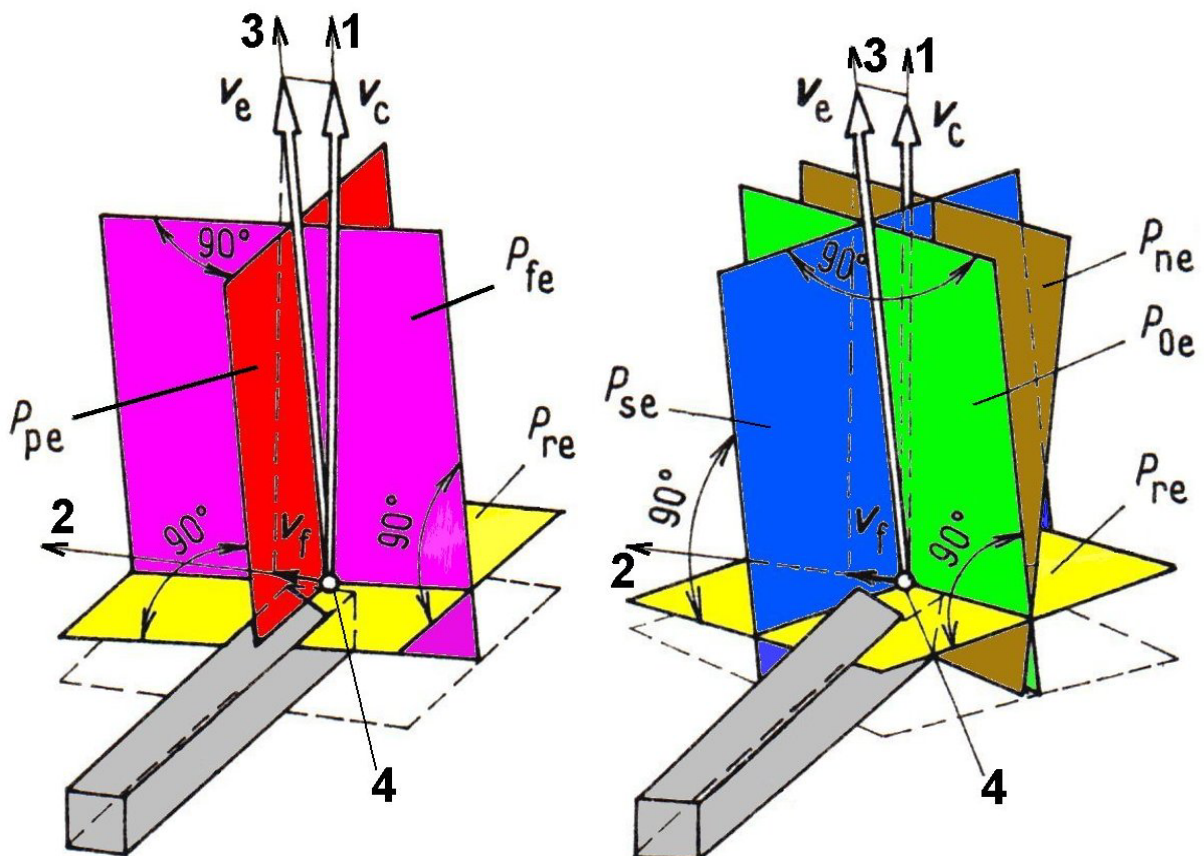
Pracovní rovina ostří P_{se} - rovina tečná k ostří v uvažovaném bodě a kolmá na pracovní základní rovinu P_{re} .

Pracovní ortogonální rovina P_{oe} - rovina procházející uvažovaným bodem ostří, kolmá na pracovní rovinu ostří P_{se} a pracovní základní rovinu P_{re} .

Pracovní normální rovina P_{ne} - rovina kolmá na ostří v uvažovaném bodu. Pracovní normální rovina je totožná s nástrojovou normální rovinou, takže $P_{ne} = P_n$.

Pracovní rovina největšího spádu čela P_{ge} - rovina procházející uvažovaným bodem ostří, kolmá na čelo nástroje A_γ a pracovní základní rovinu P_{re} . Tato rovina se vyznačuje tím, že pracovní úhel čela v ní měřen je ze všech pracovních úhlů čela největší (γ_{ge} - maximální).

Pracovní rovina největšího spádu hřbetu P_{be} - rovina procházející uvažovaným bodem ostří, kolmá na hřbet nástroje A_α a pracovní základní rovinu P_{re} . Tato rovina se vyznačuje tím, že pracovní úhel hřbetu v ní měřen je ze všech pracovních úhlů čela nejmenší (α_{be} - minimální).



Obr.2.2 Roviny pracovní souřadnicové soustavy
1 - směr hlavního pohybu, 2 - směr posuvového pohybu,
3 - směr řezného pohybu, 4 - uvažovaný bod ostří

2.2. NÁSTROJOVÉ ÚHLY

Nástrojové úhly jsou definovány v nástrojové souřadnicové soustavě a mají jeden index, totožný s indexem nástrojové roviny, ve které jsou měřeny (obr.2.3, 2.4).

2.2.1. Nástrojové úhly orientace (polohy) ostří

Nástrojový úhel nastavení hlavního ostří κ_r - úhel mezi nástrojovou rovinou hlavního ostří P_s a nástrojovou boční rovinou P_f , měřený v nástrojové základní rovině P_r .

Nástrojový doplňkový úhel nastavení hlavního ostří ψ_r - úhel mezi nástrojovou rovinou hlavního ostří P_s a nástrojovou zadní rovinou P_p , měřený v nástrojové základní rovině P_r ($\kappa_r + \psi_r = 90^\circ$).

Nástrojový úhel nastavení vedlejšího ostří κ_r' - úhel mezi nástrojovou rovinou vedlejšího ostří P_s' a nástrojovou boční rovinou P_f , měřený v nástrojové základní rovině P_r .

Nástrojový úhel sklonu hlavního ostří λ_s - úhel mezi hlavním ostřím S a nástrojovou základní rovinou P_r , měřený v nástrojové rovině hlavního ostří P_s .

Nástrojový úhel špičky ε_r - úhel mezi nástrojovou rovinou hlavního ostří P_s a nástrojovou rovinou vedlejšího ostří P_s' , měřený v nástrojové základní rovině P_r ($\kappa_r + \varepsilon_r + \kappa_r' = 180^\circ$).

2.2.2. Nástrojové úhly čela

Nástrojový ortogonální úhel čela γ_o - úhel mezi čelem nástroje A_γ a nástrojovou základní rovinou P_r , měřený v nástrojové ortogonální rovině P_o .

Nástrojový boční úhel čela γ_f - úhel mezi čelem nástroje A_γ a nástrojovou základní rovinou P_r , měřený v nástrojové boční rovině P_f .

Nástrojový zadní úhel čela γ_p - úhel mezi čelem nástroje A_γ a nástrojovou základní rovinou P_r , měřený v nástrojové zadní rovině P_p .

Nástrojový normální úhel čela γ_n - úhel mezi čelem nástroje A_γ a nástrojovou základní rovinou P_r , měřený v nástrojové normální rovině P_n .

Nástrojový úhel největšího spádu čela γ_g - úhel mezi čelem nástroje A_γ a nástrojovou základní rovinou P_r , měřený v nástrojové rovině největšího spádu čela P_g . *Je ze všech nástrojových úhlů čela největší.*

2.2.3. Nástrojové úhly hřbetu

Nástrojový ortogonální úhel hřbetu α_o - úhel mezi hřbetem nástroje A_α a nástrojovou rovinou ostří P_s , měřený v nástrojové ortogonální rovině P_o .

Nástrojový boční úhel hřbetu α_f - úhel mezi hřbetem nástroje A_α a nástrojovou rovinou ostří P_s , měřený v nástrojové boční rovině P_f .

Nástrojový zadní úhel hřbetu α_p - úhel mezi hřbetem nástroje A_α a nástrojovou rovinou ostří P_s , měřený v nástrojové zadní rovině P_p .

Nástrojový normální úhel hřbetu α_n - úhel mezi hřbetem nástroje A_α a nástrojovou rovinou ostří P_s , měřený v nástrojové normální rovině P_n .

Nástrojový úhel největšího spádu hřbetu α_b - úhel mezi hřbetem nástroje A_α a nástrojovou rovinou ostří P_s , měřený v nástrojové rovině největšího spádu hřbetu P_b . *Je ze všech nástrojových úhlů hřbetu nejmenší.*

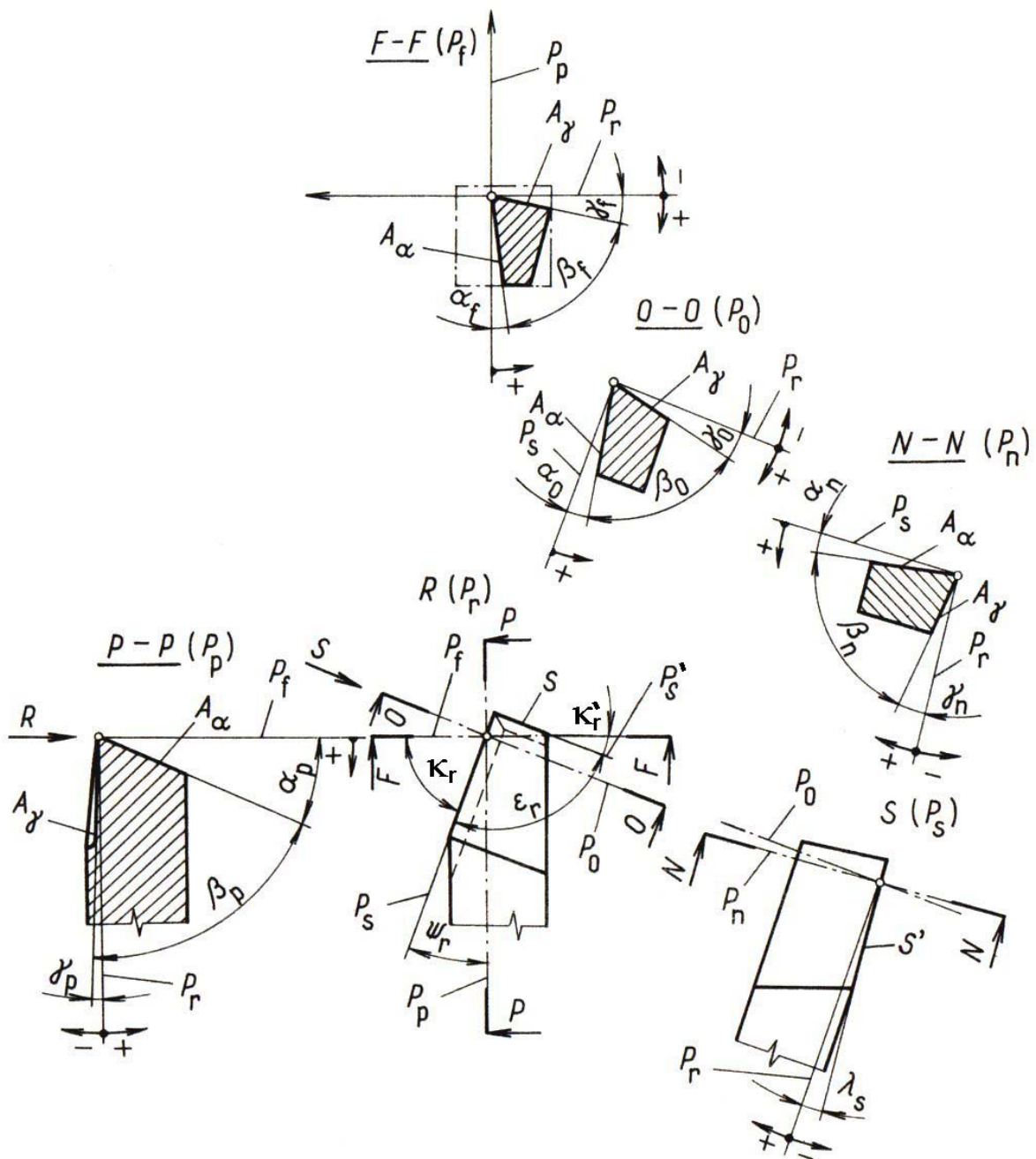
2.2.4. Nástrojové úhly břitu

Nástrojový ortogonální úhel břitu β_o - úhel mezi čelem a hřbetem nástroje (A_γ, A_α), měřený v nástrojové ortogonální rovině P_o ($\alpha_o + \beta_o + \gamma_o = 90^\circ$).

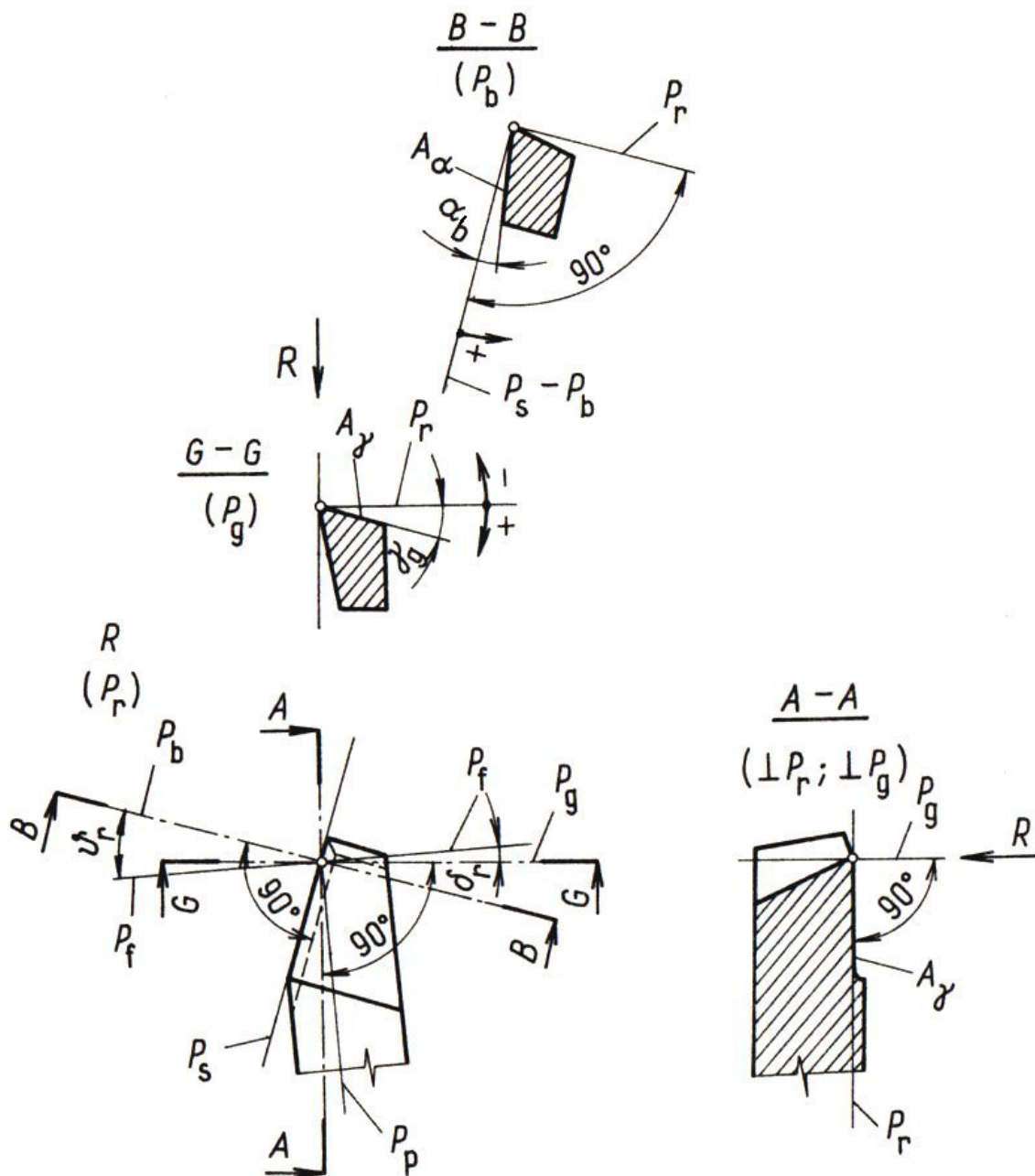
Nástrojový boční úhel břitu β_f - úhel mezi čelem a hřbetem nástroje (A_γ, A_α), měřený v nástrojové boční rovině P_f ($\alpha_f + \beta_f + \gamma_f = 90^\circ$).

Nástrojový zadní úhel břitu β_p - úhel mezi čelem a hřbetem nástroje (A_γ, A_α), měřený v nástrojové zadní rovině P_p ($\alpha_p + \beta_p + \gamma_p = 90^\circ$).

Nástrojový normální úhel břitu β_n - úhel mezi čelem a hřbetem nástroje (A_γ, A_α), měřený v nástrojové normální rovině P_n ($\alpha_n + \beta_n + \gamma_n = 90^\circ$).



Obr.2.3 Nástrojové úhly v rovinách $P_r, P_f, P_p, P_s, P_o, P_n$



Obr.2.4 Nástrojové úhly v rovinách P_g , P_b

2.2.5. Význam nástrojových úhlů

Nástrojové úhly obecně ovlivňují velikost řezných sil, teplotu řezání, podmínky tvorby třísky, hospodárnost obrábění, strukturu povrchu obrobku a vlastnosti povrchové vrstvy obrobenej plochy.

Volba nástrojových úhlů je ovlivňována fyzikálními a mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu (největší vliv), vlastnostmi nástrojového materiálu, řeznými podmínkami, požadovanou strukturou povrchu obrobku a požadovanými vlastnostmi povrchové vrstvy obrobenej plochy.

Nástrojové úhly nastavení ostří κ_r , κ_r' ovlivňují:

- tvar třísky (κ_r),
- strukturu povrchu obrobku (zejména κ_r'),
- složky řezné síly (κ_r , např. poměr posuvové a pasivní síly $F_f : F_p$ při soustružení).

Hodnoty κ_r se pohybují v rozsahu $0^\circ \div 90^\circ$ (běžně $45^\circ \div 90^\circ$, u kopirovacích a vnitřních soustružnických nožů může hodnota κ_r dosáhnout až 98°). Hodnoty nástrojového úhlu nastavení vedlejšího ostří κ_r' závisí na úhlech κ_r a ϵ_r (určeno tvarem břitové destičky).

Nástrojový úhel sklonu hlavního ostří λ_s má vliv na tuhost břitu a zatížení špičky nástroje a ovlivňuje směr odchodu třísky z místa řezu ($+\lambda$ = tříska odchází směrem od obrobku, $-\lambda$ = tříska odchází směrem k obrobku). Pro obrábění měkkých a méně pevných materiálů se volí v kladných hodnotách, pro obrábění tvrdých a pevnějších materiálů v záporných hodnotách.

Hodnoty λ_s se běžně pohybují v rozsahu $-6^\circ \div +6^\circ$, včetně nulové hodnoty, extrémně až v rozsahu $-40^\circ \div +20^\circ$.

Nástrojový ortogonální úhel čela γ_o ovlivňuje:

- mechanismus tvorby třísky a její odchod z místa řezu,
- řezné síly (menší $\gamma_o \Rightarrow$ intenzivnější přechování třísky \Rightarrow zvětšení F),
- tuhost břitu (menší $\gamma_o \Rightarrow$ větší $\beta_o \Rightarrow$ vyšší tuhost).

Hodnoty γ_o se běžně pohybují v rozsahu $-8^\circ \div +8^\circ$, včetně nulové hodnoty, extrémně až v rozsahu $-20^\circ \div +40^\circ$. Pro materiály s pevností v tahu $R_m \leq 850$ MPa se volí $\gamma_o \geq 0$, pro materiály $R_m > 850$ MPa se volí $\gamma_o < 0$.

Nástrojový ortogonální úhel hřbetu α_o ovlivňuje podmínky tření na hřbetě nástroje a tuhost břitu (menší $\alpha_o \Rightarrow$ větší $\beta_o \Rightarrow$ vyšší tuhost). Hodnoty α_o se běžně pohybují v rozsahu $8^\circ \div 12^\circ$, extrémně až v rozsahu $3^\circ \div 25^\circ$. Větší hodnoty α_o jsou doporučovány pro pevnější obráběné materiály, malou tloušťku třísky, nízké posuvy a vyšší řezné rychlosti. Extrémně vysoké hodnoty α_o jsou určeny pro obrábění slitin hliníku.

Nástrojový ortogonální úhel břitu β_o ovlivňuje tuhost břitu. Hodnoty β_o se pohybují v rozsahu $40^\circ \div 100^\circ$ (malé hodnoty pro obrábění materiálů s nižší pevností, velké hodnoty pro obrábění materiálů s vysokou pevností).

Nástrojový ortogonální úhel řezu $\delta_o = \alpha_o + \beta_o$ se volí co nejmenší ale tak, aby tuhost břitu odpovídala danému zatížení při obrábění.

Poloměr zaoblení špičky r_ϵ se pohybuje v rozsahu $0,2 \div 5,0$ mm. Větší hodnoty r_ϵ se používají pro vyšší hodnoty posuvů, přinášejí vyšší trvanlivost nástroje a zvětšují pasivní sílu F_p . Poloměr zaoblení špičky též výrazně ovlivňuje strukturu povrchu obrobku.

2.3. PRACOVNÍ ÚHLY

Pracovní úhly jsou definovány v pracovní souřadnicové soustavě a proto mají dva indexy, totožné s indexy pracovní roviny, ve které jsou měřeny.

2.3.1. Pracovní úhly orientace (polohy) ostří

Pracovní úhel nastavení hlavního ostří κ_{re} - úhel mezi pracovní rovinou hlavního ostří P_{se} a pracovní boční rovinou P_{fe} , měřený v pracovní základní rovině P_{re} .

Pracovní doplňkový úhel nastavení hlavního ostří ψ_{re} - úhel mezi pracovní rovinou hlavního ostří P_{se} a pracovní zadní rovinou P_{pe} , měřený v pracovní základní rovině P_{re} ($\kappa_{re} + \psi_{re} = 90^\circ$).

Pracovní úhel nastavení vedlejšího ostří κ_{re}' - úhel mezi pracovní rovinou vedlejšího ostří P_{se}' a pracovní boční rovinou P_{fe} , měřený v pracovní základní rovině P_{re} .

Pracovní úhel sklonu hlavního ostří λ_{se} - úhel mezi hlavním ostřím S a pracovní základní rovinou P_{re} , měřený v nástrojové rovině hlavního ostří P_{se} .

Pracovní úhel špičky ε_{re} - úhel mezi pracovní rovinou hlavního ostří P_{se} a pracovní rovinou vedlejšího ostří P_{se}' , měřený v pracovní základní rovině P_{re} ($\kappa_{re} + \varepsilon_{re} + \kappa_{re}' = 180^\circ$).

2.3.2. Pracovní úhly čela

Pracovní ortogonální úhel čela γ_{oe} - úhel mezi čelem nástroje A_γ a pracovní základní rovinou P_{re} , měřený v pracovní ortogonální rovině P_{oe} .

Pracovní boční úhel čela γ_{fe} - úhel mezi čelem nástroje A_γ a pracovní základní rovinou P_{re} , měřený v pracovní boční rovině P_{fe} .

Pracovní zadní úhel čela γ_{pe} - úhel mezi čelem nástroje A_γ a pracovní základní rovinou P_{re} , měřený v pracovní zadní rovině P_{pe} .

Pracovní normální úhel čela γ_{ne} - úhel mezi čelem nástroje A_γ a pracovní základní rovinou P_{re} , měřený v pracovní normální rovině P_{ne} .

Pracovní úhel největšího spádu čela γ_{ge} - úhel mezi čelem nástroje A_γ a pracovní základní rovinou P_{re} , měřený v pracovní rovině největšího spádu čela P_{ge} . *Je ze všech pracovních úhlů čela největší.*

2.3.3. Pracovní úhly hřbetu

Pracovní ortogonální úhel hřbetu α_{oe} - úhel mezi hřbetem nástroje A_α a pracovní rovinou ostří P_{se} , měřený v pracovní ortogonální rovině P_{oe} .

Pracovní boční úhel hřbetu α_{fe} - úhel mezi hřbetem nástroje A_α a pracovní rovinou ostří P_{se} , měřený v pracovní boční rovině P_{fe} .

Pracovní zadní úhel hřbetu α_{pe} - úhel mezi hřbetem nástroje A_α a pracovní rovinou ostří P_{se} , měřený v pracovní zadní rovině P_{pe} .

Pracovní normální úhel hřbetu α_{ne} - úhel mezi hřbetem nástroje A_α a pracovní rovinou ostří P_{se} , měřený v pracovní normální rovině P_{ne} .

Pracovní úhel největšího spádu hřbetu α_{be} - úhel mezi hřbetem nástroje A_α a pracovní rovinou ostří P_{se} , měřený v pracovní rovině největšího spádu hřbetu P_{be} . *Je ze všech pracovních úhlů hřbetu nejmenší.*

2.3.4. Pracovní úhly břitu

Pracovní ortogonální úhel břitu β_{oe} - úhel mezi čelem a hřbetem nástroje (A_γ, A_α), měřený v pracovní ortogonální rovině P_{oe} ($\alpha_{oe} + \beta_{oe} + \gamma_{oe} = 90^\circ$).

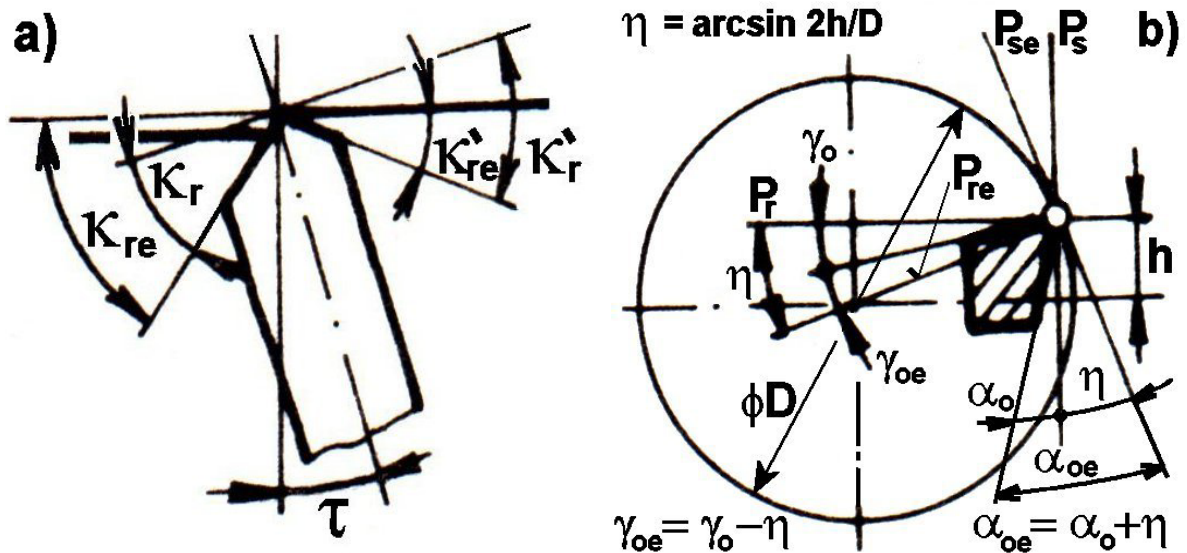
Pracovní boční úhel břitu β_{fe} - úhel mezi čelem a hřbetem nástroje (A_γ, A_α), měřený v pracovní boční rovině P_{fe} ($\alpha_{fe} + \beta_{fe} + \gamma_{fe} = 90^\circ$).

Pracovní zadní úhel břitu β_{pe} - úhel mezi čelem a hřbetem nástroje (A_γ, A_α), měřený v pracovní zadní rovině P_{pe} ($\alpha_{pe} + \beta_{pe} + \gamma_{pe} = 90^\circ$).

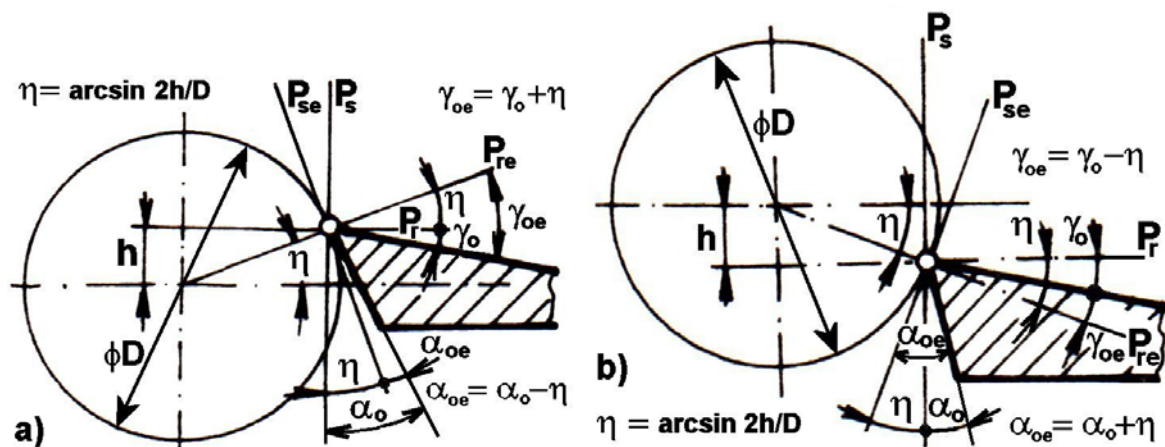
Pracovní normální úhel břitu β_{ne} - úhel mezi čelem a hřbetem nástroje (A_γ, A_α), měřený v pracovní normální rovině P_{ne} ($\alpha_{ne} + \beta_{ne} + \gamma_{ne} = 90^\circ$).

2.3.5. Využití pracovních úhlů

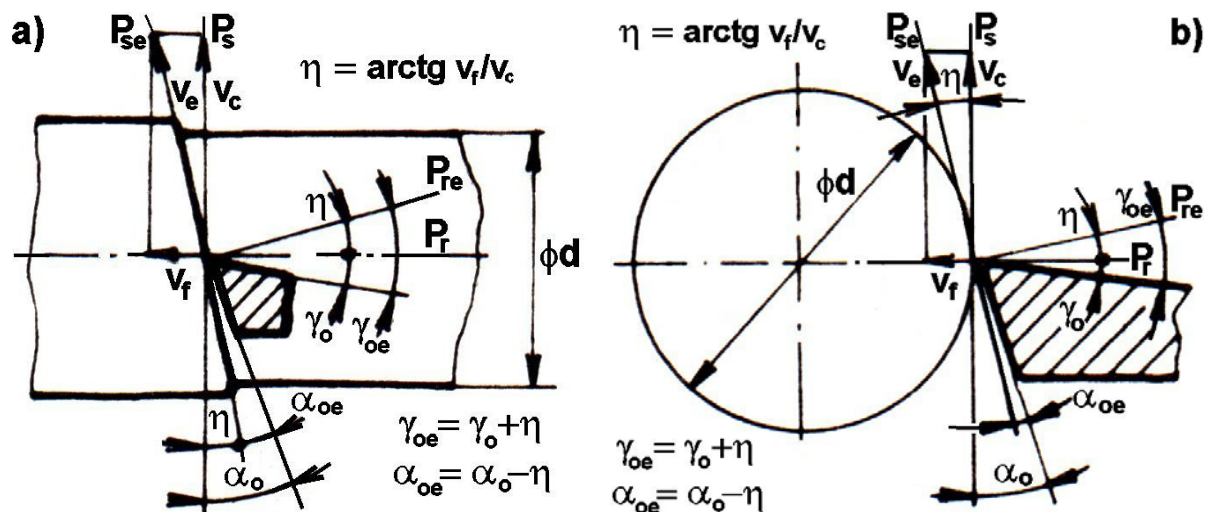
Nástroj jako samostatné těleso má definované nástrojové úhly, kterými lze jednoznačně určit polohu čela, hlavního a vedlejšího hřbetu, hlavního a vedlejšího ostří, atd. V důsledku vlivů procesu obrábění (např. poloha nástroje vůči obrobku, rychlostní poměry) však nástroj při své funkci některé z těchto úhlů nevyužívá, protože se z uvedených důvodů změny na úhly pracovní. To se může stát např. při natočení soustružnického nože kolem svislé osy (obr.2.5a), změně polohy špičky nože (obr.2.5b - nad osou obrobku u vnitřního soustružení, obr.2.6a - nad osou obrobku u vnějšího soustružení, obr.2.6b - pod osou obrobku u vnějšího soustružení), podélném (obr.2.7a) či zapichovacím soustružení vysokou posuvovou rychlostí (obr.2.7b).



Obr.2.5 Změna nástrojových úhlů na pracovní - vliv nastavení nástroje



Obr.2.6 Změna nástrojových úhlů na pracovní - vliv nastavení nástroje

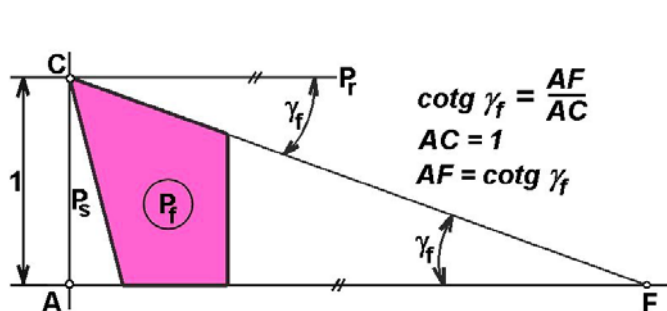


Obr.2.7 Změna nástrojových úhlů na pracovní - vliv rychlostních poměrů

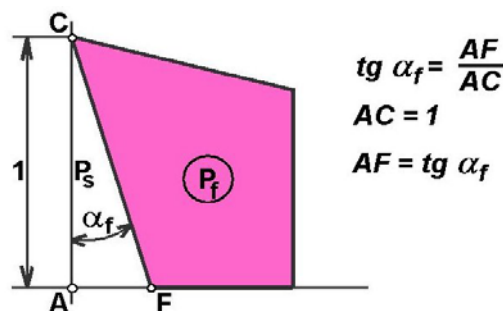
2.4. BŘITOVÉ DIAGRAMY

Břítové diagramy čela a hřbetu slouží pro rychlé určení vzájemné závislosti jednotlivých nástrojových úhlů a využívají se zejména při ostření nástrojů. Jejich konstrukce vychází z jednotkové vzdálenosti uvažovaného bodu ostří od základny nástroje (břítový diagram čela - obr.2.8, břítový diagram hřbetu - obr.2.9). Protože vzdálenost uvažovaného bodu ostří (C) od základny nástroje je rovna jedné, je zřejmé, že úsečka AF představuje na obrázku č.2.8 kotangentu úhlu γ_f a na obrázku č.2.9 tangentu úhlu α_f . Podobně, jako pro úhly měřené v rovině P_f , platí i pro úhly v dalších nástrojových rovinách předpoklad, že odpovídající úsečky v břítovém diagramu představují hodnoty jejich goniometrických funkcí:

- břítový diagram čela: $AS = \cotg \lambda_s$, $AO = \cotg \gamma_o$, $AP = \cotg \gamma_p$, $AG = \cotg \gamma_g$,
- břítový diagram hřbetu: $AS = \cotg \lambda_s$, $AO = \tg \alpha_o$, $AP = \tg \alpha_p$, $AB = \tg \alpha_b$.



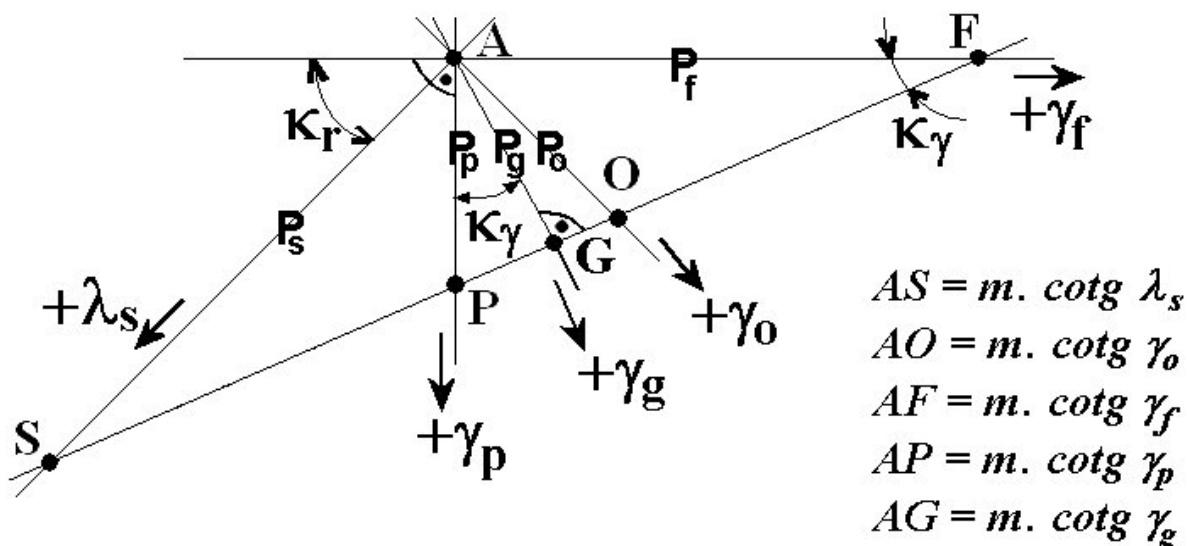
Obr.2.8 Jednotková vzdálenost, čelo



Obr.2.9 Jednotková vzdálenost, hřbet

2.4.1. Břítový diagram čela

Slouží pro stanovení vzájemné závislosti úhlů κ_r , λ_s , γ_o (nástrojový úhel nastavení hlavního ostří, nástrojový úhel sklonu hlavního ostří, nástrojový ortogonální úhel čela) a úhlů γ_f , γ_p , γ_g , κ_γ (nástrojový boční úhel čela, nástrojový zadní úhel čela, nástrojový úhel největšího spádu čela, pomocný úhel pro stanovení polohy nástrojové roviny největšího spádu čela P_g) - obr.2.10. Při jeho konstrukci je bez výjimky využívána goniometrická funkce *kotangens*.

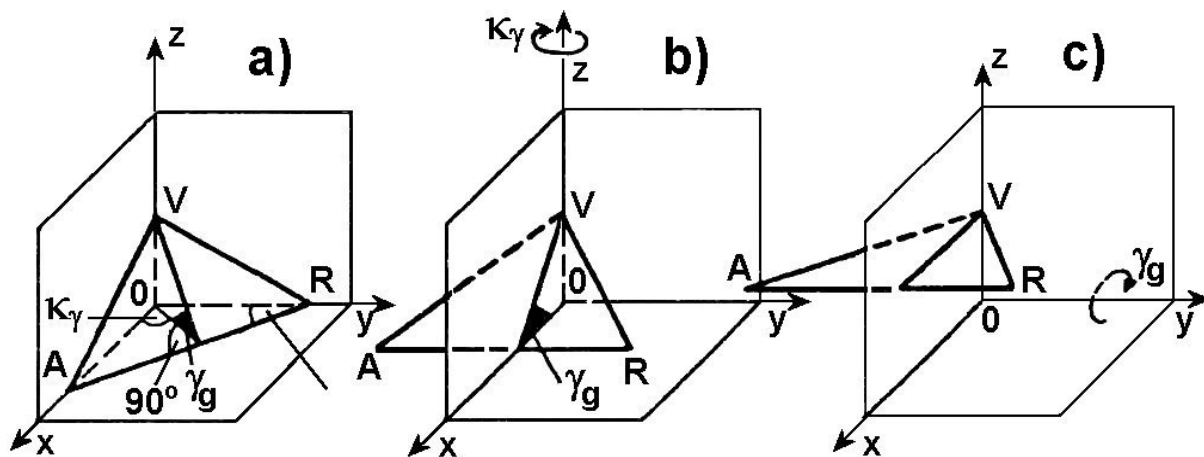


Obr.2.10 Břítový diagram čela

2.4.1.1. Využití břítového diagramu čela při broušení nástroje

Hodnoty úhlů, stanovených při konstrukci břítového diagramu čela je možno využít např. při ostření nástroje, a to k natočení čela nástroje do roviny rovnoběžné s rovinou broušení (rovinou stolu brusky). Toto lze provést pomocí dvojice úhlů $\gamma_f - \gamma_p$ nebo dvojice úhlů $\kappa_\gamma - \gamma_g$ (obr.2.11). Postup je následující:

- Nástroj je upnutý v přípravku, který umožňuje jeho otáčení kolem tří os x, y, z , čelo (na obrázku č.2.11 je reprezentováno plochou trojúhelníku AVR) má vzhledem k rovině broušení (rovinu xy) obecnou polohu.



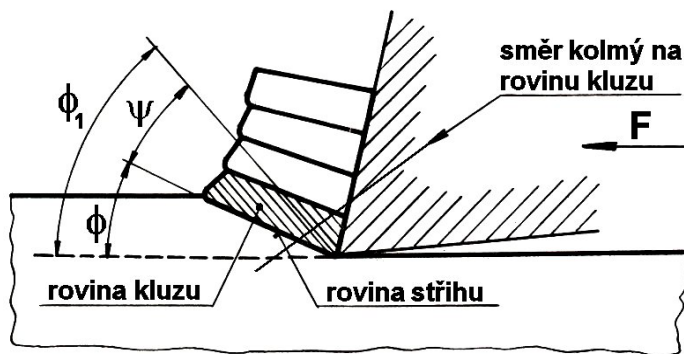
Obr.2.11 Využití úhlů κ_γ a γ_g při broušení čela soustružnického nože

- Nástroj se v přípravku otočí kolem osy z o úhel κ_γ (přepona AR trojúhelníku AVR je rovnoběžná s osou y).
- Nástroj se v přípravku otočí kolem osy y o úhel γ_g (přepona AR trojúhelníku AVR se zvedne na úroveň bodu V , celá plocha trojúhelníku AVR je tedy rovnoběžná s rovinou broušení xy).

Při ortogonálním řezání je ostří kolmé na směr řezného pohybu a daná problematika se řeší v rovině (zapichování, frézování nástrojem s přímými zuby, protahování). Při obecném řezání je třeba danou problematiku řešit v prostoru (podélné soustružení, vrtání, frézování nástrojem se zuby ve šroubovici).

3.1. PLASTICKÁ DEFORMACE PŘI ORTOGONÁLNÍM ŘEZÁNÍ

Při vnikání řezného nástroje do materiálu obrobku je břit tlačěn do obrobku silou F a před a pod břitem se koncentruje napětí, které má za následek pružné a plastické deformace obráběného materiálu (zjednodušené schéma na obr.3.2). Smykové napětí narůstá do té míry, až dojde k plastické deformaci materiálu před břitem nástroje (posuv jednotlivých vrstev materiálu v kluzných rovinách pod úhlem kluzu ϕ_1).



Obr.3.2 Vznik třísky



Obr.3.3 Kořen třísky

Pohyb nástroje pokračuje, proto dále roste plastická deformace a dochází k posunu a pěchování vrstev materiálu před břitem nástroje, a to ve směru kolmém ke kluzným rovinám. Tím jsou vyčerpány veškeré možnosti plastické deformace materiálu v mikroobjemu; při dalším pohybu nástroje dále roste napětí v materiálu, až dostoupí hodnoty vyšší než je stříhová mez pevnosti obráběného materiálu a dojde k odstřížení segmentu třísky v rovině stříhu pod úhlem stříhu ϕ - jednotlivé segmenty třísky jsou dobře vidět na obrázku kořene třísky (obr.3.3). Rozdíl mezi úhly ϕ_1 a ϕ se pohybuje v rozmezí $\psi = (0 \div 30)^\circ$, nízké hodnoty úhlu ψ vykazují tvárné materiály (např. ocel), vysoké hodnoty vykazují křehké materiály (např. šedé litiny).

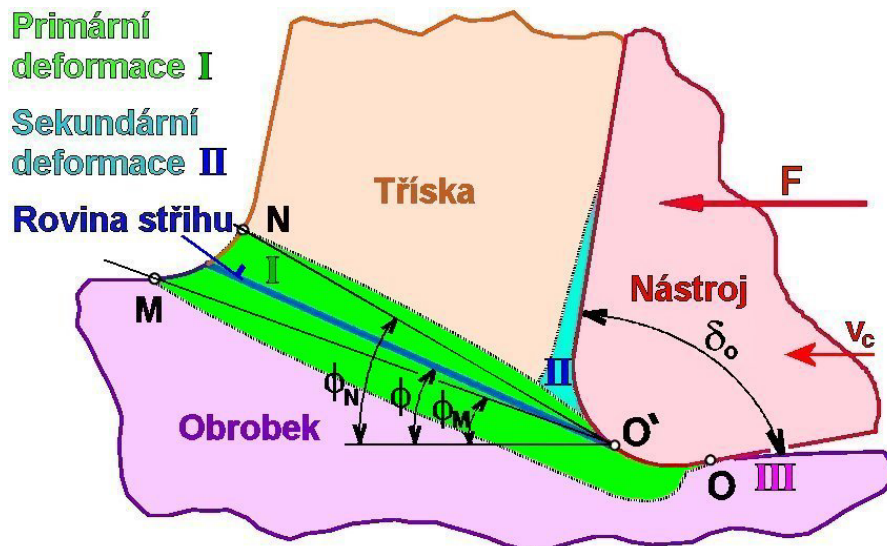
Při vnikání břitu nástroje do obráběného materiálu dochází k pružným a následně plastickým deformacím v těchto oblastech (obr.3.4):

- před břitem nástroje, oblast primární plastické deformace (I - OMNO`),
- v povrchových vrstvách styčné plochy třísky s čelem nástroje (II - sekundární plastická deformace),
- v povrchové vrstvě obrobku (III).

Velikost a tvar oblasti OMNO`, jakož i stav napjatosti v této oblasti jsou značně proměnlivé a závisí na:

- **fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu** (zejména jeho deformační a zpevňovací schopnosti),

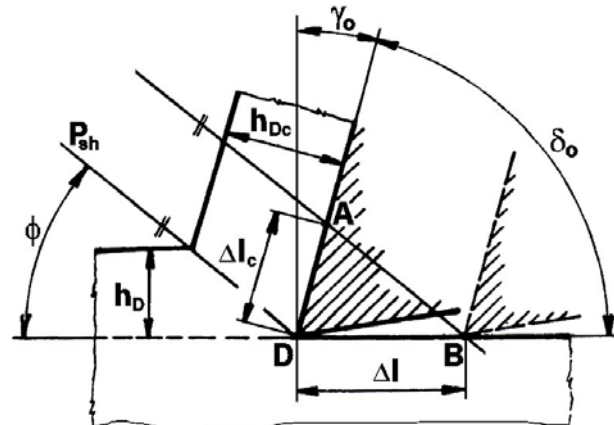
- **řezné rychlosti v_c** (když v_c roste, deformační oblast se zužuje; úhly ϕ_M i ϕ_N rostou - ϕ_M rychleji než ϕ_N ; při vysoké řezné rychlosti plochy $O'M$ a $O'N$ prakticky splývají a ke vzniku třísky dochází plastickým skluzem v jediné, střížné rovině),
- **geometrii nástroje** (zejména úhlech γ a δ),
- **řezném prostředí** (chlazení - vzduch, řezná kapalina).



Obr.3.4 Deformační oblasti



Obr.3.5 Změna textury materiálu



Obr.3.6 Pěchování třísky

Plastická deformace obráběného materiálu v procesu řezání způsobuje:

- **oddělení třísky od obrobku** (v oblasti I),
- **mechanické zatížení nástroje** řeznými odpory (největší vliv má oblast I, menší oblast II, nejmenší oblast III),
- **tepelné zatížení nástroje** (největší vliv má oblast I, menší oblast II, nejmenší oblast III),
- **opotřebení nástroje** (na čele v důsledku vlivu oblasti II, na hlavním hřbetě v důsledku vlivu oblasti III),
- **změnu textury materiálu** ve tříске (vliv oblasti I) i v povrchové vrstvě obrobene plochy (vliv oblasti III, částečně i oblasti I) - obr.3.5,

- *vznik zbytkových napětí* v povrchové vrstvě obrobenej plochy (zejména oblast III, částečně i oblast I),
- *pěchování třísky* (oblasti I a II) - průřez a délka třísky neodpovídají teoretickým hodnotám.

3.2. TŘÍSKY A JEJICH TECHNOLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY

3.2.1. Součinitel pěchování třísky

V důsledku plastických deformací v oblasti primární plastické deformace dochází k pěchování třísky při jejím odchodu ze zóny řezání. Pro ortogonální řezání lze vycházet z rovnosti objemů odřezávané vrstvy a vzniklé třísky, za jednotku času:

$$A_D \cdot v_c \cdot 10^{-3} = A_{Dc} \cdot v_t \cdot 10^{-3} \quad [\text{dm}^3 \text{ min}^{-1}], \quad (3.1)$$

kde: A_D [mm^2] - jmenovitá plocha řezu,
 A_{Dc} [mm^2] - plocha průřezu třísky,
 v_c [m min^{-1}] - řezná rychlost,
 v_t [m min^{-1}] - rychlost třísky.

Součinitel pěchování třísky Λ se vyjádří na základě úpravy vztahu (3.1):

$$\Lambda = \frac{A_{Dc}}{A_D} = \frac{v_c}{v_t} > 1 \quad [-]. \quad (3.2)$$

Plochy A_D a A_{Dc} lze vyjádřit ve tvaru:

$$A_D = h_D \cdot b_D \quad [\text{mm}^2], \quad (3.3)$$

$$A_{Dc} = h_{Dc} \cdot b_{Dc} \quad [\text{mm}^2], \quad (3.4)$$

kde (obr.3.6): h_D [mm] - jmenovitá tloušťka řezu, h_{Dc} [mm] - tloušťka třísky,
 b_D [mm] - jmenovitá šířka řezu, b_{Dc} [mm] - šířka třísky.

Z hlediska praktického řešení lze předpokládat, že $b_{Dc} \cong b_D$, takže

$$\Lambda = \frac{h_{Dc}}{h_D} \quad [-]. \quad (3.5)$$

V tomto případě se velikost h_{Dc} odměří na realizované třisce, např. mikrometrem s kulovými doteky, a pro danou hodnotu h_D se vypočítá součinitel pěchování.

Součinitel pěchování je možné rovněž vyjádřit na základě délky relativní dráhy nástroje vzhledem k obrobku l a korespondující délky třísky l_c (obr.3.6):

$$\Lambda = \frac{l}{l_c} \quad [-]. \quad (3.6)$$

Při stanovení hodnoty Λ se v tomto případě vychází z parametrů odřezané třísky a použije se vztah:

$$\Lambda = \frac{10^3 \cdot G_t}{l_c \cdot \rho_t \cdot A_D} \quad [-], \quad (3.7)$$

kde: G_t [g] - hmotnost třísky, ρ_t [g cm^{-3}] - hustota materiálu třísky,
 l_c [mm] - délka třísky, A_D [mm^2] - jmenovitá plocha řezu.

3.2.2. Objemový součinitel třísek

Třísky, jako doprovodný produkt řezného procesu, mají mít určité vlastnosti z hlediska rozměru a tvaru, a to bezprostředně po opuštění prostoru jejich vzniku. Z hlediska jejich manipulovatelnosti při odstraňování z prostoru obráběcího stroje a další dopravy a zpracování by měly mít takový tvar, při kterém zaujímají co nejmenší objem. Tento požadavek na třísky se zvláště zdůrazňuje při obrábění na automatizovaných obráběcích strojích a v automatizovaných výrobních systémech.

Tvar třísky je též velmi důležitým faktorem efektivního využití nástroje (dlouhá, plynulá tříska se namotává na nástroj, což zvyšuje nebezpečí jeho poškození) a dosažení předepsané kvality obrobku (plynulá tříska zhoršuje strukturu obrobeného povrchu). Proto je třeba dosáhnout dělení třísky na jednotlivé elementy i u takových obráběných materiálů, které s ohledem na jejich vlastnosti tvoří vždy třísku plynulou (např. korozivzdorné oceli). Tvar třísky při obrábění závisí na více faktorech, z nichž nejdůležitější jsou:








- vlastnosti obráběného materiálu,
- geometrie nástroje a tvar břitu nástroje (úhly γ , δ , lamače a utvařeče třísky),
- pracovní (řezné podmínky), zejména řezná a posuvová rychlost,
- nástrojový materiál (druh - vliv na podmínky tření).

Objemový součinitel třísek W (hodnoty pro vybrané tvary třísek jsou uvedeny na obrázku č.3.7) umožňuje kvantifikovat stupeň plnění obecných požadavků na tvar třísek a lze ho vyjádřit vztahem:

$$W = \frac{V_t}{V_m} \quad [-], \quad (3.8)$$

kde: V_t [dm³] - objem volně ložených třísek,

V_m [dm³] - objem odebraného materiálu korespondující s V_t .

TVAR TŘÍSEK		W	TVAR TŘÍSEK		W
	STUŽKOVÉ DLOUHÉ	400 a více		SPIRÁLOVÉ PLOCHÉ	10 až 20
	STUŽKOVÉ SMOTANÉ	300 až 400		OBLOUKOVITÉ SPOJENÉ	8 až 10
	VINUTÉ DLOUHÉ	80 až 150		ELEMENTÁRNÍ	4 až 6
	VINUTÉ KRÁTKÉ	40 až 60			

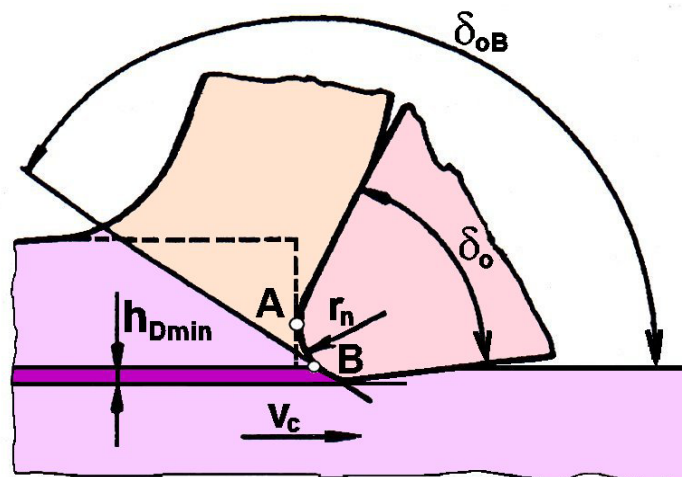
Obr.3.7 Hodnoty W pro vybrané tvary třísek

3.3. SEKUNDÁRNÍ JEVY PROCESU ŘEZÁNÍ

3.3.1. Mechanické vlastnosti povrchové vrstvy obrobené plochy

V důsledku řezného procesu je povrchová vrstva obrobené plochy ovlivněna různými fyzikálními a někdy i chemickými procesy, které mají za následek *změnu mechanických vlastností, strukturní transformace, různé vady, zpevnění, zbytková napětí* a pod.

Zpevnění povrchové vrstvy je způsobeno zejména tím, že oblast primárních plastických deformací často zasahuje pod úroveň budoucího povrchu (obr.3.4). Další vliv na zpevnění povrchové vrstvy souvisí se skutečností, že reálné ostří není nikdy tvořeno úsečkou, ale je částí válcové plochy o poloměru $r_n = 5 \div 20 \mu\text{m}$. V bezprostřední interakci břitu s materiálem obrobku se realizuje negativní úhel čela i úhel řezu (δ_{OB}) a budoucí povrch obrobené plochy nevzniká pouze řezáním, ale i tvářením. S uvedeným jevem souvisí též minimální hodnota jmenovité tloušťky řezu h_{Dmin} , která je ještě pro dané řezné podmínky realizovatelná (obr.3.8).



Obr.3.8 Vliv zaoblení ostří na povrch obrobku

Hloubka a intenzita zpevnění popř. rozrušení povrchové vrstvy závisí na vlastnostech obráběného materiálu a na podmínkách deformace. Kovy, které se vyznačují dobrou deformací schopností (oceli, slitiny hliníku) se při obrábění zpevnějí intenzivněji než kovy křehké. Z řezných podmínek ovlivňují intenzitu a hloubku zpevnění řezná rychlost v_c a šířka záběru ostří a_p . Z geometrických parametrů nástroje působí na zpevnění povrchové vrstvy obrobku úhel řezu δ , úhel hřbetu α , poloměry zaoblení špičky r_e a poloměr zaoblení ostří r_n .

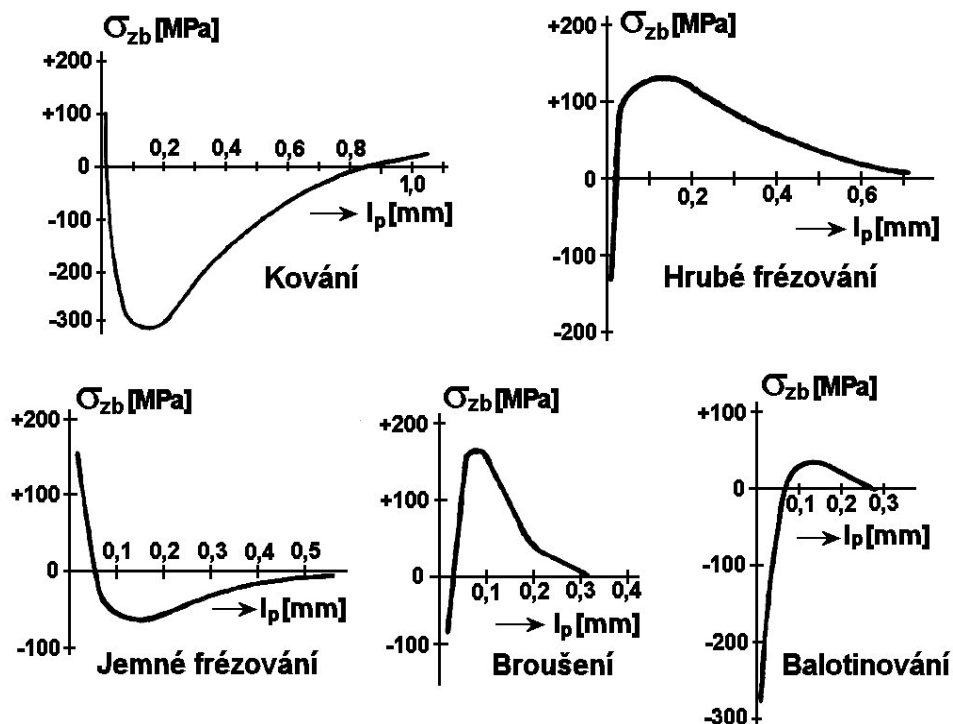
Hlavní podmínkou vzniku zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobku je *nerovnoměrná plastická deformace*. K dalším mechanismům vzniku zbytkových napětí patří:

- *teplotní roztažnost* při nerovnoměrném ohřevu nebo ochlazování,
- *strukturní změny materiálu* v tuhém stavu (dochází k nim za vysokých teplot, např. při broušení),
- *chemické procesy* (vznikají chemické sloučeniny s odlišnou hustotou - v důsledku difúze a působení řezného prostředí).

Pokud převažuje při obrábění plastická deformace (bez výrazného tepelného účinku), v naprosté většině případů dochází na povrchu obrobku k vytvoření *tlakového napětí*. Toto je z hlediska funkce povrchu součástí výhodné, protože případné zárodky trhlin jsou tlakem zavírány. Při současném tepelném a mechanickém zatěžování povrchu je horní, nejteplejší část

povrchové vrstvy při obrábění plasticky zúžena. Při chladnutí se pak v této zúžené vrstvě vytvoří **tahové napětí**, což je z hlediska funkčních vlastností povrchu nevýhodné, protože může dojít k únavovým lomům a vzniku trhlin. Mechanický i tepelný mechanismus se mohou dále kombinovat se strukturními změnami materiálu v tuhém stavu, i s chemickými procesy. Strukturní a chemické změny způsobují buď **zvětšení** nebo **zmenšení objemu** materiálu. V prvním případě neovlivněný okolní materiál brání zvětšování a v takto ovlivněném materiálu vznikají tlaková napětí, při zmenšování objemu vznikají napětí tahová.

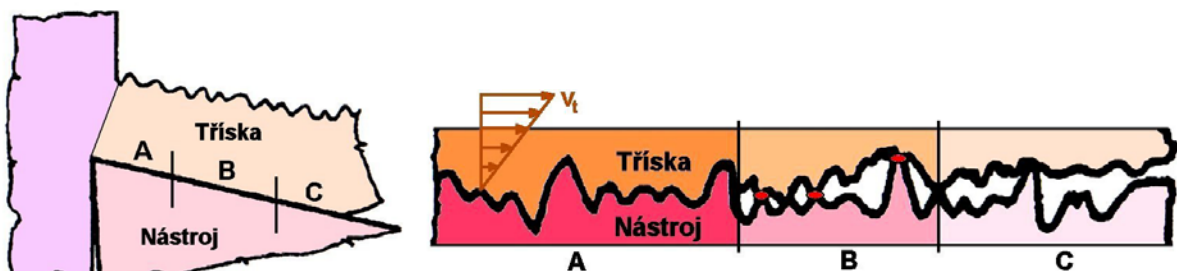
Příklad průběhu zbytkových napětí v povrchové vrstvě lopatky turbokompresoru z oceli 10Ch17N2, po různých technologických operacích, je na uveden na obrázku č.3.9.



Obr.3.9 Průběh zbytkových napětí v povrchové vrstvě lopatky kompresoru

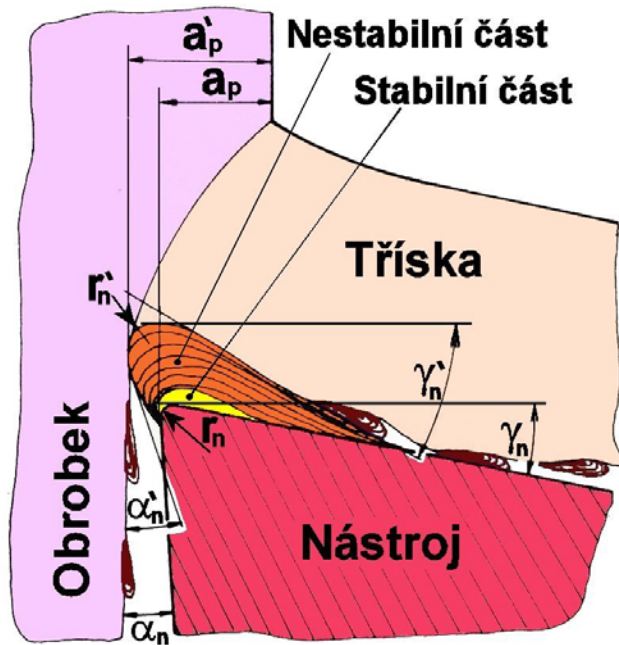
3.3.2. Nárůstek

Pohyb třísky po čele nástroje probíhá za velkých tlaků (řádově 10^3 až 10^4 MPa) a vysokých teplot (až 1200 °C). Plochu kontaktu třísky s čelem nástroje lze rozdělit do tří základních oblastí A - váznutí, B - svařování, C - kluz (obr.3.10). V oblasti A působí nejvyšší tlak a teplota a z těchto důvodů je pohyb třísky těsně u čela nástroje zabrzdován až na nulovou hodnotu rychlosti v_t .

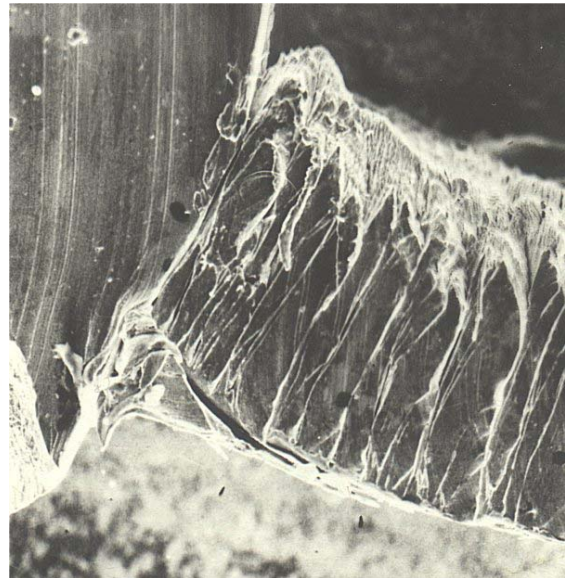


Obr.3.10 Plocha kontaktu třísky s čelem nástroje

Plynulý odchod třísky z místa řezu je v této oblasti umožněn tím, že dochází k vnitřnímu pohybu mezi jednotlivými vrstvami třísky. Rychlost pohybu těchto vrstev se s rostoucí vzdáleností od čela nástroje zvyšuje tak, že od určité vrstvy se tříska pohybuje danou rychlostí v_t . Zabrzdované vrstvy pak vytvářejí na čele nástroje nárůstek, který má dvě části, stabilní a nestabilní (obr.3.11).



