

# **Energetické a ekologické aspekty HSC obrábění**

Bc. Martin Láník

---

Diplomová práce  
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin LÁNÍK**  
Osobní číslo: **T10379**  
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Energetické a ekologické aspekty HSC obrábění**

Zásady pro vypracování:

- 1) Obecná analýza při konvenčním a HSC řezání
- 2) Přehled nástrojových materiálů a jejich charakteristik
- 3) Kvantifikace energetických poměrů při řezání
- 4) Teorie torby třísky při HSC obrábění
- 5) Význam chlazení při obrábění, charakteristika používaných chladících médií
- 6) Ekonomické a environmentální hodnocení HSC technologií

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] AB SANDVIK, Sandviken, Sveden. Understanding Cemented Carbide - Grainsize [online]. Dostupné na Word Wide Web: <http://www.hardmaterials.sandviken.com>
- [2] AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ, s.r.o. Příručka obrábění. Přel. M. Kudela, 1. vydání Praha: Scientia, s.r.o., 1997.857 s. 857. ISBN 91-97-22 99-4-
- [3] KOČMAN, K.: Technologické procesy obrábění, I.vyd. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o. Brno, 2011, s.330,ISBN 978-80- 7204-722-2
- [4] KOČMAN, K. a kol.: Aktuální příručka pro technický úsek. Verlag Dashófer, 16. aktualizované vydání, Praha, 2001 ISBN 80-902247-2-5
- [5] Metals Handbook Volume 16, Machining. Edit. Josef R. Davis, I.ed., Metals park, ASM International, s. 944, 1989

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Karel Kocman, DrSc.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **13. února 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2012**

Ve Zlíně dne 2. února 2012

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
děkan



  
prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: .....

Obor: .....

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně .....

.....

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Stanovení rozdílů mezi HSC a konvenčním obráběním. Vliv řezné rychlosti na průběh řezného procesu a tepelného zatížení břitu. Popis základních řezných materiálů. Kvantifikace energetických poměrů při obrábění, popis geometrických veličin řezného procesu, řezných sil, práce a výkonu řezání, tepla a teploty při řezném procesu. Teorie tvorby třísky při HSC obrábění. Ekologické a ekonomické hledisko dané problematiky.

Klíčová slova:

HSC obrábění, řezná rychlost, řezné materiály, teorie tvorby třísky, řezná kapalina, ekologické aspekty, obrábění za sucha

## **ABSTRACT**

Determination of the differences between conventional and HSC machining. Effect of cutting speed on the course of the cutting process and cutting edge heat load. Description of basic cutting materials. Quantification of the ratios of energy during operation, a description of the geometrical dimensions of the cutting process, cutting forces, cutting labor and power, heat and temperature at the cutting process. Theory of chip formation in HSC machining. Ecological and economic aspects of the issue.

Keywords:

HSC machining, cutting speed, cutting materials, theory of chip formation, cutting fluid, environmental aspects, dry machining

Velice děkuji Prof. Ing. Karlovi Kocmanovi, DrSc. Za čas věnovaný konzultacím a za cenné připomínky a rady, které byly přínosem pro moji diplomovou práci.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ÚVOD</b> .....   | <b>11</b> |
| <b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....  | <b>12</b> |
| <b>1 VYSOKORYCHLOSTNÍ OBRÁBĚNÍ</b> .....  | <b>13</b> |
| 1.1 HISTORIE.....   | 13        |
| 1.2 ROZDÍL MEZI KONVENČNÍM A HSC OBRÁBĚNÍM .....  | 14        |
| 1.2.1 Konvenční obrábění .....  | 14        |
| 1.2.2 Vysokorychlostní obrábění .....   | 16        |
| 1.3 VLIV ŘEZNÉ RYCHLOSTI NA PRŮBĚH ŘEZNÉHO PROCESU A TEPELNÉHO<br>ZATÍŽENÍ BŘITU .....  | 17        |
| 1.3.1 Vliv řezné rychlosti na velikost primární plastické deformace třísky a<br>na úroveň řezné síly .....                    | 18        |
| 1.3.2 Vliv řezné rychlosti na odvod tepla z místa řezu .....  | 20        |
| 1.3.3 Snížení výchozí pevnosti obráběného materiálu účinkem vysokých<br>teplot při obrábění vysokými řeznými rychlostmi ..... | 21        |
| 1.3.4 Závislosti při obrábění ocelových a litinových obrobků.....   | 22        |
| 1.3.5 Závislost při obrábění hliníku a jeho slitin.....   | 23        |
| <b>2 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY</b> .....   | <b>25</b> |
| 2.1 NÁSTROJOVÉ OCELI.....   | 25        |
| 2.1.1 Nástrojové oceli nízkolegované (uhlíkové) .....   | 25        |
| 2.1.2 Nástrojové oceli legované .....   | 26        |
| 2.2 RYCHLOŘEZNÉ OCELI .....   | 26        |
| 2.3 SLINUTÉ KARBIDY .....   | 28        |
| 2.3.1 Nepovlakované slinuté karbidy.....  | 29        |
| 2.3.2 Povlakované slinuté karbidy .....   | 32        |
| 2.4 CERMETY .....   | 33        |
| 2.5 KERAMICKÉ ŘEZNÉ MATERIÁLY .....   | 34        |
| 2.6 SUPERTVRDÉ ŘEZNÉ MATERIÁLY.....   | 37        |
| 2.6.1 Polykrystalický kubický nitrid bóru.....  | 38        |
| 2.6.2 Polykrystalický diamant.....  | 38        |
| 2.7 OČEKÁVANÝ VÝVOJ ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ .....   | 39        |
| <b>3 KVANTIFIKACE ENERGETICKÝCH POMĚRŮ PŘI ŘEZÁNÍ</b> .....   | <b>40</b> |
| 3.1 GEOMETRICKÉ VELIČINY ŘEZNÉHO PROCESU .....  | 40        |
| 3.1.1 Kinematické veličiny .....  | 40        |
| 3.1.2 Posuv .....   | 40        |
| 3.1.3 Ostří nástroje .....  | 41        |
| 3.1.4 Záběr ostří .....   | 42        |
| 3.1.5 Průřez třísky a jeho rozměry .....  | 42        |
| 3.1.6 Úběr a jeho rozměry.....  | 43        |
| 3.1.7 Výkonnost obrábění .....  | 43        |
| 3.2 ŘEZNÉ SÍLY .....  | 43        |
| 3.2.1 Celková řezná síla .....  | 43        |
| 3.2.2 Geometrický rozklad celkové řezné síly do směru řezné rychlosti a<br>směrů k němu kolmých .....                         | 44        |



|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.2.3    | Geometrický rozklad celkové řezné síly v zjednodušeném<br>dvourozměrném modelu ortogonálního řezání ..... | 46        |
| 3.2.4    | Výpočet složek celkové řezné síly .....   | 47        |
| 3.3      | PRÁCE A VÝKON ŘEZÁNÍ.....   | 48        |
| 3.4      | TEPLO A TEPLOTA ŘEZÁNÍ .....  | 50        |
| 3.4.1    | Tepelná bilance řezného procesu .....   | 50        |
| 3.4.2    | Teplota řezání .....  | 51        |
| <b>4</b> | <b>TEORIE TVORBY TŘÍSKY PŘI HSC OBRÁBĚNÍ.....</b>   | <b>53</b> |
| 4.1      | FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY PROCESU ŘEZÁNÍ.....   | 53        |
| 4.2      | PLASTICKÉ DEFORMACE V OBLASTI TVOŘENÍ TŘÍSKY PŘI ORTOGONÁLNÍM<br>ŘEZÁNÍ .....                             | 54        |
| 4.2.1    | Primární plastické deformace.....   | 54        |
| 4.2.2    | Sekundární plastické deformace .....  | 55        |
| 4.3      | KVANTIFIKACE ÚHLU ROVINY STŘIHU .....   | 56        |
| 4.4      | TŘÍSKY A JEJICH TECHNOLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY .....   | 58        |
| 4.4.1    | Druhy tvářených třísek .....  | 58        |
| 4.5      | SOUČINITEL PĚCHOVÁNÍ TŘÍSKY .....   | 59        |
| <b>5</b> | <b>VÝZNAM CHLAZENÍ PŘI OBRÁBĚNÍ, CHARAKTERISTIKA<br/>POUŽÍVANÝCH CHLADÍCÍCH MÉDIÍ.....</b>                | <b>62</b> |
| 5.1      | TECHNOLOGICKÉ POŽADAVKY NA ŘEZNÉ PROSTŘEDÍ.....   | 62        |
| 5.2      | ŘEZNÉ KAPALINY .....  | 65        |
| 5.2.1    | Druhy řezných kapalin .....   | 65        |
| 5.3      | PŘÍVOD ŘEZNÉ KAPALINY DO MÍSTA ŘEZU.....  | 66        |
| <b>6</b> | <b>EKONOMICKÉ A ENVIRONMENTÁLNÍ HODNOCENÍ HSC<br/>TECHNOLOGIÍ.....</b>                                    | <b>70</b> |
| 6.1      | OŠETŘOVÁNÍ ŘEZNÝCH KAPALIN.....   | 70        |
| 6.2      | KONTROLA ŘEZNÝCH KAPALIN V PROVOZU.....   | 71        |
| 6.3      | ČIŠTĚNÍ ŘEZNÝCH KAPALIN.....  | 71        |
| 6.4      | BEZPEČNOST PRÁCE S ŘEZNÝMI KAPALINAMI .....   | 72        |
| 6.5      | RECYKLACE ŘEZNÝCH KAPALIN .....   | 72        |
| 6.6      | OBRÁBĚNÍ BEZ ŘEZNÝCH KAPALIN .....  | 74        |
| 6.6.1    | Minimalizace množství tepla .....   | 74        |
| 6.6.2    | Ochlazování a odplavování třísek .....  | 75        |
| 6.6.3    | Vyšší trvanlivost břitu .....   | 76        |
| 6.6.4    | Zlepšení obrobiteľnosti.....  | 76        |
| 6.6.5    | Obrábění ocelí bez řezných kapalin-soustružení.....   | 77        |
| 6.6.6    | Negativa používání řezných médií.....   | 77        |
| 6.6.7    | Náklady na aplikaci řezných kapalin .....   | 78        |
|          | <b>ZÁVĚR .....</b>  | <b>80</b> |
|          | <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>   | <b>82</b> |
|          | <b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>  | <b>83</b> |
|          | <b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>   | <b>85</b> |
|          | <b>SEZNAM TABULEK.....</b>  | <b>87</b> |
|          | <b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>   | <b>88</b> |



## ÚVOD

Obrábění velmi vysokými řeznými rychlostmi je dnes považováno za významný směr ve vývoji obrábění. Současný stav strojírenské výroby je charakterizován neustále rostoucími požadavky na složitost výrobků, tvarovou a rozměrovou přesnost a integritu povrchu, zejména funkčních ploch obráběného dílce a zaváděním nových druhů konstrukčních materiálů. Jednou z možností jak realizovat uvedené cíle je použití HSC obrábění.

Při HSC obrábění dochází ke zvýšení řezné rychlosti, což vede ke zvýšení intenzity úběru materiálu, která je již dlouho vyžadována, hlavně s nástupem CNC obráběcích strojů. Dnes můžeme sledovat firmy dodávající na trh obráběcí stroje s vysokootáčkovými vřeteny s dostatečným příkonem, moderními řídicími systémy a rychlostními posuvovými systémy. Díky vysokým rychlostem lze obrábět i oceli tepelně zpracované a další tvrdé materiály, které byly obrobitelné pouze broušením. Kvalitnějšího obrobku se dosáhne zlepšením drsnosti obrobeného povrchu, příznivým ovlivněním charakteru zbytkových pnutí v obrobeném povrchu a omezením možnosti vzniku tepelných deformací obrobku.

Důležitým faktorem při HSC obrábění, zejména při obrábění oceli a litin, je limitním faktorem řezivost. Přesněji řečeno mez tepelné stability stávajících materiálů jako jsou zejména slinuté karbidy ale i další řezné materiály (keramika, kubický nitrid bóru, polykrystalický diamant. Výrobci těchto materiálů se snaží dosáhnout vytvoření takového řezného materiálu, který by splňoval všechny doposud jmenované požadavky.

Jednou z hlavních podstat jak pochopit teorii HSC obrábění jsou energetické vlivy při řezání. Tvorba článkovité třísky a hlavně pak tepelné pochody během obráběcího procesu jsou jedním z hlavních znaků HSC. Dalším podstatným činitelem je součinitel přechování třísky a změna úhlu střížné roviny při určitých řezných parametrech.

Z ekonomického ale i ekologického hlediska vyvstává otázka obrábění bez řezné kapaliny, tzv. obrábění za sucha. Je nutné ale upozornit, že ne všechny metody obrábění (např. vrtání) a také ne všechny materiály (např. hořčík) jsou k obrábění za sucha vhodné. Pokud se na danou problematiku podíváme z hlediska ekologického, je ihned jasná výhoda tohoto způsobu obrábění a to, že odpadají problémy s řeznou kapalinou, jako je její ekologická závadnost, recyklace, skladování apod. Z ekonomického hlediska odpadají náklady na řeznou kapalinu, které podle statistických údajů, tvoří až 17% ceny výrobku, zatímco nástroje pouze 4%.

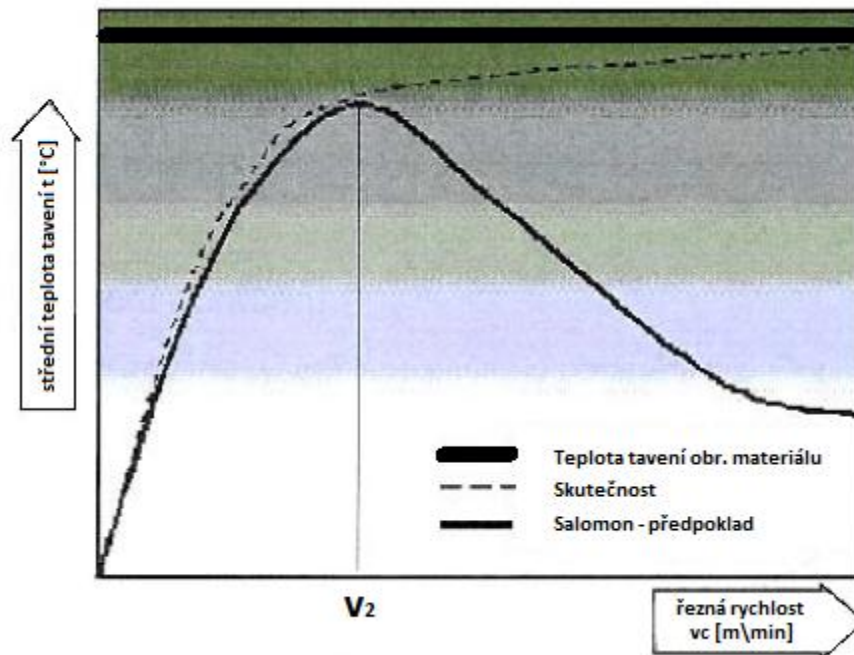
## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 VYSOKORYCHLOSTNÍ OBRÁBĚNÍ

## 1.1 Historie

Stručně z hlediska vzniku vysokorychlostního obrábění. Myšlenka vysokorychlostního obrábění se zrodila v roce 1931 pro zvýšení řezných výkonů při frézování slitin Al a s touto myšlenkou přišel Salomon a také ji experimentálně ověřil při frézování nástrojem velkého průměru, aby dosáhl odpovídající řezné rychlosti. Přitom vycházel z předpokladu, že se řezná teplota s rostoucí řeznou rychlostí nejprve zvětšuje a po dosažení určitého maxima dochází k jejímu poměrně rychlému poklesu- viz graf 1.

Jak z grafu vyplývá, pokles teploty zdůvodňoval tím, že se primární deformace v oblasti tvoření třísky s řeznou rychlostí zmenšuje, protože stupeň plasticity materiálu je závislý na rychlosti deformace. S rostoucí řeznou rychlostí se materiál stává méně plastickým. Tento předpoklad byl pozdějšími výzkumnými pracemi vyvrácen a bylo prokázáno, že zpočátku rychlý nárůst teploty se zpomalí a střední teplota řezání se s rostoucí řeznou rychlostí asymptoticky blíží teplotě tavení obráběného materiálu. [6]



Graf 1. Závislost řezné rychlosti na střední teplotě řezání [6]

Teoretické závěry Salomona byly ověřovány v některých výzkumných laboratořích, které řešili základní problém existence poklesu teploty po dosažení maximální teploty – viz. graf 1, hodnota  $v_2$ . Výsledky balistických zkoušek, při kterých bylo dosaženo řezných rychlostí

řádově  $v_c = 50\,000\text{--}80\,000$  m/min, sice potvrdily nižší úroveň řezných teplot i sil, ale s ohledem na dobu trvání záběru bříty s obrobkem (projektilem) řádu milisekund šlo o podmínky výrazně odlišné od zatížení bříty při běžném obrábění. Rozsáhlý výzkum této problematiky byl proveden v 70 a 80 letech minulého století v rámci programu DARPA (Defense advanced project agency) financováno USAAF. Pozornost byla mimo jiné věnována výzkumu tvorby třísky při obrábění slitin Al, titanu a superslitin vysokými řeznými rychlostmi. [6]

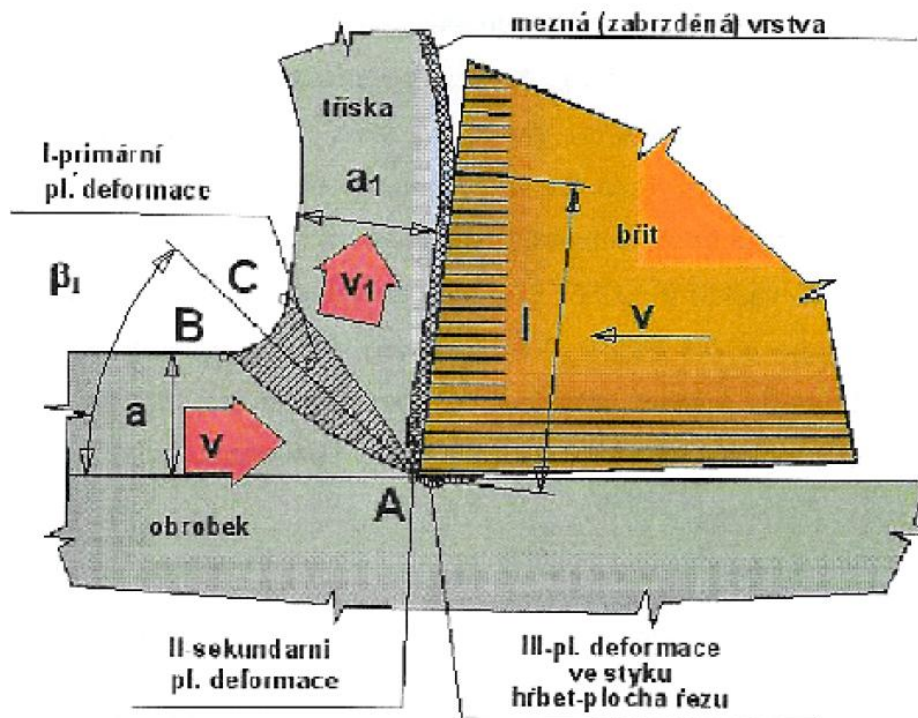
## 1.2 Rozdíl mezi konvenčním a HSC obráběním

### 1.2.1 Konvenční obrábění

Je charakterizováno rysem konvenčního obrábění viz obr. 1. Probíhající za relativně nízkých teplot a pokud možno s chlazením řezného procesu. V oblasti PPD (primární plastická deformace) prochází odřezávaný materiál výraznou plastickou deformací (zvláště u tzv. měkkých kovů) a tím často dochází ke zpevnění materiálu vznikající třísky, oproti původnímu materiálu obrobku. Pro konvenční obrábění nezušlechtěných ocelí je charakteristická oblast PPD, která zasahuje do oblasti i pod rovinou řezu. Vznik nárůstku této takové deformace ještě podporuje vzhledem k většímu poloměru ostří nárůstku vůči ostří bříty. [5]

Při obrábění zušlechtěných ocelí se deformace pod rovinou řezu zmenšují se zvětšující se tvrdostí obráběného materiálu (důsledkem zvětšování a zmenšování oblasti PPD).

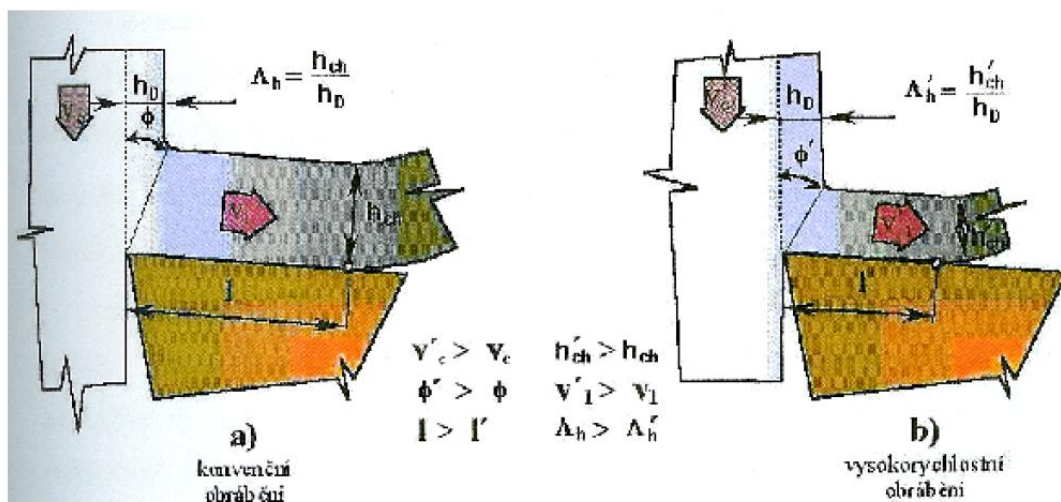
V oblasti SPD (Sekundární plastické deformaci) vznikají nárůstky, které jsou výsledkem velkých hodnot přítláčných a třecích sil působících v oblasti tříska - čelo nástroje. Smykové napětí v oblasti SPD přesahuje mez kluzu ve smyku již zpevněného materiálu třísky a dochází tak k další výrazné plastické deformaci. Veliké síly mají za následek vznik intenzivního tření a následný vývin tepla. Vzniklé teplo má relativně dost času (malá rychlost třísky  $v_1$  přejít do nástroje, to je nežádoucí z důvodů intenzivnějšího opotřebení nástroje. Se zvyšující se řeznou rychlostí (deformační rychlostí) úměrně roste intenzita vznikajícího procesního tepla, které je závislé na řezném odporu (měrné řezné síle). Řezný odpor závisí především na druhu obráběného materiálu, a proto tvrdé zušlechtěné materiály s velkou pevností se za těchto podmínek těžko obrábí (z hlediska trvanlivosti bříty nástroje). [5]



Obr. 1. Znáornění plastických deformací při obrábění [6]

V oblasti TPD (Terciální plastická deformace) je tomu právě naopak. Veliké síly a odpor materiálu proti deformaci způsobují neúnosné zatížení břitu, zvláště hřbetu. Nadměrně veliký deformační odpor vede k rychlému otupení břitu, popř. k jeho destrukci. [5]

Zpevněná tříška může mít i dvakrát vyšší tvrdost a klade větší řezný odpor. Výsledné rozdíly mezi konvenčním a HSC obráběním najdeme na obr. 2. Je vidět patrný rozdíl mezi úhlem smykové roviny  $\Phi$ , součinitelem pčhování třísky  $\Lambda_h$  z obr. 2a / 2b. Čím větší je hodnota  $\Lambda_h$ , tím více je tříška deformována (pčhována) a tím větší jsou řezné síly. [6]



Obr. 2. Charakteristické rysy jednotlivých typů obrábění [6]

### 1.2.2 Vysokorychlostní obrábění

Dojde-li ke zvýšení řezné rychlosti tak, že se dostáváme do oblasti HSC (High Speed Cutting), (obr.2.2b), tj. rychlost nárůstu třísky ( $v_1, <v_1'$ ), dochází k výrazně odlišným pochodům než u konvenčního obrábění. Důvodem je především velká deformační rychlost, která vyvolá nárůst procesní teploty řezání, od které se odvíjí převážná většina dalších změn. Vysoká rychlost třísky ( $v_1 < v_1'$ ) způsobí, že materiál odřezané vrstvy prochází oblastí PPD se značně vyšší deformační rychlostí, to má výrazný vliv na koncentraci mechanického napětí do úzkých smykových oblastí a následně na plasticitu kovu v této oblasti. Plasticita materiálu obrobku se snižuje se zvyšující se rychlostí deformace, oblast PPD se proto zmenšuje. Pro HSC je charakteristické, že probíhá intenzivní plastická deformace v celém průřezu odebírané vrstvy, ale pouze v lokalizované oblasti smykové roviny a v blízkosti čela břitu. Objem deformovaného materiálu je mnohem menší než u konvenčního způsobu obrábění. Velká deformační rychlost materiálu generuje ve zmenšené oblasti plastické deformace podstatné zvýšení tepla (teploty). Teplota, zvláště v blízkosti čela, dosahuje bodu tavení daného materiálu. Vzhledem k popsaným jevům je zřejmé, že silové a napět'ové zatížení nástroje je menší než u konvenčního obrábění, proto je možné obrábět i zušlechťené kovové materiály.

Z obr. 2.2b je patrné, že úhel smykové roviny se zvětšuje ( $\Phi < \Phi'$ ) v závislosti na rostoucí řezné rychlosti. Zvětšením úhlu  $\Phi$  dochází ke ztenčení odcházející třísky ( $h_{ch} < h'_{ch}$ ), a tím k poklesu součinitele pěchování. Dochází také ke snížení pevnosti třísky v ohybu z důvodu zmenšení kontaktní plochy třísky - čelo ( $\Lambda_h > \Lambda'_h$ ) viz. obr. 2b.

