

Energetické a ekologické aspekty HSC obrábění

Bc. Richard Pinkava

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Richard Pinkava**

Osobní číslo: **T12683**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **kombinovaná**

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 tvorby 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 - Grain size [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. 1.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 Dashöfer, 16. aktualizované vydání, Praha, 2001 ISBN 80-902247-2-5
- [5] Metals Handbook Volume 16, Machining. Edit. Joseph R. Davis, 1.ed., Metals park, ASM International, s. 944, 1989

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Karel Kocman, DrSc.
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

10. února 2014

Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2014

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

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 ¹⁾;
- 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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ 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 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit 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

.....

¹⁾ 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:

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.

(1) 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.

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

²⁾ 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).

³⁾ 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

Tato diplomová práce shrnuje možnosti použití HSC technologie v oblasti obrábění. Po úvodní části byly uvedeny teoretické aspekty konvenčního a vysokorychlostního obrábění. Zde je zařazen vznik tvorby třísky u obou způsobu obrábění a vznik plastické deformace v místě řezu. Byla provedena charakteristika řezných kapalin z hlediska technologického dělení a jejich vlastností. Výsledkem práce bylo zhodnocení výhod a nevýhod HSC technologie, obrábění za sucha a možné náhrady dokončovacích operací HSC technologií.

Klíčová slova:

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

ABSTRACT

This dissertation summarize possibilities of using HSC technology in machining. After introduction , theoretical aspects of conventional and high-speed machining were presented. Production of metal splinter by both methods of machining and formation of plastic deformation in the place of cut is presented in this part of dissertation. There was also done characteristic of cutting fluids in terms of their technological division and attributes. As a result of dissertation was evaluation of advantages and disadvantages of HSC technology, evaluation of cutting without cooling and possible substitutions of finishing operations by HSC technologies.

Keywords:

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

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

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 ANALÝZA PŘI KONVENČNÍM A HSC ŘEZÁNÍ.....	12
1.1 HISTORIE VYSOKORYCHLOSTNÍHO OBRÁBĚNÍ	12
1.2 ROZDÍL MEZI KONVENČNÍM OBRÁBĚNÍM A HSC OBRÁBĚNÍM.....	13
1.2.1 Tvorba třísky u konvenčního obrábění	14
1.2.2 Tvorba třísky v podmínkách HSC obrábění.....	15
1.3 VLIV PODMÍNEK OBRÁBĚNÍ VYSOKORYCHLOSTNÍMI ŘEZNÝMI RYCHLOSTMI.....	16
1.3.1 Vliv řezné rychlosti vc	16
1.3.2 Vliv řezné rychlosti na vlastní tvorbu třísky	16
1.3.3 Vliv řezné rychlosti na řezné síly	17
1.3.4 Velikost posuvu, hloubka řezu	17
1.4 VLIV NA INTEGRITU POVRCHU	18
2 PŘEHLED NÁSTROJOVÝCH MATERIÁLŮ A JEJICH CHARAKTERISTIK.....	19
2.1 NÁSTROJOVÉ OCELI.....	20
2.1.1 Uhlíkové nástrojové oceli	20
2.1.2 Nízkolegované nástrojové oceli	20
2.1.3 Vysokolegované nástrojové oceli	21
2.2 RYCHLOŘEZNÉ OCELI	21
2.2.1 Chemické složení a vlastnosti RO.....	21
2.3 SLINUTÉ KARBIDY	23
2.3.1 Nepovlakované slinuté karbidy.....	25
2.3.2 Povlakované slinuté karbidy	28
2.4 CERMETY	29
2.5 ŘEZNÉ KERAMICKÉ MATERIÁLY	30
2.6 SUPERTVRDÉ ŘEZNÉ MATERIÁLY.....	32
2.6.1 Syntetický diamant.....	33
2.6.2 Kubický nitrid bóru	33
3 KVANTIFIKACE ENERGETICKÝCH POMĚRŮ PŘI ŘEZÁNÍ.....	35
3.1 KINEMATICKÉ VELIČINY.....	35
3.1.1 Posuv	36
3.1.2 Ostří nástroje	36
3.1.3 Průřez třísky a jeho rozměry	37
3.1.4 Úběr materiálu a jeho rozměry.....	38
3.2 ŘEZNÉ SÍLY	39
3.2.1 Geometrický rozklad celkové řezné síly do směru řezné rychlosti a směrů k němu kolmých	39
3.2.2 Výpočet vybraných složek celkové řezné síly	41
3.3 PRÁCE A VÝKON ŘEZÁNÍ.....	43
3.4 TEPLO A TEPLOTA ŘEZÁNÍ	44
3.4.1 Teplota řezání.....	46

4	TEORIE TVORBY TŘÍSKY PŘI HSC OBRÁBĚNÍ.....	48
4.1	FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY PROCESU ŘEZÁNÍ.....	48
4.2	PLASTICKÁ DEFORMACE PŘI ORTOGONÁLNÍM ŘEZÁNÍ.....	49
4.2.1	Primární plastické deformace.....	49
4.2.2	Sekundární plastické deformace.....	51
4.3	KVANTIFIKACE ÚHLU ROVINY STŘIHU.....	51
4.4	TŘÍSKY A JEJICH TECHNOLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY.....	53
4.4.1	Druhy tvářených třísek.....	53
4.4.2	Součinitel pěchování třísky.....	54
4.4.3	Objemový součinitel třísek.....	56
5	VÝZNAM CHLAZENÍ PŘI OBRÁBĚNÍ, CHARAKTERISTIKA POUŽÍVANÝCH CHLADÍCÍCH MÉDIÍ.....	57
5.1	CHARAKTERISTIKY A VLASTNOSTI ŘEZNÝCH KAPALIN.....	57
5.2	ROZDĚLENÍ ŘEZNÝCH KAPALIN.....	59
5.2.1	Přívod řezné kapaliny do místa řezu.....	61
5.2.2	Volba řezné kapaliny podle druhu práce.....	62
6	EKONOMICKÉ A ENVIROMENTÁLNÍ HODNOCENÍ HSC TECHNOLOGIÍ.....	63
6.1	EKOLOGICKÉ ASPEKTY RYCHLOSTNÍHO OBRÁBĚNÍ.....	65
6.2	EKOLOGICKÉ PROCESNÍ KAPALINY PRO OBRÁBĚNÍ.....	65
6.2.1	Biocidní přísady.....	66
6.3	VÝMĚNA A ČIŠTĚNÍ ŘEZNÝCH KAPALIN.....	66
6.4	OŠETŘOVÁNÍ ŘEZNÝCH KAPALIN.....	67
6.5	KONTROLA ŘEZNÝCH KAPALIN.....	67
6.6	RECYKLACE ŘEZNÝCH KAPALIN.....	67
6.7	SOUČASNÁ EKONOMIKA PROCESNÍCH KAPALIN.....	69
6.8	SUCHÉ OBRÁBĚNÍ.....	70
6.8.1	Obrábění (soustružení) ocelí bez řezných kapalin.....	70
6.9	NÁHRADA BROUŠENÍ HSC OBRÁBĚNÍM.....	71
	ZÁVĚR.....	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	75
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	77
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	80
	SEZNAM TABULEK.....	81

ÚVOD

Vysokorychlostní obrábění lze považovat za současný standard dnešní doby. Přitom ale výzkumy využití strojního parku v podnicích (prováděné v roce 2003) ukazují, že možnosti vysokorychlostního obrábění na strojích, které to umožňují, z 90 % nejsou využívány. Klasickým příkladem aplikace HSC obrábění je frézování. Dosavadní standardní způsob frézování je technologicky velmi dobře propracován a jeho principem je pohyb frézy po dané dráze při relativně malých řezných rychlostech a velké odebírané třísece. Nevýhodou je, že neumožňuje obrábět příliš tvrdé materiály a to, že povrch obrobku nedosahuje požadované drsnosti a je nutné jej dodatečně opracovat. Všechny takové nedostatky odstraňuje metoda HSC, kterou lze obrábět i kalené materiály o tvrdosti 65 HRC. To je velmi přínosné, jelikož není nutné provádět vyjiskřování, vyžadující speciální stroj a výrobu vhodné elektrody.

Pro HSC frézování je nutné mít NC frézku s dostatečným výkonem a tuhostí vřetene, s vysokými otáčkami a rychlým posuvem. Zejména posuv a jeho zrychlení jsou mimořádně důležité, protože snižují negativní vlivy, jako je chvění a zhoršenou drsnost povrchu při najíždění. Dalším předpokladem je použití kvalitních nástrojů. Při vysokorychlostním obrábění dochází k vysokým teplotám na řezu třísky. To klade značné nároky na nástroj, jelikož je nutné, aby si udržel dlouhou životnost nástroje.

Mezi důležitou podstatu jak pochopit teorii HSC obrábění jsou energetické vlivy při řezání. Tvorba člankovité třísky a tepelné pochody během obráběcího procesu jsou jedním z hlavních znaků HSC. Podstatným činitelem je součinitel pýchování třísky a změna úhlu střižné roviny při určitých řezných parametrech.

Významným faktorem, který podporuje HSC technologie, je obrábění bez použití řezných kapalin tzv. obrábění za sucha. První z předností je výše popsání zvýšení produktivity, dále pak snížení výrobních nákladů. Náklady na chladicí kapalinu a její likvidaci tvoří 15 - 20 % celkových nákladů, zatímco samotné obráběcí nástroje tvoří jen 4 - 5 %. Obrábění bez kapaliny přináší čistší a zdravější pracovní prostředí bez množení bakterií a zápachu, což je lepší pro obsluhu i životní prostředí. Není nutná údržba nádrží a rozvodu chladicí kapaliny. Při obrábění za sucha obvykle dochází k lepšímu utváření třísky.