Obr.3.11 Nárůstek



Obr.3.12 Nárůstek u kořene třísky

Nárůstek (zejména jeho stabilní část) je silně spěchovaná vrstva obráběného materiálu, která má v důsledku probíhajících pochodů odlišnou strukturu a je charakterizována vysokou pevností a tvrdostí. Je produktem adheze, pro jejíž vznik jsou podstatné tyto výchozí podmínky (musí být splněny všechny současně):

- vysoká teplota,
- vysoký tlak,
- styk chemicky příbuzných materiálů (např. kombinace nástroj - obrobek: nástrojová ocel - ocel, slinutý karbid - ocel; kombinaci řezná keramika - ocel nelze považovat za chemicky příbuzné materiály),
- styk kovově čistých povrchů (technický termín „kovově čistý povrch“ znamená téměř absolutně čistý povrch, bez jakýchkoli kontaminovaných povrchových vrstev, byť jen ve vrstvách o tloušťce několika desítek atomových rovin).

Nárůstek se tvoří a porušuje periodicky s frekvencí 10^2 až 10^3 Hz. Vytváří se zejména při obrábění tvárných materiálů (které mají sklon k deformačnímu zpevnování), v oblasti nízkých řezných rychlostí ($v_c \cong 20 \text{ m min}^{-1}$). Je odnášen třískou a obrobkem (obrobenou plochou). Vzhledem ke svým vlastnostem může po určitou přebírat funkci břitu a chránit tím nástroj před opotřebením (v okamžiku porušení stabilní části může naopak způsobit velké opotřebenění), jinak jsou ale jeho vlivy většinou nežádoucí (obr.3.11):

- **mění geometrii nástroje** (zvětšuje poloměr zaoblení ostří r_n , zvětšuje úhel čela γ a úhel hřbetu α , zmenšuje úhel řezu δ),
- **mění rozměry obrobku** (důsledek rozdílných hodnot a_p a a_p'),

- *zhoršuje strukturu obrobené plochy* (nestabilní část nárůstku se „nalepuje“ na obrobenou plochu),
- *způsobuje samobuzené kmitání soustavy* stroj - nástroj - obrobek.

Vzniku nárůstku lze zabránit změnou řezných podmínek (zvýšení řezné rychlosti), použitím vhodných řezných kapalin vysokým mazacím účinkem (změna třecích podmínek na čele nástroje, vytváření kontaminovaných povrchů), lapováním čelní plochy nástroje a pod.

3.3.3. Práce a výkon řezání

K oddělení třísky určité délky z materiálu obrobku musíme vynaložit určitou práci E , která se skládá z následujících složek:

$$E = E_p + E_e + E_t + E_d \quad [J], \quad (3.9)$$

$$E_t = E_{t\check{c}} + E_{th} \quad [J], \quad (3.10)$$

kde: E_p [J] - práce nutná k překonání plastických deformací v odřezávané vrstvě a pod břitem nástroje (tvoří 50÷80% celkové práce E),
 E_e [J] - práce nutná k překonání pružných (elastických) deformací materiálu odřezávané vrstvy a materiálu pod břitem nástroje (tvoří 5÷10% celkové práce E),
 $E_{t\check{c}}$ [J] - práce nutná k překonání tření třísky po čele nástroje,
 E_{th} [J] - práce nutná k překonání tření hřbetu nástroje po řezné ploše (pasivní práce tření, spolu se složkou $E_{t\check{c}}$ tvoří 20 ÷40 % celkové práce E),
 E_d [J] - disperzní práce (práce potřebná k vytvoření nových povrchů, tvoří přibližně 1% celkové práce E).

Práce řezání E_c je práce potřebná na zajištění hlavního pohybu, pro odebrání určitého množství materiálu obrobku:

$$E_c = \int_0^t F_c \cdot v_c \cdot dt \quad [J], \quad (3.11)$$

Pro soustružení válcové plochy bude po formální úpravě platit:

$$E_c = F_c \cdot v_c \cdot t_p \quad [J], \quad (3.12)$$

kde: F_c [N] - řezná síla,
 v_c [m min⁻¹] - řezná rychlost,
 t_p [min] - čas řezného procesu.

Práce posuvu E_f je práce potřebná na zajištění posuvového pohybu, pro odebrání určitého množství materiálu:

$$E_f = \int_0^t F_f \cdot v_f \cdot dt \quad [J], \quad (3.13)$$

Pro soustružení válcové plochy bude po formální úpravě platit:

$$E_f = F_f \cdot v_f \cdot t_p \quad [J], \quad (3.14)$$

kde: F_f [N] - posuvová síla, v_f [m min⁻¹] - posuvová rychlost, t_p [min] - čas řezného procesu.

Práce řezného procesu E_e vyjadřuje celkovou práci na odebrání určitého množství materiálu a stanoví se jako součet práce řezání a práce posuvu:

$$E_e = E_c + E_f \quad [J], \quad (3.15)$$

Pro soustružení válcové plochy bude po formální úpravě platit:

$$E_e = (F_c \cdot v_c + F_f \cdot v_f) \cdot t_p \quad [J]. \quad (3.16)$$

Měrná práce řezání e_c [$J \text{ cm}^{-3}$] je vyjádřena prací, potřebnou na odebrání jednotkového objemu materiálu obrobku.

Řezný výkon P_c je určen součinem řezné síly F_c a řezné rychlosti v_c , působících v hlavním bodě ostří v daném čase:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60} \quad [W], \quad (3.17)$$

kde: F_c [N] - řezná síla,
 v_c [m min^{-1}] - řezná rychlost.

Vztah (3.17) lze formálně upravit na tvar:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4} \quad [kW], \quad (3.18)$$

kde: F_c [N] - řezná síla,
 v_c [m min^{-1}] - řezná rychlost.

Výkon potřebný pro posuv P_f je určen součinem posuvové síly F_f a rychlosti posuvu v_f :

$$P_f = \frac{F_f \cdot v_f}{60} \quad [W], \quad (3.19)$$

kde: F_f [N] - posuvová síla,
 v_f [m min^{-1}] - posuvová rychlost.

Pracovní výkon P_e je dán součinem pracovní síly F_e a rychlosti řezného pohybu v_e , přičemž F_e i v_e působí v hlavním bodě ostří ve stejném čase:

$$P_e = \frac{F_e \cdot v_e}{60} \quad [W], \quad (3.20)$$

kde: F_e [N] - pracovní síla,
 v_e - [m min^{-1}] rychlost řezného pohybu.

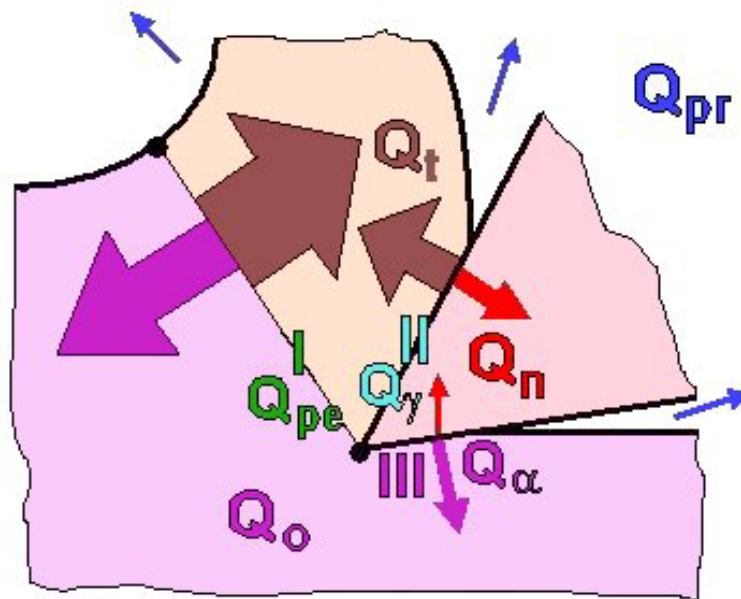
Měrný řezný výkon p_c [$W \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$] se stanoví jako řezný výkon potřebný na odebrání jednotkového množství materiálu za jednotku času.

3.3.4. Teplota a teplota řezání

3.3.4.1. Tepelná bilance řezného procesu

Během obráběcího procesu se téměř veškerá práce řezání transformuje v teplo. Teplo řezného procesu Q_e , vzniklé při odebrání určitého množství materiálu, je přibližně rovné práci řezného procesu E_e , takže $Q_e \cong E_e$. Vzniklé teplo výrazně ovlivňuje řezný proces, protože:

- negativně působí na řezné vlastnosti nástroje,
- ovlivňuje mechanické vlastnosti obráběného materiálu,
- ovlivňuje petchování a zpevňování obráběného materiálu,
- ovlivňuje podmínky tření na čele i hřbetě nástroje.



Obr.3.13 Vznik a odvod tepla

Teplo při obrábění (obr.3.13) vzniká v oblasti primární plastické deformace I (Q_{pe} - v důsledku plastických a elastických deformací), v oblasti sekundární plastické deformace II (Q_γ - v důsledku tření mezi čelem nástroje a třískou) a v oblasti III (Q_α - v důsledku tření hlavního hřbetu nástroje o přechodovou plochu na obrobku). Vzniklé teplo je odváděno třískou (Q_t), nástrojem (Q_n), obrobkem (Q_o) a řezným prostředím (Q_{pr}) - obr.3.13. Na základě předpokladu, že vzniklé a odvedené teplo musí být v rovnováze, lze vytvořit rovnici tepelné bilance řezného procesu v následujícím tvaru:

$$Q_{pe} + Q_\gamma + Q_\alpha = Q_t + Q_n + Q_o + Q_{pr} \quad [J]. \quad (3.21)$$

Největší množství tepla vzniká v oblasti primární plastické deformace I, následuje oblast sekundární plastické deformace II. Teplo, vznikající v oblasti hřbetu, by mělo být udržováno na co možná nejnižších hodnotách, proto je třeba volit úhel hřbetu co největší a zamezit výraznému opotřebení hřbetu, které ve svém konečném efektu úhel hřbetu dále zmenšuje. Množství vzniklého tepla závisí na vlastnostech obráběného materiálu, geometrii nástroje a řezných podmínkách, jejichž vliv lze shrnout následovně:

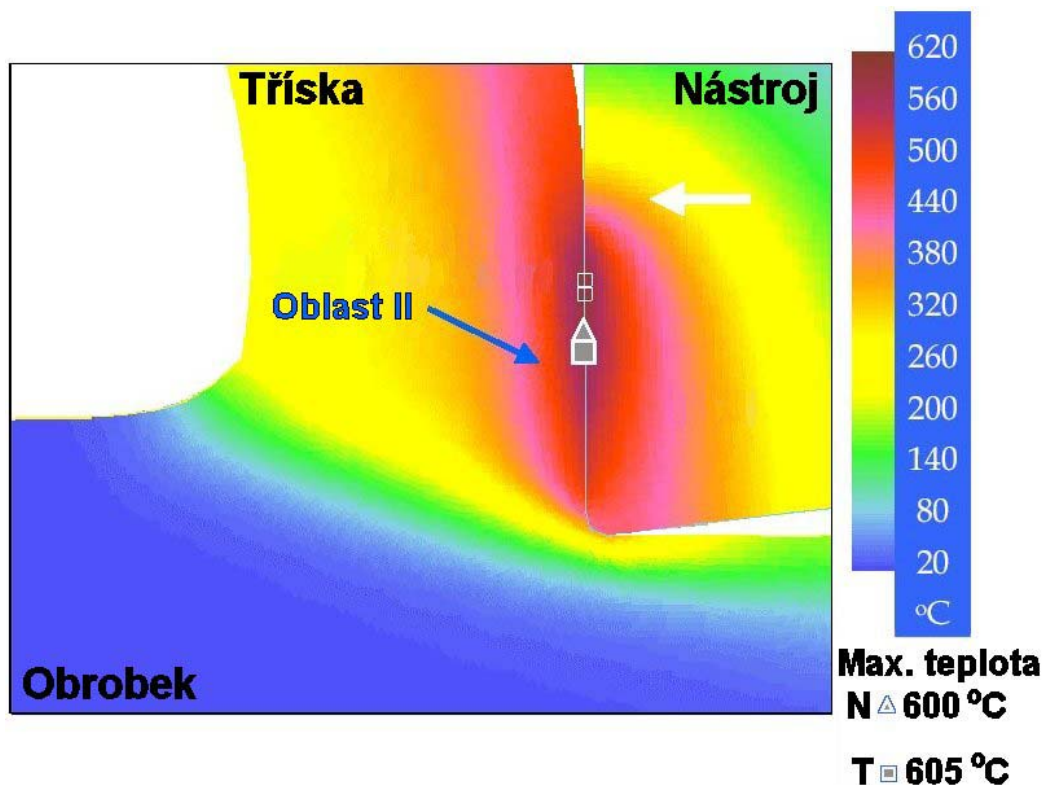
- Se zvyšování řezné rychlosti roste množství vzniklého tepla, v první fázi rychleji, pak se nárůst zpomalí (s rostoucí hodnotou v_c klesá měrný řezný odpor a tím i teplota v oblasti primární plastické deformace, ale výrazně roste práce a tření na čele nástroje).

- Se zvyšováním posuvové rychlosti v_f a šířky záběru ostří a_p roste množství vzniklého tepla, ale méně výrazně než při zvyšování řezné rychlosti. Výhodnější, a to i z hlediska tepelného zatížení nástroje, je štíhlá tříška (malá hodnota f a velká hodnota a_p).
- Při zvětšování pracovního úhlu nastavení hlavního ostří κ_{re} se vzniklé teplo soustřeďuje na kratší úsek břitu a proto tepelné zatížení nástroje narůstá.
- Při zmenšování úhlu čela γ narůstá úhel řezu δ , intenzita plastické deformace se zvyšuje a proto roste i množství vzniklého tepla.
- Při zmenšování úhlu hřbetu α narůstá práce tření na hřbetě nástroje a tím i množství vzniklého tepla.

Podíl jednotlivých složek tepla, odváděného třískou, obrobkem, nástrojem a prostředím, závisí na tepelné vodivosti materiálů obrobku a nástroje, na řezných podmínkách (především řezné rychlosti), řezném prostředí (způsobu chlazení a mazání) a na geometrii břitu řezného nástroje. Největší část tepla vzniklého při obrábění je u řezných procesů, které využívají nástroj s definovatelnou geometrií, odváděna ze zóny řezání třískou. Celkové množství tepla, vzniklého při obrábění, lze měřit **pomocí kalorimetrů**.

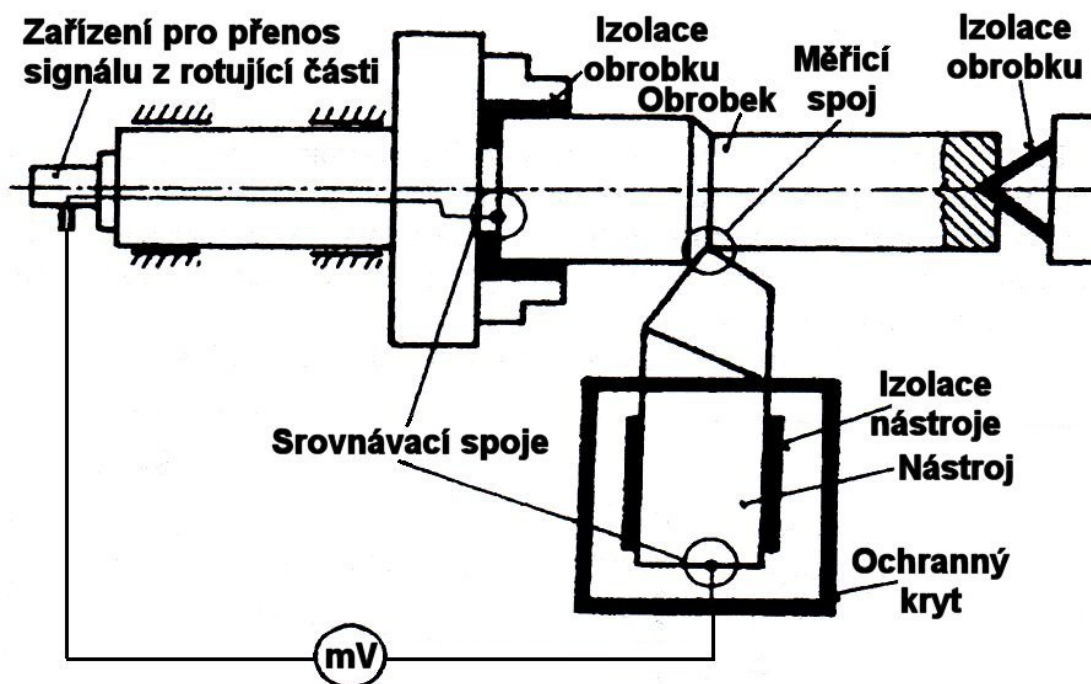
3.3.4.2. Teplota řezání

Teplota v zóně řezání je závislá hlavně na kontaktu třísky a nástroje, velikosti řezných sil a třecích procesech mezi materiálem obrobku a břitem nástroje. Příklad teplotního pole obrobku, třísky a nástroje je uveden na obrázku č.3.14 (je třeba si uvědomit, že teploty na styku čela nástroje a třísky mohou dosahovat hodnot až 1200 °C). Při obrábění nízkými řeznými rychlostmi je maximální teplota na špičce nástroje, při obrábění vyššími řeznými rychlostmi je maximální teplota v určité vzdálenosti od ostří nástroje.

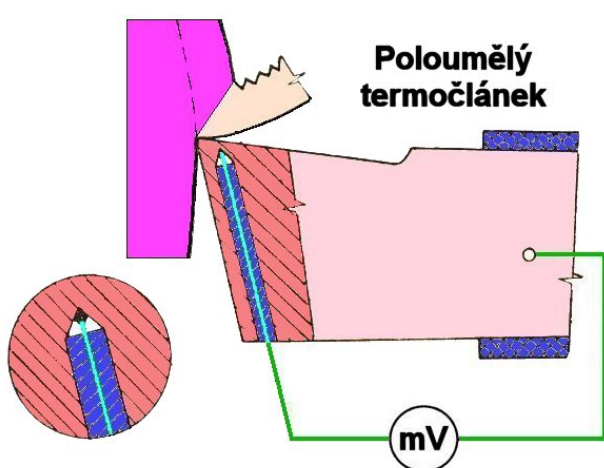


Obr.3.14 Teplotní pole

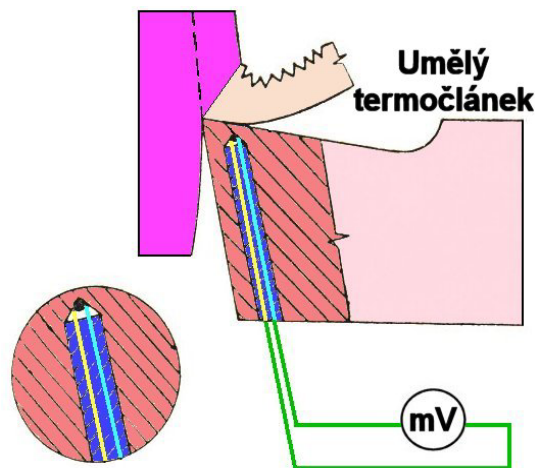
Identifikace teplotního pole představuje složitý metrologický problém a vyžaduje složité měřicí systémy (např. termokamera propojená s počítačem). Při aplikaci standardních měřicích metod lze měřit střední teplotu všech stykových ploch mezi nástrojem a obrobkem (označuje se jako *teplota řezání*). Měření lze provádět různými typy termočlánků (přirozený - obr.3.15, poloumělý - obr.3.16, umělý - obr.3.17), přičemž značným problémem je umístění měřicího spoje termočlánku co nejblíže ke stykové ploše nástroje a třísky.



Obr.3.15 Přirozený termočlánek



Obr.3.16 Poloumělý termočlánek



Obr.3.17 Umělý termočlánek

Přirozeným termočlánkem se měří střední teplota všech stykových míst mezi nástrojem a obrobkem. Protože tento termočlánek umožňuje registrovat okamžité změny teploty řezání, používá se tato metoda nejen při experimentální práci, ale slouží i jako jeden z možných snímačů obráběcího procesu u obráběcích strojů s adaptivním řízením. Měřicí spoj

přirozeného termočlásku je na stykových plochách mezi nástrojem a obrobkem. Nástroj a obrobek jsou vzájemně elektricky izolovány. Nevýhodou tohoto termočlásku je, že pro každou kombinaci materiálu nástroje a materiálu obrobku musí být stanovena cejchovní křivka.

3.3.5. Kmitání soustavy obrábění

Obráběcí stroj, nástroj a obrobek tvoří obráběcí systém se složitými dynamickými charakteristikami a proto zde v průběhu řezného procesu téměř vždy vzniká kmitání. Kmitání jednotlivých prvků obráběcího systému zhoršuje kvalitu obrobenej plochy (vznik vlnitosti, zhoršená drsnost povrchu), zvyšuje intenzitu opotřebení nástroje (může způsobit vylamování břitu, nebo i celkovou destrukci nástroje), urychluje opotřebení součástí obráběcího stroje a zhoršuje pracovní prostředí (vysoké tóny nebo silný hluk). Na základě vnějšího působení různých impulzů a sil lze rozlišit kmitání *vlastní*, *vynucené* a *samobuzené*.

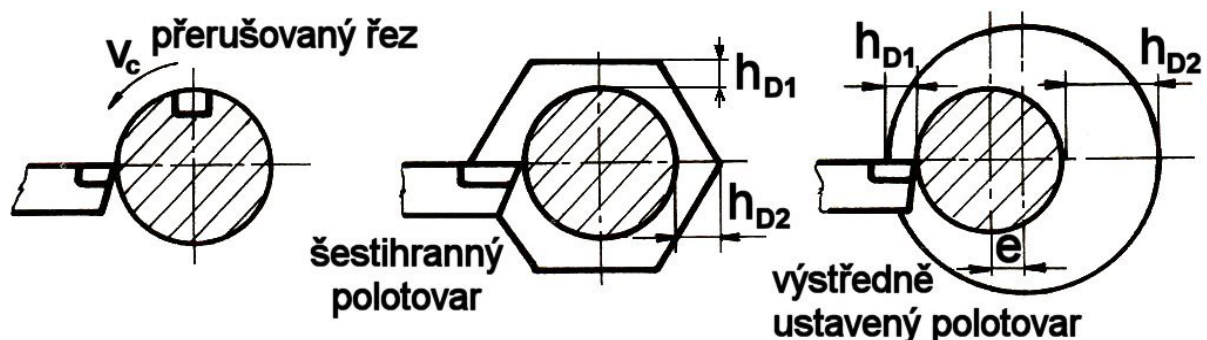
3.3.5.1. Vlastní kmitání

Sem patří kmitání některé části nebo několika částí soustavy vlastními kmity, určenými vlastní frekvencí. Takovéto kmitání může být vyvoláno rázem - např. záběrem nástroje nebo zapnutím spojky. Vlastní kmity se udržují působením pružných sil, vlivem odporů se utlumí a proto lze jejich vliv obvykle zanedbat.

3.3.5.2. Vynucené kmitání

Toto kmitání vznikne, působí-li na danou soustavu periodicky proměnlivá budící síla a jeho charakteristickým znakem je, že frekvence kmitání se obvykle shoduje s frekvencí této síly. Vynucené kmitání technologické soustavy může být trojího druhu:

- kmitání, které není vyvolané řezným procesem, ale pramení z technologické soustavy a vzniká v důsledku:
 - nevyváženosti rotujících součástí,
 - setrvačných sil, které vznikají vratným rotačním nebo přímočarým pohybem součástí,
 - nepřesností převodových mechanismů obráběcího stroje,
 - rotace nesymetrických hřídelí (např. s drážkou),
- kmitání vyvolané vlastním řezným procesem (obr.3.18):
 - přerušovaný řez (např. soustružení hřídele s drážkou),
 - kolísání hloubky řezu (např. soustružení mnohohranu),
- vynucené kmitání přenášené do technologické soustavy z okolí.



Obr.3.18 Vynucené kmitání vyvolané řezným procesem

3.3.5.3. Samobuzené kmitání

Toto kmitání vzniká bez periodického vnějšího budicího účinku. Soustava je uvedena do samobuzeného kmitání prvním impulzem, který vyvolá výchylku z rovnovážné polohy a dále kmitání probíhá bez přívodu energie z vnějšku a jeho periodická proměnlivost závisí pouze na vlastnostech kmitající soustavy. Prvním impulzem může být např. uvolnění nárůstku z nástroje, nebo náraz nástroje na tvrdší strukturální částici v obráběném materiálu. Samobuzené kmitání mohou vyvolat vlivy:

- nesouvisející s procesem řezání:
 - relaxační kmitání (trhavé pohyby při velmi malých posuvech u vyvrtávaček),
 - kmitání kopirovacího systému se zpětnou vazbou.
- související s řezným procesem:
 - reprodukce předchozí vlnitosti povrchu,
 - postupné usmýkávání článků nebo prvků třísky,
 - nestabilita nárůstku,
 - změna součinitele tření v závislosti na rychlosti pohybu.

4. ŘEZNÉ PROSTŘEDÍ

Prostředí v zóně řezání má významný vliv na kvantitativní, kvalitativní a ekonomické parametry řezného procesu. Řezné prostředí je vytvářeno řeznými médii - řeznými (procesními) pastami, kapalinami, plyny a mlhami. Všechna tato média jsou vyrobena a užívána tak, aby měla chladicí, mazací a čisticí účinek. K dalším důležitým specifickým požadavkům, kladeným na řezná média, lze zařadit provozní stálost, ochranný účinek, zdravotní nezávadnost a přiměřené provozní náklady.

4.1. TECHNOLOGICKÉ POŽADAVKY NA ŘEZNÁ MÉDIA

Chladicí účinek

Chladicím účinkem se rozumí schopnost řezného média odvádět teplo z místa řezu. Tuto schopnost má každé médium, které smáčí povrch kovů, za předpokladu, že mezi povrchem obrobku a médiem existuje tepelný spád. Odvod tepla vzniklého při řezání se uskutečňuje tím, že řezné médium obklopuje nástroj, třísky i obrobek a přejímá část vzniklého tepla. Důsledkem chladicího účinku je snížení teploty řezání, což má příznivý vliv na opotřebení a trvanlivost nástroje, i na jakost povrchové vrstvy obrobené plochy (nižší hodnoty zbytkových napětí).

Chladicí účinek řezného média závisí na jeho smáčecí schopnosti, na výparném teple, rychlosti vypařování za určitých teplot, tepelné vodivosti, měrném teple a průtokovém množství. Čím budou tyto veličiny větší, tím bude chladicí účinek řezného média vyšší. Výparné teplo zvětšuje chladicí účinek, ale přílišné odpařování řezného média není žádoucí.

Mazací účinek

Mazací účinek je umožněn tím, že médium vytváří na povrchu obrobku a nástroje vrstvu, která brání přímému styku kovových povrchů a snižuje tření, ke kterému dochází mezi nástrojem a obrobkem. Vzhledem k vysokým tlakům, které vznikají při řezání, nemůže zde

dojít ke kapalnému tření. Může ale vzniknout mezní tření, má-li řezné médium velkou afinitu ke kovu, nebo váže-li se s materiálem obrobku chemicky, v mikroskopické povrchové mezní vrstvě. Mazací účinek znamená zmenšení řezných sil, zmenšení spotřeby energie a také zlepšení jakosti obrobeneho povrchu. Mazací účinek řezného média se uplatní zejména u dokončovacích obráběcích operací, ale také při protahování, výrobě závitů nebo výrobě ozubení.

Mazací schopnost řezného média je závislá na viskozitě a na pevnosti vytvořené mezní vrstvy. Negativní důsledkem vyšší viskozity je omezení průniku média mezi třecí plochy, zhoršení jeho proudění a snížení odvodu tepla. Viskóznější médium ve větším množství ulpívá na třískách, čímž dochází k jeho značným ztrátám. Pevnost mazací vrstvy se zvyšuje přísadami povrchově aktivních látek, které napomáhají pronikání do trhlin deformovaného kovu a usnadňují tak vlastní proces řezání.

Čistící účinek

Čistící účinek řezného média spočívá zejména v odstraňování třísek z místa řezu. Čistící účinek je významný zejména při broušení (zlepšení řezivosti broušícího kotouče v důsledku vyplavování zanesených pórů, zabránění slepování částic třísky a usnadnění jejich usazování), řezání závitů nebo vrtání hlubokých děr.

Provozní stálost

Měřítkem provozní stálosti řezného média je doba jeho výměny. Dlouhá doba mezi jednotlivými výměnami média je podmíněna tím, aby se jeho vlastnosti po celou tuto dobu neměnily. Stárnutí řezného média olejového typu se projevuje tvořením pryskyřičnatých usazenin, které mohou způsobit i poruchu stroje. Produkty stárnutí mají vliv i na zhoršování funkčních vlastností média, jeho rozklad, zmenšení mazacího účinku, ztrátu ochranných schopností, korozi a hnilobný rozklad. Provozní stálost řezného média závisí na jeho fyzikálních a chemických vlastnostech a na pracovní teplotě.

Ochranný účinek

Ochranný účinek řezného média se projevuje tím, že nenapadá kovy a nezpůsobuje korozi. Tento požadavek je důležitý proto, aby nebylo nutné výrobky mezi jednotlivými operacemi konzervovat a aby byl obráběcí stroje chráněny před korozi. Pro zvýšení antikoroziho účinku jsou do řezného média přidávány pasivační přísady. Dalším důležitým požadavkem je, aby řezné médium nerozpouštělo nátěry obráběcích strojů a nebylo agresivní vůči gumovým těsněním.

Zdravotní nezávadnost

Požadavek na zdravotní nezávadnost řezného média vychází z toho, že při práci na obráběcích strojích s ním obsluhující pracovník přichází do přímého styku. Proto médium nesmí být zdraví škodlivé, nesmí obsahovat látky dráždivé sliznici a pokožku, nesmí být jedovaté a nesmí zamořovat ovzduší nepříjemným zápachem. Jeho zdravotní nezávadnost závisí také na jeho provozní stálosti a čistotě. Přitom je nutné v provozu dbát na to, aby byla zajištěna základní hygienická opatření, jako je větrání (někdy je nutné, aby vznikající páry byly odsávány), umývání, preventivní ochrana pokožky a pod.

Přiměřené provozní náklady

Přiměřené provozní náklady souvisí především se spotřebou řezného média. Při rozboru nákladů je nutné nejdříve posoudit jejich vliv na proces obrábění (průběh plastických deformací v zóně řezání, opotřebení, trvanlivost, ostření nebo výměna nástroje, změny struktury povrchu obrobeneho plochy, spotřeba energie). Po tomto rozboru musí následovat hodnocení

řezného média s ohledem na jeho provozní stálost, spotřebu, výměnu a náklady na likvidaci. Jedině podrobný technicko-ekonomický rozbor může rozhodnout o vhodnosti určitého druhu řezného média. Hodnocení podle cenových rozdílů je sice jednoduché, ale zcela nedostačující, protože cena řezného média není tím hlavním parametrem, který by rozhodujícím způsobem ovlivňoval ekonomii obrábění.

4.2. ŘEZNÉ KAPALINY

Řezné kapaliny lze členit na kapaliny s převažujícím chladicím účinkem a kapaliny s převažujícím mazacím účinkem. Toto rozdělení však přesně nevystihuje sortiment kapalin, které jsou v současné době na trhu. Stále více se totiž projevuje snaha zvyšovat mazací účinky i u řezných kapalin s převažujícím chladicím účinkem. Všechny moderní druhy řezných kapalin tento požadavek plní, čímž je prakticky rozdíl mezi oběma skupinami stírán. Řezné kapaliny se rozdělují na vodní roztoky, emulzní kapaliny, mastné oleje, zušlechtěné řezné oleje, rostlinné oleje (ekologicky nezávadné) a syntetické kapaliny.

4.2.1. Druhy řezných kapalin

Vodní roztoky

Vodní roztoky jsou nejjednodušší a tím i nejlevnější řezné kapaliny, neposkytují ale žádné další výhody. Voda, která je jejich základem, vyžaduje řadu úprav - změkčování a přidávání přísad proti korozi (kalcinová soda trinitriumfosfát, triethanolamin), pro zlepšení smáčivosti a proti pěnovosti. Vodní roztok musí být vždy alkalický. U těchto kapalin vzniká nebezpečí rozmnožování anaerobních bakterií, které způsobují tvorbu kalů a nepříjemný zápach. Vodní roztoky mají velmi dobrý chladicí a čistící účinek, ale téměř žádný mazací účinek.

Emulzní kapaliny

Emulzní kapaliny tvoří disperzní soustavu dvou vzájemně nerozpustných kapalin, z nichž jedna tvoří mikroskopické kapky, rozptýlené v kapalině druhé (olej ve vodě). Aby to bylo umožněno, je třeba do této soustavy přidat ještě třetí složku, tzv. emulgátor, který zmenšuje mezipovrchové napětí emulgovaných kapalin, stabilizuje emulzi a zabraňuje koagulaci jemně rozptýlených částic oleje ve vodě. Funkce emulgátoru je podmíněna tím, že některé jeho částice mají na jednom konci silný elektrický náboj, zatímco druhý, neutrální konec je rozpustný v oleji. Záporný náboj polární části molekuly způsobuje, že olejové částice jsou elektrostatickou silou vzájemně odpuzovány, což brání jejich spojování.

Emulzní kapaliny spojují do určité míry přednosti vody a mazacích olejů. Chladicí účinek emulzní kapaliny závisí na koncentraci emulze, s jejím nárůstem klesá. Schopnost ochrany proti korozi závisí na tom, jaké hodnoty pH emulze dosahuje (pro slitiny na bázi železa postačuje hodnota $\text{pH} = 8\div 9$), ale v daleko menší míře než u vodných roztoků. Emulzní kapaliny jsou nejčastěji používanými řeznými kapalinami, tvoří asi 80 % jejich celkového objemu.

Zušlechtěné řezné oleje

Jsou to kapaliny na bázi minerálních olejů. Přísady, které se používají (mastné látky, organické sloučeniny a pevná maziva), zvyšují jejich tlakovou únosnost a mazací vlastnosti.

Mastné látky jsou zmýdelnitelné mastné oleje, mastné kapaliny nebo syntetické estery. Tyto přísady zvětšují přilnavost oleje ke kovu a zlepšují jeho mazací schopnosti, ne však za extrémních tlaků.

Organické sloučeniny jsou vytvořeny na bázi síry, chloru, nebo fosforu. Všechny tyto látky se osvědčily jako vysokotlaké přísady. Na povrchu předmětů vytvářejí vrstvičku kovových mýdel, která zabraňují svařování a usnadňují kluzný pohyb troucích se ploch. Sloučeniny s chlorem zmenšují tření, ale jejich účinnost klesá při teplotách nad 400°C. Sloučeniny s fosforem mají vyšší účinek a jako neúčinnější se projevily kombinace sloučenin síry, chloru a fosforu.

Pevná maziva, která se používají jako přísady do řezných olejů, působí při řezání navíc mechanickým účinkem. Svou afinitou ke kovu vytvářejí mezní vrstvu, odolnou proti tlakům a zlepšují mazací schopnosti oleje. Mezi pevná maziva patří grafit a sirník molybdenu. Jejich nevýhodou je, že se v kapalinách nerozpouští a musí se proto udržovat v rozptýleném stavu.

Syntetické a polosyntetické kapaliny

Tento druh řezných kapalin se vyznačuje velkou provozní stálostí. Většinou jsou rozpustné ve vodě a mají dobré chladicí, mazací a ochranné účinky.

Syntetické řezné kapaliny neobsahují minerální oleje, ale jsou složeny z rozpouštědel - glykolů, které ve vodě emulgují, nebo se rozpustí. Glykoly jsou průsvitné, takže umožňují sledovat průběh obráběcího procesu.

Aplikace syntetických řezných kapalin má proti kapalinám na bázi oleje ekonomické výhody a navíc zajišťuje rychlé odvádění tepla, dobrý čisticí účinek a jednoduchou přípravu. V syntetických řezných kapalinách je možné rovněž rozptýlit oleje, čímž vznikají polosyntetické řezné kapaliny, které mají příznivější mazací schopnosti. V polosyntetických kapalinách jsou olejové částice mnohem menší než v emulzích.

4.2.2. Přívod řezné kapaliny do místa řezu

Způsob přívodu řezné kapaliny do zóny řezání významně ovlivňuje parametry řezného procesu, zejména trvanlivost bříty nástroje a jakost obrobenej plochy.

Standardní chlazení

Tento způsob přívodu řezné kapaliny nevyžaduje žádnou úpravu přívodního potrubí a vystačí se standardním zařízením, dodávaným výrobcem obráběcího stroje. Toto zařízení je tvořeno nádrží na řeznou kapalinu, čerpadlem a rozvodovým potrubím. Množství dodávané řezné kapaliny je dáno typem čerpadla a škrcením průtoku výstupním kohoutem.

Tlakové chlazení

Při tlakovém chlazení je řezná kapalina přiváděna do místa řezu pod vysokým tlakem. Průměr výstupní trysky bývá 0,3÷1,0 mm, tlak 0,3÷3,0 MPa. Řezná kapalina je přiváděna na břit nástroje zespodu, přímo do místa řezu. Tento způsob chlazení je vhodný tam, kde vzniklé teplo má prokazatelný nepříznivý vliv na trvanlivost nástroje.

Množství přiváděné kapaliny se pohybuje v rozmezí 0,5÷2,0 litrů za minutu. Jedním z nedostatků tohoto způsobu je, že se řezná kapalina rozstříkuje a tvoří mlhu a proto je třeba pracovní prostor stroje uzavřít, aby se zabránilo znečišťování pracovního prostředí.

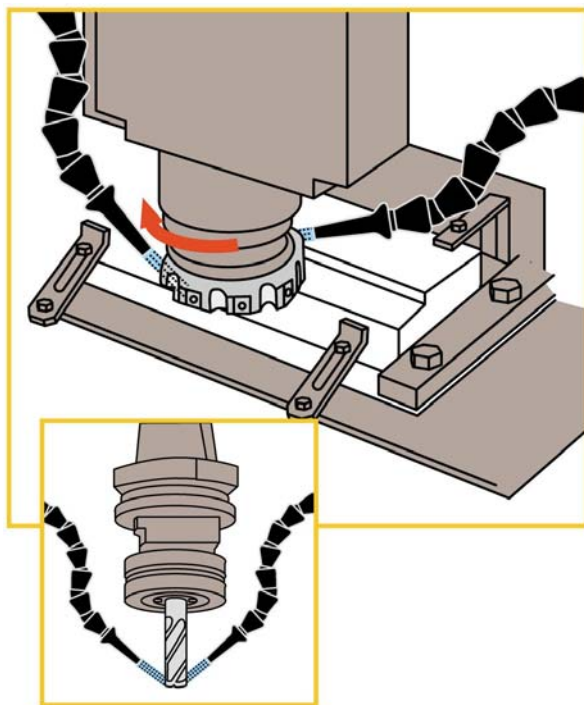
Podchlazování řezné kapaliny

Podchlazování řezné kapaliny na teplotu nižší než je teplota okolí přispívá ke zvýšení trvanlivosti nástrojů. Běžné druhy řezných kapalin mohou být při zachování mazacích

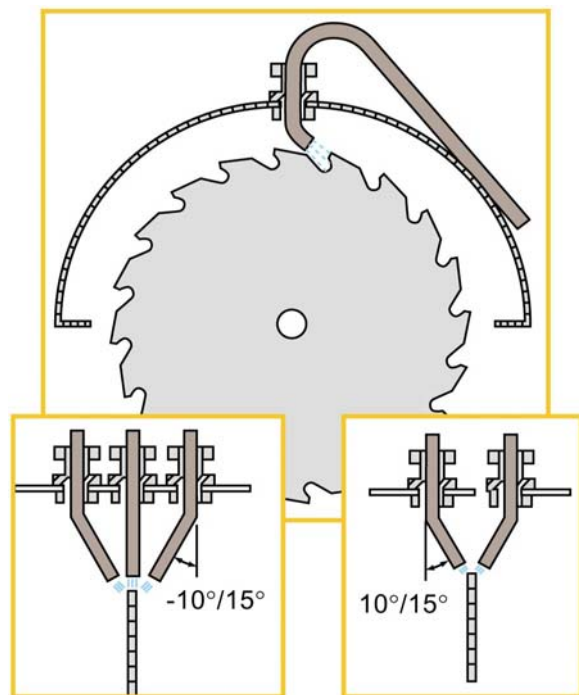
vlastností podchlazeny na $5\div 7\text{ }^{\circ}\text{C}$, oleje potom na $15\div 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Podchlazení na nižší teploty je omezeno stálostí řezné kapaliny u emulzí a houstnutím u řezných olejů. Snížení teploty řezné kapaliny pod bod mrazu může přinést další zvýšení výkonu obrábění, je však nutné použít řeznou kapalinu speciálního složení.

Chlazení řeznou mlhou

Řezná kapalina je v tomto případě rozptýlena tlakem vzduchu vytékajícího z trysky rychlostí až 300 m s^{-1} a nasměrována přímo na řeznou část nástroje, před jeho najetím do řezu (obr.4.1, 4.2). Velmi dobrého odvodu tepla z místa řezu se dosáhne tím, že rozpínající se vzduch obsahuje částičky řezné kapaliny a má tak větší schopnost přejímat vzniklé teplo.



Obr.4.1 Chlazení mlhou - frézování

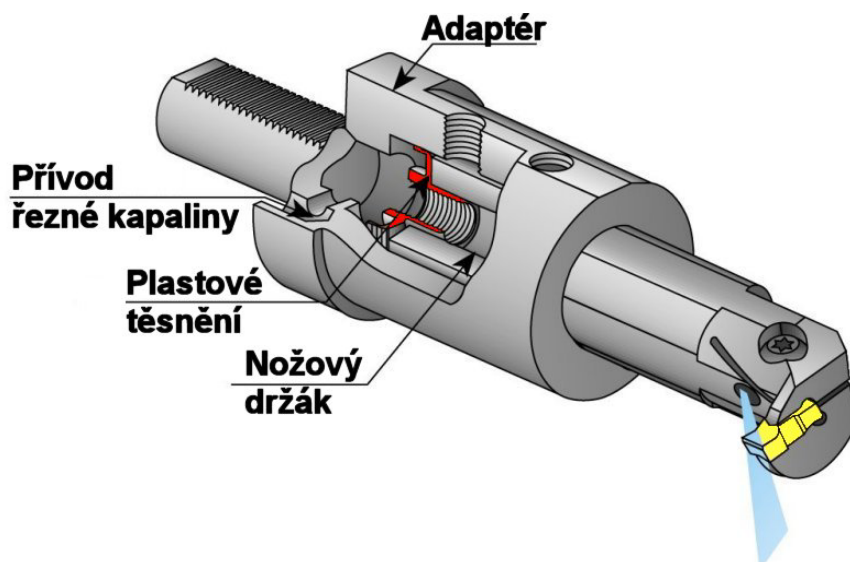


Obr.4.2 Chlazení mlhou - dělení materiálu

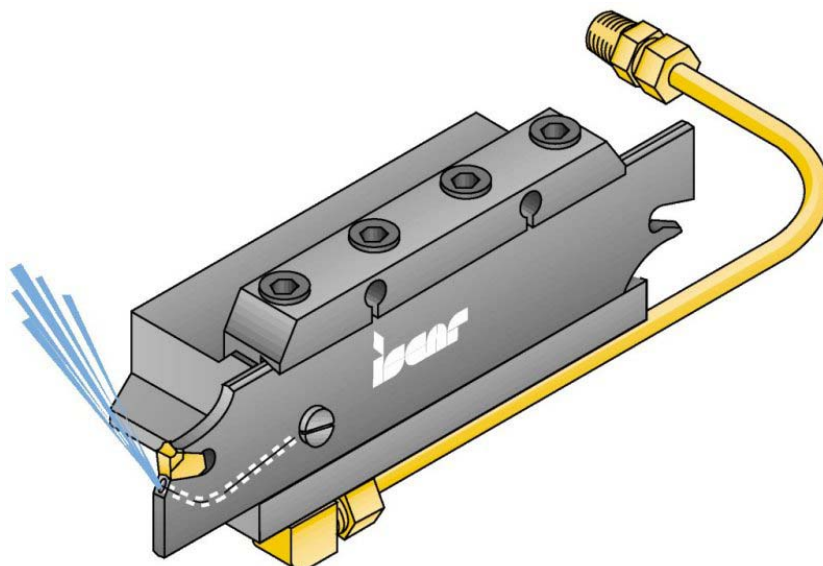
Vnitřní chlazení

Vnitřní chlazení přináší výrazné zvýšení výkonu obrábění, umožňuje zvýšení řezné rychlosti o 5 až 15 %. Při soustružení je tato metoda vhodná pro nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutých karbidů (obr.4.3 až 4.6).

U vrtáků je vnitřní chlazení upraveno tak, že řezná kapalina je přiváděna centrálními otvory v tělese nástroje až do místa řezu (obr.4.6). Mimo vrtáků s vyměnitelnými břitovými destičkami je vnitřní chlazení používáno i u klasických šroubových vrtáků vyrobených z monolitních SK i rychlořezné oceli. Tohoto způsobu chlazení se též využívá při vrtání hlubokých děr a vrtání těžkoobrobitelných materiálů. Zvýšení tlaku řezné kapaliny, přiváděné do místa řezu, vede ke zvýšení výkonu obrábění a případně k lepšímu odvodu třísek.



Obr.4.3 Vnitřní nůž firmy Iscar s vnitřním chlazením



Obr.4.4 Zapichovací nůž firmy Iscar s vnitřním chlazením



Obr.4.5 Fréza firmy Stellram s vnitřním chlazením



Obr.4.6 Vrták firmy Sandvik - Coromant s vnitřním chlazením

4.3. PLYNNÉ ŘEZNÉ PROSTŘEDÍ

Plynné látky se jako řezná média běžně nepoužívají, protože mají relativně nízký chladicí účinek, problematický čistící účinek a žádný mazací účinek. Některé obráběné materiály, případně nástrojové materiály se však chladí vzduchem, přiváděným pod tlakem do místa řezu. U prvních slinutých karbidů a řezných keramik bylo povoleno výhradně chlazení vzduchem, až na základě pozdějšího rozvoje technologie výroby umožnil výrobcům nástrojů doporučovat pro tyto materiály i použití řezných kapalin.

Jedním z účinných způsobů chlazení plynem je chlazení stlačeným CO₂ (tenký paprsek plynu se do místa řezu přivádí pod tlakem 0,5÷7,0 MPa), doporučováno např. pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Tato metoda má řadu nevýhod, k nimž patří především vysoké náklady na CO₂, jisté nebezpečí při jeho používání a nutnost dokonalého odsávání a větrání pracoviště.

Zvláštním případem aplikace plynného řezného prostředí je tzv. suché obrábění, kdy řezným prostředím je atmosférický vzduch. Rozšiřování tohoto způsobu obrábění souvisí s vývojem nových řezných materiálů, které nevyžadují chlazení a přesto jsou schopny výkonně a efektivně obrábět.

5. PRODUKTIVITA A HOSPODÁRNOST OBRÁBĚNÍ

5.1. OPOTŘEBENÍ BŘITU NÁSTROJE

5.1.1. Fyzikální podstata opotřebení

Opotřebení je běžným důsledkem funkce všech strojních součástí, které jsou ve vzájemném kontaktu a relativním pohybu. Při obrábění dochází v důsledku řezného procesu k relativnímu pohybu nástroj-obrobek a nástroj-tříška, i ke kontaktu nástroje s obrobkem (na hlavním a vedlejším hřbetě a špičce nástroje) a odcházející třískou (na čele nástroje), což musí nutně vést k opotřebení nástroje. Protože podmínky práce řezného nástroje se zásadně liší od podmínek práce běžných strojních součástí (tab.5.1), je třeba i k procesu opotřebení nástroje přistupovat z odlišných pozic.

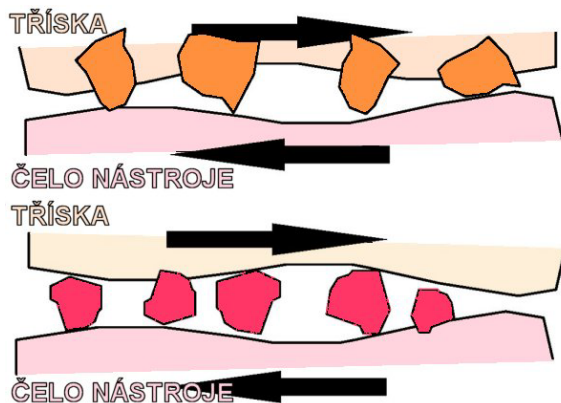
Tab.5.1 Pracovní podmínky řezného nástroje

Pracovní podmínky	Strojní součást	Břit nástroje
Měrný tlak (řádově) [MPa]	10^2	$10^3 \div 10^4$
Teplota na funkčním povrchu [°C]	60 ÷ 100	300 ÷ 1200
Teplotní gradient na čele nástroje [°C cm ⁻¹]		10^5
Rychlost ohřevu [°C s ⁻¹]		$10^6 \div 10^9$
Deformační rychlost [s ⁻¹]		$10^3 \div 10^6$
Doba kontaktu mezi nástrojem a třískou [s]		10^{-3}
Otěr [mm] při dráze $10^3 \div 10^4$ m	$10^{-3} \div 10^{-4}$	$10^{-2} \div 10^{-1}$

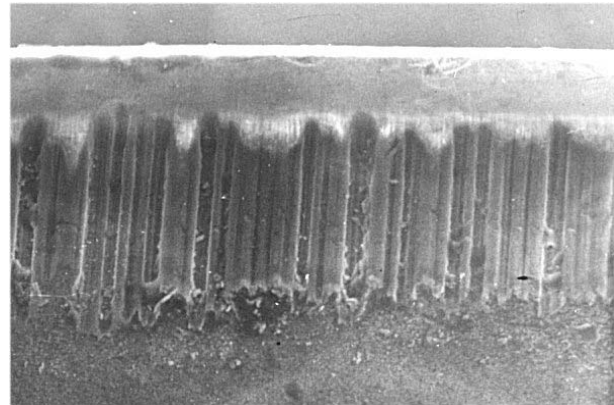
Proces opotřebení nástroje je velmi složitý děj, který závisí na mnoha faktorech (fyzikální a zejména mechanické vlastnosti obráběného a nástrojového materiálu, druh obráběcí operace, geometrie nástroje, pracovní podmínky, řezné prostředí, atd.) a v jehož průběhu pů-

sobí mnoho odlišných fyzikálně-chemických jevů (mechanizmů opotřebení). K základním mechanizmům opotřebení patří zejména:

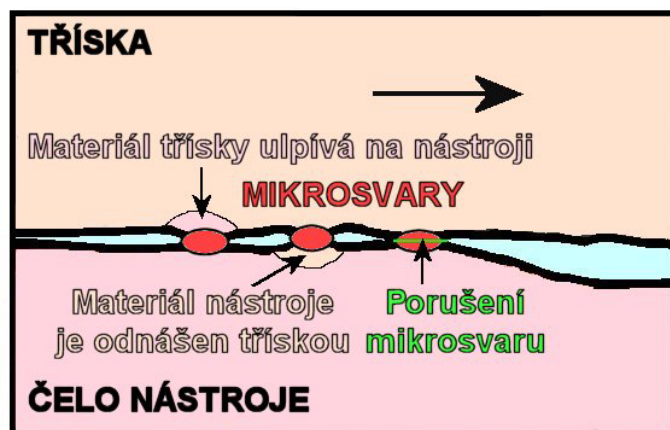
- **abraze** (brusný ořez vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu i mikročástic uvolněných z nástroje) - obr. 5.1, 5.2,
- **adheze** (vznik a okamžité následné porušování mikrosvarových spojů na stýkajících se vrcholcích nerovností čela a třísky, v důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých styčných povrchů) - obr.5.3, 5.4,
- **difúze** (migrace atomů z obráběného do nástrojového materiálu a naopak, a z ní vyplývající vytváření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje),
- **oxidace** (vznik chemických sloučenin na povrchu nástroje v důsledku přítomnosti kyslíku v okolním prostředí),
- **plastická deformace** (obr.5.5, 5.6, důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení, kumulovaného v čase), která se může ve svém nejnepríznivějším důsledku projevit ve formě tzv. lavinového opotřebení,
- **křehký lom** (důsledek vysokého mechanického zatížení, např. přerušovaný řez, nehomogenity a vměstky v obráběném materiálu, atd.) - obr.5.7, 5.8.



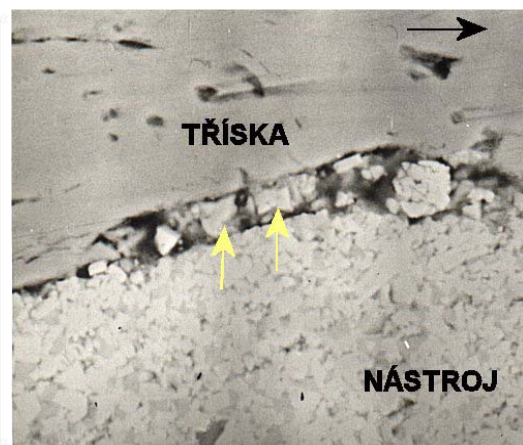
Obr.5.1 Schéma abraze



Obr.5.2 Abrazně opotřebený hřbet nástroje z řezné keramiky



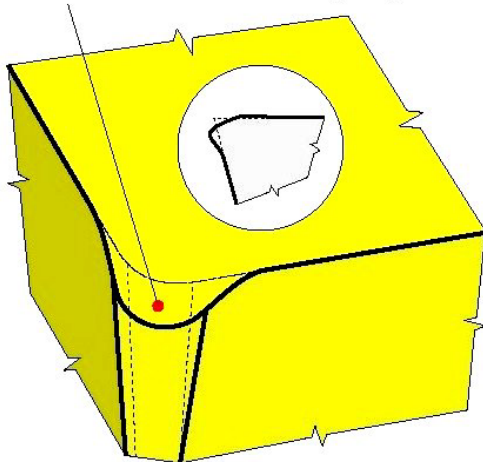
Obr.5.3 Schéma adheze



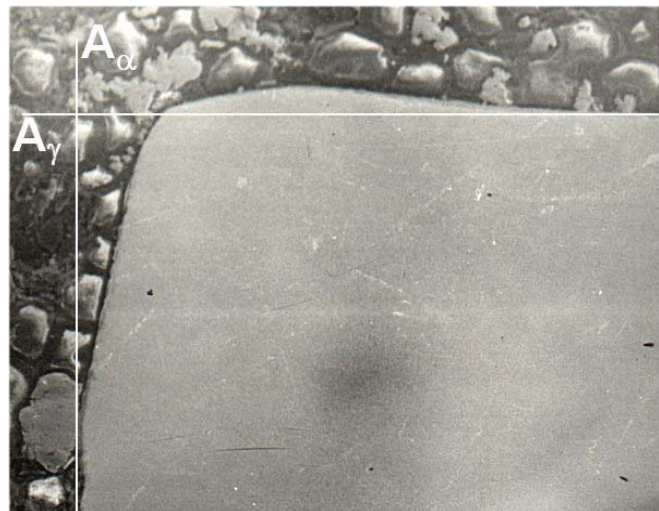
Obr.5.4 Adheze u nástroje ze slinutého karbidu

Abraze a adheze jsou též obvykle označovány jako fyzikální mechanismy opotřebení, difúze a oxidace jako chemické, všechny čtyři působí v průběhu času plynule, s tím, že časový okamžik začátku jejich působení nemusí být vždy shodný. Plastická deformace a křehký lom jsou naproti tomu mechanismy, které působí náhle, v daném okamžiku a obvykle způsobí okamžité ukončení činnosti nástroje (náhlá změna tvaru břitu nástroje, lavinové opotřebení nebo ulomení špičky). Hřbet nástroje se opotřebovává především v důsledku abraze a oxidace, čelo v důsledku adheze, difúze, abraze a oxidace. Na skutečnost, zda se nástroj bude více opotřebovávat na hřbetě nebo na čele (příp. na špičce), mají výrazný vliv i další faktory, jako je např. geometrie nástroje, druh operace (hrubování, dokončování) a v neposlední řadě i řezné podmínky (řezná rychlost, posuv, hloubka řezu a chlazení).

Plastická deformace špičky

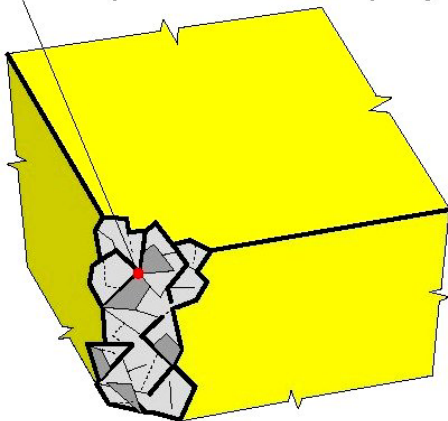


Obr.5.5 Plastické porušení - schéma

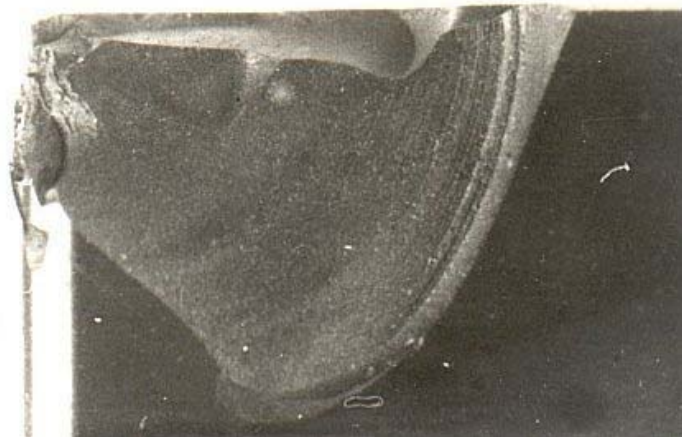


Obr.5.6 Plastické porušení čela nástroje z povlakovaného slinutého karbidu

Křehké porušení v oblasti špičky



Obr.5.7 Křehký lom - schéma



Obr.5.8 Křehký lom nástroje z řezné keramiky $Al_2O_3 + TiC$

Mimo výše uvedených základních mechanismů uvádí odborná literatura i tyto další mechanismy opotřebení:

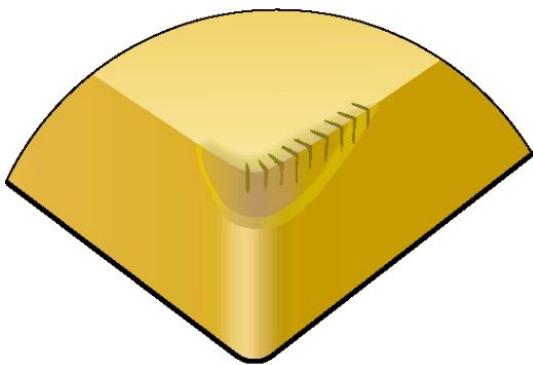
- mechanická únava,
- tepelná únava (projevuje se většinou vytvářením hřebenovitých trhlin, kolmých na ostří, a to na čele i hřbetě nástroje - obr.5.9, 5.10,

- delaminační opotřebení (odlupování tenkých vrstev z povrchu nástroje - častý jev zejména u povlakovaných SK),
- termoelektrické opotřebení (odstraňování elektricky vodivého materiálu z funkčních povrchů nástroje),
- rozpouštění nástrojového materiálu (v jednotlivých bodech na povrchu nástroje),
- elektrochemické opotřebení (výměna iontů mezi materiálem nástroje a obrobku).

Schopnost břítu odolávat abrazivnímu otěru je z větší části závislá na jeho tvrdosti. Řezný materiál, který obsahuje hustou strukturu tvrdých částic, bude abrazivnímu otěru odolávat dobře, avšak nemusí stejně dobře odolávat také jiným mechanismům opotřebení.

Adhezní otěr se vyskytuje hlavně při nízkých teplotách obrábění na čele břítu nástroje. Je významný při nižších řezných rychlostech, kdy vzniká bodový styk mezi třískou a nástrojem a kdy je umožněno adhezní spojení obou materiálů.

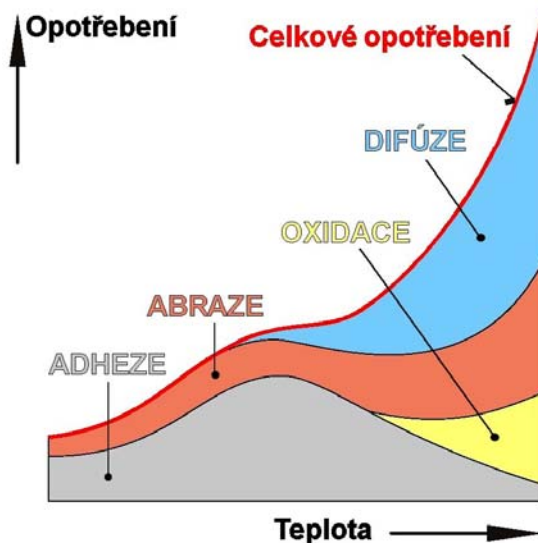
Teplota řezání, chemické vlastnosti nástrojového materiálu a jeho afinita vůči materiálu obrobku jsou rozhodujícími činiteli pro vznik a průběh difúzního opotřebení. Na tomto procesu má tvrdost materiálu jen relativně malý podíl. O podílu difúzního opotřebení na celkovém opotřebení rozhoduje chemické složení řezného nástrojového materiálu a materiálu obrobku.



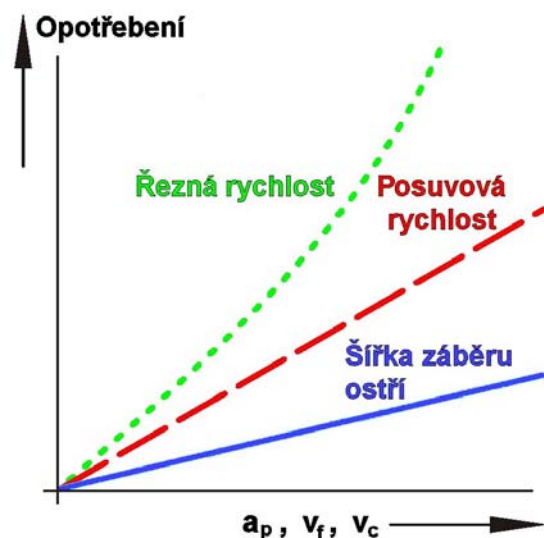
Obr.5.9 Hřebenovité trhliny - schéma



Obr.5.10 Hřebenovité trhliny na čele nástroje z řezné keramiky Al_2O_3



Obr.5.11 Vliv teploty na jednotlivé mechanismy opotřebení

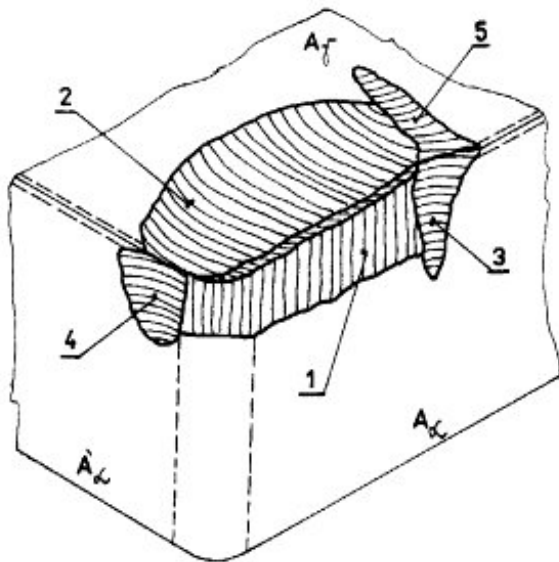


Obr.5.12 Vliv řezných podmínek na opotřebení

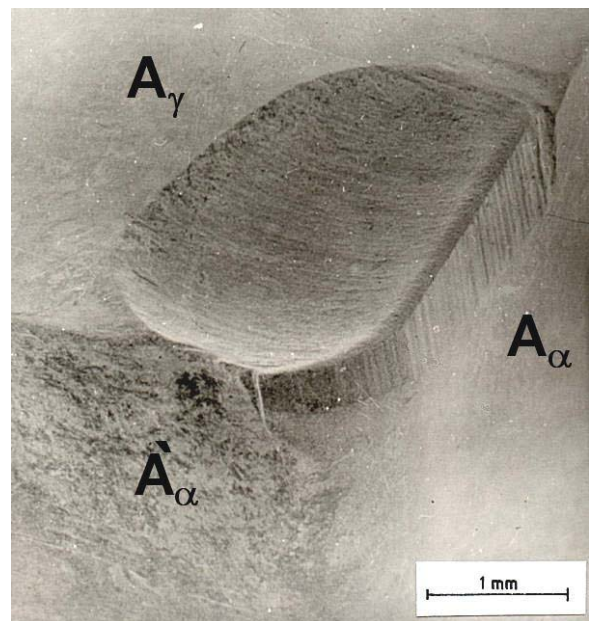
Plynule působící základní mechanizmy opotřebení mají různý podíl na celkovém opotřebení a tento podíl se mění s narůstající teplotou (obr.5.11). Z řezných podmínek má na intenzitu celkového opotřebení největší vliv řezná rychlost v_c , menší vliv vykazuje posuvová rychlost v_f a nejmenší šířka záběru ostří a_p (obr.5.12).