Vysokorychlostním obráběním v podstatě sledujeme zvýšení úběru materiálu, kvality obrobeneho povrchu a trvanlivosti břitu nástroje podstatným zvýšením řezné rychlosti při sníženém průřezu třísky a snížené řezné síle. Vysoká relativní rychlost odebíraného materiálu vzhledem k čelní ploše břitu nástroje spolu s vysoce účinnými povlaky a efektivní geometrií břitu, zvyšují podíl tepla řezného procesu, které odchází s třískou a snižuje tepelné i mechanické namáhání nástroje a prodlužuje trvanlivost (za určitých striktních podmínek).

Podstatné pro HSC je vyloučení chladicího efektu procesních medií, který by komplikoval dosažení vysokorychlostního režimu. Vysoká teplota (v oblasti PPD) třísky je tedy pozitivním faktorem i principiálním zdrojem efektů vysokorychlostního obrábění. Tam, kde se lze těžko obejít bez procesních kapalin, jako u vrtání nebo broušení (vysoce záporná geometrie břitu - brusného zrna), je dosažení efektů HSC problematické. Při HSC vzniká extrémně



teplá tříška, její teplota může velmi ovlivnit přesnost obrábění, protože třísky se mohou shromažďovat např. v dutině obrobku, upínacího přípravku nebo obráběcího stroje a způsobit tak jejich tepelnou deformaci.

Použití procesních kapalin současný trend z mnoha hledisek vylučuje. Hovoří se tedy o suchém obrábění nebo o tzv. kvazi-suchém obrábění (polosuchém), které ponechává určité silně zredukované množství procesních kapalin nebo mlhy pro mazání čela břítu nástroje a dosahuje tak snížení třecích sil. Tam, kde je zapotřebí třísky účinně odstraňovat z místa řezu a popř. chladit nástroj (především u nástrojů s nepřerušovaným řezem) je nutné používat speciální zařízení pro chlazení. [4]

### 1.3 Vliv řezné rychlosti na průběh řezného procesu a tepelného zatížení břítu

Jestliže vycházíme z rovnice (1), potom roste množství tepla vzniklého při oddělování třísky za jednotku času na součin řezné síly  $F_c$  a řezné rychlosti  $v_c$ . Teoreticky by měla vzrůstat řezná teplota (střední teplota řezání) úměrně řezné rychlosti podle čáry 1 naznačené v grafu 2: [6]

$$Q_c = F_c \cdot v_c \quad (1)$$

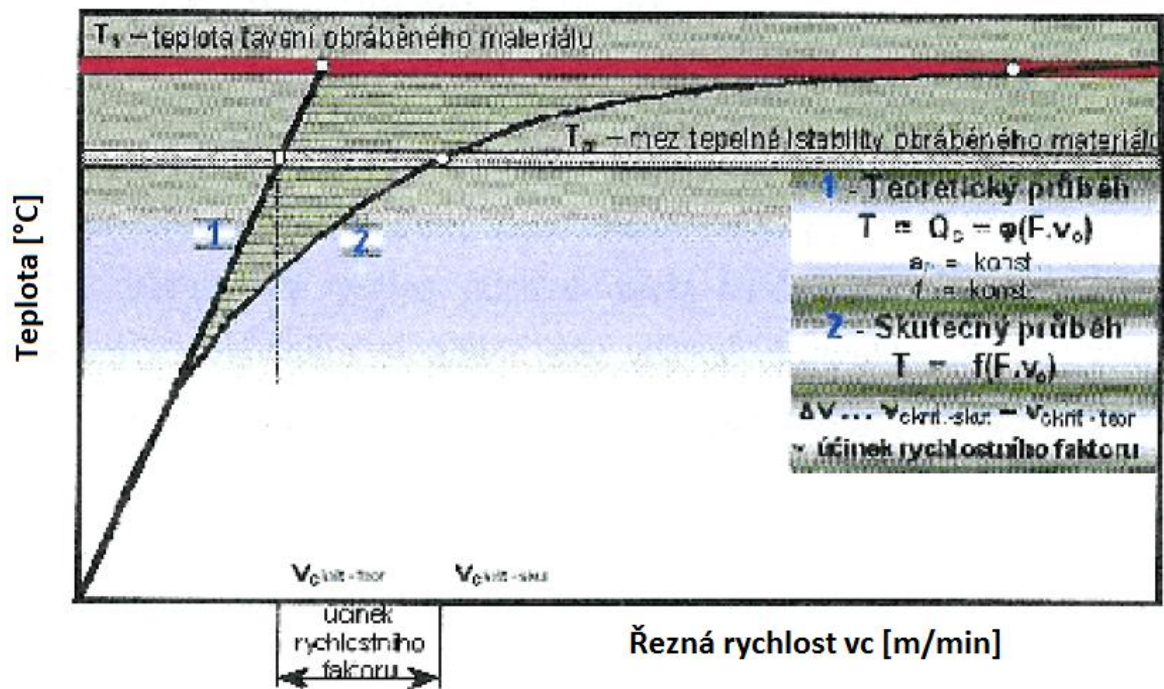
Kde  $Q_c$  .... celkové množství tepla vzniklé při odřezávání třísky [ $J \cdot \text{min}^{-1}$ ]

$F_c$  .... řezná síla [N]

$v_c$  .... řezná rychlost [ $m \cdot \text{min}^{-1}$ ]

V tomto případě předpokládám, že je řezná síla  $F_c$  nezávislá na řezné rychlosti  $v_c$ . Podle tohoto předpokladu by měla vzrůstat střední řezná teplota přibližně lineárně až do dosažení bodu teploty tavení obráběného materiálu.

Ve skutečnosti je růst střední řezné teploty zpočátku (při nižších řezných rychlostech) rychlý, blízký teoretickému průběhu podle čáry 1, ale s rostoucí řeznou rychlostí se růst zpomaluje podle čáry 2. Zpomalování nárůstu střední teploty řezání je důsledkem snížení výchozí pevnosti obráběného materiálu, které je důsledkem účinku vysokých teplot, změnou odvodu tepla z místa řezu a přímým účinkem řezné rychlosti na velikost PPD. [6]



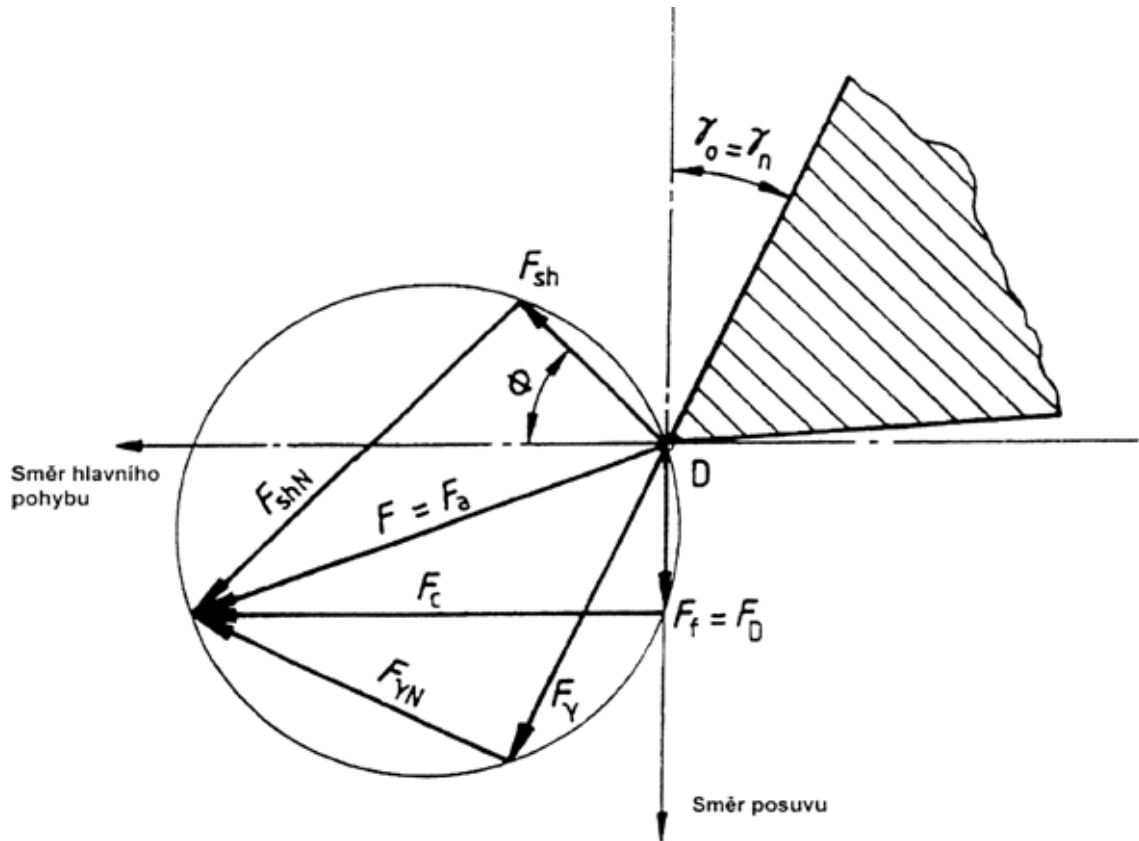
Graf. 2. Závislost řezné rychlosti na teplotě [6]

Pochopitelně růst řezné teploty není bez omezení, jestliže obrábíme určitým nástrojovým materiálem, může růst řezná teplota až do meze tepelné stability nástroje. Této meze se dosáhne při určité kritické řezné rychlosti  $v_{\text{krit-teor}}$ , teoretická kritická řezná rychlost je menší než skutečná kritická řezná rychlost  $v_{\text{krit-skut}}$  - viz. graf 2.

Rozdíl kritické teoretické a skutečné rychlosti charakterizuje účinek rychlostního faktoru  $\Delta v$ . Efekt rychlostního obrábění bude tím větší, čím více se řezná teplota přiblíží, popř. dosáhne teploty tavení obráběného materiálu. [6]

### 1.3.1 Vliv řezné rychlosti na velikost primární plastické deformace třísky a na úroveň řezné síly

Se zvyšováním řezné rychlosti se zvětšuje úhel střižné roviny  $\Phi$ . V důsledku toho se zmenšuje PPD - pěchování třísky  $\Lambda_h > \Lambda'_h$ . Se zmenšováním součinitele pěchování třísky se zmenšuje délka kontaktní plochy třísky - čelo  $l' < l$ , ale vzrůstá rychlost odchodu třísky po čele (obr. 3). V porovnání s případem konvenčního obrábění, kdy vznikají normálně síly  $F_N$  i tečná složka  $F_T$  (obr. 3), dochází s rostoucí řeznou rychlostí k poklesu obou složek řezné síly.



Obr. 3. Rozložení řezné síly [4]

Současně vzrůstá rychlost odchodu třísky po čele nástroje, což vede k růstu tepla  $Q_2$  vzniklého za jednotku času v oblasti sekundární plastické deformace v důsledku tření. V tomto případě platí: [6]

$$Q_2 = F_y \cdot v_1 \quad (2)$$

kde:  $Q_2$  .... růst tepla vzniklé za jednotku času v oblasti SPD [ $J \cdot \text{min}^{-1}$ ]

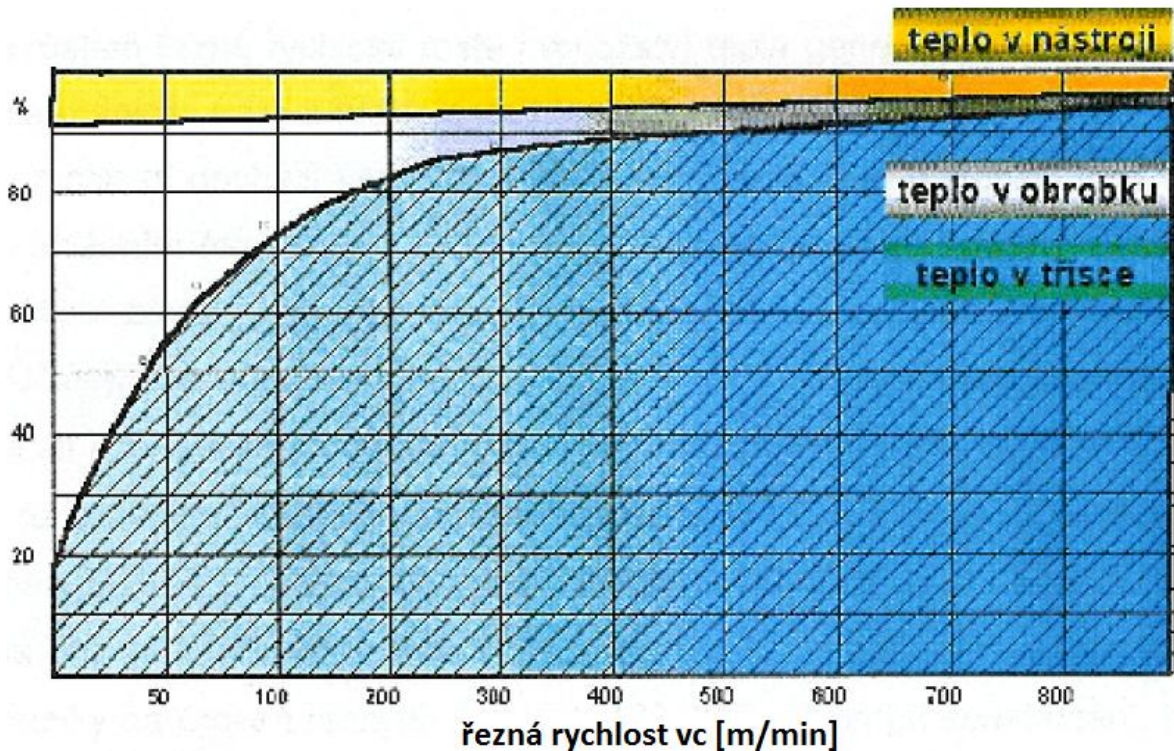
$F_y$  .... tečná, složka řezné síly [N]

$v_1$  .... rychlost třísky [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]

Což ve svém důsledku vede ke vzrůstu střední řezné teploty a ke zvýšení intenzity opotřebení břitu a tím je účinek nepříznivý. Vzrůst řezné síly tudíž vede na jedné straně k poklesu síly  $F_y$  v kontaktu tříska - čelo, ale současně k růstu rychlosti třísky  $v_1$ . I když nelze jednoznačně prokázat převládající vliv jednoho či druhého činitele z rovnice (2) lze předpokládat obecně příznivý účinek vlivu řezné rychlosti na zpomalení nárůstu řezné teploty omezením PPD. [4]

### 1.3.2 Vliv řezné rychlosti na odvod tepla z místa řezu

S rostoucí řeznou rychlostí se zkracuje doba na odvedení tepla  $q_2$  do obrobku a proto vzrůstá podíl tepla  $q_1$  odvedeného třískou. S rostoucí řeznou rychlostí vzrůstá podíl tepla odvedeného třískou k celkovému množství tepla  $Q_c$ . Zároveň se zmenšuje procentní podíl tepla, které je odváděno břitem a obrobkem. V grafu 3 je schéma rozdělení tepla mezi třísku, břit nástroje a obrobek v závislosti na řezné rychlosti při obrábění oceli. [6]



Graf. 3. Závislost rozložení teploty na řezné rychlosti [6]

Z grafu je zřejmé, že s rostoucí řeznou rychlostí se zvětšuje podíl tepla odvedeného třískou, kdežto podíl tepla odvedeného obrobkem a břitem se zmenšuje. Důsledkem použití vysokých řezných rychlostí je chladnější obrobek tzn., že obrobek má menší tepelné deformace a je tedy přesnější s příznivějším charakterem zbytkových pnutí v obrobeném povrchu. Převážná část tepla vzniklého při řezání tedy zůstává v třísce. U plastických materiálů odchází v třísce 60 až 90 % celkového množství tepla  $Q_c$ , u litiny odchází v třísce 35 až 60 % celkového množství tepla. Podíl tepla odvedeného nástrojem je v rozmezí 0,5 až 30 % podle vlastností obráběného materiálu a řezných podmínek. Do obrobku přejde 5 až 50 % veškerého tepla vzniklého při obrábění, část tepla se odvede do okolní atmosféry.

Obrábění vysokými řeznými rychlostmi má proto za následek rostoucí tepelné zatížení břitu, i když střední teplota řezání vzrůstá pomaleji než by odpovídalo nárůstu rychlosti

odchodu třísky  $v_1$  po čele, tedy množství tepla vzniklého v kontaktu tříska - čelo podle rovnice (2). [6]

### 1.3.3 Snížení výchozí pevnosti obráběného materiálu účinkem vysokých teplot při obrábění vysokými řeznými rychlostmi

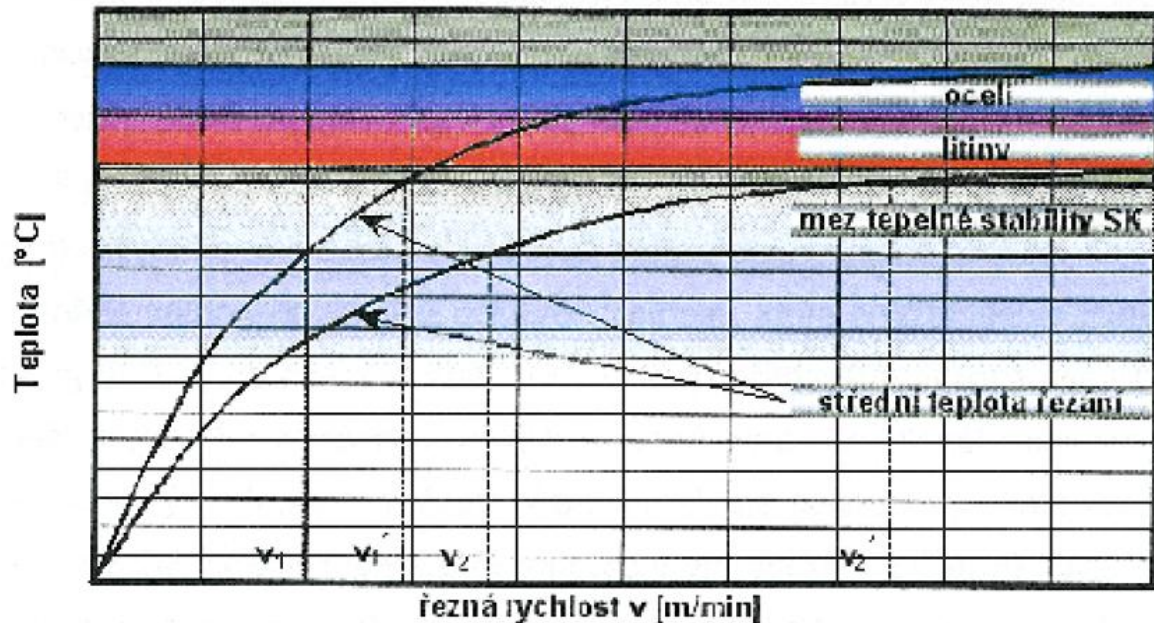
S růstem řezné rychlosti roste i množství tepla generovaného v oblasti PPD dle rovnice (1) a tudíž roste i teplota v této oblasti. Počínaje určitou řeznou rychlostí dochází ke snížení pevnosti obráběného materiálu, což se projeví snížením řezné síly, a proto se zpomalí nárůst střední teploty řezání, jejíž velikost závisí podle rovnice (2) na množství tepla vzniklého v oblasti SPD. Účinek zpevnění se prakticky projevuje např. při obrábění zušlechťených ocelí (s vysokou tvrdostí 58-62 HRC) nástrojem z BN řeznými rychlostmi na úrovni řezné rychlosti 80-100 m.min<sup>-1</sup>, posuvu  $f=0,2-0,4$  mm/ot. Zpevňující účinek se příznivě projevuje i při obrábění žáruvzdorných ocelí a speciálních slitin na bázi niklu případně kobaltu, buď nástroji BN nebo i siliciumnitridové keramiky. Tyto účinky se projevují při řezných rychlostech 120-250 m.min<sup>-1</sup> při soustružení, při posuvech  $f=0,1$  mm/ot. nebo frézování při posuvech  $f_2 \leq 0,3$  mm/zub a  $v_c=200$  m.min<sup>-1</sup>. Kde působí zpevňující účinek proti zpevňování obráběných materiálů, tak že velmi zhoršuje jejich obrobiteľnosť při nižších řezných rychlostech.

Vysoká teplota v oblasti PPD působí při rychlostním obrábění jako předehřev obráběného materiálu např. plasmou nebo laserem. Uvedené metody byly často publikovány jako prostředek pro zlepšení obrobiteľnosti materiálů. Ve svém souhrnu všechny popsané účinky vedou k výraznému nárůstu řezného výkonu a tedy růstu produktivity, zlepšení integrity obrobeného povrchu a přesnosti obrobku, omezení možnosti vzniku vibrací atd. Na druhé straně vede použití vysokých řezných rychlostí zákonitě k nárůstu řezných teplot. Tento fakt však v mnoha případech zásadním způsobem limituje možnost širšího uplatnění metody obrábění vysokými řeznými rychlostmi. Limitujícím faktorem je nástrojový materiál přesněji mez jeho tepelné stability. Nástrojový materiál pro rychlostní obrábění musí splňovat základní požadavek, aby si i při vysokých řezných rychlostech a tedy i vysokých řezných teplotách zachoval dostatečnou převahu tvrdosti vzhledem k tvrdosti obráběného materiálu za teplot existujících v kontaktní ploše tříska - čelo. Podle zatím docílených údajů je nutný poměr tvrdosti břitu k tvrdosti obráběného materiálu při možných teplotách řezání. [4]



### 1.3.4 Závislosti při obrábění ocelových a litinových obrobků

V grafu 4 je schematicky naznačena závislost střední teploty řezání na řezné rychlosti při obrábění oceli a litiny.



Graf. 4. Závislost střední teploty řezání na řezné rychlosti (ocel, litina) [6]

Řezná teplota s rostoucí řeznou rychlostí vzrůstá zpočátku velmi rychle a po dosažení určité úrovně řezné rychlosti se její růst zpomaluje účinkem jevů, které jsem již uvedl. Při dalším růstu řezné rychlosti se křivky znázorňující závislost řezné teploty na řezné rychlosti asymptoticky blíží teplotě tavení obráběného materiálu. V případě obrábění oceli a litiny se jejich teploty tavení pohybují v rozmezí asi 1150-1500°C.

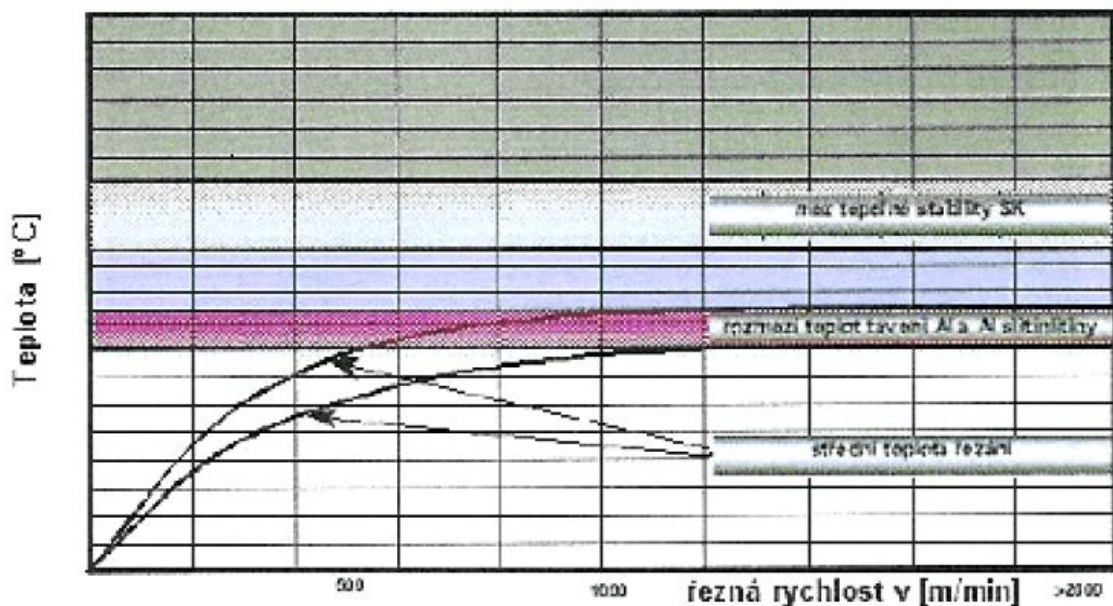
U teplot řezání v grafu 4 je uvedeno určité rozmezí řezných teplot. Rychlejší nárůst blíže horní hranici uvedeného rozmezí odpovídá materiálům s vyšší pevností a obrábění většími průřezy třísky. Břity s horšími podmínkami pro odvod tepla a pomalejší nárůst je blíže k dolní hranici rozmezí a odpovídá méně pevným obráběným materiálům a menším průřezům třísky odebíraným břity s lepšími podmínkami odvodu tepla.

Jestliže vezmeme v úvahu, že u dnes dominantního řezného materiálu slinutých karbidů dochází k výraznému poklesu tvrdosti v rozmezí teplot 850-1100°C, potom existují určité mezní řezné rychlosti, které nelze při rychlostním obrábění oceli a litiny slinutými karbidy (SK) překročit. Většinou jde o mezní řezné rychlosti, při kterých ještě nedochází k plnému uplatnění výhod rychlostního obrábění. Pro lepší využití výhod rychlostního obrábění oceli a litiny jsou v současné době k dispozici řezné materiály s vyšší mezí tepelné stability a to kubický nitrid bóru (BN) a řezná keramika.