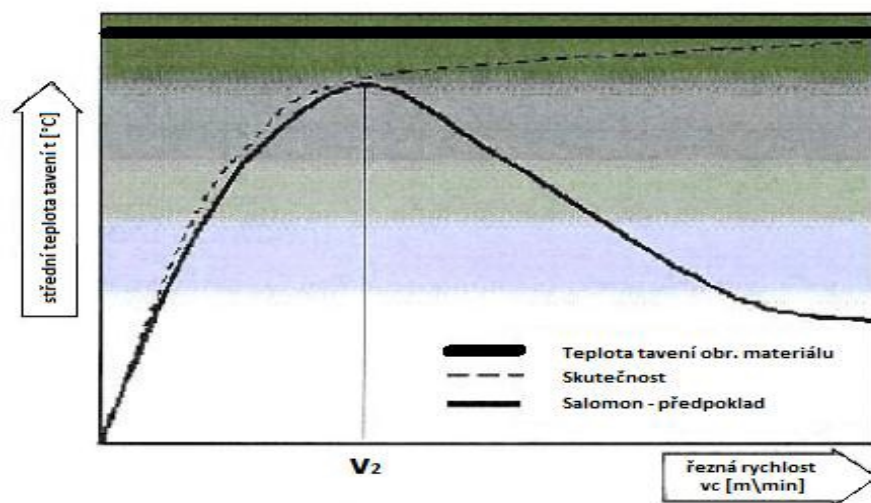
Jedním z hlavních faktorů úspěchu vysokorychlostního obrábění je dokonalý odvod třísek z řezné zóny. To, že se znovu neřežou třísky, je při obrábění kalené oceli velmi důležité pro předvídatelnou životnost nástroje a spolehlivost výrobního procesu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ANALÝZA PŘI KONVENČNÍM A HSC ŘEZÁNÍ

1.1 Historie vysokorychlostního obrábění

Stručně z hlediska vzniku vysokorychlostního obrábění. Myšlenka vysokorychlostního obrábění se zrodila v roce 1931 pro zvýšení řezných výkonů při frézování slitin hliníku a s touto myšlenkou přišel Salomon a také ji experimentálně ověřil při frézování nástrojem velkého průměru, aby dosáhl odpovídající řezné rychlosti. Vycházel přitom z předpokladu, že řezná teplota se s rostoucí řeznou rychlostí nejprve zvětšuje a po dosažení určitého maxima dochází k jejímu poměrně rychlému poklesu (obr 1). Jak vyplývá z grafu, 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. Bylo prokázáno, že zpočátku rychlý nárůst teploty se zpomalí a střední teplota řezání se s rostoucí řeznou rychlostí asymptoticky blíží teplotě tavení obráběného materiálu.[4]



Obr. 1. Závislost řezné rychlosti na střední teplotě řezání [4]

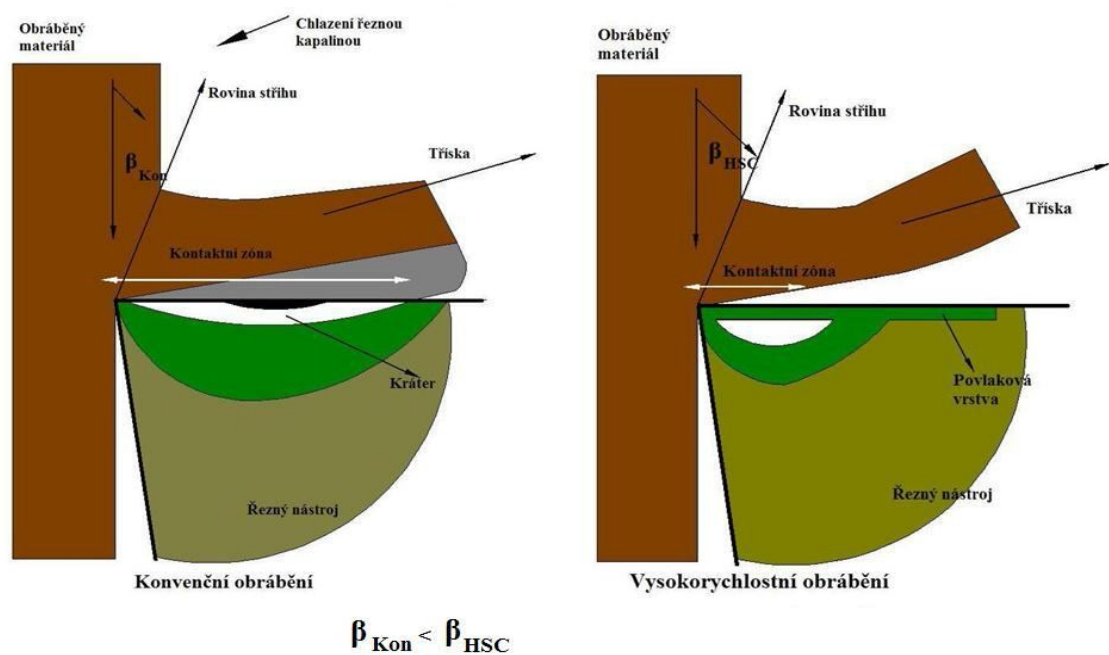
Teoretické závěry Salomona byly ověřovány v některých výzkumných laboratořích, které řešili základní problém existence poklesu teploty po dosažení maximální teploty viz. obr.1, hodnota v_2 . Výsledky balistických zkoušek, při kterých bylo dosaženo řezných rychlostí řádově $v_c = 50\ 000\text{--}80\ 000\ \text{m/min}$, sice potvrdily nižší úroveň řezných teplot i sil, ale s ohledem na dobu trvání záběru břitu s obrobkem (projektil) řádu milisekund šlo o podmínky výrazně odlišné od zatížení břitu 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 hliníku, titanu a super slitin vysokými řeznými rychlostmi.[4]

1.2 Rozdíl mezi konvenčním obráběním a HSC obráběním

Obecně platí, že efektivní řezání kovu nastává, pouze když si řezný materiál při teplotě a v prostředí řezného procesu udrží výraznou převahu tvrdosti oproti obráběnému materiálu. Se vzrůstající řeznou rychlostí roste celkové množství tepla řezného procesu, a to téměř úměrně s narůstající rychlostí stříhu třísky a intenzitou tření třísky o nástroj. Plastickou deformaci třísky v rovině stříhu se rázem, skokově, mění její teplota, která dále roste třením třísky o čelo nástroje. [10]

Princip HSC řezných pochodů lze vysvětlit s porovnáním konvenčních technologií.



Obr. 2. Porovnání konvenčního a vysokorychlostního obrábění [10]

Tab. 1. Srovnání řezných parametrů u konvenčního a HSC obrábění

Sledovaný parametr	Konvenční obrábění	HSC obrábění
Řezná rychlost	$v_{cK} < v_{cHSC}$	
Celkový řezný odpor	$F_K > F_{HSC}$	
Třecí síla	$F_{TK} > F_{THSC}$	
Úhel směru max. tečných napětí	$\Phi_K < \Phi_{HSC}$	
Tloušťka třísky	$a_K > a_{HSC}$	
Rychlost odchodu třísky z kontaktní zóny	$v_{tK} < v_{tHSC}$	
Drsnost obrobeného povrchu	$Ra_K > Ra_{HSC}$	

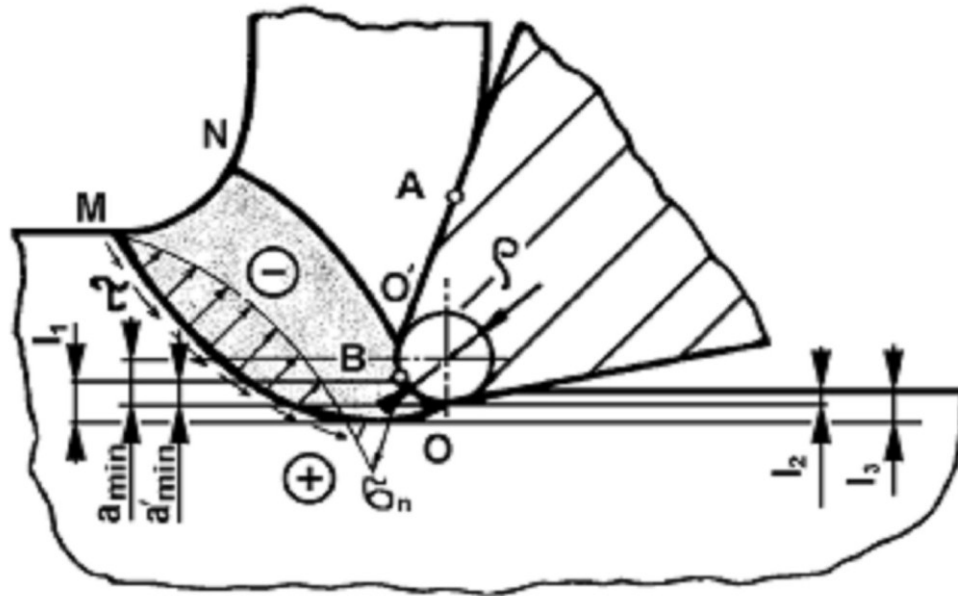
Rozdíly mezi rychlostním a konvenčním obráběním se výrazně projevují v mechanismu tvorby třísky. Oddělování třísky je velmi složitým procesem, jehož průběh závisí na mnoha činitelích, zejména na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu a jejich závislosti na podmínkách plastické deformace.

Obecně platí, že při zvyšující se řezné rychlosti se oblast plastické deformace v zóně tvorby třísky zužuje a ke vzniku třísky dochází plastickým skluzem v jediné rovině, tzv. rovině stříhu. [12]

1.2.1 Tvorba třísky u konvenčního obrábění

Základní podmínkou progresivního obrábění je naprostá převaha požadovaných fyzikálních vlastností materiálu řezného nástroje nad obráběným. Obecně se předpokládá, že se vzrůstající řeznou rychlostí roste celkové množství tepla, a to téměř úměrně s narůstající rychlostí stříhu třísky o nástroj. Plastickou deformací třísky v rovině stříhu se skokově mění její teplota, která dále roste třením třísky o čelo nástroje. Při klasickém obrábění dochází ve smykové rovině k mechanickému zpevnění třísky, které vede k jejímu ztvrdnutí oproti původnímu stavu. Tím, že zpevněná tříska klade větší odpor, narůstá úhel roviny stříhu, který zvyšuje tloušťku třísky i její odpor proti ohybu a současně zvětšuje plochu kontaktní zóny. Mezi třískou a čelem nástroje spolu působí přítlačné i třecí síly, které tímto nabývají vysokých hodnot. Dochází takto k přechodu velké části tepla vyvolaného třením z třísky do nástroje. Třecí teplo a značná přítlačná síla třísky podporující difusní procesy, které vedou k vymílání kráteru na čele nástroje. Intenzita