5.1.2. Formy opotřebení

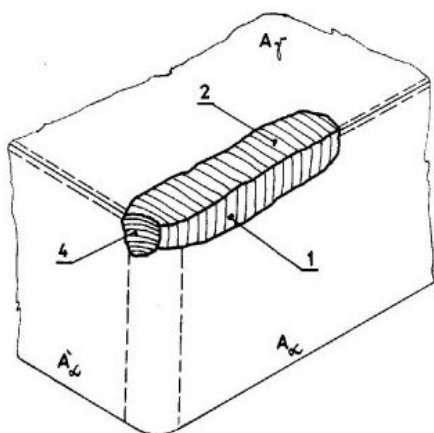
Vzhled břitu nástroje ze slinutého karbidu, se všemi typickými formami opotřebení, je uveden na obrázku číslo 5.13, vzhled břitu nástroje z řezné keramiky na obrázku číslo 5.15. Jednotlivé formy opotřebení jsou na obou obrázcích označeny následovně: 1 - fazetka opotřebení na hřbetě, 2 - výmol na čele, 3 - primární hřbetní rýha, 4 - sekundární (oxidační) hřbetní rýha, 5 - rýha na čele. Na obrázcích 5.14 a 5.16 jsou dokumentovány opotřebované plochy nástroje ze slinutého karbidu resp. řezné keramiky.



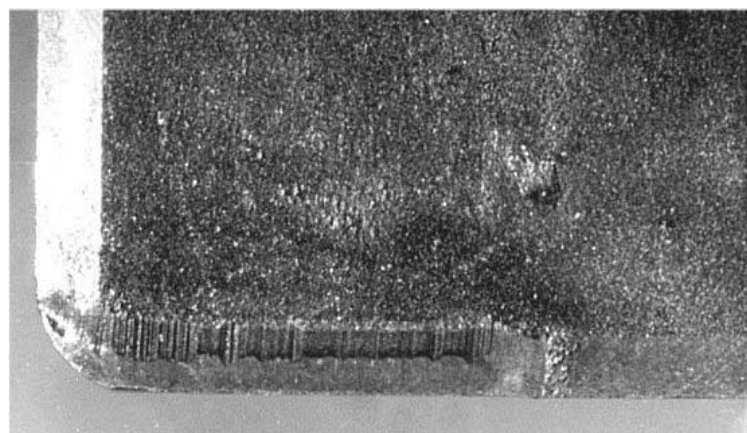
Obr.5.13 Formy opotřebení břitu nástroje z SK



Obr.5.14 Opotřebovaný břit nástroje z SK

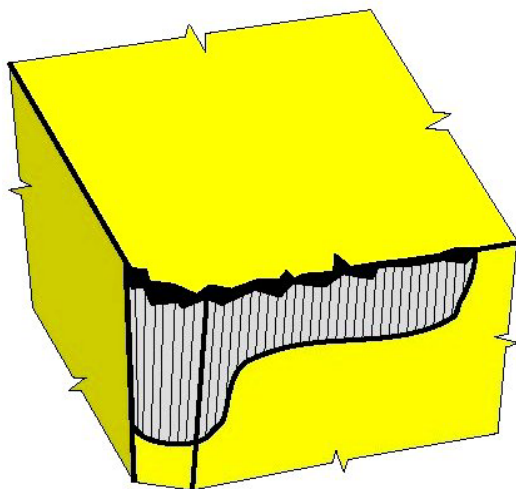


Obr.5.15 Formy opotřebení břitu nástroje z ŘK

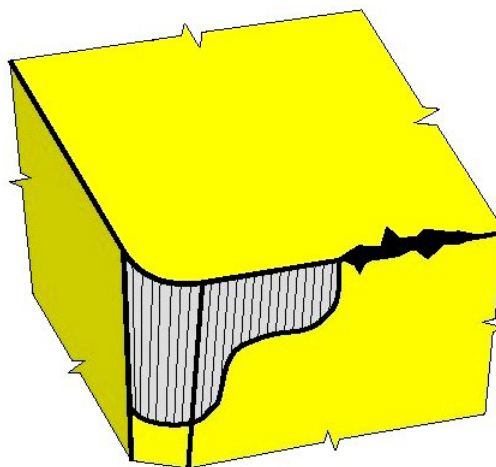


Obr.5.16 Břítová destička z ŘK opotřebovaná na čele

Některé další formy opotřebení, které se mohou vyskytovat na břitu nástroje, jsou uvedeny na obrázcích č.5.17 (vylomení břitu v místě záběru) a 5.18 (vylomení břitu mimo záběr).



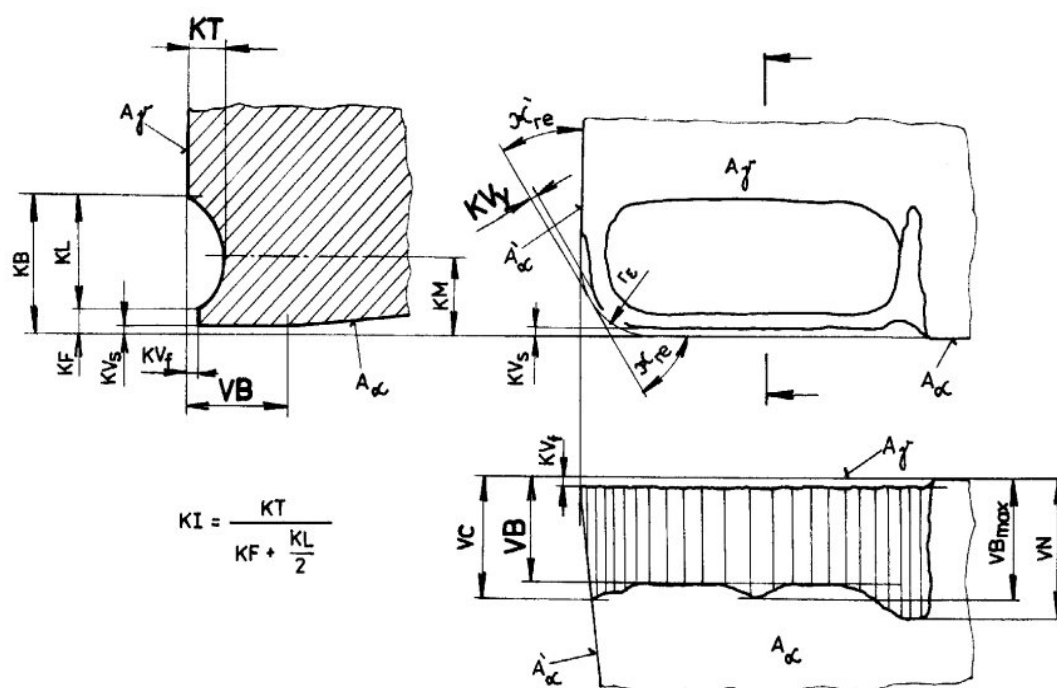
Obr.5.17 Vylomení v místě záběru



Obr.5.18 Vylomení mimo záběr

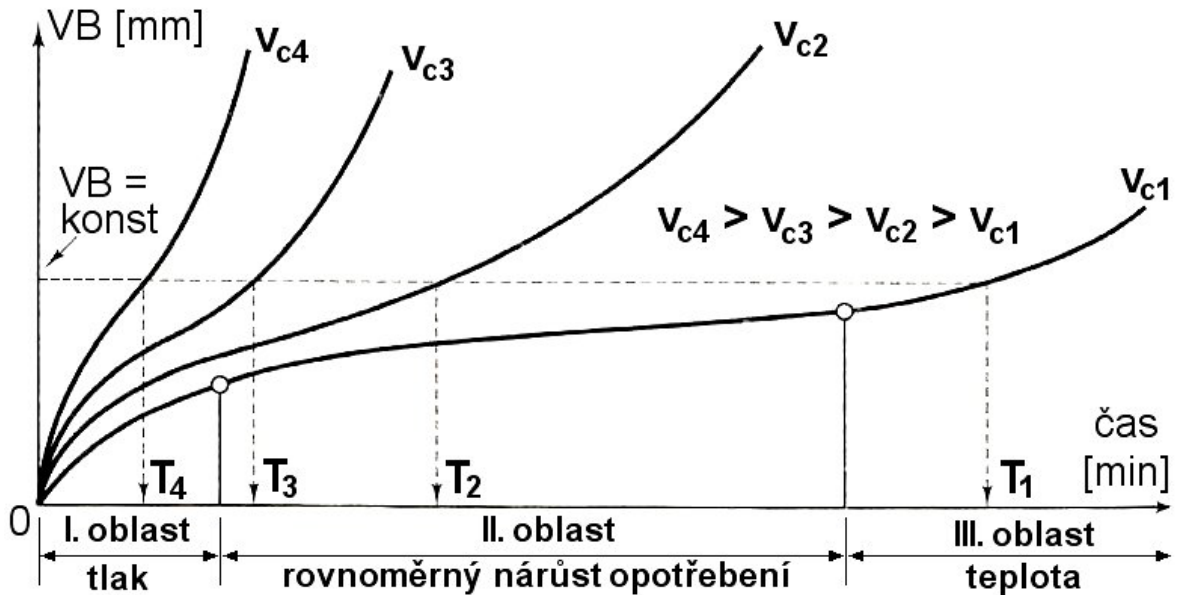
5.1.3. Kritéria opotřebení

Kritéria, kterými je opotřebení kvantifikováno, jsou uvedena na obrázku č.5.19 (nejčastěji užívaná kritéria, **VB** - šířka fazetky opotřebení na hřbetě, **KT** - hloubka výmolu na čele, **KV_y** - radiální opotřebení špičky, jsou zvýrazněna většími písmeny). Kritérium **KV_y** je významné zejména u dokončovacích operací, protože způsobuje změnu rozměru obrobek plochy. Označování jednotlivých kritérií odpovídá místním zvyklostem, které se poněkud liší od normy ČSN ISO 3685, která označuje kritéria opotřebení na hřbetě **VB_C** (**VC** na obrázku č.5.19), **VB_B** (**VB**), **VB_{B max}** (**VB_{max}**) a **VB_N** (**VN**).



Obr.5.19 Kritéria opotřebení řezného nástroje

Doporučené hodnoty kritéria **VB** leží v rozsahu $0,2 \div 0,8$ mm, jeho charakteristický časový průběh je uveden na obrázku č.5.20 (křivka pro nejmenší řeznou rychlost v_{c1}). Poměrně rychlý nárůst hodnoty **VB** v oblasti I je způsoben velkým měrným tlakem, který působí na styku hlavního hřbetu nástroje s přechodovou plochou obrobku v důsledku velmi malé stykové plochy. V oblasti II hodnota **VB** rovnoměrně narůstá v důsledku působení základních mechanismů opotřebení, nakumulované tepelné zatížení nástroje znamená výrazné zvýšení intenzity opotřebení v oblasti III.



Obr.5.20 Časová závislost opotřebení pro různé řezné rychlosti

Časový průběh hloubky výmolu na čele (**KT**) má charakter exponenciální křivky, doporučené hodnoty leží v rozsahu $0,2 \div 0,3$ mm, limitní hodnota se např. pro soustružení počítá v praxi podle vztahu:

$$KT = 0,06 + 0,3f \quad [\text{mm}], \quad (5.1)$$

kde: f [mm] - hodnota posuvu na otáčku.

Dalším praktickým kritériem opotřebení, které při hospodárných řezných podmínkách může rozhodovat o trvanlivosti bříty mnohem častěji než např. kritérium **VB**, je prolomení výmolu na čele (2) do vedlejšího ostří v oblasti sekundární hřbetní rýhy (4) - obr.5.13. Toto kritérium bude rozhodující zejména z hlediska posuzování struktury obrobeného povrchu, protože znamená výrazné zhoršení parametrů drsnosti.

5.2. TRVANLIVOST A ŽIVOTNOST NÁSTROJE

Trvanlivost řezného nástroje lze definovat jako součet všech čistých časů řezání, od začátku obrábění, až po opotřebení bříty nástroje na předem stanovenou hodnotu vybraného kritéria (kritérium opotřebení a jeho hodnota musí být stanoveny tak, aby vyráběný obrobek měl požadovaný tvar, rozměry a kvalitu povrchu a to po celou dobu trvanlivosti nástroje). **Životnost** nástroje je pak definována jako součet všech jeho trvanlivostí, nebo též jako celková doba funkce nástroje od prvního uvedení do činnosti až do jeho vyřazení (nástroje, které

lze ostřit jsou vyraženy v případě, že byla odbroušena celá jejich funkční část, vyměnitelné břitové destičky v případě, že byly použity všechny jejich břity). Z tohoto hlediska lze tedy životnost přebrušovaného nástroje vyjádřit vztahem:

$$Z = \sum_{i=1}^{x+1} T_i = (x+1) \cdot T \quad [\text{min}], \quad (5.2)$$

kde: T_i [min] - jednotlivé trvanlivosti,
 T [min] - aritmetický průměr hodnot T_i ,
 x [-] - počet možných ostření nástroje.

Pro nástroj s mechanicky upínanými vyměnitelnými břitovými destičkami se životnost stanoví podle vztahu:

$$Z = \sum_{i=1}^q T_i = q \cdot T \quad [\text{min}], \quad (5.3)$$

kde: T_i [min] - trvanlivosti jednotlivých ostří destičky,
 T [min] - aritmetický průměr hodnot T_i ,
 q [-] - počet použitelných ostří destičky.

(Pozn.: Anglosaská literatura obvykle nerozlišuje "trvanlivost" a "životnost", např. v angličtině existuje pro oba pojmy společný výraz "tool life" a proto je třeba dávat pozor při jeho překladu do češtiny).



Trvanlivost nástroje, podobně jako opotřebení nástroje, závisí zejména na metodě obrábění (soustružení, frézování, vrtání, atd.), vlastnostech obráběného a nástrojového materiálu a řezných podmínkách (řezná a posuvová rychlost, šířka záběru ostří, řezné prostředí). Již počátkem XX. století zjistil Frederick Winslow Taylor (obr.5.21), že z řezných podmínek má na trvanlivost nástroje největší vliv právě řezná rychlost a odvodil základní vztah pro vzájemnou závislost těchto dvou veličin, na němž jsou založeny dnešní normy ČSN ISO 3685, i ČSN ISO 8688-1 a ČSN ISO 8688-2 a který je u nás znám pod názvem "T- v_c závislost" (někdy též "Taylorův vztah") a užívá se ve tvaru:

Obr.5.21 F.W. Taylor

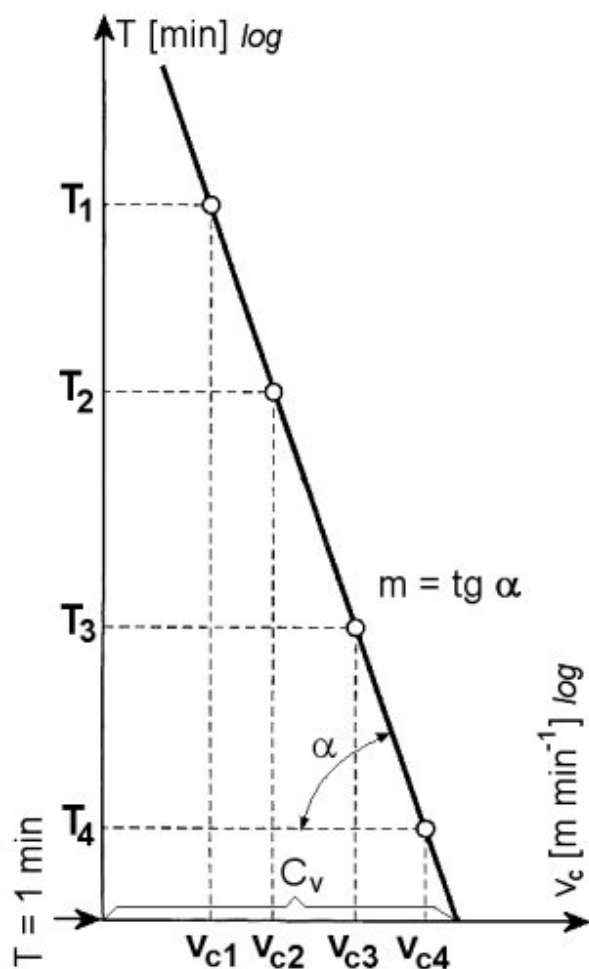
$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \quad [\text{min}], \quad (5.4)$$

kde: C_T [-] - konstanta,
 v_c [m min⁻¹] - řezná rychlost,
 m [-] - exponent,

nebo vzhledem k velmi vysoké a nepraktické hodnotě konstanty C_T (řádově 10⁹÷10¹³) častěji ve tvaru

$$v_c = \frac{C_v}{T^{1/m}} \quad [\text{m min}^{-1}], \quad (5.5)$$

kde: C_v [-] - konstanta (protože $C_v = C_T^{1/m}$, je řádová velikost konstanty C_v pouze 10²÷10³).



Obr.5.22 $T-v_c$ závislost

Postup při stanovování základní $T-v_c$ závislosti pro konkrétní kombinaci řezný nástroj - obráběný materiál vychází z definice trvanlivosti. Za ostatních konstantních řezných podmínek (např. pro soustružení: šířka záběru ostří $a_p = \text{konst}$, posuv na otáčku $f = \text{konst}$, způsob chlazení) je daný materiál obráběn daným nástrojem minimálně při čtyřech různých řezných rychlostech, přičemž se sleduje časový nárůst opotřebení nástroje (např. VB), který se vynáší do závislosti $VB=f(\text{čas})$ - obr.5.20. Aby bylo dosaženo rovnoměrné rozložení jednotlivých bodů pro konstrukci $T-v_c$ závislosti, volí se řezné rychlosti podle řady R20 (1,00 - 1,12 - 1,25 - 1,40 - 1,60 - 1,80 - 2,00 - 2,24 - 2,50 - 2,80 - 3,15 - 3,55 - 4,00 - 4,50 - 5,00 - 5,60 - 6,30 - 7,10 - 8,00 - 9,00 - 10,00; tuto řadu předepisuje norma ČSN ISO 3685 pro nástroj ze slinutého karbidu), pokud je zapotřebí vyšší rozsah změny řezné rychlosti, podle řady R10 (1,00 - 1,25 - 1,60 - 2,00 - 2,50 - 3,15 - 4,00 - 5,00 - 6,30 - 8,00 - 10,00; tuto řadu předepisuje norma ISO 3685 pro keramický řezný nástroj). U nástroje z rychlořezné oceli předepisuje norma ISO 3685 pro volbu řezných rychlostí řadu R40. Při

nejvyšší řezné rychlosti nemá trvanlivost klesnout pod hodnotu $T=5$ minut (pro obrábění drahých materiálů se přípouští nižší trvanlivost, ne však pod hodnotou $T=2$ minuty).

Pro předem stanovenou hodnotu vybraného kritéria (např. $VB = \text{konst} = 0,3$ mm) jsou z časových křivek VB odečteny hodnoty trvanlivosti T_1 , T_2 , T_3 a T_4 které odpovídají zvoleným řezným rychlostem v_{c1} , v_{c2} , v_{c3} a v_{c4} . Body o souřadnicích $v_{c1}-T_1$, $v_{c2}-T_2$, $v_{c3}-T_3$ a $v_{c4}-T_4$ jsou pak vyneseny do diagramu s logaritmickými souřadnicemi T a v_c , kde vytvoří přímku, která odpovídá zvolené hodnotě VB (obr.5.22). Matematicky je získaná $T-v_c$ závislost popsána základními vztahy (5.4) a (5.5), hodnotu konstanty C_T lze odečíst na ose T pro řeznou rychlost $v_c = 1 \text{ m min}^{-1}$, hodnotu konstanty C_v na ose v_c pro trvanlivost $T = 1 \text{ min}$, exponent m vyjadřuje směrnici vytvořené přímky, $m = \text{tg } \alpha$. Nevýhodou uvedených základních vztahů $T-v_c$ závislosti je omezení následujícími podmínkami:

- šířka záběru ostří $a_p = \text{konst}$,
- posuv na otáčku $f = \text{konst}$,
- opotřebení $VB = \text{konst}$.

V praxi jsou proto často používány rozšířené vztahy pro $T-v_c$ závislost ve tvaru (např. pro soustružení):

$$v_{cT} = \frac{C_{vT}}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \text{ [m min}^{-1}\text{]}, \quad (5.6)$$

kde: v_{cT} [m min^{-1}] - řezná rychlost při konstantní trvanlivosti T , např. v_{c15} znamená řeznou rychlost při trvanlivosti $T=15$ minut

C_{vT} [-] je konstanta,

x_v [-] je exponent, vyjadřující vliv hloubky řezu,

y_v [-] je exponent, vyjadřující vliv posuvu na otáčku,

nebo ve tvaru:

$$v_c = \frac{C_{v1}}{T^{1/m} \cdot a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \text{ [m min}^{-1}\text{]}, \quad (5.7)$$

kde: C_{v1} [-] - konstanta (pozn.: konstanty C_{v1} , C_{vT} a C_v mají rozdílné číselné hodnoty dokonce i pro stejnou kombinaci nástroj - obrobek!).

Výhodou vztahů (5.7) a (5.8) je menší počet omezujících podmínek ($T=\text{konst}$, $VB=\text{konst}$) resp. ($VB=\text{konst}$), nevýhodou mnohem větší rozsah zkoušek, potřebných pro jejich konkrétní stanovení, ve srovnání se zkouškami nutnými pro určení vztahů (5.4) a (5.5).

5.3. OPERAČNÍ VÝROBNÍ NÁKLADY

Operační výrobní náklady na obrobení jednoho kusu konkrétní součásti (vztažené k obráběcímu stroji a řeznému nástroji) se za předpokladu, kdy se obrábí jedna plocha jedním nástrojem, vyjádří pomocí vztahu:

$$N_c = N_s + N_v + N_n \text{ [Kč]}, \quad (5.8)$$

kde: N_s [Kč] - náklady na strojní práci,

N_v [Kč] - náklady na vedlejší práci,

N_n [Kč] - náklady na nástroj a jeho výměnu.

Náklady na strojní práci souvisí s jednotkovým strojním časem, potřebným pro obrobení jednoho kusu obrobku:

$$N_s = t_{AS} \cdot N_{sm} \text{ [Kč]}, \quad (5.9)$$

kde: t_{AS} [min] - jednotkový strojní čas,

N_{sm} [Kč] - náklady na minutu strojní práce.

Jednotkový strojní čas t_{AS} je čas automatického chodu obráběcího stroje; při obrobení dané součásti je pro většinu obráběcích metod definován obecným vztahem:

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} \text{ [min]}, \quad (5.10)$$

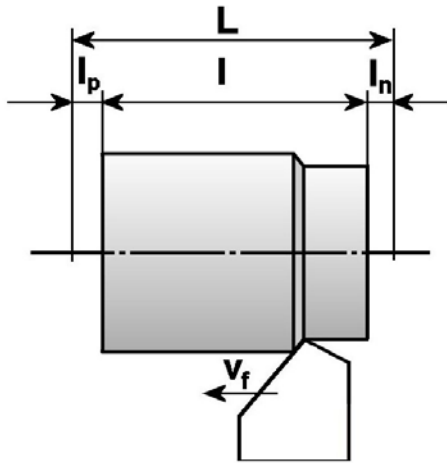
kde: L [mm] - dráha nástroje ve směru posuvu,

v_f [mm min^{-1}] - posuvová rychlost.

Při stanovení dráhy nástroje ve směru posuvu se vychází z konkrétních technologických poměrů, např. pro podélné soustružení válcové plochy (obr.5.23):

$$L = l_n + l + l_p \text{ [mm]}, \quad (5.11)$$

kde: l_n [mm] - délka náběhu, l [mm] - délka soustružené plochy, l_p [mm] - délka přeběhu.



Obr.5.23 Dráha nástroje při podélném soustružení

Náklady na vedlejší práci N_v korespondují s upínáním a odepínáním obrobku, měřením součásti a pod. a vyjádří se vztahem:

$$N_v = t_{AV} \cdot N_{vm} \text{ [Kč]}, \quad (5.12)$$

kde: t_{AV} [min] - jednotkový vedlejší čas,
 N_{vm} [Kč] - náklady na minutu vedlejší práce
 (pro praktické řešení platí $N_{vm} \cong N_{sm}$).

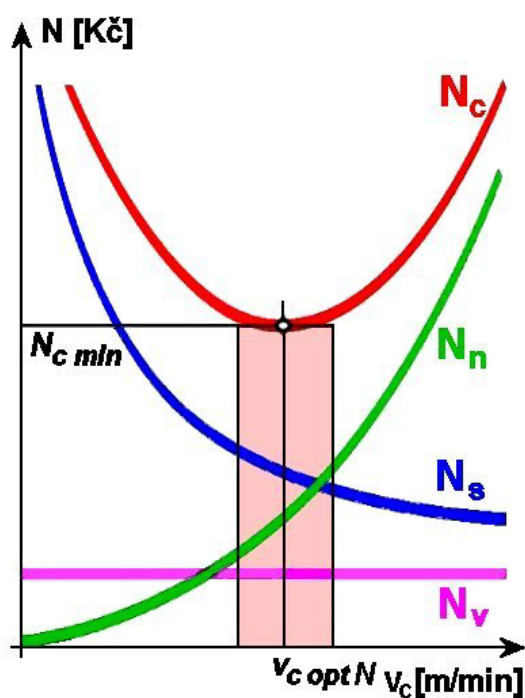
Náklady na nástroj a jeho výměnu N_n se vyjádří pomocí vztahu:

$$N_n = N_T \cdot z_v \text{ [Kč]}, \quad (5.13)$$

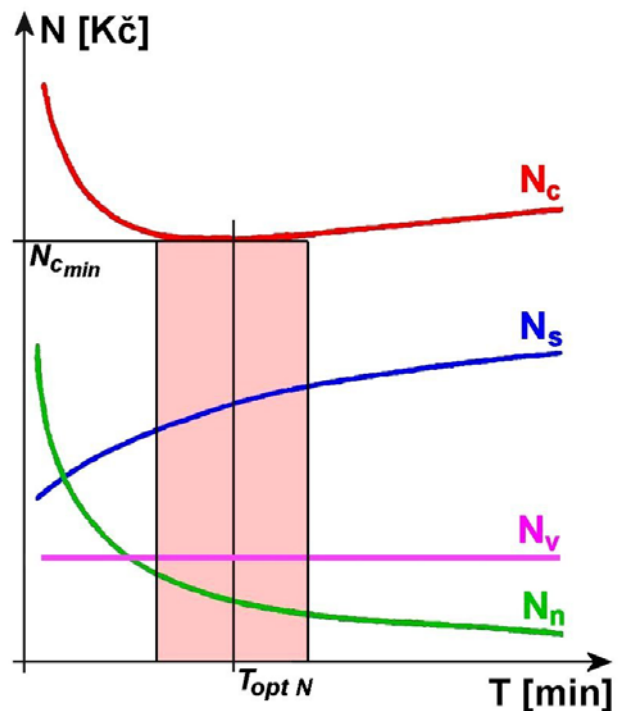
kde: N_T [Kč] - náklady na nástroj a jeho výměnu, vztažené na jednu trvanlivost,

$$z_v = \frac{t_{AS}}{T} \text{ [-]} - \text{počet výměn nástroje, vztažený na obrobení jednoho kusu.}$$

Závislost celkových operačních výrobních nákladů, i jejich jednotlivých složek na řezné rychlosti je uveden na obrázku č.5.24, kde je též vyznačena oblast optimální řezné rychlosti.



Obr.5.24 Závislost nákladů na řezné rychlosti



Obr.5.25 Závislost nákladů na trvanlivosti

5.4. OPTIMÁLNÍ TRVANLIVOST

Trvanlivost břítu nástroje obecně závisí na materiálu obrobku, materiálu nástroje, řezných podmínkách a řezném prostředí. Hodnotu optimální trvanlivosti lze stanovit buď z hlediska maximální výrobnosti (v praxi se příliš nepoužívá), nebo z hlediska minimálních nákladů, kdy se při výpočtu vychází ze vztahu (5.8):

$$N_c = N_s + N_v + N_n,$$

s použitím vztahů (5.9, 5.10, 5.12, 5.13):

$$N_c = \frac{L}{v_f} \cdot N_{sm} + t_{AV} \cdot N_{vm} + N_T \cdot \frac{L/v_f}{T}. \quad (5.13)$$

Hodnotu posuvové rychlosti lze vypočítat podle vztahu:

$$v_f = n \cdot f, \quad (5.14)$$

kde: n [min^{-1}] - otáčky obrobku,
 f [mm] - posuv na otáčku.

Protože řezná rychlost se při podélném soustružení vypočítá podle vztahu:

$$v_c = \pi \cdot D \cdot n \cdot 10^{-3}, \quad (5.15)$$

platí:

$$n = \frac{10^3 \cdot v_c}{\pi \cdot D}, \quad (5.16)$$

kde: D [mm] - průměr obrobku.

Po dosazení vztahu (5.5) do vztahu (5.16) a úpravě platí:

$$n = \frac{10^3 \cdot C_v}{\pi \cdot D \cdot T^{1/m}}. \quad (5.17)$$

Dosazením (5.17) do (5.14) a poté (5.14) do (5.13) a úpravě lze získat vztah:

$$N_c = \frac{L \cdot \pi \cdot D \cdot T^{1/m}}{10^3 \cdot C_v \cdot f} \cdot N_{sm} + t_{AV} \cdot N_{vm} + N_T \cdot \frac{L \cdot \pi \cdot D \cdot T^{(1/m-1)}}{10^3 \cdot C_v \cdot f}, \quad (5.18)$$

Náklady na minutu vedlejší práce N_{sm} se stanoví podle vztahu:

$$N_{sm} = \frac{D_s}{60}, \quad (5.19)$$

kde: D_s [Kč h^{-1}] - náklady na hodinu strojní práce.

Po dosazení (5.19) do (5.18) a úpravě:

$$N_c = k_1 \cdot T^{1/m} \cdot \frac{D_s}{60} + t_{AV} \cdot N_{vm} + N_T \cdot k_1 \cdot T^{(1/m-1)}, \quad (5.20)$$

kde: $k_1 = \frac{L \cdot \pi \cdot D}{10^3 \cdot C_v \cdot f}$.

Po derivaci vztahu (5.20) podle trvanlivosti T , za předpokladu, že hodnoty t_{AV} a N_{vm} jsou ve vztahu k trvanlivosti konstantní (jejich derivací tedy bude nula) a předpokladu, že tato derivace je rovna nule (hledání maximální hodnoty operačních výrobních nákladů N_c) a následně úpravě se získá vztah pro výpočet optimální trvanlivosti ve tvaru:

$$T_{optN} = \frac{60 \cdot N_T}{D_s} \cdot (m-1) \text{ [min]}, \quad (5.21)$$

kde: N_T [Kč] - náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost,
 D_s [Kč h⁻¹] - náklady na hodinu strojní práce
 m [-] - exponent závislosti $T-v_c$.

Závislost celkových operačních výrobních nákladů, i jejich jednotlivých složek na trvanlivosti nástroje je uveden na obrázku č.5.25, kde je též vyznačena oblast optimální trvanlivosti. V současné technické praxi dosahuje optimální trvanlivost hodnoty 15 minut.

5.5. ŘEZIVOST NÁSTROJE

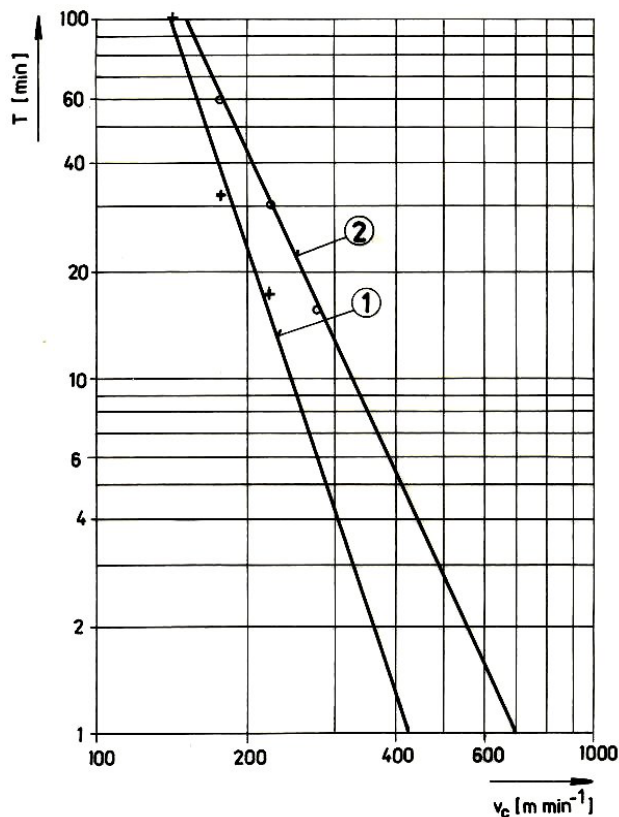
Řezivost nástroje lze charakterizovat např. jako vlastnost, která umožňuje nástroji efektivním způsobem odebrat třísku z obráběného materiálu. Tato vlastnost úzce souvisí s fyzikálními a mechanickými vlastnostmi nástroje, je též ale ovlivněna i dalšími faktory, jako je metoda obrábění, geometrie nástroje, řezné podmínky, řezné prostředí, atd. Není vlastností absolutní a to zejména v tom smyslu, že **závisí i na obráběném materiálu**, především na jeho mechanických vlastnostech (např. za jinak stejných podmínek vykáže nástroj ze slinutého karbidu P20 velmi dobrou řezivost při soustružení běžné oceli, ale bude mít velmi nízkou nebo dokonce nulovou řezivost při soustružení kalené oceli).

Jednoduchým kritériem hodnocení řezivosti nástroje je $T-v_c$ závislost a to i ve svém nejjednodušším tvaru (vztah 5.5). Potvrzují to i obrázky č.5.26 a 5.27, na kterých jsou uvedeny $T-v_c$ závislosti pro čelní frézování oceli 12 050.1 a podélné soustružení korozivzdorné oceli 17 248 různými nástrojovými materiály. Obrázek č.5.26 dokumentuje situaci, kdy jeden z nástrojových materiálů (povlakovaný SK, označeno 2) má vyšší řezivost v celém uváděném rozsahu řezných rychlostí (pro libovolnou řeznou rychlost v tomto rozsahu je jeho trvanlivost vždy vyšší, než trvanlivost nepovlakovaného SK, označeno 1). Řezivost nástrojových materiálů na obrázku č.5.27 závisí na zvolené řezné rychlosti. Do hodnoty $v_c=180 \text{ m min}^{-1}$ (přibližný průsečík přímek 1 až 3) má nejvyšší řezivost materiál AC10 (1), mírně nižší řezivost materiál Sr127 (3) a nejnižší řezivost materiál AC25 (2), nad touto hodnotou v_c vykazují materiály 1 a 3 prakticky shodnou řezivost, která je vždy nižší, než řezivost materiálu 2.

Z obecného hlediska má lepší řezivost ten nástrojový materiál, který vykazuje v $T-v_c$ závislosti vyšší hodnotu konstanty C_v a nižší hodnotu exponentu m (viz též tabulku č.5.2).

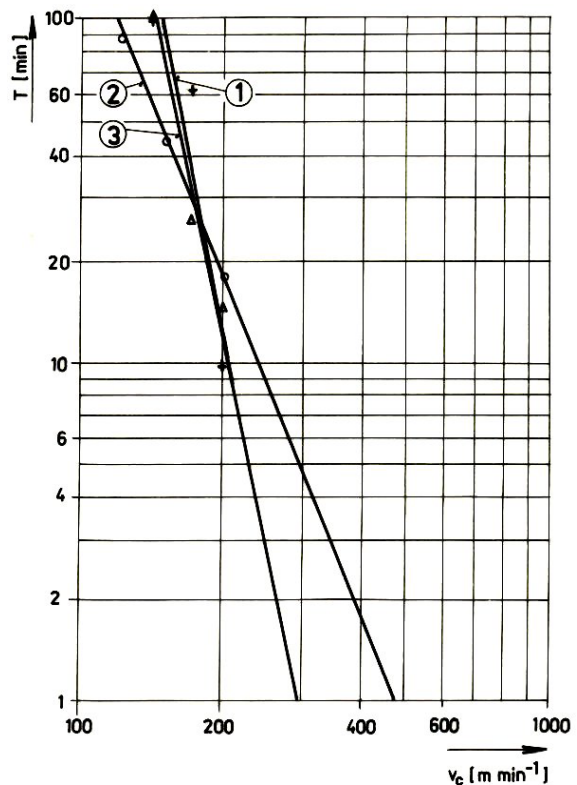
Tab.5.2 Hodnoty exponentu m pro různé nástrojové materiály

Materiál	Nástrojové oceli	Rychlořezné oceli	Slinuté karbidy	Řezná keramika
m [-]	10 ÷ 8 (až 6)	8 ÷ 5 (až 3)	5,0 ÷ 2,5 (až 2)	2,5 ÷ 1,5 (až 1,2)
α [°]	84 ÷ 83	83 ÷ 79	79 ÷ 68	68 ÷ 56



ČELNÍ FRÉZOVÁNÍ BEZ CHLAZENÍ
 ocel 12 050.1
 nástroj ISCAR F45 ST - D63 - 22
 destičky SEHW 1204 AFTN
 ○ ① ISCAR IC 50 M (P25)
 + ② ISCAR IC 250 (povlak.)
 $a_p = 2,5 \text{ mm}$, $B = 36 - 38 \text{ mm}$, $f_z = 0,22 \text{ mm}$
 $VB = 0,4 \text{ mm}$

Obr.5.26 $T-v_c$ závislosti, frézování



PODÉLNÉ SOUSTRUŽENÍ
 CHLAZENO EMULSINEM H, 3 l min⁻¹
 ocel 17 248
 nástroj PSBNR 2525 M12
 destičky SNMG 120408
 ○ ① SUMITOMO AC 10 (utvařec NUG)
 + ② SUMITOMO AC 25 (utvařec NUP)
 ▲ ③ TIZIT Sr 127 (utvařec TM)
 $a_p = 2 \text{ mm}$, $f = 0,25 \text{ mm}$
 $VB = 0,4 \text{ mm}$

Obr.5.27 $T-v_c$ závislosti, soustružení

5.6. OBROBITELNOST MATERIÁLU

Z hlediska technologie obrábění je obrobiteľnosť jednou z nejdůležitějších vlastností materiálu a v obecném smyslu ji lze definovat jako míru schopnosti daného konkrétního materiálu být zpracován některou z metod obrábění. Je hlavním činitelem, který ovlivňuje volbu řezných podmínek pro funkci nástroje při všech metodách obrábění.

Obrobiteľnosť závisí na mnoha faktorech, z nichž nejdůležitější jsou:

- způsob výroby a tepelného zpracování obráběného materiálu,
- mikrostruktura obráběného materiálu,
- chemické složení obráběného materiálu,
- fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu,
- metoda obrábění,
- řezné podmínky,
- řezné prostředí,
- geometrie nástroje,
- druh a vlastnosti nástrojového materiálu.

Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem je obrobiteľnosť vlastností relativní a pro daný sledovaný materiál se určuje porovnáním s jiným materiálem, obráběným stejným nástrojem za stejných pracovních podmínek. Srovnávacím kritériem pak může být **teplota řezání, utváření třísky, velikost řezných sil** (odporů), **struktura povrchu obrobenej plochy** nebo, nejčastěji, **velikost řezné rychlosti** při zvolené trvanlivosti v_{cT} (obvyklé hodnoty trvanlivosti: 45, 30 nebo 15 minut). Pokud je obrobiteľnosť posuzována hodnotou v_{cT} , jedná se prakticky o vyhodnocování úběru obráběného materiálu (velikost objemu materiálu odebraná za jednotku času) pomocí daného nástroje při smluveném konstantním průřezu třísky (např. pro podélné soustružení: šířka záběru ostří $a_p=2,5$ mm, posuv na otáčku $f=0,25$ mm), v daném řezném prostředí.

Pro potřeby vyhodnocování obrobiteľnosti jsou technické konstrukční materiály rozděleny do devíti základních skupin, označovaných malými písmeny:

- a - litiny,
- b - oceli,
- c - těžké neželezné kovy (měď a slitiny mědi),
- d - lehké neželezné kovy (hliník a slitiny hliníku),
- e - plastické hmoty,
- f - přírodní nerostné hmoty,
- g - vrstvené hmoty,
- h - pryže,
- v - tvrzené litiny pro výrobu válců.

V jednotlivých skupinách je vždy vybrán jeden konkrétní materiál, který slouží jako etalon obrobiteľnosti a ve vztahu k tomuto materiálu je pak stanovována relativní obrobiteľnost všech ostatních materiálů celé skupiny (např. pro skupinu ocelí je etalonovým materiálem ušlechtilá uhlíková ocel 12 050.1 podle ČSN 41 1250). Materiály každé skupiny jsou děleny do tříd a to na základě indexu obrobiteľnosti, daného vztahem:

$$i_o = \frac{v_{c15}}{v_{c15 \text{ etalonu}}} \quad [-], \quad (5.22)$$

kde: v_{c15} [m min^{-1}] - řezná rychlost při trvanlivosti $T=15$ minut pro sledovaný materiál,
 $v_{c15 \text{ etalonu}}$ [m min^{-1}] - řezná rychlost při trvanlivosti $T=15$ minut pro etalonový materiál.

Třídy jsou označovány číslem, umístěným před písmeno, které určuje danou skupinu materiálů (např. 11a, 14b, atd.). Odstupňování střední hodnoty indexu obrobiteľnosti v jednotlivých třídách je dáno geometrickou řadou s kvocientem $q=10^{1/10}=1,26$ (třída etalonového materiálu má hodnotu $q=1$), což znamená, že hodnota řezné rychlosti v_{cT} v dané třídě je vždy 1,26krát vyšší (nižší), než hodnota v_{cT} v třídě sousední. Materiály v třídách s nižším číslem, než má třída etalonového materiálu, mají horší obrobiteľnosť než etalonový materiál, materiály v třídách s vyšším číslem mají lepší obrobiteľnosť. Relativně nejhorší obrobiteľnosť v dané skupině má vždy materiál zařazený do třídy s nejnižším číslem, nejlepší obrobiteľnosť má materiál zařazený do třídy s nejvyšším číslem. Dělení skupin obrobiteľnosti a-d na třídy, včetně hodnot i_o (střední hodnota, rozsah hodnot, vyjádření hodnotou kvocientu geometrické řady) je uvedeno v tabulce č.5.3.

Obrobiteľnosť je především vlastností obráběného materiálu, přesto ale musí být posuzována v úzké souvislosti s řezivostí nástroje (nástrojového materiálu), který je použit pro zkoušky obrobiteľnosti. Jednotné normativy zařazují oceli do tříd obrobiteľnosti na základě zkoušek zasucha, prováděných slinutými karbidy typu P10-P20, které mají ve srovnání s dnes mnohem více používanými povlakovanými SK podstatně nižší řezivost. Lze tedy důvodně

očekávat, že při zkouškách obrobiteľnosti, provedených povlakovanými slinutými karbidy mohou být za jinak stejných podmínek použity vyšší hodnoty v_{cT} a tím může dojít k zařazení sledovaného obráběného materiálu do třídy s lepší obrobiteľností, než uvádějí Jednotné normativy.

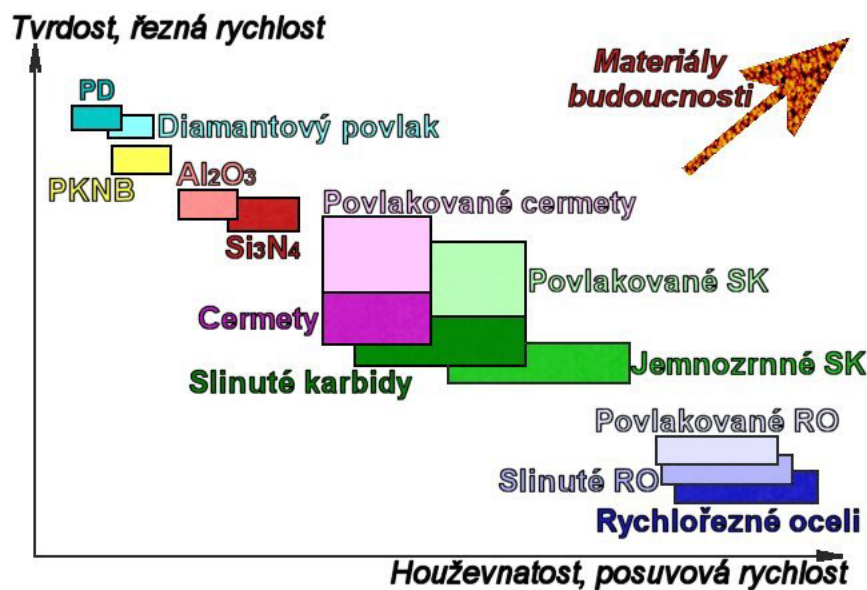
Tab.5.3 Třídy obrobiteľnosti

Index obrobiteľnosti i_0			Materiál			
Vyjádřeno kvocientem	Střed	Rozsah	Litiny	Oceli	Slitiny	
					mědi	hliníku
$1,26^{-13}$	0,050	0,045÷0,054		1b		
$1,26^{-12}$	0,065	0,055÷0,069		2b		
$1,26^{-11}$	0,080	0,070÷0,089		3b		
$1,26^{-10}$	0,10	0,09÷0,11	1a	4b		
$1,26^{-9}$	0,13	0,12÷0,14	2a	5b	2c	
$1,26^{-8}$	0,16	0,15÷0,17	3a	6b	3c	
$1,26^{-7}$	0,20	0,18÷0,22	4a	7b	4c	
$1,26^{-6}$	0,25	0,23÷0,28	5a	8b	5c	4d
$1,26^{-5}$	0,32	0,29÷0,35	6a	9b	6c	5d
$1,26^{-4}$	0,40	0,36÷0,44	7a	10b	7c	6d
$1,26^{-3}$	0,50	0,45÷0,56	8a	11b	8c	7d
$1,26^{-2}$	0,63	0,57÷0,71	9a	12b	9c	8d
$1,26^{-1}$	0,80	0,72÷0,89	10a	13b	10c	9d
$1,26^0$	1,00	0,90÷1,12	11a	14b	11c	10d
$1,26^1$	1,26	1,13÷1,41	12a	15b	12c	11d
$1,26^2$	1,59	1,42÷1,78	13a	16b	13c	12d
$1,26^3$	2,00	1,79÷2,24	14a	17b	14c	13d
$1,26^4$	2,50	2,25÷2,82		18b	15c	14d
$1,26^5$	3,15	2,83÷3,55		19b		15d
$1,26^6$	4,00	3,56÷4,47		20b		16d

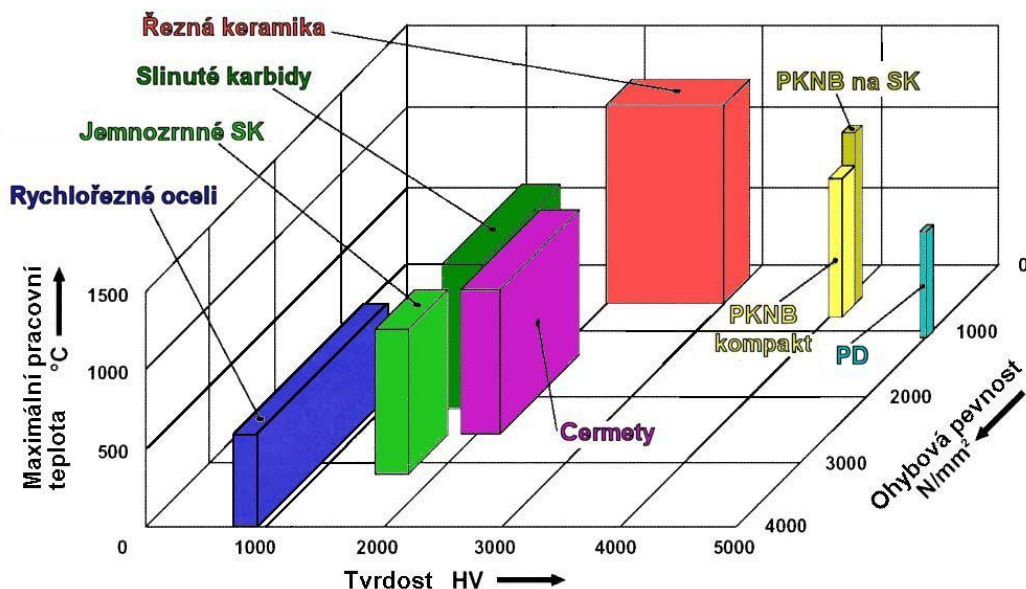
6. NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY

Současný poměrně široký sortiment materiálů pro řezné nástroje, od nástrojových ocelí až po syntetický diamant, je důsledkem celosvětového dlouholetého a intenzivního výzkumu a vývoje v dané oblasti a má úzkou souvislost s rozvojem konstrukčních materiálů určených pro obrábění, i s vývojem nových obráběcích strojů, zejména s číslicovým řízením.

Na obrázku č.6.1 jsou schematicky uvedeny hlavní oblasti aplikace všech současných materiálů pro řezné nástroje, vyjádřené vztahem mezi základními řeznými podmínkami (řezná rychlost - posuvová rychlost), který odpovídá vztahu mezi jejich základními vlastnostmi (tvrdost - houževnatost). Obrázek č.6.2 specifikuje konkrétní hodnoty vybraných vlastností řezných materiálů (tvrdost, ohybová pevnost, pracovní teplota).



Obr.6.1 Oblasti použití řezných materiálů



Obr.6.2 Hodnoty vybraných vlastností řezných materiálů

Supertvrdé materiály (polykrystalický diamant - PD a polykrystalický kubický nitrid boru - PKNB) mají vzhledem ke svým vlastnostem a vysoké ceně zcela specifické použití. Polykrystalický diamant se používá pro obrábění vláknově vyztužených kompozitů a zejména hliníkových slitin (se zvýšeným obsahem Si, v automobilovém průmyslu), kde lze aplikovat řezné rychlosti až do hodnoty 5000 m min^{-1} . Protože diamant je uhlík v kubické modifikaci, nesmí se pro svoji vysokou afinitu k železu používat pro obrábění oceli ani litiny. PKNB je obecně doporučován pro obrábění tvrdých, kalených materiálů, s tvrdostí minimálně 45 HRC.

Řezná keramika na bázi Al_2O_3 je užívána pro obrábění vysokou řeznou rychlostí a nízkou posuvovou rychlostí, protože má vysokou tvrdost za tepla a vysokou termochemickou stabilitu, ale nízkou houževnatost. Řezná keramika na bázi Si_3N_4 má vyšší houževnatost a vydrží vyšší posuvovou rychlost než keramika Al_2O_3 , ale její užití je omezeno na obrábění šedé litiny, protože při obrábění oceli a tvárné litiny vykazuje rychlé opotřebení.

Cermety mohou být užity pro vyšší posuvové rychlosti než řezná keramika a pro řezné rychlosti na úrovni povlakovaných slinutých karbidů. Vzhledem k nízké houževnatosti jsou ale jejich aplikace doposud omezeny pouze na lehké a střední řezy (při vyšších posuvech se začíná projevovat jejich nižší tepelná vodivost, dochází k vyšší koncentraci tepla v oblasti špičky a tím i k rychlému plastickému porušení břitu nástroje), dobře se uplatní při obrábění korozivzdorných ocelí.

Slinuté karbidy (SK) jsou nejpevnějšími materiály mezi tvrdými nástrojovými materiály a mohou být použity pro obrábění vysokými posuvovými rychlostmi a pro těžké přerušované řezy. Nemohou být ale použity pro vysoké řezné rychlosti, zejména v důsledku své nízké termochemické stability.

Povlakované slinuté karbidy jsou složeny z pevného karbidového podkladu a termochemicky stabilního tvrdého povlaku (karbidy, nitridy, oxidy a jejich kombinace). Výsledkem jsou nejlepší materiály pro vysoké řezné i posuvové rychlosti, vysoký úběr materiálu a přerušované řezy.

Rychlořezné oceli mají nejvyšší houževnatost, ale ve srovnání s ostatními materiály je jejich tvrdost poměrně nízká. Proto jsou z nich vyráběny nástroje, určené pro obrábění nízkými řeznými rychlostmi a též tvarově složitě nástroje, který nemohou být vyrobeny z ostatních řezných materiálů.

Tab.6.1 Značení nástrojových materiálů podle normy ISO 513

Materiál		Symbol
Nepovlakované slinuté karbidy s obsahem primárního WC		HW
Nepovlakované cermety s obsahem TiC nebo TiN nebo obou		HT
Povlakované slinuté karbidy a cermety		HC
Řezná keramika	Oxidická ŘK s obsahem primárního Al ₂ O ₃	CA
	Směsná ŘK na bázi Al ₂ O ₃ s neoxidickými přísadami	CM
	Neoxidická ŘK obsahem primárního Si ₃ N ₄	CN
	Povlakovaná ŘK	CC
Supertvrdé materiály	Polykrystalický diamant	DP
	Polykrystalický kubický nitrid boru	BN

6.1. NÁSTROJOVÉ OCELI

Na nástrojové oceli, podobně jako na ostatní řezné materiály jsou kladeny často protichůdné požadavky. Některé nástroje musí mít vysokou tvrdost a pevnost, u jiných se naopak tyto vlastnosti snižují, aby se získala dostatečně vysoká houževnatost. U nástrojů pracujících za tepla musí zůstat mechanické vlastnosti zachovány i za zvýšených teplot. U všech nástrojů je požadována vysoká odolnost proti abrazivnímu a adheznímu opotřebení, u některých i za zvýšených teplot. Nástrojové oceli musí mít také vysokou čistotu, tj. nižší obsah vměstků, a rovnoměrně rozložené karbidy v matici, aby se snížilo nebezpečí praskání nástrojů při kalení a vyštípování břitu za provozu. U ocelí na nástroje s většími průřezy nebo složitými tvary je třeba zaručit také dostatečně velkou prokalitelnost. Nástrojové oceli se nejčastěji rozdělují podle chemického složení (tab.6.2) na:

- nelegované oceli,
- legované oceli (nízkolegované, střednělegované),
- vysokolegované oceli.

V rámci dosud používaného pětimístného značení patří nástrojové oceli do třídy 19, nově zaváděné označování podle norem EU je ale zcela odlišné. Jako příklad lze uvést rychlořeznou ocel 19 861 (ČSN 41 9861), která je v rámci norem EU označena jako HS 10-4-3-10 (význam symbolů: HS - rychlořezná ocel, 10 - 10%W, 4 - 4%Mo, 3 - 3%V, 10 - 10%Co).

Tab.6.2 Rozdělení, značení, vlastnosti a užití nástrojových ocelí

Oceli	Nelegované	Legované	Vysokolegované (rychlořezné)
Označování	19 0xx ÷ 19 2xx	19 3xx ÷ 19 7xx	19 8xx
Obsah uhlíku [%]	0,5 ÷ 1,5	0,8 ÷ 1,2	0,7 ÷ 1,3
Obsah legujících prvků [%]	Celkem	< 1,0	> 30
	Jednotlivé prvky	desetiny	jednotky až desítky
Legující prvky	Mn, Si, Cr	Cr, W, Mo, V, Mn, Si, Ni	W, Mo, Cr, V, Co
Kalící prostředí	voda	olej	vzduch
Tvrdość po kalení [HRC]	62 ÷ 64	66	64 ÷ 68
Užití	ruční nástroje a nářadí (nůžky, sekáče, pilníky, pilky na kov)	strojní nástroje pro nižší hodnoty v_c (např. protahovací trny)	strojní nástroje (nože, frézy, vrtáky, výstružníky, atd.)

6.2. SLINUTÉ KARBIDY

K počátku dvacátého století se váže zjištění, že výborné funkční vlastnosti rychlořezných ocelí jsou dány přítomností velmi tvrdých karbidických částic (z nichž největší význam mají částice WC) v jejich kovové matici. Významní producenti nástrojových materiálů se proto snažili vyrobit materiál, u kterého by podíl tvrdých částic byl mnohem vyšší než u tehdy běžných rychlořezných ocelí (přibližně 30%). V důsledku omezení, způsobených klasickými metalurgickými postupy, však tato snaha nemohla být úspěšná. Materiály s vysokým obsahem karbidických částic (90% i více) začaly být úspěšně vyráběny až po zvládnutí technologie výroby metodou práškové metalurgie.

Průmyslovou výrobu slinutého karbidu typu WC-Co (pod názvem **WIDIA - WIe DI-Amant** = jako diamant) rozvinula německá firma Krupp v roce 1926. Na lipském veletrhu byl v roce 1927 představen slinutý karbid Widia N (později označen podle německé normy jako G1), který obsahoval 94% WC + 6% Co. V letech 1930-1932 byly vyrobeny slinuté karbidy Widia s obsahem 11% Co (G2) a 15% Co (G3), následoval druh H1 se stejným složením jako G1, ale s jemnějším zrnem. Řezné nástroje ze slinutých karbidů typu WC-Co, vyrobené na konci 20.let našeho století, dosahovaly velmi dobrých výsledků při obrábění litin a barevných kovů mnohem vyššími řeznými rychlostmi, než byly dosud používány u nástrojů z rychlořezných ocelí. Nebyly ale vhodné pro obrábění ocelí, protože již při řezných rychlostech mírně nad hranici pro rychlořezné oceli docházelo u nich k rychlé tvorbě výmolu na čele a výsledná trvanlivost nástroje byla z tohoto důvodu velmi nízká. Proto byla pozornost zaměřena na další karbidy, zejména TiC, TaC a NbC. V roce 1931 se objevil první slinutý karbid na bázi dvou karbidů -Widia X (86,5% WC + 8,5% TiC + 5% Co), v roce 1932 slinuté karbidy Titanit U1 a Titanit U2 (později známé pod označením S1 a S2) se složením 77 - 76% WC + 16% TiC + 2% Mo₂C + 5-6% Co a 76-74% WC + 14% TiC + 2% Mo₂C + 8-10% Co. V roce 1935 byl vyroben slinutý karbid S3 s obsahem 4-5 % TiC. Produkce slinutých karbidů (všech typů)

rostla velmi rychle, z jedné tuny za měsíc v roce 1930 na celoněmeckou produkci 40 tun měsíčně v roce 1944.

Výroba slinutých karbidů u dalších firem v Německu, i v jiných zemích, vycházela z německých patentů na karbidy typu WC-Co, v prvním období byly vyráběny zejména SK s obsahem 4-13% Co (Carboloy - USA, Vimet - Velká Británie). Právě vzhledem k patentovým právům měl vývoj SK v USA svůj osobitý směr - v roce 1930 byl vyroben materiál na bázi TaC + Ni (87% + 13%) s označením Ramet, který se používal pro výrobu nástrojů pro obrábění ocelí, protože měl vyšší odolnost proti opotřebení (zejména z hlediska tvorby výmolu na čele) než slinuté karbidy typu WC-Co. I když se tento SK neuplatnil jako základ pro další novou samostatnou skupinu nástrojových materiálů, ukázal další směr rozvoje slinutých karbidů, který spočíval v přidávání kubických karbidů TiC, TaC nebo NbC do slinutého karbidu WC-Co.

V prvních aplikacích byl nový řezný nástroj vytvořen tak, že destičky ze slinutých karbidů byly pájeny do ocelových držáků. Změny v upevnění destičky v držáku (z pájeného spoje na konstrukci s mechanickým upínáním) se objevily v polovině 50. let 20. století, v současnosti má již drtivá většina nástrojů mechanicky upínanou vyměnitelnou břitovou destičku (destičky). Vývoj nástrojů s vyměnitelnými destičkami měl výrazný vliv nejen na rozvoj geometrie nástroje a utvařeče třísky, ale i na rozvoj nástrojových materiálů a rozšíření jejich sortimentu (možnost použít materiály, které jdou obtížně pájet, jako jsou cermety a řezná keramika). Proto je přechod od pájených destiček k vyměnitelným právem považován za první "revoluci" v novodobých dějinách vývoje řezných nástrojů (za druhou revoluci lze považovat rychlý rozvoj povlakovacích technologií).

Současné standardní (běžné, nepovlakované) slinuté karbidy pro řezné aplikace jsou rozdělovány na základě jejich užití do třech skupin - **P** (barva značení modrá), **M** (barva značení žlutá), **K** (barva značení červená), s dalším dělením např. P10, M30, K20 (vyšší číslo vyjadřuje vyšší obsah pojícího kovu, vyšší houževnatost a pevnost v ohybu a nižší tvrdost a otěruvzdornost materiálu a vymezuje oblast jeho aplikací pro nižší řezné a vyšší posuvové rychlosti). Složení jednotlivých skupin je následující (karbidy, uvedené v závorce, netvoří samostatnou strukturní složku SK a jejich hlavním úkolem je zabránit růstu zrna hlavních karbidických fází):

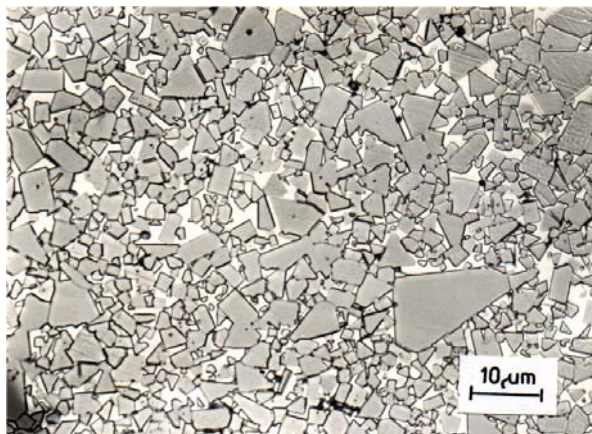
- skupina K: WC + Co + (TaC.NbC) - struktury na obrázcích č.6.3 a 6.4,
- skupina P: WC + TiC + Co + (TaC.NbC) - struktura na obrázku č.6.5,
- skupina M: WC + TiC + TaC.NbC + Co - struktura na obrázku č.6.6.

Skupina **K** je určena pro obrábění materiálů, které vytvářejí krátkou, drobnou třísku (zejména pro litiny, nezelezné slitiny a nekovové materiály). Karbid wolframu, který tvoří jedinou tvrdou strukturní složku této skupiny SK má za pokojové teploty zhruba stejnou tvrdost jako TiC, s rostoucí teplotou ale ztrácí tvrdost rychleji než TiC. Proto jsou slinuté karbidy této skupiny nevhodné pro obrábění materiálů, tvořících dlouhou třísku, která mnohem více tepelně zatěžuje čelo nástroje (dlouhá tříska má větší plochu styku s čelem nástroje a doba jejího kontaktu s nástrojem je delší).

Skupina **P** je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou třísku, jako jsou uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické korozivzdorné oceli. Přísada TiC zaručuje vysokou odolnost proti difúzi za vysokých teplot, která je jednou z hlavních příčin vytváření výmolu na čele nástroje. Vhodnost slinutých karbidů skupiny P pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou třísku je dána též vyšší tvrdostí TiC (stejně TaC.NbC) za vyšších teplot, ve srovnání s WC. Nevýhodnou vlastností TiC a tuhých roztoků na bázi TiC je jejich vyšší křehkost a nižší odolnost proti abrazi ve srovnání s WC.

Skupina **M** má univerzální použití a je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou a střední třísku, jako jsou lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli a tvárné litiny. Vzhledem k relativně vysoké houževnatosti se SK této skupiny též často používají pro těžké hrubovací a přerušované řezy.

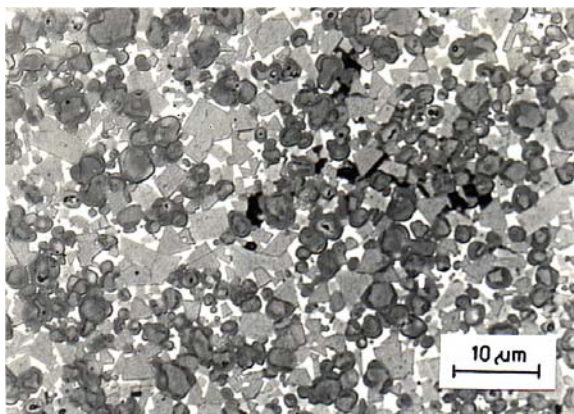
Z běžných slinutých karbidů **K,P,M** je pouze omezený počet druhů užíván pro lehké a dokončovací obrábění (vysoká řezná rychlost, nízká posuvová rychlost a hloubka řezu). Druhy s vyšším číselným označením jsou obvykle používány pro střední a těžké obrábění nebo hrubování, lze je také užít pro frézování a vrtání. Při nepřerušovaném řezání mají slinuté karbidy s nižším obsahem pojící fáze (zařazené do skupin s nižším číselným označením) lepší řezivost vzhledem k větší odolnosti proti plastické deformaci.