U nástrojů BN se předpokládá mez tepelné stability  $> 1500^{\circ}\text{C}$  a u řezné keramiky  $1200\text{--}300^{\circ}\text{C}$ . Tyto materiály umožňují tedy využití vyšších řezných rychlostí při obrábění oceli a zejména litiny v porovnání se SK, ale na druhé straně je nutno vzít v úvahu některé vlastnosti, které použití těchto materiálů pro rychlostní obrábění limitují. U BN je to především vysoká cena břitu i vyšší křehkost v porovnání se SK a u řezné keramiky menší odolnost proti mechanickým i teplotním rázům. Pokud budu hodnotit možnost všeobecného využití metody rychlostního obrábění pro ocelové a litinové obrobky potom je možno očekávat jeho využití až po příchodu zcela nového řezného materiálu s mezí tepelné stability asi  $1700\text{--}1800^{\circ}\text{C}$  a s dostatečnou houževnatostí. [6]

### 1.3.5 Závislost při obrábění hliníku a jeho slitin

V grafu 5 je schematicky znázorněn průběh střední řezné teploty při obrábění hliníku a jeho slitin. Teploty tavení těchto materiálů dosahují maximálních hodnot asi  $650^{\circ}\text{C}$ , které leží hluboko pod rozmezím tepelné stability slinutých karbidů. Střední řezná teplota se s růstem řezné rychlosti opět asymptoticky blíží teplotě tavení těchto materiálů. [4]



Graf. 5. Závislost střední teploty řezání na řezné rychlosti (hliník) [6]

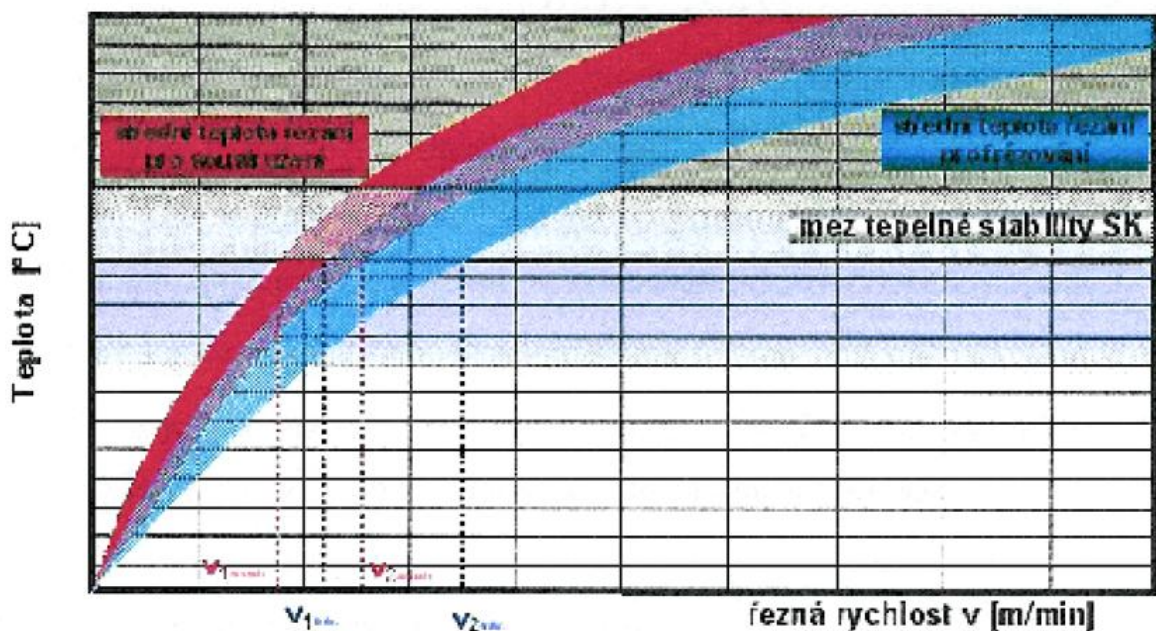
Je proto zřejmé, že realizace rychlostního obrábění nenarazí na omezení vlastnostmi řezného materiálu jako je tomu u ocelí. Při řezných teplotách blízkých teplotě tavení slitin hliníku lze volit řeznou rychlost při použití nástrojů SK prakticky neomezenou pouze s ohledem na možnosti obráběcího stroje. Obrábění především frézování těchto materiálů je v současné době ve stádiu plného využívání především v leteckém i kosmickém průmyslu,

kde jsou při frézování běžně dosahovány řezné rychlosti  $v_c=2000-3000 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  na speciálních strojích s vysokootáčkovými vřeteny ( $40000-80000 \text{ min}^{-1}$ ) a rychlými posuvnými mechanismy s posuvy řadově  $20-60 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Určitou výjimkou při rychlostním obrábění slitin hliníku tvoří slitiny s vyšším obsahem Si  $> 12 \%$ , kdy dochází k vyššímu otěru břitu u SK, v tomto případě se lépe uplatňují nástroje s břity DP. Stejně příznivé podmínky pro realizaci rychlostního obrábění jsou i při obrábění nekovových kompozitních materiálů, kde lze použít řadově stejných řezných rychlostí jako u Al slitin.

Podobný případ jako u slitin Al při realizaci rychlostního obrábění jsou slitiny Cu i když se v tomto případě blíží jejich teplota tavení mezi tepelné stability SK. V tomto případě již nelze volit úroveň řezných rychlostí zcela neomezeně. Při volbě řezných parametrů je zapotřebí postupovat diferencovaně podle obrobitelnosti příslušných slitin zvlášť.

S ohledem na intenzitu řezné teploty a řezné rychlosti se jeví frézování jako výhodnější pro aplikaci rychlostního obrábění. Břit frézy, který obvykle periodicky vyjíždí během 1. otáčky z řezu se ochlazuje a proto řezná teplota vzrůstá pomaleji než při soustružení stejnými řeznými podmínkami. Pro frézování materiálů různých pevností, při úběru různých průřezů třísky, leží rozmezí kritických řezných rychlostí při frézování  $v_{1\text{fréz}} v_{2\text{fréz}}$  výše, než při soustružení stejného materiálu a při úběru stejného průřezu třísky (viz. graf 6). [6]



Graf. 6. Charakteristika kritických řezných rychlostí pro frézování a soustružení



## 2 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY

Průběh a výstupy řezného procesu významně závisí na vlastnostech řezné části nástroje, která je zhotovena z příslušného nástrojového materiálu.

K základním požadavkům na nástrojový materiál patří jeho tvrdost, odolnost proti opotřebení, tepelná vodivost, pevnost v ohybu a houževnatost. Všechny uvedené vlastnosti by měl nástrojový materiál splňovat při vyšších a vysokých teplotách po dostatečně dlouho dobu. Jedná se především o požadavek vysoké řezivosti a tím i vysokého řezného výkonu, kvantifikovaném velkým minutovým úběrem obráběného materiálu a dále vysoké odolnosti proti mechanickým a teplotním rázům pro všechny kategorie řezných nástrojů. [3]

### 2.1 Nástrojové oceli

Nástrojové oceli jsou zařazeny ve třídě 19 a jejich rozdělení je uvedeno v tabulce 1

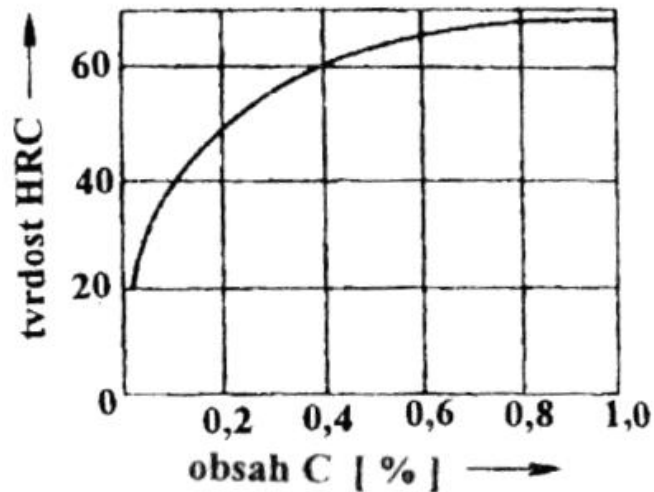
| Základní číselná značka    | Význam třetí číslice v základní značce oceli                |                             |
|----------------------------|---|-----------------------------|
| 19 0xx<br>19 1xx<br>19 2xx | Dvojcísle ze 3. a 4. číslice vyjadřuje střední obsah uhlíku | Nástrojové oceli nelegované |
| 19 3xx                     | Oceli manganové, křemíkové, vanadové                        | Nástrojové oceli legované   |
| 19 4xx                     | Oceli chromové  |                             |
| 19 5xx                     | Oceli chrommolybdenové                                      |                             |
| 19 6xx                     | Oceli niklové   |                             |
| 19 7xx                     | Oceli wolframové  |                             |
| 19 8xx                     | Oceli rychlořezné   |                             |
| 19 9xx                     | Volné   |                             |

Tab. 1. Rozdělení a označování nástrojových ocelí

#### 2.1.1 Nástrojové oceli nízkolegované (uhlíkové)

Na vlastnosti těchto ocelí má největší vliv obsah uhlíku. Tvrdost oceli v zakaleném stavu vzrůstá se stoupajícím obsahem uhlíku – obr. 4.

Nástroje z nástrojových nelegovaných ocelí snáší teplotu bříty do 220 °C a je možné je využívat pro řezné rychlosti do 15m.min<sup>-1</sup>. V současné době ztrácejí na významu a jsou často nahrazovány legovanými nástrojovými oceli. [1]



Obr. 4. Závislost tvrdosti zakalené nelegované nástrojové oceli na obsahu uhlíku [1]

### 2.1.2 Nástrojové oceli legované

Hlavními legujícími prvky těchto ocelí jsou karbidotvorné prvky Cr, V, W, Mo, které vytváří tvrdé a až do vysokých teplot stálé karbidy. Další legující prvky Ni, Si, Co nejsou karbidotvorné. Z legovaných nástrojových ocelí se vyrábějí téměř všechny druhy řezacích, stříhacích tvářecích a jiných nástrojů. Oproti nelegovaným ocelím jsou legované oceli charakteristické zejména větší prokalitelností a zvýšenou odolností proti popouštění, avšak jsou náročnější na tepelné zpracování. Nástroje z legovaných nástrojových ocelí snášejí teplotu bříty 250°C až 350 °C a řeznou rychlost 15 až 25 m.min<sup>-1</sup>. [1]

### 2.2 Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli – RO – jsou uváděny jako samostatná skupina legovaných nástrojových ocelí, a to pro své zcela specifické vlastnosti a využitelnost, zejména pro vysocevýkonné řezné nástroje. Obsahují karbidotvorné prvky W, Cr, V, Mo a nekarbidotvorná Co. Uhlíku obsahují zpravidla méně než 1%. Podle obsahu legujících prvků a vlastností jsou vhodné pro řezné nástroje na obrábění ocelí, ocelí na odlitky o vysoké pevnosti a tvrdosti a těžkoobrobitelných materiálů. Rychlořezné oceli jsou charakteristické střední odolností proti opotřebení a vysokou lomovou pevností, které jim dávají široké pole uplatnění. [2]

Pro nástroje z RO je ekonomicky velmi vhodné používání sice poněkud dražších, ale podstatně kvalitnějších novějších druhů vysoce výkonných rychlořezných ocelí uvedených v tabulce 2.

Při volbě nástroje je nutné zejména respektovat:

- složitost tvaru obrobku a obrobitelnost jeho materiálu
- druh operace obrábění
- možnost volby řezných parametrů
- výkon a tuhost obráběcího stroje
- požadované parametry obrobeného povrchu, zejména drsnost povrchu a rozměrovou a tvarovou přesnost
- náklady na obrábění

Důležitým předpokladem optimálního využití nástrojů z rychlořezných ocelí je použití vhodného řezného prostředí, tj. řezných emulzí a olejů. Rychlořezná ocel se též uplatňuje ve výrobě tvarových nástrojů a nástrojů vystaveným nárazům při přerušovaném řezu. Je houževnatá a v žíhaném stavu se dá relativně dobře obrábět. Velmi výhodné je použití slitých karbidů. Břítové destičky jsou na čele nástrojů buď připájeny, nebo jsou upevňovány mechanicky.

U všech typů nástrojů, kde je to konstrukčně možné, je vhodné použít nástrojů s vyměnitelnými břítovými destičkami. Při použití vyměnitelných destiček se zvýšenou a vysokou přesností, určených pro NC stroje, další seřizování zcela odpadá. Nevýhodou je nákladnější upínací zařízení a vyšší požadavky na organizaci údržby. [1]

| Označení podle normy | Hutní označení          | Obráběné materiály a charakteristika pracovních podmínek  |
|----------------------|-------------------------|---|
| 19 802               | Maximum Speciál G Extra | Značně namáhané nástroje pro obrábění materiálů o nižší a střední pevnosti cca do 850 Mpa hrubování   |
| 19 830               | Maximum Speciál M05     | Značně namáhané nástroje pro obrábění materiálů do pevnosti 900 Mpa i přerušovaným řezem a při požadavku na vysokou houževnatost            |
| 19 855               | Maximum Speciál 55      | Vysoce namáhané nástroje pro obrábění ocelí a ocelolitiny o vysoké pevnosti a materiálů těžkoobrobitelných při vysokých řezných rychlostech |
| 19 856               | Maximum Speciál 55G     | Vysoce namáhané nástroje pro obrábění ocelí a ocelolitiny o vysoké pevnosti a materiálů těžkoobrobitelných při vysokých řezných rychlostech |
| 19 857               | MKG                     | Hrubování oceli a ocelolitiny o vysoké pevnosti a materiálů těžkoobrobitelných  |
| 19 858               | Radeco C                | Jemné a přesné obrábění oceli a ocelolitiny o vysoké pevnosti, tvrdých a abrazivních materiálů, nepřerušovaný řez                           |
| 19 859               | MK                      | Nejvýše namáhané nástroje pro obrábění, zejména hrubování oceli a ocelolitiny o vysoké pevnosti, pevných a houževnatých materiálů           |
| 19 860               | MKH                     | Nejvýše namáhané nástroje pro obrábění, zejména hrubování oceli a ocelolitiny o vysoké pevnosti, pevných a houževnatých materiálů           |
| 19 861               | RAdecO M10              | Jemné obrábění oceli a ocelolitiny, ubírání třísek velkého průřezu u ocelí a ocelolitiny o vysoké pevnosti                                  |

Tab. 2. Přehled vybraných druhů rychlořezných ocelí a jejich technologické uplatnění

### 2.3 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou jedním z nejúspěšnějších kompozitních materiálů. Svou tvrdostí, pevností a houževnatostí vyhovují i těm nejnáročnějším aplikacím. Hlavním rysem SK je možnost měnit jeho složení tak, aby jeho výsledné vlastnosti zajišťovali maximální odolnost proti opotřebení, deformacím, trhlinám, korozi a oxidaci. [11]

Slinuté karbidy – SK- jsou produktem práškové metalurgie a vyrábí se z různých karbidů a kovového pojiva. Mezi nejdůležitější patří karbid wolframu WC, karbid titanu TiC, karbid tantalu TaC a karbid Niobu NiC. Jako pojivo se ve většině případů používá kobalt Co.

SK jsou směsí dvou a více fází a není je možno dále tepelně zpracovávat.

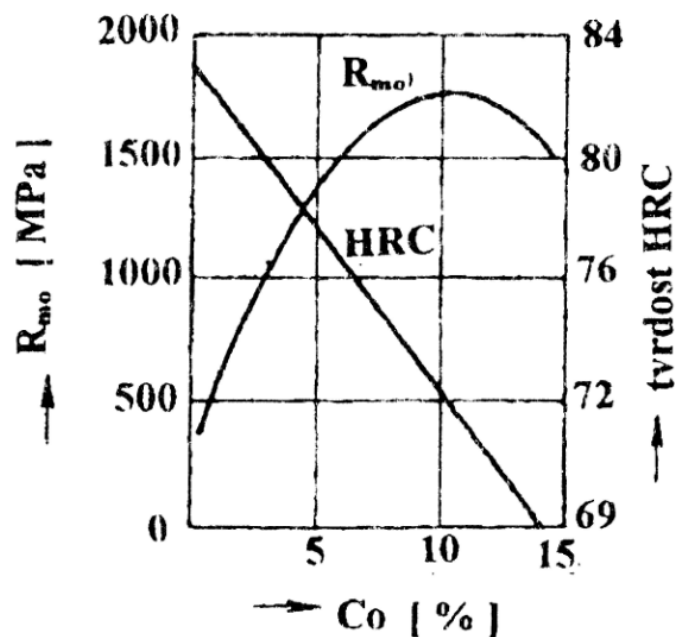
Obsahové množství jednotlivých fází ovlivňuje jejich tvrdost, houževnatost a odolnost proti oděru – obr. 2

Protože jsou velmi tvrdé, dají se tvarově a rozměrově upravovat pouze broušením, elektroerozivním obráběním a lapováním.

SK se vyrábějí ve tvaru destiček normalizovaných tvarů a rozměrů, které se pájí, ale nejčastěji mechanicky upínají na řeznou část nástroje.

Mechanicky upínané destičky mají několik ostří, která se využívají postupně. Po otupení všech ostří se destička vyřazuje, Některé nástroje (vrtáky a frézy malých rozměrů) se vyrábějí jako monolitické.

V technologické praxi se aplikují SK ve standardním provedení (nepovlakované) a slinuté karbidy opatřené různými druhy povlaků. [2]



Obr. 5. Závislost tvrdosti HRC a pevnosti v ohybu  $R_{mo}$  slinutých karbidů na obsahu uhlíku. [2]

### 2.3.1 Nepovlakované slinuté karbidy

Slinuté karbidy se dle ČSN ISO 516 (22 0801) člení v závislosti na svém složení a oblasti použití do tří skupin.

### Slinuté karbidy typu P – WC, TiC, Co

Jsou určeny pro obrábění železných kovů se vznikem dlouhé třísky – oceli, oceli na odlitky, temperované litiny. Nástroje se slinutými karbidy typu se označují modrou barvou.

### Slinuté karbidy typu M – WC, TiC, TaC, Co

Používají se při obrábění železných kovů se vznikem dlouhé i krátké třísky a pro obrábění neželezných kovů – manganové oceli, austenitické oceli, oceli na odlitky. Nástroje jsou označovány žlutou barvou.

### Slinuté karbidy typu K – WC, Co

Jsou určeny pro obrábění železných kovů s krátkou třískou – šedé litiny, neželezných kovů, měď, bronz, hliník a nekovových materiálů. Nástroje se označují červenou barvou.

Složení a vlastnosti vybraných druhů slinutých karbidů jsou uvedeny v tabulce 3 a doporučené použití slinutých karbidů v tabulce 4. [2]

| Označení | Složení [%] |          |    | Měrná hmotn. [g. cm <sup>-3</sup> ] | Tvrdost [HV] | Pevnost v ohybu [MPa] | Pevnost v tlaku [MPa] | Modul pružnosti v tahu [MPa] | Tepelná vodivost [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ] | Kof. dél. roztažnosti [10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ] |
|----------|-------------|----------|----|-------------------------------------|--------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|--|---|
|          | WC          | TiC+ TaC | Co |                                     |              |                       |                       |                              |  |   |
| P01      | 30          | 64       | 6  | 7,2                                 | 1800         | 750                   | 3500                  |                              |  |   |
| P10      | 63          | 28       | 9  | 10,7                                | 1600         | 1300                  | 4600                  | 530 000                      | 29   | 6,5   |
| P20      | 76          | 14       | 10 | 11,9                                | 1550         | 1500                  | 4800                  | 540000                       | 34   | 6,0   |
| P30      | 82          | 8        | 10 | 13,1                                | 1500         | 1700                  | 5000                  | 560000                       | 59   | 5,5   |
| P40      | 75          | 12       | 13 | 12,7                                | 1400         | 1900                  | 4900                  | 560000                       | 59   | 5,5   |
| P50      | 68          | 15       | 17 | 12,5                                | 1300         | 2100                  | 4000                  | 560000                       | 54   |   |
| M10      | 74          | 10       | 6  | 13,1                                | 1750         | 1350                  | 5000                  | 560000                       | 50   | 5,5   |
| M20      | 72          | 10       | 8  | 13,4                                | 1550         | 1600                  | 5000                  | 560000                       | 63   | 5,5   |
| M30      | 71          | 10       | 9  | 14,4                                | 1450         | 1800                  | 4800                  | 560000                       | 63   | 5,5   |
| M40      | 79          | 6        | 15 | 13,6                                | 1300         | 2100                  | 4400                  | 560000                       | 67   | 6,0   |
| K01      | 92          | 4        | 4  | 15                                  | 1800         | 1200                  | 5900                  | 560000                       | 84   | 4,5   |
| K10      | 92          | 2        | 6  | 14,8                                | 1600         | 1500                  | 5700                  | 560000                       | 80   | 5,0   |
| K20      | 93          | 1        | 6  | 14,8                                | 1550         | 1700                  | 5200                  | 560000                       | 80   | 5,0   |
| K30      | 90          | 1        | 9  | 14,4                                | 1450         | 1900                  | 4700                  | 560000                       | 71   | 5,3   |
| K40      | 87          | 1        | 12 | 14,2                                | 1300         | 2100                  | 4500                  | 560000                       | 67   | 5,5   |

Tab. 3. Složení a vlastnosti vybraných druhů slinutých karbidů

| Označení podle ISO | Doporučená použití pro  |   |
|--------------------|---|---|
|                    | soustružení   | frézování   |
| P 01 – P 15        | Soustružení načisto, vyvrtávání oceli a ocelolitiny.<br>Obrábění vyššími řeznými rychlostmi, s malými průřezy třísky a nepřerušovaným řezem.<br>Vysoká tuhost nástroje.   |   |
| P 10 – P 20        | Soustružení načisto, vyvrtávání oceli a ocelolitiny.<br>Obrábění vyššími a středními rychlostmi s malými průřezy třísek.<br>Rovnoměrná hloubka a nepřerušovaný řez.   |   |
| P 25 – P 35        | Soustružení oceli a ocelolitiny. Obrábění výkovků a odlitků s nečistým povrchem.<br>Obrábění středními a nižšími řeznými rychlostmi s nerovnoměrnou hloubkou s přerušovaným řezem.<br>Střední a větší průřezy třísek.   | Frézování oceli a ocelolitiny středními a nižšími rychlostmi, středními průřezy třísek při méně příznivých podmínkách obrábění.<br>Vysoká houževnatost a odolnost proti opotřebení.                                 |
| P 30 – P 50        | Soustružení oceli a ocelolitiny. Obrábění při nízkých řezných rychlostech a velkých průřezech třísky.<br>Pro hrubování obrobků s nerovnoměrnou hloubkou třísky a nečistým povrchem za ztížených podmínek.   | Frézování oceli a ocelolitiny středními až nižšími rychlostmi, středními a většími průřezy třísek při horších podmínkách.<br>Vysoká houževnatost.   |
| M 10 – M 20        | Soustružení oceli a ocelolitiny, manganových ocelí, austenitických ocelí a temperované litiny a žáruvzdorných slitin.<br>Obrábění s plynulým iu přerušovaným řezem, střední i nižší rychlostí s většími průřezy třísek. Vysoká houževnatost a odolnost proti opotřebení.  | Frézování oceli, ocelolitiny, austenitických ocelí, temperované litiny a žáruvzdorných slitin střední a nižší řeznou rychlostí.<br>Vysoká houževnatost, dobrá odolnost proti opotřebení.                            |
| K 05 – K 10        | Soustružení, vrtání a vyvrtávání šedé litiny, tvrzené litiny, kalených ocelí, hliníkových slitin s vyšším obsahem křemíku, barevných kovů, dřeva a umělých hmot.<br>Obrábění při řezných vyšších rychlostech a malých průřezech třísky.<br>Vyžaduje vysokou tuhost stroje.  |   |
| K 10 – K 20        | Soustružení šedé litiny, temperované litiny, automatových ocelí, kalené oceli, hliníkových slitin s vyšším obsahem křemíku, barevných kovů, dřeva a umělých hmot.<br>Obrábění při vyšších a středních rychlostech malých a středních průřezech třísky.<br>Vhodný pro obrobky s nečistým povrchem a pro přerušovaný řez. | Frézování nelegované šedé litiny, temperované litiny, automatové oceli a lehkých barevných kovů při středních a vyšších řezných rychlostech, malými a středními průřezy třísek.<br>Vysoká odolnost proti opotřebení |

Tab. 4. Doporučené použití slinutých karbidů bez povlaku [3]

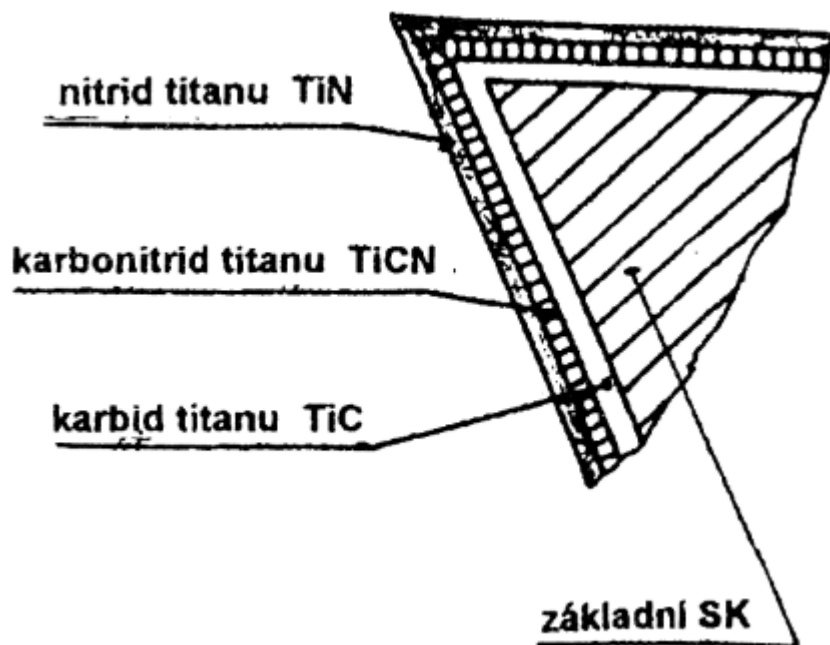
### 2.3.2 Povlakované slinuté karbidy

Od řezných strojů ze slinutého karbidu se vyžaduje, aby vykazovaly co největší otěruvzdornost a současně i velkou houževnatost. Ideálním druhem by byla taková řezná destička, která by měla tvrdý otěruvzdorný povrch a houževnaté jádro. Tomuto požadavku vyhovují vyměnitelné destičky ze slinutého karbidu s tvrdými povlaky karbidu titanu TiC, nitridu titanu TiN nebo oxidu hlinitého  $Al_2O_3$ . Povlaky mohou být jedno – nebo vícevrstvé, s jedním nebo více komponenty.