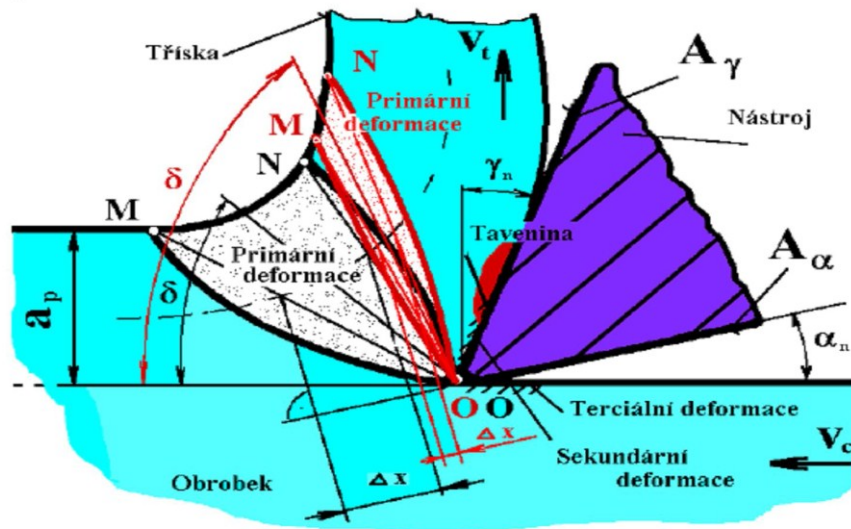
vývoje celkového procesního tepla roste úměrně se zvyšováním rychlosti smyku třísky ve smykové rovině, ale také s řezným odporem, který je dán obráběným materiálem. [13]



Obr. 3. Zpevňování při klasické obrábění [14]

1.2.2 Tvorba třísky v podmínkách HSC obrábění

Vysokorychlostní obrábění, realizované zvláště výkonnými, mimořádně tvrdými a tepelně odolnými řeznými nástroji, probíhá při teplotě třísky blízké tavné teplotě obráběného materiálu. Za určité řezné rychlosti dochází k náhlé změně řady metalurgických, chemických i mechanických vlastností třísky. Tříska sníží svou přitlačnou sílu na čelo nástroje. Tento děj nastane také v případě kalené ocelové třísky, která rovněž změkne. Třecí síla i celkový řezný odpor klesnou, zvětší se úhel smykové roviny, ztenčí se průřez odcházející třísky a zvýší se rychlost v_t jejího odchodu z kontaktní zóny. Utvářející se tříska zčervená a následně sníží svou přitlačnou sílu F_n na čelo nástroje. Plocha kontaktní zóny se naopak sníží, čímž se omezí sekundární nárůst teploty třísky třením v kontaktní zóně. [5]



Obr. 4. Tvorba třísky u konvenční a HSC technologii [14]

1.3 Vliv podmínek obrábění vysokorychlostními řeznými rychlostmi

1.3.1 Vliv řezné rychlosti v_c

S rostoucí řeznou rychlostí se zužuje oblast PPD a úhly β_0 a β_1 rostou. V oblasti HSC obrábění se PPD koncentruje do úzkého smykového pásu v okolí smykové roviny v důsledku omezené řezné rychlosti šíření kluzu v polykrystalech. Rostoucí řezná rychlost způsobuje zmenšování intenzity plastické deformace a v HSC režimu nedochází téměř k plastické deformaci třísky.

1.3.2 Vliv řezné rychlosti na vlastní tvorbu třísky

Z hlediska tvorby třísky je znám vznik především dvou druhů třísek a to třísky soudržné a elementární. Podle rozložení plastické deformace je soudržná tříska plynulá nebo článkovitá. Plynulá tříska se vytváří u kovů a slitin s krychlovou prostorově nebo plošně středěnou krystalovou mřížkou s vysokou tepelnou vodivostí a malou tvrdostí (jsou to např. slitiny hliníku nebo oceli s nízkým obsahem uhlíku). Naopak tvorba článkovité souvislé třísky je pozorována u obrábění kovů s hexagonální těsnou krystalovou mřížkou, které se vyznačují nízkou tepelnou vodivostí a vysokou tvrdostí. Do této skupiny patří převážně materiály, jakými jsou titanové a niklové slitiny.

Druh vzniklé třísky pro určitý obráběný materiál závisí především na velikosti řezné rychlosti. Proto je u HS obrábění pozorován vznik soudržné plynulé třísky, soudržné článkovité třísky i třísky elementární. Při nízkých řezných procesech se může pro jeden

obráběný materiál vytvářet plynulá soudržná tříška a od určité řezné rychlosti se začne vytvářet soudržná článkovitá tříška na třísku elementární. [9]

1.3.3 Vliv řezné rychlosti na řezné síly

Bylo potvrzeno, že řezná síla se zmenšuje s rostoucí řeznou rychlostí až do dosažení minima při řezné rychlosti charakteristické pro daný materiál. Poté má řezná síla tendenci k růstu s rostoucí řeznou rychlostí. Smyková síla v oblasti nižších řezných rychlostí roste se zvětšující řeznou rychlostí vlivem deformačního zpevnění. Od určité výše řezných rychlostí se začne uplatňovat tepelné opevnění a smyková síla klesá a teoreticky se blíží k nule.

Snížení řezné síly pozorované při obrábění různých materiálů, ale nesníží nároky na výkon obráběcích strojů. Mechanická práce je součinem řezné síly a řezné rychlosti. Pokles řezných sil je v porovnání s růstem řezné rychlosti zanedbatelný, proto potřebný výkon stroje stále roste. Snížení řezných sil se také s výhodou používá při obrábění tenkostěnných a málo tuhých částí obrobků. [9]

1.3.4 Velikost posuvu, hloubka řezu

Hodnoty velikosti posuvu a hloubky řezu mají u HS obrábění stejný vliv na jevy při obrábění, jako při konvenčním obrábění. Ovšem jejich hodnoty jsou u HS obrábění velice závislé na mnoha faktorech a jejich hodnoty se musí vždy striktně dodržet vhodná strategie úběru materiálu obrobku. V koutech a ostrých přechodech se může velikost hloubky řezu značně měnit. Vhodnou strategií odebrání materiálu zajišťují vyspělé CAD/CAM systémy. Při špatně zvolené strategii odebrání materiálu může být ovlivněna celá stabilita procesu řezání.

Vliv hloubky řezu a velikosti posuvu na některé jevy:

- s rostoucí velikostí posuvu klesá součinitel přechování, rostou řezné síly, roste střední teplota řezání a snižuje se trvanlivost břitu (pro stejnou v_c)
- s rostoucí velikostí hloubky řezu klesá měrný řezný odpor, klesá součinitel přechování, roste střední teplota řezání, rostou řezné síly a snižuje se trvanlivost břitu (pro stejnou v_c). Roste také úhel smykové roviny a zužuje se oblast PPD

Pro velikosti řezných sil a jejich minimalizace je nejpříhodnější čtvercový průřez třísky. Nevhodný průřez třísky (velká šířka a malá tloušťka) zvyšuje velikost normální složky řezné síly, která negativně ovlivňuje kvalitu povrchu a přesnost obrábění. [9]

1.4 Vliv na integritu povrchu

Integrita obrobeného povrchu je soubor vlastností obrobeného povrchu popsáný souborem následujících charakteristik:

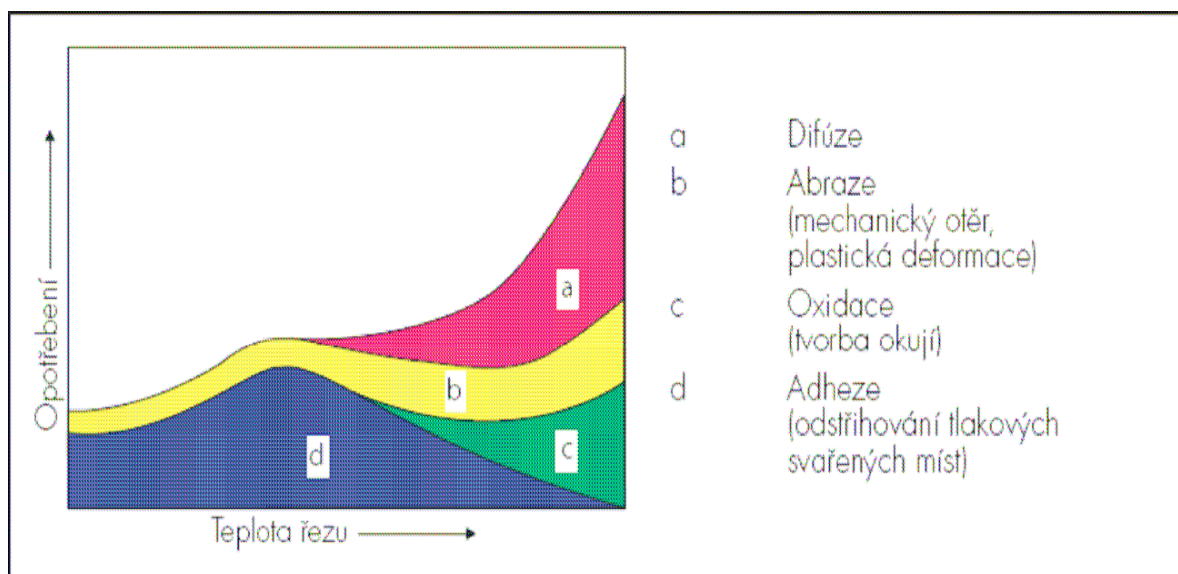
- topografie povrchu (geometrické charakteristiky profilu povrchu)
- strukturní změny v povrchové vrstvě
- stupeň, hloubka a charakter zpevnění
- smysl, velikost a průběh zbytkových pnutí

Velikost zpevnění povrchové vrstvy závisí pouze na terciární plastické deformaci. Použitím HS technologií se intenzita zpevnění povrchové vrstvy sníží a hloubka tohoto zpevnění je velice malá. Snížením teploty povrchu nedochází ani ke strukturním změnám v povrchových vrstvách. To je důležité zvláště u obrábění kalených materiálů, u kterých by vysoká teplota povrchu způsobila popuštění a ztrátu tvrdosti. Tvarová přesnost a drsnost obrobku je závislá také na stabilitě procesu řezání. Pro dosažení stability musí být frekvence vynucených kmitů a samobuzeného kmitání rozdílná od vlastní frekvence některého určujícího členu systému. Nemůže tedy dojít k rezonanci. Důraz na topografii povrchu se klade u HSC obrábění především při dokončovacím obrábění. [9]