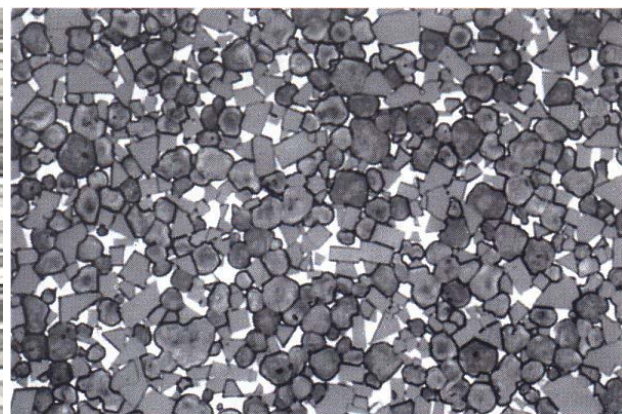
Obr.6.3 Hrubozrnný SK skupiny K



Obr.6.4 Jemnozrnný SK skupiny K



Obr.6.5 SK skupiny P



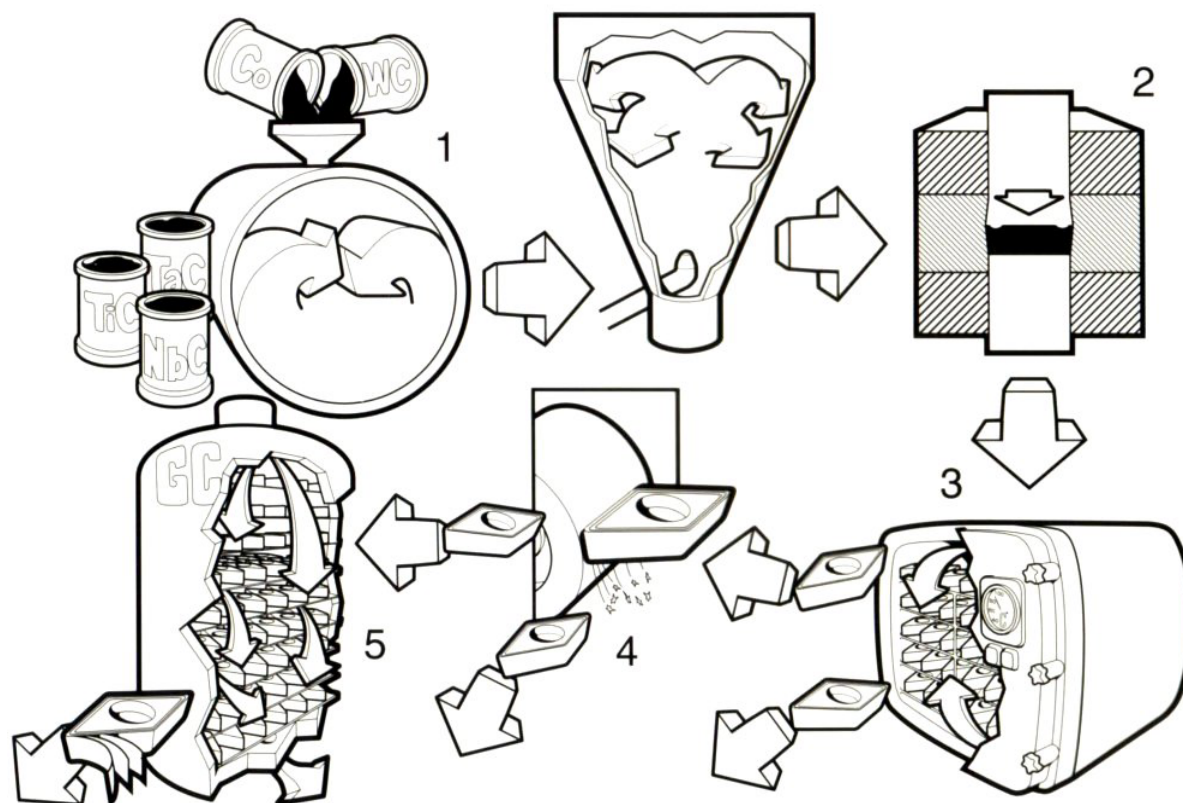
Obr.6.6 SK skupiny M

Výroba slinutých karbidů představuje typickou metodu oboru, nazývaného prášková metalurgie, který se zabývá přípravou prášků odpovídajících karbidů a pojících kovů, jejich mícháním v patřičných poměrech, lisováním směsi a slinováním výlisků.

Podstatou procesu výroby slinutých karbidů je lisování směsi prášku tvrdých karbidických částic s práškem pojícího kovu, nejčastěji kobaltu a následné slinování při teplotě blízké bodu tavení pojiva. Tím vzniká kompaktní materiál, jehož tvrdost se blíží tvrdosti výchozích karbidů a který vyniká poměrně vysokou pevností (zejména v tlaku, současné produkty předních výrobců i pevností v ohybu), protože jeho struktura je tvořena pevnou kostrou pojícího kovu, která obklopuje zrna relativně křehkých karbidů.

Tab.6.3 Složení a vlastnosti slinutých karbidů podle rozdělení ISO

Označení	Složení [%]			Měrná hmotnost [g cm ⁻³]	Tvrdoost [HV]	Pevnost v ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Modul pruž- nosti v tahu [GPa]	Tepelná vodi- vost [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Koefficient délkové roz- tažnosti [10 ⁻⁶ K ⁻¹]
	1) - ve většině případů obsahuje 5 ÷ 40% NbC									
	WC	TiC+TaC ¹⁾	Co							
P01.2	30	64	6	7,2	1800	750	3500			
P01.3	51	43	6	8,5	1750	900	4200	460	17	7,5
P01.4	62	33	5	10,1	1750	1000	4100	480	17	7,5
P05	77	18	5	12,2	1700	1100	4300			6,0
P10	63	28	9	10,7	1600	1300	4600	530	29	6,5
P20	76	14	10	11,9	1550	1500	4800	540	34	6,0
P25	71	20	9	12,4	1450	1750	4800	550	42	6,0
P30	82	8	10	13,1	1500	1700	5000	560	59	5,5
P40	75	12	13	12,7	1400	1900	4900	550	59	5,5
P50	68	15	17	12,5	1300	2100	4000	520	54	
M10	84	10	6	13,1	1750	1350	5000	580	50	5,5
M20	82	10	8	13,4	1550	1600	5000	570	63	5,5
M30	81	10	9	14,4	1450	1800	4800	550	63	5,5
M40	79	6	15	13,6	1300	2100	4400	540	67	6,0
K01	92	4	4	15,0	1800	1200	5900	670	84	4,5
K05	91	3	6	14,5	1750	1400	5900	650	80	5,0
K10	92	2	6	14,8	1600	1500	5700	630	80	5,0
K20	93	1	6	14,8	1550	1700	5200	620	80	5,0
K30	90	1	9	14,4	1450	1900	4700	580	71	5,3
K40	87	1	12	14,2	1300	2100	4500	570	67	5,5



Obr.6.7 Výroba slinutých karbidů

Obecný postup výroby slinutých karbidů lze na základě obrázku č.6.7 rozdělit do následujících základních operací:

- výroba práškového wolframu,
- výroba práškových karbidů (WC, TiC, TaC.NbC) a kobaltu,
- příprava směsí uvedených prášků - 1,
- formování směsí - 2,
- předslinování zformovaných směsí (kolem 1000 °C) - tato operace je většinou spojena s operací slinování,
- úprava tvaru předslinutého tělesa (v případě potřeby),
- slinování (1350-1650 °C) - 3,
- vysokoteplotní izostatické lisování (**HIP** - Hot Isostatic Pressing), kdy probíhá slinování za vysokých teplot a působení tlakového plynu, který zajistí rovnoměrný tlak na slinovaný výrobek ze všech směrů. Takto vyrobené slinuté karbidy mají vysokou hustotu, která se blíží teoretické hodnotě, s minimálním objemem pórů a jiných vad a při aplikacích pro řezné nástroje proto dosahují nejvyšších hodnot trvanlivosti.
- Dodatečné úpravy povrchu (broušení - 4, povlakování - 5).

Příprava směsi karbidů a pojiva

Příprava směsi karbidů s pojícím kovem (kobaltem, který se získá redukcí oxidů kobaltu ve vodíkové atmosféře) je jednou ze základních operací při výrobě slinutých karbidů, protože výrazně ovlivňuje vlastnosti výsledného produktu (velmi důležité je zejména dodržení požadovaného poměru jednotlivých složek směsi). Hlavním cílem dané operace je vytvoření jemnozrnné, homogenní práškové směsi karbidů a pojícího kovu (v mikroobjemu) mletím směsi za sucha nebo v kapalném prostředí (např. etylalkohol, metylalkohol, dichlóretylén, trichlóretylén, aceton, benzín, někdy i voda, v množství asi 0,25 litru na 1 kg směsi). Zvláště je důležité, aby po ukončení procesu byla jemná, rovnoměrně rozptýlená karbidická zrna dokonale obalena ještě jemnějším práškem pojícího kovu (to znamená, že původní práškový kobalt musí mít nejjemnější možnou strukturu). Mokrý mletí je výhodnější zejména z toho důvodu, že pracovní kapalina napomáhá disperzi jednotlivých částic, protože ve vznikajících úzkých trhlínkách dochází působením kapilárních sil k nárůstu napětí, trhlinky se rozšiřují a rozrušují konglomerát i jednotlivá zrna. Další výhody mokrého mletí lze vidět v minimalizování pracovní teploty a ochranném účinku proti oxidaci. Nevýhodou mokrého mletí je požadavek dokonalého vysušení směsi po skončení mlecího procesu (vzhledem k použitým kapalinám, které mají vesměs nízké hodnoty bodu varu, nečiní však jejich následné odstranění žádné zvláštní potíže).

Mletí obvykle probíhá v kulových mlýnech (kulový nebo častěji válcový buben naplněný mlecími koulemi, který se otáčí kolem horizontálně orientované osy), kde při pohybu uvnitř bubnu působí mlecí koule na pracovní směs rázovým a třecím účinkem. Rázovým účinkem působí pouze ty koule, které se nacházejí poblíž stěny bubnu (rozměňují konglomeráty a jednotlivá zrna karbidů i pojícího kovu a tím zmenšují jejich rozměry), třecí účinek je považován za velmi důležitý zejména z hlediska dokonalého rozmíchání a homogenizace směsi (účastní se ho všechny koule). Koule, podobně jako obložení stěn mlýnu, by měly být ze stejného druhu slinutého karbidu, pro který je směs připravována (jinak může dojít k znečištění směsi nežádoucími produkty z opotřebení koulí), jejich průměr se obvykle pohybuje v rozmezí 8-15 mm. Poměr objemů koule/směs bývá asi 2,5, ve speciálních případech, kde je požadováno zvláště intenzivní mletí, dosahuje někdy hodnot 5-10. Mlecí účinek může být zvyšován vibracemi pružně uloženého mlýnu.

Mimo kulových mlýnů lze pro mletí směsi karbidů s pojivem použít i tzv. atritory. Jedná se o válcové nádoby se svisle orientovanou osou, které jsou podobně jako kulové mlýny

zaplněny mlecími koulemi a mletou směsí, s tím rozdílem, že pohyb koulí není vynucován otáčením bubnu (buben se nepohybuje), ale otáčením míchadla umístěného v ose bubnu.

Proces mletí je dlouhodobý a trvá několik dnů (48-72 hodin, pro nejjemnější směsi někdy až 96-120 hodin), po mletí se směs prášků prosívá.

Formování směsi

Směs práškových karbidů a pojícího kovu lze formovat lisováním ve formovacích lisech (tato metoda je užívána nejčastěji, zejména při výrobě vyměnitelných břitových destiček), hydrostatickým lisováním, vytlačováním přes trysku požadovaného tvaru nebo litím do pomocných forem.

Protože jde o tvarování vysoce disperzních směsí s nízkou plasticitou, přidává se do nich látka (tzv. plastifikátor, v množství 0,5-2%), která usnadňuje vzájemný skluz částic (zvyšuje tak stupeň zhutnění směsi), přidává polotovaru doplňkovou pevnost (v důsledku své tmelicí schopnosti) a zaručuje zachování tvaru po vyhození polotovaru z lisovací formy. Plastifikátor musí splňovat několik základních požadavků, především se musí nechat lehce odstranit při sušení nebo předslinování za nižších teplot a nesmí znečistit polotovar nežádoucími přísadami. Pro daný účel jsou užívány většinou tyto látky:

- syntetický kaučuk rozpuštěný v benzínu (výhody: značná pevnost výlisku, možnost užití poměrně rychlých lisů, možnost odstranění až při slinování; nevýhoda: nedá se úplně odstranit),
- parafin rozpuštěný v tetrachlórmetanu nebo benzenu (výhody: umožňuje lisování při vyšších tlacích, jde snadno odstranit; nevýhody: musí se odstranit ve speciální peci před slinováním, má nižší tmelicí schopnost a pružnost než kaučuk a proto nelze použít rychlé lisy),

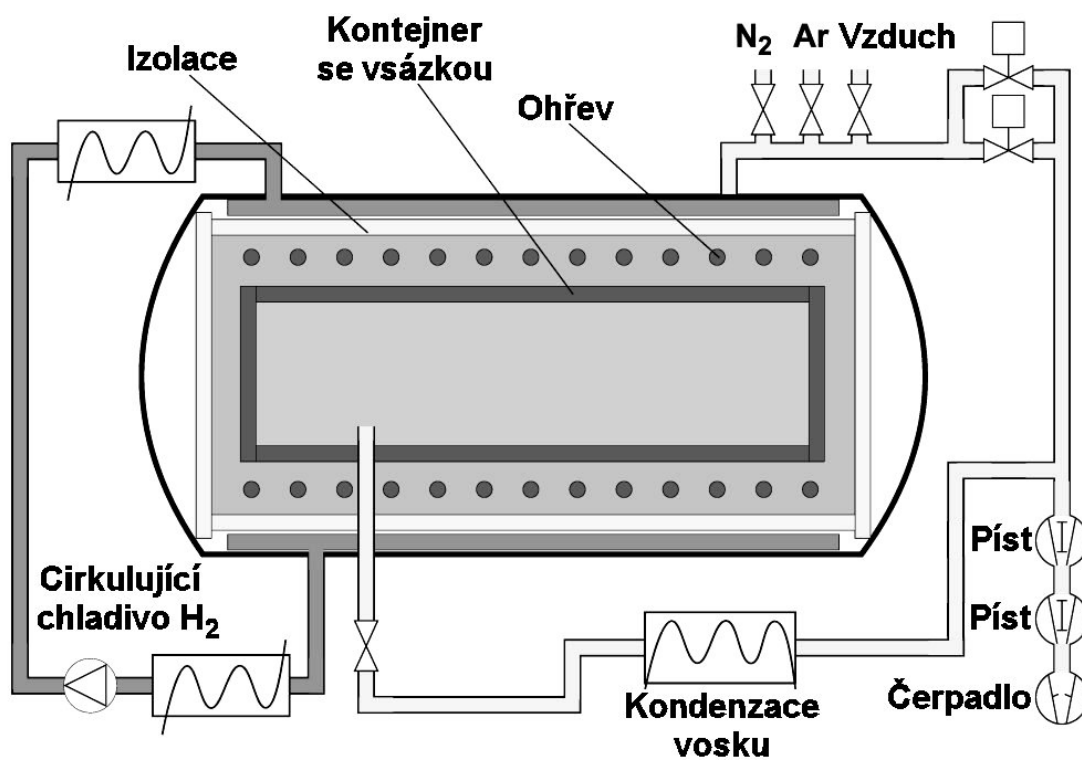
Lisovací tlaky jsou relativně nízké a pohybují se v rozmezí 50-150 MPa. Výlisek musí být rovnoměrně zhutněn v celém objemu a proto je nejčastěji používán princip dvojstranného lisování, kdy se dva písty pohybují proti sobě a lisují směs, která se nachází mezi jejich čelními plochami (čelní plochy pístů mohou mít například negativní tvar čela břitové destičky, včetně utvařeče třísky). Lisování pro lisování polotovarů vyměnitelných břitových destiček jsou velmi často označovány jako "tabletové" nebo "pilulkové" a obvykle zaručují konstantní tlak ve všech směrech (takto lisované polotovary se vyznačují rovnoměrnějším zhutněním). Rozměry výlisku musí být větší, než jsou rozměry hotového slinutého výrobku, vzhledem k lineárnímu všesměrovému smrštění při slinování, které činí 20 i více procent.

Slinování

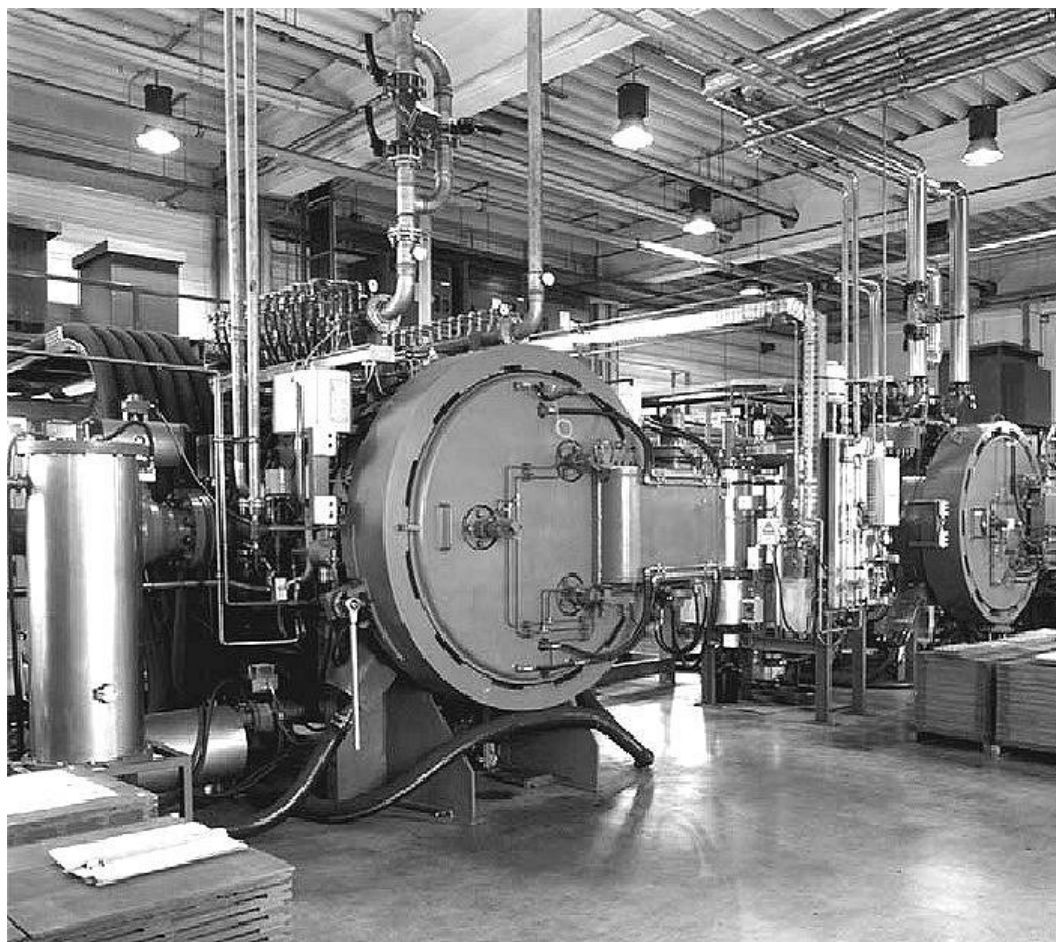
Změna pórovitého výlisku na kompaktní výrobek probíhá zejména v důsledku změn podmíněných fázovým diagramem daného systému, ale též v důsledku dalších fyzikálně chemických pochodů. Slinování je pravděpodobně nejkritičtější fází výrobního procesu slinutých karbidů.

Slinování může probíhat v ochranné atmosféře (vodík, vyčištěný a hlavně dokonale vysušený, s minimálním obsahem kyslíku - atmosféra výhodná zejména pro materiály WC-Co a materiály WC-TiC-Co s nízkým obsahem TiC), nebo ve vakuu a má obvykle tři etapy:

- předběžný ohřev (na teplotu 700-1000 °C, v této fázi dochází např. k odstranění plastifikátoru),
- ohřev na pracovní teplotu a výdrž na této teplotě (teplota, která je nad teplotou vzniku tekuté fáze; podle obsahu Co v materiálech typu WC-Co a obsahu TiC a Co v materiálech typu WC-TiC-Co se pohybuje v rozmezí 1350-1650 °C, nižší hodnoty platí pro vyšší obsah kobaltu a jemnozrnnější výchozí prášky),
- ochlazení.



Obr.6.8 Slinovací pec - schéma



Obr.6.9 Slinovací pece firmy ALD

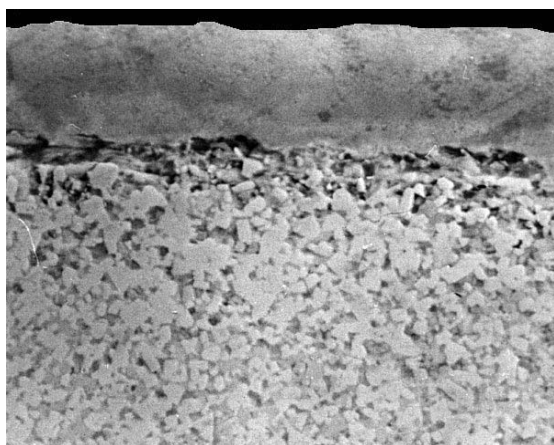
Vodíková atmosféra není vhodná pro vyměnitelné břitové destičky, protože v ní často dochází k vytváření nežádoucích povlaků (výhodnější je tedy slinování ve vakuu, i když uvedené povlaky lze odstranit např. broušením). Některé pece proto umožňují slinování v atmosféře H_2 v počátečním stadiu a slinování ve vakuu v konečném stadiu celého procesu.

Pece pro slinování mají zpravidla příčný průřez 100 až 300 cm^2 a délku 1-2 m (obr. 6.8, 6.9), slinované výrobky, uložené v grafitových kontejnerech (pokud jsou výrobky náchylné k nauhličování, jsou vnitřní stěny kontejnerů pokryty izolační vrstvou prášku Al_2O_3) postupně procházejí celým pracovním prostorem pece. Po opuštění horkého pracovního prostoru postupují kontejnery do ochlazovacího prostoru, který obvykle přímo navazuje na ohřívací pec (podobně jako ohřev je i ochlazování nejčastěji postupné, v některých případech, pokud to režim tepelného zpracování umožňuje, mohou být výrobky ochlazeny i náhle). Po potřebném ochlazení jsou hotové výrobky vyňaty z kontejnerů a tím je proces slinování ukončen.

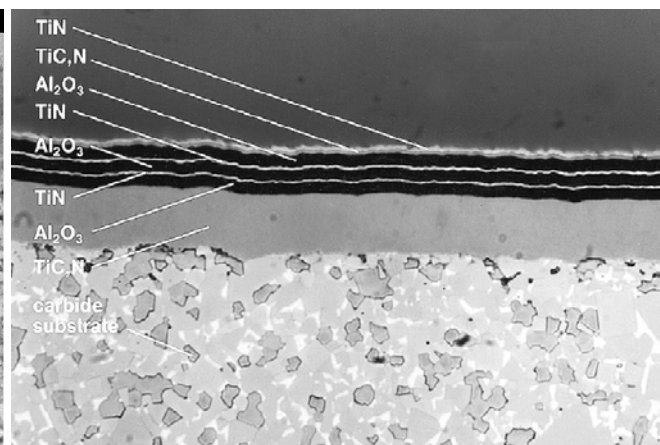
6.2.1. Povlakované slinuté karbidy

První povlakované břitové destičky ze slinutého karbidu pro obrábění vyrobila firma Sandvik Coromant v roce 1969 (materiál GC125, povlak TiC, tloušťka vrstvy 4-5 μm). S malým časovým odstupem následovaly povlaky typu TiN a TiCN, povlaky Al_2O_3 přišly na trh v polovině 70.let 20. století. Otěrúzdorné vrstvy byly vytvářeny na podkladech z běžných SK metodou CVD, jako jedno i vícevrstvé. Povlaky PVD se jako otěrúzdorné vrstvy na břitových destičkách ze slinutých karbidů začaly používat na začátku 80.let. Nejužívanějším povlakem PVD byl jednovrstvý TiN. V odborné literatuře jsou obvykle uváděny tyto vývojové stupně povlakovaných slinutých karbidů:

- **1. generace:** jednovrstvý povlak (téměř výhradně TiC) s tloušťkou asi 7 μm a špatnou soudržností podkladu a povlaku (tato nepříznivá vlastnost byla způsobena nedokonalou technologií výroby, kdy mezi podkladem a povlakem docházelo k tvorbě křehkého *eta*-karbidu).
- **2. generace** (obr.6.10): jednovrstvý povlak (TiC, TiCN, TiN) bez *eta*-karbidu na přechodu podklad - povlak. Zdokonalení technologie výroby umožnilo vytvořit vrstvy povlaků o větší tloušťce (až 13 μm), bez nebezpečí jejich odlupování při funkci nástroje.



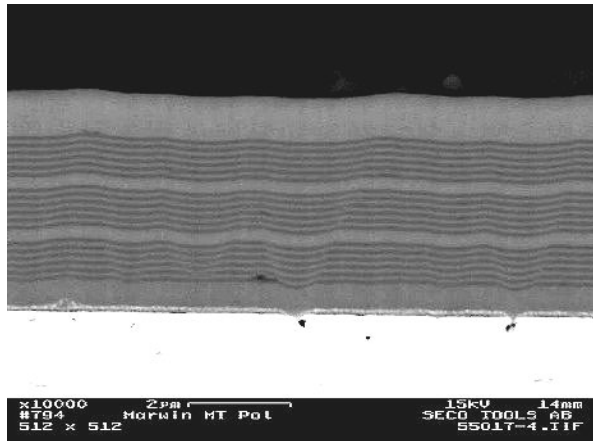
Obr.6.10 Povlak 2. generace (Sandvik - Coromant, Švédsko)



Obr.6.11 Povlak 3. generace, (Kennametal USA)



Obr. 6.12 Povlak 4. generace
(Valenite, USA)



Obr.6.13 Povlak 4. generace
(SHM Šumperk, ČR)

- **3. generace** (obr.6.11): vícevrstvý povlak (dvě až tři, případně i více vrstev) s ostře ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Řazení vrstev odpovídá jejich vlastnostem tak, že jako první jsou na podklad obvykle nanášeny vrstvy s lepší přilnavostí k podkladu, které mají relativně nižší odolnost proti opotřebení a jako poslední jsou nanášeny vrstvy, které nemusí mít dobrou přilnavost k podkladu. Nejčastěji bývají jednotlivé vrstvy řazeny v tomto pořadí (od podkladu k povrchu): TiC-Al₂O₃, TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, TiC-Al₂O₃-TiN, TiCN-Al₂O₃-TiN.
- **4. generace** (obr.6.12, 6.13): speciální vícevrstvý povlak (velmi často i více než 10 vrstev a mezivrstev), s méně či více výraznými přechody mezi jednotlivými vrstvami (užívají se stejné materiály povlaků jako u 3.generace). Výroba takového povlaku je umožněna cíleným řízením atmosféry v povlakovacím zařízení, podle potřeb technologického postupu povlakování.

Povlakované slinuté karbidy jsou vyráběny tak, že na podkladový materiál (původně běžný SK typu K, P nebo M, dnes speciální SK) se nanáší tenká vrstva materiálu s vysokou tvrdostí a vynikající odolností proti opotřebení (povlak ve formě tenké vrstvy má vyšší tvrdost i pevnost, než stejný homogenní materiál v jakékoli jiné formě). Tyto výhodné vlastnosti vyplývají zejména z toho, že povlakový materiál neobsahuje **žádné pojivo**, má o jeden i více řádů **jemnější zrnitost a méně strukturních defektů** (póry, dutiny) a tvoří **bariéru** proti difúznímu mechanismu opotřebení nástroje. Podle principu se metody povlakování dělí do dvou základních skupin, CVD a PVD.

6.2.1.1. Metoda CVD

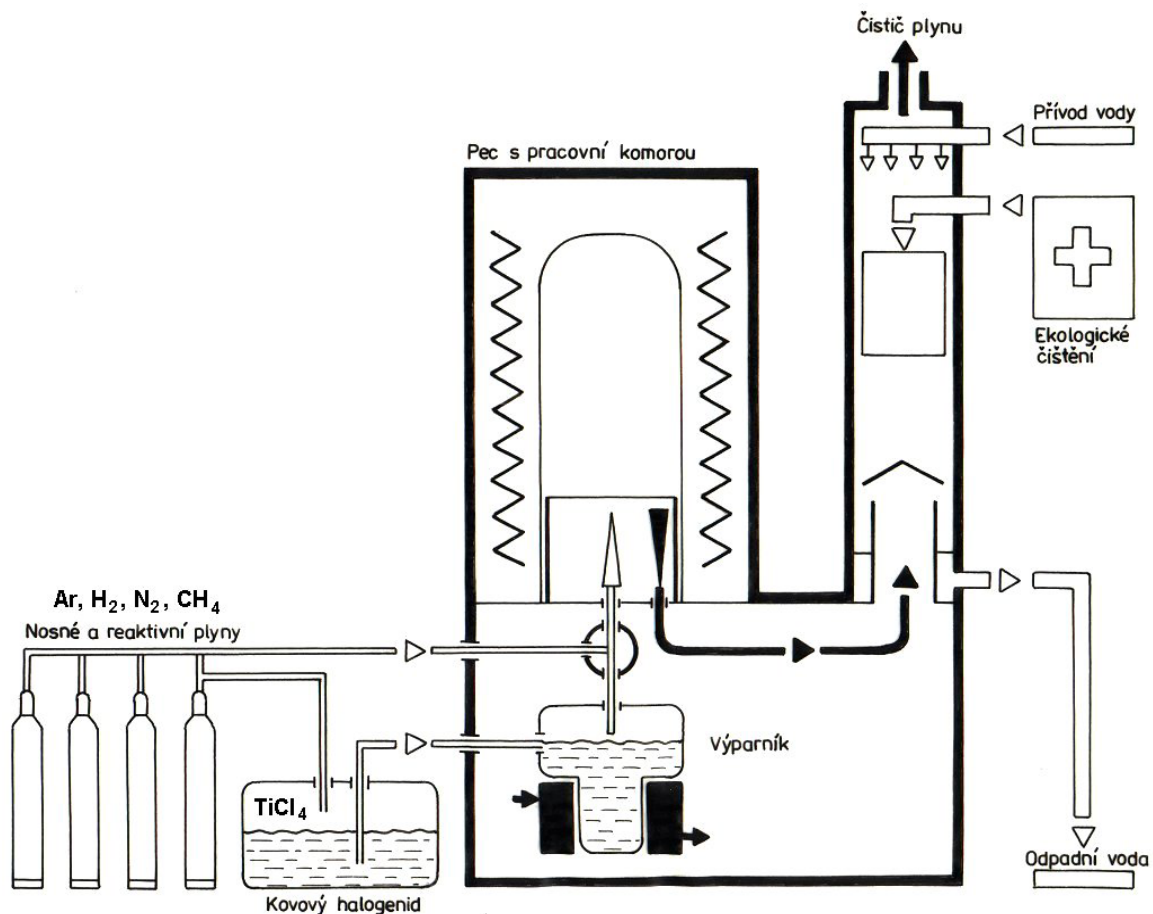
Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition = **chemické** napařování z plynné fáze - obr.6.14) probíhá za vysokých teplot (900-1200 °C); tato metoda byla až do začátku 90. let 20. století hlavní metodou povlakování slinutých karbidů. K jejím výhodám patří výborná adheze mezi podkladem a povlakem, možnost nanesení vrstev o větší tloušťce (10-13 µm), povlakování předmětů složitějších tvarů, všestranný účinek a variabilita typů povlaků. Za nevýhody lze považovat ovlivnění podkladového materiálu (snížení ohybové pevnosti), nemožnost napovlakovat ostré hrany a tahová zbytková napětí v povlaku.

Chemický proces povlakování je založen na reakci plynných chemických sloučenin v bezprostřední blízkosti povrchu podkladového slinutého karbidu a následném uložení produktů reakce na tomto povrchu. Základním požadavkem přitom je, aby výchozí plyny obsahovaly stabilní ale přitom prchavou sloučeninu, která se v důsledku přivedení energie (ohřevem,

plazmovým obloukem, laserem) chemicky rozkládá (např. kovový halogenid, TiCl_4). Produkty jejího rozkladu jsou pak ukládány na ohřátý povrch povlakovaného předmětu a působí zde jako katalyzátor. Aby proběhla požadovaná reakce (vytvoření vrstvy povlaku), musí být v plynech obsažen i nekovový reaktivní plyn (např. N_2 , NH_3 , CH_4).



Poměrně velkým procentem je v přiváděných plynech zastoupen též nosný plyn (např. Ar , H_2), který dopravuje danou směs plynů k povlakovanému předmětu, umožňuje řízení celého procesu a výrazně ovlivňuje rychlost růstu vrstvy povlaku. Cíleným řízením obsahu plynné směsi (druh a množství jednotlivých složek) v čase lze dosáhnout plynulé změny ve složení povlakové vrstvy a vytvářet tak multivrstvé povlaky čtvrté generace.



Obr.6.14 Princip povlakovacího zařízení pro metodu CVD

6.2.1.2. Metoda PVD

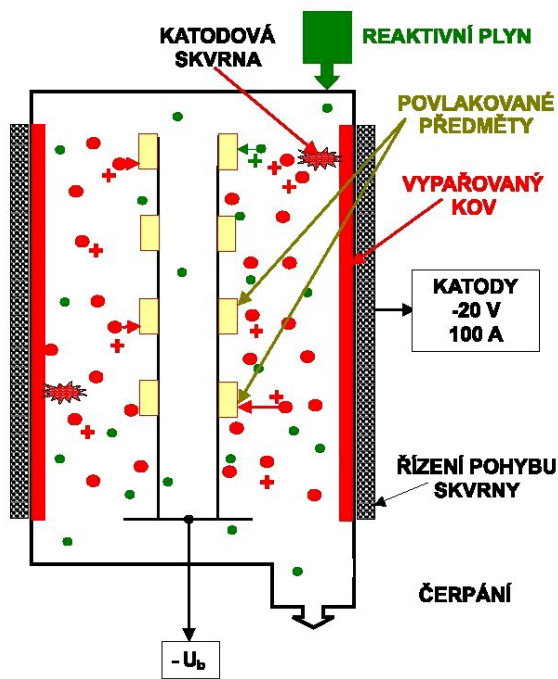
Metoda PVD (Physical Vapour Deposition = **fyzikální** napařování) je charakteristická nízkými pracovními teplotami (podle některých údajů pod $600 \text{ }^\circ\text{C}$, $350 \text{ }^\circ\text{C}$ nebo dokonce $180 \text{ }^\circ\text{C}$). Tato metoda byla původně vyvinuta pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí (nízká teplota zaručuje, že nedojde k tepelnému ovlivnění materiálu), v současné době je ve vel-

kém rozsahu používaná i u břitových destiček z SK, určených pro přerušovaný řez (frézování). Vytváří tlaková zbytková napětí v povlaku, nemá nepříznivý vliv na vlastnosti podkladu a je schopna povlakovat i ostré hrany, na druhé straně vyžaduje mnohem důkladnější přípravu povrchu vzorku před povlakováním (odmašťování, čištění) a má směrový účinek (plochy, které jsou odvrácené od místa odpařování povlakového kovu, by bez neustálého pohybu vzorku zůstaly zcela bez povlaku). K dalším nevýhodám patří tenčí vrstva povlaku (kolem 5 μm) a menší možnosti výběru typu povlaku.

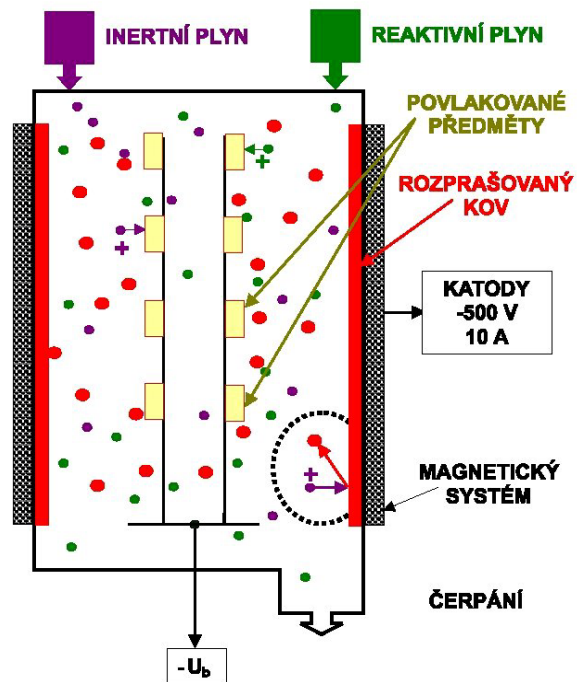
Fyzikální proces povlakování probíhá ve středním až vysokém vakuu, tj. při tlaku pod 1 Pa. Při napařování (obr.6.15) je čistý kov (obvykle Ti) odpařován pomocí elektrického oblouku, svazkem elektronů, nebo klasickým odporovým ohřevem. Emitované atomární částice reagují s atmosférou komory, kterou tvoří inertní a reaktivní plyn (např. Ar a N_2) a s tepelnou energií 0,1-0,5 eV dopadají na povrch substrátu, kde se usazují ve formě tenké vrstvy homogenního povlaku, pevně adhezně spojeného s podkladem.

Naprašování (obr.6.16) využívá elektrického výboje v plynné atmosféře komory, při kterém vznikají kationy (kladné ionty), které bombardují katodu z čistého kovu, na níž je připojen záporný pól elektrického napětí 0,5-5,0 kV. Vysoká kinetická energie iontů uvolní z terče čistého kovu částice potřebného chemického složení (závisí na použitém kovu a složení plynné atmosféry), které se následně usazují na povrchu substrátu a vytvářejí tak požadovaný povlak.

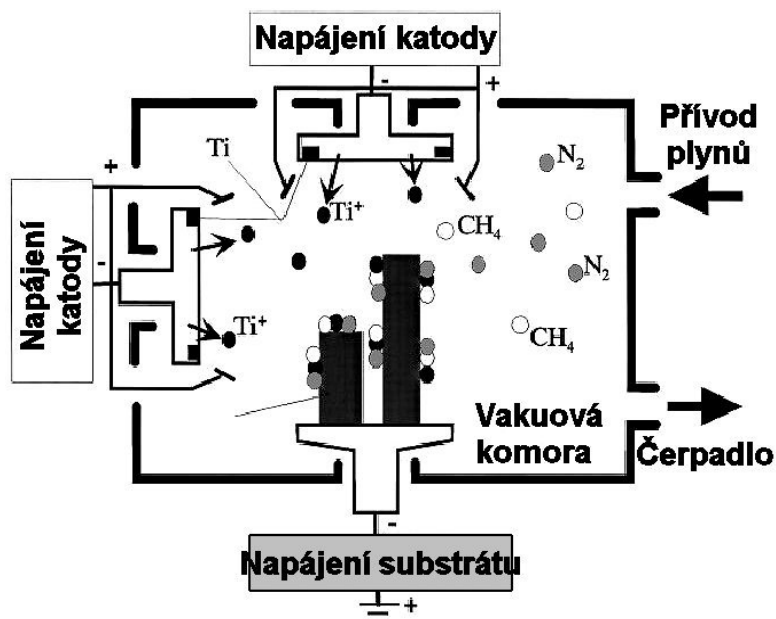
Iontová implantace (obr.6.17) je kombinací napařování a naprašování. Protože je mezi substrátem (katoda, záporný potenciál 50 až 1000 V) a odpařovačem vytvořeno silné elektrické pole (rozdíl potenciálů 10^4 V a více), dochází k elektrickému výboji v plynné atmosféře, který ionizuje částice plynu i odpařené částice čistého kovu. Reakcí iontů vzniká povlak, který se usazuje na povrchu předmětů vsázky. Daná metoda (v menší míře i naprašování) je v důsledku plazmaticky aktivovaného procesu charakterická zvýšeným podílem iontů v toku materiálu.



Obr.6.15 Napařování



Obr.6.16 Naprašování

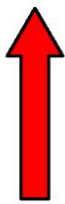


Obr.6.17 Iontová implantace

K nevýhodám všech výše uvedených metod PVD patří relativně složitý vakuový systém a požadavek pohybovat povlakovanými předměty, aby bylo zaručeno rovnoměrné ukládání povlaku po celém jejich povrchu (tento požadavek souvisí s tzv. stínovým efektem, který u dané metody způsobuje, že na plochách, které neleží ve směru pohybu odpařovaných částic, se vytváří nedokonalá vrstva povlaku, případně se povlak vůbec netvoří). Mezi výhody lze zařadit možnost povlakování ostrých hran (tedy i tzv. ostře provedeného ostří nástroje, s poloměrem zaoblení pod 20 μm).

6.2.1.3. Moderní povlakovací metody

V souladu s vývojem na konci 80. let minulého století jsou dnes u vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů nejčastěji používány povlaky čtvrté nebo třetí generace K původním materiálům pro jednotlivé vrstvy (TiC , TiN , TiCN , Al_2O_3 - obecné porovnání základních vlastností je na obrázku č.6.18) přibývají další nové materiály, jako např. CrN , HfN , ZrN , TiZrN , TiAlN , Ti_2N , TiAlSiN , AlTiN , TiN/TaN , TiN/NbN , TaC , ZrC , HfC , TaN , TaCN , $(\text{Ti-Cr})\text{CN}$, $\text{TiC}+\text{TiB}_2$, CrC , B_4C , $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2$, SiO_2 , TiO_2 , MgO , Y_2O_3 , některé z nich se ale prozatím nedostaly do stadia sériové výroby a praktického užití.

	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrdost	Tvrdost za tepla
<p>Nejllepší</p>  <p>Špatná</p>	Al_2O_3	Al_2O_3	TiC	Al_2O_3
	TiAlN	TiAlN	TiCN	TiAlN
	TiN	TiN	Al_2O_3	TiN
	TiCN	TiCN	TiAlN	TiCN
	TiC	TiC	TiN	TiC

Obr.6.18 Základní vlastnosti vybraných povlaků

Významnou roli při zvyšování výkonů řezných nástrojů hrají i tzv. lubrikační povlakové vrstvy, např. MoS₂, vytvořené metodou PVD. Jejich nejdůležitější funkcí je výrazně snížit tření mezi čelem nástroje a odcházející třískou (nižší tepelné zatížení nástroje se pak projeví ve zvýšení jeho trvanlivosti). Velký zájem výrobců je soustředěn též na vývoj a sledování vlastností povlaků z polykrystalického diamantu, jen velmi sporadicky se vyskytují práce, zabývající se povlaky z PKNB.

Zásadní kvalitativní změnu v technologii vytváření tenkých ořezvzdorných vrstev přinesla tzv. plazmaticky aktivovaná CVD metoda (označení **PCVD**, nebo též **PACVD - Plasma CVD**, **PECVD - Plasma Enhanced CVD**, **MWPCVD - MicroWave Plasma CVD**, mikrovlnná plazmatická CVD metoda), která se od klasické CVD metody liší nízkými pracovními teplotami (běžně 600 °C, podle některých údajů i méně, např. 480-560 °C), přičemž nemění její princip, tj. vytváření povlaku z plynné fáze. Metoda PCVD je založena na zvýšení energie plynné atmosféry v povlakovací komoře pomocí její ionizace a aktivace v plazmatickém výboji. Takováto chemicky aktivovaná plazma umožňuje snížit teplotu, potřebnou pro ukládání povlaku na povrchu substrátu. Plazmu lze vytvořit pomocí vnějšího elektrického napájecího zdroje (nízkofrekvenční střídavé napětí, vysokofrekvenční střídavé napětí, stejnosměrné napětí, pulzní stejnosměrné napětí) nebo reaktivním plynem (např. NH₃). U elektrického napájení je za nejvýhodnější považována pulzní metoda, u které je vysoké stejnosměrné napětí přiváděno na katodu ve formě pečlivě řízeného sledu pulzů. Pulzy zapálí plazmu bez nebezpečí vzniku elektrických oblouků a v důsledku možnosti řízení jejich délky a přestávek mezi nimi lze užít právě takové urychlující napětí, které postačuje pro vytvoření povlaku s požadovanými parametry a nezpůsobuje přitom příliš vysoký ohřev substrátu.

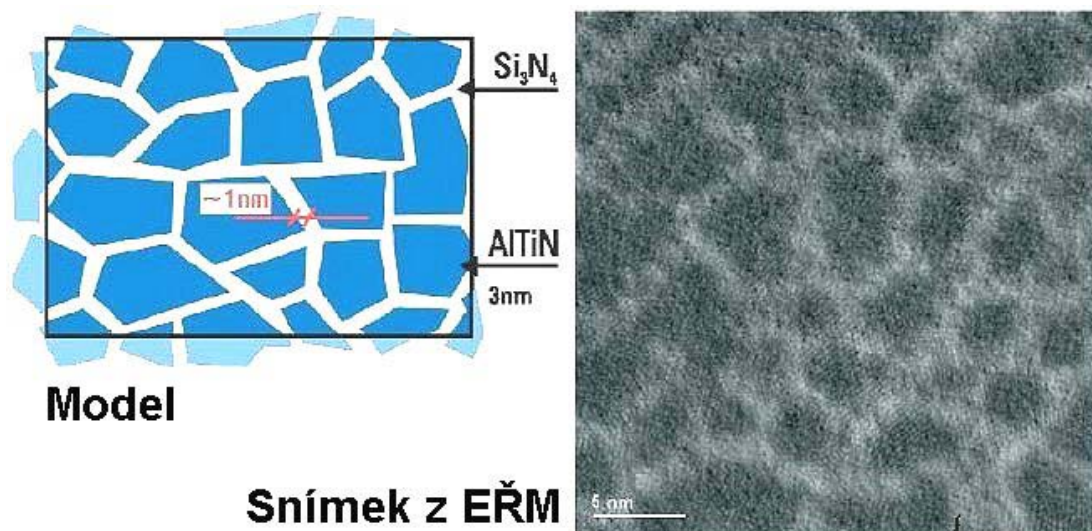
Další metodou, která je založena na principu snížení vysokých pracovních teplot CVD metody je tzv. **MTCVD** metoda (Middle Temperature Chemical Vapour Deposition). Na rozdíl od konvenční CVD technologie, kde teploty nanášení povlaků dosahují hodnot nad 1000 - 1040 °C, umožňuje technologie MTCVD nanášet povlaky z plynné fáze za teplot podstatně nižších, 700 - 850 °C. Zatímco u metody CVD je používán plynný metan CH₄ (zdroj uhlíku) a čistý dusík, MTCVD metoda využívá jako vstupní sloučeninu acetonitril (CH₃CN), nebo též vysoce toxický a hořlavý metykyanid. Zdrojem titanu je u obou metod chlorid titaničitý (TiCl₄). Základní chemická reakce metody MTCVD při vytváření povlaku TiCN probíhá za teploty zhruba 850 °C, podle rovnice (stechiometrie vzniklého karbonitridu titanu je TiC_{0,63}N_{0,37}):



Při nižších teplotách (kolem 780 °C) vzniká karbonitrid titanu s vyšším obsahem dusíku (TiC_{0,54}N_{0,46}) podle rovnice:



Rychlost růstu vrstvy TiCN je u metody MTCVD přibližně třikrát vyšší, než u klasické vysokoteplotní CVD metody. Podkladový slinutý karbid se díky vysoké reaktivitě systému TiCl₄ - CH₃CN nepodílí na ovlivňování povlaku - difúze uhlíku z podkladu do povlaku je zanedbatelná a proto je prakticky vyloučen vznik křehkého *eta*-karbidu mezi povlakem a podkladem. Mezi hlavní výhody MTCVD metody patří skutečnost, že v důsledku nižší reakční teploty nedochází k poklesu houževnatosti podkladového SK a břitové destičky jsou odolnější proti mechanickým rázům a mohou být použity při vyšších hodnotách posuvových rychlostí. Ze stejného důvodu lze též vyrábět břitové destičky s většími kladnými úhly čela (a tedy menšími úhly břítu) bez rizika, že by při jejich použití v přerušovaném řezu docházelo k vylamování ostří.



Obr.6.19 Struktura nanokompozitního povlaku firmy Platit (Švýcarsko)

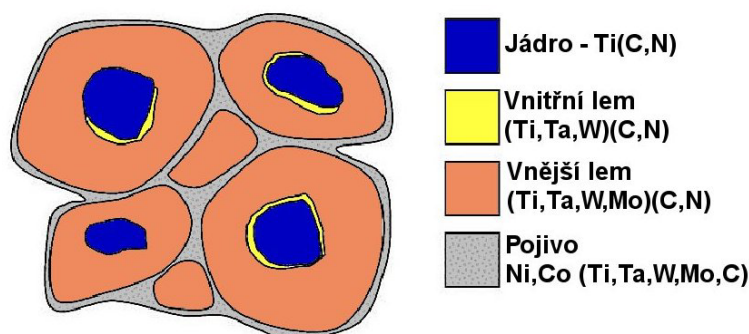
Vysokou trvanlivost a s ní spojené vysoké úběry obráběného materiálu dosahují břitové destičky ze slinutých karbidů s tzv. **nanokompozitními povlaky** (obr.6.19), které jsou založeny na principu pravidelného střídání dvou typů vrstev s rozdílnými fyzikálními vlastnostmi (tloušťky jednotlivých „monovrstev“ jsou přitom velmi malé, kolem 10 nm). Tyto povlaky jsou složeny z více druhů materiálů, jejichž vzájemná rozpustnost je minimální. Při optimálním poměru jednotlivých složek je vytvořena termodynamicky stabilní struktura s unikátními fyzikálními vlastnostmi, např. u systému $\text{TiN-Si}_3\text{N}_4$ může tvrdost povlaku dosáhnout hodnoty HV vysoko nad 50 GPa.

6.3. CERMETY

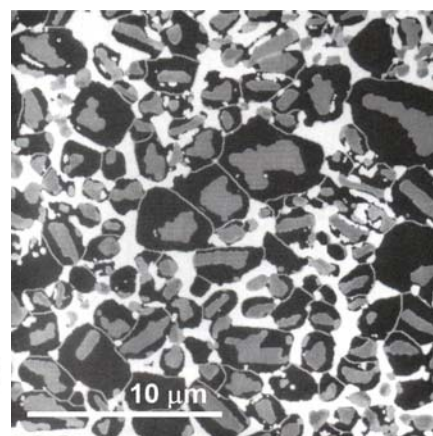
Název *CERMET* vznikl složením prvních tří hlásek slov "*CER*amics (keramika)" a "*MET*al (kov)" a měl tak vyjadřovat nástrojový materiál, jehož mechanické vlastnosti vykazují nevšednou kombinaci vysoké tvrdosti (jakou mají keramiky) a vysoké houževnatosti (jakou mají kovy). Přestože se původní očekávání na dosažení uvedených vlastností zcela nenaplnila, je tento název používán dodnes, i když lze v odborné literatuře najít i jiné, méně frekventované názvy, jako např. *slinuté karbonitridy* nebo *bezwolframové slinuté karbidy*. Základní složení cermetů: $\text{TiC} + \text{TiN} + \text{Ni, Mo}$.

První cermet, použitelný pro řezné nástroje, byly vyvinuty v USA již v polovině 50.let 20. století, v důsledku své nedostatečné houževnatosti však nevyvolaly velkou pozornost ani v USA ani v Evropě. Naproti tomu vzbudily velký zájem v Japonsku jako levný a lehce dostupný materiál pro řezné nástroje, protože neobsahují deficitní prvky wolfram a kobalt. Jejich vývoj až na dnešní úroveň byl tedy prováděn především v Japonsku (na konci 80.let tvořily cermety v japonském průmyslu téměř jednu třetinu všech užívaných břitových destiček, což byl objem prakticky shodný s objemem destiček z povlakovaných slinutých karbidů).

Charakteristickou vlastností cermetů je nízká měrná hmotnost, která se pohybuje v rozmezí $5,6-7,4\text{ g cm}^{-3}$. Ve srovnání se slinutými karbidy (SK) jsou tyto hodnoty zhruba poloviční a jsou dány zejména tím, že cermety v drtivé většině neobsahují těžký karbid wolframu. Tvrdé částice cermetu vytvářejí zvláštní zrna, která obsahují jádro Ti(C,N) , obalené lemy z komplexních karbonitridů (obr.6.20, 6.21).



Obr.6.20 Struktura cermetu - schéma



Obr.6.21 Struktura cermetu na bázi TiCN

Hlavní výhodou cermetů je jejich vysoká tvrdost, která zůstává zachována i při použití za zvýšených teplot, kdy si lépe si udržují svůj tvar než slinuté karbidy. Jsou levnější než SK, mají vyšší chemickou stabilitu, odolnost proti oxidaci a tvorbě nárůstku. Jejich hlavní nevýhodou je nízká houževnatost, která je sice neustále zvyšována, ale přesto nedosahuje hodnot obvyklých u slinutých karbidů. V důsledku vynikající odolnosti proti adhezi a nízké náchylnosti TiC a TiN k reakci s obráběným ocelovým materiálem (ve srovnání s WC) jsou cermety velmi rozšířenými řeznými materiály pro dokončovací obrábění ocelí, kde jsou schopny vytvořit plochy s velmi nízkou drsností povrchu. S výhodou je lze použít i pro obrábění korozi-vzdorných ocelí, kde vykazují vyšší trvanlivost než nepovlakované slinuté karbidy, nemohou být používány pro obrábění žáruvzdorných slitin s vysokým obsahem niklu. Analýza užití cermetů, ve srovnání s ostatními materiály pro řezné nástroje, je uvedena v tabulce č.6.4.

Tab.6.4 Užití cermetů

Nástrojový materiál	Aplikace	Analýza
PD	Obrábění slitin hliníku vysokými řeznými rychlostmi. Neželezné kovy a nekovové materiály.	Lze použít cermety, ale při nižších řezných rychlostech; náklady na jeden břit jsou při jejich použití výrazně nižší.
PKNB	Tvrdé obrobky a obrábění šedých litin vysokými řeznými rychlostmi.	Nelze obrábět pomocí cermetů při stejných rychlostech; náklady na jeden břit jsou u cermetů výrazně nižší.
Řezná keramika lisovaná za studena	Vysokorychlostní soustružení a zapichování ocelí a litin.	Cermety jsou univerzálnější a levnější, ale nemohou pracovat při vysokých řezných rychlostech.
Řezná keramika lisovaná za tepla	Soustružení a zapichování tvrdých obrobků, vysokorychlostní dokončovací obrábění ocelí a litin.	Tvrdé obrobky nelze obrábět pomocí cermetů; oceli a litiny nelze obrábět při stejných rychlostech; cermety jsou univerzálnější a levnější.
Řezná keramika Si ₃ N ₄	Hrubovací a polohrubovací soustružení a frézování šedých litin vysokými řeznými rychlostmi za nepříznivých podmínek.	Pomocí cermetů nelze obrábět šedé litiny při stejných řezných rychlostech, ale při středních rychlostech mohou být levnější.
Povlakované SK	Obecné použití pro obrábění ocelí (včetně korozi-vzdorných), šedých litin, atd.	Cermety mohou pracovat při vyšších řezných rychlostech, mají vyšší trvanlivost a jsou levnější při pohrubovacích a dokončovacích operacích.
Slinuté karbidy	Houževnaté nástrojové materiály pro nižší řezné rychlosti a různé obráběné materiály.	Cermety mohou pracovat při vyšších rychlostech, zaručují lepší obrobenu plochu.

Cermety nabízejí výhody vyšších řezných rychlostí, ve srovnání s konvenčními SK, protože TiC je termochemicky stabilnější než WC. Užití první generace cermetů TiC-Mo-Ni bylo však omezeno pouze na oblast lehkého řezání, protože jejich houževnatost a odolnost proti vydrolování byly ve srovnání s běžnými SK nižší. Tyto materiály byly z trhu řezných nástrojů postupně vytlačeny a v současnosti nejsou již téměř používány.

Hlavní pozornost při dalším vývoji cermetů byla věnována zvýšení pevnosti a odolnosti proti vydrolování. Tyto vlastnosti byly zlepšeny přidáním TaC a WC. Výsledkem bylo rozšíření oblasti užití na soustružení středními hodnotami posuvové rychlosti a lehké frézování. To upevnilo pozici cermetů v oblasti soustružení a hlavní aplikace druhé generace cermetů byla zaměřena na obrábění nižší rychlostí a vyšším posuvem, na rozdíl od obrábění vysokými rychlostmi, doporučovaného v počátečním období užití.

Třetí generace cermetů je založena na kombinaci TiC-TiN, podíl TiC začal být v polovině 70.let postupně nahrazován nitridem nebo karbonitridem titanu (přidáním TiN se zmenšila velikost zrn tvrdé fáze a vzrostla tvrdost). Ve srovnání s předchozími generacemi mají tyto materiály nižší pórovitost, vyšší houževnatost a odolnost proti opotřebení a vydrolování. Většina v současné době používaných cermetů je vyráběna na bázi TiC-TiN.

6.4. ŘEZNÁ KERAMIKA

Keramika je obecně charakterizována jako **převážně krystalický materiál, jehož hlavní složkou jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru**. Tato definice zahrnuje nejen tradiční keramiku (porcelán, cement, cihly), ale i řezné a brousící materiály a řadu tzv. "nových" (speciálních, konstrukčních, strojírenských, průmyslových, pokrokových, příp. jinak nazývaných) keramických látek. Pro novou keramiku je charakteristické to, že je vyráběna z poměrně čistých surovin jako keramika syntetická. Většina látek zařazovaných pod pojem "nová keramika" jsou látky krystalické na rozdíl od tradiční keramiky (např. porcelán, glazury), která obsahuje i značný podíl skelné (amorfní) fáze. Keramické látky jsou vázány meziatomovými vazbami iontovými a kovalentními, jejich vazba není ale čistě iontová nebo čistě kovalentní, obvykle se vyskytují oba typy vazby současně. V krystalové struktuře převažují složité mřížky kubické a hexagonální.

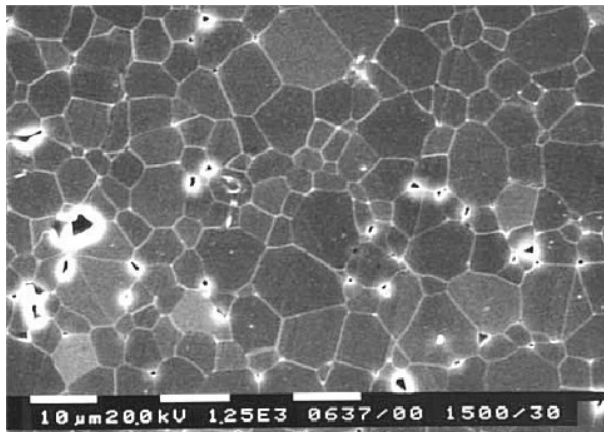
Tab.6.5 Vybrané vlastnosti nástrojových materiálů

Vlastnost	Nástrojový materiál					
	Slinutý karbid WC+Co	Cermet MO ₂ C +TiCN+Ni	Al ₂ O ₃ +ZrO ₂	Al ₂ O ₃ +TiC	Si ₃ N ₄ + přísady	
Měrná hmotnost [g cm ⁻³]	12,0 ÷ 15,1	5,6 ÷ 7,0	3,8 ÷ 4,0	4,2 ÷ 4,3	3,2 ÷ 3,4	
Pevnost v ohybu [MPa]	1000 ÷ 2400	1150 ÷ 1800	600 ÷ 800	600 ÷ 900	600 ÷ 950	
Tvrdost	[HV]	1900	2000	1600 ÷ 2200	1000 ÷ 2400	1800 ÷ 2000
	[HRA]	90 ÷ 92	91 ÷ 93	91 ÷ 94	93 ÷ 95	86 ÷ 95
Modul pružnosti v tahu [GPa]	520 ÷ 660	500	340 ÷ 400	370 ÷ 420	300 ÷ 380	
Souč. délkové roztažnosti [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	4,5 ÷ 7,0	7,0 ÷ 7,5	7,0 ÷ 8,5	1,5 ÷ 3,5		
Měrná tepelná vodivost [W m ⁻¹ K ⁻¹]	80	30	20 ÷ 30	20 ÷ 25	30 ÷ 50	
Lomová houževnatost [MPa m ^{1/2}]	10 ÷ 17	10	4 ÷ 6		5 ÷ 7	

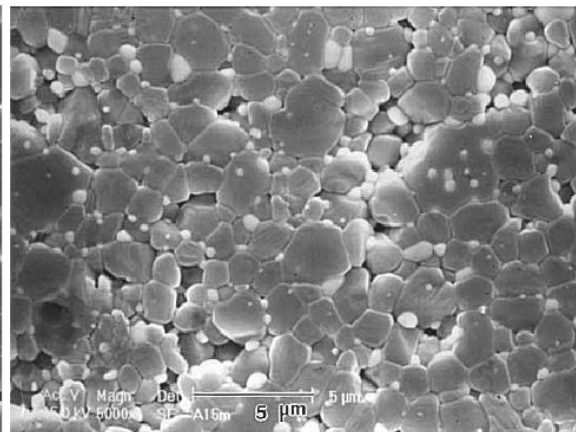
K základním vlastnostem polykrystalických keramických materiálů patří malý rozměr zrna (velmi často pod 1 μm), vysoká tvrdost, nízká houževnatost (důvod zvýšené křehkosti) a nízká měrná hmotnost (tabulka č.6.5 uvádí porovnání vybraných vlastností řezných keramik, slinutého karbidu a cermetů).

Keramické materiály, využívané pro výrobu vyměnitelných břitových destiček řezných nástrojů, jsou obvykle rozdělovány následovně:

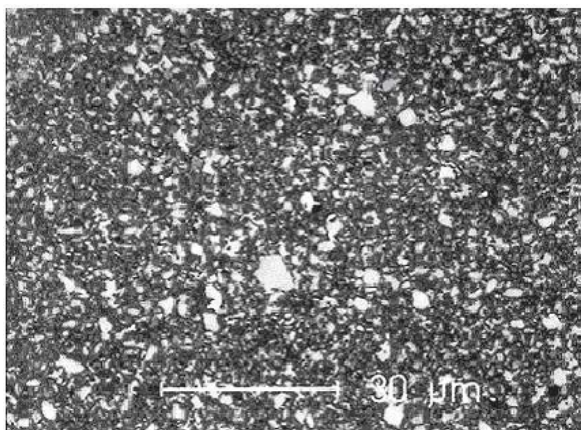
- oxidická keramika: - čistá (čistý Al_2O_3), obr.6.22,
 - polosměsná ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2+\text{CoO}$), obr.6.23,
 - směsná ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2+\text{TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}+\text{TiN}$), obr.6.24,
- nitridová (Si_3N_4 , $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{Y}_2\text{O}_3$, $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{TiN}$, sialony), obr.6.25, 6.26
- vyztužená (oxidická nebo nitridová keramika vyztužená pomocí whiskerů SiC nebo Si_3N_4), obr.6.27.



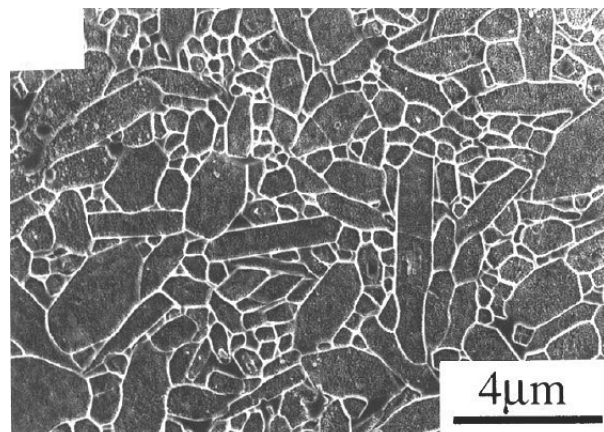
Obr.6.22 Keramika Al_2O_3



Obr.6.23 Keramika $\text{Al}_2\text{O}_3+15\%\text{ZrO}_2$



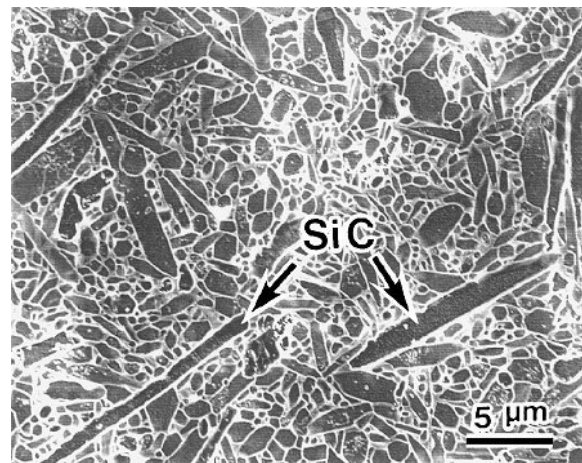
Obr.6.24 Keramika $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$



Obr.6.25 Keramika Si_3N_4



Obr.6.26 Keramika typu sialon



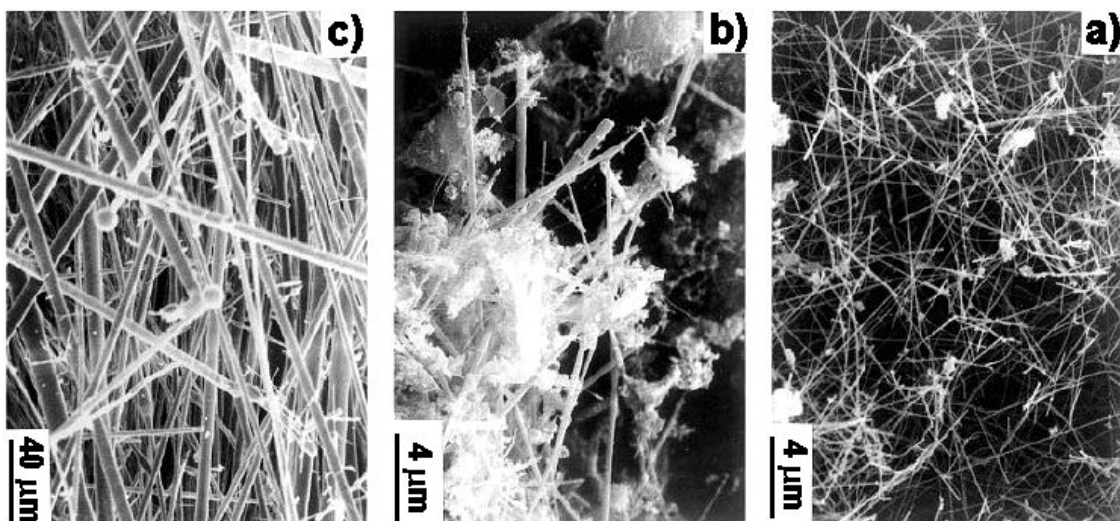
Obr.6.27 Keramika Si_3N_4 vyztužená SiCw

První čisté oxidické keramické materiály (na bázi Al_2O_3), s úspěchem aplikované pro řezné nástroje, se na trhu objevily koncem 50.let 20. století. Obsahovaly Al_2O_3 a malé množství (obvykle 1%) slinovacích přísad, např. MgO. Pevnost v ohybu se pohybovala v rozsahu 400-500 MPa, lomová houževnatost dosahovala hodnot $K_{IC} = 3 - 4 \text{ MN m}^{-3/2}$. Oxid hlinitý má nejvyšší termochemickou stabilitu mezi nástrojovými materiály a vykazuje vynikající odolnost proti opotřebení při obrábění vysokými řeznými rychlostmi.