**Jednovrstvé povlaky** jsou nejčastěji tvořeny TiC nebo TiCN, případně TiN. Tloušťka jednovrstvých povlaků dosahuje až  $13\mu m$ .

**Vícevrstvé povlaky** představují dvě, tři a více vrstev. Jako první jsou na základní slinutý karbid obvykle nanášeny vrstvy s dobrou přilnavostí k podkladu, které však mají relativně nižší odolnost proti opotřebení. Jako poslední jsou nanášeny vrstvy, které mají dobrou přilnavost k předchozí vrstvě a současně vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení.

Jednotlivé vrstvy jsou obvykle řazeny od podkladu k povrchu v tomto pořadí: TiC –  $Al_2O_3$ , TiC – TiN, TiC – TiCN – TiN, TiC –  $Al_2O_3$  – TiN. [2]



Obr. 6. Třívrstvý povlak břítu – příklad [2]

Povlakované SK nachází široké uplatnění pro soustružení, vrtání a frézování převážně části strojirenských materiálů, včetně těžkoobrobitelných. Odhaduje se, že více než 75% sou-



stružnických operací a asi 40 % frézovacích operací je v současné době realizováno nástroji s povlakovanými SK – viz tab 5. [2]

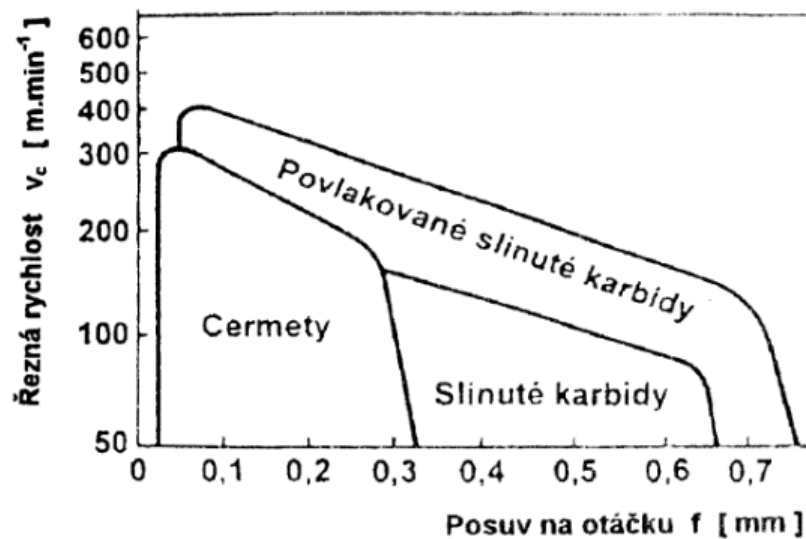
| Označení podle ISO | Doporučená použití pro  |  |
|--------------------|---|--|
|                    | soustružení   | frézování  |
| P 10 – P 20        | Soustružení načisto oceli a ocelolitiny.<br>Obrábění vyššími řeznými rychlostmi při rovnoměrné hloubce třísky nižších a středních průřezech třísky.                                     |  |
| P 35 – P 30        | Soustružení oceli, ocelolitiny, temperované litiny, nerez ocelí.<br>Obrábění vyššími a středními rychlostmi při proměnlivé hloubce a přerušovaném řezu.                                 | Frézování ocel, ocelolitiny, korozivzdorných ocelí a temperované litiny při běžných pracovních podmínkách středními a vyššími průřezy třísek.<br>Vysoká odolnost proti opotřebení. |
| M 15 – M 20        |   | Frézování ocel, ocelolitiny, korozivzdorných ocelí a šedé litiny nižšími až středními rychlostmi při méně stabilních podmínkách při obrábění.<br>Vysoká houževnatost.              |
| P 30 – P 40        | Soustružení oceli, ocelolitiny a ušlechtilých ocelí.<br>Obrábění středními řeznými rychlostmi při nerovnoměrné hloubce třísky s přerušovaným řezem.<br>Střední až velké průřezy třísek. |  |

Tab. 5. Doporučené použití povlakovaných slinutých karbidů [3]

## 2.4 Cermety

Cermet je řezný materiál obsahující tvrdé částice (TiC, TiN, TiCN, TaN) v kovovém pojivu (Ni, Mo, Co), který je vyráběn práškovou metalurgií. Název je tvořen počátečními písmeny slovního spojení **CER**amic/**MET**al a vyjadřuje označení keramických částic v kovovém pojivu.

Větší obsah TiC způsobuje vysokou tvrdost a tím i větší odolnost proti deformaci. Tyto materiály však nejsou tak houževnaté jako slinuté karbidy, a proto se používají především pro dokončovací operace do řezné rychlosti cca  $360 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  – obr. 7. V praxi jsou mezi cermety počítány materiály na bázi karbidu titanu, nitridu nitanu a karbonitridu. [2]



Obr. 7. Oblasti základních řezných podmínek při soustružení běžných ocelí – SK, povlakované SK a cermety

Tvrдость cermetů je přibližně srovnatelná se slinutými karbidy, houževnatost je nižší. Pevnost slinutých karbidů je o 15 – 25 % vyšší než u cermetů. Odolnost proti teplotním šokům je u cermetů nižší, a proto je omezeno jejich použití při přívodu řezné kapaliny.

Nástroje osazené cermety jsou vhodné pro obrábění ocelí, litiny, lité oceli, neželezných kovů a snadno obrobitelných slitin. Mohou pracovat při vyšších řezných rychlostech než slinuté karbidy nebo povlakované slinuté karbidy. Používají se ve formě břitových destiček pro soustružení, řezání závitů a frézování. [2]

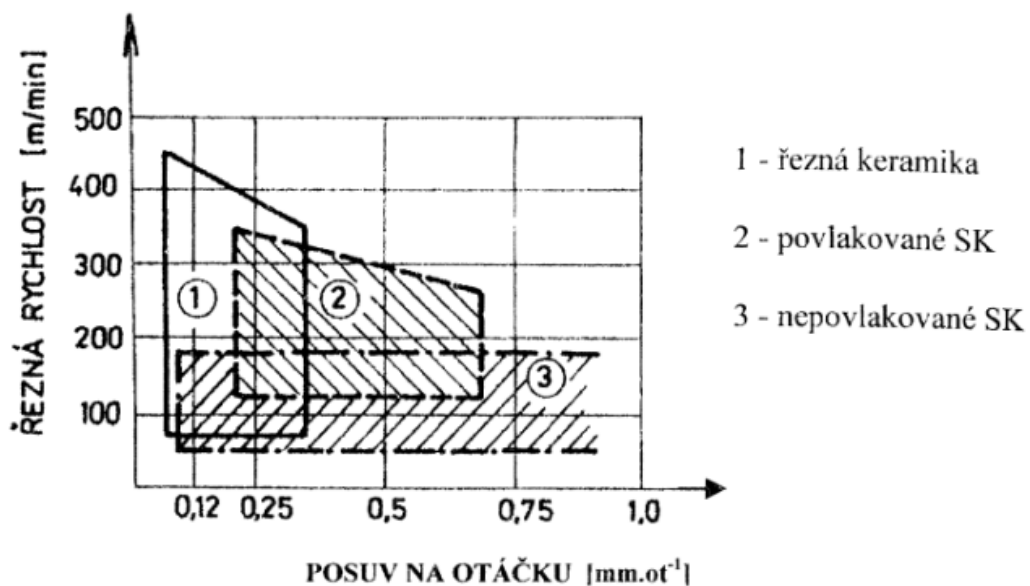
## 2.5 Keramické řezné materiály

Jsou to slinuté kombinované materiály a lze je rozdělit do dvou základních skupin: keramické materiály na bázi kysličníku hlinitého nebo nitridu křemičitého.

Základní složkou keramických řezných materiálů na bázi kysličníku hlinitého je elektrickou cestou vyrobený korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), který je jedním z nejtvrdějších známých materiálů. Jeho nevýhodou je křehkost, proto se do keramických řezných materiálů pro zvýšení jejich houževnatosti přidávají nikl, molybden, chrom a také karbidy titanu, molybdenu a wolframu.

Řezivost keramických materiálu je dána přímo tvrdostí korundu, případně přimíslených karbidů. Tepelné zpracování za účelem zvýšení tvrdosti se neprovádí, keramické řezné materiály mají vysokou odolnost proti otěru a snášejí teploty 1200°C i vyšší. Jejich podstatnou výhodou je relativně nízká cena.

Zlepšení mechanických vlastností keramických destiček, zejména pevností v tlaku a ohybu, zvýšení tvrdosti při vysokých teplotách, odolnosti proti otěru, bylo dosaženo jednak jemnější strukturou čisté korundové keramiky, jednak výrobou keramiky směsné, kde přídavek karbidu titanu zvyšuje celkovou pevnost v ohybu a odolnost proti náhlým změnám teploty. Hlavní uplatnění keramických nástrojů je při obrábění šedé litiny, tvárné litiny, cementačních ocelí, nástrojových a rychlořezných ocelí, slitin odolných proti žáru a zčásti i ocelí. Obecně lze uvést, že pevnost, tvrdost a odolnost proti tepelným rázům řezné keramiky závisí na hustotě, velikosti a rozdělení zrn tak, že zlepšení uvedených parametrů nastává při zvyšující se hustotě a snižující se velikosti zrn. [3]



Obr. 8. Oblasti ekonomického použití řezných podmínek [3]

Řezná keramika se dělí zhruba na tři základní skupiny podle chemického složení, vlastností a doporučeného použití. Jedná se o tzv. čistou keramiku (bílou), směsnou keramiku (černou) a keramiku na bázi nitridu křemíku.

**Čistá keramika** obsahuje až 99,9% kysličníku hlinitého  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Je doporučována většinou pro dokončovací soustružení šedé litiny, uhlíkových a nízkolegovaných ocelí při použití řezné rychlosti přesahující 100  $[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$ . Pro zlepšení řezivosti bílé keramiky se stále častěji používá různých přísad, nejčastěji kysličníku zirkonu  $\text{ZrO}_2$  – až do 20%. Tak se pů-

vodní čistá keramika stále více nahrazuje tzv. polosměsnou keramikou, obsahující navíc další přísady.

**Směsná keramika** obsahuje vedle korundu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  přísadu 20-40% karbidu titanu TiC. Tento materiál má v porovnání s čistou keramikou větší odolnost proti teplotním a mechanickým rázům. Je doporučována pro frézování šedé litiny a oceli, pro soustružení na čisto a jemné soustružení ocelí cementačních, zušlechtěných a tvrdé litiny.

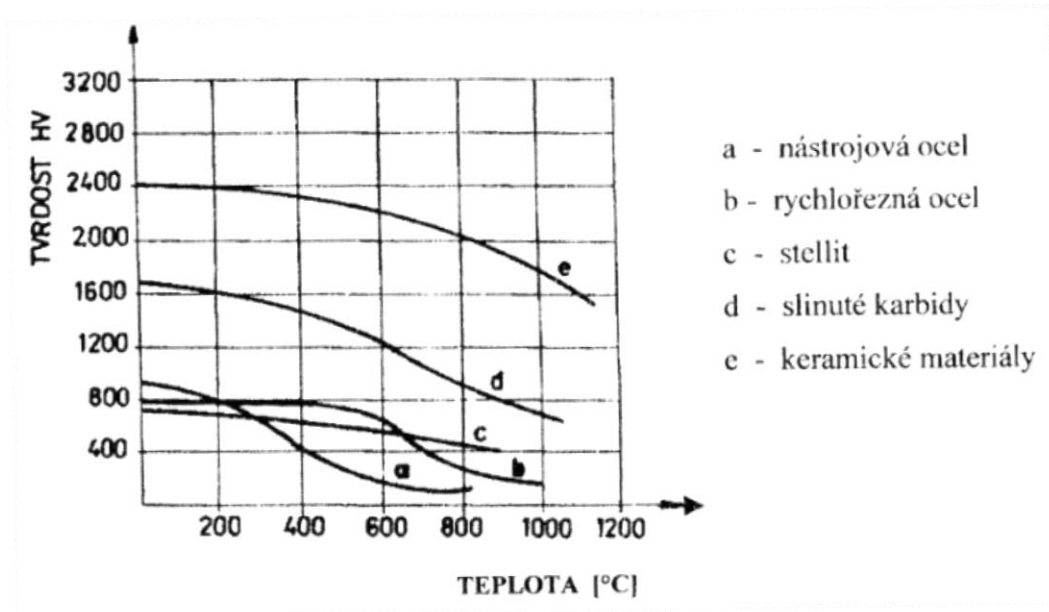
**Keramika na bázi nitridu křemíku** má relativně vysokou odolnost proti mechanickému porušení břitů a doporučuje se pro dokončování i hrubování šedé litiny, litiny s hrubou licí kůrou. Je vhodná i pro přerušované řezy, odolná vůči teplotním rázům, vhodná pro soustružení žárovečných slitin na bázi niklu a též pro kolísající hloubku řezu. [1]

**Vyztužená keramika** představuje relativně nový vývojový produkt. Nazývá se také keramika vyztužená viskerem – název je odvozen od vláken krystalu, kterému se říká visker. Tyto viskery mají průměr pouze cca  $1\ \mu\text{m}$  a délku více než  $20\ \mu\text{m}$ , jsou z karbidů křemíku a mají velmi vysokou pevnost. Vyměnitelné břitové destičky z vyztužené keramiky vykazují zvýšenou houževnatost, pevnost v tahu a odolnost proti tepelnému šoku. Podíl viskou v řezném materiálu činí asi 30%. Barva hotových destiček je zelená.

Vyztužená keramika je doporučována pro obrábění žáruvzdorných slitin, kalené oceli, šedé litiny a zejména při obrábění přerušovaným řezem. [2]

Obecně je možno zhodnotit keramické řezné materiály jako materiály s vysokou odolností vůči abrazivnímu opotřebení, odolností vůči chemickým vlivům a vysokou odolností proti poklesu tvrdosti při vyšších teplotách vzhledem k ostatním řezným materiálům jak je zřejmé z obrázku 9.

Hlavní technologické podmínky úspěšného použití řezné keramiky jsou stabilní, přesně definované pracovní podmínky obrábění, dostatečně výkonné stroje s vysokými otáčkami včetně, vysokou tuhostí a přesností chodu včetně, zakrytování pracovního prostoru stroje před odletujícími třískami, mechanizovaný odběr třísek při provozu (vynášení dopravníky), obrobky tuhé s tuhým upnutím atd. Z rozboru těchto potřebných vlastností lze dojít k závěru, že tyto podmínky právě splňují moderní automatizované obráběcí stroje. [1]



Obr. 9. Závislost tvrdosti řezných materiálů na teplotě [3]

## 2.6 Supertvrdé řezné materiály

Do skupiny perspektivních řezných materiálů, které jsou v současné době ve světě realizovány, patří mimo řeznou keramiku další dva druhy syntetický řezných materiálů:

- Polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB)
- Polykrystalický diamant (PD)

O tom, v jakém rozsahu bude možno použít těchto vývojových řezných materiálů při jejich výborných řezných vlastnostech ve spojení s nástroji NC stroje, ukáže nejbližší budoucnost. Jejich hlavní nevýhodou v současné době je jejich vysoká pořizovací cena.

Diamant a kubický nitrid bóru představují dnes nejtvrďší látky. Proto se tyto látky a dále všechny materiály, které tyto komponenty obsahují, označují jako supertvrdé materiály.

V současné době do této skupiny supertvrдых materiálů patří zejména:

- Diamantové prášky
- Prášky kubického nitridu bóru
- Brousící kotouče obsahující tyto komponenty
- Diamantové brousící pasty
- Řezné nástroje osazené segmenty PKNB nebo PD
- Orovnávače s práškovými komponenty kubického nitridu bóru nebo diamantu
- Kompozitní materiály

V této části jsou dále charakterizovány PKNB a PD jako segmenty využívané na vyměnitelných destičkách s definovanou geometrií břitu. [1]

### 2.6.1 Polykrystalický kubický nitrid bóru

Je to zvláště tvrdý řezný materiál, jehož tvrdost se blíží tvrdosti diamantu. Vyrábí se při vysokých teplotách a tlacích, při nichž se dosahuje spojení kubických krystalů bóru s keramickým nebo kovovým pojivem. Neuspořádané částice tvoří velmi hustou polykrystalickou strukturu. Krystal kubického nitridu bóru je velmi podobný krystalu syntetického diamantu.

PKNB vykazuje vysokou tvrdost za tepla i při vysokých teplotách (2000°C), velkou odolnost proti abrazivnímu opotřebení a při obrábění má dobrou chemickou stabilitu. Segmenty z PKNB tvoří řeznou část břitové vyměnitelné destičky ze slinutého karbidu. Jsou však také dodávány monolitické vyměnitelné destičky z PKNB.

Nasazení řezných destiček z PKNB se předpokládá při soustružení tvrdých a žáruvzdorných materiálů, dále kalené oceli, nežíhané tvrdé litiny, nástrojů z kalených nástrojových ocelí, kobaltových a niklových slitin atp. Výhodné bude i jejich nasazení jako náhrady za broušení při dokončovacím obrábění, zejména z hlediska integrity takto obrobeného povrchu. [2]

### 2.6.2 Polykrystalický diamant

Nejtvrdším známým materiálem je přírodní monokrystalický diamant, jehož tvrdosti syntetický polykrystalický diamant PD téměř dosahuje. Jemné krystaly diamantu jsou spojovány slinováním za vysokých teplot a tlaků. Poloha krystalů je nahodilá a v žádném směru nevytváří místa, která by mohla být zdrojem lomu. Malé břity z PD jsou pevně zakotveny na vyměnitelné břitové destičce ze slinutého karbidu, která jim zaručuje odolnost proti tepelným a rázovým šokům. Trvanlivost břitu je mnohonásobně vyšší než u slinutých karbidů.

PD je doporučen pro obrábění všech neželezných kovů a nekovových materiálů jako např.: sklolaminátů, výlisků plněných abrazivními plnidly, tvrdého kaučuku, grafitu, skla atd. Z kovových materiálů je vhodný zejména pro obrábění slitin hliníku, mědi a jejich slitin, obrábění titanu a jeho slitin. Perspektivní je jeho nasazení v oblasti obrábění dřeva. Je vhodný pro soustružení, frézování a vrtání. [2]

## 2.7 Očekávaný vývoj řezných materiálů

Další vývoj řezných materiálů je ovlivňován snahou o jeho široké použití a výzkumem nových obráběcích materiálů. Nové požadavky na řezné materiály kladou zejména obráběné materiály s nižší měrnou hmotností a vysokou pevností.

Ve vývoji obráběcích strojů, mimo soustruhů, převažují menší stroje s nižším příkonem, zaměřené na obrábění polotovarů s minimálními přídávky. U soustruhů stále převládají snahy o zvýšení tuhosti a instalaci vysokých příkonů pohonných jednotek.

Nejpoužívanějším řezným materiálem zůstanou pravděpodobně i nadále povlakované sli nuté karbidy s tím, že bude snaha především zdokonalit proces slinování a povlakování. U keramických materiálů není rovněž vývoj ukončen, zvláště u kombinace keramiky a různých výztužných vláken (viskerů). Očekává se, že keramika na bázi oxidu hlinitého nebude svůj podíl využití zvyšovat, protože její vývoj je pravděpodobně ukončen. Možnosti dalšího vývoje jsou ale u nitridované keramiky. Také cermetům bude věnována pozornost, zejména pro jejich vhodnost k obrábění při malých úběrech a vysokých řezných rychlostech.

Perspektivním se jeví řezný materiál z rychlořezné nebo zušlechtilé oceli, který má silnou povrchovou vrstvu nitridu titanu, tzv. coronit. Je vhodný zejména pro stopkové frézy. Syntetický diamant a polykrystalický kubický nitrid bóru bude mít nadále použití při speciálních případech obrábění. Také povlakování vhodných komponentů diamantem je jedním z perspektivních směrů rozvoje oproti povlakování kubickým nitridem bóru. Je to ale zatím příliš nákladné a nepřináší očekávané výsledky. [1]

### 3 KVANTIFIKACE ENERGETICKÝCH POMĚRŮ PŘI ŘEZÁNÍ

Řezný proces je v reálném obráběcím systému charakterizován celou řadou technologických veličin. K základním technologickým charakteristikám patří geometrické a silové veličiny, práce a výkon řezání, teplo a teplota řezání a kmitání obráběcího systému. [2]

#### 3.1 Geometrické veličiny řezného procesu

K základním geometrickým veličinám charakterizujícím řezný proces patří kinematické veličiny, posuv, ostří nástroje, záběr, průřez třísky, úběr a výkonnost obrábění. [2]

##### 3.1.1 Kinematické veličiny

Kinematiku řezného procesu charakterizují veličiny, jako hlavní pohyb, směr hlavního pohybu, řezná rychlost  $v_c$ , posuvový pohyb, směr posuvového pohybu, posuvová rychlost  $v_f$ , řezný pohyb, směr řezného pohybu, rychlost řezného pohybu  $v_e$ .

Uvedené veličiny jsou definované a měřené jako okamžité veličiny v určitém okamžiku, pokud není specifikováno jinak. Pokud se uvádějí jejich střední hodnoty, je třeba určit příslušný časový interval. V případě přerušovaného ostří se každá jeho část může považovat za samostatné ostří, nebo jako celek. [2]

Např.: pro podélné soustružení válcové plochy bude platit:

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

$$v_f = 10^3 \cdot f \cdot n \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (4)$$

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (5)$$

$v_c$  – řezná rychlost

$v_f$  – posuvová rychlost

$v_e$  – rychlost řezného procesu

$D$  – průměr obráběné plochy [mm]

$n$  – otáčky obrobku [ $\text{min}^{-1}$ ]

$f$  – posuv na otáčku obrobku [mm]

##### 3.1.2 Posuv

Posuv  $f$  se definuje jako přemístění nástroje vzhledem k obrobku ve směru posuvového pohybu. Toto přemístění může být vztaženo k jedné otáčce nástroje nebo obrobku, k jed-



nomu zdvihu resp. dvojdzvihu nástroje nebo obrobku. V případě vícebřitého nástroje může být posuv vztažený na jeden zub nástroje. [2]

Např.: pro frézování rovinné plochy válcovou frézou bude platit:

$$f = z \cdot f_z \text{ [mm]} \quad (6)$$

$f$  - posuv na otáčku nástroje [ mm ]

$f_z$  - posuv na zub [ mm ]

$z$  - počet zubů nástroje [ - ]

### 3.1.3 Ostří nástroje

*Délka aktivního osíří*  $l_{sa}$  je skutečná délka aktivního ostří, která bezprostředně realizuje řezání.

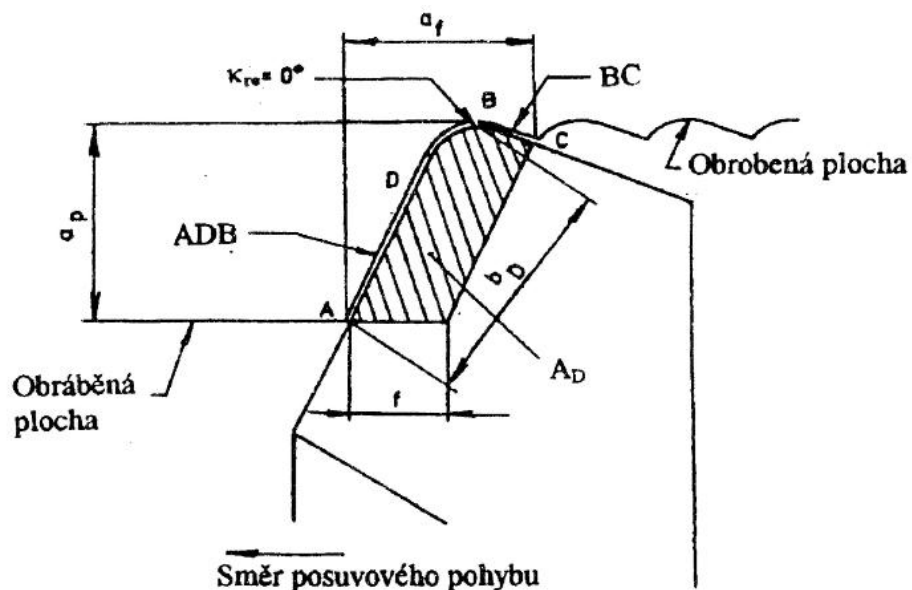
*Hlavní bod ostří D* je referenční bod na aktivním ostří, používaný ke stanovení veličin jako profil aktivního ostří a rozměr třísky. Doporučuje se, aby bod D byl umístěn tak, aby rozděloval hlavní ostří na dvě stejné části.

*Rovina řezu  $P_D$*  je rovina procházející hlavním bodem ostří D a je kolmá na směr pohybu tohoto bodu.

*Tvar aktivního ostří* je křivka vytvořená projekcí aktivního ostří do roviny řezu  $P_D$ .

*Délka profilu aktivního ostří  $l_{saD}$*  je délka průmětu aktivního ostří do roviny řezu  $P_D$ .

Identifikace veličin vztažených k ostří nástroje je konkretizována pro případ podélného soustružení - obr. 10. [2]



Obr. 10. Geometrické veličiny vztažené k ostří nástroje – podélné soustružení – pohled v rovině řezu  $P_D$  [2]

ADB - délka aktivního ostří  $l_{sa}$

BC - délka vedlejšího ostří

ADBC - délka profilu aktivního ostří  $l_{saD}$

$a_f$  - záběr ostří ve směru posuvu

$a_p$  - šířka záběru ostří

$A_d$  - jmenovitá plocha řezu

### 3.1.4 Záběr ostří

*Záběr ostří  $a$*  je definovaný a měřený jako vzdálenost mezi dvěma rovinami, které jsou obě kolmé na zvolený směr měření a procházejí přes dva body na aktivním ostří umístěné tak, že vzdálenost mezi těmito rovinami je maximální.

*Šířka záběru ostří  $a_p$*  je záběr ostří měřený kolmo na pracovní rovinu  $P_{fe}$  procházející hlavním bodem ostří D.

*Pracovní záběr ostří  $a_e$*  je záběr ostří měřený ve směru rovnoběžném s pracovní rovinou  $P_{fe}$  a kolmém na směr posuvu v hlavním bodě ostří D.