2 PŘEHLED NÁSTROJOVÝCH MATERIÁLŮ A JEJICH CHARAKTERISTIK

Vlastnosti materiálu břitů nástroje zcela zásadním způsobem ovlivňují výkonnost a trvanlivost nástroje. Vývoj technologie obrábění po celé 20. století je především vývojem nových dokonalejších nástrojových materiálů. Objevy a zavádění rychlořezných ocelí začátkem 20. století a slinutých karbidů ve třicátých letech znamenaly vždy zlomovou změnu ve schopnostech nástrojů, kterým musely být urychleně přizpůsobeny schopnosti obráběcích strojů. Obráběcí operace trvající začátkem 20. století 100 minut je možno nyní provést během jedné minuty. Vývoj materiálů v současné době dále pokračuje, možná již méně dramaticky, a přináší neustálé další a další zlepšování užitných vlastností. Požadavky kladené na materiály břitů nástroje patří vůbec k nejvyšším v průmyslu (srovnatelné pouze s extrémně namáhanými částmi raketových motorů) a jsou současně značně protichůdné: [7]

- vysoká tvrdost a pevnost při pracovních teplotách, zajišťující odolnost proti deformacím a abrazivnímu opotřebení
- vysoká houževnatost, eliminující křehké porušení břitů
- chemická stálost, zaručující odolnost proti difuzi a oxidaci
- odolnost proti teplotnímu rázu
- snadná zpracovatelnost
- dostupnost a přijatelná cena



Obr. 5. Příčiny opotřebení v závislosti na teplotě v místě řezu [7]

V současné době se používají pro řezné nástroje tyto základní materiály:

1. nástrojové oceli
2. slinuté karbidy
3. keramické řezné materiály
4. supertvrdé řezné materiály
5. brousicí materiály (brusivo)

2.1 Nástrojové oceli

Nástrojové oceli jsou zařazeny ve třídě 19.

- uhlíkové
- nízkolegované
- vysokolegované (rychlořezné)

2.1.1 Uhlíkové nástrojové oceli

Tvrдость uhlíkových nástrojových ocelí, které obsahují 1,1 až 1,35 % uhlíku, je dosažena jejich zakalením, zpravidla do vody, kdy vzniká martenzit, z toho vyplývají dva negativní důsledky:

- ochlazovací rychlost je tak velká, že může dojít ke značným tvarovým deformacím nástroje
- nástroje mohou být použity pouze za podmínek, při kterých nedojde k jejich ohřátí na teplotu způsobující rozpad martenzitu (přibližně 220 °C), popuštění kalené struktury a tím k zásadnímu snížení její tvrdosti s následkem další nepoužitelnosti nástroje

Uhlíkové nástrojové oceli se proto používají pro tvarově jednoduché nástroje určené k obrábění materiálů o malé pevnosti malou řeznou rychlostí, zejména se jedná o nástroje pro ruční obrábění kovů (například pilníky) a o nástroje na ruční i strojní obrábění dřeva či jiných podobných materiálů.[8]

2.1.2 Nízkolegované nástrojové oceli

U těchto ocelí je potřebná tvrdost dosažena kalením, legující prvky obsažené v oceli zvyšují její prokalitelnost natolik, že ochlazovací rychlost při kalení může být relativně nižší, důsledky:

- nedochází k velkým deformacím tvaru nástrojů
- legující prvky přispívají ke zvýšení celkové tvrdosti, odolnosti proti opotřebení a trvanlivosti ostří

Nízkolegované nástrojové oceli obsahují 1,1 až 1,5 % uhlíku, dále především chrom, wolfram a vanad. Kalí se do vody nebo oleje, po kalení následuje jednoduché popouštění. Nízkolegované nástrojové oceli jsou vhodné pro nástroje pracující při menším namáhání, při nižších až středních výkonech a nižších řezných rychlostech, vyrábějí se z nich například vrtáky, závitníky, závitořezné čelisti. [8]

2.1.3 Vysokolegované nástrojové oceli

Tvrdot vysokolegovaných nástrojových ocelí je dána:

- zakalením na martenzit
- přítomností karbidů legujících prvků

Složení vysokolegovaných nástrojových ocelí 0,65 až 1,45 % C, 3,8 až 4,8 % Cr, 5,5 až 19 % W, 0,5 až 5,5 % Mo, 1,0 až 4,7 % V, 4,2 až 10 % Co. Karbidotvorné legující prvky Cr, W, Mo a V se slučují s uhlíkem obsaženým v oceli, vzniklé karbidy jsou velmi tvrdé samy o sobě, tvrdost oceli je ale závislá na formě, v jaké jsou v ní karbidy vyloučeny. Vysoký obsah legujících prvků způsobuje vysokou prokalitelnost těchto ocelí, ochlazovací rychlosti mohou být velmi nízké, a proto jsou vzniklé deformace malé. [8]

2.2 Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli (RO) jsou historicky nejstarším moderním nástrojovým materiálem. Přes současný mohutný nástup používání slinutých karbidů jsou díky svým některým vlastnostem nenahraditelné. Ze všech nástrojových materiálů má RO nejvyšší houževnatost. Je zpracovatelná všemi běžnými technologiemi. Nástroje můžeme z RO vyrábět odléváním, kování, válcováním, třískovým obráběním. To může být pro některé výrobce rozhodující argument. Výhodou je i příznivá cena. Naopak nevýhodou je menší tvrdost a odolnost proti opotřebení, které navíc prudce klesají při teplotě přesahující 500°C. [7]

2.2.1 Chemické složení a vlastnosti RO

Rychlořezné oceli jsou samostatnou skupinou vysoce legovaných nástrojových ocelí, pro kterou je v normě vyhrazena třída 19 8xx. Vysoký obsah legujících prvků způsobuje kromě

vysoké tvrdosti (60 až 68 HRC), pevnosti v ohybu 2700 až 4500 MPa zvýšení popouštěcí teploty (a tím i použitelnosti) do oblasti mezi 500 až 600°C. [7]

Podle převažujícího základního legujícího prvku se rychlořezné oceli dělí na typy wolframové a molybdenové. Podle obsahu dalších legur (Co a V) se dále dělí na oceli výkonné (označované HSS) a vysoce výkonné označované (HSS-E). Sortiment doplňují méně legované úsporné oceli pro méně náročné (např. řemeslnické) nástroje. Vlastnosti jednotlivých RO obsahem legujících prvků:

Wolfram W (v množství 6 až 18%) je základním legujícím prvkem. Vytváří tvrdé, vůči opotřebení odolné karbidy a pevný, vůči popouštění stálý martensit.

Molybden Mo (0,7 až 10%) má podobné vlastnosti jako wolfram. Intenzita působení na vlastnosti oceli je dokonce vyšší, proto se používá menší koncentrace. Karbidy molybdenu jsou navíc jemnější a ve struktuře rovnoměrněji rozložené. Tím je dána poněkud vyšší houževnatost molybdenových oceli. Tyto oceli jsou citlivější na dodržování předepsaných podmínek tepelného zpracování, což dříve poněkud omezovalo jejich používání.

Vanad V (1,3 až 4,3%) vytváří nejtvrďší karbidy a tím zvětšuje odolnost proti opotřebení. Současně ale výrazně klesá obrusitelnost a houževnatost.

Kobalt Co (5 až 12%) zvyšuje odolnost oceli proti poklesu tvrdosti při vysokých teplotách.

Chrom Cr (4%) zajišťuje dostatečnou kalitelnost a prokalitelnost oceli. [7]

Tab. 2. Přehled vybraných druhů rychlořezných ocelí [2]

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

2.3 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy (SK) jsou tuhé roztoky karbidů kovů (především WC a TiC) v pojivu tvořeném většinou kobaltem (Co). Typickou vlastností slinutých karbidů je vysoká tvrdost a odolnost proti opotřebení až do teplot cca 900 °C a vysoká pevnost v tlaku. Nedostatkem

je nižší houževnatost (ve srovnání s rychlořeznými ocelmi) a malá tepelná vodivost. V současné době jsou slinuté karbidy nejdůležitějším nástrojovým materiálem. [7]

Vlastnosti slinutého karbidu lze odvodit z jejich chemického složení orientačně takto:

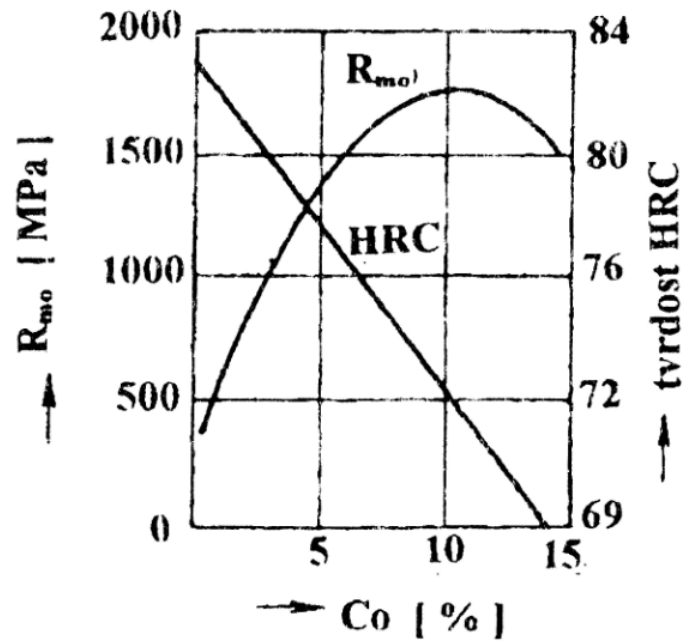
WC – Základní složka standardních karbidů. Zajišťuje odolnost proti abrazivnímu opotřebení a pevnost bříty nástroje.

TiC – Zvyšuje odolnost proti vymílání čela, zmenšuje odolnost proti otěru, houževnatost, pevnost v ohybu a tím pevnost bříty.

Ta (Nb)C – Ve spojení s WC zvyšuje proti opotřebení při vysokých teplotách. Zvyšuje houževnatost a mechanickou pevnost bříty a odolnost proti tepelným šokům.