Keramiky typu $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ vyráběné metodou vysokoteplotního lisování byly vyvinuty začátkem 70.let a měly zlepšit odolnost proti vydrolování a spolehlivost keramických řezných nástrojů. Ohybová pevnost vzrostla na 1000 MPa a lomová houževnatost na $4\text{-}5 \text{ MN m}^{-3/2}$, značně byla zvýšena odolnost proti vydrolování ostří. Jde o dnes nejrozšířenější řeznou keramiku, která se významně zasloužila o vstup keramických materiálů na trh řezných nástrojů. Slinovací proces byl postupně změněn z vysokoteplotního lisování na vysokoteplotní izostatické lisování (HIP), aby se snížila cena a zvýšila produktivita.

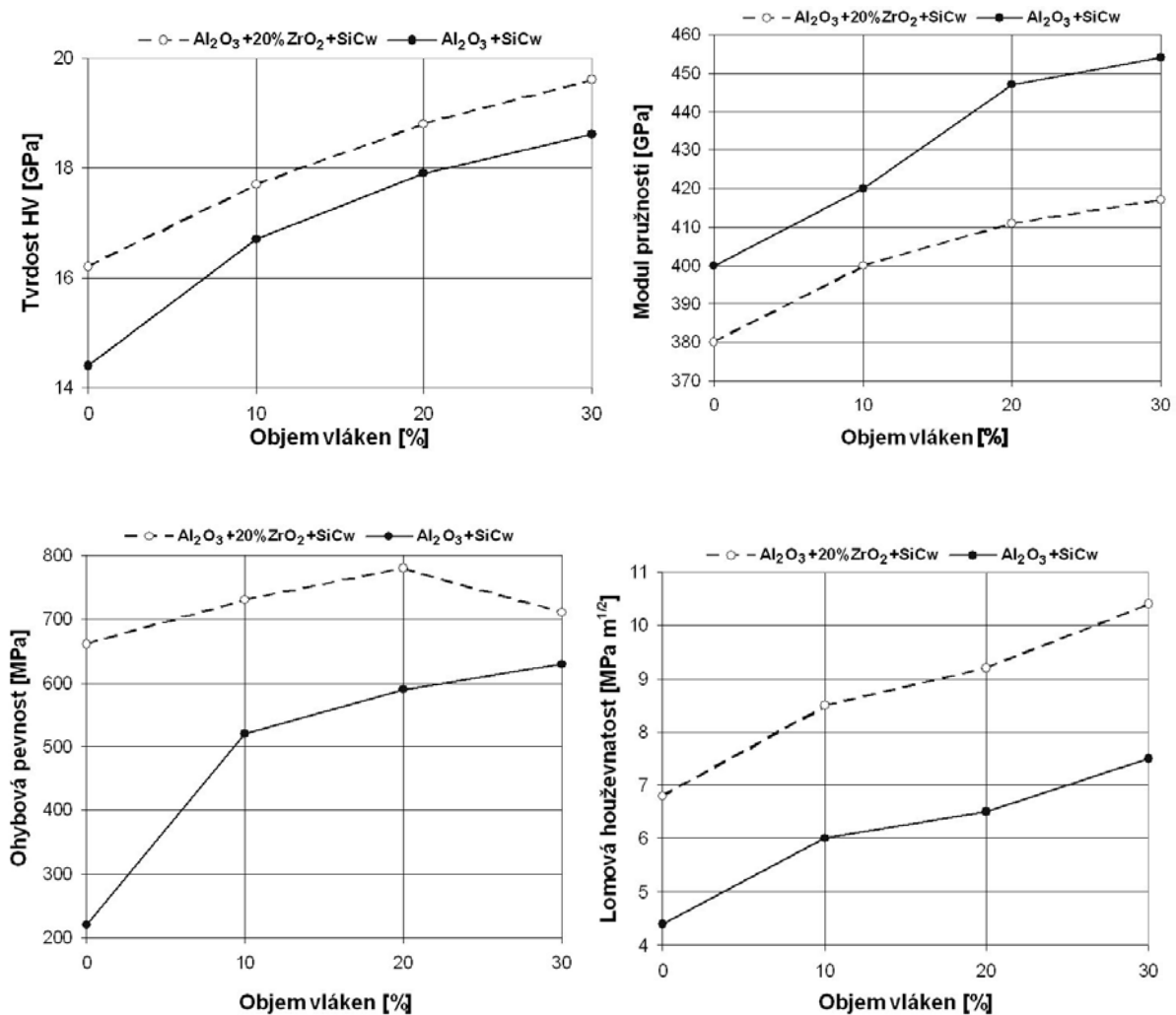
Výroba keramik na bázi nitridu křemíku je při atmosférickém tlaku, v důsledku nižší samodifúze a teploty rozkladu Si_3N_4 , mnohem obtížnější než u oxidických keramik. Proto je při výrobě nitridové řezné keramiky nutné dopovat výchozí prášek slinovacími přísadami (kovy, sloučeniny kovů) a aplikovat technologický postup vysokoteplotního lisování nebo vysokoteplotního izostatického lisování (HIP). Další problémy při slinování nitridu křemíku způsobuje pevná kovalentní vazba mezi atomy křemíku a dusíku, která zabraňuje dosažení teoretické hustoty materiálu. Přes všechny uvedené problémy lze však při přesném dodržení technologie výroby získat v nitridové keramice vynikající nástrojový materiál pro soustružení šedých litin řeznými rychlostmi přes 1000 m min^{-1} .

V polovině 80.let byly vyvinuty kompozity Al_2O_3 vyztužené vlákny SiC (whiskery - obr.6.28), v rozsahu 20-30 objem.%. Jejich ohybová pevnost je stejná jako u keramik typu $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$, lomová houževnatost je mnohem vyšší, kolem $9 \text{ MN m}^{-3/2}$ (obr.6.29). Přidáním vláken SiC se značně zvýší odolnost proti vydrolování a vylamování ostří, v důsledku mechanického zpevnění a vyšší odolnosti proti oxidaci. Výsledkem jsou vynikající řezné výkony těchto materiálů při obrábění superslitin, kde nevyztuženým keramickým materiálům hrozí nebezpečí porušení právě v důsledku vydrolování a vylamování ostří.



a - růst přímým ukládáním atomů Si a C v rovině růstu, z par obsahujících Si a C
b - růst ve formě slupky v surovině, obsahující kovové příměsi
c - růst z kapek při rozpouštění par obsahujících Si a C

Obr.6.28 Whiskery SiC vyrobené různými technologiemi



Obr. 6.29 Vliv vyztužujících vláken na vlastnosti oxidických keramik

V současné době jsou pomocí whiskerů SiC nebo Si_3N_4 vyztužovány i další typy keramik, např. $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ nebo Si_3N_4 . Whiskery jsou vlákna submikrometrového průměru $d = 0,5 - 1,0 \mu\text{m}$ o délce $l = (10 - 20)d$. Vzhledem k technologii výroby se pevnost těchto vláken blíží hranici jejich teoretické pevnosti a proto výrazně zpevňují i materiál, ve kterém jsou rovnoměrně rozptýleny. Vlastnosti keramických materiálů vyztužených pomocí whiskerů jsou ovlivněny zejména poměry na rozhraní matrice-vlákno, velikostí whiskerů a jejich množstvím v matrici. Vazba mezi vlákny a matricí musí být čistě mechanická (matrice "svírá" vlákno), bez jakékoli chemické reakce, která zhoršuje vlastnosti vláken. Whiskery zlepšují mechanické vlastnosti kompozitu zejména proto, že brání šíření trhlin a to z následujících důvodů:

- při uvolňování vláken, která jsou rovnoběžná s rovinou trhliny dochází k odklonu směru šíření trhliny,
- vlákna kolmá k rovině trhliny se porušují v rovině trhliny, nebo několik mikrometrů od ní,
- vlákna, která se nacházejí v bezprostřední blízkosti zrn matrice, vytvářejí účinné zpevňovací můstky (pouze v případě, kdy je jejich délka minimálně dvakrát větší, než je rozměr zrn).

Nejnovější trendy v oblasti vývoje řezných keramik patří smíšeným oxidicko - nitrídkovým keramikám, obvykle ve složení $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Y}_2\text{O}_3$. Vzhledem k uvedenému složení jsou tyto materiály též často označovány jako keramiky Sialonové (SiAlON - křemík, hliník,

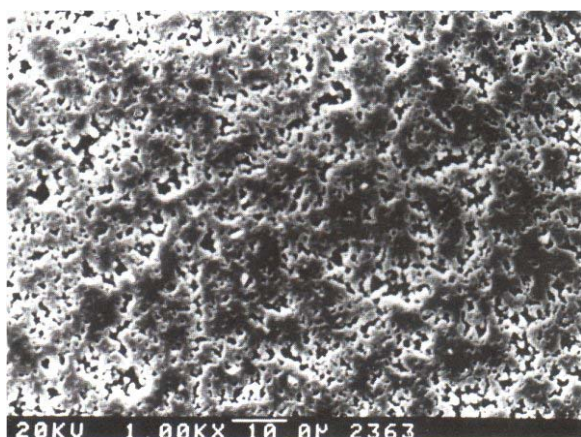
kyslík, dusík). Materiály tohoto typu mají poměrně vysokou houževnatost a své výhodné vlastnosti si zachovávají i při působení vysokých teplot. Ve srovnání s keramikami na bázi Al_2O_3 mohou obrábět šedé litiny při dvojnásobných rychlostech posuvu, nehodí se ale pro obrábění ocelí a tvárných litin, kde vykazují poměrně velkou intenzitu opotřebení. Proto jsou jejich současné aplikace omezeny na soustružení a frézování šedých litin, někdy se užívají pro soustružení superslitin.

6.5. SUPERTVRDÉ NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY

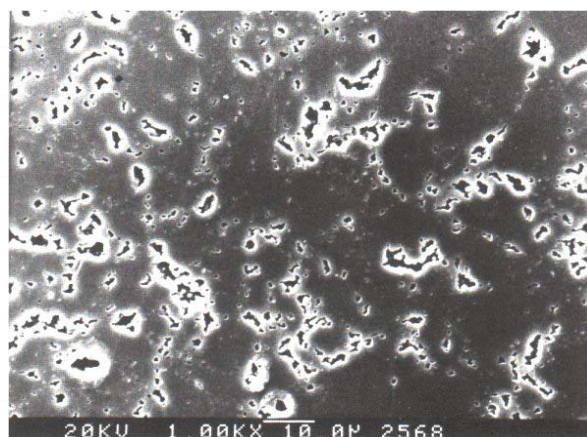
Pod všeobecný název supertvrdé materiály lze zahrnout dva synteticky vyrobené materiály a to **polykrystalický diamant** (PD - struktury na obrázcích č.6.30, 6.31) a **polykrystalický kubický nitrid boru** (PKNB - struktury na obrázcích č.6.32, 6.33). Vzhledem k vynikajícím mechanickým vlastnostem (pevnost v tlaku, tvrdost - tab.6.6) lze PD i PKNB s výhodou použít jako řezné nástrojové materiály pro speciální aplikace.

Tab.6.6 Vlastnosti supertvrдых materiálů

Vlastnost	Diamant		PKNB
	monokrystal	polykrystal	
Měrná hmotnost [g cm^{-3}]	3,52	3,6 - 4,1	3,4 ÷ 4,3
Délka strany kubické mřížky [nm]		0,3567	0,3616
Pevnost v tlaku [GPa]		4,7	3,8
Mikrotvrdost [HV]	12000	7000 ÷ 10000	5000 ÷ 8000
Modul pružnosti v tahu [GPa]		925	680
Modul pružnosti ve smyku [GPa]		430	280
Lomová houževnatost K_{IC} [$\text{MN m}^{-3/2}$]		8,0	5,0
Poissonova konstanta [-]		0,09	0,22
Koeficient délkové roztažnosti při 200 °C [10^{-6}K^{-1}]	2,5	4,0	4,9
Měrná tepelná vodivost [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]		120	100 ÷ 600
Teplotní stálost [°C]		700 ÷ 800	1500 ÷ 1600



Obr.6.30 PD Syndite 002
firmy de Beers (JAR)

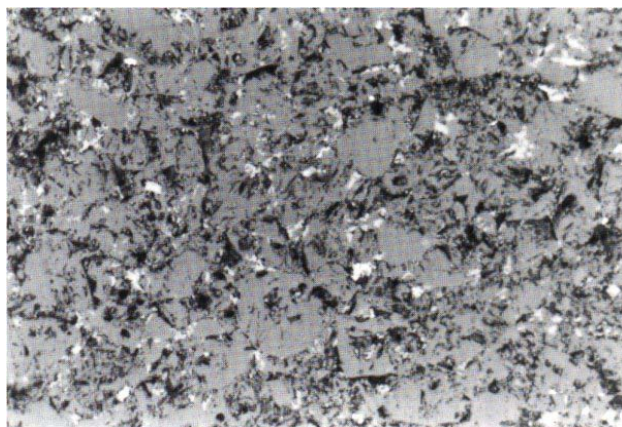


Obr.6.31 PD Syndite 025
firmy de Beers (JAR)

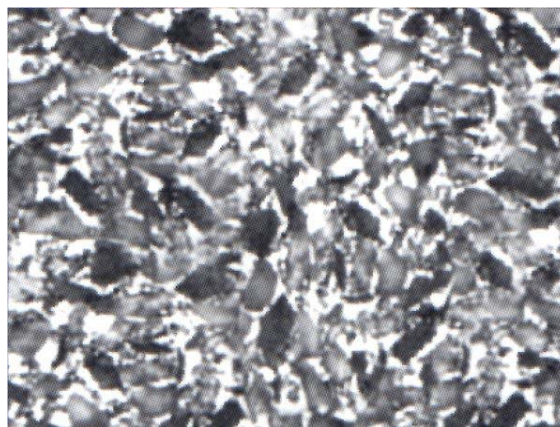
Protože diamant má poměrně nízkou teplotní stálost (při dosažení teplot nad 800 °C se mění na grafit), nesmí být používán pro obrábění materiálů na bázi železa (oceli, litiny), kde by při nadměrném ohřevu docházelo k silné difúzi mezi nástrojem a obráběným materiálem a

tím i k velmi rychlému opotřebení v důsledku probíhajících chemických reakcí, hlavně na čele nástroje.

Aplikační možnosti PD při obrábění neželezných materiálů jsou naopak velmi široké: hliníkové slitiny (v některých případech lze použít řezné rychlosti, které přesahují hodnotu 5000 m min^{-1}), zejména s vysokým obsahem křemíku, který působí na nástroj velmi silným abrazivním účinkem, bronzy, mosazi, kompozity vyztužené různými druhy vláken (skleněná, uhlíková, aramidová - Kevlar, polyetylenová, atd.), titan a jeho slitiny, keramika, grafit, tvrdé přírodní materiály (žula, mramor, apod.).

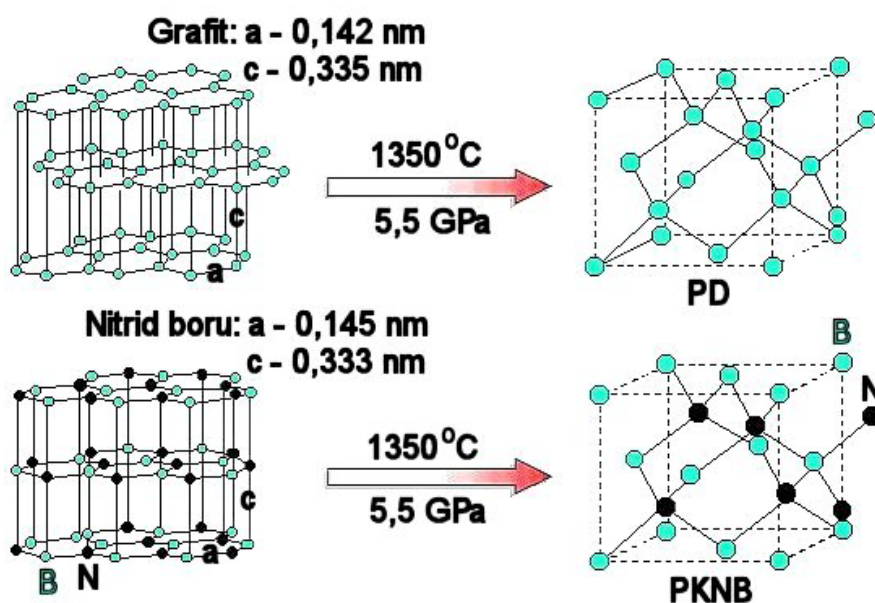


Obr.6.32 PKNB DBC50
firmy de Beers (JAR)



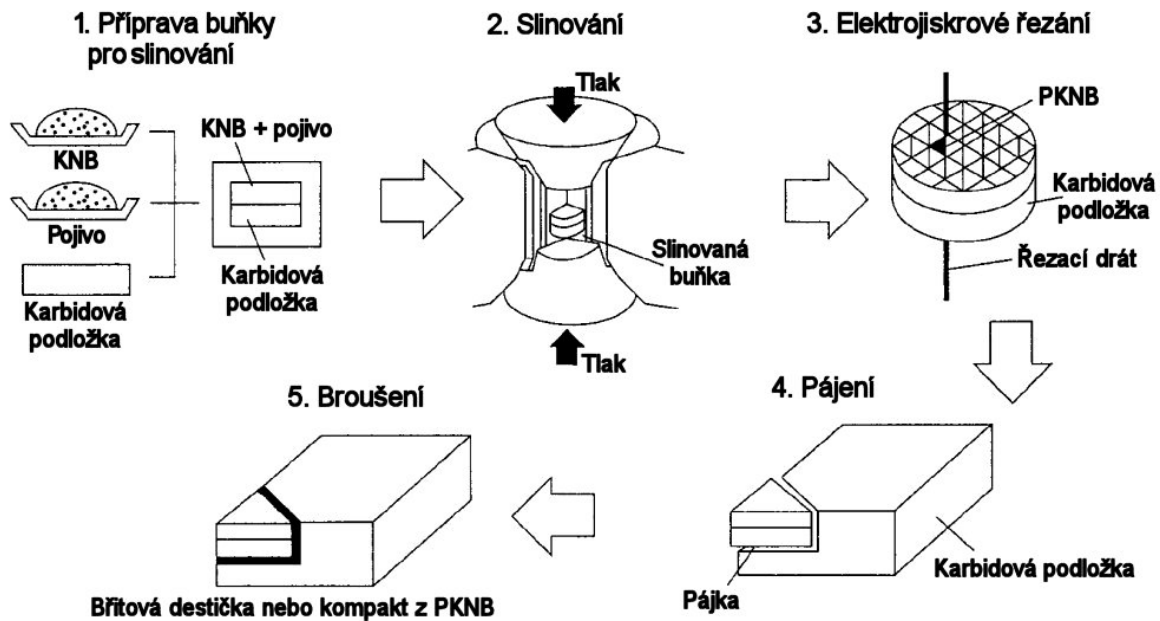
Obr.6.33 PKNB BX380 firmy Toshiba
Tungaloy (Japonsko)

Pro obrábění diamantovými nástroji je doporučováno chlazení běžnými řeznými kapalinami, na které nejsou kladeny žádné speciální požadavky. Je však požadováno, aby oběhové čerpadlo bylo schopno dodávat kapalinu do místa řezu pod vysokým tlakem. Protože nástroje z PD pracují obvykle za vysokých řezných rychlostí, musí mít použitý obráběcí stroj vysoký výkon a tuhost, a s ohledem na vysoké úběry obráběného materiálu je též třeba pamatovat na efektivní odstraňování třísek z místa řezu.

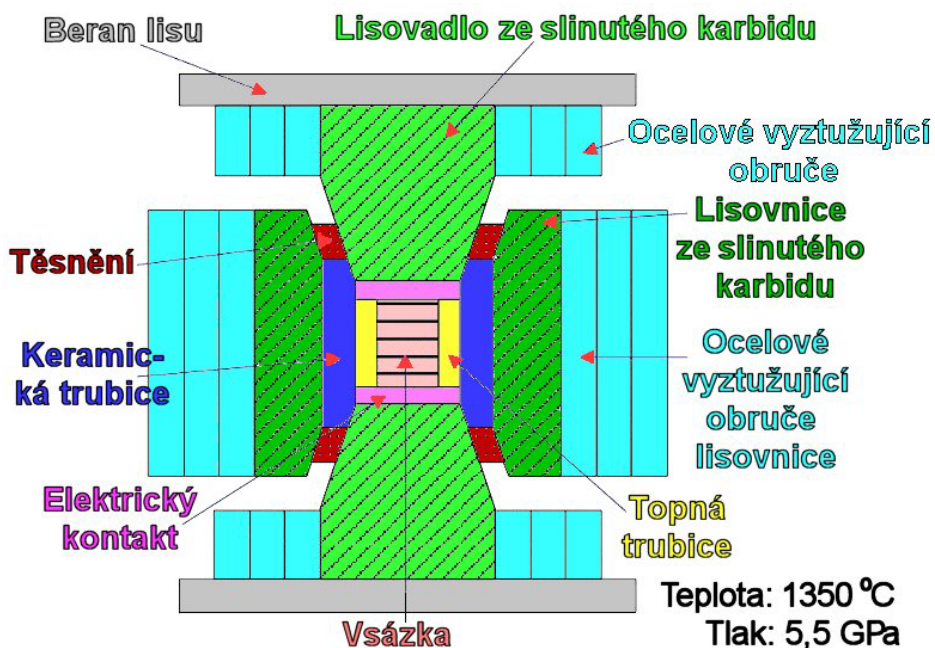


Obr.6.34 Mřížka PD a PKNB

Průmyslově je diamant vyráběn z velmi čistého grafitu, kubický nitrid boru z nitridu boru. Grafit i nitrid boru (někdy též nazýván „bílý grafit“) mají hexagonální mřížku (obr.6.34) a podobají se i některými vlastnostmi, jako je velmi nízká tvrdost, nízký koeficient tření a dobrá elektrická vodivost. Působením vysoké teploty a tlaku se hexagonální mřížka grafitu i nitridu boru transformuje na mřížku kubickou. Velká deformace mřížky je důvodem vzniku velkých vnitřních napětí, což se navenek projeví velmi vysokou tvrdostí vyrobeného diamantu a kubického nitridu boru. Postup výroby břitových destiček z PKNB je schématicky uveden na obrázku č.6.35, detail slinovacího zařízení na obrázku č.6.36. Postup výroby břitových destiček z PD je analogický, rozdíl je pouze v tom, že diamantové destičky nejsou vyráběny ve formě kompaktních celků.



Obr.6.35 Postup výroby vyměnitelné břitové destičky z PKNB



Obr.6.36 Slinovací zařízení

7. OBRÁBĚCÍ STROJE

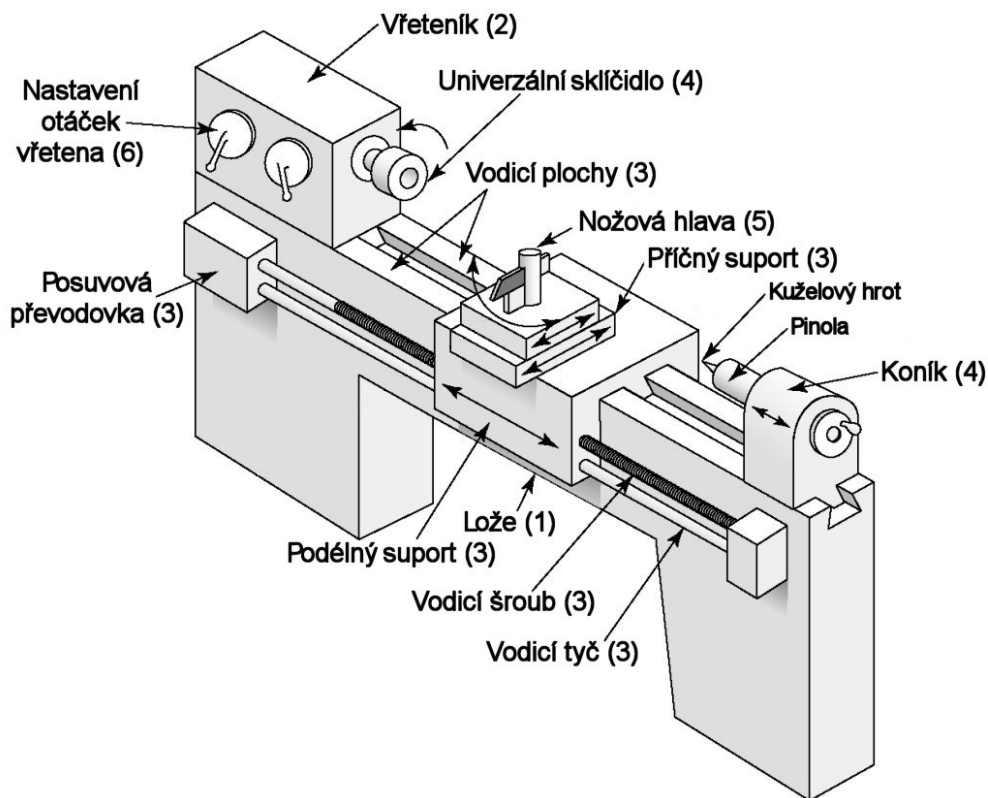
Obráběcí stroje představují základní prvek obráběcího systému (stroj-nástroj-obrobek), ve kterém se realizuje vlastní obráběcí proces. Technologické vlastnosti obráběcích strojů významně ovlivňují výsledný efekt obráběcího procesu jak z hlediska jeho hospodárnosti, tak i z hlediska parametrů obrobeneé plochy.

Obráběcí stroje lze charakterizovat z různých technologických hledisek, jako např. *způsobu obrábění, konstrukčně-technologického provedení, stupně mechanizace automatizace, velikosti* (rozměry obrobku a možnosti jeho upnutí) a pod.

Podle způsobu obrábění se rozlišují obráběcí stroje *soustružnické, vyvrtávací, frézovací, hoblovací, protahovací, brousící, elektroerozivní*, atd.

Podle konstrukčně-technologického provedení lze obráběcí stroje dělit na *univerzální* (univerzální soustruhy, univerzální frézky, univerzální brusky), *speciální* (podtáčecí soustruh závitové frézky, závitové brusky) a *jednoučelové* (obráběcí stroje koncipované pro jednu operaci).

Podle stupně mechanizace a automatizace se používají stroje *ručně ovládané* (řízení se provádí tlačítky, pákami, ovládacími kolečky), *poloautomatické* (veškeré činnosti obráběcího procesu probíhají automaticky, zásahy obsluhy jsou omezeny na upnutí polotovaru, odepnutí obrobeneé součásti a spuštění pracovního cyklu) a *automatické* (mimo pracovní cyklus je rovněž automatizováno upnutí polotovaru a odebrání obrobeneé součásti).



Obr.7.1 Hlavní funkční části univerzálního hrotového soustruhu

Obecně lze funkční části všech obráběcích strojů rozdělit do následujících skupin (obrázek č.7.1):

- 1) nosné prvky (slouží k uložení všech mechanismů a částí, nezbytných k realizaci rezného procesu) - *rámy, základové desky, lože, stojany, konzoly, stoly*,

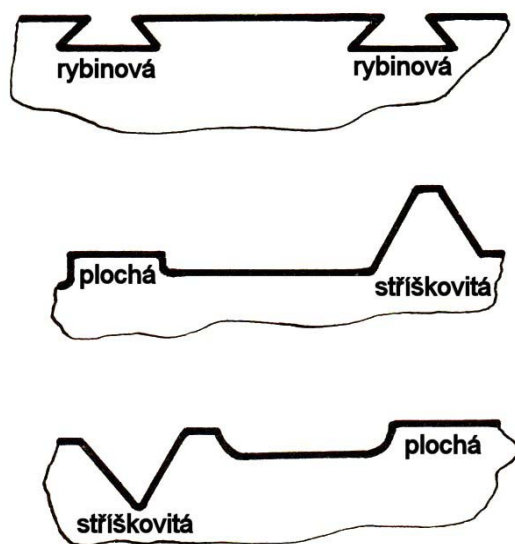
- 2) části a mechanismy pro vyvození a vedení hlavního pohybu - *vřeteníky, vřetena, náhony, převody, vodící plochy,*
- 3) části a mechanismy pro vyvození a vedení posuvového pohybu - *suporty, náhony, vodící plochy, vodící šrouby,*
- 4) zařízení pro upnutí a polohování obrobku,
- 5) zařízení pro upnutí a polohování nástroje,
- 6) řídicí a ovládací prvky a mechanismy,
- 7) přídavná zařízení - *hydraulické jednotky, zařízení pro cirkulaci řezné kapaliny, zařízení pro odvod třísek, zásobníky a podavače obrobků,* atd.

7.1. VODICÍ PLOCHY

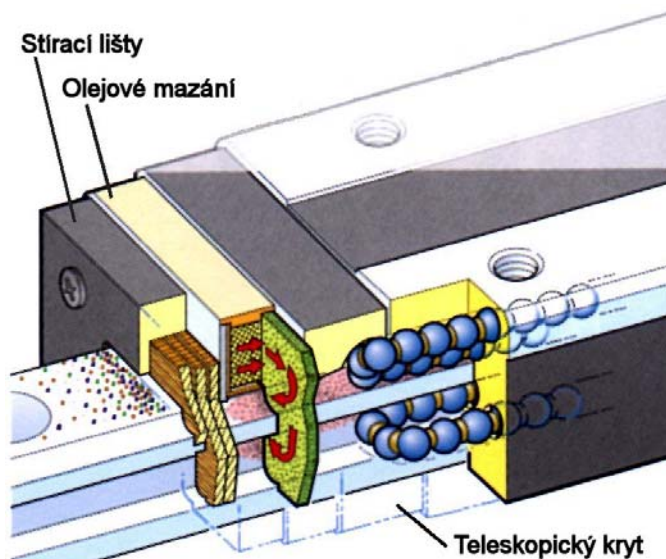
Vodící plochy slouží pro přesné vedení přímočarých i rotačních pohybů jednotlivých pohyblivých částí obráběcího stroje. Protože jsou určeny pro zachycování řezných odporů a tlumení vibrací, musí být dostatečně pevné a tuhé, s minimální tepelnou deformací. Mají významný vliv na přesné nastavení vzájemné polohy nástroje vůči obrobku i vedení pohybů a proto se rozhodujícím způsobem podílejí na přesnosti obrábění. Vodící plochy musí být účinně mazány, musí umožňovat snadné odstraňování třísek a musí být chráněny proti poškození od třísek (např. u valivých vedení CNC strojů teleskopickými kryty).

Vodící plochy, určené pro vedení přímočarých pohybů, lze z konstrukčního hlediska rozdělit na:

- kluzné (ploché, stříškovité, rybinové) - obr. 7.2,
- valivé - obr.7.3,
- hydraulické.



Obr.7.2 Kluzné vodící plochy



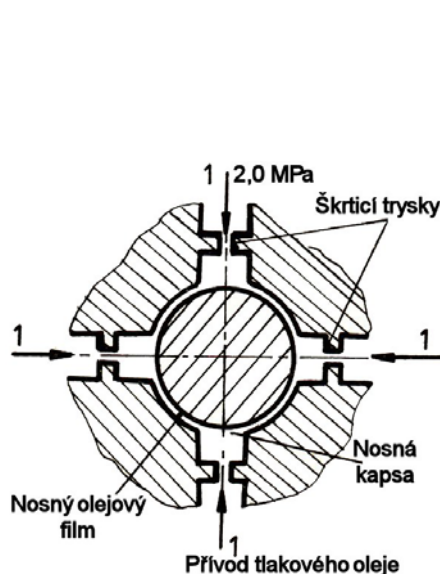
Obr.7.3 Valivá vodící plocha

Kluzné vodící plochy se vyznačují nízkými měrnými tlaky, vysokou únosností, snadnou výrobou a relativně nízkou cenou. K jejich nevýhodám patří, že pro přechod z klidového stavu do pohybu vyžadují velký počáteční silový impulz (proto se nepoužívají u číslicově řízených obráběcích strojů). Tato skutečnost se může projevit negativním vlastním kmitáním, což vede k zvýšenému opotřebení ploch a snížení přesnosti výroby.

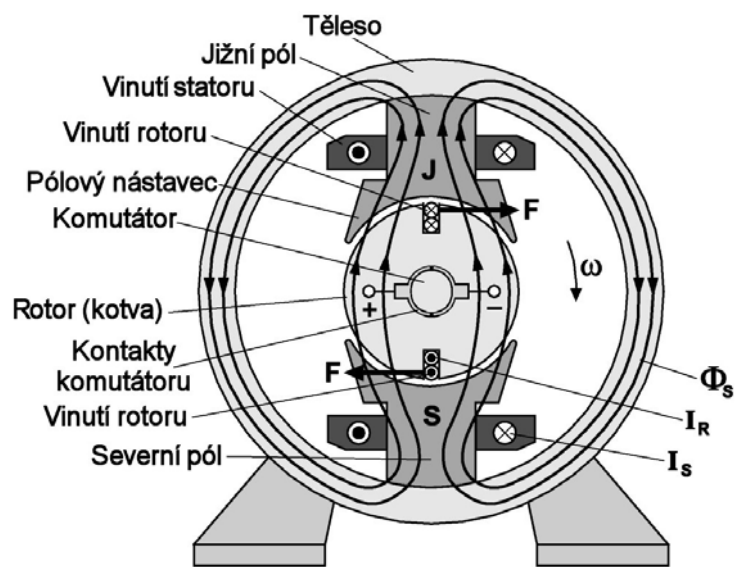
Měrné tlaky u valivých vodících ploch jsou vyšší než u ploch kluzných, proto musí být rozloženy na větší styčnou plochu. Valivé plochy jsou velmi přesné, pro libovolný stav vyžadují minimální počáteční silový impuls. Jsou drahé a náročné na výrobu, proto se používají převážně u číslicově řízených obráběcích strojů.

Hydrostatické vodící plochy pracují na principu tlakového média (většinou oleje), které spolehlivě oddělí stykové plochy navzájem se pohybujících částí obráběcího stroje. Jsou velmi náročné na výrobu i provoz (nedostatečné těsnění může způsobit únik oleje).

Vodící plochy, určené pro vedení rotačních pohybů, se stejně jako plochy pro vedení přímočarých pohybů dělí z konstrukčního hlediska na kluzné (kluzná ložiska), valivé (standardní valivá ložiska) a hydraulické (obr.7.4). Musí zaručovat vysokou tuhost, vysokou přesnost chodu, minimální tření za všech pracovních podmínek a uložení bez vůle nebo s minimální vůlí (v radiálním i axiálním směru) u nových strojů, i u strojů, které jsou již delší dobu v provozu.



Obr.7.4 Hydrostatické uložení vřetena



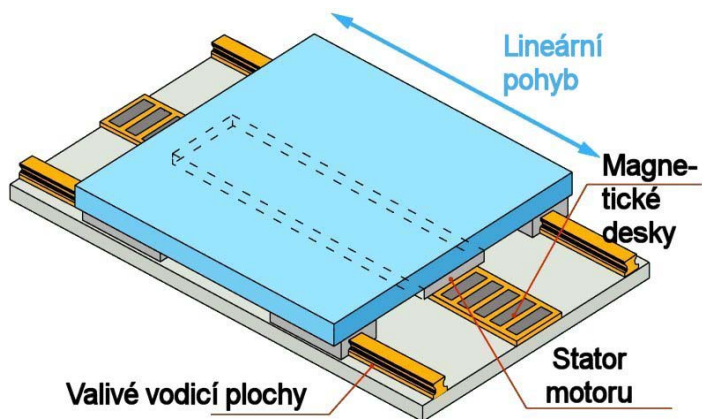
Obr.7.5 Elektromotor s jednou pólovou dvojicí

7.2. ELEKTRICKÉ POHONY

K pohonu obráběcích strojů se většinou používají asynchronní elektromotory na střídavý proud s jmenovitými otáčkami 750 až 3000 min⁻¹. U menších a středně velkých strojů je pohon všech pohybových mechanismů zpravidla zajištěn jedním elektromotorem (většinou s kotvou nakrátko), u větších strojů a strojů číslicově řízených se používají samostatné elektromotory pro pohon pracovního vřetena, jiné pro pohon posuvových pohybů, další pro rychloposuvy apod. Otáčky asynchronních motorů jsou určeny počtem pólových dvojic statoru, podobně jako je tomu u motorů synchronních, pro které platí:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad [\text{min}^{-1}], \quad (7.1)$$

kde: f [Hz] - frekvence sítě (50 Hz),
 p [-] - počet pólových dvojic.

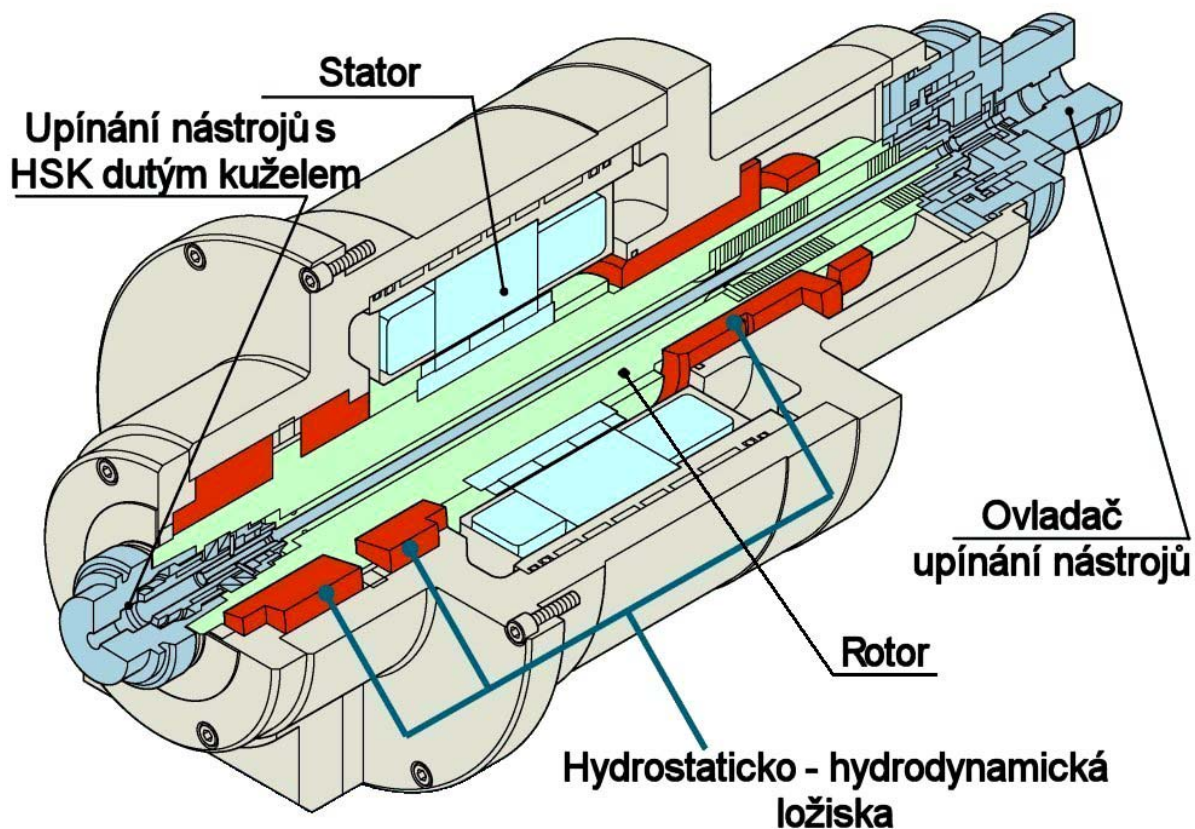


Obr. 7.6 Lineární elektromotor

ky komutátoru. Předností uvedených elektromotorů je jejich derivační charakteristika (otáčky nejsou závislé na vnějším zatížení).

Některé moderní obráběcí stroje využívají pro pohon přímočarých pohybů lineární elektromotory (obrázek č. 7.6) a pro pohon rotačního hlavního pohybu elektromotory integrované s vřetenem (obrázek č. 7.7).

V menší míře se používají též trojfázové regulační komutátorové elektromotory (obr. 7.5), které umožňují regulaci otáček v rozsahu 1:2,5 až 1:4. Otáčky jsou regulovány buď změnou napětí v rotoru (pomocí regulačního transformátoru, přičemž stator je zapojen na síť) nebo natáčením kartáček komutátoru. Při tomto způsobu regulace je do sítě zapojen rotor motoru a proud do statoru se přivádí z rotoru přes kartáč-

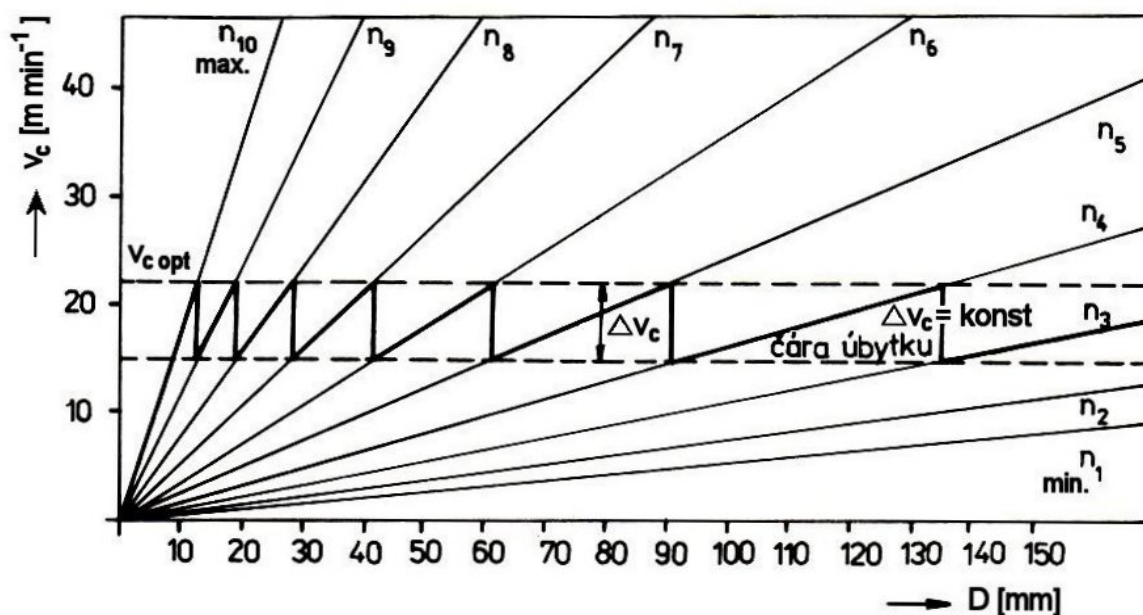


Obr. 7.7 Pohon vřetena frézovacího CNC centra Mori Seiki HVM 630

7.3. MECHANICKÉ PŘEVODOVKY

K přenosu krouticího momentu z hřídele elektromotoru na pracovní vřeteno a ke změně jeho otáček se u většiny starších obráběcích strojů používají mechanické převodovky s ozubenými koly. Změna převodu je umožněna buď přesouváním ozubených kol nebo častěji zapínáním a vypínáním spojek (zubových nebo lamelových, s ručním, elektromagnetickým nebo hydraulickým ovládním). Za výhodu převodu pomocí ozubených kol lze považovat schopnost přenášet velké krouticí momenty, k nevýhodám patří stupňovitá změna převodu a v případě nedokonalé výroby ozubení i hlučnost a kmitání.

Otáčky výstupního hřídele mechanické převodovky jsou zásadně odstupňovány v geometrické řadě (obvykle R20, s kvocientem 10^{-20}), ze které je použit každý druhý, případně třetí nebo další člen. Pomůckou pro nastavení otáček je tzv. pilový diagram - obr. 7.8.



Obr.7.8 Pilový diagram převodovky odstupňované v geometrické řadě

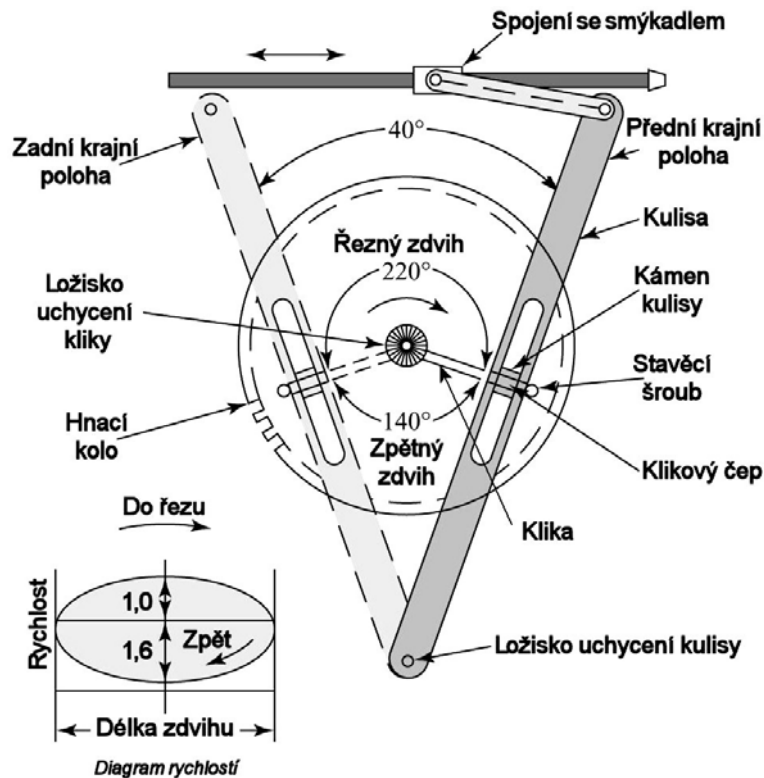
K mechanickým převodovkám lze zařadit i variátory, které umožňují plynulou změnu otáček. Krouticí moment je u nich přenášen řetězy nebo ozubenými řemeny mezi dvěma řemenicemi. Každá řemenice se skládá ze dvou kuželových talířů, které se pomocí zvláštního mechanismu vzájemně přibližují nebo oddalují, čímž se mění průměr pro styk řemene s řemenicemi a tím i převod.

7.4. MECHANIZMY PRO PŘÍMOČARÉ POHYBY

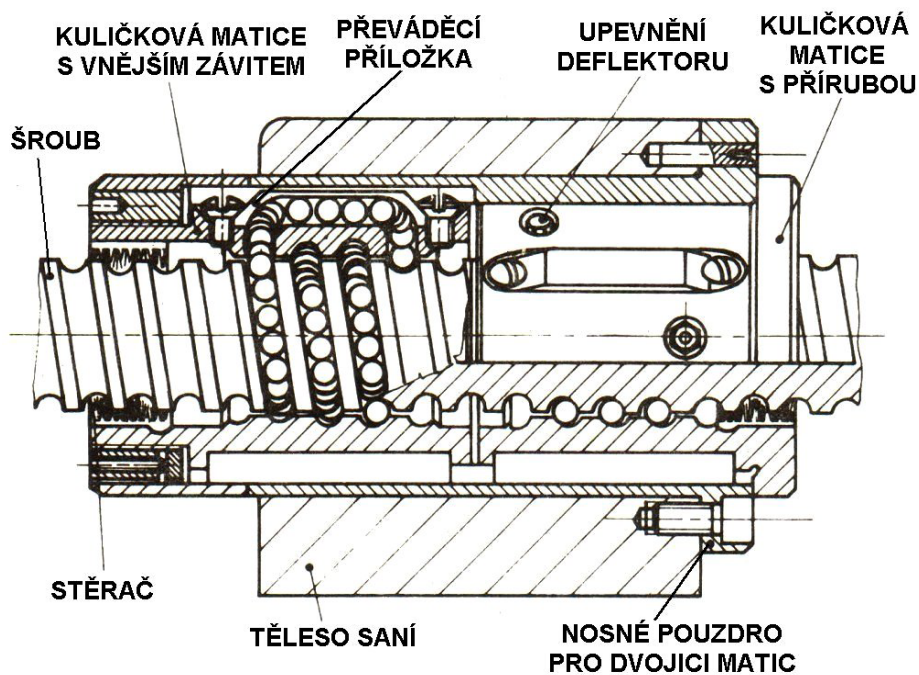
U přímočarých pohybů se pracovní pohyb skládá z vlastního řezného pohybu a ze zpětného pohybu, většinou naprázdno. Změna smyslu pohybu je v důsledku hmotnosti poháněného uzlu stroje a s ní souvisejících setrvačných sil spojena se značnými rázy, proto jsou u mechanismů pro přímočaré pohyby kladeny vysoké požadavky na tuhost.

Přímočarý pohyb se vyvozuje buď mechanicky, od základního rotačního pohybu elektromotoru, nebo je realizován hydraulickým zařízením. Základní požadavky na mechanismy pro přímočaré pohyby lze shrnout následovně:

- smysl pohybu poháněného uzlu obráběcího stroje (stůl, nástroj) se musí měnit beze změny směru pohybu základní poháněcí jednotky (většinou elektromotoru),
- mechanismus musí umožnit změnu délky a polohy zdvihu poháněného uzlu stroje,
- mechanismus musí umožnit zrychlení zpětného pohybu.



Obr.7.9 Kulisový mechanismus vodorovné obrážečky



Obr.7.10 Kuličková matice

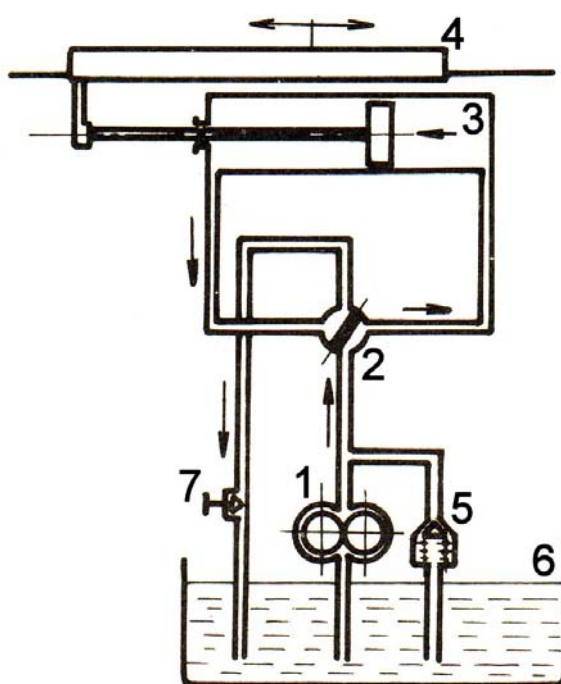
Mechanismy a zařízení pro vyvození přímočarých pohybů obráběcích strojů jsou obvykle rozdělovány následujícím způsobem:

- kulisové mechanismy (velmi často se používají pro pohon smýkadla vodorovných obrážek - obr.7.9),
- ozubené hřebeny s ozubeným kolem nebo šnekem,
- pohybové šrouby s maticí (matice bývá obvykle kuličková - obr.7.10),
- vačky,
- klikové mechanismy (používají se ojediněle),
- hydraulické pohony.

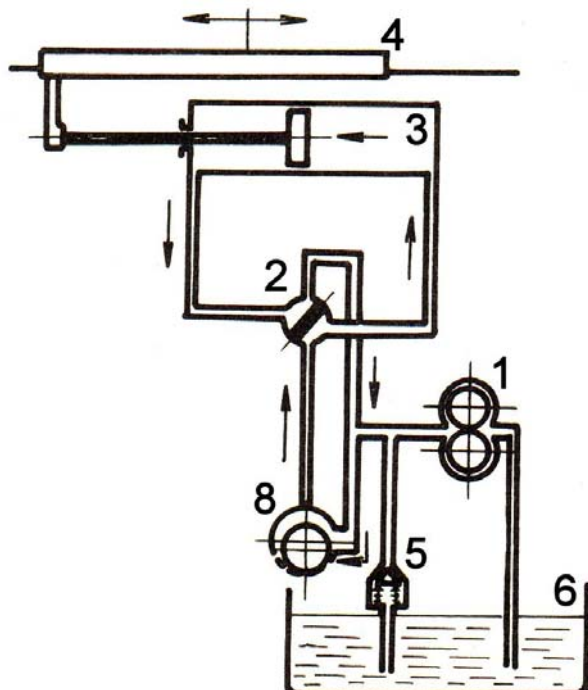
Hydraulické pohony

Používají se např. pro vyvození přímočarých pohybů pracovních stolů hoblovek a brussek, suportů revolverových a automatických soustruhů, nástrojů protahovaček. Jejich přednostmi jsou snadná plynulá regulace rychlosti pohybu, snadná změna smyslu pohybu, klidný chod stroje, vysoká bezpečnost při přetížení a jednoduchá kombinace a automatizace pracovních cyklů stroje. K nevýhodám patří vyšší pořizovací i provozní náklady a jako u všech hydraulických mechanismů, nebezpečí znečištění životního prostředí při úniku tlakového média (oleje).

Na obrázku č.7.11 je zobrazen hydraulický pohon s otevřeným okruhem (1 - zubové čerpadlo, 2 - regulační šoupátko pro změnu smyslu pohybu, 3 - válec s pístem, 4 - poháněný uzel obráběcího stroje, 5 - pojistný ventil, 6 - nádrž s pracovním médiem, 7 - škrticí ventil), u kterého je rychlost pohybu poháněného uzlu stroje regulována škrticím ventilem (vyšší rychlost při větším otevření ventilu). Hydraulický pohon s uzavřeným okruhem je na obrázku č.7.12 - označení jeho jednotlivých částí odpovídá označení na obrázku č.7.11, číslem 8 je označeno čerpadlo, které množstvím čerpaného média řídí rychlost pohybu poháněného uzlu obráběcího stroje.



Obr.7.11 Pohon s otevřeným okruhem



Obr.7.12 Pohon s uzavřeným okruhem

7.5. MECHANIZACE A AUTOMATIZACE OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

Mechanizace, tj. nahrazení ruční práce obsluhy obráběcích strojů a automatizace jejich pracovních cyklů jsou obecně platné trendy vývoje výrobního zařízení, které vedou k usnadnění a zrychlení práce, zvýšení výkonu, efektivnosti i přesnosti výroby. Mechanizovat a automatizovat lze všechny úkony, které souvisí s obsluhou a funkcí obráběcího stroje:

- úkony obsluhy:
 - nastavení požadovaných řezných podmínek (v_c , a_p , f),
 - upnutí nástroje a jeho ustavení do pracovní polohy,
 - upnutí obrobku,
 - omezení délky pracovních pohybů stolu, suportu, atd.,
 - seřízení časového sledu strojních operací a jejich provedení,
- pracovní cyklus stroje:
 - přisuv nástroje z výchozí polohy do pracovní polohy,
 - provedení řezného pohybu,
 - návrat nástroje do výchozí polohy.

Obráběcí stroje mohou být automatizovány zcela nebo částečně. U plně automatizovaných strojů (automatů) probíhá celý pracovní cyklus (výměna obráběné součásti, spuštění stroje, obrobek součásti) bez zásahu obsluhy. U částečně automatizovaných strojů (poloautomatů) je automatizován pouze vlastní cyklus obrábění, obsluha musí vyměnit obráběnou součást a spustit stroj.

Automaty i poloautomaty mají pracovní cyklus seřízen vždy jen na dané výrobní operace, prováděné v určitém sledu na konkrétním obrobku. Před započítím výroby je proto třeba jejich mechanismy seřídit, tj. nastavit délky pracovních pohybů jednotlivých uzlů stroje (suporty, nožové saně, pracovní stoly, vřeteníky, konzoly, atd.) podle rozměrů a tvarů ploch, které se budou obrábět. Dále je třeba ustavit nástroje do pracovních poloh a nastavit řezné a posuvové rychlosti.

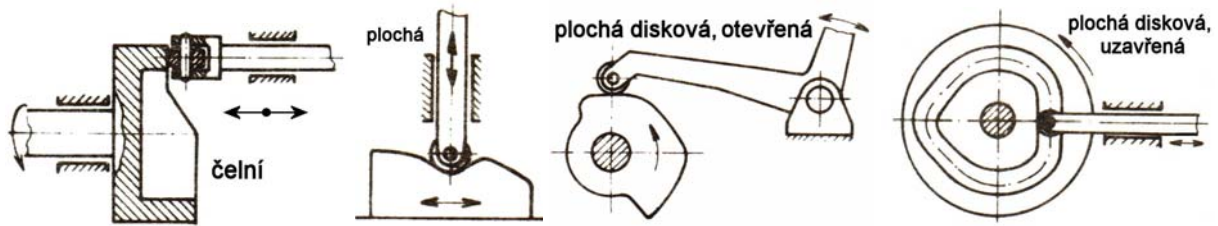
Čas potřebný na seřízení stroje je důležitým kritériem pro hodnocení stupně jeho automatizace. Podle délky času potřebného pro seřízení stroje, v poměru k celkovému času výroby, jsou obráběcí stroje rozdělovány na stroje s **tvrdou** (●) a stroje s **pružnou** (☉) automatizací. Obráběcí stroje s tvrdou automatizací vyžadují dlouhé seřizovací časy a navíc je pro každou nově vyráběnou součást třeba vyměnit některé automatizační prvky - proto se tyto stroje hodí pouze pro velkosériovou a hromadnou výrobu. Obráběcí stroje s pružnou automatizací lze seřídit na výrobu nové součásti v krátkém čase a nevyžadují výměnu žádných prvků. Pro automatizaci obráběcích strojů se využívají tyto základní systémy:

- systémy vaček a křivkových bubnů,
- ☉ systémy narážek,
- ☉ kopirovací systémy,
- ☉ systémy řízení stroje pomocí záznamu.

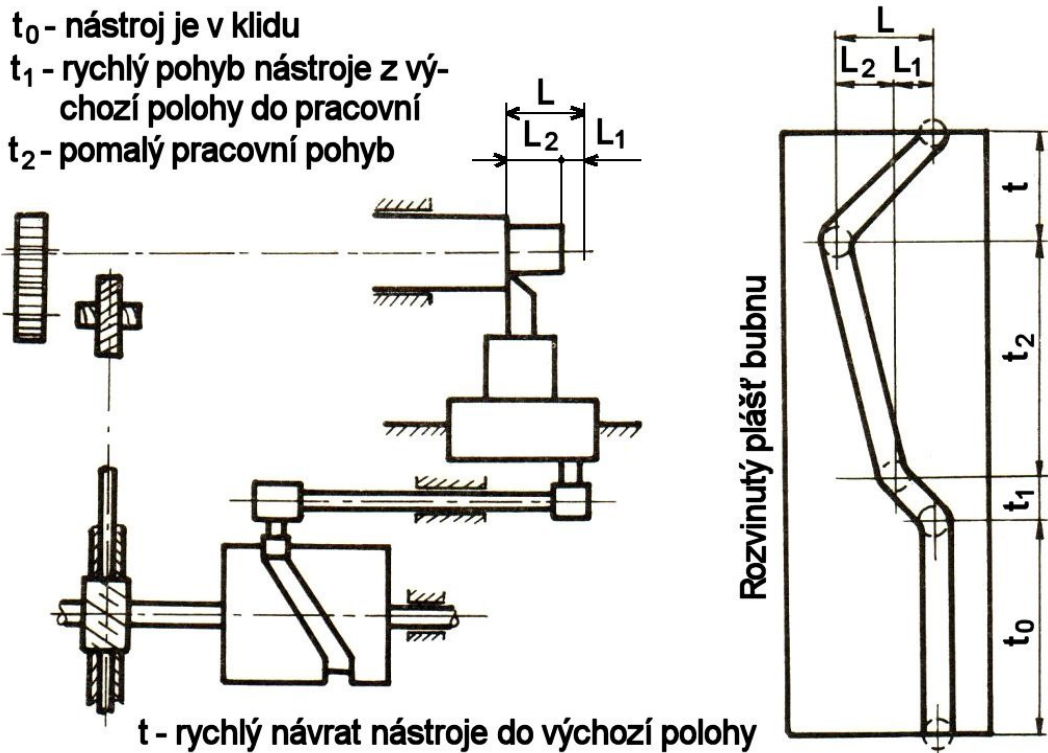
7.5.1. Vačky a křivkové bubny

Pomocí vaček (obr.7.13) a křivkových bubnů (obr.7.14) se zabezpečuje uskutečnění pohybu podle určitých fyzikálních zákonů (podle dráhy nebo rychlosti). Vačka se zpravidla otáčí konstantní úhlovou rychlostí ω , z čehož vyplývá, že rychlost posuvu řízeného uzlu obráběcího stroje je dána stoupáním vačky. Obecně platí, že snímací člen (vačka i křivkový bu-

ben) řídí pohyb od jedné polohy do druhé a mimo zvolené rychlosti tak zaručuje i konkrétní dráhu - snímací člen je tedy jakýmsi „záznamem“ dráhy a rychlosti.



Obr.7.13 Vačky



Obr.7.14 Princip činnosti křivkového bubnu

7.5.2. Narážky

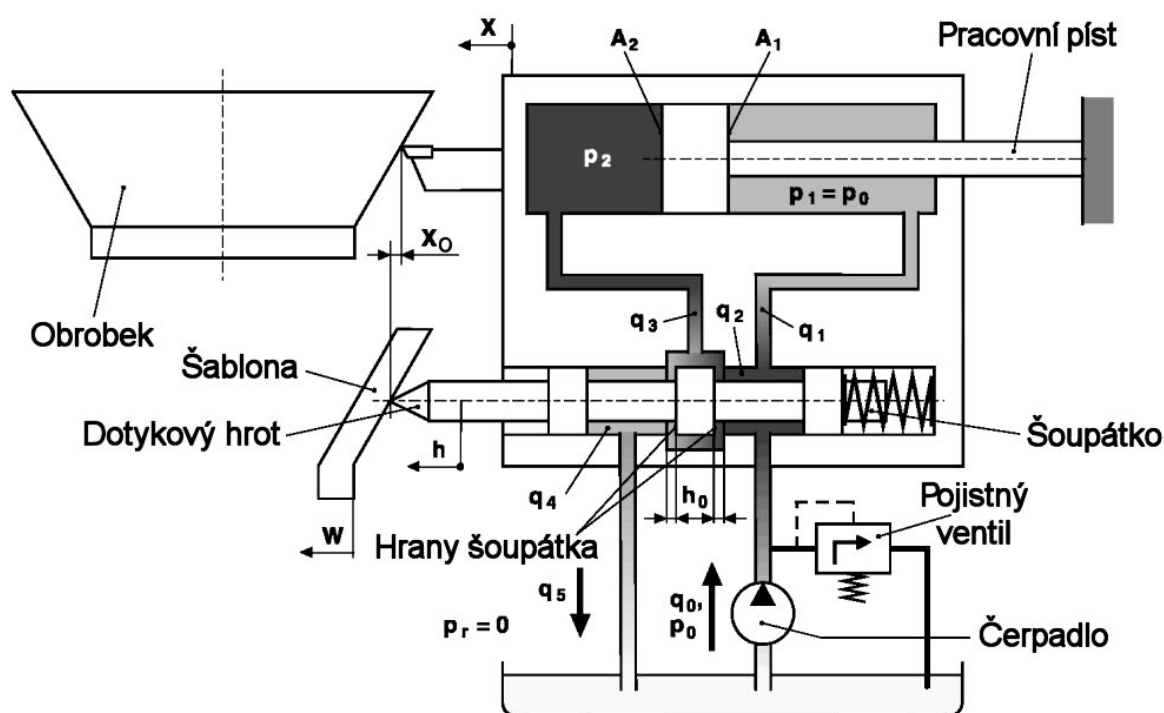
Narážky jsou používány u většiny automatizovaných obráběcích strojů. Ovládají jejich řídicí i výkonná ústrojí tím, že zajišťují např. omezení dráhy posuvových pohybů, změnu otáček pracovního vřetena, změnu řezné i posuvové rychlosti u přímočarých pohybů, reverzaci hlavního a posuvového pohybu, vypnutí motoru stroje. Narážky nejsou přímým ovládacím či řídicím systémem, vyvolávají pouze podnět k provedení určité změny v pracovním cyklu stroje. Existují tři základní nárazkové systémy - *mechanické*, *hydraulické*, *pneumatické* a *elektrické*.