*Záběr ostří ve směru posuvu  $a_f$*  je záběr ostří ve směru posuvu, měřený v referenčním bodě ostří D. [2]

### 3.1.5 Průřez třísky a jeho rozměry

*Průřez třísky (plocha řezu)* je určen jako vrstva obráběného materiálu, která má být odebraná působením ostří nástroje. Adekvátně k „průřezu třísky“ lze použít pojem „plocha řezu“ nebo pojem „plocha průřezu třísky“.

*Jmenovitý průřez třísky  $A_D$*  je plocha průřezu třísky v rovině řezu  $P_d$  v určitém čase [2]

Pro praktické účely přibližně platí:

$$A_D = a_p \cdot f_z \cdot \sin\varphi \text{ [mm}^2\text{]} \quad (7)$$

Pro podélné soustružení válcové plochy při  $r_\varepsilon = 0$  bude  $\varphi = 90^\circ$ , takže:

$$A_D = a_p \cdot f \text{ [mm}^2\text{]} \quad (8)$$

*Celkový průřez třísky  $A_{dtot}$*  se stanoví při použití vícebřitých nástrojů jako součet jednotlivých ploch průřezu třísek vytvářených aktivními břity současně:

$$A_{dtot} = \sum_i A_{Di} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (9)$$

$i < 1, n_z >$ , kde  $n_z$  je počet současně aktivních břitů nástroje.

*Jmenovitá šířka třísky  $b_D$*  je vzdálenost mezi dvěma krajními body hlavního ostří, měřená v rovině řezu  $P_D$  v určitém čase. Pro soustružení válcové plochy při  $r_\varepsilon = 0$  je

$$b_D = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \text{ [mm]} \quad (10)$$

*Jmenovitá tloušťka třísky  $h_D$*  je určena poměrem

$$h_D = \frac{A_D}{b_D} \text{ [mm]} \quad (11)$$

Pro soustružení válcové plochy při  $r_\varepsilon = 0$  a  $\varphi = 90^\circ$  bude  $h_D = f \cdot \sin \kappa_r$ , [ 2 ]

### 3.1.6 Úběr a jeho rozměry

*Úběr* je vrstva materiálu odebraná z obrobku při jednom průchodu řezného nástroje. Při soustružení se úběr vyjádří na jednu otáčku obrobku, při vrtání a frézování na jednu otáčku nástroje.

*Plocha průřezu jednoho úběru  $A_T$*  je skutečná plocha průřezu úběru promítnutá do kolmé roviny ve směru řezné rychlosti. [ 2 ]

Např. pro soustružení válcové plochy o průměru  $D$  bude:

$$A_T = \pi \cdot a_p \cdot (D - a_p) \text{ [mm}^2\text{]} \quad (12)$$

### 3.1.7 Výkonnost obrábění

Výkonnost obrábění  $Q$  se vyjádří objemem materiálu odebraného za jednotku času v určitém čase:

$$Q = A_T \cdot v_f \text{ [cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}\text{]} \quad (12)$$

## 3.2 Řezné síly

Řezný proces se realizuje jako výsledný proces působení složité silové soustavy mezi nástrojem a obrobkem. Identifikace této silové soustavy umožňuje optimalizaci řezných podmínek s ohledem na průběh obrábění a stabilitu břitu nástroje. [2]

### 3.2.1 Celková řezná síla

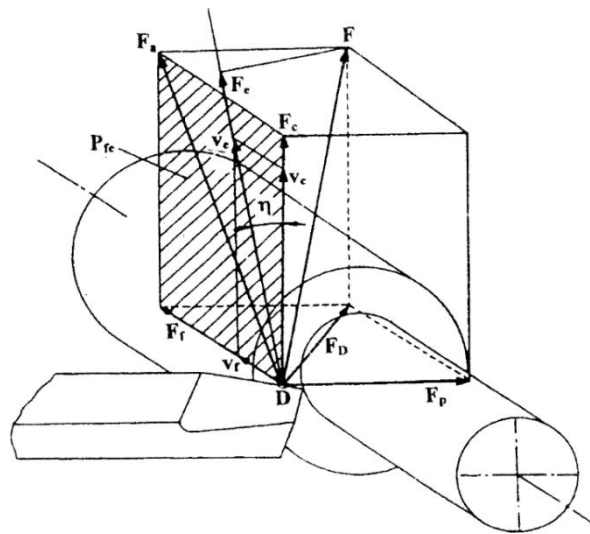
Celková řezná síla vyvolaná působením řezné části nástroje na obrobek se označí symbolem  $F$ . Pro další úvahy se předpokládá, že vektor celkové řezné síly  $F$  je umístěný do jed-

noho hlavního bodu ostří nástroje D. Všechny roviny a směry potřebné k identifikaci celkové řezné síly  $F$  jsou definovány v tomto hlavním bodě ostří D.

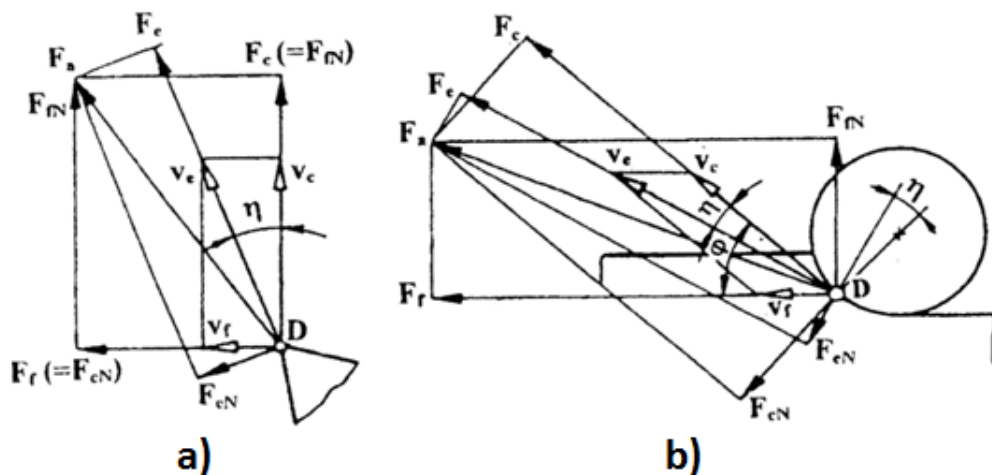
Pro analýzu silových poměrů řezného procesu se celková řezná síla  $F$  rozkládá do příslušných geometrických složek v závislosti na záměrech takové analýzy. [2]

### 3.2.2 Geometrický rozklad celkové řezné síly do směru řezné rychlosti a směru k němu kolmých

Geometrický rozklad celkové řezné síly  $F$  pro různé případy řezných procesů je naznačen na obr. 11, 12.



Obr. 11. Rozklad celkové řezné síly při podélném soustružení válcové plochy [2]



Obr. 12. Rozklad celkové řezné síly  $F$  v pracovní boční rovině  $P_{fe}$  [2]

a – soustružení při  $\phi=90^\circ$

b – rovinné frézování válcovou frézou s přímými zuby při  $\phi=90^\circ$  [2]

*Aktivní síla*  $F_a$  - obr.11 a 12 - je určena průmětem celkové řezné síly  $F$  do pracovní boční roviny  $P_{fe}$ .

*Pasivní síla*  $F_p$  - obr.11- je složka celkové řezné síly  $F$  kolmá na pracovní boční rovinu  $P_{fe}$  a na směr výslednice řezného pohybu.

Složky celkové řezné síly definované v pracovní rovině vztahující se ke směru výslednice řezného pohybu jsou:

*Pracovní síla*  $F_e$  - obr. 11 a 12 - je vyjádřena pravoúhlým průmětem celkové řezné síly  $F$  do směru řezného pohybu a je tudíž definována v pracovní boční rovině  $P_{fe}$ .

*Kolmá pracovní síla*  $F_{eN}$  - obr.12 - je složka pracovní síly  $F_e$  kolmá na vektor výsledného řezného pohybu v pracovní boční rovině  $P_{fe}$  :

$$F_a^2 = F_e^2 + F_{eN}^2 \quad (13)$$

*Složky celkové řezné síly definované v pracovní rovině, vztahující se ke směru hlavního pohybu, jsou:*

*Řezná síla*  $F_c$  - obr.11 a 12 - je složka celkové řezné síly  $F$  identifikovaná pravoúhlým průmětem do směru hlavního pohybu, tzn. do směru vektoru řezné rychlosti.

*Kolmá řezná síla*  $F_{cN}$  - obr.12 - je určena jako složka celkové řezné síly  $F$  kolmá na směr hlavního pohybu, definovaná v pracovní boční rovině  $P_{fe}$ .

$$F_a^2 = F_c^2 + F_{cN}^2 \quad (14)$$

Pro řeznou sílu  $F_c$  se odvodí měrná řezná síla  $k_c$  a řezná síla na jednotku šířky řezu  $F'_c$ .

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

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad [N \cdot mm^{-2}] = [MPa] \quad (15)$$

*Řezná síla na jednotku šířky řezu*  $F'_c$  je definována jako poměr řezné síly  $F_c$  a jmenovité šířky řezu  $b_D$ :

$$F'_c = \frac{F_c}{b_D} \quad [N \cdot mm^{-1}] \quad (16)$$

*Složky celkové řezné síly definované v pracovní rovině vztahující se ke směru posuvového pohybu, jsou:*

*Posuvová síla*  $F_f$  - obr. 11 a 12 - je dána průmětem celkové řezné síly  $F$  do směru posuvového pohybu.

*Kolmá posuvová síla*  $F_{fN}$  - obr. 12 - je určena složkou celkové síly  $F$ , kolmou na směr posuvového pohybu definované v pracovní boční rovině  $P_{fe}$ :

$$F_a^2 = F_f^2 + F_{fN}^2 \quad (17)$$

Pro řezný proces, kdy úhel posuvového pohybu  $\varphi = 90^\circ$  (soustružení, vrtání) je  $F_f \equiv F_{CN}$  a  $F_c \equiv F_{fN}$ . V tomto případě je

$$F_a^2 = F_f^2 + F_c^2 \quad (18)$$

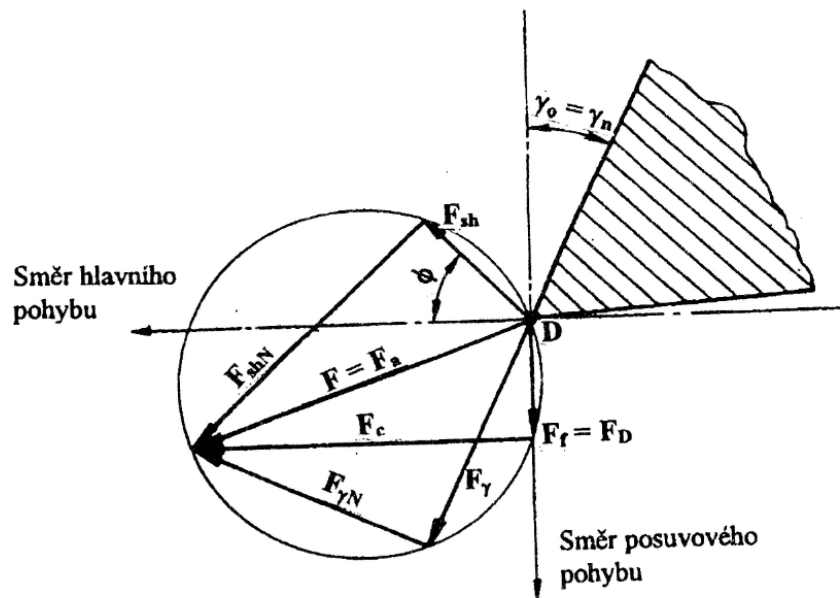
*Dimenzionální síla*  $F_D$  je složka celkové řezné síly  $F$  získaná jako kolmý průmět do roviny základní. [2]

$$F_D^2 = F_p^2 + F_{eN}^2 \quad (19)$$

$$F^2 = F_c^2 + F_D^2 \quad (20)$$

### 3.2.3 Geometrický rozklad celkové řezné síly v zjednodušeném dvourozměrném modelu ortogonálního řezání

Rozklad celkové řezné síly se provede pro předpoklad přímého aktivního ostří pro  $\kappa_r = 90^\circ$  a  $\lambda_s = 0$ . Jednotlivé složky se řeší na základě dvojrozměrného modelu v pracovní boční rovině  $P_{fe}$  - obr.13 [2]



Obr. 13. Rozklad celkové řezné síly  $F$  při ortogonálním řezání – pohled na pracovní boční rovinu  $P_{fe}$  v hlavním bodě ostří  $D$  [2]

*Tangenciální síla v rovině stříhu*  $F_{sh}$  je určena jako složka celkové řezné síly  $F$ , získaná průmětem do roviny stříhu  $P_{sh}$ .

Normálová síla v rovině stříhu  $F_{shN}$  je složka celkové řezné síly  $F$ , kolmá na rovinu stříhu  $P_{sh}$ .

Tangenciální síla působící na čele nástroje  $F_y$  je složka celkové řezné síly  $F$ , získaná jako kolmý průmět na čelo nástroje  $A_y$  v pracovní boční rovině  $P_{fe}$ .

Normálová síla čela nástroje  $F_{yN}$  je složka celkové řezné síly  $F$ , kolmé na čelo nástroje  $A_y$  v pracovní rovině  $P_{fe}$ . [2]

### 3.2.4 Výpočet složek celkové řezné síly

Výpočet vybraných složek celkové řezné síly je možné provést na základě empiricky vyšetřených závislostí. Např.: pro podélné soustružení válcové plochy se uvádí mocninové závislosti:

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad [N] \quad (21)$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \quad [N] \quad (22)$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad [N] \quad (23)$$

Konstanty  $C_{Fc}$ ,  $C_{Fp}$ ,  $C_{Ff}$  a exponenty  $x_{Fc}$ ,  $x_{Fp}$ ,  $x_{Ff}$ ,  $y_{Fc}$ ,  $y_{Fp}$ ,  $y_{Ff}$  jsou pro dané podmínky řezného procesu empiricky stanovené. Např.: pro soustružení oceli 12 050 nástrojem s břitovou destičkou SK se uvádí konkretizovaná závislost:

$$F_c = 2007 \cdot a_p^{0,98} \cdot f^{0,71} \quad [N] \quad (24)$$

Pro vypočtené síly  $F_c$ ,  $F_p$ ,  $F_f$  se celková řezná síla stanoví ze vztahu

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad [N] \quad (25)$$

Pro známou velikost měrné řezné síly  $k_c$  [ MPa ] je možné vypočítat řeznou sílu  $F_c$  na základě upraveného vztahu (15) s uvážením (11) :

$$F_c = k_c \cdot A_D = k_c \cdot h_D \cdot b_D \quad (26)$$

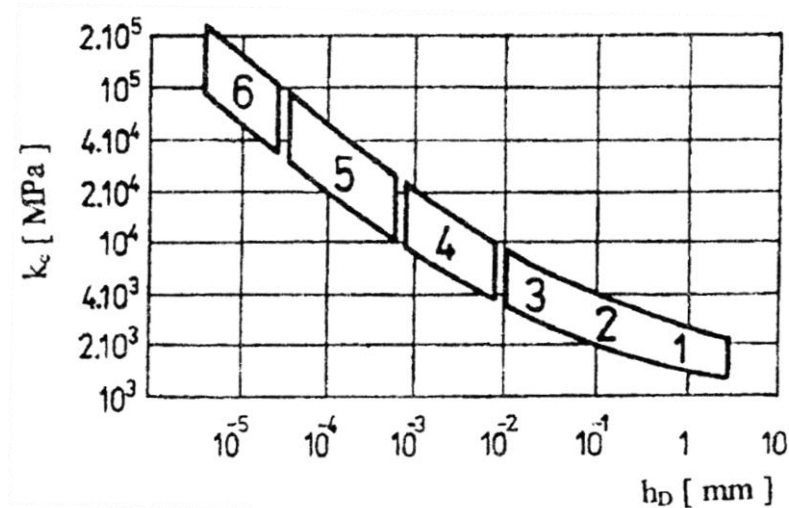
Měrná řezná síla  $k_c$  se výrazně mění v závislosti na obráběném materiálu, ale také se jmenovitou tloušťkou průřezu třísky  $h_D$ .

Empirická závislost  $k_c = f(h_D)$  má tvar:

$$k_c = \frac{C_{kc}}{h_D^{u_{kc}}} \quad [MPa] \quad (27)$$

$C_{kc}$ ,  $u_{kc}$  - empiricky stanovené konstanty.

Grafické znázornění funkce  $k_c = f(h_D)$  je pro různé řezné procesy uvedeno v grafu 7. [2]

Graf. 7. Závislost  $k_c=f(h_D)$  pro různé řezné procesy

1 – soustružení, 2 – vrtání, 3 – frézování, 4 – vystružování, 5 – broušení, 6 – lapování [2]

### 3.3 Práce a výkon řezání

Práce řezného procesu zahrnuje práci pružných a plastických deformací v oblasti tvoření třísky, práci tření třísky po čele nástroje, práci tření hřbetu nástroje po obrobené ploše a práci disperzní (souvisí s vytvářením nových povrchů).

**Práce řezání  $E_c$**  je práce potřebná na zajištění hlavního pohybu za účelem odebrání určitého množství materiálu obrobku:

$$E_c = \int_0^t F_c \cdot v_c \cdot dt \quad (28)$$

Pro soustružení válcové plochy bude mít poslední vztah konkretizovaný tvar:

$$E_c = F_c \cdot v_c \cdot t_p \quad [J] \quad (29)$$

$F_c$  - řezná síla [ N ]

$v_c$  - řezná rychlost [ m.min<sup>-1</sup> ]

$t_p$  - čas řezného procesu [ min ]

**Práce posuvu  $E_f$**  je práce potřebná na zajištění posuvového pohybu za účelem odebrání určitého množství materiálu:

$$E_f = \int_0^t F_f \cdot v_f \cdot dt \quad (30)$$



Pro soustružení válcové plochy bude mít poslední vztah konkretizovaný tvar:

$$E_f = F_f \cdot v_f \cdot t_p \quad [J] \quad (31)$$

$F_f$  - posuvová síla [ N ]

$v_f$  - posuvová rychlost [ m.min<sup>-1</sup> ]

$t_p$  - čas řezného procesu [ min ]

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

$$E_e = E_c + E_f \quad (32)$$

Pro soustružení válcové plochy bude po formální úpravě platit:

$$E_e = (F_c \cdot v_c + F_f \cdot v_f) \cdot t_p \quad [J] \quad (33)$$

*Měrná práce řezání*  $e_c$  [J. cm<sup>-3</sup>] - 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:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60} \quad [W] \quad (34)$$

$F_c$  - řezná síla [ N ]

$v_c$  - řezná rychlost [ m. min<sup>-1</sup> ]

*Výkon potřebný pro posuv*  $P_f$  se vyjádří jako součin posuvové síly  $F_f$  a rychlosti posuvu  $v_f$ :

$$P_f = \frac{F_f \cdot v_f}{60} \quad [W] \quad (35)$$

$F_f$  - posuvová síla [ N ]

$v_f$  - posuvová rychlost [ m. min<sup>-1</sup> ]

*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:

$$P_e = \frac{F_e \cdot v_e}{60} \quad [W] \quad (36)$$

$F_e$  - pracovní síla [ N ]

$v_e$  - rychlost řezného pohybu [ m. min<sup>-1</sup> ]

Měrný řezný výkon  $p_c$  [ $\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}$ ] se stanoví jako řezný výkon potřebný na odebrání jednotkového množství materiálu za jednotku času. [2]

### 3.4 Teplo a teplota řezání

#### 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  $Q_e \cong E_e$ .

Hlavní zdroje tepla jsou v oblasti plastických deformací při tvoření třísky, v oblasti tření třísky po čele nástroje a v oblasti tření hřbetu po obrobené ploše, takže:

$$Q_e = Q_{pd} + Q_\gamma + Q_\alpha \quad [\text{J}] \quad (37)$$

$Q_{pd}$  - teplo vzniklé v oblasti plastických deformací při tvoření třísky [ J ]

$Q_\gamma$  - teplo vzniklé v oblasti tření třísky po čele nástroje [ J ]

$Q_\alpha$  - teplo vzniklé v oblasti tření hřbetu nástroje po přechodové ploše obrobku [ J ]

Vzniklé teplo řezného procesu  $Q_e$  je odváděno do jednotlivých prvků obráběcího systému:

$$Q_e = Q_t + Q_o + Q_n + Q_{pr} \quad [\text{J}] \quad (38)$$

$Q_t$  - teplo odvedené třískou [ J ]

$Q_o$  - teplo odvedené obrobkem [ J ]

$Q_n$  - teplo odvedené nástrojem [ J ]

$Q_{pr}$  - teplo odvedené řezným prostředím [ J ]

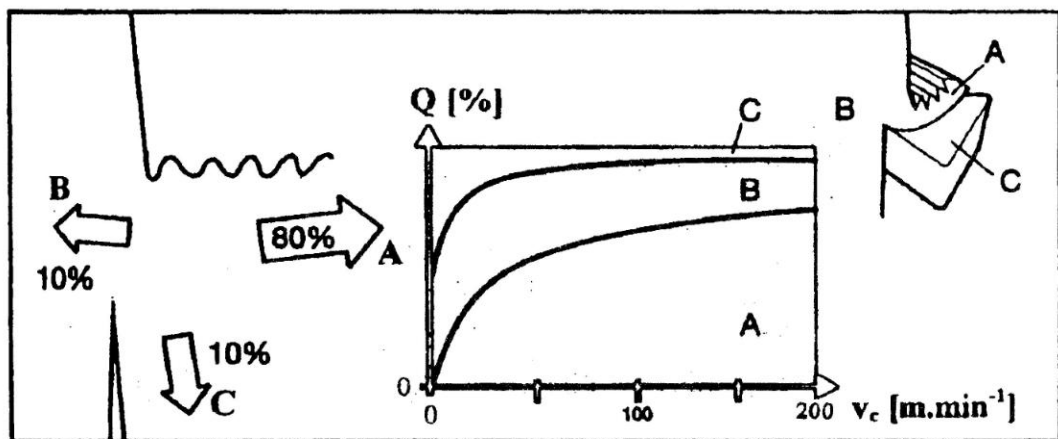
Podíl jednotlivých odváděných složek tepla řezného procesu do třísky, obrobku, nástroje a prostředí závisí na tepelné vodivosti materiálů obrobku a nástroje, na řezných podmínkách (především řezné rychlosti), řezném prostředí (způsobu chlazení a mazání) a na geometrii břitu řezného nástroje.

Největší část tepla vzniklého při obrábění je v ideálním případě odváděna ze zóny řezání třískou. Teplota třísky zatěžuje řezný nástroj jen tak dlouho, pokud je s ním v kontaktu. Největší teplo vzniká v rovině stříhu. Proto působí rozsah a jakost styku mezi třískou a nástrojem přímo na výkon. Malé mezní úhly roviny stříhu mohou, jako důsledek malého úhlu čela, zvýšit odvod tepla do obrobku. Podél zóny kluzu se mění menší množství energie na teplo. Stav tenké tavné zóny mezi třískou a nástrojem je ovlivňován kontinuálním váznutím materiálu třísky a jeho odstřihováním na čelní ploše nástroje.

Nasazením moderních břitových destiček je možné proces obrábění optimalizovat tak, aby byl přechod tepla do břitu minimalizován.

Teplu vznikající v oblasti hřbetu, kde se dráhy nástroje a opracovávaného obrobku rozdělují, by mělo být udržováno na co možná nejnižších hodnotách. Dostatečně velký úhel hřbetu a zamezení výrazného opotřebení hřbetu, které ve svém konečném efektu úhel hřbetu zmenšuje, jsou důležitými faktory. Nebereme-li je v potaz, vzniknou vysoké teploty, které mají za následek rychlý lom břitu.

Příklad rozdělení odváděného tepla vzniklého při obrábění je na obr.14 [2]

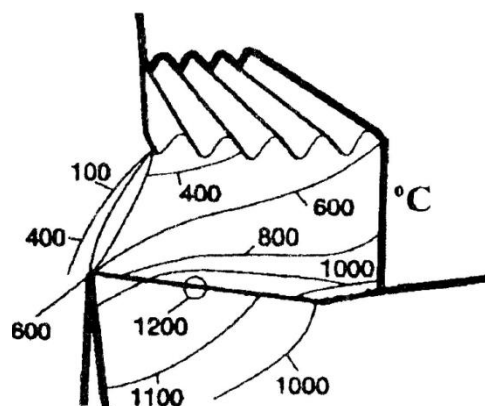


Obr. 14. Obecné rozdělení odváděného tepla při realizaci řezného procesu

A – tříška, B – obrobek, C – nástroj [2]

### 3.4.2 Teplota řezání

Teplota v zóně řezání je závislá hlavně na kontaktu třísky a nástroje, na velikosti řezných sil a třecích procesech mezi materiálem obrobku a břitem nástroje. Příklad teplotního pole obrobku, třísky a nástroje je na obr. 15.



Obr. 15. Teplotní pole obrobku, třísky a nástroje při ortogonálním řezání – příklad [2]

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.

Identifikace teplotního pole představuje složitý metrologický problém a vyžaduje složité měřicí systémy.