Co – Plní funkci spojovací fáze karbidu. S růstem obsahu se zvyšuje houževnatost a pevnost v ohybu, klesá však tvrdost. [7]

Obsahové množství jednotlivých fází ovlivňuje jejich tvrdost, houževnatost a odolnost proti oděru obr. 6. 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.[1]



Obr. 6. Závislost tvrdosti HRC a pevnosti
v ohybu R_{mo} slinutých karbidů na obsahu uhlíku[1]

2.3.1 Nepovlakované slinuté karbidy

Obrovský sortiment vyráběných SK označovaných u jednotlivých výrobců zcela rozdílně, způsobuje obtížnou srovnatelnost a znesnadňuje výběr vhodného typu. Proto byla přijata mezinárodní klasifikace SK normou ISO 513, která jako základ třídění používá vhodnost karbidu pro obrábění určité skupiny materiálů podle charakteristického způsobu namáhání bříty a mechanismu opotřebení. Norma tedy neudává nic o chemickém složení karbidu, povlakování, nic o jeho výkonnosti pouze doporučuje vhodnost jeho použití. [7]

Třídění karbidů do tří skupin **P** (určené pro obrábění ocelí), **M** (pro obrábění korozivzdorné oceli) a **K** (pro obrábění litiny). Pro přehlednost jsou skupiny karbidů barevně rozlišeny. V každé skupině se karbidy ještě označují číselným kódem, který určuje poměr mezi tvrdostí a houževnatostí. Větší číslo znamená vyšší houževnatost a nižší tvrdost. Tedy např. karbid typu P01 je určen pro jemné dokončovací soustružení a vyvrtávání (nepřerušovaný řez) oceli vysokou řeznou rychlostí a malým posuvem. Naopak karbid P50 je určen pro hrubování, obrábění, nízké řezné rychlosti a vysoké posuvy. [7]

Tab. 3. Rozdělení slinutých karbidů do skupin a jejich barevné označení [7]

Skupina	Podskupina	Základní chemické složení	Efektivní aplikace pro obráběný materiál
P	P01,P05, P10,P15, P20,P25, P30,P35, P40,P45, P50	WC (30-80)% +TiC(8-64)% +Co (5-17)% + (TaC.NbC)	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávají dlouhou, plynulou třísku: Nelegovaná, nízkolegovaná a vysoce legovaná ocel, litá ocel, automatová ocel, nástrojová ocel, feritická a martenzitická
M	M01,M05, M10,M15, M20,M25, M30,M35, M40	WC (79-84)% +TiC(5-10)% +TaC NbC(4-7)% +Co (6-15)%	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávají dlouhou a střední třísku: Austenitická a feriticko austenitická ocel, korozivzdorná, žáruvzdorná, žárovevná, magnetická a otěruvzdorná ocel.
K	K01,K05, K10,K15, K20,K25, K30,K35, K40	WC (87-92)% +Co (4-12)% + (TaC.NbC)	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávají krátkou, drobnou třísku: Nelegovaná i legovaná šedá litina, tvárná litina, temperovaná.
N	N01,N05, N10,N15, N20,N25, N30		Slinuté karbidy pro obrábění neželezných materiálů: Slitiny mědi a hliníku, duroplasty, fibry, plasty s vlákninou, tvrdá guma.
S	S01,S05, S10,S15, S20,S25, S30		Slinuté karbidy pro obrábění: žáruvzdorné slitiny na bázi Fe, superslitiny na bázi Ni nebo Co, Titanu, Ti slitiny.
H	H01,H05, H10,H15, H20,H25, H30		Slinuté karbidy pro obrábění: Zušlechtěné oceli s pevností nad 1500 MPa, kalené oceli HRC 48-60, tvrzené kokilové litiny HSh 55-58.

Tab. 4. Doporučené použití slinutých karbidů bez povlaku [2]

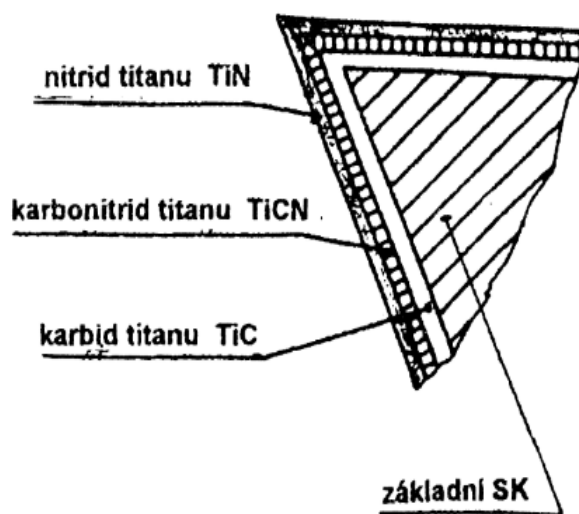
Označení podle ISO	Doporučená použití pro	
	soustružení	frézování
P 01 – P 15	Soustružení načisto, vyvrtávání ocelí a ocelolitiny. Obrábění vyššími řeznými rychlostmi, s malými průřezy třísky a nepřerušovaným řezem. Vysoká tuhost nástroje.	
P 10 – P 20	Soustružení načisto, vyvrtávání oceli a ocelolitiny. Obrábění vyššími a středními rychlostmi s malými průřezy třísek. Rovnoměrná hloubka a nepřerušovaný řez.	
P 25 – P 35	Soustružení ocelí a ocelolitiny. Obrábění výkovků a odlitků s nečistým povrchem. Obrábění středními a nižšími řeznými rychlostmi s nerovnoměrnou hloubkou s přerušovaným řezem. Střední a větší průřezy třísek.	Frézování oceli a ocelolitiny středními a nižšími rychlostmi, středními průřezy třísek při méně příznivých podmínkách obrábění. Vysoká houževnatost a odolnost proti opotřebení.
P 30 – P 50	Soustružení ocelí a ocelolitiny. Obrábění při nízkých řezných rychlostech a velkých průřezech třísky. 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. Vysoká houževnatost.
M 10 – M 20	Soustružení ocelí a ocelolitiny, manganových ocelí, austenitických ocelí a temperované litiny a žáru-vzdorných slitin. Obrábění s plynulým 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. 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. Obrábění při řezných vyšších rychlostech a malých průřezech třísky. 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. Obrábění při vyšších a středních rychlostech malých a středních průřezech třísky. 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. Vysoká odolnost proti opotřebení

2.3.2 Povlakované slinuté karbidy

Od řezných nástrojů 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. [1]

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. [1]



Obr. 7. Třívrstvý povlak břitu[1]

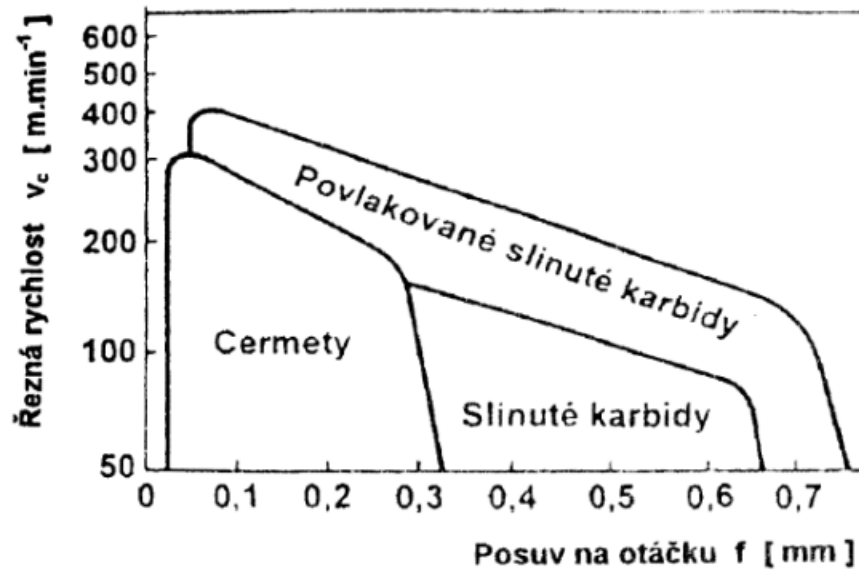
Povlakované slinuté karbidy nachází široké uplatnění pro soustružení, vrtání a frézování převážné části strojírenských materiálů, včetně těžkoobrobitelných. Odhaduje se, že více než 75% soustružnických operací a asi 40 % frézovacích operací je v současné době realizováno nástroji s povlakovanými SK. [1]

Tab. 5. Doporučené použití povlakovaných slinutých karbidů [2]

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

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 m.min⁻¹ obr. 8. [1]



Obr. 8. Oblasti základních řezných podmínek při soustružení běžných ocelí – SK, povlakované SK a cermety [1]

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 jemné obrábění dokončování ocelí, do určité míry 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. [1]

2.5 Řezné keramické materiály

Řezné keramické materiály jsou slinuté kombinované materiály, které lze 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 (Al_2O_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 materiálů 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. [2]

Nutnou podmínkou úspěšného nasazení řezné keramiky jsou vysoce výkonné a tuhé obráběcí stroje s dostatečným rozsahem otáček a posuvů. Obrobek musí umožnit dokonalé tuhé upnutí, pracovní prostor strojů musí být dokonale a bezpečně uzavřen. Některé řezné keramiky nedovolují použití chladicí kapaliny, což může být problém, pokud jsou na stoji současně upnuty i nástroje vyžadující chlazení. [7]

Rozdělení řezné keramiky podle chemického složení, vlastností a doporučeného použití se dělí:

CA – čistá oxidická keramika (bílá nebo šedá barva) je tvořena téměř výhradně 99% oxidem hlinitým Al_2O_3 . Vyniká tvrdostí a odolností proti opotřebení za vysokých řezných teplot až 1200 °C. Má relativně nízkou pevnost a houževnatost a malou tepelnou vodivost. Výhodou je využití řezných rychlostí až 1000 m/min, zvláště při obrábění šedé litiny a konstrukčních ocelí nepřerušovaným řezem. Přidáním malého množství oxidu zirkoničitého do keramiky je možno poněkud zvýšit houževnatost. [7]

CM – směsná oxidová keramika (černá barva) vzniká přidáním 20 až 40% TiC nebo TiN k čisté keramice. Výrazně se tak zvýší teplotní vodivost tím i odolnost proti teplotním šokům, což umožňuje obrábění s částečně přerušovaným řezem i použití chladicí kapaliny. Lze použít pro obrábění tvrzené litiny a kalených ocelí (do 64 HRC), včetně středního a jemného frézování. [7]

CN – nitridová keramika jedná se o zcela rozdílný keramický dvoufázový materiál, ve kterém jsou krystaly nitridu křemíku Si_3N_4 uloženy v pojivu. Materiál vyniká velmi vysokou houževnatostí při zachování vysoké tvrdosti a umožňuje obrábění běžným přerušovaným řezem i použití chladicí kapaliny. Tento druh keramiky je zvláště vhodný

pro obrábění všech druhů litin, včetně litiny s kůrou. Je také nejvhodnější pro frézování (hrubování) k dosažení maximálních řezných výkonů. [7]