Přestavitelné mechanické nárazky omezují pohyb řízeného uzlu, (saně nebo stolu), pohybujícího se po vedení lože. Pomocí těchto nárazek je možné, ve spojení se zařízením vypínajícím posuv, dosáhnout vysoké přesnosti nastavení polohy řízeného uzlu ($\pm 0,01$ mm), nebo vypínání při minimálním rozptylu. Základní princip čistě mechanického vypínání posuvu spočívá ve zvýšení posuvové síly při najetí na pevný doraz. Tím je přerušeno spojení předepjatého mechanismu s převodovkou posuvů a saně zůstávají v klidu proti dorazu. Přesnost vypíná-

ní závisí na tuhosti dorazu a na rozptylu síly, další chyby vznikají např. naklápěním saní, zpětným pružením u dorazu, atd. Nevýhodou mechanických narážek je poměrně obtížné a časově náročné nastavování pevných dorazů a proto je jejich použití v automatizaci omezeno výhradně na oblast velkosériové a hromadné výroby (např. jednoúčelové stroje).

7.5.3. Kopirovací zařízení

Obráběcí stroje (zejména univerzální) jsou velmi často vybavovány kopirovacími zařízeními, která mohou podstatně zvýšit výkon i přesnost výroby. Kopírování tvaru součásti podle šablony nebo vzorku se uplatňuje u tvarově jednodušších součástí v sériové a hromadné výrobě a u tvarově složitějších součástí také v kusové výrobě. Podle systému, kterým je dráha dotykového hrotu sledujícího šablonu nebo vzorek převáděna na pohyb nástroje, existují kopirovací zařízení mechanická, hydraulická (obr.7.15), elektrohydraulická a elektrická.



Obr.7.15 Hydraulické kopirovací zařízení

7.5.4. Číslicově řízené obráběcí stroje

Číslicově řízené NC (Numeric Control) i CNC (Computer Numeric Control) obráběcí stroje umožňují dosažení libovolné, předem dané polohy pracovního uzlu stroje podle záznamu na záznamovém médiu (u starších nebo levnějších NC systémů to jsou děrné a magnetické pásky, u modernějších CNC systémů pak počítač vlastního řídicího systému, v současnosti může být záznam posílán i z jiného počítače).

Určení tvaru a rozměru obrobku je specifikováno vhodným číselným vyjádřením souřadnic, směrů a smyslů pracovních pohybů stroje resp. nástrojů. Výhodou je snadné a rychlé předávání potřebných informací, libovolná opakovatelnost, jednoduchá a nenáročná archivace živých programů atd.

Program je zcela oddělen od vlastního stroje a připravuje se nezávisle na stroji, mimo výrobní dílnu. Oddělení programu od obráběcího stroje přináší možnost přizpůsobit se častému střídání tvarově i rozměrově rozdílných výrobků, při minimálních časech potřebných pro seřízení stroje na novou dávku.

Vzhledem ke své vysoké pružnosti a vysokému stupni automatizace se NC a CNC obráběcí stroje staly vhodným prostředkem pro automatizaci malosériové výroby. Dále umožnily řešit velmi složité technologické operace (např. výrobu tvarově velmi složitých součástí, obrábění tvarových ploch rovinných i prostorových (např. formy pro tlakové lití, zápustky, vačky, křivkové kotouče, atd.), pro které se předtím musely vyrábět drahé modely, šablony nebo přípravky. Pro tyto stroje platí, že tvar obrobku a údaje o uskutečňování pomocných úkonů jsou vyjádřeny čísly a zaznamenány vhodným kódem na nosič programu. Seřizovací čas je zkrácen na minimum a čas na přípravu se zmenšuje využitím výpočetní techniky.

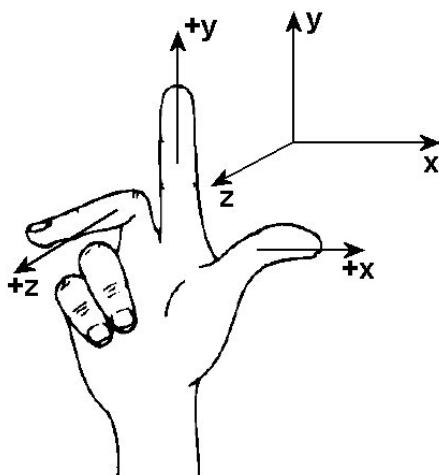
Číslicové řízení je automatické řízení procesu prováděné zařízením, které využívá informaci v číslicové formě postupně zaváděné v průběhu řízení operace. Vyznačuje se vysokou přizpůsobitelností nejrůznějším výrobním úlohám, všechny informace nutné k provedení těchto úloh (řídící informace) jsou vytvářeny v alfanumerických znacích. Každý číslicově řízený stroj (zařízení) je tvořen dvěma základními samostatnými celky a to:

- **řízeným strojem** (objektem) vybaveným takovými zařízeními, která mu umožňují realizovat požadovaný průběh technologického procesu na základě řídicích signálů určené struktury, přijímaných jednotlivými částmi stroje v souladu se sekvenčním prováděním jednotlivých operací,
- **řídícím systémem** - na základě údajů zakódovaných ve formě programu a uložených na vhodném médiu a s využitím údajů zpětnovazebního charakteru přicházejících od řízeného stroje generuje na výstupu signály pro řízený objekt.

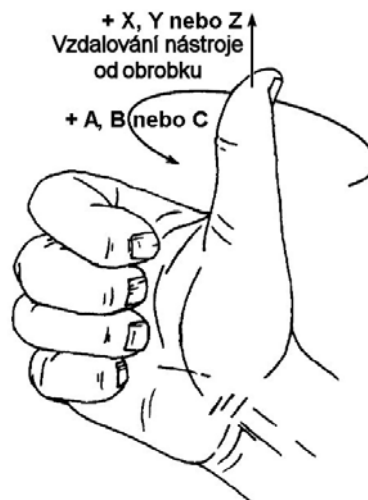
Z hlediska způsobu řízení dráhy referenčního bodu vzhledem k objektu lze systémy číslicového řízení rozdělit následovně:

- **systém stavění souřadnic** (polohovací systém),
- **systém pravoúhlý**,
- **systém souvislý**.

Všechny tyto systémy umožňují programování obráběcího stroje v pravotočivém pravoúhlém souřadnicovém systému (obr.7.16, 7.17).



Obr.7.16 Pravoúhlý pravotočivý souřadnicový systém

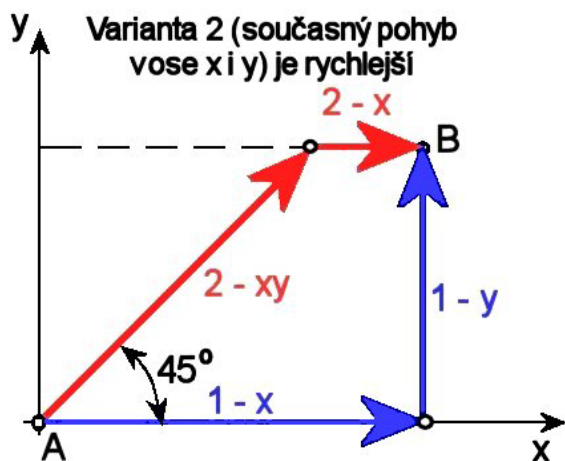


Obr.7.17 Definice kladného posuvu ve směru osy a rotace kolem osy

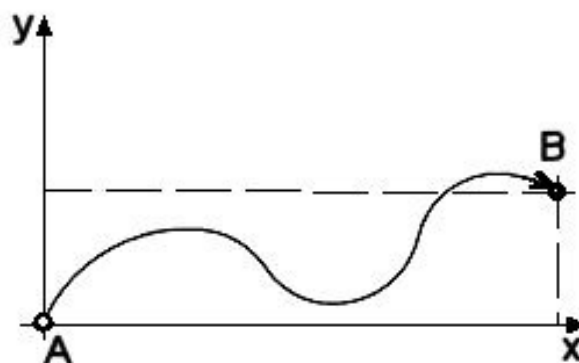
7.5.4.1. Systém stavění souřadnic

Práce v tomto systému vypadá tak, že je vždy naprogramována a tedy sekvenčně řízena následující poloha referenčního bodu vzhledem k poloze předcházející. Tento způsob řízení je prováděn převážně v rovině xy (obr.7.18), pohyby řízeného referenčního bodu v souřadných osách nejsou vzájemně koordinovány, což znamená, že výsledná dráha mezi dvěma body není dána.

Systém stavění souřadnic se používá především u vrtaček a vyvrtávaček, pro **nastavování vzájemné polohy nástroje a obrobku**, neřídí žádný pracovní pohyb. Během přemístění nástroje nebo obrobku v základních souřadnicích nedochází k obrábění, proto se toto přemístění provádí rychlým posuvem (rychluposuvem). Těsně před dokončením nastavení souřadnice se různým způsobem pohyb co nejrychleji zpomalí a zastaví. Teprve pak se provádí obrábění posuvem ve třetí souřadnici, kterou systém neřídí. Sestavení programu pro dvě základní souřadnice je tedy dáno pouhým sepsáním jednotlivých dvojic souřadnic v pořadí, ve kterém má operace probíhat. Tento druh řízení nahrazuje použití přípravků nebo způsoby nastavování souřadnic podle stupnic, např. opticky odečítaných.



Obr.7.18 Programování dráhy v systému stavění souřadnic



Obr.7.19 Programování dráhy v souvislém systému

7.5.4.2. Pravoúhlý systém řízení

Mimo konečné polohy je u tohoto systému dále řízena i rychlost pohybu, kterou se řízený referenční bod pohybuje po lineární dráze. Systém se používá u frézovacích a soustružnických strojů. Je specifikován tím, že v jednotlivých úsecích cyklu probíhá pohyb vždy **jen v jedné souřadnici**, proto např. na takto řízených frézkách lze obrábět pouze plochy na sebe navzájem kolmé. Rychlost pohybu v jednotlivých úsecích lze programovat tak, že se může střídat rychluposuv s různými hodnotami pracovního posuvu a před koncem úseku se obvykle zařazuje velmi pomalý, tzv. dojížděcí posuv, aby bylo usnadněno přesné dosažení rozměru. Např. je možné střídat pohyb podélný, počínající rychluposuvem s pracovním posuvem, dále s pracovním pohybem příčným, s pohybem svislým, atd. Na některých strojích řízení umožňuje současný pohyb ve dvou souřadnicích stejnou rychlostí, takže lze např. provádět srážení pod 45° (většina pravoúhlých systémů dovoluje používat mimo pohybů pravoúhlých i takové, kde rychlost pohybu v jedné řízené ose je konstantním násobkem rychlosti pohybu v ose druhé).

7.5.4.3. Souvislý systém řízení

Tento systém řízení dokáže řídit dráhu referenčního řízeného bodu po obecných křivkách (obr.7.19) a to podle počtu souvisle řízených os a celkové koncepce řídicího systému buď v rovině (systém 2D) nebo v prostoru (systém 3D), řízení je možno realizovat až v pěti osách. Systém je proto určen pro obrábění tvarů složitějších než pravoúhlých, u nichž se vyskytují zejména křivkové tvary (u většiny součástí nejde složitost tvarů dále než k použití kruhových úseků). Souvislým řízením lze však realizovat i pohyb po parabole, elipse nebo libovolné obecné křivce. Je tedy zřejmé, že systém musí současně řídit i pohyb ve dvou, někdy i ve třech souřadnicích.

Pohyb v několika řízených souřadnicích se koordinuje tak, že se současně řídí v každé souřadnici po velmi malých přírůstcích. Proto se program v tomto případě skládá z velkého množství číselných údajů. Jestliže se tedy např. za základní krok zvolí 0,01 mm, pak v úseku který je v souřadnici *x* dlouhý 100 mm a v souřadnici *y* dlouhý 40 mm, musí stroj v průběhu tohoto úseku dostat ve dvojicích (současné příkazy pro *x* a *y*) celkem 14 000 příkazů. Tyto údaje nelze spočítat a vložit do programu ručně, proto jsou systémy souvislého řízení vybaveny **interpolátory**, pro které stačí zadat jen omezené údaje, nutné k tomu, aby byla dráha přesně definována, a interpolátor si provede výpočet průběhu dráhy sám. Jsou používány interpolátory **lineární** (schopné vytvářet informace jen pro přímkové úseky pod libovolným úhlem, **kruhové** (pro vytváření kruhových úseků) a **kvadratické** (pro vytváření libovolného druhu křivky druhého stupně). Při použití lineárního interpolátoru pro kruhový úsek je nutno tento úsek nahradit mnohoúhelníkem, jemnost nahrazení může být různá podle požadované přesnosti. Souvislé řídicí systémy jsou náročné, složité a drahé. Proto je často vlastní souvislé řízení realizováno jen ve dvou osách, ostatní osy jsou řízeny pravoúhle.

7.5.4.4. Číslicové kódování informací

Program pro číslicově řízený obráběcí stroj je posloupnost zakódovaných údajů s definovanou strukturou, které představují uzavřený pracovní cyklus jednoznačně popisující všechny funkce a činnost konkrétního stroje, které jsou nezbytné pro realizaci předepsaného technologického procesu. Je to tedy soubor úplných, číselně vyjádřených informací, které určují pohyby pracovních orgánů stroje (suportů, stolů, vřeten, atd.) co do velikosti, směru a smyslu, definují podmínky těchto pohybů (posuv, otáčky) během pracovního cyklu a případně řídí automatickou výměnu nástrojů, eventuálně i obrobků. Při zápisu každého programu je třeba respektovat syntaktická a sémantická pravidla, která jsou do určité míry vždy specifická pro každý systém i obráběcí stroj.

Program řízení NC a CNC obráběcích strojů je takový sekvenčně uspořádaný soubor informací, který je formou vyjádření technologického postupu realizovaného činností stroje. Skládá se z množiny informačních jednotek, z nichž každá definuje číselnou informaci formou "jeden pracovní úsek stroje nebo úkon". Základním prvkem NC programu je **slovo** (funkce), což je informace z uspořádaného sledu znaků stanoveného významu. Definovaná posloupnost slov vytváří **blok** nebo **větu**, Sekvenčně uspořádaná posloupnost bloků pak tvoří vlastní **program**.

Slovo

Každé slovo má dvě části a to **povelovou** část (**adresa** - písmeno, které indikuje polohu uvnitř bloku) a **významovou** část (soubor číslic, které vyjadřují příslušný **povel**). Počet číslic, včetně znaménka za jistým znakem, se nazývá **délka slova** a je pro každou konkrétní adresu konstantní.

Tab.7.1 Struktura slova

Slovo	
N	015
adresa	významová část

Slova se dělí na:

- **Rozměrová** - slouží k určení relativní dráhy nástroje vzhledem k výrobku. Je to uspořádaný sled adresového znaku, jednoho znaménka a určitého počtu číslic. Znaménko mezi adresou a první číslicí udává smysl pohybu při inkrementálním (přírůstkovém) programování nebo polohu vzhledem k počátku v soustavě orientovaných souřadnic při absolutním programování, číselný údaj udává absolutní rozměry u absolutního programování nebo přírůstkové relativní rozměry u přírůstkového programování. Rozměrová slova:
X, Y, Z - pohyb přímočarý primární,
U, V, W - pohyb přímočarý sekundární,
P, Q, R - pohyb přímočarý terciální,
I, J, K - interpolace (tzv. interpolační parametry),
A, B, C (příp. D, E) - pohyb kruhový.
- **Informační** - určují technologické a doplňující údaje a opět to je uspořádaný sled adresného znaku a určitého počtu číslic. Informační slova:
N (number) - číslo bloku,
G (go) - přípravná funkce,
H - korekce polohy,
F (feed) - funkce posuvu,
S (speed) - funkce otáček vřetena,
T (tool) - funkce nástroje,
M (make) - pomocná funkce.

Programový blok

Programový blok vzniká sériovým řazením slov, bloky jsou od sebe odděleny znakem konec bloku. Formát bloku je charakterizován typem bloku, uspořádáním slov v něm a specifikací jednotlivých slov. Bloky mohou mít **formát s pevnou délkou** (používá se pro pravoúhlé řízení) nebo **formát s proměnnou délkou** (pro souvislé i pravoúhlé řízení). Charakteristické znaky formátu bloku s pevnou délkou:

- blok musí mít stálou délku, to znamená, že žádné slovo ani znak nesmí být vynecháno, ani když se vzhledem k předchozímu údaji nemění nebo je významově prázdné,
- význam každého znaku je stanoven jeho polohou v bloku, blok nemá obsahovat písmenný znak,
- složení bloku: 1. číslo bloku, 2. adresa bloku, 3. informační slovo, 4. konec bloku (toto stanoví konec každého bloku a musí také předcházet bloku prvnímu),
- informační slova se ve stejném bloku nesmějí opakovat,
- používají se pouze slova odpovídající funkcím, kterými je stroj vybaven a to v následujícím pořadí: 1. přípravná funkce, 2. rozměrová slova, 3. funkce posuvu, 4. funkce otáček vřetena, 5. funkce nástroje, 6. pomocné funkce,
- slova bloků s pevnou délkou bloku nemají adresy (jejich význam je určen polohou v bloku),
- všechny bloky mají stejnou délku určenou formátovou specifikací,
- význam číselných údajů jednotlivých slov je určen jejich polohou v bloku,
- žádné slovo nesmí obsahovat písmenný abecední znak adresy.

Charakteristické znaky formátu bloku s proměnnou délkou:

- maximální počet znaků v bloku je stanoven tabulkami,
- jednotlivá slova musí být uváděna v následujícím pořadí: 1. číslo bloku, 2. přípravná funkce, 3. rozměrové slovo, 4. funkce posuvu, 5. funkce otáček vřeten, 6. funkce nástroje, 7. pomocná funkce, 8. konec bloku,
- žádné rozměrové slovo se nesmí uvnitř jednoho bloku vyskytnout více než jednou,
- ta slova, která nejsou uvedena ve formátové specifikaci, se nesmí vyskytnout ani ve struktuře bloku,
- při zápisu bloku lze informačně prázdná slova vynechat,
- nevynechaná (informačně významná) slova tvoří blok proměnné délky,
- výmaz bloku musí být umístěn před slovo "číslo bloku",
- první blok programu - "start programu" (platí i pro formát s pevnou délkou),
- poslední blok programu - "stop programu" (platí i pro formát s pevnou délkou).

Tab.7.2 Struktura bloku

Blok						
Obecný zápis	N3	G2	X±43	H2	F3	<i>M2</i>
Konkrétní zápis	N140	G41	X+0230500	H01	F008	<i>M09</i>
Složení	slovo ¹⁾	slovo ¹⁾	slovo ²⁾	slovo ¹⁾	slovo ¹⁾	slovo ¹⁾
1) číslice v obecném zápisu určuje počet číslic konkrétního zápisu, 2) číslice v obecném zápisu znamená čtyři číslice vlevo a tři číslice vpravo od desetinné čárky (tj. v konkrétním případě rozměr 230,500 mm).						

7.6. CNC OBRÁBĚCÍ CENTRA

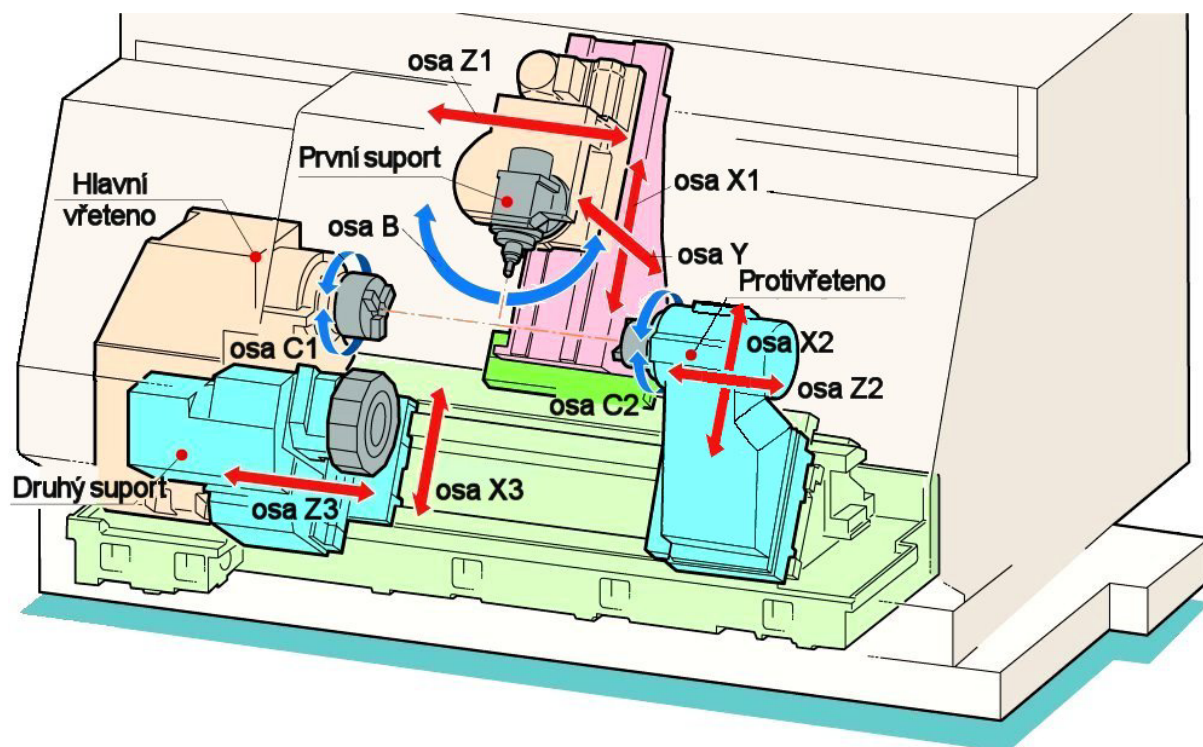
CNC obráběcí centrum je číslicově řízený obráběcí stroj, který je schopný (definice podle ISO):

- provést různé operace při jednom upnutí obrobku,
- vybrat a vyměnit nástroje,
- nastavit vzájemnou polohu obrobku a nástroje (platí i pro běžný CNC obráběcí stroj),
- řídit otáčky, posuvy a pomocné úkony (platí i pro běžný CNC obráběcí stroj).

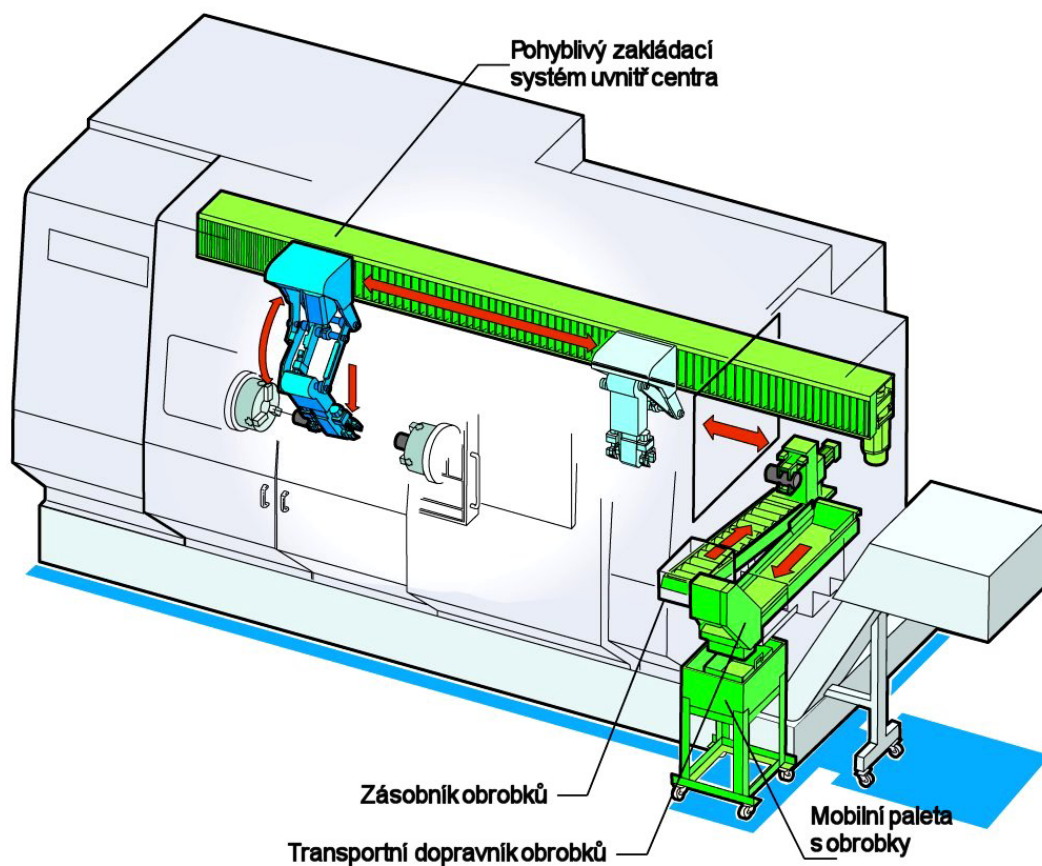
Z technologického hlediska jsou CNC obráběcí centra rozdělována na:

- obráběcí centra pro výrobu rotačních součástí (soustružnická OC, horizontální - s vodorovnou osou vřeten, vertikální - se svislou osou vřeten),
- obráběcí centra pro výrobu nerotačních součástí (frézovací, horizontální a vertikální jako v předchozím případě).

Soustružnická centra s horizontální osou vřeten (obr.7.20) jsou multiprofesní stroje s hlavním obrobkovým vřetenem a obrobkovým protivřetenem a dvěma nástrojovými suporty, pro obrábění přírubových rotačních součástí s přídatnými nerotačními nebo nesouose rotačními plochami, velmi často jsou vybavena zařízením pro manipulaci s obrobkem (obr.7.21). Mají lože s vícenásobnými vodicími plochami pro první nástrojový suport s revolverovou hlavou a vřeteník protivřeten. První nástrojový suport má tři řízené osy *XI*, *Y* a *ZI* (případně *B*). Jeho revolverová hlava může nést pevné nástroje i nástrojová vřeten pro rotující nástroje na obrábění přídatných nerotačních ploch na obrobcích upnutých v hlavním vřeteně nebo protivřeteně.

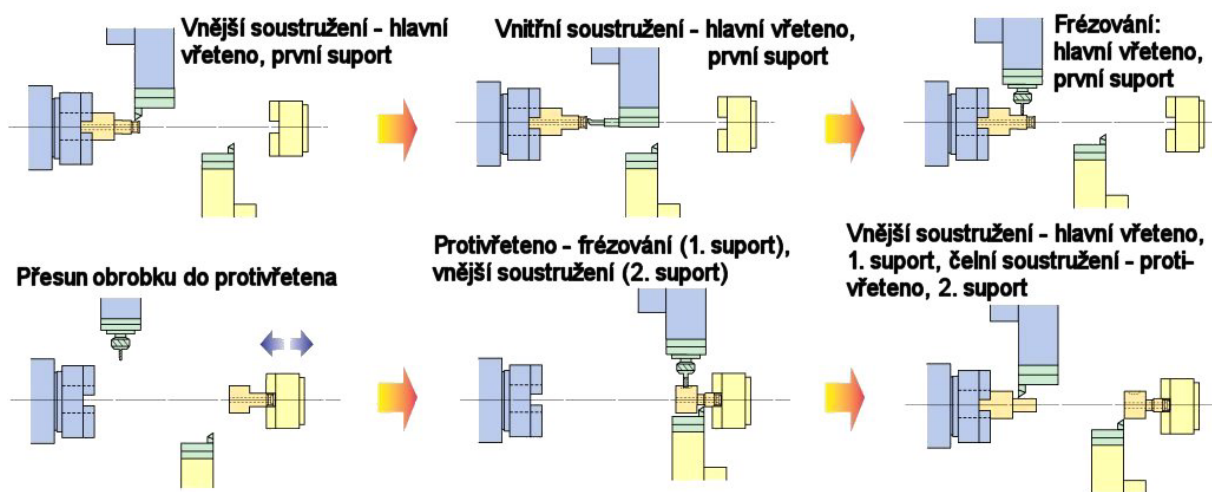


Obr.7.20 Soustružnické CNC obráběcí centrum Mori Seiki MT 2000F



Obr.7.21 Zařízením pro manipulaci s obrobkem soustružnického obráběcího centra Mori Seiki ZT 2500

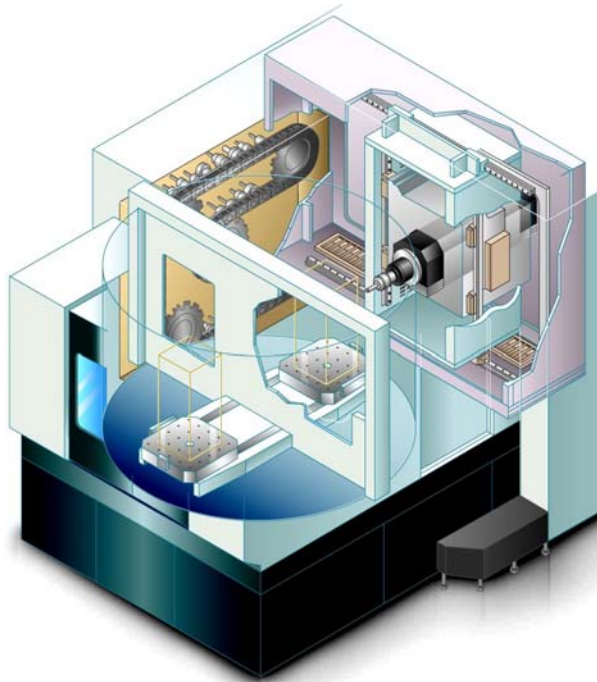
Hlavní obrobkový vřeteník je obvykle pevný a pro obrábění nerotačních a nesouose rotačních ploch je vybaven kontinuálním řízením úhlové polohy obrobku v ose **C1**. Druhý nástrojový suport, jehož revolverová hlava nese pevné i rotující nástroje, může být pevně připojen k hlavnímu vřeteníku nebo může být řízen v osách **X3** a **Z3**. Vřeteník protivřetená je řízen v osách **X2**, **Z2** a **C2**. Na jeho tělese je možné umístit pevné nástroje, které mohou spolupracovat s prvním nástrojovým suportem při obrábění obrobků rotujících v hlavním vřetení. Mezi těmito pevnými nástroji může být i hrot koníkové opěrky delšího obrobku v hlavním vřetení při jeho obrábění z prvního nástrojového suportu. Obrobek v protivřetení může být obráběn i pevnými nebo rotujícími nástroji z prvního suportu, což umožňuje i využití osy **Y** pro obrábění z druhé strany. Příklad pracovního cyklu soustružnického CNC obráběcího centra je uveden na obrázku č.7.22.



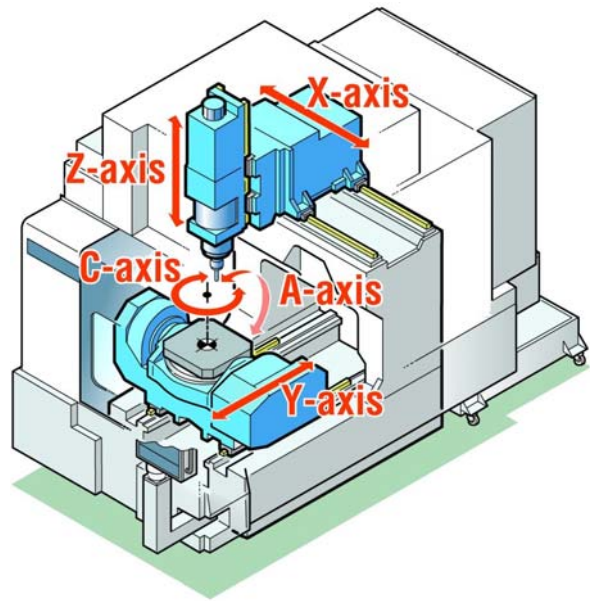
Obr.7.22 Příklad pracovního cyklu soustružnického OC

Frézovací obráběcí centra s horizontální osou vřetení (obr.7.23) jsou tří- až pětiosé multiprofesní stroje (lze na nich nejen frézovat, ale i vrtat, vyvrtávat, vystružovat, řezat závit) pro obrábění nerotačních obrobků většinou skříňovitěho tvaru. Nosná část je obvykle rozdělena na neměnnou nástrojovou část s třemi navzájem kolmými řízenými osami (**X**, **Y** a **Z**) a na stavebnicově proměnnou obrobkovou část se dvěma rotačními osami **A** a **B**. Existují též modifikovaná provedení s dvěma osami **X** a **Y** v nástrojové části a třemi osami **Z**, **A** a **B** v obrobkové části. Variabilita obrobkové části umožňuje např. stavbu stroje s pevnou upínací deskou pro obrábění těžkých a rozměrných obrobků (**X**, **Y** a **Z**) nebo stroje s otočným stolem (osy **X**, **Y**, **Z** a **B**) či pětiosého stroje (osy **X**, **Y**, **Z**, **A** a **B**). Nástrojová část všech uvedených konfigurací je mimo dosah třísek.

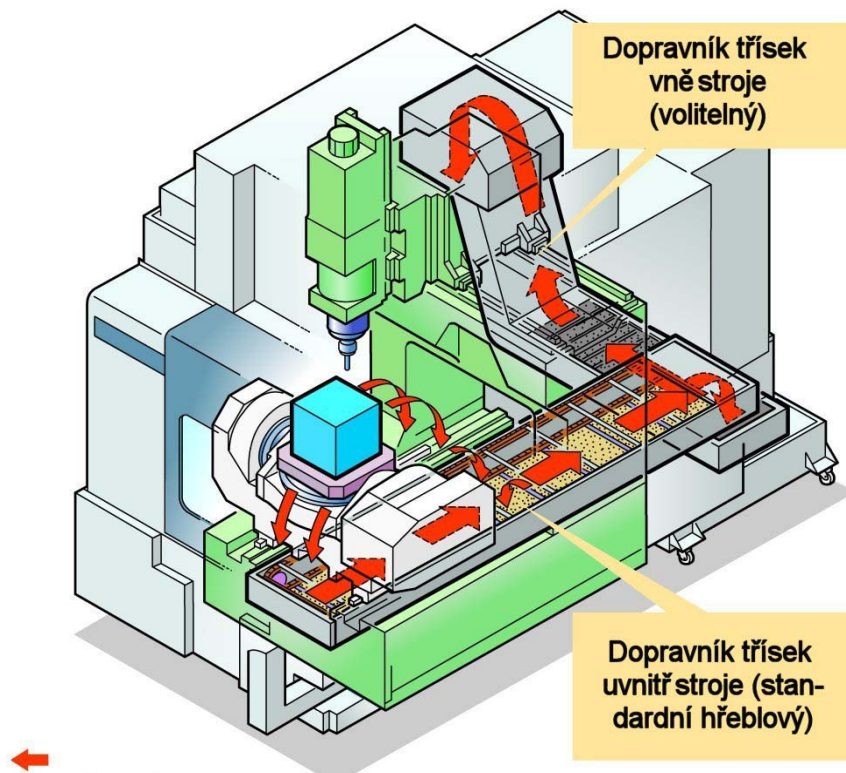
Frézovací obráběcí centra s vertikální osou vřetení jsou tří- a až pětiosé multiprofesní stroje na obrábění plochých nerotačních součástí. Vřetení s třemi ovládanými osami (**X**, **Y** a **Z**) je umístěno na pojízděném portálu (existují též varianty s dvěma ovládanými osami **X** a **Z**, které mají v obrobkové části řízené osy **Y**, **A** a **C** - obr.7.24). Obrobková část je proměnná a může mít prostý pevný stůl s vodorovnou upínací plochou, otočný „dvojjstůl“ s krytem proti třískám pro upínání následné součásti během obrábění, stůl nebo dvojjstůl s otočnými vícenásobnými upínači, nebo otočný a sklopný stůl se dvěma otočnými osami **A** a **B** pro plnohodnotné pětiosé obrábění. Vertikální frézovací centra (stejně též horizontální) jsou často doplněny zařízením pro kontinuální odvod třísek (obr.7.25).



Obr.7.23 Horizontální frézovací centrum
Mori Seiki HVM 630



Obr.7.24 Vertikální frézovací centrum
Mori Seiki GV 5035AX



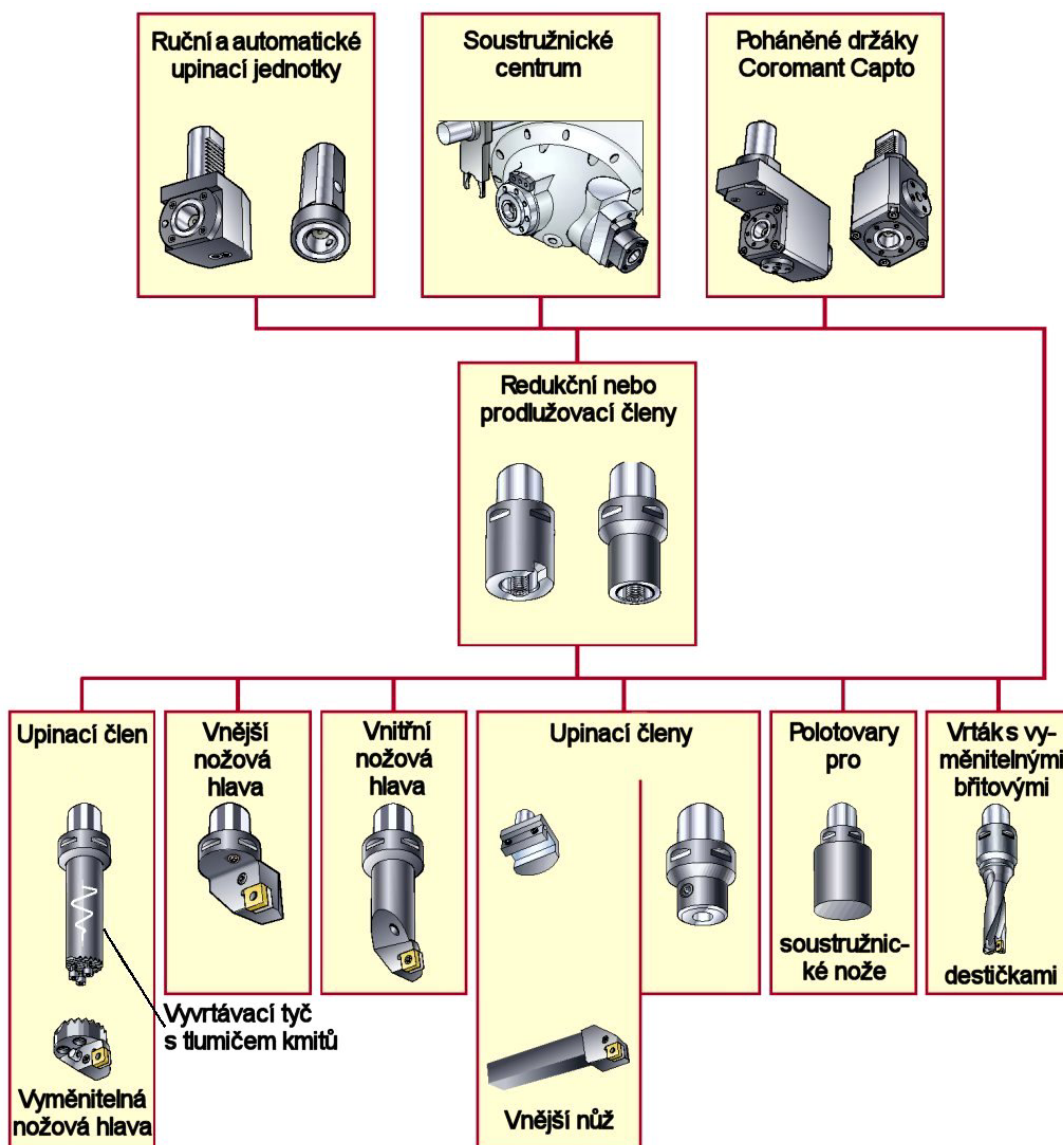
Obr.7.25 Třískové hospodářství vertikálního frézovacího centra Mori Seiki GV 5035AX

K hlavním charakteristickým znakům všech obráběcích center (soustružnických i frézovacích) patří vysoký rozsah a plynulá regulace řezných a posuvových rychlostí, valivé, zakrytované vedení všech pohybů a zásobníky nástrojů různých typů.

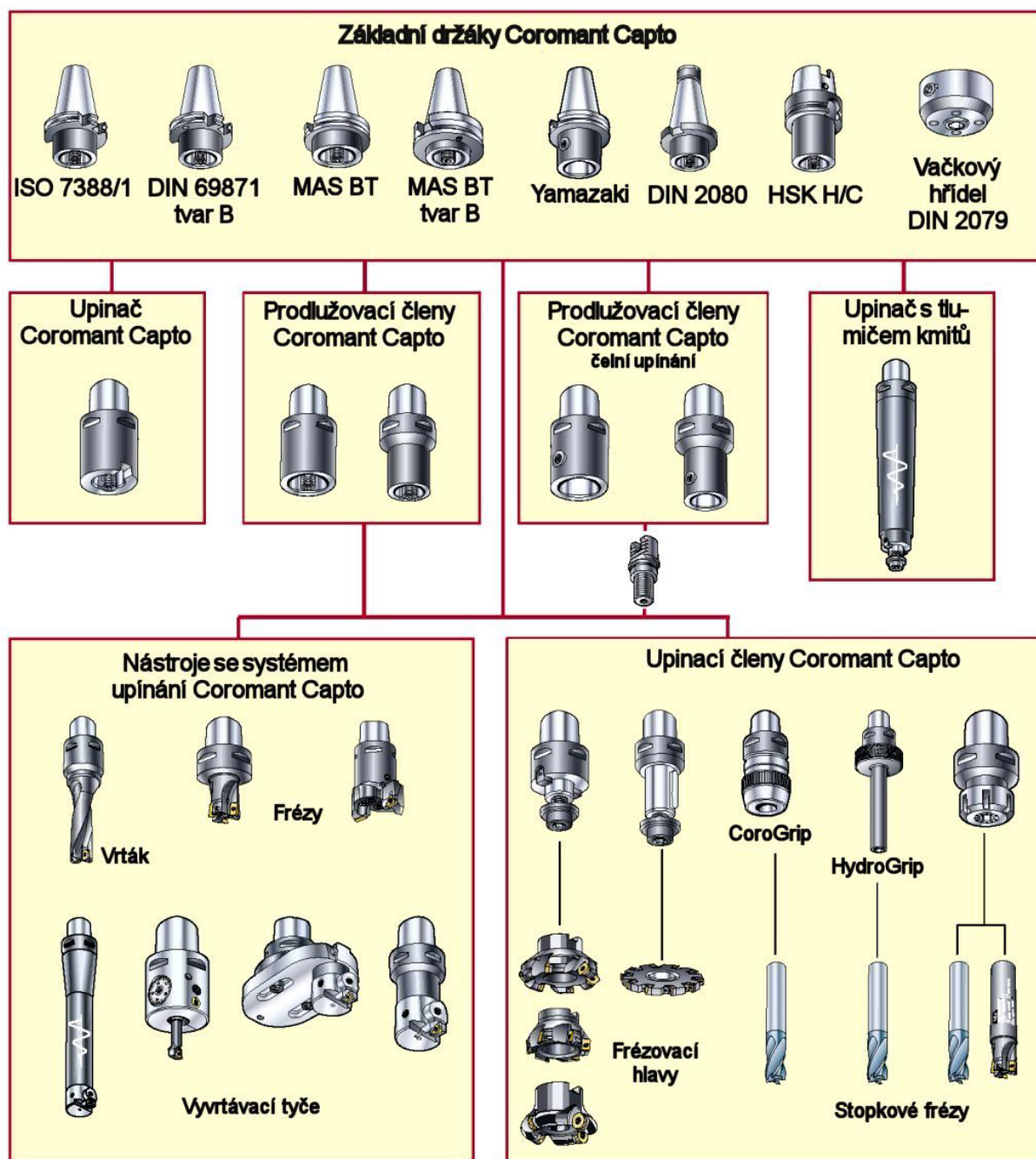
7.6.1. Nástroje pro CNC obráběcí centra

Nástroje pro CNC obráběcí centra vykazují následující základní znaky:

- mají stavebnicovou konstrukci, obvykle s těmito členy (jednotlivé konkrétní nástroje nemusí vždy obsahovat všechny uvedené členy) - obr.7.26 a 7.27:
 - základní držák pro upnutí na obráběcím centru,
 - redukční členy (umožňují změnu velikosti příčného průřezu),
 - prodlužovací členy (umožňují změnu polohy špičky řezné části nástroje),
 - upinací členy pro upnutí řezných částí nástroje,
 - řezná část nástroje (nebo normalizovaný nástroj),
- seřizují se mimo stroj, na speciální seřizovacím přístroji (nutnost zabezpečení požadované polohy řezné části nástroje, s kterou pracuje řídicí program stroje),
- jejich řezné části jsou vyráběny z kvalitních nástrojových materiálů s vysokou řezivostí,
- jejich optimální trvanlivost obvykle nepřesahuje hodnotu $T=15$ minut (pracují s vysokými řeznými rychlostmi).



Obr.7.26 Nástroje firmy Sandvik Coromant pro soustružnická centra

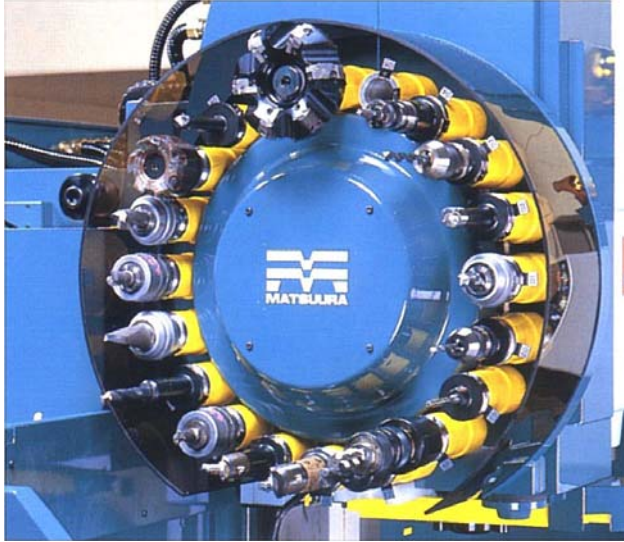


Obr. 7.27 Nástroje firmy Sandvik Coromant pro frézovací centra

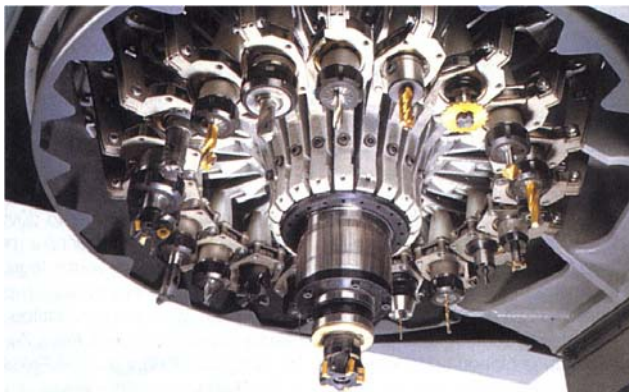
Všechny nástroje jsou na obráběcích centrech uloženy v zásobnících nástrojů (s kapacitou 15÷60, někdy i 100÷150 nástrojů), které mohou být umístěny na pracovním vřeteníku, na stojanu nebo stole stroje, případně i mimo stroj. Podle konstrukce lze zásobníky nástrojů dělit na *revolverové*, *bubnové* (obr. 7.28), *deskové* (obr. 7.29), *voštinové*, *regálové*, *řetězové* (obr. 7.30), atd. Výměnu nástrojů zajišťuje speciální manipulační zařízení, které je schopno vyjmout nástroj z vřetena a uložit ho do zásobníku a dále vyjmout nový nástroj ze zásobníku a nasadit ho do vřetena stroje.

Poloha nástroje v zásobníku, případně i vlastní nástroj mají svoje identifikační kódy, pro umožnění výběru a výměny nástroje podle řídicího programu obráběcího centra. Sled nástrojů a jejich seskupení v zásobníku může odpovídat technologickému postupu výroby kon-

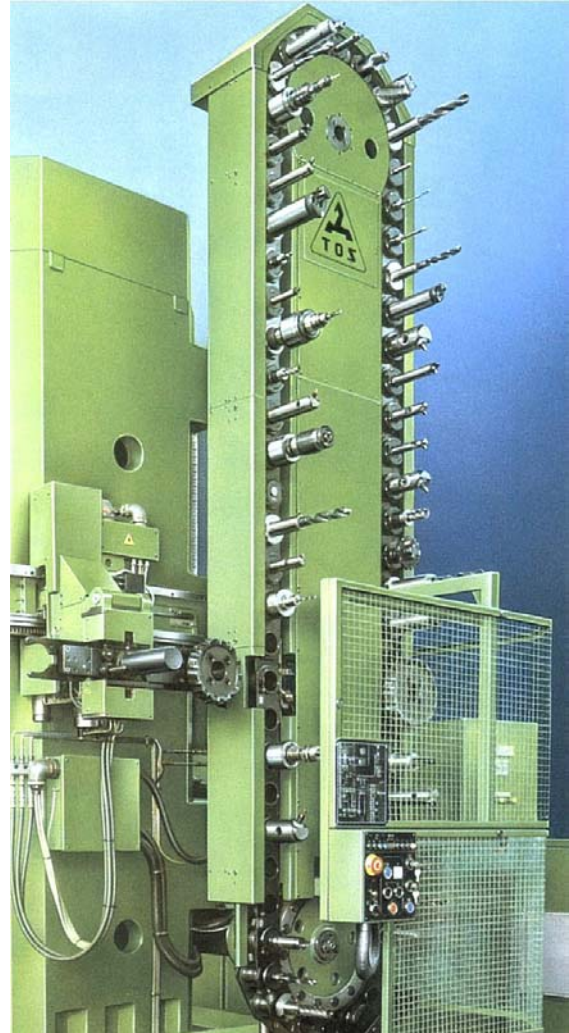
krétní součásti (kódováno je místo v zásobníku) nebo může být libovolné (kódován je nástroj). Výhodou prvního způsobu jsou krátké časy výměny nástrojů a minimální pohyby zásobníku, nevýhodou nutnost výměny většiny nástrojů pro výrobu každé nové součásti. Relativní nevýhodou druhého způsobu jsou velké pohyby zásobníku při vyhledávání a výměně nástrojů.



Obr.7.28 Bubnový zásobník



Obr.7.29 Deskový zásobník



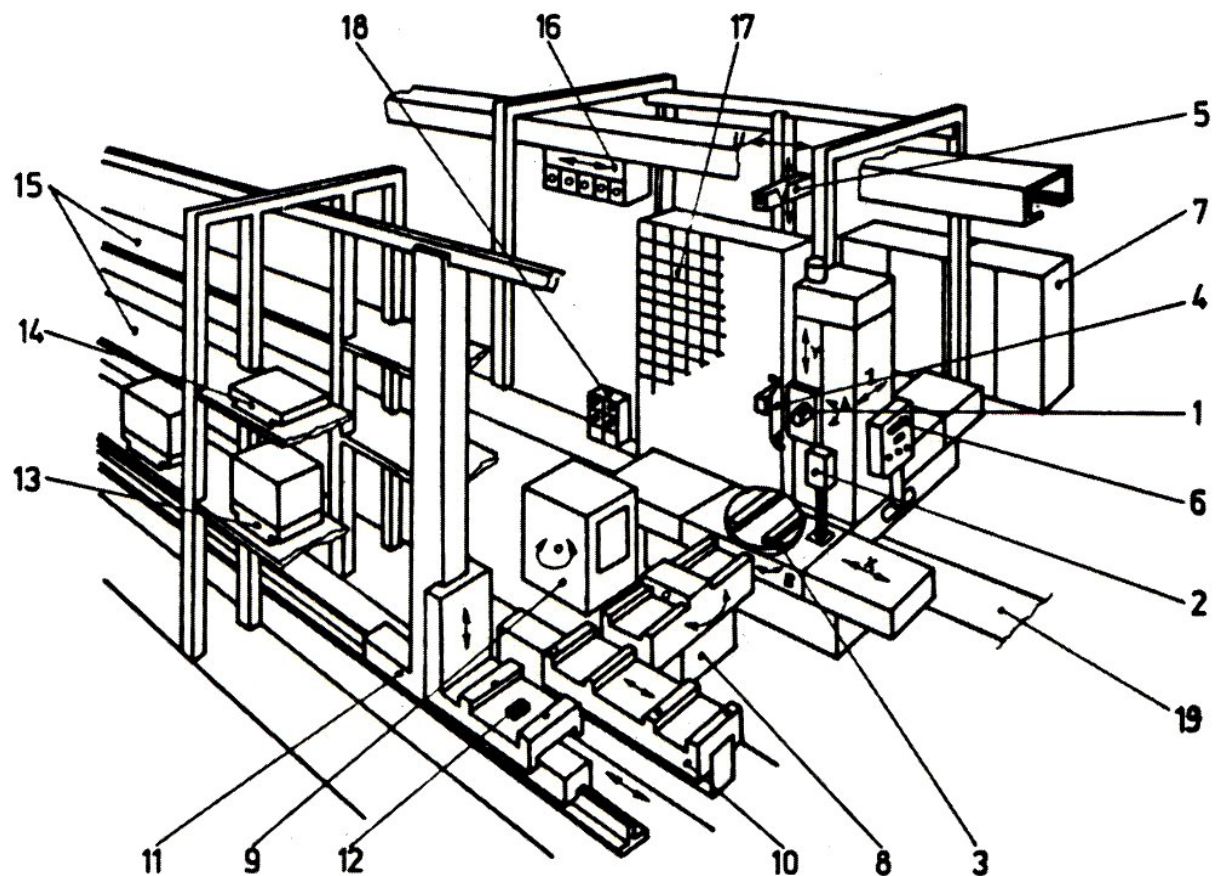
Obr.7.30 Řetězový zásobník

7.7. PRUŽNÉ VÝROBNÍ SYSTÉMY

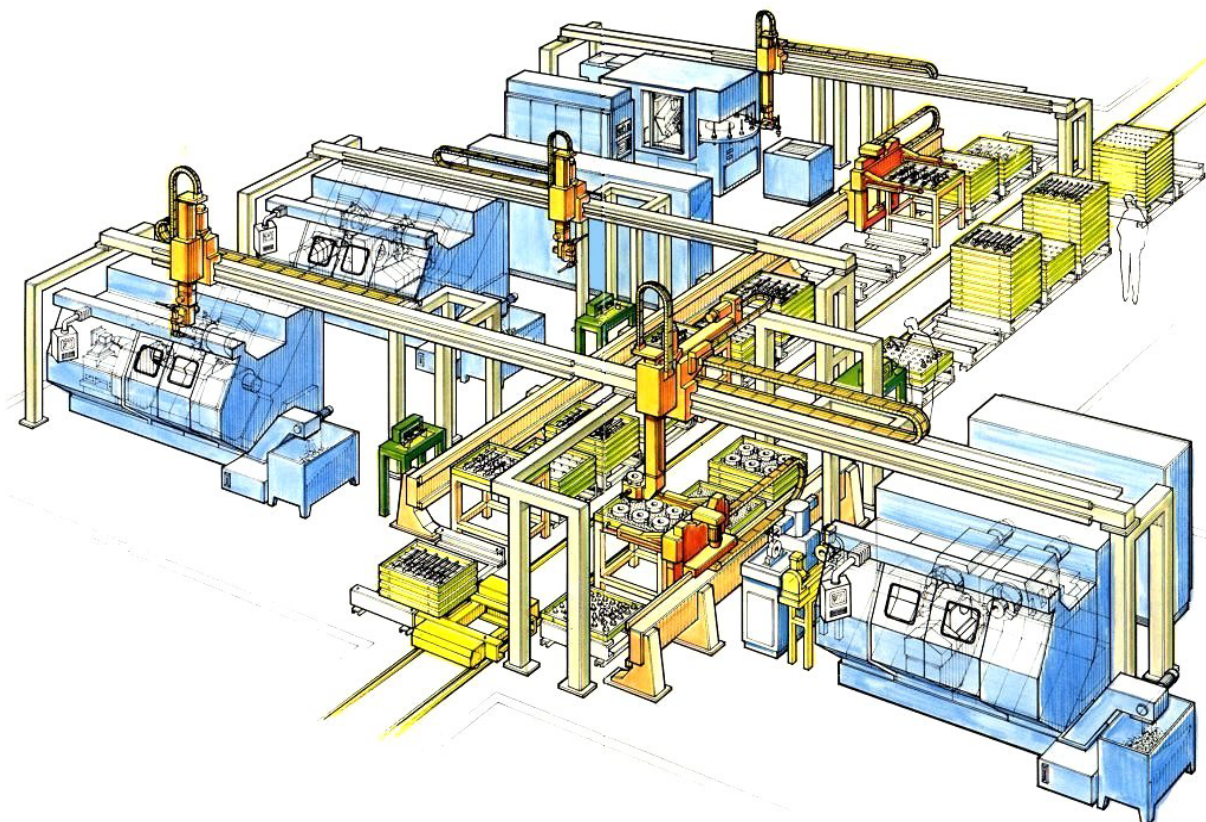
Spojováním CNC obráběcích center (případně výrobních buněk - CNC center vybavených zásobníkem technologických palet s upinací pro výrobky) do větších konfigurací a automatizováním manipulace s obrobky a jejich dopravy vznikají pružné výrobní systémy (PVS, nebo anglicky FMS - *Flexible Manufacturing System*). U nejmodernějších systémů je automatizována i mezistrojová doprava nástrojů. Pro vyráběné součásti mohou být vytvořeny automatické víceúrovňové sklady technologických palet, zařízení pro mezistrojovou dopravu palet, čisticí stanice, měřicí stanice a ruční pracoviště pro upínání, přepínání a odepínání obrobků v ranní směně. Vysoký stupeň automatizace jednotlivých strojů a komplexní počítačové řízení pak umožní bezobslužnou práci strojů v odpoledních nebo i nočních směnách.

Schéma modulu pružného výrobního systému s volným tokem obrobků je na obrázku č.7.31, kde jednotlivé popisy znamenají:

- 1) Vřeteno stroje se snímači momentu a výkonu pro adaptivní řízení řezných podmínek,
- 2) jednotka pro snímání rozměrů nástroje a automatické doladování průměru nástrojů (vyvrtávacích tyčí),
- 3) otočný stůl se základem technologické palety,
- 4) ruka pro automatickou výměnu nástroje,
- 5) NC manipulátor nástrojů,
- 6) CNC panel jako periférie skupinového CNC řízení,
- 7) silnoproudé řízení pomocných elektrických, hydraulických a chladicích agregátů,
- 8) otočný podavač technologických palet,
- 9) stanice pro sklápění a čištění obrobku na technologické paletě stlačeným vzduchem,
- 10) přesuvný stůl jako „nárazníkový“ sklad jedné palety,
- 11) regálový zakladač technologických palet,
- 12) identifikační prvek technologické palety,
- 13) paleta s upnutým obrobkem,
- 14) prázdná paleta bez upinače,
- 15) zdvojený regálový sklad,
- 16) vozík automatické mezistrojové dopravy nástrojových jednotek,
- 17) regálový zásobník pro nástrojové jednotky,
- 18) vozík pomocné ruční dopravy nástrojů,
- 19) dopravník třísek

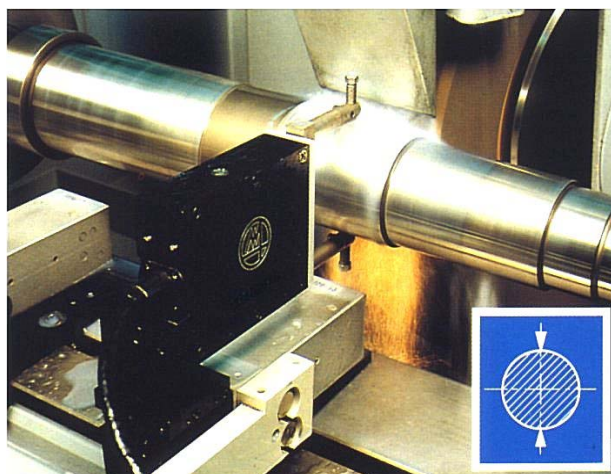


Obr.7.31 Modul pružného výrobního systému

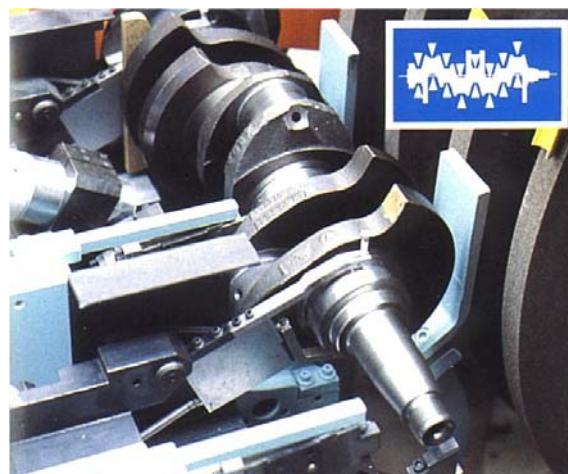


Obr. 7.32 Pružný výrobní systém firmy Emag na výrobu hřídelových součástí, do kterého je začleněna i bruska

V pružných výrobních systémech mohou být zařazena i aktivní měřicí zařízení pro automatickou kontrolu obrobku, buď přímo v pracovním cyklu stroje (obr.7.33) nebo těsně po jeho ukončení (7.34). Konkrétní rozměr obrobku je sledován tzv. sledovacími měřidly, jejichž doteky, vyrobené z otěruvzdorných materiálů (slnutý karbid, keramika), sledují nepřetržitě nebo v pravidelných intervalech obrobenou plochu a po dosažení žádaného rozměru dají impulz k zastavení operace. Nejčastěji jsou tato měřidla umístěna na obráběcích strojích pro dokončovací operace (honovací stroje, brusky, vyvrtávačky, atd.).



Obr. 7.33 Sledovací měřidlo firmy Marposs

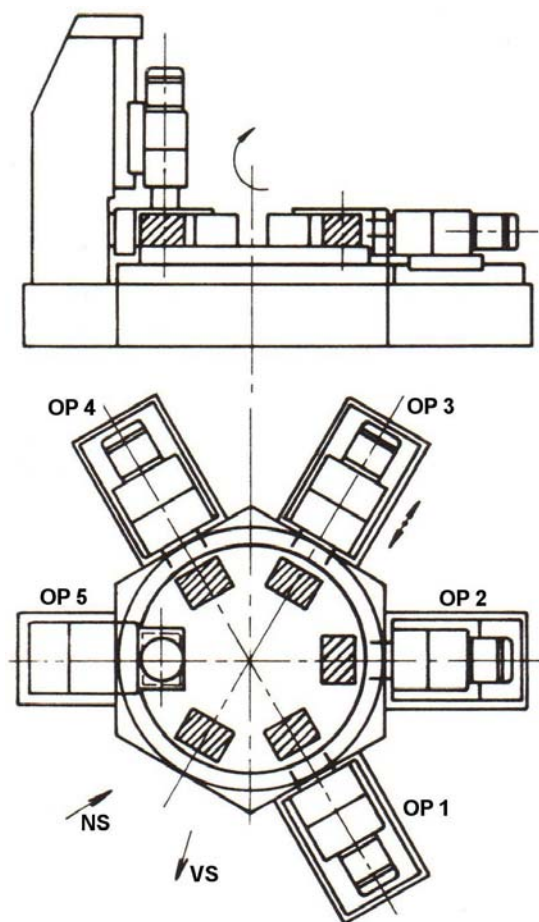


Obr. 7.34 Sledovací měřidlo firmy Marposs

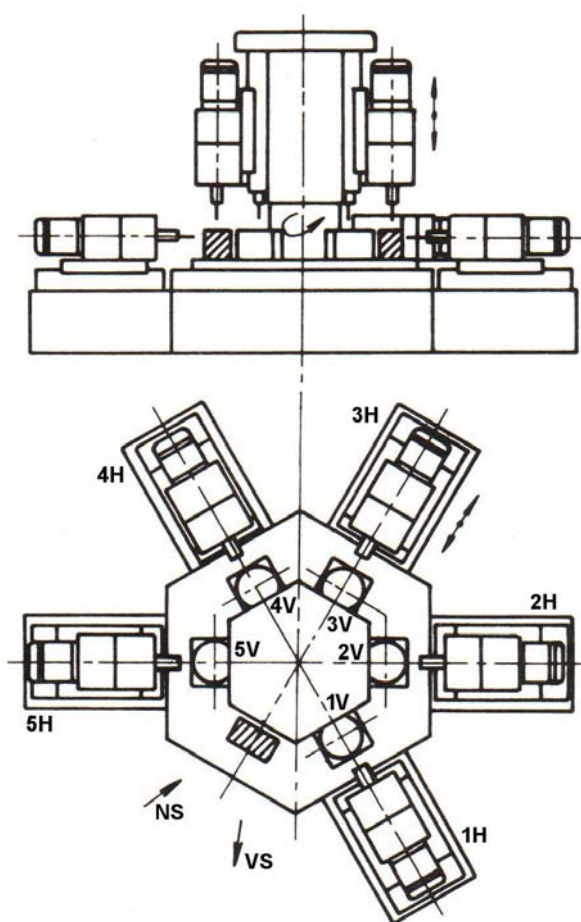
7.8. STROJE PRO VELKOSÉRIOVOU A HROMADNOU VÝROBU

Velkosériová a hromadná výroba umožňuje dosáhnout vysoké výkony obrábění, zvyšuje produktivitu a snižuje výrobní náklady. Protože stejné pracovní úkony se zde mnohonásobně opakují, je možné rozdělit je na jednotlivé úseky a každý z nich důsledným propracováním zdokonalit a urychlit. Ve velké míře se proto v takovéto výrobě může uplatnit automatizace a hlavně specializace výrobních zařízení.