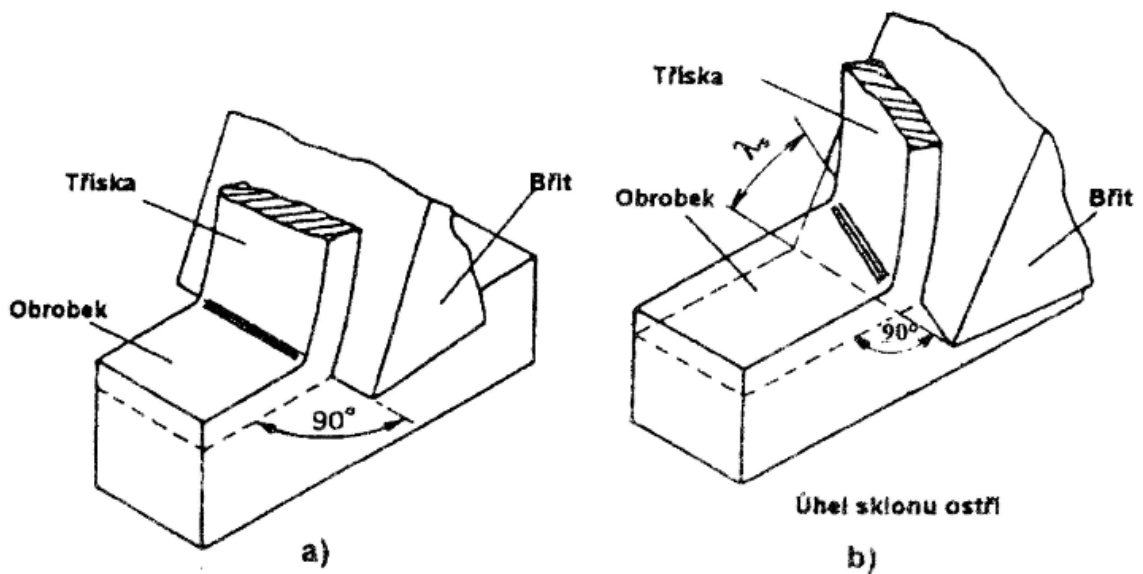
Při aplikaci standardních měřicích metod lze měřit střední teplotu všech stykových ploch mezi nástrojem a obrobkem, která se označí jako teplota řezání. Měření lze provádět různými typy termočlánků, přičemž značným problémem je umístění měřicího spoje termočlánku co nejbližší ke stykové ploše nástroje a třísky. [2]

## 4 TEORIE TVORBY TŘÍSKY PŘI HSC OBRÁBĚNÍ

### 4.1 Fyzikální základy procesu řezání

Řezný proces se realizuje v obráběcím systému stroj, obrobek, nástroj, přičemž prioritním výstupem jsou parametry obrobené plochy. Z tohoto hlediska má zvláštní význam problematika identifikovaného mechanismu tvoření třísky.

Řezný proces se může realizovat jako ortogonální nebo obecné řezání - obr.16 [2]



Obr. 16. Realizace řezného procesu  
a- ortogonální řezání; b- obecné řezání [2]

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, vrátání, frézování nástrojem se zuby ve šroubovici).

Při obrábění probíhá proces oddělování třísky vlivem trvalého zatěžování odřezávané vrstvy řezným nástrojem. Mechanismus vzniku a oddělování třísky je různý u krystalických a nekrystalických látek. U krystalických látek dochází při vnikání břitu nástroje do obrobku k plastické deformaci obráběného materiálu a vzniká tříska tvářená. U nekrystalických látek se odděluje tříska křehkým lomem nebo štěpením, nedochází k plastické deformaci a vzniklá tříska je netvářená.

Většinu technických materiálů, které se v technické praxi obrábějí, tvoří materiály krystalické, zejména kovy. Teoretické a experimentální studie se u těchto materiálů provádí zpravidla pro případ ortogonálního řezání. [2]

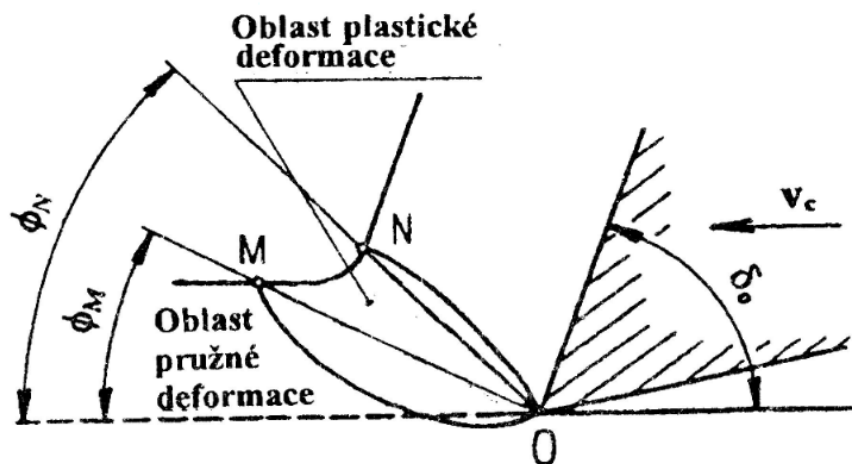
## 4.2 Plastické deformace v oblasti tvoření třísky při ortogonálním řezání

Při řezném procesu dochází v oblasti tvoření třísky k pružným a následně plastickým deformacím v odřezávané vrstvě, před břitem nástroje - primární plastické deformace a v povrchových vrstvách třísky ve styku s čelem nástroje - sekundární plastické deformace. [2]

### 4.2.1 Primární plastické deformace

Při relativním pohybu nástroje vůči obrobku působí na odebíranou vrstvu materiálu vnější zatížení, které v této vrstvě vyvolává napětí.

Pokud napětí nepřestoupí mez úměrnosti deformovaného materiálu, odebíraná vrstva se pružně deformuje. Zvýšením napětí nad mez pružnosti se materiál odřezávané vrstvy začíná plasticky deformovat a dochází k plastickému skluzu v určitých vhodně orientovaných krystalických plochách - obr.17. [2]



Obr. 17. Oblast plastických deformací v odřezávané vrstvě

MO- počátek plastických deformací

NO- konec plastických deformací

$\delta_0$ - nástrojový ortogonální úhel řezu [2]

Velikost a tvar oblasti OMN, jakož i stav napjatosti v této oblasti jsou značně proměnlivé a závisí na fyzikálních vlastnostech deformovaného materiálu, tj. na deformační a zpevňovací schopnosti obráběného materiálu, řezné rychlosti  $v_c$ , nástrojovém ortogonálním úhlu řezu  $\delta_0$  a nástrojovém ortogonálním úhlu čela  $\gamma_0$ .

Při zvýšení řezné rychlosti se deformační oblast zužuje a to tak, že úhly  $\Phi_M$  a  $\Phi_N$  rostou ( $\Phi_M$  rychleji než  $\Phi_N$ ). Při vysokých řezných rychlostech OM a ON prakticky splývají a zjednodušeně můžeme uvažovat, že ke vzniku třísky dochází plastickým skluzem v rovině stříhu  $P_{sh}$ , jejíž poloha je určena úhlem roviny stříhu  $\Phi$ .

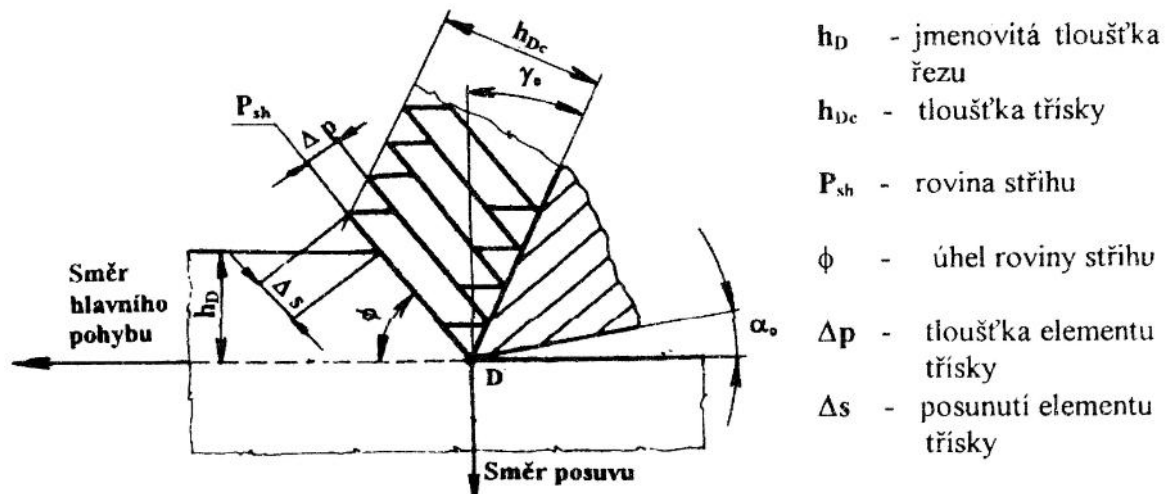
Úhel  $\Phi$  se definuje jako úhel mezi směrem hlavního pohybu a průsečnicí roviny stříhu  $P_{sh}$  s pracovní boční rovinou  $P_{fe}$ .

Úhel roviny stříhu  $\Phi$  vyjadřuje úhel polohy roviny stříhu a také současně úhel směru maximálních tečných napětí.

Rovina stříhu  $P_{sh}$  je prakticky tvořena určitou zónou mezi třískou a obrobkem, kdy nejde o ideální rovinu jako takovou. [2]

#### 4.2.2 Sekundární plastické deformace

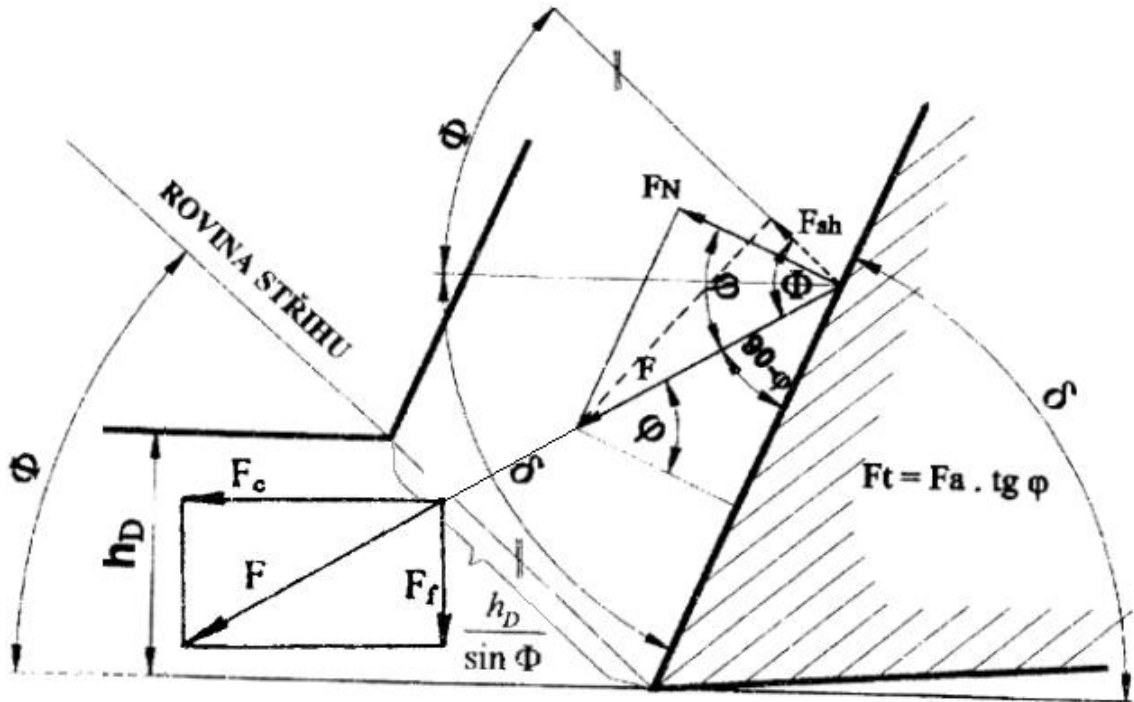
Materiál vpravo od roviny stříhu  $P_{sh}$  je již tvářenou třískou, jak je naznačeno pro zjednodušený dvojrozměrný model ortogonálního řezání na obr.18. [2]



Obr. 18. Zjednodušený model tvorby elementů třísky při ortogonálním řezání  
Pohled na pracovní rovinu  $P_{fe}$  v hlavním bodě ostří D [2]

### 4.3 Kvantifikace úhlu roviny stříhu

Velikost úhlu  $\Phi$  je možné určit na základě teorie minimální vynaložené práce, kdy nástroj působí na odřezávanou vrstvu minimální silou. Při této úvaze se vychází z dynamických poměrů pro ortogonální řezání – obr.19.



Obr. 19. Dynamické poměry při ortogonálním řezání a kvantifikace úhlu roviny stříhu  $\Phi$  [2]

$F$  – celková řezná síla;  $F_c$  – řezná síla;  $F_f$  – posuvová síla

$F_{sh}$  – tangenciální síla v rovině stříhu;  $F_{shN}$  – normálová síla v rovině stříhu

$F_\gamma$  – tangenciální síla působící na čele nástroje;  $F_{\gamma N}$  – normálová síla čela nástroje

$\varphi_t$  – třecí úhel mezi odcházející třískou a čelem nástroje

Tangenciální síla v rovině stříhu je dána vztahem:

$$F_{sh} = \frac{\tau_K}{S_D} = F \cdot \cos\theta \quad (39)$$

$\tau_K$  – střední hodnota kritického smykového napětí ve střížné rovině

$S_D$  - jmenovitá plocha třísky



$$S_D = b_D \cdot \frac{h_D}{\sin\Phi} \quad (40)$$

$$\theta = \delta_0 + \Phi - (90^\circ - \varphi_t) \quad (41)$$

Celková řezná síla F je pak:

$$F = \frac{\tau_K \cdot b_D \cdot h_D}{\sin\Phi \cdot \cos(\varphi_t + \delta_0 + \Phi - 90^\circ)} \quad (42)$$

Úhel roviny stříhu  $\Phi$  se pak stanoví jako minimum funkce (42) a pro další řešení se pro zjednodušení zavádí konstanta  $K = \tau_K \cdot b_D \cdot h_D$

Minimum se určí jako první derivace funkce (42), tato funkce se položí rovna nule a vyčíslí se příslušný úhel  $\Phi$ :

$$\frac{dF}{d\Phi} = -K \frac{\cos\Phi \cos(\varphi_t + \delta_0 + \Phi - 90^\circ) + \sin\Phi \cdot [-\sin(\varphi_t + \delta_0 + \Phi - 90^\circ)]}{\sin^2\Phi \cos^2(\varphi_t + \delta_0 + \Phi - 90^\circ)} = 0 \quad (43)$$

$$\frac{dF}{d\Phi} = -K \frac{\cos[\Phi + (\varphi_t + \delta_0 + \Phi - 90^\circ)]}{\sin^2\Phi \cdot \cos^2(\varphi_t + \delta_0 + \Phi - 90^\circ)} = 0 \quad (44)$$

Protože:  $K \neq 0$  a  $\sin^2\Phi \cdot \cos^2(\varphi_t + \delta_0 + \Phi - 90^\circ) \neq 0$  pak bude:

$$\cos(2\Phi + \varphi_t + \delta_0 - 90^\circ) = 0; \quad 2\Phi + \varphi_t + \delta_0 - 90^\circ = 90^\circ$$

$$\Phi = 90^\circ - \frac{\varphi_t + \delta_0}{2} \quad (45)$$

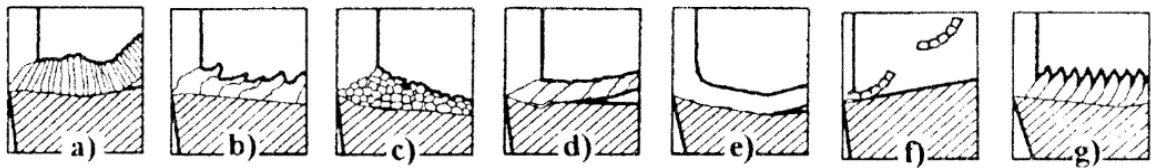
Úhel  $\Phi$  závisí na ortogonálním úhlu řezu  $\delta_0$  a třecím úhlu  $\varphi_t$  mezi odcházející třískou a čelem nástroje. Protože úhel  $\varphi_t$  se vyjadřuje středním součinitelem tření, který obsahuje tření mezi třískou a čelem, bude úhel  $\Phi$  ovlivněn všemi řeznými podmínkami, které mají vliv na velikost úhlu  $\varphi_t$ . Hned po fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu má největší vliv řezná rychlost, zejména svým vlivem na deformační rychlost a na teplotu povrchových vrstev třísky. Dále je ovlivněn úhel  $\varphi_t$  mazacím médiem, které snižuje součinitel tření na čele. [2]

## 4.4 Třísky a jejich technologické charakteristiky

Třísky představují vedlejší produkt řezného procesu, avšak jejich technologické charakteristiky významně vypovídají o průběhu procesu řezání jak z energetického hlediska, tak i z hlediska jejich řízeného odchodu z řezné zóny. [2]

### 4.4.1 Druhy tvářených třísek

V závislosti na průběhu řezného procesu mají třísky různý tvar - obr.20



Obr. 20. Základní druhy tvářených třísek při obrábění kovů [2]

a - plynulá článkovitá soudržná tříska, vznikající u většiny ocelí

b - plynulá soudržná lamelová tříska, vznikající u většiny korozivzdorných ocelí

c - tvářená elementární tříska, vznikající u většiny litin

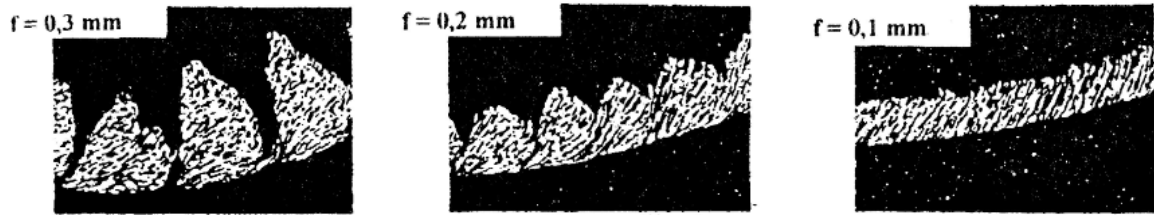
d - nepravidelné článkovitá plynulá tříska, vznikající u většiny vysoce legovaných materiálů

e - tvářená plynulá soudržná tříska, vznikající při malých řezných silách, např. při obrábění hliníku

f - dělená segmentová tříska, vznikající při velkých řezných silách a vysokých teplotách řezání, např. při obrábění tvrdých materiálů

g - plynulá segmentová tříska, vznikající při obrábění titanu [2]

Pro ilustraci jsou na obr.21 uvedeny metalografické výbrusy třísek pro dané podmínky soustružení oceli 16 220.1.



Obr. 21. Metalografické výbrusy třísek při soustružení oceli 16220.1  
řeznou rychlostí  $v_c=160 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  pro dané posuvy na otáčku  $f$  [mm] [2]

#### 4.5 Součinitel přechování třísky

V důsledku plastických deformací v oblasti tvoření třísky dochází k přechování třísky při jejím odchodu ze zóny řezání.

Výchozí úvaha se provede pro ortogonální řezání a rovnost objemů odřezávané vrstvy a realizované třísky:[2]

$$A_{Dc} \cdot v_c = A_D \cdot v_t \quad (46)$$

$A_D$  - jmenovitá plocha řezu

$A_{Dc}$  - plocha průřezu třísky

$v_t$  - rychlost třísky

$v_c$  - řezná rychlost

Součinitel přechování třísky  $\Lambda$  se vyjádří na základě úpravy vztahu (46)

$$\Lambda = \frac{A_{Dc}}{A_D} = \frac{v_c}{v_t} > 1 \quad (47)$$

Plochy  $A_D$  a  $A_{Dc}$  se na základě příslušných rozměrů vyjádří ve tvaru:

$$A_D = h_D \cdot b_D \quad (48)$$

$$A_{Dc} = h_{Dc} \cdot b_{Dc} \quad (49)$$

$h_D$  - jmenovitá tloušťka řezu

$h_{Dc}$  tloušťka třísky

$b_D$  - jmenovitá šířka řezu

$b_{Dc}$  - šířka třísky

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

$$\Lambda = \frac{h_{Dc}}{h_D} \quad (50)$$

V tomto případě se velikost  $h_{Dc}$  odměří na realizované třísece např. mikrometrem a pro danou hodnotu  $h_0$  se vypočítá součinitel přechování.

Součinitel přechování je možné rovněž vyjádřit na základě délky relativní dráhy nástroje vzhledem k obrobku  $l$  a korespondující délky třísky  $l_c$ : [2]

$$\Lambda = \frac{l}{l_c} \quad (51)$$

Při stanovení hodnoty  $\Lambda$  se v tomto případě vychází z parametrů odřezané třísky a použije se vztah: [2]

$$\Lambda = \frac{10^3 \cdot G_t}{l_c \cdot \rho_t \cdot A_D} \quad (52)$$

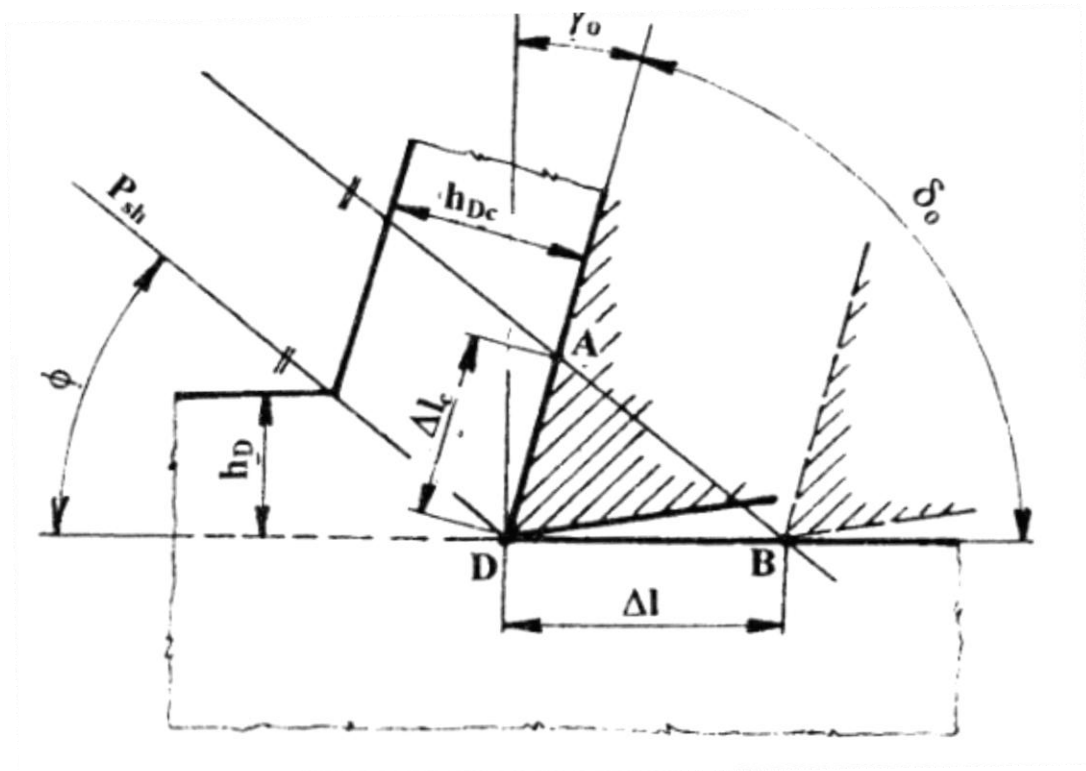
$G_t$  - hmotnost třísky [ g ]

$l_c$  - délka třísky [ mm ]

$\rho_t$  - hustota materiálu třísky [ g.cm<sup>-3</sup> ]

$A_D$  - jmenovitá plocha řezu [ mm<sup>2</sup> ]

Pro známou hodnotu  $\Lambda$  a  $\gamma_0$  lze rovněž vyjádřit velikost uhlu střižné roviny  $\Phi$ , přičemž se vychází z geometrických souvislostí naznačených na obr 22.



Obr. 22. Model geometrických souvislostí při přechování třísky – ortogonální řezání [2]

$\Delta l$  – element relativní dráhy nástroje vzhledem k obrobku

$\Delta l_c$  – element délky odřezané třísky korespondující s  $\Delta l$

Dle dříve uvedené definice a relací obecného trojúhelníka ABC platí:

$$\Lambda = \frac{\Delta l}{\Delta l_c} = \frac{\sin(\Phi + \delta_0)}{\sin\Phi} = \frac{\sin\Phi \cdot \cos\delta_0 + \cos\Phi \cdot \sin\delta_0}{\sin\Phi} \quad (53)$$

Po dosazení za  $\delta_0 = 90^\circ - \gamma_0$  a další úpravě je:

$$\operatorname{tg}\Phi = \frac{\cos\gamma_0}{\Lambda - \sin\gamma_0} \quad (54)$$

## 5 VÝZNAM CHLAZENÍ PŘI OBRÁBĚNÍ, CHARAKTERISTIKA POUŽÍVANÝCH CHLADÍCÍCH MÉDIÍ

Prostředí v řezné zóně má významný vliv na kvalitativní a ekonomické parametry řezného procesu. Nejčastěji používaná řezná média jsou kapaliny, plyny a mlhy.

### 5.1 Technologické požadavky na řezné prostředí

Z technologického a provozního hlediska se na řezné prostředí specifikují určité požadavky, k nimž patří zejména:

- chladicí účinek
- mazací účinek
- čisticí účinek
- provozní stálost
- ochranný účinek
- zdravotní nezávadnost
- přiměřené náklady.

#### **Chladicí účinek**

Chladicím účinkem se rozumí schopnost řezného prostředí odvádět teplo z místa řezu. Tuto schopnost má každé prostředí, které smáčí povrch kovů a pokud existuje tepelný spád mezi povrchem obrobku a prostředím. Odvod tepla vzniklého při řezání se uskutečňuje tím, že řezné prostředí obklopuje nástroj, třísky i obrobek a přejímá část vzniklého tepla. Chladicí účinek řezného prostředí bude záviset, na jeho smáčecí schopnosti, na výparném teple, na rychlosti vypařování za určitých teplot, na tepelné vodivosti a na měrném teple. Čím budou tyto veličiny větší, tím bude vyšší chladicí účinek řezného prostředí. Stejně důležité je v souvislosti s tím průtokové množství řezného média. Výparné teplo zvětšuje chladicí účinek prostředí, ale přílišné odpařování řezného média není žádoucí. Aby bylo řezné prostředí využito hospodárně z hlediska čistoty a zdraví, je nutné v některých případech vznikající páry odsávat. [2]

#### **Mazací účinek**

Mazací účinek je vyjádřen schopností prostředí vytvořit 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 prostředí velkou afinitu ke kovu, nebo váže-li se s materiálem obrobku chemicky v mikroskopické povrchové mezní vrstvě. Mazací účinek znamená proto zmenšení řezných sil, zmenšení spotřeby energie a také zlepšení jakosti obrobeného povrchu. Mazací účinek řezného prostředí se uplatní zejména u dokončovacích obráběcích operací a při provádění náročných operací, jako je protahování, výroba závitů nebo výroba ozubení.