CC – povlakovaná řezná keramika povlakování řezné keramiky není tak obvyklé jako u slinitých karbidů. Hlavním posláním povlaku zde není zvýšení tvrdosti povrchu ale zvýšení houževnatosti pomocí snížení šíření mikrotrhlinek základního materiálu nebo zvýšení otěruvzdornosti řezných hran. Metodou CVD se nanáší jedna vrstva TiN nebo TiCN. [7]

Vyztužená keramika (zelená barva) nazývá se tak oxidická keramika zesílená přídavkem viskerů (až 30%). Viskery jsou velice jemná vlákna karbidu křemíku dosahující extrémní pevnosti. Jejich průměr je cca 1 μ m, délka 20 μ m. Vyztužením se výrazně zvýší houževnatost, pevnost v tahu a odolnost proti teplotním šokům. Současně se zvýší tvrdost za tepla a odolnost proti opotřebení. Vyztužená keramika je vhodná pro obrábění žáruvzdorných slitin, kalené oceli, šedé litiny zejména přerušovaným řezem. [7]

2.6 Supertvrde řezné materiály

Do skupiny perspektivních řezných materiálů, které jsou v současné době ve světě, patří krom řezné keramiky další dva druhy syntetický řezných materiálů:

- Kubický nitrid bóru
- Syntetický diamant

Použit těchto řezných materiálů při jejich výborných řezných vlastnostech ve spojení s nástroji NC stroje, ukáže nejbližší budoucnost. Hlavní nevýhodou v současné době je jejich vysoká pořizovací cena. Diamant a kubický nitrid bóru představují dnes nejtvrďší látky. Proto se tyto látky a všechny materiály, které tyto komponenty obsahují, označují jako supertvrde materiály. Do této skupiny supertvrdých 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

2.6.1 Syntetický diamant

Syntetický diamant je uměle vyráběný materiál, který se vlastnostmi blíží přírodním diamantům. Nejvyšší známá tvrdost způsobuje výbornou odolnost proti abrasivnímu opotřebení, má dobrou tepelnou vodivost a nízký koeficient tření. Nevýhodou je křehkost, afinita k železným kovům a Ni slitinám a tepelná odolnost pouze do cca 700 °C. Nejčastěji se používá polykrystalický diamant (PKD), který na rozdíl od monokrystalické formy má isotropní vlastnosti, menší tvrdost a lepší houževnatost. PKD se vyrábí slinováním diamantových zrn při vysokých teplotách s kovovým kobaltovým pojivem. Výsledná struktura je tvořena zrny diamantu spojenými buď přímo mezi sebou, nebo pomocí kobaltového pojiva. PKD se dodává ve formě kompaktních řezných destiček nebo jako tenká vrstva (0,5 až 1 mm) na karbidové destičce. [7]



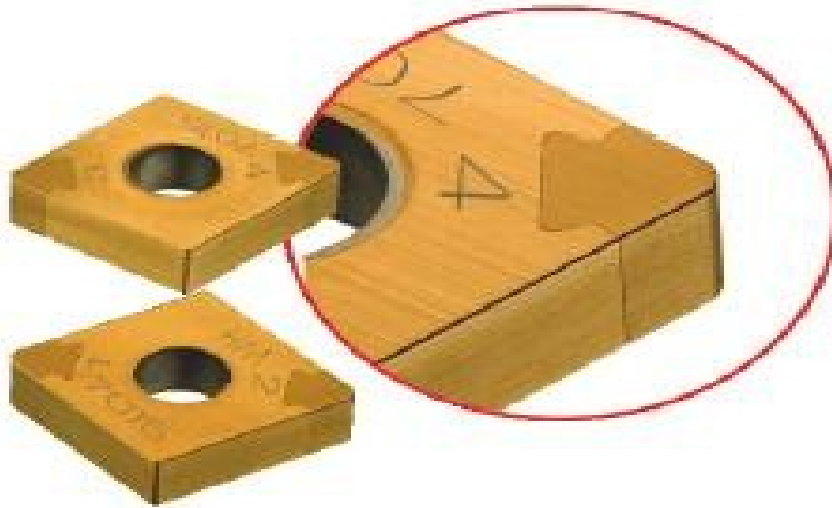
Obr. 9. Břítová destička syntetického diamantu [7]

2.6.2 Kubický nitrid bóru

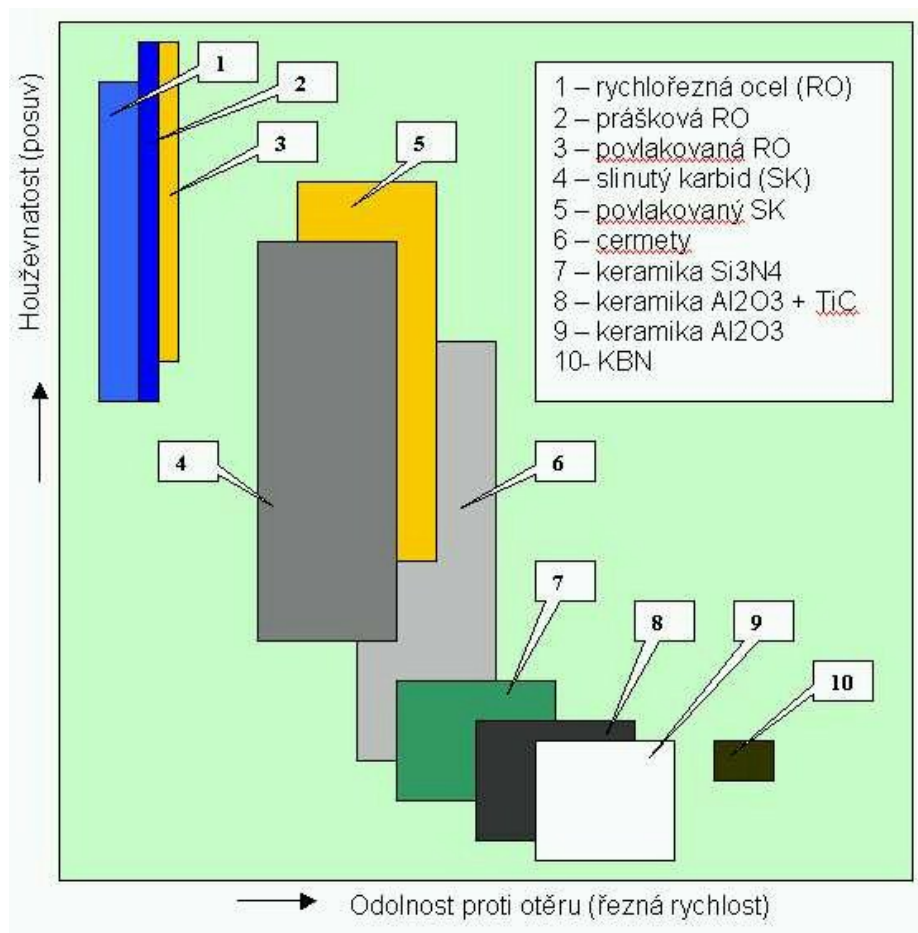
Polykrystalický kubický nitrid boritý (CBN) je synteticky vyrobený materiál s extrémní tvrdostí, kterou si zachovává až do cca 2000 °C, vysokou pevností za tepla, s výbornou odolností proti opotřebení. Houževnatost je nízká podobně jako u keramických materiálů. Vysoká chemická stabilita (na rozdíl od diamantu) umožňuje jeho použití při obrábění ocelí. Nevýhodou je velmi vysoká cena. [7]

CBN se zpracovává do formy břítových destiček lisováním s kovovým nebo keramickým pojivem. Často bývá do karbidové destičky zapájena pouze špička z CBN. Uspoří se tak drahý materiál a destička získá houževnatý základ. Použití CBN má smysl pouze pro

dokončovací obrábění velmi tvrdých materiálů (např. kalených ocelí, tvrzených litin apod.) jako alternativní technologie k broušení. Významné je užití CNB ve formě brousicích materiálů pro broušení kalených ocelí. [7]



Obr. 10. Břitová destička kubického nitridu bóru [7]



Obr. 11. Porovnání vlastností nástrojových materiálů [7]

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 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 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:

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

$$v_f = 10^3 \cdot f \cdot n \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2)$$

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (3)$$

v_c - řezná rychlost

v_f - posuvová rychlost

v_e - rychlost řezného procesu

D - průměr obráběné plochy [mm]

n - otáčky obrobku [min^{-1}]

f - posuv na otáčku obrobku [$\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$]

3.1.1 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 jednomu zdvihu resp. Dvoj zdvihu nástroje nebo obrobku. V případě vícebřitého nástroje může být posuv vztažený na jeden zub nástroje. [1]

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

$$f = z \cdot f_z \quad [\text{mm}] \quad (4)$$

f - posuv na otáčku nástroje [mm]

f_z - posuv na zub [mm]

z - počet zubů nástroje [-]

3.1.2 Ostří nástroje

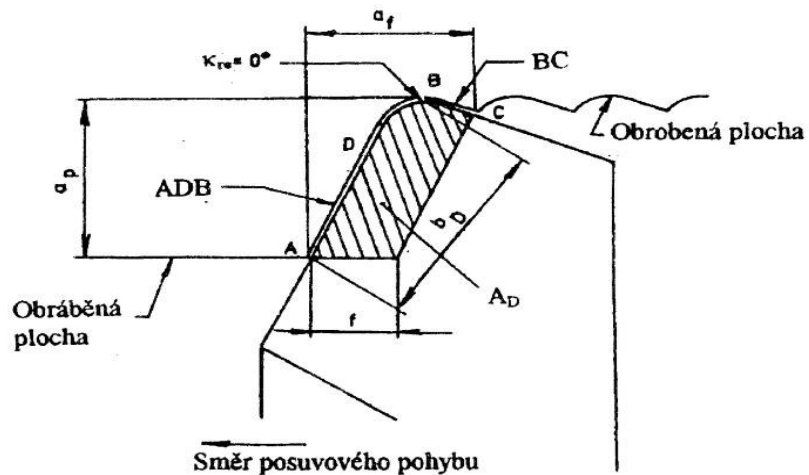
Délka aktivního ostří l_{sa} je skutečná délka aktivního ostří, která bezprostředně realizuje řezání.