Ve velkosériové a hromadné výrobě se jen výjimečně používají univerzální obráběcí stroje, číslicově řízené stroje jsou z tohoto typu výroby zcela vyloučeny. Uvedené stroje jsou pro daný účel zbytečně drahé a zejména složité, protože mají mnoho stupňů otáček a posuvů, široké pracovní možnosti a jsou vybaveny různým příslušenstvím, které zde nelze využít. V hromadné výrobě se používají zpravidla stroje jednoúčelové, ve velkosériové výrobě stroje úzce specializované (oba typy strojů jsou určeny pro podobnou operaci na součástech tvarově i rozměrově podobných). Jednoúčelový obráběcí stroj (JÚS) slouží pro výrobu určité součásti, lze ho však přizpůsobit pro stejnou práci na součásti která se liší pouze rozměry, a to výměnou některých funkčních celků stroje. Specializované stroje jsou konstruovány tak, že po menším seřízení je lze připravit pro výrobu jiné součásti. Jednoúčelové i specializované stroje jsou velmi často řešeny jako stavebnicové, tj. jsou složeny převážně z typizovaných jednotek, které se dají podle potřeby vyměňovat.



Obr.7.35 JÚS s kruhovým stolem



Obr.7.36 JÚS s prstencovým stolem

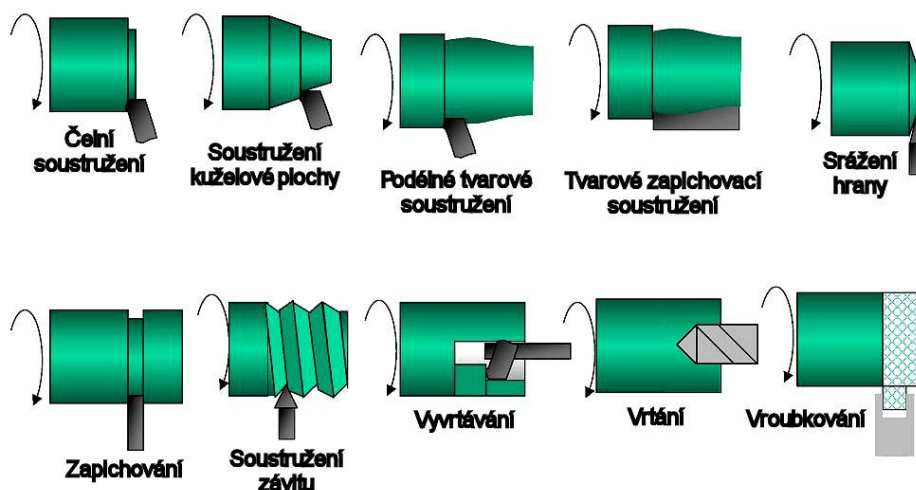
8. ZÁKLADNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Metody obrábění lze rozdělit podle různých hledisek, např. podle charakteru práce existují ruční (pilování, sekání, zaškrabávání, atd.) a strojní metody obrábění, podle charakteristických znaků se metody obrábění dělí následovně:

- metody obrábění pomocí nástrojů s definovanou geometrií (soustružení, frézování, vrtání, vystružování, zahlubování, vyvrtávání, obrážení, hoblování, protahování, atd.),
- metody obrábění pomocí nástrojů s nedefinovanou geometrií (dokončovací metody - broušení, honování, lapování, superfinišování, atd.),
- nekonvenční metody obrábění (elektroerozivní obrábění, chemické obrábění, obrábění ultrazvukem, obrábění elektronovým paprskem, obrábění vodním paprskem, atd.),
- úpravy obrobených ploch (válečkování, hlazení, brokování, balotínování, leštění atd.).

8.1. SOUSTRUŽENÍ

Soustružení je obráběcí metoda používaná pro zhotovení součástí rotačních tvarů, většinou pomocí jednobřítých nástrojů různého provedení. Z mnoha hledisek představuje soustružení nejjednodušší způsob obrábění a také nejužívanější metodu obrábění ve strojírenské praxi. Soustružením lze obrábět vnější a vnitřní válcové, kuželové i tvarové plochy, rovinné čelní plochy a zápichy (obr.8.1). Na soustruzích lze dále vrtat, vyvrtávat, vystružovat, řezat závity, vroubkovat, válečkovat, hladit, leštit, vyrábět hřbetní plochy tvarových fréz podsoustružováním (obr.8.2), atd.



Obr.8.1 Základní práce na soustruhu



Hlavní pohyb je *rotační*, koná ho obrobek, posuvový pohyb je *přímočarý* a koná ho nástroj (viz obr.1.4 a 1.5). Řezný pohyb se při soustružení válcové plochy realizuje po šroubovici a při soustružení čelní plochy po Archimedově spirále.

Obr.8.2 Podsoustružování hřbetu frézy

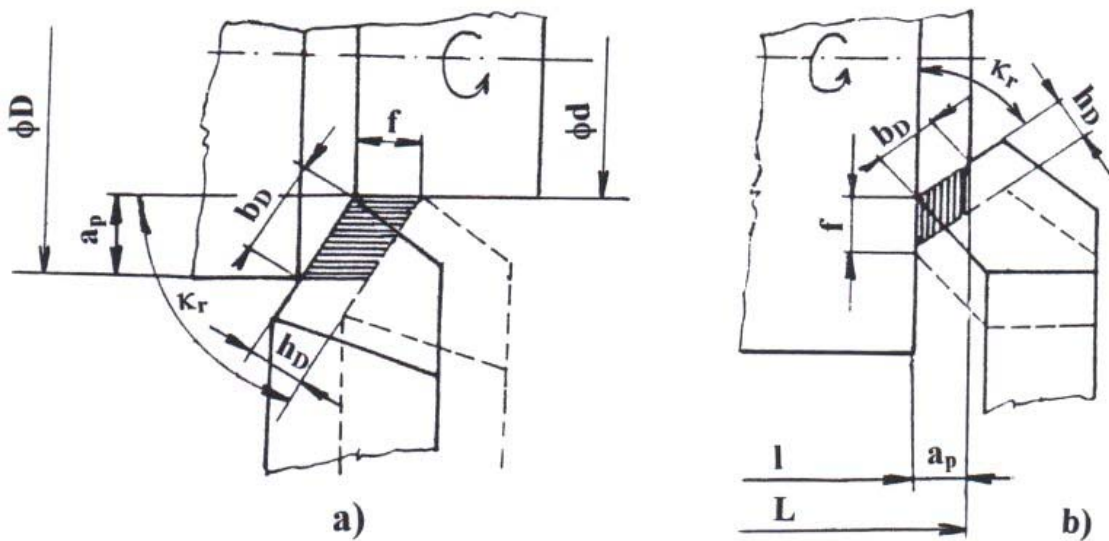
Hodnoty řezné rychlosti v_c , posuvové rychlosti v_f a rychlosti řezného pohybu v_e se vyjádří na základě vztahů (pro standardní podmínky soustružení platí, že $v_f \ll v_c$ a $f \ll \pi D$, takže $v_e \cong v_c$):

$$v_c = \pi \cdot D \cdot n \cdot 10^{-3} \quad [\text{m min}^{-1}], \quad (8.1)$$

$$v_f = f \cdot n \quad [\text{mm min}^{-1}], \quad (8.2)$$

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} = 10^{-3} \cdot n \cdot \sqrt{(\pi \cdot D)^2 + f^2} \quad [\text{m min}^{-1}], \quad (8.3)$$

kde: D [mm] - průměr obráběné plochy,
 n [min^{-1}] - otáčky obrobku,
 f [mm] - posuv na otáčku obrobku.



Obr.8.3 Identifikace průřezu třísky při soustružení

a) válcová plocha, **b)** čelní plocha, a_p - šířka záběru ostří, b_D - jmenovitá šířka třísky, h_D - jmenovitá tloušťka třísky, κ_r - nástrojový úhel nastavení hlavního ostří, D - průměr obráběné plochy, d - průměr obrobené plochy, L - délka obráběné plochy, l - délka obrobené plochy

Identifikace rozměrů průřezu třísky pro základní případy soustružení je uvedena na obrázku č.8.3. Šířka záběru ostří a_p se vyjádří podle vztahu:

$$\text{pro podélné soustružení} \quad a_p = 0,5 (D - d) \quad [\text{mm}], \quad (8.4)$$

$$\text{pro čelní soustružení} \quad a_p = L - l \quad [\text{mm}]. \quad (8.5)$$

Jmenovitá šířka třísky b_D a jmenovitá tloušťka třísky h_D se vypočítají podle vztahů:

$$b_D = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad [\text{mm}], \quad (8.6)$$

$$h_D = f \cdot \sin \kappa_r \quad [\text{mm}]. \quad (8.7)$$

Jmenovitý průřez třísky A_D se stanoví podle vztahu:

$$A_D = b_D \cdot h_D = a_p \cdot f \quad [\text{mm}^2]. \quad (8.8)$$

8.1.1. Řezné síly

Celková řezná síla F a její složky - řezná síla F_c , posuvová síla F_f a pasivní síla F_p se pro podélné soustružení válcové plochy stanoví podle vztahů:

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \quad [\text{N}], \quad (8.9)$$

$$F_f = C_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} \quad [\text{N}], \quad (8.10)$$

$$F_p = C_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} \quad [\text{N}], \quad (8.11)$$

kde: C_{F_c} , C_{F_f} , C_{F_p} [-] - materiálové konstanty,

x_{F_c} , x_{F_f} , x_{F_p} [-] - exponenty vlivu a_p ,

y_{F_c} , y_{F_f} , y_{F_p} [-] - exponenty vlivu f ,

a_p [mm] - šířka záběru ostří,

f [mm] - posuv na otáčku,

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad [\text{N}]. \quad (8.12)$$

Měrná řezná síla k_c je vyjádřena řeznou silou, vztahenou na jednotku plochy řezu. Je definována jako poměr řezné síly F_c a plochy jmenovitého průřezu třísky A_D :

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad [\text{MPa}]. \quad (8.13)$$

Celkový výkon obráběcího stroje, potřebný pro pokrytí řezného výkonu (viz vztah 3.17) a pasivních oporů stroje se vypočítá podle vztahu:

$$P_m = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4 \cdot \eta} \quad [\text{kW}], \quad (8.14)$$

kde: F_c [N] - řezná síla,

v_c [m min⁻¹] - řezná rychlost,

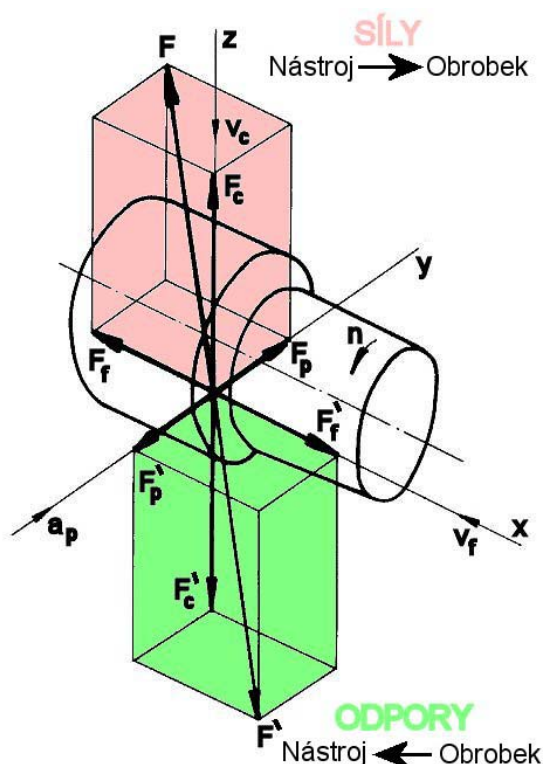
η [-] - mechanická účinnost obráběcího stroje.

8.1.2. Jednotkový strojní čas

Při stanovení jednotkového strojního času soustružnických obráběcích procesů se vychází z poměrů uvedených na obrázku č.8.5. Pro podélné soustružení válcové plochy (obr.8.5a) platí:

$$t_{AS} = \frac{L}{n \cdot f} \quad [\text{min}], \quad (8.15)$$

kde: L [mm] - dráha nástroje, n [min⁻¹] - otáčky obrobku, f [mm] - posuv na otáčku.



Obr.8.4 Řezné síly a opory při podélném soustružení

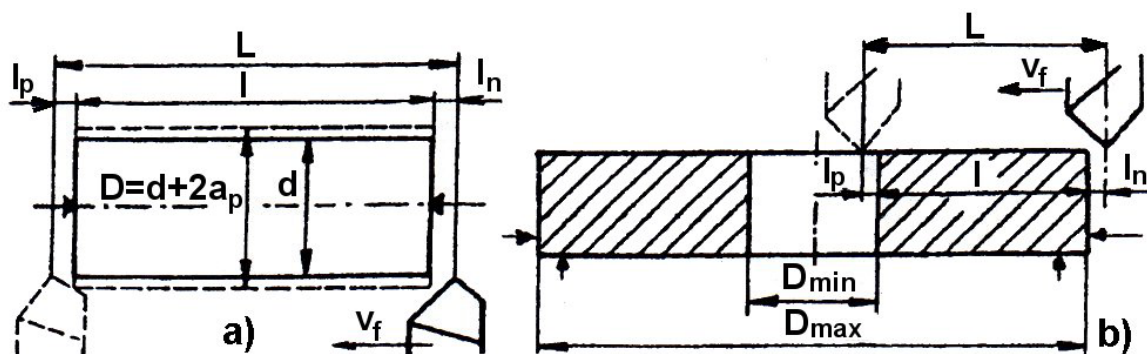
Dráha nástroje ve směru posuvu L [mm] je dána součtem jednotlivých složek:

$$L = l + l_n + l_p \quad [\text{mm}] \quad (8.16)$$

kde: l [mm] - délka soustružené plochy,

l_n [mm] - délka náběhu,

l_p [mm] - délka přeběhu.



Obr.8.5 Jednotkový strojní čas
a) podélné soustružení, b) čelní soustružení

Pro soustružení čelní plochy (obr. 8.5b) se rozlišuje jednotkový strojní čas obrábění při konstantních otáčkách obrobku t_{ASn} a obrábění konstantní řeznou rychlostí t_{ASv} . Hodnota t_{ASn} se určí podle vztahu (8.15), dráha L se např. pro poměry na obrázku č.8.5b vypočítá podle vztahu:

$$L = \frac{[(D_{\max} + 2l_n) - (D_{\min} - 2l_p)]}{2} \quad [\text{mm}], \quad (8.17)$$

Velikost t_{ASv} se pro poměry na obrázku č.8.5b stanoví podle vztahu:

$$t_{ASv} = \frac{\pi \cdot [(D_{\max} + 2l_n)^2 - (D_{\min} - 2l_p)^2]}{4 \cdot 10^3 \cdot v_c \cdot f} \quad [\text{min}], \quad (8.18)$$

kde: v_c [m min^{-1}] - řezná rychlost,

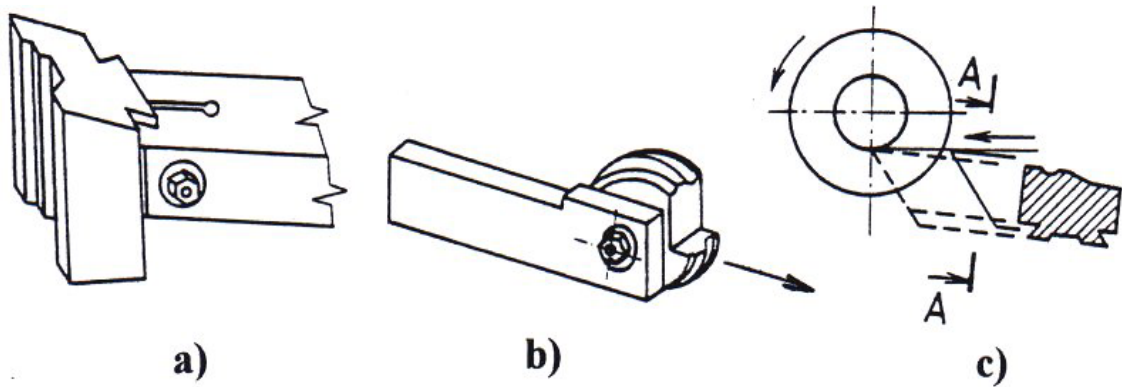
f [mm] - posuv na otáčku.

8.1.3. Nástroje

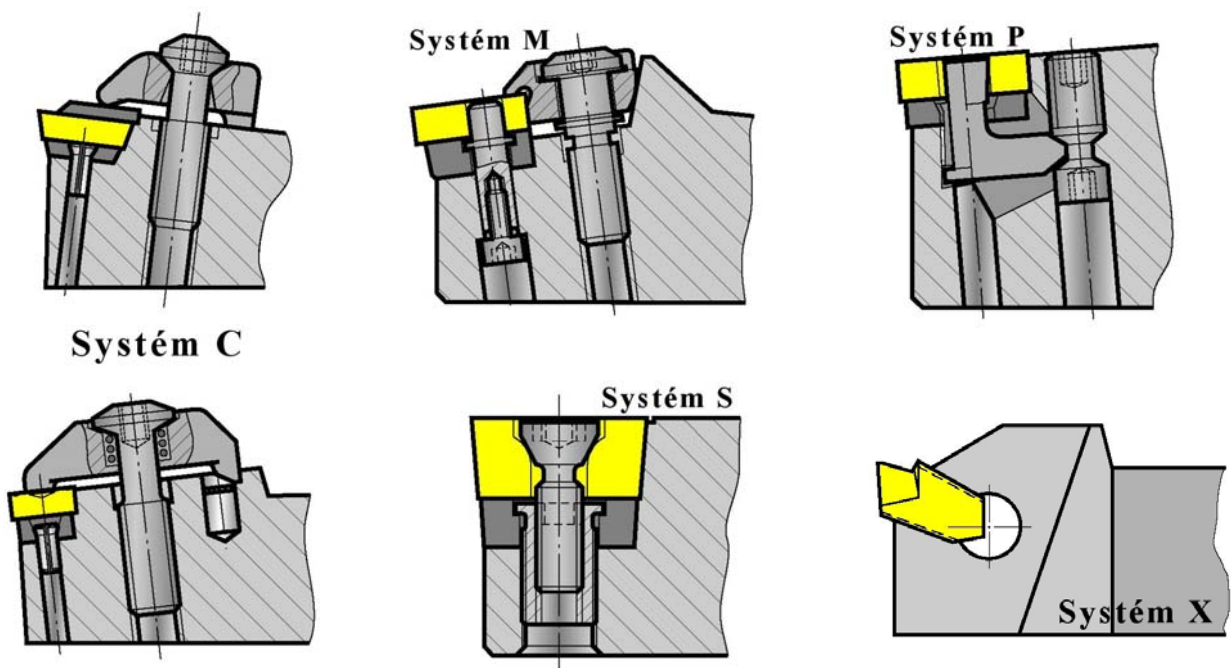
Z technologického hlediska se rozlišují soustružnické nože **radiální** (nejčastěji užívané), **prizmatické**, **kotoučové** a **tangenciální** (obr.8.6).

Radiální nože lze dělit podle konstrukce, směru posuvového pohybu, způsobu obrábění, tvaru tělesa nože a použitého nástrojového materiálu. V závislosti na konstrukci jsou radiální nože:

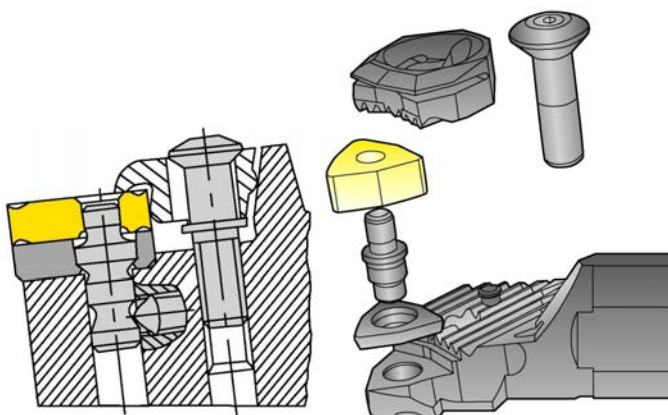
- **celistvé** (těleso i řezná část nože je z nástrojového materiálu),
- **s pájenými břitovými destičkami** (břítová destička z řezného materiálu je pájena tvrdou pájkou na těleso nože z konstrukční oceli),
- **s vyměnitelnými břitovými destičkami** (břítová destička z řezného materiálu je mechanicky upnuta v nožovém držáku z konstrukční oceli - systémy upínání ISO jsou uvedeny na obrázku č.8.7, některé další systémy na obr.8.8 až 8.10).



Obr.8.6 Tvarové soustružnické nože
a) prizmatický, b) kotoučový, c) tangenciální



Obr.8.7 Systémy upínání vyměnitelných břitových destiček



Obr.8.8 Upínání M.W
firmy Iscar

Obr.8.9 Upínání P
firmy Seco



Obr.8.10 Upínání rotující destičky
na noži firmy Mitsubishi

1		2		3					4	
Způsob upínání Způsob upínania		Tvar destičky Tvar doštičky		Tvar nože - úhel nastavení Tvar noža - uhol nastavenia					Úhel hřbetu Uhol chrpta	
C		S		A	B	C	D	D		
P		T		E	F	G	H	J	N	C
M		R		K	L	M	N	P	$\alpha_n=0^\circ$	$\alpha_n=7^\circ$
S		W		Q	R	S	S	T		P
X		V		U	V	W	X	T		
G		L		Z				Y		
		X	Speciál Špeciál							

5	
Směr řezu Smer rezu	
R	
L	
N	

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
C K J N R - 32 25 L 19 - S

6						8		9													
Výška držáku (mm) Výška držiaka (mm)						Celková délka Celková dĺžka		Velikost destičky Veľkosť doštičky													
08	10	12	16	20	25		l_1 [mm]														
32	38	40	45	50	D			60													
					E			70													
					F			80													
					H			100													
					J			110													
					K			125													
					L			140													
					M			150													
					N			160													
					P			170													
					Q			180													
					R			200													
					S			250													
					T			300													
					U	350															
					V	400															
					W	450															
					X	Spec.															
					Y	500															

7					
Šířka držáku (mm) Šírka držiaka (mm)					
08	10	12	16	20	25
32	38	40	45	50	

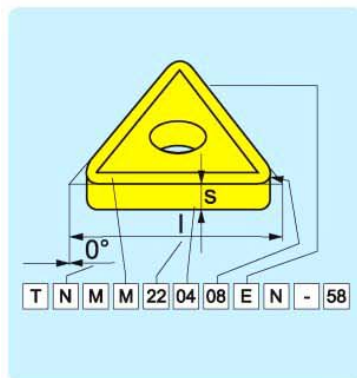
10	
Údaje výrobce Údaje výrobcu	
M	Způsob upínání "S" s podložkou Spôsob upínania "S" s podložkou
S	Se seřizovacími šrouby S nastavovacími skrutkami

Obr.8.12 Označování nožových držáků s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutých karbidů

1			
Tvar destičky / Tvar doštičky			
H	O	P	R
S	T	C	D
E	M	V	W
L	A	B	K

2	
Úhel hřbetu / Uhol chrčta	
A	B
C	D
E	F
G	N
	Speciální Špeciálny
P	O

4	
Provedení / Prevedenie	
N	R
F	A
M	G
W	T
	Speciální Špeciálne
Q	X

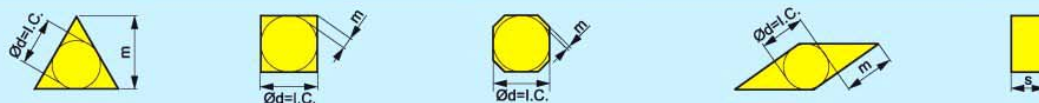


ISO kód

ANSI kód

1	2	3	4
T	N	U	N
T	N	M	M
1	2	3	4
T	N	U	
T	N	M	M

3						
Tolerance / Tolerancia						
Označení / Označenie	Tolerance / Tolerancia [mm]			Tolerance / Tolerancia [Palce]		
	m (±)	s (±)	d = I.C. (±)	m (±)	s (±)	d = I.C. (±)
A	0,005	0,025	0,025	0,0002	0,001	0,0010
F	0,005	0,025	0,013	0,0002	0,001	0,0005
C	0,013	0,025	0,025	0,0005	0,001	0,0010
H	0,013	0,025	0,013	0,0005	0,001	0,0005
E	0,025	0,025	0,025	0,0010	0,001	0,0010
G	0,025	0,130	0,025	0,0010	0,005	0,0010
J	0,005	0,025	0,05 + 0,13	0,0002	0,001	0,002 + 0,005
K	0,013	0,025	0,05 + 0,13	0,0005	0,001	0,002 + 0,005
L	0,025	0,025	0,05 + 0,13	0,0010	0,001	0,002 + 0,005
M	0,08 + 0,18	0,130	0,05 + 0,13	0,003 + 0,007	0,005	0,002 + 0,005
N	0,08 + 0,18	0,025	0,05 + 0,13	0,003 + 0,007	0,001	0,002 + 0,005
U	0,05 + 0,38	0,130	0,08 + 0,25	0,005 + 0,015	0,005	0,003 + 0,010



Obr.8.13-1 Označování vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů

5								
Délka ostří / Dĺžka reznej hrany								
d=I.C.		R	S	T	C	D	V	W
mm	Palce							
3,97	5/32"			06				
5,00		05						
5,56	7/32"			09				03
6,00		06						
6,35	1/4"			11	06	07		04
8,00		08						
9,525	3/8"	09	09	16	09	11	16	06
10,0		10						
12,0		12						
12,7	1/2"	12	12	22	12	15		08
15,875	5/8"	15	15	27	16			
16,0		16						
19,05	3/4"	19	19	33	19			
20,0		20						
25,0		25						
25,4	1"	25	25		25			
31,75	1 1/4"	31						
32,0		32						

6		
Tloušťka / Hrúbka		
Označ.	mm	Palce
01	1,59	1/16"
T1	1,98	
02	2,38	3/32"
03	3,18	1/8"
T3	3,97	5/32"
04	4,76	3/16"
05	5,56	
06	6,35	1/4"
07	7,94	5/16"
09	9,52	3/8"

7		
Rádus špičky / Rádus špičky		
Označ.	r ₁	
	mm	Palce
00	0	0"
02	0,2	
04	0,4	1/64"
08	08	1/32"
12	1,2	3/64"
16	1,6	1/16"
24	2,4	3/32"
32	3,2	1/8"
Kruhové destičky / Kruhové doštičky		
d=I.C.	Označ.	
Palce	00	
mm	M0	

5
22
22

6
04
04

7
08
08

8
E

9
N

10
-
58

5A
4
4

6A
3
3

7A
2
2

8
E

9
N

10
-
58

ANSI kód		
Vepsaná kružnice Vpísaná kružnica		
Označ.	d = I.C.	
	mm	Palce
2	6,35	1/4"
3	9,525	3/8"
4	12,7	1/2"
5	15,875	5/8"
6	19,05	3/4"
8	25,4	1"
10	31,75	1 1/4"
Tloušťka Hrúbka		
Označ.	s	
	mm	Palce
2	3,18	1/8"
3	4,76	3/16"
4	6,35	1/4"
5	7,94	5/16"
6	9,52	3/8"
Rádus špičky Rádus špičky		
Označ.	r ₁	
	mm	Palce
0	0	0"
1	0,4	1/64"
2	0,8	1/32"
3	1,2	3/64"
4	1,6	1/16"
6	2,4	3/32"
8	3,2	1/8"

8			
Provedení ostří / Prevedenie reznej hrany			
	Ostré hrany Ostré hrany		Zaoblené hrany Zaoblené hrany
	Hrany s fazetkou Hrany s fazetkou		Zaoblené hrany s fazetkou Zaoblené hrany s fazetkou

9	
Směr posuvu / Smer posuvu	
R	
L	
N	

10
Utvařeč / Utvárač

Obr.8.13-2 Označování vyměnitelných břitových destiček ze slitutých karbidů

Některé radiální soustružnické nože s vyměnitelnými břitovými destičkami jsou konstruovány jako stavitelné. U tohoto typu nožů je břitová destička upnuta do speciální vložky, která se pak připevňuje k základnímu držáku a pomocí šroubů, které posouvají vložku v podélné nebo i příčné ose nože, lze v určitém rozsahu nastavit polohu špičky destičky.

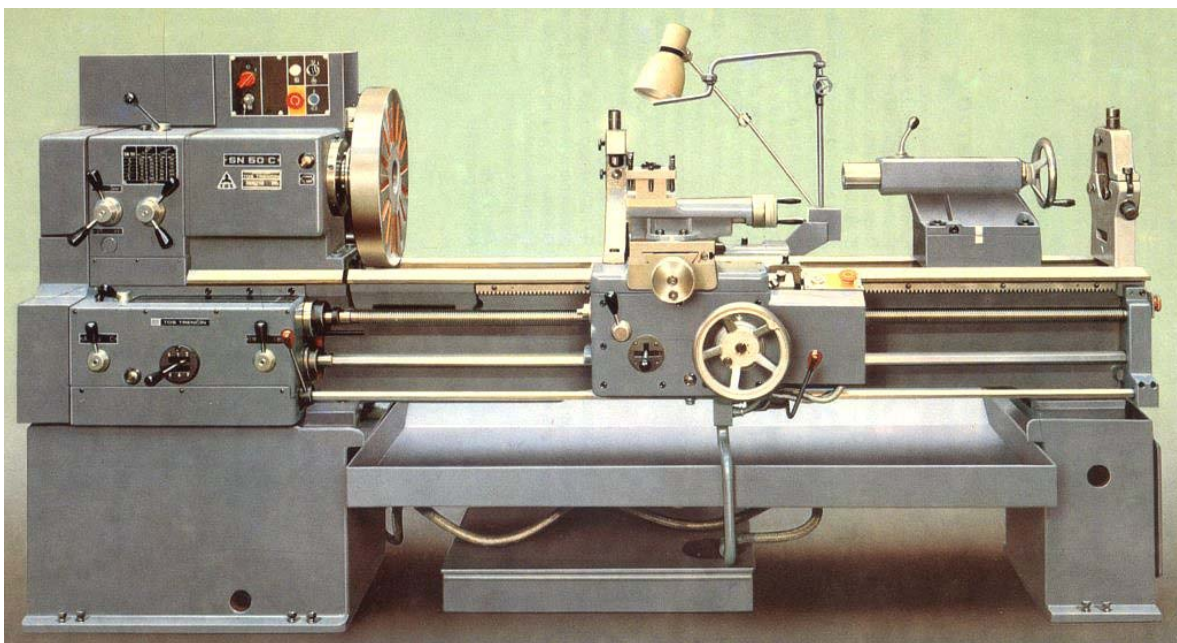
Soustružnické nože (obr.8.12) i vyměnitelné břitové destičky ze slinutých karbidů (obr.8.13-1, 8.13-2) jsou označovány jednotným systémem ISO, který používají všichni výrobci nástrojů a nástrojových materiálů. Označování podle obrázků č.8.13-1 a 8.13-2 platí i pro vyměnitelné břitové destičky z cermetů. Keramické destičky mají jen velmi málo odlišný systém označování, destičky ze supertvrdých materiálů jsou většinou poměrně jednoduché a pro jejich označování jsou využívány prvky z označování SK destiček.

8.1.4. Soustruhy

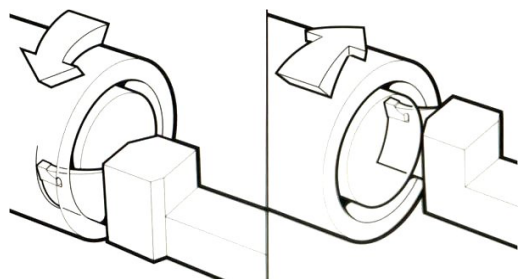
Soustružnické stroje představují největší podíl strojírenské obráběcí techniky. V obráběcích provozech strojírenských podniků se vyskytují ve velkém počtu typů a vykazují různý stupeň automatizace. Z konstrukčně technologického hlediska se rozlišují soustruhy ***hrotové, svíslé, čelní, revolverové a speciální*** (např. podsoustružovací). Podle stupně automatizace se používají soustruhy ***ručně ovládané, poloautomatické a automatické***. U poloautomatických a automatických soustruhů se aplikuje tvrdá automatizace nebo pružná automatizace pracovního cyklu.

Hrotové soustruhy

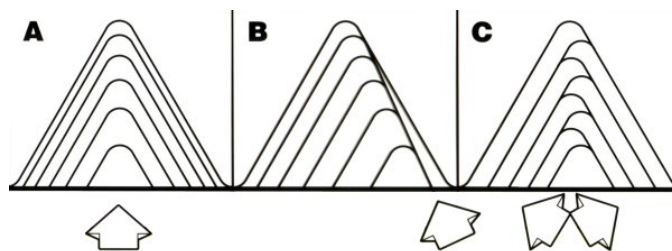
Hrotové soustruhy se používají v kusové a malosériové výrobě, pro soustružení hřídelových a přírubových součástí rozličných rozměrů a tvarů, bez náročného seřizování stroje. Vyrábějí se jako soustruhy hrotové ***univerzální a jednoduché*** (produkční). Univerzální hrotové soustruhy (obr.8.14) mají vodící šroub a lze na nich obrábět vnější a vnitřní rotační plochy, čelní rovinné plochy, zapichovat při podélném i čelním (obr.8.15) soustružení, řezat závitý závitovým nožem (8.16), soustružit kuželové plochy (obr.8.17), příp. plochy tvarové.



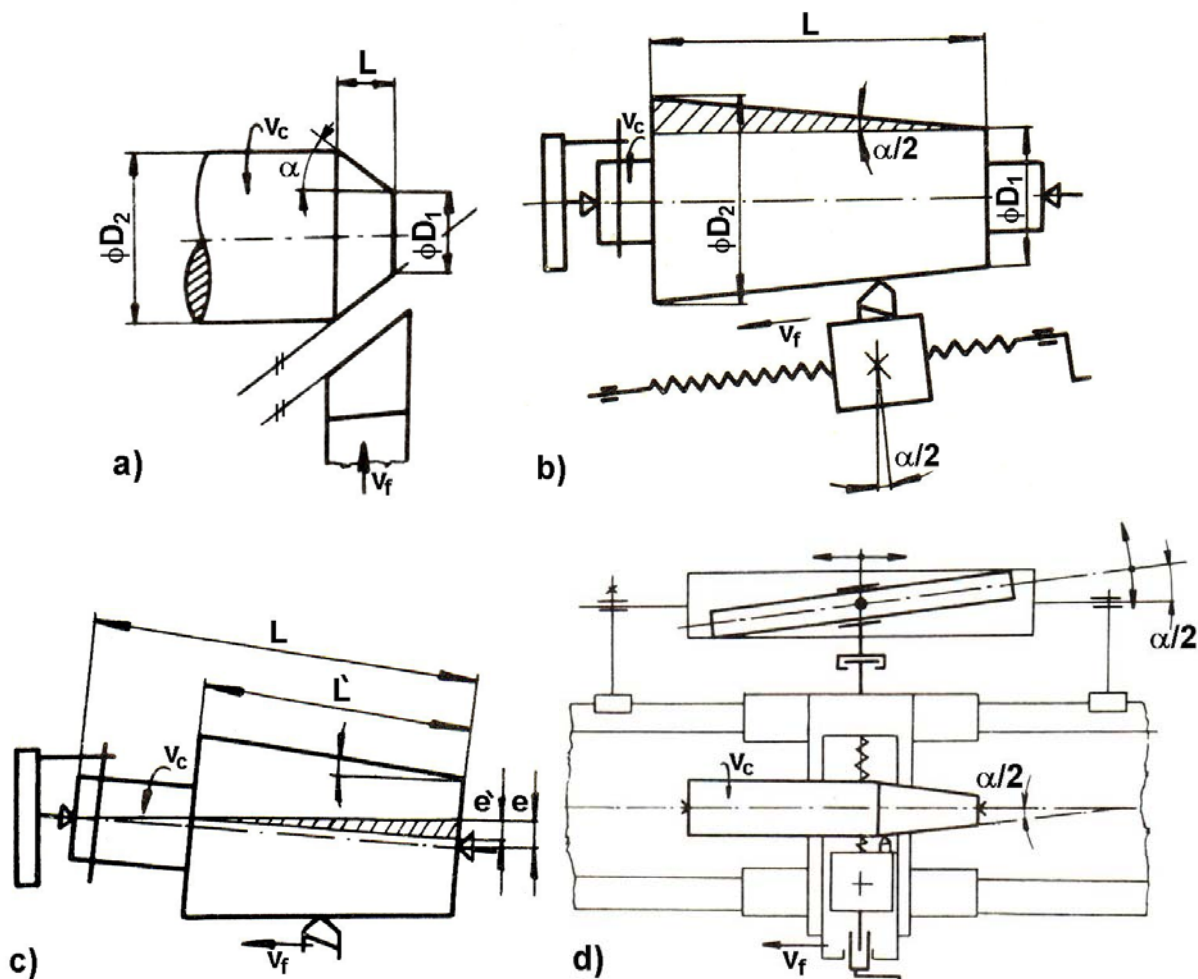
Obr.8.14 Univerzální hrotový soustruh SN50C



Obr.8.15 Čelní zapichování



Obr.8.16 Soustružení závitu



Obr.8.17 Soustružení kuželů

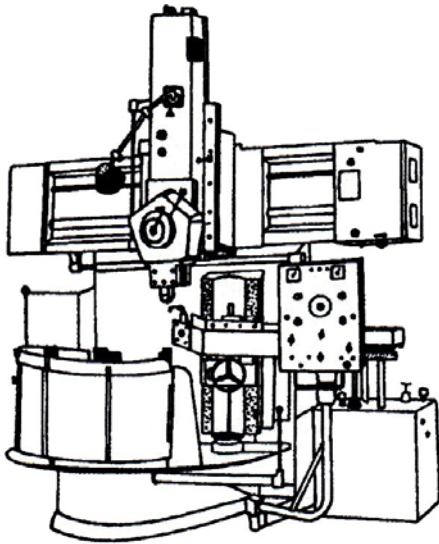
- a) zapichovací způsob - velmi krátké kužely, b) natočením nožového suportu,
c) vyosením koníku - velmi štíhlé kužely, d) pomocí vodícího pravítka

Jednoduché hrotové soustruhy (produkční) nemají vodící šroub, proti univerzálním soustruhům jsou vybaveny elektromotorem většího výkonu. Používají se hlavně pro hrubovací práce, jejich rozsah otáček a posuvů je menší než u soustruhů univerzálních.

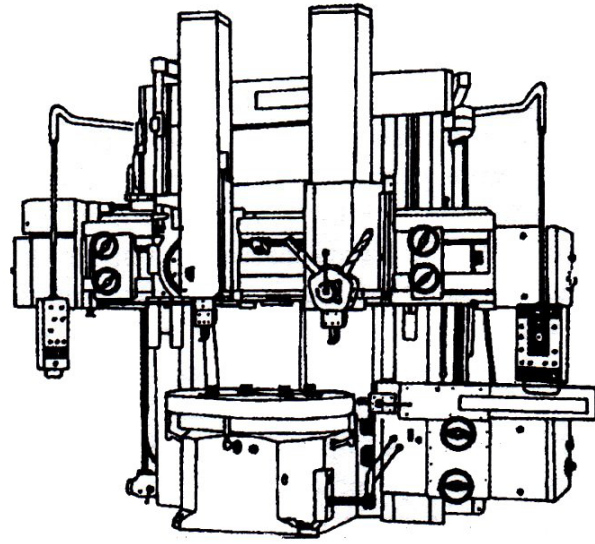
Velikost hrotových soustruhů se posuzuje především podle velikosti maximálního průměru obrobku, který na nich lze obrobřit. Jako další parametr posuzování slouží největší délka soustružení, daná vzdáleností mezi hroty. Univerzální hrotové soustruhy bývají často vybaveny zařízením pro plynulou změnu otáček vřetena.

Svislé soustruhy

Svislé soustruhy (karusely) se vyrábějí ve dvou variantách, *jednostojanové* (malé, do průměru stolu 1200 mm - obr.8.18) a *dvoustojanové* (velké, do průměru stolu 18000 mm - obr.8.19). Jednostojanové soustruhy mají na příčniku pohybujiícím se po stojanu obvykle suport s pětibokou revolverovou hlavou, druhý suport je pak přímo na stojanu. Dvoustojanové svislé soustruhy mají příčník pohybujiící se po dvou stojanech, na příčniku jsou většinou dva suporty a další suport je na jednom nebo obou stojanech.



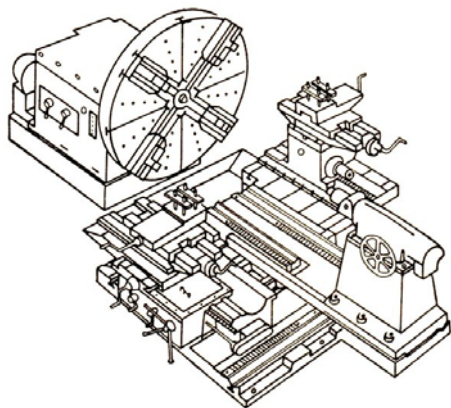
Obr.8.18 Jednostojanový svislý soustruh



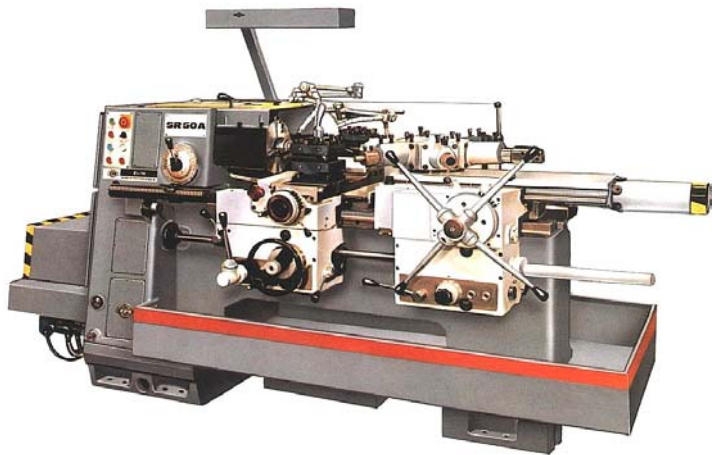
Obr.8.19 Dvoustojanový svislý soustruh

Svislé soustruhy se používají v kusové, malosériové a některé typy i v sériové výrobě středních a velkých rotačních součástí malého poměru délky k průměru. Hlavními částmi těchto strojů jsou otočný stůl, stojany a příčníky se suporty. Otočný stůl je uložen u menších a středně velkých strojů na valivém vedení, u velkých stolů na vedení prizmatickém.

Na svislých soustruzích se obrábějí vnější a vnitřní válcové plochy, kuželové plochy (při natočených suportech), řezou závity, případně soustruží tvarové plochy, pokud je stroj vybaven kopirovacím zařízením. Jako zvláštní příslušenství mají někdy naklápěcí brousící vřeteník pro broušení vnějších i vnitřních povrchů. Rovněž bývají vybavovány indikací polohy a aplikuje se u nich číslicové řízení.



Obr.8.20 Čelní soustruh



Obr.8.21 revolverový soustruh SR50A

Čelní soustruhy

Čelní soustruhy se používají pro obrábění deskovitých součástí velmi velkého průměru. Jsou vybaveny jedním nebo dvěma podélnými suporty a v některých případech mají i kóník pro podepření obrobku (obr.8.20).

Revolverové soustruhy

Revolverové soustruhy jsou určeny hlavně pro výrobu součástí v menších a středních sériích, vyžadujících k obrobení větší počet nástrojů. Obrobky se na těchto strojích obrábějí při jednom upnutí, postupně více nástroji revolverové hlavy (nástroje se upínají v držácích pro jeden nebo více nástrojů, do upínacích otvorů revolverové hlavy) a nástroji, upnutými na suportu. Jde především o nástroje pro obrábění povrchů a nástroje pro obrábění děr. Součásti se obrábějí při jednom upnutí postupně, s využitím nástrojů v jednotlivých polohách hlavy. Předností revolverových soustruhů, při porovnání s hrotovými soustruhy, je rychlé a přesné nastavení nástroje vzhledem k upnutému obrobku a možnost obrábění několika nástroji současně, i při současné práci revolverové hlavy a příčných suportů.

Na revolverových soustruzích je možno soustružit podélně i příčně a v ose obrobku vrtat, vyvrtávat, vystružovat, řezat závity apod. Při řezání závitu je nůž veden výměnnou vodící patronou, jejíž otáčky jsou odvozeny odpovídajícím převodem od vřetena a která posouvá čelist spojenou s držákem nože. Nůž je upevněn na výkyvné páce a čelist se uvádí do záběru ručně.

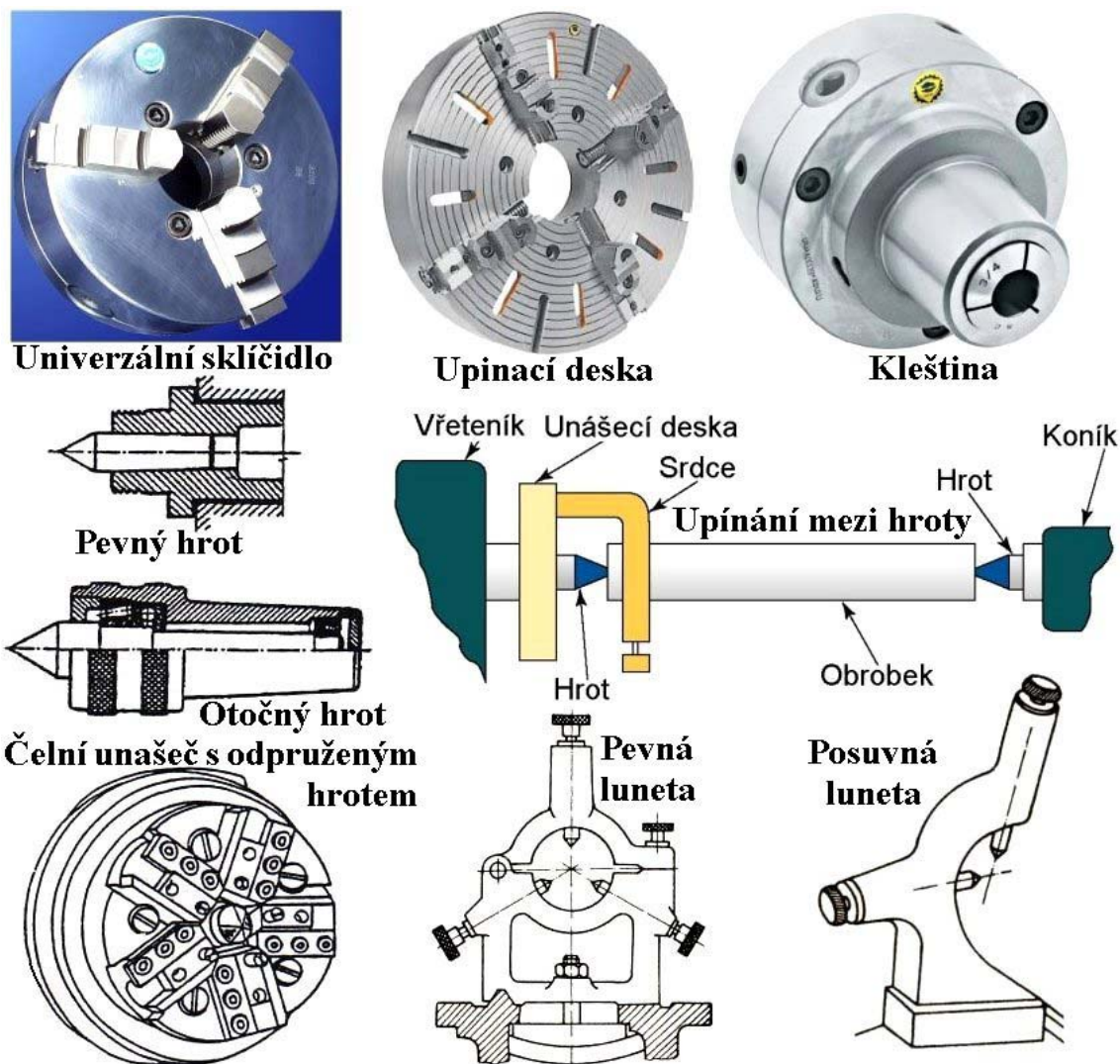
Výchozím polotovarem je buď tyčový materiál, který se upíná do kleštin, nebo výkovky, výlisky a odlitky upínané do sklíčidel. Řízení pracovního cyklu nástrojů vykonává obsluha stroje, nebo je pracovní cyklus automatizován. Rovněž řazení otáček a posuvů bývá u některých strojů ovládáno předvolbou nebo řízeno programem. Revolverové soustruhy jsou často vybavovány číslíkovým řízením. Podle polohy osy otáčení revolverové hlavy dělíme revolverové soustruhy na soustruhy s vodorovnou, svislou (obr.8.21) nebo šikmou osou revolverové hlavy.

8.1.4.1. Upínání nástrojů a obrobků

Upnutí soustružnických nástrojů má být jednoznačné a spolehlivé, má vykazovat minimální vyložení a je-li to nutné, má umožnit výškové přestavení. Soustružnické nože se upínají do různých upínek, nebo do otočných nožových hlav, které se využívají zejména u univerzálních hrotových soustruhů a je možné do nich upnout až čtyři nože současně. Upínání nástrojů ve speciálních držácích do otočných revolverových hlav se uplatňuje u revolverových soustruhů, automatických soustruhů, ale také u soustruhů svislých. U CNC poloautomatických a automatických soustruhů a obráběcích center se používá upnutí do speciálních držáků, které jsou řešeny tak, že seřizování nástroje je provedeno mimo stroj v seřizovacím přístroji. Předseřizený nástroj se vkládá do zásobníku nástrojů a odtud se v automatickém cyklu aplikuje pro obráběcí proces.

Upnutí obrobku má být spolehlivé, má vykazovat dostatečnou tuhost a má zajistit jednoznačnou polohu obrobku vzhledem k funkčním částem obráběcího stroje. Pro upnutí obrobků na soustružnických strojích se používá celá řada upínacích elementů buď jednotlivě, nebo ve vzájemné kombinaci - obr. 8.21.

Způsob upnutí obrobku při soustružení závisí na jeho tvaru a hmotnosti, požadované přesnosti soustružení a na druhu soustruhu. Obrobky s poměrem délky a průměru větším než 2÷3 se upínají mezi hroty, jež zasahují do středících důlků navrtaných na čelech obrobku.



Obr. 8.21 Základní upínací elementy pro upnutí obrobku při soustružení

Ve vřetenu stroje se používá pevný hrot, v koníku většinou hrot otočný. Kroučící moment vřetena se přenáší na obrobek unášecí deskou a srdcem, které je připevněno šroubem na začátku obrobku. U soustružnických poloautomatů a automatů se používá odpružených hrotů, které usnadňují upínání obrobku. Mezi hroty se také upíná při vyšších požadavcích na přesnost obrábění. Těžší obrobky s větším poměrem délky k průměru se upínají ve sklíčidle nasaženém na konci pracovního vřetena a druhým koncem opírají o hrot koníku.

U soustružnických poloautomatů a automatů se používají samosvorná sklíčidla, která obrobek automaticky sevřou, jakmile se začínají otáčet. Na těchto strojích lze rovněž použít čelní unášec s odpruženým hrotem, které přenášejí kroučící moment řezným odporem nožičů namáčknutých do čela obrobku. V tomto případě se dá obrobek soustružit v celé délce.

Nejpoužívanějším upínacím zařízením na soustruhu je univerzální sklíčidlo, které se používá jak pro dvoustanné upínání dlouhých obrobků, tak pro letmé upínání. Současného soustředného pohybu upínacích čelistí (bývají 3, popř. 4, výjimečně 2) se dosahuje nejčastěji ručně, u automatizovaných soustruhů i pneumaticky, hydraulicky, nebo elektricky.

Těžší a kratší obrobky nepravidelných tvarů se upínají např. na univerzální upinací desku se samostatně stavitelnými čelistmi. Univerzální upinací desku lze rovněž využít v případech upínání komplikovaných tvarů, kdy obrobek nelze upnout mezi čelisti.

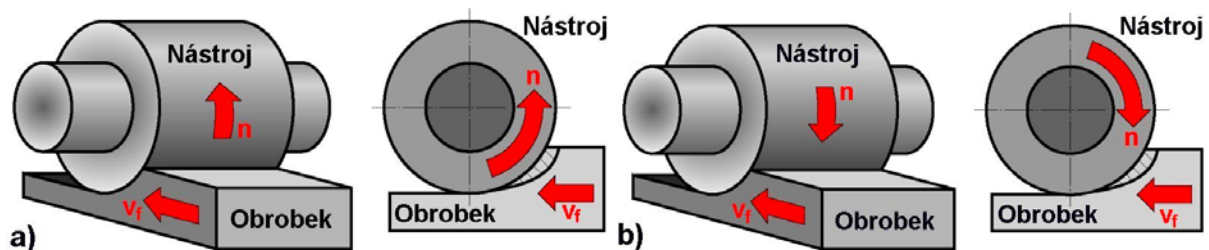
Tyčový materiál menších a středních průměrů se upíná do přesných upinacích pouzder - kleštin. Kleštiny jsou rozříznuty několika podélnými drážkami a vtahováním do kuželové dutiny pouzdra materiál upnou. U menších průměrů jsou odstupňovány po 0,5 mm, u větších průměrů po 1 mm.

Štíhlé obrobky s velkým poměrem délky k průměru se podpírají při soustružení lunetami, které jsou buď pevně upnuty na loži stroje, nebo jsou připevněny k suportu, s nímž se posouvají po loži.

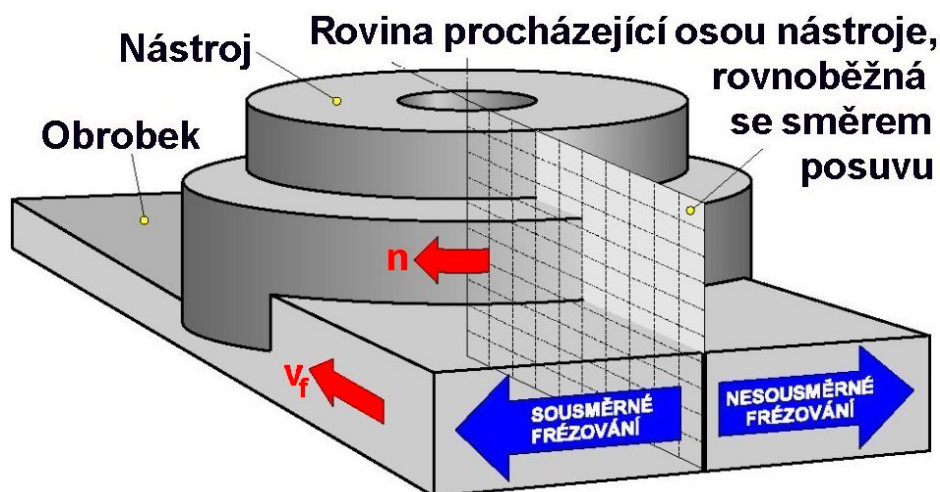
8.2. FRÉZOVÁNÍ

Frézování je obráběcí metoda, při které je materiál obrobku odebrán břity rotujícího nástroje. Posuv nejčastěji koná obrobek, převážně ve směru kolmém k ose nástroje. U moderních frézovacích strojů jsou posuvové pohyby plynule měnitelné a mohou se realizovat ve všech směrech (obráběcí centra, víceosé CNC frézky). Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky.

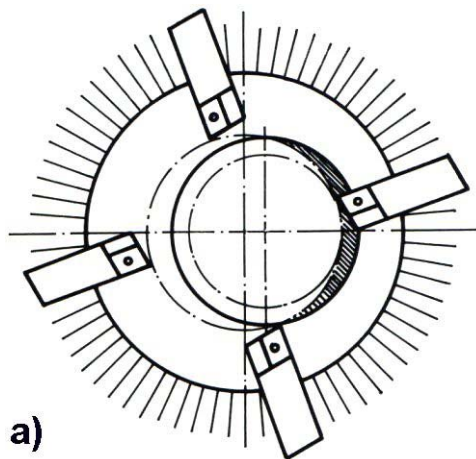
Z technologického hlediska se v závislosti na aplikovaném nástroji rozlišuje frézování **válcové** (frézování obvodem nástroje - obr.8.22) a frézování **čelní** (frézování čelem nástroje - obr.8.23). Od těchto základních způsobů se odvozují některé další způsoby, jako je frézování **okružní** (obr.8.24, 8.25) a **planetové** (obr.8.26).



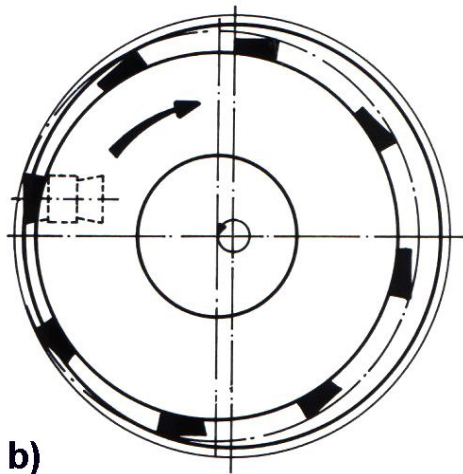
Obr.22 Válcové frézování: a) nesousledné, b) sousledné



Obr.8.23 Čelní frézování



a)

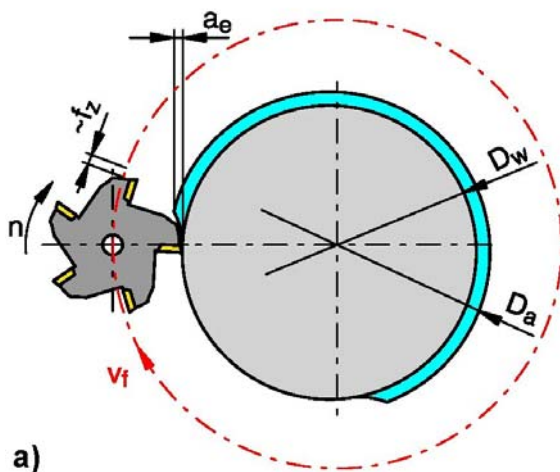


b)

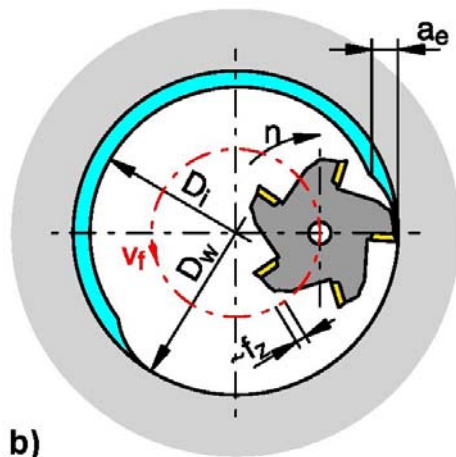
Obr.8.24 Okružní frézování
a) vnější, b) vnitřní



Obr.8.25 Hlava pro vnější okružní frézování
na univerzálním hrotovém soustruhu



a)



b)

Obr.8.26 Planetové frézování: a) vnější, b) vnitřní

Válcové frézování se převážně uplatňuje při práci s válcovými a tvarovými frézami. Zuby frézy jsou vytvořeny pouze po obvodu nástroje, hloubka odebírané vrstvy se nastavuje kolmo na osu frézy a na směr posuvu. Obrobená plocha je rovnoběžná s osou otáčení frézy. V závislosti na kinematice obráběcího procesu se rozlišuje frézování *nesousledné* (protisměrné, nesousměrné) a *sousledné* (sousměrné) - viz obrázek č.8.22.

Při nesousledném frézování je smysl rotace nástroje proti směru posuvu obrobku. Obrobená plocha vzniká při vnikání nástroje do obrobku. Tloušťka třísky se postupně mění z nulové hodnoty na hodnotu maximální. K oddělování třísky nedochází v okamžiku její nulové tloušťky, ale po určitém skluzu břitu po ploše vytvořené předcházejícím zubem. Přitom vznikají silové účinky a deformace způsobující zvýšené opotřebení břitu. Řezná síla při nesousledném frézování má složku, která působí směrem nahoru a odtahuje obrobek od stolu stroje.

Při sousledném frézování je smysl rotace nástroje ve směru posuvu obrobku. Maximální tloušťka třísky vzniká při vnikání zubu frézy do obrobku. Obrobená plocha se vytváří, když zub vychází ze záběru. Řezné síly působí obvykle směrem dolů, proti stolu stroje. Sousledné frézování může probíhat pouze na přizpůsobeném stroji při vymezené vůli a předpětí mezi posuvovým šroubem a maticí stolu frézky. V opačném případě způsobuje vůle nestejnoměrný posuv, při němž může dojít k poškození nástroje, popř. i stroje.

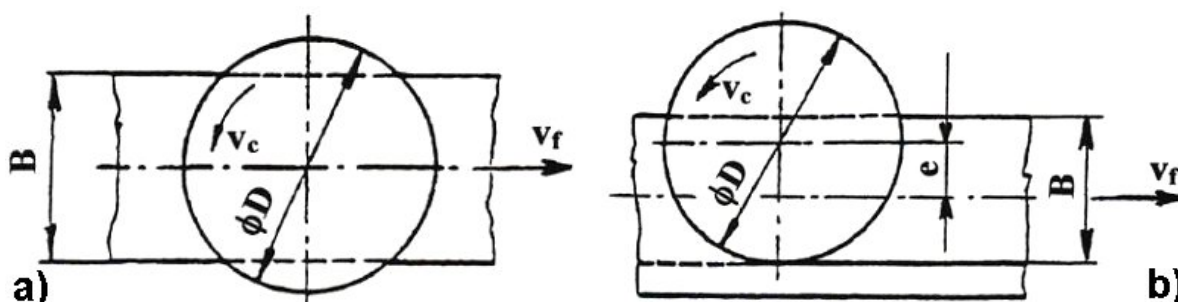
Výhody nesousledného frézování:

- trvanlivost nástroje nezávisí na okujích, písčitém povrchu obrobku a pod.,
- není zapotřebí vymezování vůle mezi posuvovým šroubem a maticí stolu stroje,
- menší opotřebení šroubu a matice,
- záběr zubů frézy při jejich vřezávání nezávisí na hloubce řezu.

Výhody sousledného frézování:

- vyšší trvanlivost břitů, což umožňuje použití vyšších řezných rychlostí a posuvů,
- menší potřebný řezný výkon,
- řezná síla přitlačuje obrobek ke stolu, takže lze použít jednodušších upínacích přípravků,
- menší sklon ke kmitání,
- obvykle menší sklon k tvoření nárůstku,
- menší drsnost obrobeného povrchu.

Čelní frézování se uplatňuje při práci s čelními frézami, které mají břity vytvořeny na obvodě i čele nástroje. Podle polohy osy frézy vzhledem k frézované ploše se rozlišuje symetrické (osa nástroje prochází středem frézované plochy) a nesymetrické frézování (osa nástroje je mimo střed frézované plochy) - obr.8.27. U čelního frézování pracuje fréza současně sousledně i nesousledně (viz obr.8.23).



Obr.8.27 Čelní frézování: a) symetrické, b) nesymetrické

Hlavní, rotační pohyb u všech druhů frézování koná nástroj, posuvový pohyb je většinou přímočarý a koná ho obrobek, u okružního a planetového frézování může být i rotační a konat ho může obrobek nebo nástroj. Hodnota řezné rychlosti se vypočítá podle vztahu:

$$v_c = \pi \cdot D \cdot n \cdot 10^{-3} \text{ [m min}^{-1}\text{]}, \quad (8.19)$$

kde: D [mm] - průměr nástroje,
 n [min^{-1}] - otáčky nástroje.

Základní jednotkou posuvového pohybu je posuv na zub f_z [mm], což je délka dráhy, kterou ujede obrobek po dobu záběru zubu. Z posuvu na zub lze vypočítat posuv na otáčku f_n (délka dráhy, kterou ujede obrobek po dobu jedné otáčky nástroje):

$$f_n = f_z \cdot z \text{ [mm]}, \quad (8.20)$$

kde: z [-] - počet zubů (břitů) nástroje.