Mazací schopnost řezného prostředí je závislá na viskozitě a na pevnosti vytvořené mezní vrstvy. S rostoucí viskozitou se ale zhoršuje pronikání řezného média mezi třecí plochy, jeho proudění a také odvod tepla. Viskóznější řezné médium ulpívá také více na třískách a tím dochází ke značným ztrátám. Pevnost mazací vrstvy se zvyšuje přísadami povrchově aktivních látek, které napomáhají také pronikání do trhlin deformovaného kovu a usnadňují tak vlastní proces řezání. [2]

### ***Čistící účinek***

Čistící účinek řezného prostředí znamená, že jeho přívod odstraňuje třísky z místa řezání a zlepšuje např. vlastnosti broušícího kotouče tím, že vyplavuje zanesené póry.

Řezné prostředí má také bránit slepování částic, které vznikají při řezání a usnadňovat jejich usazování. Velký význam má čistící účinek pro broušení a u těch operací, kdy řezné prostředí musí odnášet třísky z místa řezu např. při řezání závitů nebo vrtání hlubokých děr. [2]

### **Provozní stálost**

Provozní stálost je možné hodnotit dobou výměny řezného prostředí. Dlouhodobost výměny řezného prostředí je podmíněna zárukou, že se jeho vlastnosti nebudou po tuto dobu měnit. Stárnutí řezného prostředí olejového typu se projevuje tvořením pryskyřičnatých usazenin, které mohou způsobit i poruchu stroje. Produkty stárnutí mají vliv i na zhoršování funkčních vlastností řezného prostředí, jeho rozklad, zmenšení mazacího účinku, ztrátě ochranných schopností, korozi a hnilobný rozklad.

Provozní stálost řezného prostředí závisí na jeho fyzikálních a chemických vlastnostech a na teplotě. Čím je řezné prostředí složitější, tím větší má sklon k nestabilitě. [2]

### **Ochranný účinek**

Ochranný účinek řezného prostředí se projevuje tím, že nenapadá kovy a nezpůsobuje korozi. Toto je důležitý požadavek proto, aby nebylo nutné výrobky mezi operacemi konzervovat, aby se také stroje chránily před korozí. Pro vytvoření dokonalého antikorozního účinku jsou do řezného prostředí přidávány přísady, které pasivují kovy proti nežádoucím účinkům.

Dalším důležitým požadavkem je to, aby řezné prostředí nerozpouštělo nátěry obráběcích strojů a nebylo agresivní vůči gumovým těsněním. [2]

### **Zdravotní nezávadnost**

Požadavek na zdravotní nezávadnost řezného prostředí vychází z toho, že při práci na obráběcích strojích přichází obsluhující pracovník do styku s nosným médiem. Proto řezné prostředí nesmí být zdraví škodlivé, nesmí obsahovat látky dráždivé sliznici a pokožku a nesmí být jedovaté. Řezné prostředí také nesmí zamořovat ovzduší nepříjemným zápachem. Zdravotní nezávadnost řezného prostředí 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, umývání, preventivní ochrana pokožky apod. [2]

### **Přiměřené náklady**

Přiměřené náklady souvisí především se spotřebou řezného média. Při rozboru nákladů je nutné nejdříve posoudit jejich vliv na proces obrábění, tj. na trvanlivost nástroje, ostření, jakost obrobku a spotřebu energie. Po tomto rozboru musí následovat hodnocení řezného prostředí s ohledem na jeho provozní stálost, spotřebu a výměnu. Je třeba zvážit i náklady na likvidaci řezného prostředí. Jedině podrobný technicko-ekonomický rozbor může rozhodnout o vhodnosti určitého druhu řezného prostředí. Hodnocení podle cenových rozdílů je sice jednoduché, ale zcela nedostatečné, poněvadž řezné prostředí ovlivňuje parametry rozhodující o ekonomii obrábění často ve větším rozsahu než jeho cena.

Řezné prostředí je jedním z prostředků, jak ovlivňovat hospodárnost procesu obrábění. Při jeho výběru je nutné komplexně zvážit jeho působení na proces řezání, tj. na průběh plastických deformací v zóně řezání, na opotřebenost nástroje a na změnu struktury povrchu obrobenej plochy. [2]



## 5.2 Řezné kapaliny

Řezné kapaliny je možné členit na kapaliny s převažujícím chladicím účinkem a na kapaliny s převažujícím mazacím účinkem. Toto rozdělení však přesně nevystihuje sortiment řezných kapalin, které jsou v současné době na trhu. Stále se totiž projevuje snaha zvyšovat mazací účinky i u řezných kapalin s převažujícím chladicím účinkem. Moderní druhy řezných kapalin tento požadavek plní a tak je stírán rozdíl mezi oběma skupinami. [2]

### 5.2.1 Druhy řezných kapalin

#### Vodné roztoky

Vodné roztoky jsou nejjednodušší řezné kapaliny, ale mají málo výhod. Voda, jako jejich základ, vyžaduje řadu úprav, jako je její změkčování, přidávání přísad proti korozi, pro zlepšení smáčivosti a proti pěnivosti. Vodný roztok musí být vždy alkalický. U těchto kapalin vzniká nebezpečí rozmnožování anaerobních bakterií, které způsobují tvorbu kalů a nepříjemný zápach. Vodné roztoky mají velmi dobré chladicí a čisticí účinky. [2]

#### Emulzní kapaliny

Emulzní kapaliny tvoří disperzní soustavou dvou vzájemně nerozpustných kapalin, z nichž jedna tvoří mikroskopické kapky, rozptýlené v kapalině druhé. Obvykle se jedná o olej ve vodě. Přitom je třeba využít další složky, tzv. emulgátory, které zabrání koagulaci jemně rozptýlených částic oleje ve vodě. Tyto látky zmenšují mezipovrchové napětí emulgovaných kapalin a stabilizují emulzi. Emulzní kapaliny spojují do určité míry přednosti vody a mazacích olejů. Chladicí účinek emulzní kapaliny závisí na koncentraci emulze. S rostoucí koncentrací emulgačního prostředku ubývá chladicího účinku je dána také koncentrací a vlastnostmi emulgačního prostředku. Schopnost ochrany proti korozi závisí na hodnotě pH emulze, ale v daleko menší míře než u vodných roztoků. Emulze o hodnotě pH = 8 až 9 poskytuje již dostatečnou ochranu proti korozi slitin železa. Emulzní kapaliny zahrnují asi 80 % všech používaných řezných kapalin. [2]

#### Řezné oleje

Řezné oleje jsou zušlechťené minerální oleje. Přísady, které se používají, zvyšují tlakovou únosnost a mazací vlastnosti. Jako přísady, které zlepšují mazací schopnosti řezných olejů, se používají mastné látky, organické sloučeniny a pevná maziva.

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

Organické sloučeniny jsou sloučeniny určitých prvků, jako je síra, chlor, fosfor. Všechny tyto látky se osvědčily jako vysokotlaké přísady. Na povrchu vytvářejí vrstvičku kovových mýdel, která zabraňují kovovým svarům a usnadňují kluzný pohyb troucích se ploch. Sloučeniny s chlorem zmenšují tření, ale jeho účinnost klesá při teplotách nad 400°C. Sloučeniny s fosforem jsou proto účinnější a jako nejúčinnější se projevíly kombinace sloučenin síry, chlóru a fosforu.

Pevná maziva, která se používají jako přísady do řezných olejů, působí při řezání 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. [2]

### **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. Postupně se vyvinuly syntetické řezné kapaliny se zlepšenými mazacími a antikorozními vlastnostmi.

Aplikace syntetických řezných kapalin má proti kapalinám na bázi oleje ekonomické výhody a navíc zajišťuje rychlé odvádění tepla, má dobré čisticí vlastnosti 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. [2]

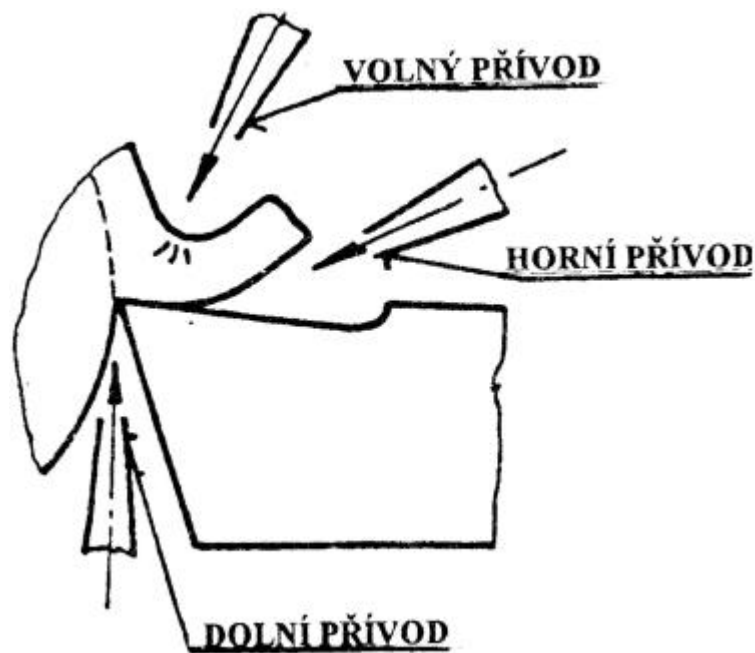
### **5.3 Přívod řezné kapaliny do místa řezu**

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

### Standardní chlazení

Tento způsob přívodu řezné kapaliny nevyžaduje žádnou úpravu přívodního potrubí a vy-  
stačí s úpravou dodávanou výrobcem ke každému obráběcímu stroji. Toto zařízení je tvo-  
řeno nádrží na řeznou kapalinu, čerpadlem a rozvodovým potrubím. Množství dodávané  
řezné kapaliny je dáno typem čerpadla a škrcením průtoku výstupním kohoutem.

Variantně se upravuje poloha výstupu řezné kapaliny z výstupní trysky, jak je naznačeno  
na obr. 23. [2]



Obr. 23. Přívod řezné kapaliny do místa řezu –  
varianty pro ortogonální řezání [2]

### Tlakové chlazení

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

Množství přiváděné kapaliny se pohybuje v rozmezí 0,5 až 2 l.min<sup>-1</sup>. Jedním z nedostatků tohoto způsobu je, že se řezná kapalina rozstříkuje a tvoří mlhu, a proto je třeba řešit vhodné krytování pracovního prostoru stroje, aby se zabránilo znečišťování pracovního prostředí. [2]

### **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 až 7°C, oleje potom na 15 až 20°C. Podchlazení na nižší teploty je omezeno stálostí řezné kapaliny u emulzí a houstnutím u řezných olejů.

Snížení teploty řezné kapaliny na teploty pod bodem mrazu znamená, že je nutné použít jiné složení řezné kapaliny. Takováto úprava může přinést zvýšení výkonu obrábění. [2]

### **Chlazení řeznou mlhou**

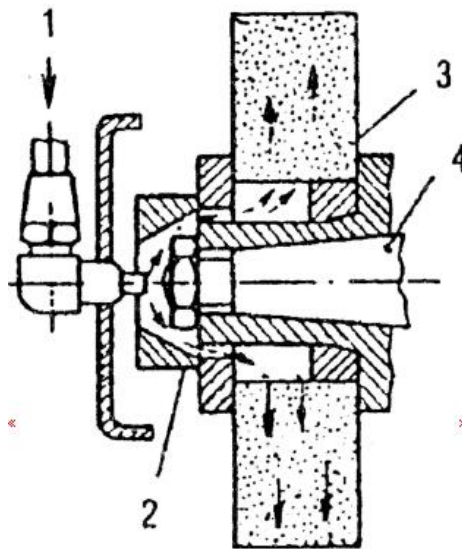
Řezná kapalina je v tomto případě rozptýlená tlakem vzduchu vytékajícího z trysky rychlostí až 300 m.s<sup>-1</sup>. Velmi dobrého odvodu tepla z místa řezu se dosáhne tím, že rozpínající se vzduch obsahuje částičky řezné kapaliny a tím má větší schopnost přejímat vzniklé teplo. Výsledky publikovaných zkoušek ukazují na podstatné zvýšení výkonu obrábění a úsporu řezné kapaliny. [2]

### **Vnitřní chlazení**

Vnitřní chlazení je metodou, která přináší výrazné zvýšení výkonu obrábění. Při soustružení je tato metoda vhodná pro nástroje se slinutými karbidy. Tím se dá zvýšit řezná rychlost o 5 až 15 %. U vrtáků je vnitřní chlazení upraveno tak, že řezná kapalina je přiváděna otvory v tělese nástroje až do místa řezu. Tohoto způsobu chlazení se využívá při vrtání hlubokých děr a při vrtání těžkoobrobitelných materiálů. Také zvýšení tlaku řezné kapaliny přiváděné do místa řezu vede ke zvýšení výkonu obrábění a případně k lepšímu odvodu řísek.

Vnitřní chlazení se dá využít i při broušení - obr.24. Řezná kapalina je přiváděna do příruby broušícího kotouče a odstředivou silou postupuje přes póry v kotouči až do míst styku broušícího kotouče s obrobkem. Vnitřní chlazení zlepšuje drsnost povrchu obrobené plochy a zvětšuje trvanlivost kotouče.

Při tomto způsobu chlazení je však nutné zajistit dokonalé čištění řezné kapaliny. [2]



Obr. 24. Vnitřní chlazení brousícího kotouče [2]

- 1 – Přívod řezné kapaliny
- 2 – Příruba
- 3 – Brousící kotouč
- 4 – Vřeteno brusky

### 2.1 Plynné řezné prostředí

Plynné látky jako řezné prostředí se běžně nepoužívají. U některých obráběných materiálů se chladí vzduchem. Podchlazování vzduchem nepřineslo velké úspory. Všechny plynné látky mají relativně malý chladicí účinek.

Jedním z účinných způsobů chlazení plynem je chlazení stlačeným  $\text{CO}_2$ . Tento způsob je doporučován jako vhodný při obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Tenký paprsek plynu se přivádí do místa řezu pod tlakem 0,5 až 7 MPa.

Tato metoda, i když přináší možnost zvýšení výkonu obrábění, má řadu nevýhod, k nimž patří především vysoké náklady na  $\text{CO}_2$ , jisté nebezpečí při jeho používání a nutnost dokonalého odsávání a větrání pracoviště. [2]

## 6 EKONOMICKÉ A ENVIRONMENTÁLNÍ HODNOCENÍ HSC TECHNOLOGÍÍ

V oblasti obrábění představuje z ekologického pohledu klíčový problém existence a kvalita řezného prostředí. S otázkami snižování technologické zátěže životního prostředí úzce souvisí ekonomické pozadí pro jejich efektivní uplatnění. V České republice, kde odvětví strojírenství prochází hlubokou kvalitativní proměnou technologické základny, je řešení o to složitější, že daná matice obsahuje spektrum výrob s velmi odlišnou technologickou úrovní. Další problém spočívá v ekonomických možnostech jednotlivých subjektů, je tedy nezbytné přistupovat k této problematice diferencovaně a při volbě z nabízených řešení uplatnit taková, která umožní podstatně zlepšit ekologické podmínky při přiměřených nákladech. Při obrábění s použitím chladicích kapalin jsou náklady na ošetřování, kontrolu, čištění, bezpečnost při skladování a likvidaci řezných kapalin poměrně značné. Při aplikaci technologie HSC, potom z velké míry budeme používat obrábění bez použití chladicích kapalin. Použití obrábění za sucha nám odpadá zmiňované náklady a následné opatření snižuje výrobní náklady. Řezné kapaliny a maziva stále budou součástí provozu, ale už ne v takové míře jako tomu bylo dříve. Existují určité obráběcí operace, při kterých není možno použít technologii HSC obrábění, tzn., že není možné použít obrábění za sucha (viz řezání závitů, výroba ozubení apod.) a proto jsme schopni snižovat výše uvedené náklady jen do určité míry.

Budeme-li se o řezné kapaliny starat podle určitých kritérií, můžeme dosáhnout optimálních vlastností řezné kapaliny a dostatečně využít její dobu využívání a s tím souvisí i její náklady na samotný obráběcí proces.[4]

### 6.1 Ošetřování řezných kapalin

V provozu jsou řezné kapaliny vystavovány různým vlivům, které se projevují na kvalitě chladicího média, stárnutí média. Přestane-li mít řezná kapalina požadované vlastnosti, je nutné ji vyměnit a s touto výměnou rostou výrobní náklady. Do nákladů patří náklady na čištění, náklady na výměnu, náklady na likvidaci. Snahou je co nejvíce prodloužit dobu mezi dvěma výměnami řezné kapaliny a k tomuto slouží pravidelné kontroly, ošetřování a čištění daného média.

Stárnutí řezných kapalin znamená změny jejich vlastností, způsobené okysličováním, účinkem tepla, tlakovým zatížením v čerpadle, nečistotami, vniknutí jiných kapalin apod.

Nejrychlejšímu stárnutí podléhají v provozu kapaliny na vodní bázi. Voda se velice snadno odpařuje a také podléhá napadení anaerobními bakteriemi, proto tento proces vede k nestabilitě a rozvrstvení emulze a tím ztrácí mazací a ochranný účinek. Řezné kapaliny na bázi řezných olejů jsou v provozu daleko stabilnější, stárnutí této řezné kapaliny se projevuje kyselostí oleje a tvorbou pryskyřičných látek. [4]

## 6.2 Kontrola řezných kapalin v provozu

Provozní kontrola stárnutí řezné kapaliny se provádí velice jednoduše, posouzením vzhledu, pachu a vzhledu povrchu omývaného řeznou kapalinou. Nejsnadněji se pozná změna jakosti chladicí kapaliny u kapalin emulzních. Souvislý olejový povlak na povrchu emulze upozorňuje na to, že emulze je nestabilní. Také kaly na dně a stěnách nádrže jsou známkami zastárlé a znečištěné kapaliny. Nejkritičtějšími známkami jsou skvrny rzi na plochách stroje. Kontrola se provádí indikačními papírky, které kontrolují pH faktor řezného media, při pH faktoru menším než 7,5 je nutné kapalinu upravit přidáním základní emulze. Nejhorším problémem u řezných kapalin je napadení bakteriemi, tento problém lze vyřešit použitím baktericidními přísadami, které nemusí mít ale příznivý vliv na stabilitu řezné kapaliny. Řezné oleje se vyznačují velmi dobrou stálostí a při pozvolném doplňování řezné kapaliny se plynule renovují. [4]

## 6.3 Čištění řezných kapalin

Nečistoty, které se dostávají do řezné kapaliny, negativně ovlivňují výslednou drsnost obrobenej plochy a trvanlivost nástroje a to hlavně u dokončovacích operací. Dokonalá filtrace zabezpečuje odstranění nečistot z řezného media, u brousicího procesu se dokonalá filtrace vyžaduje.

Nejčastěji se řezné kapaliny čistí dlouhodobým usazováním s následnou filtrací, metoda je to ale dlouhodobá a proto se používají odstředivky, které tento proces urychlí. Tímto způsobem se dají odstranit nečistoty až do 0,5 %. Magnetické filtry zaručují odstranění všech kovových nečistot a vyrábí se jako průtokové nebo rotační. Elektromagnetické rotační filtry mají výkon 40 až 50 l.min<sup>-1</sup>, uvedené filtry nezaručují vyčištění řezné kapaliny od uvolněných zrn brousicího materiálu a proto jsou často spojovány s filtry mechanickými. Jako mechanické filtry se nejčastěji používají filtrační papír, plátno nebo síťka. Princip filtrů je založen na usazování nečistot na povrchu filtračního materiálu. Výkon těchto filtrů je až 100 l.min<sup>-1</sup>.

Centrální rozvod řezné kapaliny a její čištění se uplatní tam, kde pracuje větší počet obráběcích strojů se stejným druhem řezné kapaliny. V dnešní době se hojně používají obráběcí CNC centra, kde jsou uzavřené obvody s řeznými kapalinami, a proto se od metody centralizace ustupuje a to především z důvodu univerzálnosti používaných obráběcích strojů, kde každý stroj má jiný druh řezného prostředí. Výměny řezných kapalin se provádí podle druhu operace a také podle typu směnného provozu. [4]

#### 6.4 Bezpečnost práce s řeznými kapalinami

Většina řezných kapalin není zdravotně a požárně zabezpečena. Tyto skutečnosti často vedou k přehlížení opatření, která jsou nutná pro dokonalý a nezávadný provoz. Protipožární opatření jsou nejméně náročná, protože řezné kapaliny za běžných podmínek, které v běžném provozu jsou, netvoří zápalné nebo výbušné směsi. K jejich vznícení dochází až při teplotách kolem 400°C výjimku tvoří lehké oleje, které mají bod vzplanutí kolem 125°C. Velmi nebezpečné jsou petroleje a to hlavně jeho páry, proto skladování těchto mazacích prostředků musí být dokonale odvětráváno.

Ze zdravotního hlediska je k práci s řeznými kapalinami daleko více připomínek. Možnost škodlivého účinku je dána tím, že při práci s řeznou kapalinou se tato dostává do styku s pokožkou pracovníků nebo mohou vdechovat její rozprášené kapičky, které se tak mohou dostat do dýchacího ústrojí obsluhovatele. Nejmenší zdravotní komplikace jsou při použití minerálních olejů. Při hrubovacích operacích se mohou uvolňovat do ovzduší výpary olejů s některými přísadami, které se uvolní působením tepla a potom nepříznivě působí na dýchání člověka. Při práci s emulzemi může, ale jen velmi zřídka vzniknout kožní onemocnění. Nejlepší ochranou proti onemocnění pokožky je preventivní ochrana. K preventivní ochraně přispívá také pravidelná kontrola řezné kapaliny a výměna znečištěných nebo vadných náplní stroje.

U řezného media musí být od výrobce dodán bezpečnostní list, ve kterém jsou uvedeny údaje o řezném mediu (ochranná značka, složení, fyzikální a chemické vlastnosti, bezpečnost při jeho použití a skladování, ekologické informace atd.) [4]

#### 6.5 Recyklace řezných kapalin

Nejprve je potřeba specifikovat pojmy:

**Recyklace** - je souhrn technologických procesů, které umožní návrat oleje (jinak odpadu) do stávající nebo nové aplikace. Recyklace nemusí znamenat obnovení plné životnosti ole-



je, kapaliny. Recyklace zahrnuje v sobě jak regeneraci, tak i ošetřování oleje nebo kapaliny.

**Ošetřování olejů** - je řada nezávislých technologických procesů. Provádí se v průběhu životnosti olejů, kapalin. Cílem je prodloužení exploatace oleje nebo průmyslové kapaliny a snížení opotřebení strojního zařízení.

**Regenerace** - je ucelený technologický proces. Upotřebené motorové a průmyslové oleje se jako základní surovina zpracovává v rafinerii a výsledným produktem je nový olej.

**Upotřebený olej, kapalina** - olej setrval ve stroji určitý počet jednotek (hodiny, km apod.) doporučených výrobcem zařízení, nebo jakostní parametry oleje, kapaliny překročily hranici pro bezpečné provozování strojního zařízení.

Samotná recyklace se provádí ve dvou navzájem nezávislých liniích.

### **Recyklace - regenerace**

Vstupní surovinou pro recyklaci-regeneraci jsou upotřebené motorové a průmyslové oleje. V rafinerii se upotřebený olej tzv. "rozdestiluje" na jednotlivé frakce, ty se následně upravují rafinačními postupy. Výsledkem je čerstvý olej. Vybudování závodu na regenerace oleje je nepochybně investičně velmi náročné.

### **Recyklace - ošetřování**

Základem je kvalita laboratorních výsledků, přístrojové vybavení, software, informace, prostředí, personál a jeho zaujetí pro vykonávanou práci. Ošetřování má smysl, nejsou-li překročeny limitní hodnoty jakostních ukazatelů olejů či kapalin. Na podkladě diagnostiky a dalších informací se rozhodne, zda průmyslový olej či kapalinu z technických i ekonomických hledisek lze ošetřovat. Technologií, kterými se ošetřování provádí, je celá řada.

Při oddělování vody od oleje je možné použít různé technologie, např. vakuové separace, odstředivky, mikrofiltrace, filtry schopné jímat vodu nebo například různé typy sorbentů. Po odstranění vody, volné i vázané, následuje odstranění mechanických nečistot. Při odstraňování mechanických nečistot nebo jiných kontaminantů v oleji se zpravidla volí mezi mikrofiltrací, různými druhy filtrů s různou účinností, odstředivkou, elektrostatickým čištěním, aplikací vhodných sorbentů nebo se kapalina nechává jen sedimentovat. Výběr vhodné metody i pracovní postup je určován stupněm a charakterem znečištění a dostupností technologie. Svou roli zde hrají i ekonomické ukazatele. Ovšem pro recyklaci-ošetřování olejů a kapalin neexistuje pomyslný "kámen mudrců", a stejně tak neexistuje ani univerzální zařízení, které by problematiku ošetřování olejů a kapalin řešilo komplexně.

Odloučení vody z oleje za sníženého tlaku - vakuová separace, technologie je šetrná k oleji a olej není teplotně namáhaný.

Likvidace použitých a starých řezných kapalin si zabezpečuje většinou sama společnost, která do daného provozu dodává řezné kapaliny a maziva. Firma dodá sedimentační nádrže nebo ultrafiltrační technologii, která následně přefiltruje řeznou kapalinu, ze které se část vrátí do provozu jako doplňkové medium (druhořadý produkt). Ohledně nepoužitelných složek řezných kapalin zabezpečí likvidaci u specializovaných firem, které garantují ekologickou likvidaci s následným potvrzením o likvidaci nebezpečného odpadu. [7]

## 6.6 Obrábění bez řezných kapalin

Při této metodě se jako řezné medium používá atmosférický vzduch. Uvedená metoda řeší celou řadu problémů povahy ekologických, hygienických, ale i technických a technologických.