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. 12 [1]



Obr. 12. Geometrické veličiny vztažené k ostří nástroje
podélné soustružení – pohled v rovině řezu P_D [1]

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

3.1.3 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_{Dv} určitým čase. [2]

Pro praktické účely přibližně platí:

$$A_D = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi \quad [\text{mm}^2] \quad (5)$$

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

$$A_D = a_p \cdot f \quad [\text{mm}^2] \quad (6)$$

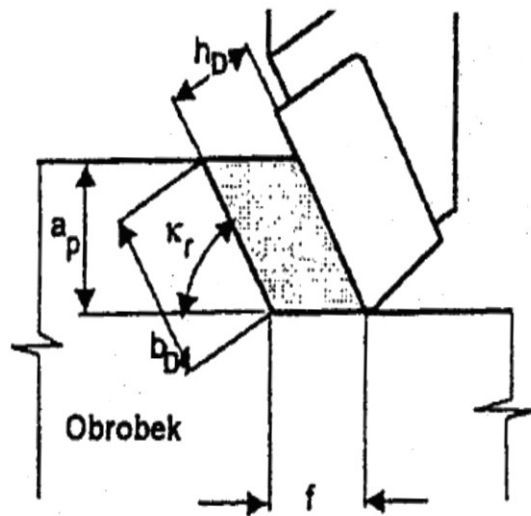
Jmenovitá šířka třísky b_D je vzdálenost mezi dvěma krajními body hlavního ostří, měřená v rovině řezu P_D v určitém čase. Pro soustružení válcové plochy při $r_\varepsilon = 0$ je [2]

$$b_D = \frac{a_D}{\sin \kappa_r} \quad [\text{mm}] \quad (7)$$

Jmenovitá tloušťka třísky h_D je určena poměrem:

$$h_D = \frac{A_D}{b_D} \quad [\text{mm}] \quad (8)$$

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



Obr. 13. Jmenovitý průřez třísky pro podélné soustružení při $r_\varepsilon = 0$ a $a_p \gg r_\varepsilon$ [2]

3.1.4 Úběr materiálu a jeho rozměry

Úběr materiálu 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:

$$A_T = \pi \cdot a_p \cdot (D - a_p) \quad [\text{mm}^2] \quad (9)$$

Výkonnost obrábění Q se vyjádří objemem materiálu odebraného za jednotku času v určitém čase: [2]

$$Q = A_T \cdot v_f \quad [\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}] \quad (10)$$

Např. pro soustružení válcové plochy bude: [2]

$$Q = \pi \cdot 10^{-3} \cdot a_p \cdot f \cdot n (D - a_p) \quad [\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}] \quad (11)$$

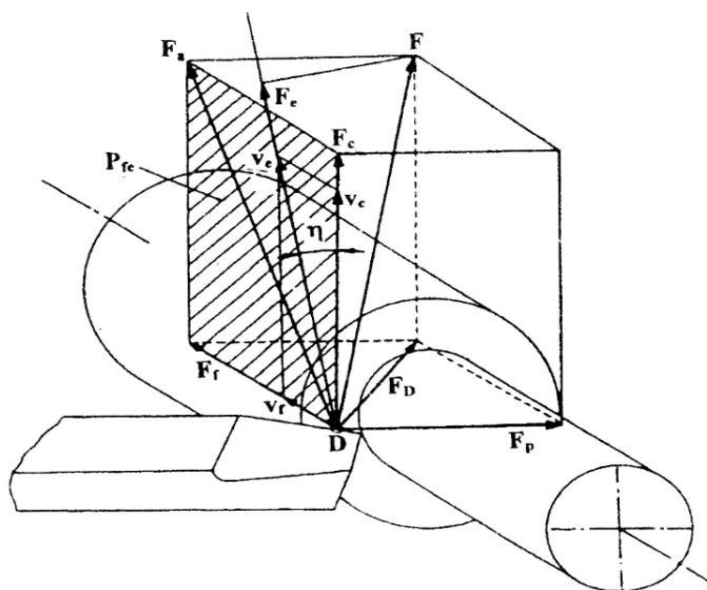
3.2 Řezné síly

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. [1]

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 se rozkládá do příslušných geometrických složek v závislosti na záměrech takové analýzy. [1]

3.2.1 Geometrický rozklad celkové řezné síly do směru řezné rychlosti a směřů k němu kolmých

Geometrický rozklad celkové řezné síly F pro různé případy řezných procesů je uveden na obr. 14 a 15



Obr. 14. Rozklad celkové řezné síly při podélném soustružení válcové plochy [2]

Aktivní síla F_a – obr. 14 a 15 je určena průmětem celkové řezné síly F do pracovní boční roviny P_{fe} . [2]

Pasivní síla F_p – obr. 14 je složka celkové řezné síly F kolmá na pracovní boční rovinu P_{fe} a na směr výslednice řezného pohybu. [2]

Složky celkové řezné síly definované v pracovní rovině, vztahující se ke směru výslednice řezného pohybu, jsou: [2]

Pracovní síla F_e – obr. 14 a 15 je vyjádřena pravoúhlým průmětem celkové řezné síly F do směru řezného pohybu a je tudíž definována v pracovní boční rovině P_{fe} . [2]

Kolmá pracovní síla F_{eN} – obr. 15 je složka pracovní síly F_e kolmá na vektor výsledného řezného pohybu v pracovní boční rovině P_{fe} : [2]

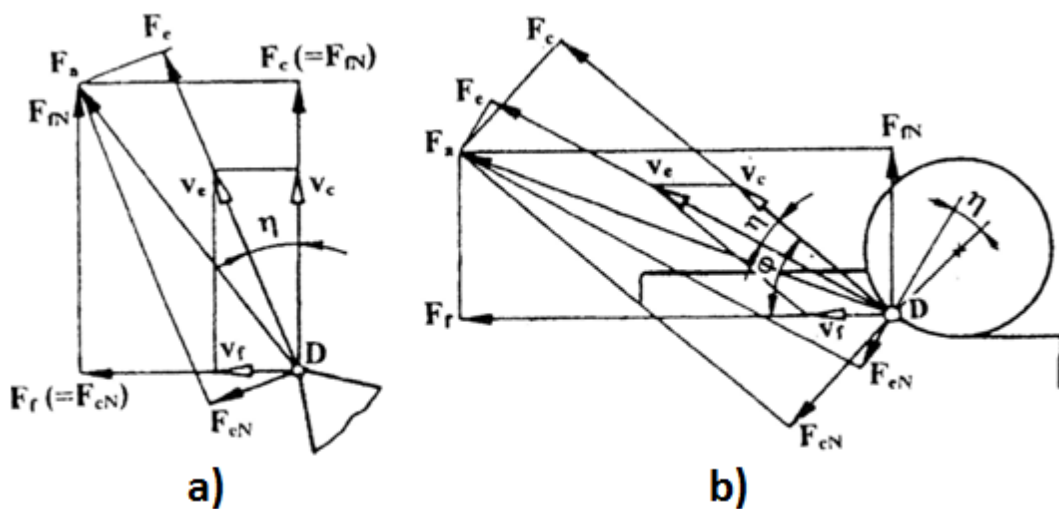
$$F_a^2 = F_e^2 + F_{eN}^2 \quad (12)$$

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

Řezná síla F_c – obr. 14 a 15 je složka celkové řezné síly F identifikovaná pravoúhlým průmětem do směru hlavního pohybu, tzn. do směru vektoru řezné rychlosti. [2]

Kolmá řezná síla F_{cN} – obr. 15 je určena jako složka celkové řezné síly F kolmá na směr hlavního pohybu, definovaná v pracovní boční rovině P_{fe} . [3]

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



Obr. 15. Rozklad celkové řezné síly F v pracovní boční rovině P_{fe} [3]

a - soustružení při $\varphi=90^\circ$; b - rovinné frézování válcovou frézou s přímými zuby při $\varphi<90^\circ$

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

Posuvová síla F_f – obr. 14 a 15 je dána průmětem celkové řezné síly F do směru posuvového pohybu.

Kolmá posuvová síla F_{fN} – obr. 15 je určena složkou celkové síly F , kolmou na směr posuvového pohybu definované v pracovní boční rovině P_{fe} :

$$F_a^2 = F_f^2 + F_{fN}^2 \quad (14)$$

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 :

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad [\text{MPa}] \quad (15)$$

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

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

Dimenzionální síla F_D je složka celkové řezné síly F získaná jako kolmý průmět do roviny základní:

$$F_D^2 = F_f^2 + F_{eN}^2 \quad (17)$$

$$F^2 = F_c^2 + F_D^2 \quad (18)$$

3.2.2 Výpočet vybraných 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: [2]

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{X_{Fc}} \cdot f^{Y_{Fc}} \quad [\text{N}] \quad (19)$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{X_{Fp}} \cdot f^{Y_{Fp}} \quad [\text{N}] \quad (20)$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{X_{Ff}} \cdot f^{Y_{Ff}} \quad [\text{N}] \quad (21)$$

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: [2]

$$F_c = 2007 \cdot a_p^{0,98} \cdot f^{0,71} \quad [\text{N}] \quad (22)$$

Výsledná řezná síla F_e dána vektorovým součtem: [2]

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad [\text{N}] \quad (23)$$

Pro známou velikost měrné řezné síly k_c je možné vypočítat řeznou sílu F_c na základě upraveného vztahu: [2]

$$F_c = k_c \cdot A_D = k_c \cdot h_D \cdot b_D \quad (24)$$

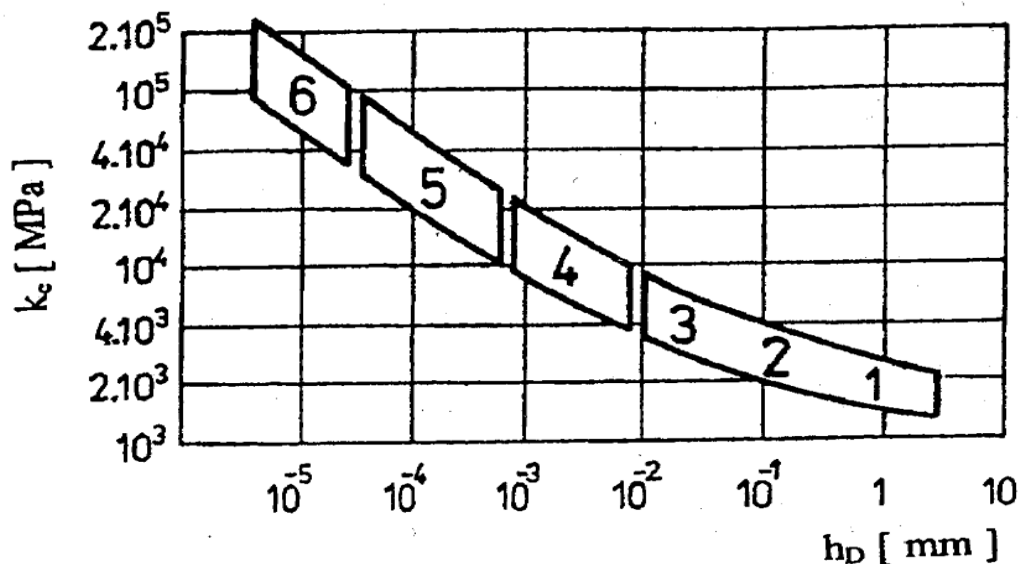
Měrná řezná síla k_c se výrazně mění v závislosti na obráběném materiálu, ale také se jmenovitou tloušťkou průřezu třísky h_D . [2]

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

$$k_c = \frac{C_{kc}}{h_D^{u_{kc}}} \quad [\text{MPa}] \quad (25)$$

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

Grafické znázornění funkce $k_c = f(h_D)$ je pro různé řezné procesy uvedeno na obr.16.