Posuvová rychlost se vypočítá podle vztahu:

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \text{ [mm min}^{-1}\text{]}, \quad (8.21)$$

kde: n [min^{-1}] - otáčky nástroje.

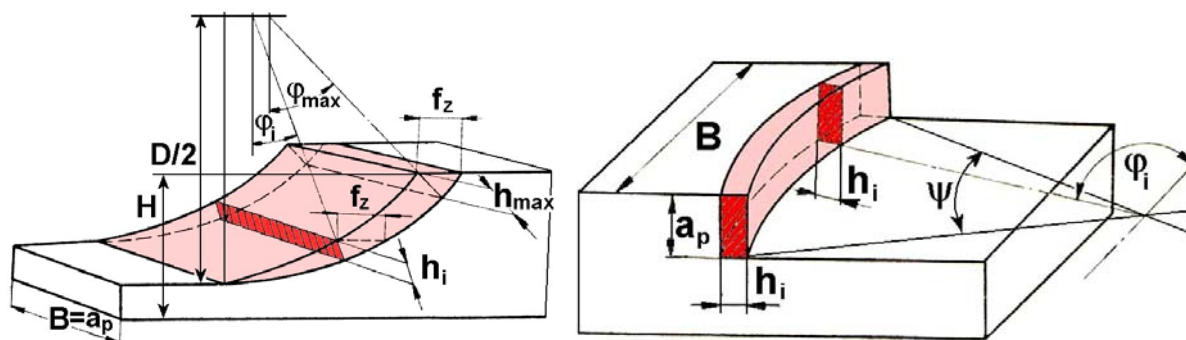
8.2.1. Průřez třísky

Tloušťka odřezávané třísky h_i se při válcovém nesousledném frézování mění od nulové do maximální hodnoty a od maximální hodnoty do nuly při frézování sousledném (obr.8.28). Jmenovitá tloušťka třísky h_i v libovolné fázi jejího odřezávání se vyjádří vztahem:

$$h_i = f(\varphi_i) = f_z \cdot \sin \varphi_i \text{ [mm]}, \quad (8.22)$$

kde: f_z [mm] - posuv na zub,
 φ_i [°] - úhel posuvového pohybu.

Úhel posuvového pohybu φ_i se mění nejen v závislosti na poloze řešeného zubu, ale u fréz se šikmými zuby nebo zuby ve šroubovici, také podél příslušného ostří.



Obr.8.28 Průřez třísky při válcovém frézování Obr.8.29 Průřez třísky při čelním frézování

Jmenovitý průřez třísky pro polohu zubu frézy i se označí A_{Di} a vyjádří se na základě poměrů naznačených na obrázku č.8.28:

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \text{ [mm}^2\text{]}, \quad (8.23)$$

Maximální velikost jmenovitého průřezu třísky bude při $\varphi_i = \varphi_{\max}$

$$A_{D\max} = a_p \cdot h_{\max} = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_{\max} \text{ [mm}^2\text{]}, \quad (8.24)$$

$$\sin \varphi_{\max} = \frac{2}{D} \sqrt{D \cdot H - H^2} \text{ [-]}. \quad (8.25)$$

U čelního frézování se tloušťka třísky rovněž mění v závislosti na úhlu posuvového pohybu φ_i a je navíc ovlivněna i úhlem nastavení hlavního ostří κ_r (na obrázku č.8.29 je hodnota $\kappa_r=90^\circ$), proto se její okamžitá hodnota se vypočítá podle vztahu:

$$h_i = f_z \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \kappa_r \quad [\text{mm}]. \quad (8.26)$$

Jmenovitá šířka třísky b_i je pro libovolné φ_i konstantní a vypočítá se podle vztahu:

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad [\text{mm}]. \quad (8.27)$$

Jmenovitý průřez třísky A_{Di} pro $\kappa_r=90^\circ$:

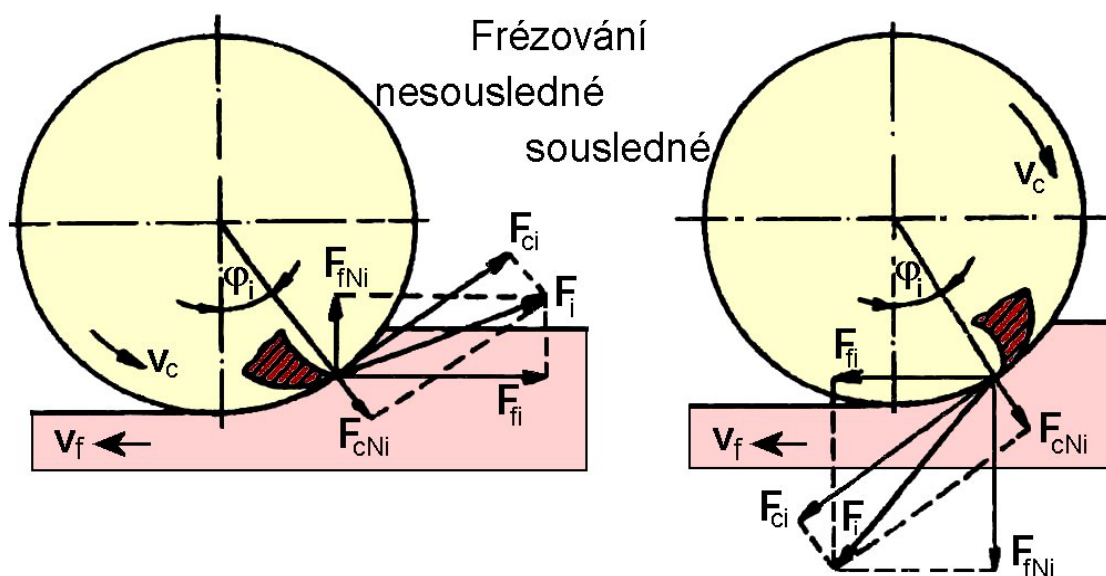
$$A_{Di} = b \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [\text{mm}^2]. \quad (8.28)$$

Maximální velikost jmenovitého průřezu třísky je při $\varphi_i = 90^\circ$, takže:

$$A_{Dmax} = a_p \cdot f_z \quad [\text{mm}^2]. \quad (8.29)$$

8.2.2. Řezné síly

Při specifikaci řezných sil při frézování se vychází ze silových poměrů na jednom břitu, který je v poloze určené úhlem φ_i . Pro válcové frézování nástrojem s přímými zuby se celková řezná síla působící na břitu F_i rozkládá na složky F_{ci} a F_{cNi} , resp. na složky F_{fi} a F_{fNi} - obr.8.30.



Obr.8.30 Řezné síly na zubu válcové frézy v pracovní rovině P_{fe}
 F_i - celková řezná síla, F_{ci} - řezná síla, F_{cNi} - kolmá řezná síla,
 F_{fi} - posuvová síla, F_{fNi} - kolmá posuvová síla

Řezná síla F_{ci} se vyjádří na základě měrné řezné síly k_{ci} a průřezu třísky A_{Di} :

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [\text{N}]. \quad (8.30)$$

Měrná řezná síla k_{ci} se vyjádří pomocí vztahu:

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} \text{ [MPa]}, \quad (8.31)$$

kde: C_{Fc} [-] - konstanta, vyjadřující vliv obráběného materiálu,
 x [-] - exponent vlivu tloušťky třísky.

Po dosazení vztahu (8.31) do (8.30) a úpravě bude:

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \varphi_i \text{ [N]}. \quad (8.32)$$

Při čelním frézování se řezná síla F_{ci} vyjádří obdobným postupem:

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \text{ [N]}, \quad (8.33)$$

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} \text{ [MPa]}, \quad (8.34)$$

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{(x-1)} \kappa_r \cdot \sin^x \varphi_i \text{ [N]}. \quad (8.35)$$

Protože frézy jsou v převážné většině vícebřité nástroje, je při frézování vždy v záběru několik zubů současně. Výsledné síly pak závisí na počtu zubů v záběru a na okamžité poloze zubů frézy vzhledem k obrobku. Z hlediska potřebného krouticího momentu a výkonu na vřetenu frézy je pak důležitá celková řezná síla F_c , která se pro válcové frézování vypočítá podle vztahu:

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f^x \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \text{ [N]} \quad (8.36)$$

a pro čelní frézování podle vztahu:

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f^x \cdot \sin^{(x-1)} \kappa_r \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \text{ [N]}. \quad (8.37)$$

Počet zubů v záběru se pro válcové frézování vypočítá podle vztahu:

$$n_z = \frac{\varphi_{\max}}{360} \cdot z \text{ [-]}, \quad (8.38)$$

kde: φ_{\max} [°] - maximální úhel posuvového pohybu (viz obr.8.28),
 z [-] - počet zubů (břitů) frézy.

Počet zubů v záběru se pro čelní frézování vypočítá podle vztahu:

$$n_z = \frac{\psi}{360} \cdot z \text{ [-]}, \quad (8.39)$$

kde: ψ [°] - úhel záběru frézy (viz obr.8.29),
 z [-] - počet zubů (břitů) frézy.

Při stanovování počtu zubů v záběru podle vztahů (8.38, 8.39) je třeba vypočtené hodnoty zaokrouhlovat vždy nahoru.

8.2.3. Jednotkový strojní čas

Hodnoty jednotkového strojního času pro základní případy frézování se vyjádří na základě poměrů naznačených na obrázcích č.8.31 až 8.33.

Hodnota L pro čelní hrubé frézování asymetrické (obr.8.32) se vyjádří pomocí vztahu:

$$L = l + l_n + l_p + \frac{D}{2} - l_{pf} \quad [\text{mm}], \quad (8.43)$$

kde:
$$l_{pf} = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{B}{2} + e\right)^2} \quad [\text{mm}]. \quad (8.44)$$

Hodnota L pro čelní frézování na čisto asymetrické (obr. 8.33) se vyjádří pomocí vztahu:

$$L = l + l_n + l_p + D \quad (8.45)$$

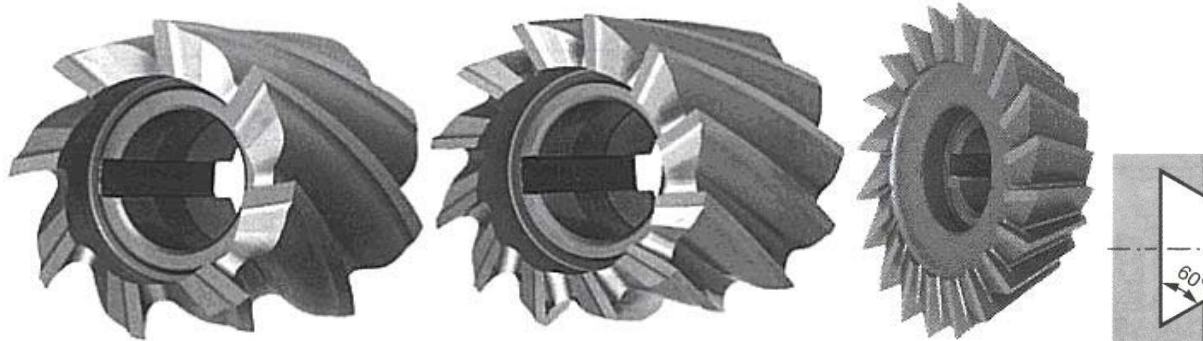
Při hrubém čelním frézování symetrickém je ve vztahu (8.44) $e=0$.

8.2.4. Nástroje

Vzhledem k mnohostrannému uplatnění frézování ve strojírenské výrobě a k velkému rozsahu technologie frézování se v současné době používá mnoho typů fréz. Frézy jsou vícebřité, někdy i tvarově složité, nástroje, které lze v závislosti na jejich technologickém uplatnění třídit do jednotlivých skupin podle různých hledisek:

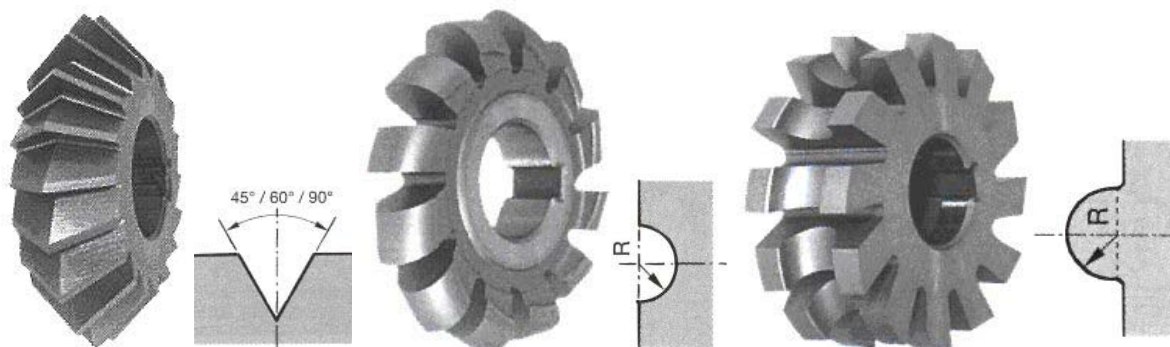
- a) Podle **umístění zubů** na tělese nástroje se rozlišují frézy **válcové** (mají zuby na válcové ploše - a1), **čelní** (mají zuby na čelní ploše - a2), **válcové čelní** (mají zuby na čelní i válcové ploše - a3). *Pozn.: údaj v závorce (písmeno + číslo: např. a1, d3, f2, g5, atd.) slouží pro identifikaci fréz na obrázcích č.8.34 až 8.46.*
- b) Podle **nástrojového materiálu zubů** se rozlišují frézy z **rychlořezné oceli** (b1), **slnutých karbidů** (b2), **cermetů** (b3), **řezné keramiky** (b4), **KNB** (b5) a **PKD** (b6).
- c) Podle **provedení zubů** se rozlišují frézy se zuby **frézovanými** (c1) nebo **podsoustruženými** (c2). U frézovaných zubů tvoří čelo i hřbet rovinné plochy, úzká fazetka o šířce 0,5 až 2 mm na hřbetě zpevňuje břit a ostření se provádí na hřbetě. Podsoustružené zuby mají hřbetní plochu vytvořenou jako část Archimedovy spirály, čelo zubu je tvořeno rovinnou plochou a ostření se provádí na čele. Předností podsoustružených zubů je, že při ostření na čele se jejich profil mění jen nepatrně, takže se využívají především pro tvarové frézy.
- d) Podle **směru zubů** vzhledem k ose rotace frézy se rozlišují frézy se zuby **přímými** (d1) a zuby **ve šroubovici** (d2), pravé nebo levé. Zuby ve šroubovici vnikají do záběru postupně, takže řezný proces je plynulý a klidnější. Sklon šroubovice je 10° až 45° a někdy i více.
- e) Podle **počtu zubů** vzhledem k průměru frézy se rozlišují frézy **jemnozubé** (e1), **polohrubozubé** (e2) a **hrubozubé** (e3). Pro klidný chod frézy má být počet zubů takový, aby současně řezaly nejméně dva zuby.
- f) Podle **konstrukčního uspořádání** se rozlišují frézy **celistvé** (těleso i zuby jsou z jednoho materiálu - f1), s **vloženými noži** (f2) a frézy s **vyměnitelnými břitovými destičkami**, mechanicky upevněnými k tělesu frézy (f3).
- g) Podle **geometrického tvaru funkční části** se rozlišují frézy **válcové** (g1), **kotoučové** (g2), **úhlové** (g3), **drážkovací** (g4), **kopirovací** (g5), **rádusové** (g6), **na výrobu ozubení** (g7), atd.
- h) Podle **způsobu upnutí** jsou frézy **nástrčné** (upínají se na centrální otvor - h1) a **stopkové** (upínají se za válcovou - h2 nebo kuželovou stopku - h3).
- i) Podle **smyslu otáčení** při pohledu od vřeten stroje se frézy dělí na **pravořezné** (i1) a **levořezné** (i2).

Vybrané druhy fréz jsou uvedeny na obrázcích č.8.34 až 8.46.



Obr.8.34
a3, b1, c1, d2, e2, f1, g1, h1, i1

Obr.8.35
a3, b1, c1, d1, e3, f1, g3, h1, i1



Obr.8.36
a1, b1, c1, d1, e2, f1, g3, h1, i2

Obr.8.37
a1, b1, c2, d1, e2, f1, g6, h1, i2

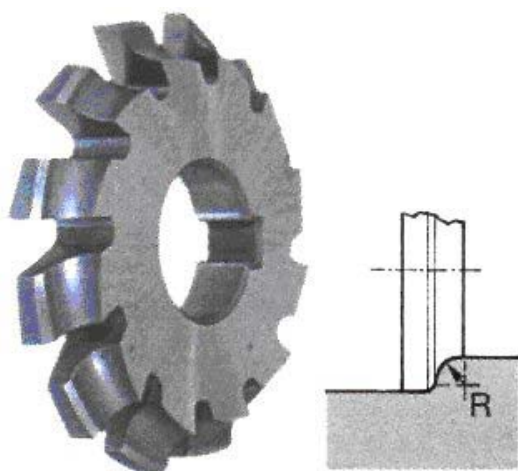
Obr.8.38



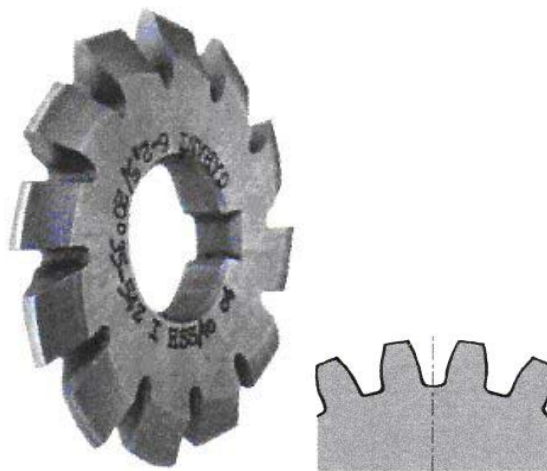
Obr.8.39
a3, b2, c1, d2, e3, f1, g4, h2, i1



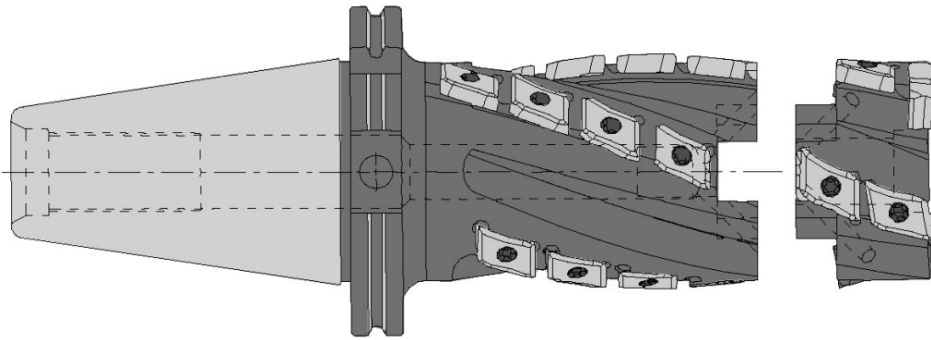
Obr.8.40
a3, b2, c1, d2, e3, f1, g5, h2, i1



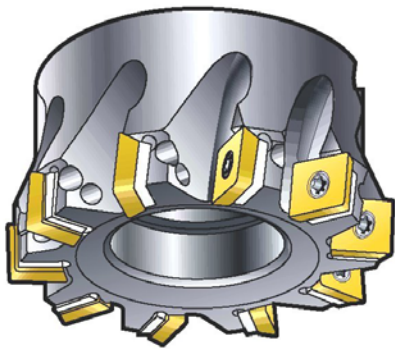
Obr.8.41
a1, b1, c2, d1, e2, f1, g6, h1, i2



Obr.8.42
a1, b1, c2, d1, e2, f1, g7, h1, i2

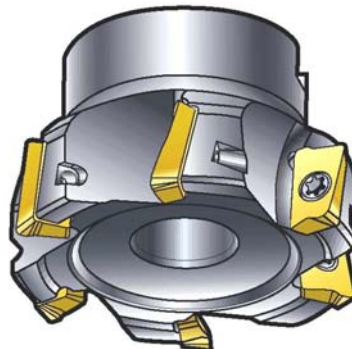


Obr.8.43 - a3, b2, c-, d2, e3, f3, g1, h3, i1



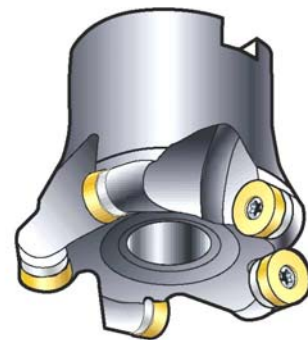
Obr.8.44

a2, b2, c-, d2, e2, f3, g-, h1, i1



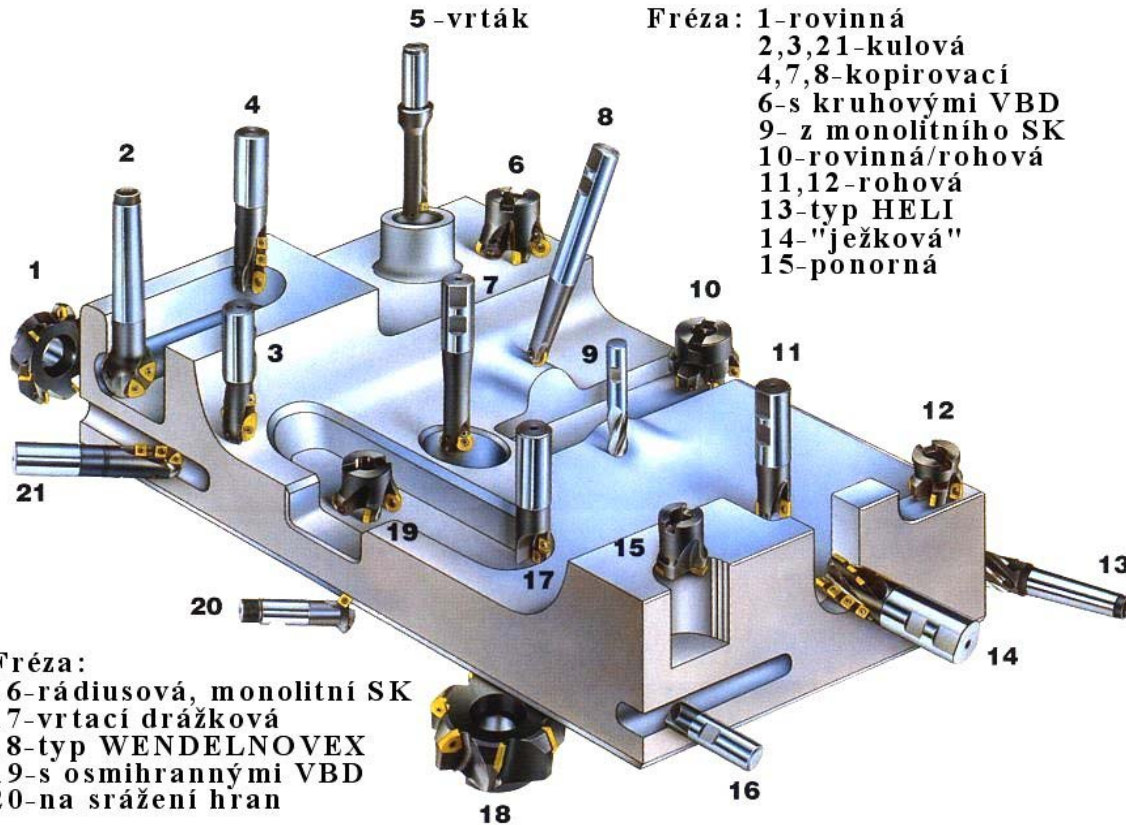
Obr.8.45

a2, b2, c-, d2, e3, f3, g-, h1, i1



Obr.8.46

a2, b2, c-, d1, e3, f3, g-, h1, i1



Obr.8.47 Frézy firmy Walter (SRN)

**NÁSTRČNÉ FRÉZY ISO 7406-88
DIN 8029/1**

2
Typ frézy, druh a veľkosť upínání
Typ frézy, druh a veľkosť upnutia

A ISO 6462/A
DIN 8030/A
ČSN 22 2301/A

B ISO 6462/B
DIN 8030/B
ČSN 22 2301/B

C ISO 6462/C
DIN 8030/C
ČSN 22 2301/C

F $\varnothing d = 27$
G $\varnothing d = 32$
H $\varnothing d = 40$
J $\varnothing d = 50$
K $\varnothing d = 60$
M $\varnothing d = 80$
T

6
Úhel nastavení
Uhol nastavenia

K 90°
K 75°
K 60°
K 45°
K
MO $\varnothing D$ [mm]

10
Úhel hřbetu
Uhol chrčta

N $\alpha'_c = 0^\circ$
P $\alpha'_c = 11^\circ$
D $\alpha'_c = 15^\circ$

E $\alpha'_c = 20^\circ$
F $\alpha'_c = 25^\circ$

11
Délka (šířka) břitu
Dĺžka (šířka) reznej hrany

B [mm]
l [mm]

1	2	3	4
160	H	05	N
250	C	16	R

5	6	7	8	9	10	11
F	90	T	P	16	P	22
W	45	S	E	12	F	

1
Rezný priemer
Rezný priemer $\varnothing D$ [mm]

4
Směr řezu
Smer rezu

R
L
N

5
Způsob upínání
Spôsob upínania

C
S
W
F

7
Tvar destičky
Tvar doštičky

S C
T W
R A

8
Úhel hřbetu
Uhol chrčta

N $\alpha_c = 0^\circ$ D $\alpha_c = 15^\circ$
C $\alpha_c = 7^\circ$ E $\alpha_c = 20^\circ$
P $\alpha_c = 11^\circ$ F $\alpha_c = 25^\circ$

9
Velikost destičky - délka řezné hrany
Veľkosť doštičky - dĺžka reznej hrany

d [mm]	S	C	T	W	R	A
6,35						09/11
7,94				05		
8,00					08	
9,525	09	09	16	06		12
10,00					10	
12,00					12	
12,70	12	12	22	08		15
15,875	15					
16,00					16	
25,00					25	
25,40	25					

1	1a	3	4
63	J	4	R
32	A	3	R

2a	3a	4a
150	H	50
040	B	32

5	7	8	9 (11)
S	SA	P	95
S	A	D	12

**STOPKOVÉ FRÉZY ISO 7548-86
DIN 8029/2**

1a
Typ frézy a úhel nastavení
Typ frézy a uhol nastavenia

A N
E H
J K

2a
Délka vyložení
Dĺžka vyloženia l [mm]

3a
Typ upín. stopky
Typ upín. stopky

4a
Velikost stopky
Veľkosť stopky

	$\varnothing D$	$\varnothing d$
A DIN 1835/1-A	08 + 32	10 + 32
B ISO 3338/B DIN 1835/1-B ČSN 22 0412	10; 12; 16 20 25 32; 40	16 20 25 32
E ISO 296 DIN 228/A ČSN 22 0420	$\varnothing D$ MORSE No.	
	10; 12; 16 20; 25; 32 40	02 03 04
G ISO 297 DIN 2080/1 ČSN 22 0430	$\varnothing D$	7:24 No.
X ČSN 22 0432	32; 40 (50; 63)	40 50
H ISO 7388/1 DIN 6987/1/A ČSN 22 0434	$\varnothing D$	7:24 No.
	32; 40 50; 63; 80	40 50

Obr.8.48 Označování fréz s vyměnitelnými břitovými destičkami podle ISO

8.2.5. Frézky

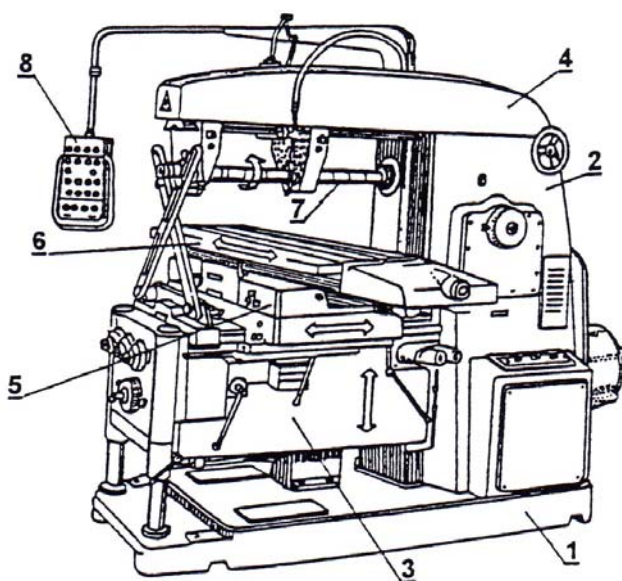
Frézovací stroje - frézky jsou vyráběny a dodávány ve velkém počtu modelů a velikostí, často pak s rozsáhlým zvláštním příslušenstvím. Zpravidla se člení do čtyř základních skupin - **konzolové**, **stolové**, **rovinné** a **speciální**. Z hlediska řízení pracovního cyklu se rozlišují frézky ovládané ručně a řízené programově (tvrdá automatizace, pružná automatizace).

Velikost frézky určuje šířka upínací plochy stolu a velikost kužele ve vřetenu pro upnutí nástroje. Dalšími důležitými technickými parametry jsou maximální délky pohybu pracovního stolu nebo vřeteníku, rozsah otáček vřetena a posuvů (případně plynulá regulace pohybů), výkon elektromotoru pro otáčení vřetena a kvalitativní parametry dosahované u obrobků na plochách.

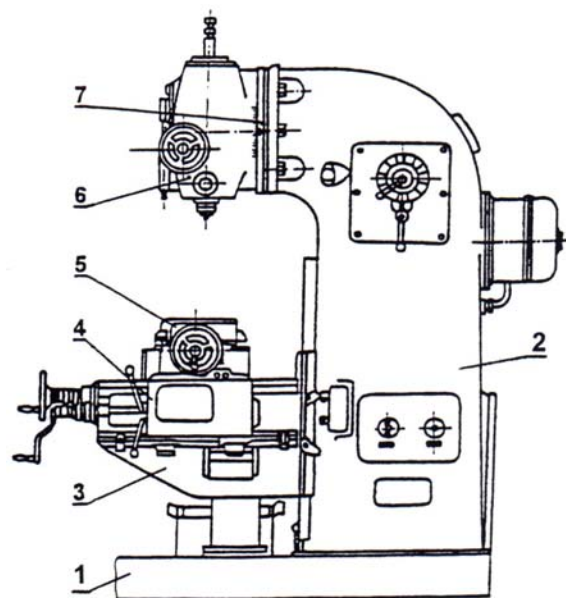
8.2.5.1. Konzolové frézky

Charakteristickou částí těchto strojů je výškově přestavitelná konzola, která se pohybuje po vedení stojanu. Na konzole je pohyblivý příčný stůl s podélným pracovním stolem. Tato kombinace pohybů umožňuje přestavování obrobku upnutého na pracovním stole ve třech pravouhlých souřadnicích vzhledem k nástroji. Konzolové frézky jsou vhodné pro frézování rovinných a tvarových ploch u menších a středně velkých obrobků v kusové a malosériové výrobě. Vyrábějí se ve třech základních variantách, a to jako vodorovné (horizontální), svislé (vertikální), a univerzální.

Konzolové frézky vodorovné (schéma na obrázku č.8.49: 1 - základna, 2 - stojan, 3 - konzola, 4 - rameno, 5 - příčný stůl, 6 - podélný pracovní stůl, 7 - vřeteno, 8 - ovládací panel) mají osu pracovního vřetena vodorovnou, rovnoběžnou s plochou podélného stolu a kolmou na směr pohybu podélného stolu. Frézují se na nich převážně plochy rovnoběžné s upínací plochou stolu, drážky a tvarové plochy. Pracuje se na nich nejčastěji válcovými a kotoučovými frézami a frézami tvarovými. Frézovací trn může být podepřen v jednom nebo ve dvou opěrných ložiskách. Omezeně se u nich používají frézy s kuželovou stopkou a frézovací hlavy upnuté do kužele pracovního vřetena. Konzolové frézky univerzální se od vodorovných frézek liší tím, že jejich podélný stůl je ve vodorovné rovině otočný kolem svislé osy o $\pm 45^\circ$.



Obr.8.49 Vodorovná konzolová frézka



Obr.8.50 Svislá konzolová frézka

Konzolové frézky svislé (schéma na obrázku č.8.50: 1 - základna, 2 - stojan, 3 - konzola, 4 - příčný stůl, 5 - podélný pracovní stůl, 6 - naklápěcí vřeteník, 7 - kruhová základna vřeteníku) mají osu pracovního vřetení kolmou k upínací ploše stolu. Pracovní vřetení je uloženo buď ve svislé hlavě připevněné na stojanu frézky, nebo přímo ve stojanu. Svislá hlava se dá natáčet o $\pm 45^\circ$, vřetení bývá svisle přestavitelné. Na svislých konzolových frézách se frézují zejména rovinné plochy rovnoběžné s upínací plochou stolu, drážky v těchto plochách a tvarové plochy. Používají se k tomu čelní frézy upnuté na krátkém trnu, nebo frézy s kuželovou stopkou, upínané přímo do kužele vřetení, nebo s válcovou stopkou, upnuté do sklíčidla. Na větších svislých konzolových frézách se používají také frézovací hlavy.

8.2.5.2. Příslušenství konzolových frézek

Univerzálnost použití konzolových frézek je významně rozšířena zvláštním příslušenstvím, jako jsou různé hlavy, otočné stoly, dělicí přístroje apod.

Univerzální hlava se připevňuje na čelní plochu stojanu univerzální vodorovné frézky. Dá se natáčet kolem dvou os, takže frézu lze nastavit do libovolné polohy vzhledem k obrobku. Pohon frézovacího vřetení hlavy je odvozen od hlavního vřetení stroje. Univerzální hlava se používá při frézování těžko přístupných, zejména šikmých ploch. Používá se také k frézování ozubených hřebenu, kde je zapotřebí, aby osa vřetení byla rovnoběžná se směrem podélného posuvu stolu. Rozteč zubů se v tomto případě nastavuje pomocí přístroje pro podélné dělení.

Svislá frézovací hlava se používá rovněž na univerzálních vodorovných frézách. Hlava je otočná kolem osy pracovního vřetení, z něhož se přenáší kroučící moment v podstatě stejným způsobem jakou univerzální hlavy. Při použití svislé frézovací hlavy lze na vodorovných frézách pracovat se stopkovými frézami, a provádět práce, které by jinak vyžadovaly svislé frézky.

Otočný stůl (obr.8.51) se připevňuje na pracovní stůl frézky. Otáčí se buď ručně, nebo je otáčení odvozeno od podélného pohybu pracovního stolu šroubovým teleskopickým hřídelem. Otočné stoly umožňují frézovat různé rotační tvary, vačky, segmenty, drážky apod. stopkovými frézami. Užívají se také pro dělicí práce, nelze-li obrobek pro jeho velké rozměry upnout na běžném dělicím přístroji. K tomu účelu pak mají otočné stoly nejčastěji zařízení pro přímé, případně nepřímé dělení.

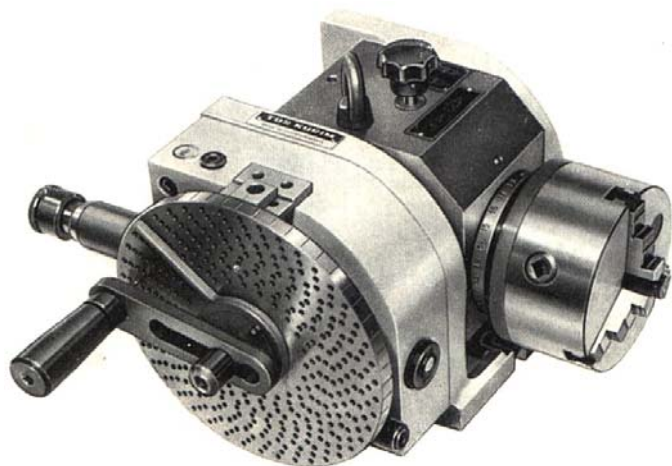


Obr.8.51 Otočný stůl

Obrázecí hlava se upíná obdobně jako svislá frézovací hlava, dá se rovněž pootáčet, takže umožňuje obrážet ve směru svislém, vodorovném nebo šikmém. Pohyb se na klikový mechanismus hlavy přenáší z pracovního vřetena stroje. Obrázecí hlavy se používají jako doplňkové zařízení univerzálních vodorovných frézek.

Dělicí přístroje umožňují pootáčení obrobku o určitý úhel nebo rozteč při frézování čtyřhranů a šestihranů, vícedrážkových hřídelů, ozubených kol, vícebřitých nástrojů, zářezů na čelních plochách apod. Používají se dva druhy dělicích přístrojů a to jednoduché a univerzální.

Jednoduché dělicí přístroje mají vřeteno s kuželovou dírou pro hrot nebo kužel držáku sklíčidla. Pro dělení obvodu obrobku u nich slouží dělicí kotouč, který má na svém obvodu zářezy nebo díry. Vlastní dělení probíhá metodou přímého dělení, tj. pootočením vřetena dělicího přístroje o požadovaný díl obvodu a zajištění polohy buď západkou do zářezu dělicího kotouče, nebo kolíkem do díry dělicího kotouče. Podle počtu zářezů na kotouči je možné tímto způsobem dělit obvod obrobku na násobky 1/24, 1/36 nebo 1/48 obvodu. Jednoduché dělicí přístroje se vyrábějí rovněž se svislou osou. Uplatňují se hlavně při obrábění drážek a zubů na čelních plochách. Obrobky se na nich upínají buď na desku s upínacími drážkami, nebo do univerzálního sklíčidla.



Obr.8.52 Univerzální dělicí přístroj DU400A

Univerzální dělicí přístroj (obrázek č.8.52, kinematické schéma na obrázku č.8.53) se používá se pro přímé, nepřímé a diferenciální dělení. Pro přímé dělení má přístroj dělicí kotouč nasazený a upevněný na předním konci dělicího vřetena. V kotouči je vyvrtáno 24, 36, popř. 48 otvorů, do nichž zapadá odpružený kolík, uložený v tělese přístroje. Dělení probíhá jako u jednoduchého dělicího přístroje. Pro nepřímé a diferenciální dělení slouží kotouč, který má na čelní ploše v soustředných kruzích různé počty děr, jako např. 15, 16, 17, 18,

19, 20, 21, 23, 27, 31, 33, 37, 39, 41, 43, 47, 49. Vřeteno přístroje se pootáčí klikou přes ozubené soukolí z_1, z_2 s převodem 1:1 a přes šnekový převod, zpravidla 1:40.

Nepřímé dělení (obr.8.53): Má-li se např. pootočit dělicí vřeteno o $\frac{1}{26}$ obvodu, je třeba pootočit klikou o $\frac{40}{26} = 1 + \frac{14}{26}$. Protože 26 děr na dělicím kotouči není, upraví se zlomek $\frac{14}{26}$ na $\frac{21}{39}$ a kolíkem v rukojeti kliky se zajistí její poloha v některé z děr na kruhu s 39 děrami. Poté se otočí klikou jednou dokola a ještě o 21 roztečí. Nepřímé dělení je možno provádět rovněž jako složené z roztečí na dvou kruzích s různým počtem děr.

Diferenciální dělení (obr.8.54): Pokud se nevystačí s nepřímým dělením a když je třeba dělit obvod na počty dané některými prvočísly, využívá se diferenciální dělení. Univerzální dělicí přístroj je opatřen výměnnými ozubenými koly z_1 až z_4 . Otáčením dělicí kliky se pootáčí vřeteno dělicího přístroje přes šnek a šnekové kolo jako při nepřímém dělení. Současné

se však zpětným převodem z_1 až z_4 otáčí dělicí kotouč (je odjištěn a proto se volně otáčí na hřídeli dělicí kliky). Je-li převod mezi dělicí klikou a pracovním vřetenem tvořen koly z_1 až z_4 , otáčí se dělicí kotouč ve stejném smyslu s dělicí klikou. Pokud je ještě vloženo další mezikolo, bude se dělicí kotouč otáčet v opačném smyslu než dělicí klika.

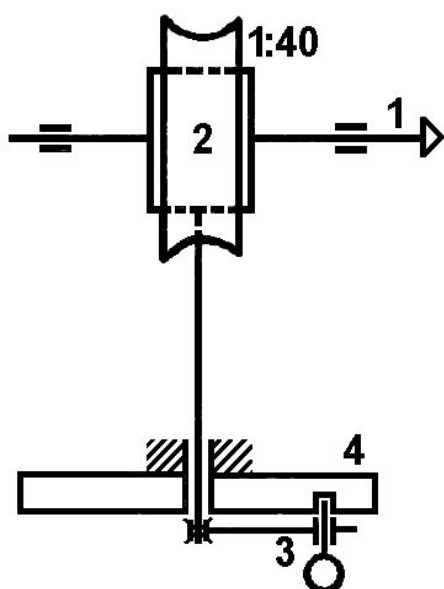
Při diferenciálním dělení se zvolí číslo nejbližší k požadovanému počtu, které lze dělit nepřímým způsobem. Odchyłka, která zde vzniká, se vyrovnává diferenciálním převodem i , pro který platí :

$$i = \frac{40 \cdot (z' - z)}{z'} = \frac{z_1}{z_2} \cdot \frac{z_3}{z_4} [-], \quad (8.46)$$

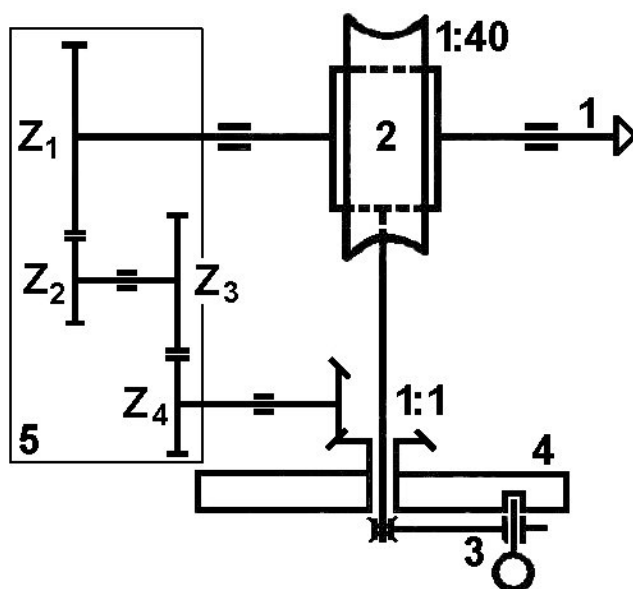
kde: z [-] - skutečný počet roztečí

z' [-] - počet roztečí zvolený pro nepřímé dělení.

K dělicím přístrojům jsou vypracovány tabulky, s jejichž pomocí lze snadno řešit rozličné případy dělení. Univerzální dělicí přístroje se používají také při frézování šroubových drážek. Vřeteno přístroje má v tomto případě pohon odvozený od pohybového šroubu podélného stolu univerzální frézky. Stůl je natočen o úhel stoupání šroubovice.



Obr.8.53 Nepřímé dělení



Obr.8.54 Diferenciální dělení

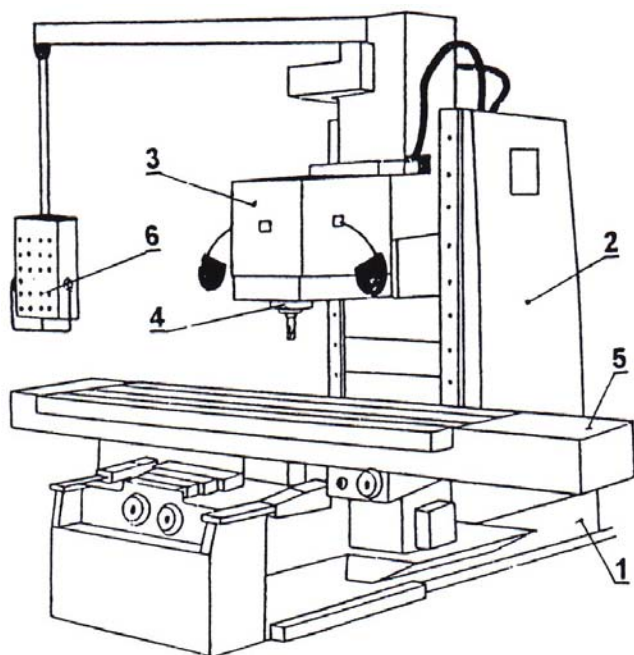
Zjednodušené kinematické schéma univerzálního dělicího přístroje:

1 - vřeteno, 2 - šnekový převod, 3 - dělicí klika, 4 - dělicí kotouč, 5 - výměnná ozubená kola

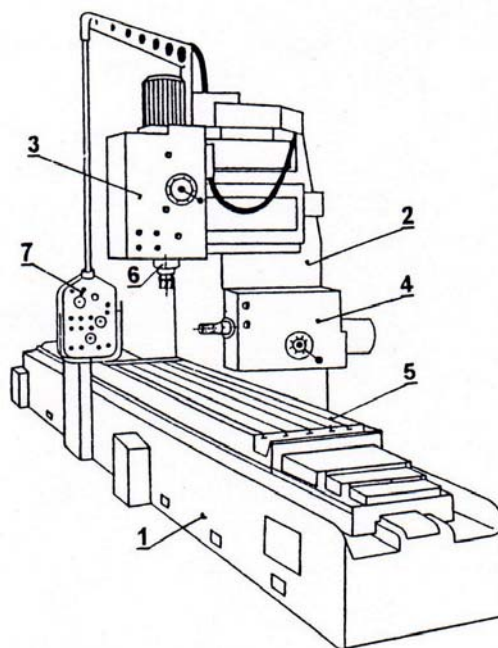
8.2.5.3. Stolové frézky

Stolové frézky nemají konzolu a mají obvykle podélný a příčný stůl. Pohyb se svislém směru pro nastavení nástroje vzhledem k obrobku je zajištěn přemísťováním frézovacího vřeteníku po vedení stroje (obr.8.55).

Na stolových frézkách lze kvalitně a produktivně obrábět rozměrnější a těžší součástky. Vyrábějí se jak v provedení svislém, tak i vodorovném.

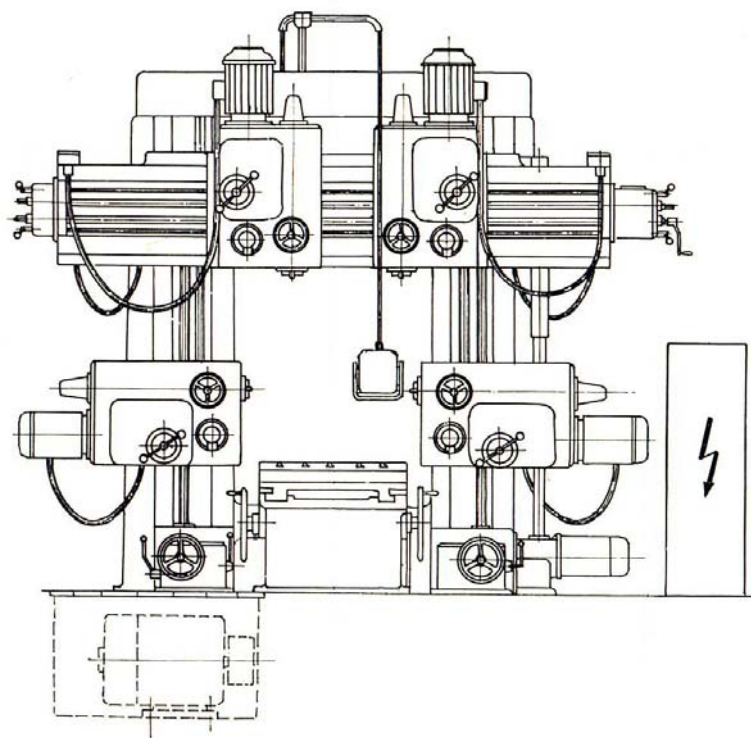


Obr. 8.55 Svislá stolová frézka
 1 - základní deska, 2 - stojan, 3 - vřeteník,
 4 - vřeteno, 5 - pracovní stůl,
 6 - ovládací panel



Obr. 8.56 Rovinná frézka
 1 - lože, 2 - stojan, 3 - svislý vřeteník,
 4 - vodorovný vřeteník; 5 - pracovní stůl
 6 - vřeteno, 7 - ovládací panel

8.2.5.4. Rovinné frézky

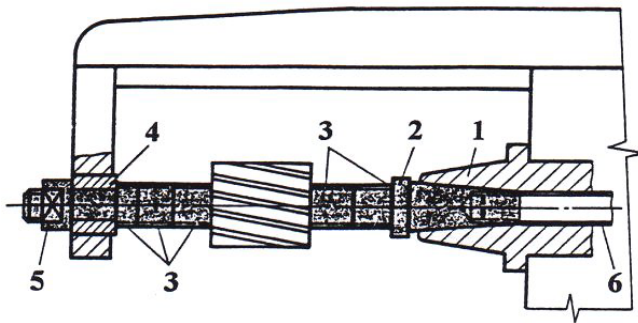


Obr. 8.57 Rovinná portálová frézka

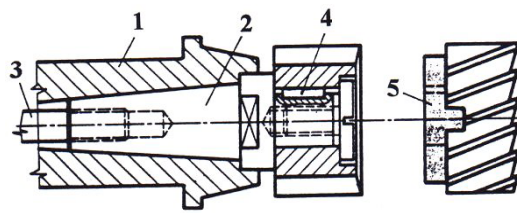
Patří mezi nejvýkonnější druh frézek. Mají robustní konstrukci a umožňují obrábět těžké a rozměrné obrobky. Jsou vhodné pro kusovou a malosériovou výrobu, dobře se však uplatňují i v sériové výrobě. Pracuje se na nich nejčastěji frézovacími hlavami při obrábění vodorovných, svislých a šikmých ploch a stopkovými frézami při frézování úzkých ploch a drážek. U rovinných frézek má pracovní stůl jeden stupeň volnosti, pohybuje se pouze v jednom vodorovném směru (obr. 8.56, 8.57). Rovinné frézky mohou mít více vřeteníků (vodorovné i svislé), někdy jsou konstruovány jako portálové (obr. 8.57).

8.2.5.5. Upínání nástrojů a obrobků

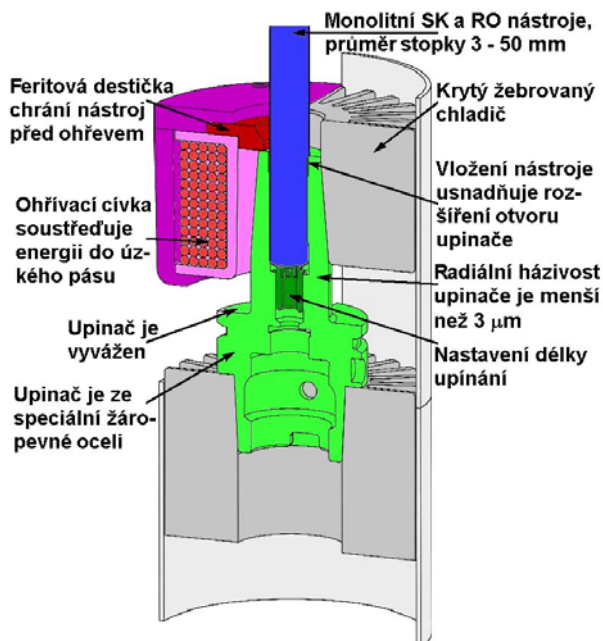
Pro upínání nástrčných fréz na frézkách se používají frézovací trny. Upinací kužel frézovacích trnů a pracovního vřetena může být buď metrický s kuželovitostí 1:20, nebo Morse 1:19 až 20, nebo strmý 1:3,5. Metrický a Morse kužel jsou samosvorné a mohou přenést krouticí moment z vřetena na frézovací trn. Aby přenos krouticího momentu byl dokonalý, má konec vřetena obdélníkové vybrání, do něhož zapadá zploštělý nákrůžek na konci frézovacího trnu. Strmý kužel pouze středí trn v pracovním vřetenu, krouticí moment se přenáší dvěma kameny upevněnými na čele vřetena, které zapadají do vybrání na nákrůžku frézovacího trnu. Poloha frézy na dlouhém trnu se zajišťuje volně navlečenými rozpěrnými kroužky (obr.8.58). Kromě rozpěrných kroužků je na trnu vodící pouzdro, které je součástí posuvného podpěrného ložiska, umístěného na výsuvném rameni vodorovné frézky. Pouzdro je ustaveno v poloze, kde bude trn ložiskem podepřen. Aby upnutí nástrojů na trnech bylo co nejtužší, upínají se frézy co nejblíže k vřetenu a výsuvné rameno se přisune k fréze tak blízko, jak je to jen možné. Čelní nástrčné frézy a frézovací hlavy se upínají krátkými upinacími trny letmo upnutými do vřetena stroje (obr.8.59).



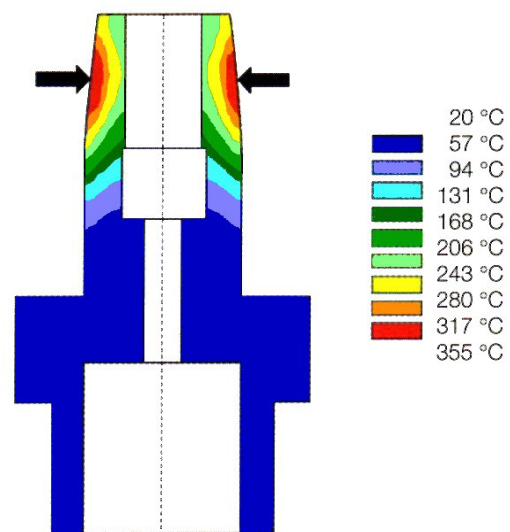
Obr.8.58 Dlouhý frézovací trn
1 - vřeteno, 2 - trn, 3 - rozpěrné kroužky,
4 - podpěrné ložisko, 5 - upinací matice,
6 - upinací šroub



Obr.8.59 Krátký frézovací trn
1 - vřeteno, 2 - trn, 3 - upinací šroub
4 - podélné pero, 5 - příčné pero



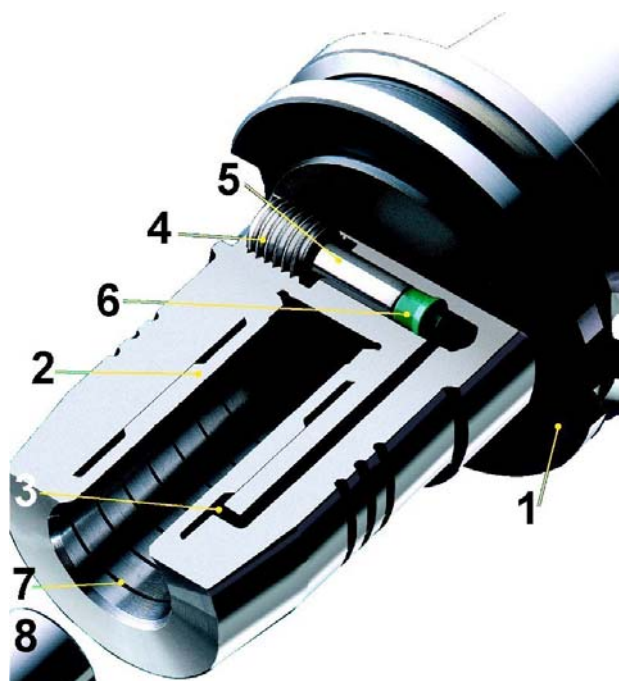
Obr.8.60 Tepelný upinač firmy LMT



Obr.8.61 Teplotní pole upinače

Frézy s kuželovou stopkou se upínají pomocí redukčních pouzder přímo do upinacího kužele ve vřetenu frézky. Redukční pouzdro se použije také tehdy, neshoduje-li se kužel frézovacího trnu s kuželem vřetena. Frézy s válcovou stopkou se upínají do vřetena frézky při použití sklíčidla s upinacím pouzdem.

Frézy s válcovou stopkou o průměru 3÷50 mm se v současné době velmi často upínají pomocí speciálních tepelných (obr.8.60, 8.61) nebo hydraulických upinačů (obr.8.62). V tepelném upinači je nástroj vložen do tělesa upinače a poté spolu s ním ohříván ve speciálním zařízení pomocí magnetického pole cívky vysokofrekvenčního generátoru. Průběh ohřevu je tak rychlý, že zvýšení teploty nástroje v důsledku vedení tepla je minimální. Poté je upnutý nástroj ochlazen proudem vzduchu (ke zkrácení doby ochlazování se používají hliníková tělesa s žebrováním, která obepínají upinač s nástrojem, a vestavěný ventilátor) a v důsledku smrštění materiálu upinače spolehlivě upnut. Uvolnění nástroje se provede ohřevem ve stejném zařízení.



Upinací síla hydraulického upinače (položka 1 na obr.8.60) je vytvořena pomocí šroubu 4, který při zašroubování posouvá píst 5 s těsněním 6. Tím dochází ke zvýšení tlaku oleje v dutině upinače 3 a mírně deformované pouzdro 2 pevně obepne válcovou stopku nástroje 8. Drážky 7 slouží k odvedení případných mastnot ze stopky nástroje a napomáhají tak k zajištění spolehlivého přenosu vysokých hodnot krouticího momentu.

Obr.8.62 Hydraulický upinač firmy Schunk (SRN)



Obr.8.63 Otočný sklopný svěrák

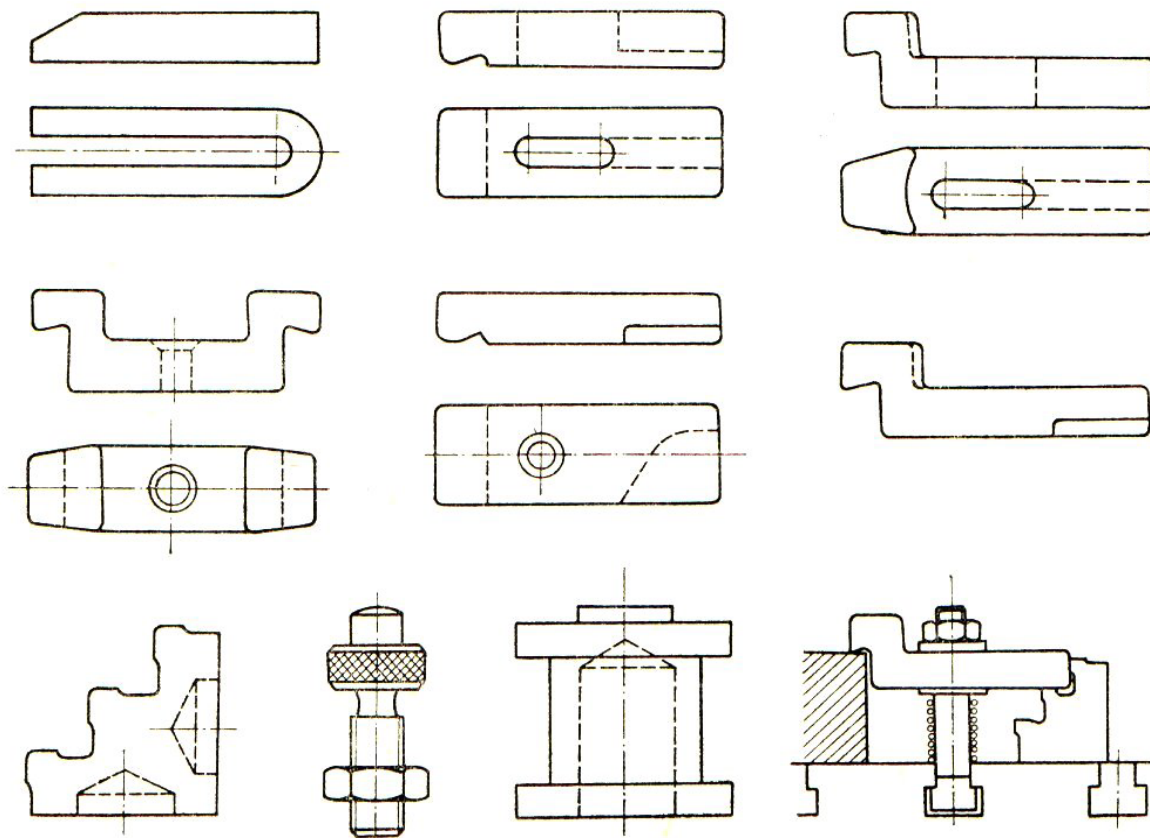


Obr.8.64 Samostředící svěrák pro upínání válcových součástí

Současným záběrem několika zubů vznikají při frézování velké řezné síly, takže obrobek musí být řádně upnut. Je důležité, aby obrobek nebyl při upínání deformován a aby byla obráběná i upínací plocha co nejlépe vřetená. Menší obrobky se obvykle upínají do běžných strojních svěráků, otočných a sklopných svěráků (obr.8.63), speciálních svěráků pro upínání válcových součástí (obr.8.64) apod. Uvedené svěráky mohou být ovládány ručně, pneumaticky nebo hydraulicky.

K upínání větších obrobků se používají rozličné upínací pomůcky, jako jsou upínky, opěrky, podpěry, apod. (obr.8.65). Všechny tyto upínací pomůcky jsou upevňovány do T-drážek stolu frézky pomocí speciálních šroubů s čtvercovou hlavou.

Pro upínání přesných obrobků na číslicově řízených frézách slouží technologické palety, se kterými se obrobek podle požadavků technologického postupu může pohybovat mezi jednotlivými obráběcími stroji. Paleta má na stroji přesně vymezenou polohu, v níž se před vlastním obráběním zafixuje (tím odpadá několikeré upínání a seřizování polohy obrobku).



Obr.8.65 Základní upínky a podpěry obrobků

9. POUŽITÁ LITERATURA

1. AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
2. DANG, V.H. *Počítačová podpora pro efektivní využití nových nástrojových materiálů*. Disertační práce. Ústav strojírenské technologie VUT-FSI v Brně. Brno, 2000, 130 s.
3. FREMUNT, P., KREJČÍK, J., PODRÁBSKÝ, T. *Nástrojové oceli*. Dům techniky Brno. Brno, 1994, 229 s.
4. HEON-JIN, CH., JUNE-GUNN, L. Stacking faults in silicon carbide whiskers. *Ceramics International*. No.26, 2000, p. 7-12.
5. HOLUBÁŘ, P., JÍLEK, M. a ŠÍMA, M. *Otěruvzdorné tvrdé a supertvrdé vrstvy*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.shm-cz.cz/cz/info.htm>>.
6. HUMÁR, A. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. 1. vyd. Brno: CCB spol. s r.o., 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4.
7. HUMÁR, Anton. *Výrobní technologie II* [online]. Studijní opory pro podporu samostudia v oboru "Strojírenská technologie" BS studijního programu "Strojírenství". VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2002, 84 s. Dostupné na World Wide Web: <http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobníTechnologie_II.pdf>
8. KOČMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
9. LIN, G.Y., LEI, T.C. Microstructure, Mechanical Properties and Thermal Shock Behaviour of $Al_2O_3+ZrO_2+SiC$ Composites. *Ceramics International*. No.24, 1998, p. 313-326.
10. L.M.T.-FETTE, spol s r.o., Brno. *Nástroje pro výrobu zápustek a forem*. Tisk: Tiskárna Horák, Ústí nad Labem, 2002.
11. PLATIT Advanced Coating Systems, Switzerland. Nanostructured Coatings for High Performance Tools. Reprint: *Werkzeug Technik*, No.77, March 2003.
12. PRAMET TOOLS, s.r.o., Šumperk. *Příručka obrábění - optimální volba a použití nástrojů Pramet Diadur*. PRIR 0398-CZ. 1998. 198 s.
13. ŘÍČKA, J. a BULLA, V. *Technologie obrábění a montáže*. Skriptum VUT-FS Brno. Praha: SNTL – nakladatelství technické literatury. 1985. 279 s.
14. SCHUNK GmbH & Co. KG., Lauffen/Neckar, SRN. *Hydraulic Chucks*. 9937488 - 8M - 02/2003.
15. ŠVARAL, Š. *Obrábanie nástrojmi z diamantu a kubického nitridu bóru*. Bratislava: ALFA, Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1977. 230 s. MDT 621.9.025.7.
16. TUAN, W.H., CHEN, R.Z., WANG, T.C., CHENG, C.H. and KUO, P.S. Mechanical properties of Al_2O_3/ZrO_2 composites. *Journal of the European Ceramic Society*. No.22, 2002, p. 2827 –2833.
17. VALTER, J., VYSKOČIL, J. Plazmové povlakování (1. část). *MM Průmyslové spektrum*. Číslo 5, květen 2000, s. 18,19. ISSN 1212-2572.
18. YANG, J., SEKINO, T., NIIHARA, K. Effect of grain growth and measurement on fracture toughness of silicon nitride ceramics. *Journal of Materials Science*. No.34, 1999, p. 5543 - 5548.
19. ZELENÝ, J. Vnitřní struktura obráběcích strojů a center. *MM Průmyslové spektrum*. Speciální vydání, červen 2000, s.28,29. ISBN 80-85986-19-1.
20. ZELENÝ, J. Pružné výrobní buňky, systémy a linky. *MM Průmyslové spektrum*. Speciální vydání, červen 2000, s.99-109. ISBN 80-85986-19-1.
21. ZHU, S., MIZUNO, M., KAGAWA, Y. Creep behavior in SiC-whisker reinforced silicon nitride composite. *Journal of Materials Science*. No.34, 1999, p. 1799 - 1807.