### 6.6.1 Minimalizace množství tepla

Absence temperování obrobku procesní kapalinou při obrábění bez použití řezné kapaliny, zvláště u dokončovacích operací, při nichž je nutné zabránit tepelným deformacím obrobku tak, aby se docílily úzké tolerance rozměru a tvaru, představuje závažný problém a vyžaduje proto zvláštní opatření. Z toho důvodu musí být proces obrábění navržen tak, aby se minimalizovalo množství tepla vzniklého, ale hlavně odváděného obrobkem. Obecně vzato se celkové množství tepla a tím i teplota řezání sníží zmenšením množství měrné energie ( $J \cdot mm^3$ ) vynaložené na řezný proces. Na základě poznatků z teorie obrábění se uvedeného požadavku dosáhne např. zmenšením deformačních a třecích sil. V tomto smyslu má proto příznivý účinek používání pozitivní geometrie břitu, především úhlu čela, i když se tím do jisté míry zhorší schopnost břitu teplo odvádět. Takovéto opatření rovněž zmenšuje objem a intenzitu plastických deformací doprovázejících vznik třísky a tím opět významný zdroj tepla. Kromě toho se snižuje intenzita tření mezi třískou a čelem břitu a tím také množství tepla vzniklého ze tření. Důležitá je rovněž možnost ovlivnit rozdělení toků odváděného tepla. Při soustružení se např. sníží zahřívání obrobku zvýšením posuvu a hloubky řezu, tj. průřezu odebírané vrstvy. Podobně i při frézování je vhodné zvýšit hodnotu posuvu na zub a používat především sousledné frézování, omezující tření hřbetu břitu o plochu řezu. Pokud to dovolí tepelná odolnost řezného materiálu, sníží se množství tepla přecházející do

obrobku i zvýšením řezné rychlosti. Zvětší se tak objem tepla odváděného třískami. Zvýšení řezné rychlosti rovněž způsobí nárůst deformační rychlosti a tím snížení plasticity obráběného materiálu v oblastech vzniku třísky, tím se opět zmenší objem plastických deformací. To platí obecně pro všechny způsoby obrábění. Chybějící ochlazování břitu řeznou kapalinou musí být vykompenzováno použitím takových řezných materiálů, které si zachovávají potřebnou tvrdost a otěruvzdornost i při vyšších teplotách řezání. Jsou to buď nové druhy polykrystalických velmi tvrdých řezných materiálů, nebo speciální tvrdé ochranné vrstvy nanášené na současný sortiment řezných materiálů. [4]

### 6.6.2 Ochlazování a odplavování třísek

Ochlazování extrémně teplých třísek, které se mohou shromažďovat např. v dutině obrobku, upínacího přípravku nebo obráběcího stroje, má svůj význam hlavně z hlediska zachování přesnosti obrábění. Při obrábění bez řezné kapaliny je přímé ochlazování třísek okolním vzduchem (přirozeným řezným prostředím) velmi malé, proto je nutno se s větší měrou zaměřit na důsledné odstraňování velmi teplých až žhavých třísek z výše jmenovaných oblastí. Z jiného pohledu však vyšší teplota řezání zlepšuje plasticitu odřezávaného materiálu třísky a tím její snadnější deformaci a zmenšení řezných sil. Na druhé straně vede zvýšená plasticita při nepřerušovaném řezu (soustružení) ke změně tvaru třísky na nevýhodný stuhovitý nebo smotaný. Skutečný tvar třísky proto obvykle vyžaduje použití speciálních utvářečů nebo tvarů drážek pro třísky u vrtáků tak, aby nedocházelo při obrábění bez řezné kapaliny k jejich zahlcování třískami.

Chybějící čisticí účinek řezné kapaliny, tj. odplavování třísek, může způsobovat zahlcování a zalepování prostoru pro třísky zvláště u vrtáků, závitorezných a brusných nástrojů, ale i fréz. Dochází tak nejen k poškození obrobku plochy zpevněnými třískami, ale i břitů nástroje, když se třísky dostanou mezi břit a obrobek a jsou znovu řezány. Problém lze řešit nejlépe odsáváním nebo nouzově i odfukováním třísek tlakovým vzduchem. Při odfukování však vzniká nebezpečí v zafukování kovového prachu např. do ložisek, vodících ploch, šroubů apod. Lepšímu odstraňování třísek přispívá i změna polohy nástroje vůči obrobku, tj. obrábění zespodu obrobku nebo lépe při vodorovné poloze vřeten frézky nebo vrtačky. Upínací přípravky a některé skupiny obráběcího stroje (lože, suporty apod.) určené pro obrábění bez použití řezné kapaliny musí být zvláště pečlivě konstruovány s ohledem na odstraňování třísek. Nelze-li zajistit bezpečné odstraňování třísek, je zapotřebí provádět řízené temperování uvedených komponentů, popř. teplotní rozměrovou kompenzaci u CNC strojů. [4]

### 6.6.3 Vyšší trvanlivost břítu

Používání řezných kapalin však může mít z hlediska řezného procesu i negativní účinky, které se tak při obrábění bez řezné kapaliny vyloučí. Vlivem přerušovaného řezu, např. při frézování, vzniká velmi intenzivní střídavé tepelné zatěžování břítu frézy. Používáním procesních kapalin se tyto tepelné rázy ještě zesílí. V řezném materiálu tak může docházet k vytváření nejprve mikroskopických a později makroskopických trhlin přecházejících až v lomy břítu. Použitím obrábění bez řezné kapaliny lze proto v těchto případech dosáhnout i vyšší trvanlivosti břítu. Mimo jiné se z tohoto důvodu např. vysokorychlostní frézování provádí téměř vždy bez řezných kapalin. Možnosti uplatnění obrábění za sucha a tím i specifikace požadavků na proces, jsou závislé také na konkrétní kombinaci obráběného materiálu a způsobu obrábění. Při obrábění oceli hraje samozřejmě prioritní úlohu vysoká teplota řezání, při obrábění šedé litiny a hliníku s vysokým obsahem křemíku je však hlavní abrazivní ořez břítu. U měkčích slitin hliníku způsobuje jejich obecně vysoký sklon k adhezi časté nalepování třísek jak na břit, tak i na obrobek. V závislosti na způsobu obrábění a druhu obráběného materiálu se proto vyskytují zřetelné rozdíly v trvanlivosti břítu mezi obráběním za mokra a za sucha. U většiny materiálů se při frézování za sucha dosahují vyšší trvanlivosti břítu než při obrábění s použitím řezných kapalin z výše popsaných důvodů. Pouze při frézování hliníku může být trvanlivost břítu výrazně nižší vlivem vysoké adheze materiálu obrobku (třísky) na břit. Při soustružení a vrtání za sucha se zpravidla dosahují nižší trvanlivosti břítu než při použití řezných kapalin. Příčinou jsou vyšší teploty řezání při nepřerušovaném řezu. Zatížení změnami teploty se samozřejmě při plynulém řezu téměř nevyskytuje, protože břit nevybíhá opakovaně ze záběru. Řezná kapalina tak mění pouze teplotní pole nástroje, ale samotný břit prudce neochlazuje. [4]

### 6.6.4 Zlepšení obrobiteľnosti

Vytvoření jistých pozitivních předpokladů pro nasazení obrábění za sucha lze docílit i na straně obráběných materiálů, např. zlepšením jejich obrobiteľnosti. Jednou ze známých metod jejího zlepšení je používání např. vhodných dezoxidačních přísad již při metalurgické výrobě oceli. Oceli dezoxidované např. kalciumsiliem (SiCa) s přísadou hliníku obsahují měkké a tvárné hlinitaný vápníku, které se při teplotě řezání taví a působí jako mazadlo a ochranný film na břítu. Trvanlivost břítu se tím může zvýšit až o 400 %. [8]

### 6.6.5 Obrábění ocelí bez řezných kapalin-soustružení

Při soustružení oceli za sucha je v důsledku plynulého řezu hlavním problémem zvýšené tepelné zatížení břitu. Řezný materiál musí proto odolávat především zvýšené teplotě řezání, požadavky na pevnost v ohybu jsou při plynulém řezu obvykle druhořadé. Pro dokončovací soustružení se doporučuje používat cermety s ochrannou vrstvou z TiCN (kubický nitrid titanu) nebo z polykrystalického kubického nitridu boru (BN), popř. z neoxidické řezné keramiky. Pro hrubovací operace jsou vhodnější houževnatější slinuté karbidy s ochrannou vrstvou z Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanesenou metodou CVD. Poloměr zaoblení ostří by měl být do 30 μm, proto je vhodnější metoda MT CVD pro nanesení vrstvy. Zvýšené náklady na řezný materiál jsou obvykle vyváženy zvýšením velikosti úběru materiálu, zjednodušením technologického procesu a snížením nákladů na něj (úspora procesních kapalin a souvisejících nákladů), jak dokládá příklad uvedený v Obr. 4.1. Použitím cermetu s ochrannou vrstvou z TiN se zvýšila trvanlivost břitu a tím jeho řezivost, umožňující zvýšit úběr materiálu obrobku a přesto odstranit používání procesní kapaliny. Celkové náklady na obrábění tím klesly o 10 %, [8] Při posuzování ekonomické výhodnosti obrábění za sucha je proto nutné posuzovat celý případ vždy komplexně. [4]

### 6.6.6 Negativa používání řezných médií

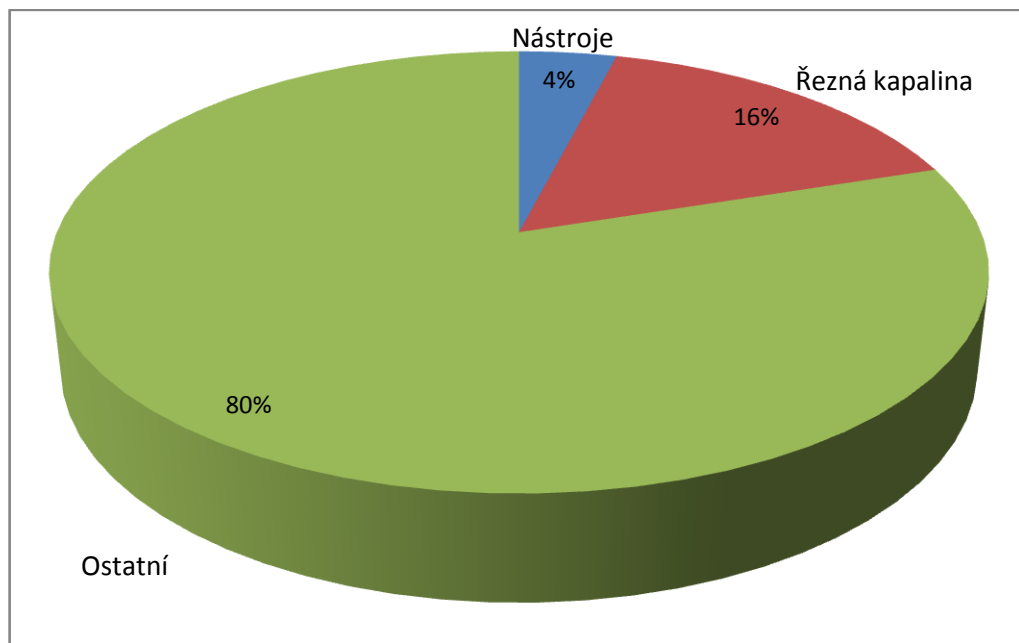
K zavedení řezných médií (především kapalin) došlo v době, kdy zvýšeným technologickým požadavkům již neodpovídaly vlastnosti řezných materiálů. Nasazením řezných kapalin se vyřešily potíže s trvanlivostí břitu, s kvalitou a přesností obrobku, s odstraňováním třísek a s řadou dalších záležitostí. Negativem takového řešení však bylo a nadále zůstává zkomplikování technologického vybavení procesu a tím i zvýšení nákladů na výrobu. V posledních letech k tomu ještě přistupují ekologická a zdravotní hlediska, jejichž význam rychle narůstá nejen z legislativních důvodů, ale především z hlediska nákladů spojených s likvidací případných ekologických havárií a zdravotních odškodnění. Dalším neméně důležitým omezujícím faktorem v používání řezných kapalin jsou rozšiřující se zákonné předpisy o manipulaci s chemickými látkami. Současným trendem v obrábění je proto snaha o omezení nebo úplné vyloučení používání řezných kapalin. Rychlý pokrok v technologii obrábění a především nové druhy řezných materiálů to již umožňují.

### 6.6.7 Náklady na aplikaci řezných kapalin

K objasnění problematiky používání procesních kapalin za současných ekonomických a výrobních podmínek, byla provedena řada studií, jejichž výsledky byly např. publikovány v odborném časopise *Annals of the CIRP*. Na příkladu "obráběčsky" tak vyspělé země, jakou je Německo, jsou zde konkrétně představeny výše zmíněné aspekty. V této zemi se ročně spotřebovávají řádově desítky tisíc tun procesních kapalin a koncentrátů za stovky milionů €. Z koncentrátů se navíc připravují další stovky tisíc tun řezných emulzí. Jaká ekologická nebezpečí a jaké další nepřímé náklady pro výrobu jsou za tímto faktem skryty, si lze již snadno domyslet. Analýzy rovněž ukázaly, že jen málo firem si vede přesné záznamy o nákladech (investice, náklady na pořízení a likvidaci kapalin, odpisy a údržba zařízení, energie, doprava, personální výdaje, zdravotní výdaje, výdaje na ekologické havárie a další) spojených s používáním procesních médií. Z dostupných informací bylo zjištěno, že náklady na aplikaci řezných kapalin na transferových obráběcích linkách se často pohybují mezi 7 a dokonce až 16 % výrobních nákladů vztažených na jeden obrobek. To je podstatně více, než se dříve předpokládalo, a více, než činí průměrné náklady např. na řezné nástroje, tj. 2 až 4 %. [7]

V běžných provozech však náklady na řezné kapaliny obvykle nepřekračují 5 %. [10] Rovněž nelze zanedbat další zvýšení nákladů spojené se zpracováním třísek obsahujících zbytky řezných kapalin a s čištěním hotových obrobků od nich.

Uvedené skutečnosti signalizují nárůst negativních stránek používání umělých řezných prostředí a tím potřebu jejich vyloučení. Rovněž z hlediska přímých i nepřímých nákladů na obrábění se ukazuje, že aplikace obrábění bez použití řezných kapalin je již za současných podmínek v řadě případů výhodnější než obrábění s používáním umělých řezných prostředí. Technické předpoklady pro takové podmínky obrábění již existují. [4]



Graf. 8. Podíl nákladů na řeznou kapalinu a nástroje při výrobě

## ZÁVĚR

Na celosvětových ekologických problémech se významně podílí i strojírenská výroba. Rostou také tlaky na snižování výrobních nákladů a cen výrobků. K hlavním problémům strojírenské výroby patří z hlediska ekologického především používání značného množství pomocných technologických kapalin.

Tradiční řezné kapaliny na bázi ropy, často s přísadami chlóru, fosforu a síry, je možné kriticky hodnotit z ekologického, ale i nákladového hlediska. Zvláštní postavení zaujímají emulze, které obsahují celou řadu přísad, včetně látek působících neblaze na zdraví lidí. Značné množství kapalin se musí regenerovat nebo likvidovat, což přináší ekologické i ekonomické problémy. To znamená, že redukce nebo vyloučení problémů spojených s používáním pomocných technologických prostředků a ovšem i zkracování strojních časů vede k rozvoji nových technologií, zvláště HSC, tj. vysokorychlostního obrábění.

Definice obrábění vysokými rychlostmi není jednoduchá, od aktuální řezné rychlosti, které může být dosaženo, až přes závislost na pracovním materiálu a typu řezné operace. Jednou jednoduchou definicí je, že řezná rychlost při HSC dosahuje 5 až 10x větších hodnot než při konvenčním obrábění pro určitou řeznou operaci. V předchozích kapitolách bylo rozebráno HSC podrobněji, následuje uvedení hlavních výhod a nevýhod tohoto způsobu obrábění.

Výhody HSC:

- Dosažení vysoké kvality obráběného povrchu
- Zvýšení rozměrové přesnosti obrobku
- Zvýšení objemu odebraného materiálu
- Vlivem menšího pěchování třísky se sníží řezné síly o 1/3
- Vzniklé teplo je odváděno převážně třískami a výrazně se tak sníží tepelné zatížení nástroje a obrobku
- Zpravidla se sníží pravděpodobnost vzniku chvění
- Možnost aplikovat obrábění bez chlazení

Nevýhody HSC:

- Technologická data pro HSC nejsou dostatečně odzkoušena pro všechny druhy materiálů.



- Na zajištění dostatečné bezpečnosti obsluhujícího personálu je třeba vynaložit zvýšené náklady
- Speciální nástroje a řezné materiály
- Odstraňování velkého množství třísek za jednotku času

Z hlediska ekonomického ale i ekologického se jeví jako největší výhoda možnost obrábění bez chlazení, tzv. obrábění za sucha. Toto obrábění přináší čistší a zdravější prostředí, není nutná údržba nádrží a rozvodů chladicí kapaliny, dochází k lepšímu utváření třísek. Pokud využijeme tohoto obrábění tak výrazně snížíme náklady na jeden výrobek a také odpadají všechny problémy způsobené likvidací řezných kapalin a jejich skladování.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Kocman, K. *Speciální technologie obrábění*, 3rd ed.; Akademické nakladatelství CERM s.r.o.: Brno, 2004.
- [2] Kocman, K.; Prokop, J. *Technologie obrábění*, 2nd ed.; Akademické nakladatelství CERM s.r.o.: Brno, 2005.
- [3] KOCMAN, K. *Technologické procesy obrábění*. 1st ed. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2011.
- [4] KAPITÁNOVÁ, Michaela. Enviromentální a technologické aspekty HSC obrábění. Zlín, 2005. diplomová práce (Ing.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická
- [5] Řehař, J.: Ještě k problematice High speed cutting. Technický týdeník 51-52, Plzeň, 2002, č. 51-52, s. 6. ISSN 0040-1064.
- [6] Houdek, J.: Rychlostní obrábění výhody a limity jeho použití ve strojírenské technologii, 2001, s. 10
- [7] Korn, R.: Recyklace - ekologie i ekonomika. MM Průmyslové spektrum, Praha, 2004, č. 4, s. 16-17. ISSN 1212-2572
- [8] Svoboda, J.: Tvorba třísky při vysokorychlostním obrábění. MM Průmyslové spektrum, Praha, 2003, č.4, s.18-19. ISSN 1212-2572.
- [9] Humár, A.: Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění, 1. vyd., CCB spol. s.r.o., 1995, s.265, ISBN 80-85825-10-4.
- [10] Hofman, P.: Obrábění za sucha-ano či ne? (díl1,2). MM Průmyslové spektrum, Praha, 2001, č. 11-12, s. 12-15. ISSN 1212-2572.
- [11] AB SANDVIK, Sandviken, Sveden. Understanding cemented carbide – Grain size [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.hardmaterials.sandvik.com>
- [12] Zeman, P.; Šafek, J.; Vaněček, D. Technologie HSC, Velké ekonomické i ekologické přínosy, 2002. Technik. [www.technik.ihned.cz](http://www.technik.ihned.cz) (accessed May 08, 2012).

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| HSC                            | High speed machining                      |
| PPD                            | Oblast primárních plastických deformací   |
| SPD                            | Oblast sekundárních plastických deformací |
| TPD                            | Oblast terciálních plastických deformací  |
| SK                             | Slinuté karbidy                           |
| BN                             | Kubický nitrid bóru                       |
| RO                             | Rychlořezné oceli                         |
| WC                             | Karbid wolframu                           |
| TiC                            | Karbid titanu                             |
| TaC                            | Karbid tantalu                            |
| NiC                            | Karbid niobu                              |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Oxid hlinitý                              |
| ZrO <sub>2</sub>               | Kysličník zirkonu                         |
| PKNB                           | Polykrystalický kubický nitrid bóru       |
| PD                             | Polykrystalický diamant                   |
| v <sub>f</sub>                 | Posuvová rychlost                         |
| v <sub>e</sub>                 | Rychlost řezného procesu                  |
| n                              | Otáčky                                    |
| f <sub>z</sub>                 | posuv na zub                              |
| z                              | Počet zubů nástroje                       |
| P <sub>fe</sub>                | Pracovní rovina                           |
| P <sub>D</sub>                 | Rovina řezu                               |
| A <sub>D</sub>                 | Jmenovitý průřez třísky                   |
| b <sub>D</sub>                 | Jmenovitá šířka třísky                    |

---

|                |  |
|----------------|--|
| $h_D$          | Jmenovitá tloušťka třísky                            |
| $A_T$          | Plocha průřezu jednoho úběru                         |
| $Q$            | Výkonnost obrábění                                   |
| $k_c$          | Měrná řezná síla                                     |
| $F_s$          | Tangenciální síla                                    |
| $E_c$          | Práce řezání   |
| $E_f$          | Práce posuvu   |
| $E_e$          | Práce řezného procesu                                |
| $e_c$          | Měrná práce řezání                                   |
| $P_c$          | Řezný výkon  |
| $P_e$          | Pracovní výkon                                       |
| $Q_e$          | Teplo řezného procesu                                |
| $v_c$          | Řezná rychlost                                       |
| $\Phi$         | Úhel smykové roviny                                  |
| $\Lambda_h$    | Součinitel pěchování třísek                          |
| $h_{ch}$       | Tloušťka odcházející třísky                          |
| $F_c$          | Řezná síla   |
| $Q_c$          | Celkové množství tepla vzniklé při odřezávání třísky |
| $F_{\gamma N}$ | Normální síly  |
| $F_{\gamma}$   | Tečná síla   |
| $f$            | Posuv  |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|   |    |
|---|----|
| Obr. 1. Znázornění plastických deformací při obrábění [6] .....   | 15 |
| Obr. 2. Charakteristické rysy jednotlivých typů obrábění [6] .....  | 15 |
| Obr. 3. Rozložení řezné síly [4].....   | 19 |
| Obr. 4. Závislost tvrdosti zakalené nelegované nástrojové oceli na obsahu uhlíku [1].....   | 26 |
| Obr. 5. Závislost tvrdosti HRC a pevnosti v ohybu $R_{mo}$ slinutých karbidů na obsahu uhlíku. [2] .....  | 29 |
| Obr. 6. Třívrstvový povlak břitu – příklad [2].....   | 32 |
| Obr. 7. Oblasti základních řezných podmínek při soustružení běžných ocelí – SK, povlakované SK a cermety.....   | 34 |
| Obr. 8. Oblasti ekonomického použití řezných podmínek [3].....  | 35 |
| Obr. 9. Závislost tvrdosti řezných materiálů na teplotě [3] .....   | 37 |
| Obr. 10. Geometrické veličiny vztahované k ostří nástroje – podélné soustružení – pohled v rovině řezu $P_D$ [2].....   | 41 |
| Obr. 11. Rozklad celkové řezné síly při podélném soustružení válcové plochy [2].....  | 44 |
| Obr. 12. Rozklad celkové řezné síly $F$ v pracovní boční rovině $P_{fe}$ [2] .....  | 44 |
| Obr. 13. Rozklad celkové řezné síly $F$ při ortogonálním řezání – pohled na pracovní boční rovinu $P_{fe}$ v hlavním bodě ostří $D$ [2].....  | 46 |
| Obr. 14. Obecné rozdělení odváděného tepla při realizaci řezného procesu .....  | 51 |
| Obr. 15. Teplotní pole obrobku, třísky a nástroje při ortogonálním řezání – příklad [2] .....   | 51 |
| Obr. 16. Realizace řezného procesu a- ortogonální řezání; b- obecné řezání [2].....   | 53 |
| Obr. 17. Oblast plastických deformací v odřezávané vrstvě MO- počátek plastických deformací NO- konec plastických deformací $\delta_0$ - nástrojový ortogonální úhel řezu [2] ..... | 54 |
| Obr. 18. Zjednodušený model tvorby elementů třísky při ortogonálním řezání Pohled na pracovní rovinu $P_{fe}$ v hlavním bodě ostří $D$ [2].....                                     | 55 |
| Obr. 19. Dynamické poměry při ortogonálním řezání a kvantifikace úhlu roviny stříhu $\Phi$ [2] .....  | 56 |
| Obr. 20. Základní druhy tvářených třísek při obrábění kovů [2].....   | 58 |
| Obr. 21. Metalografické výbrusy třísek při soustružení oceli 16220.1 řeznou rychlostí $v_c=160 \text{ m.min}^{-1}$ pro dané posuvy na otáčku $f$ [mm] [2] .....                     | 59 |

---

|   |    |
|---|----|
| Obr. 22. Model geometrických souvislostí při pýchování třísky – ortogonální řezání<br>[2] ..... | 60 |
| Obr. 23. Přívod řezné kapaliny do místa řezu –.....   | 67 |
| Obr. 24. Vnitřní chlazení brousícího kotouče [2] .....  | 69 |

**SEZNAM TABULEK**

|   |    |
|---|----|
| Tab. 1. Rozdělení a označování nástrojových ocelí.....  | 25 |
| Tab. 2. Přehled vybraných druhů rychlořezných ocelí a jejich technologické<br>uplatnění ..... | 28 |
| Tab. 3. Složení a vlastnosti vybraných druhů slinitých karbidů .....                          | 30 |
| Tab. 4. Doporučené použití slinitých karbidů bez povlaku [3].....                             | 31 |
| Tab. 5. Doporučené použití povlakovaných slinitých karbidů [3].....                           | 33 |

**SEZNAM GRAFŮ**

|  |    |
|--|----|
| Graf 1. Závislost řezné rychlosti na střední teplotě řezání [6].....                       | 13 |
| Graf. 2. Závislost řezné rychlosti na teplotě [6] .....                                    | 18 |
| Graf. 3. Závislost rozložení teploty na řezné rychlosti [6] .....                          | 20 |
| Graf. 4. Závislost střední teploty řezání na řezné rychlosti (ocel, litina) [6] .....      | 22 |
| Graf. 5. Závislost střední teploty řezání na řezné rychlosti (hliník) [6].....             | 23 |
| Graf. 6. Charakteristika kritických řezných rychlostí pro frézování a soustružení [6]..... | 24 |
| Graf. 7. Závislost $k_c=f(h_D)$ pro různé řezné procesy.....                               | 48 |
| Graf. 8. Podíl nákladů na řeznou kapalinu a nástroje při výrobě.....                       | 79 |