Obr. 16. Závislost $k_c = f(h_D)$ pro různé řezné procesy [2]

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

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). [2]

Práce řezání E_c je práce potřebná na zajištění hlavního pohybu za účelem odebrání určitého množství materiálu obrobku: [2]

$$E_c = \int_0^t F_c \cdot v_c \cdot dt \quad (26)$$

Pro soustružení válcové plochy bude mít poslední vztah tvar: [2]

$$E_c = F_c \cdot v_c \cdot t_p \quad [J] \quad (27)$$

F_c - řezná síla [N]

v_c - řezná rychlost [m.min⁻¹]

t_p - čas řezného procesu [min]

Práce posuvu E_f je práce potřebná na zajištění posuvového pohybu za účelem odebrání určitého množství materiálu: [2]

$$E_f = \int_0^t F_f \cdot v_f \cdot dt \quad (28)$$

Pro soustružení válcové plochy bude mít poslední vztah tvar: [2]

$$E_f = F_f \cdot v_f \cdot t_p \quad [J] \quad (29)$$

F_f - posuvová síla [N]

v_f - posuvová rychlost [m.min⁻¹]

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:

$$E_e = E_c + E_f \quad (30)$$

Pro soustružení válcové plochy bude po formální úpravě platit:

$$E_e = (F_c \cdot v_c + F_f \cdot v_f) \cdot t_p \quad [J] \quad (31)$$

Měrná práce řezání e_c je vyjádřena prací potřebnou na odebrání jednotkového objemu materiálu obrobku. [J. cm⁻³] [2]

Řezný výkon P_c je určen součinem řezné síly F_c a řezné rychlosti v_c působících v hlavním bodě ostří, zpravidla za 1 minutu: [2]

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60} \quad [\text{W}] \quad (32)$$

F_c - řezná síla [N]

v_c - řezná rychlost [m. min⁻¹]

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:

$$P_e = \frac{F_e \cdot v_e}{60} \quad [\text{W}] \quad (33)$$

F_e - pracovní síla [N]

v_e - rychlost řezného pohybu [m. min⁻¹]

Měrný řezný výkon p_c se stanoví jako řezný výkon potřebný na odebrání jednotkového množství materiálu za jednotku času [W.cm⁻³.s⁻¹]

3.4 Teplo a teplota řezání

Ke vzniku tepla při obrábění dochází transformací vynaložené práce. V teplo se přeměňuje veškerá práce vynaložená na řezání s výjimkou práce potřebné na pružné deformace a práce spotřebované na deformaci mřížky kovu a vytvoření nových povrchů. Při obrábění se cca 98% práce přemění na teplo. [2]

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: [2]

$$Q_e = Q_{pd} + Q_\gamma + Q_\alpha \quad [\text{J}] \quad (34)$$

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

Q_γ - teplo vzniklé v oblasti tření třísky po čele nástroje [J]

Q_α - teplo vzniklé v oblasti tření hřbetu nástroje po přechodové ploše obrobku [J]

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

$$Q_e = Q_t + Q_o + Q_n + Q_{pr} \quad [J] \quad (35)$$

Q_t - teplo odvedené třískou [J]

Q_o - teplo odvedené obrobkem [J]

Q_n - teplo odvedené nástrojem [J]

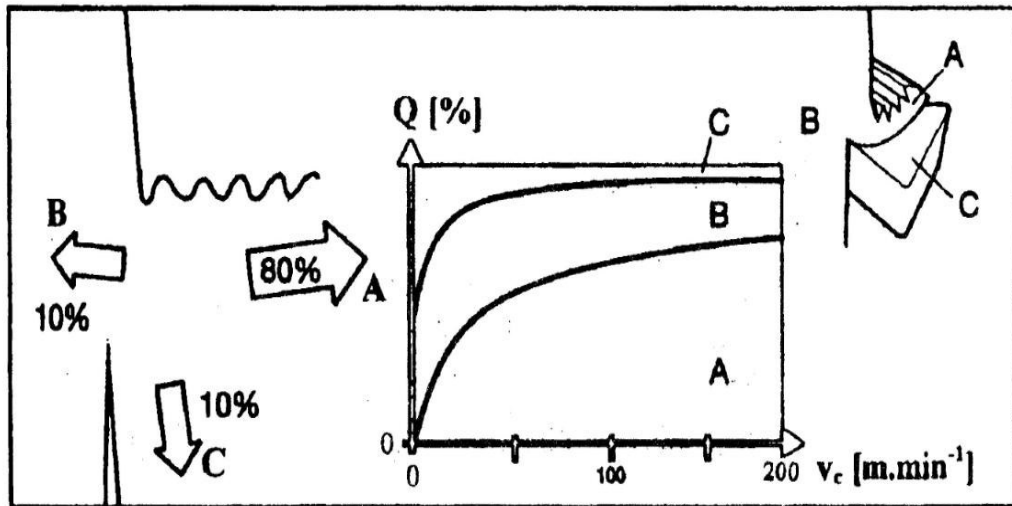
Q_{pr} - teplo odvedené řezným prostředím [J]

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. [2]

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. [2]

Teplo 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. [2]

Příklad rozdělení odváděného tepla vzniklého při obrábění je na obr. 17

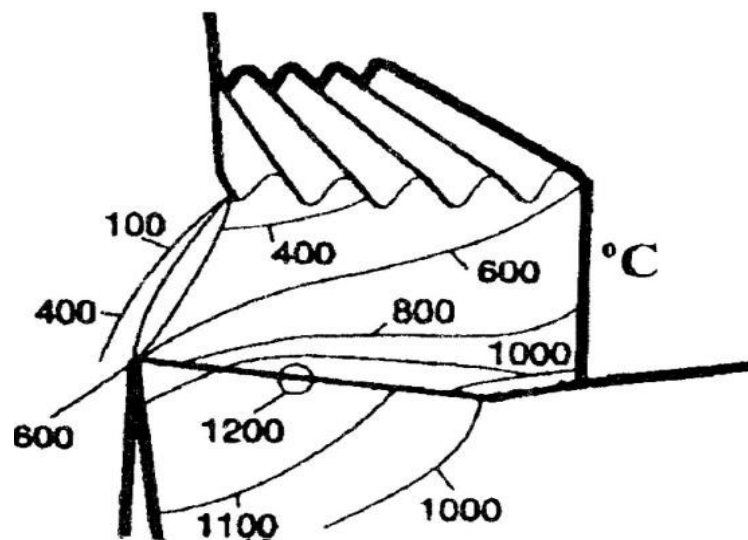


Obr. 17. Obecné rozdělení odváděného tepla při realizaci řezného procesu

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

3.4.1 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. Teplotní pole obrobku, třísky a nástroje je na obr. 18



Obr. 18. Teplotní pole obrobku, třísky a nástroje při ortogonálním řezání [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.

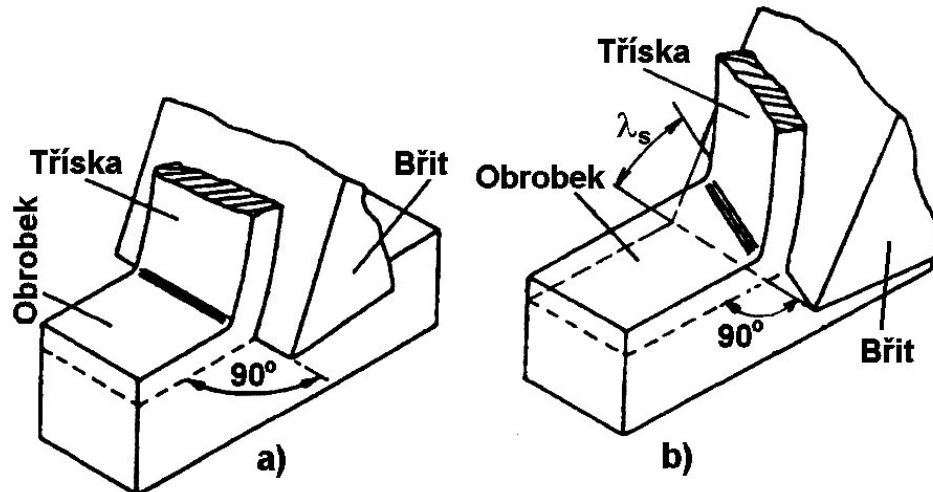
Měření lze provádět různými typy termočlánků, přičemž značným problémem je umístění měřicího spoje termočlánku co nejbližší ke stykové ploše nástroje a třísky.

Přirozeným termočlánkem se měří střední teplota všech stykových míst mezi nástrojem a obrobkem. Tato metoda se používá při experimentální práci, ale slouží i jako jeden z možných snímačů obráběcího procesu u obráběcích strojů s adaptivním řízením. [2]

4 TEORIE TVORBY TŘÍSKY PŘI HSC OBRÁBĚNÍ

4.1 Fyzikální základy procesu řezání

Řezný proces se realizuje v soustavě obrábění stroj, nástroj, obrobek, 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* (obr.19a) nebo *obecné* řezání (obr.19b) [1]



Obr. 19. Ortogonální a obecné řezání [2]

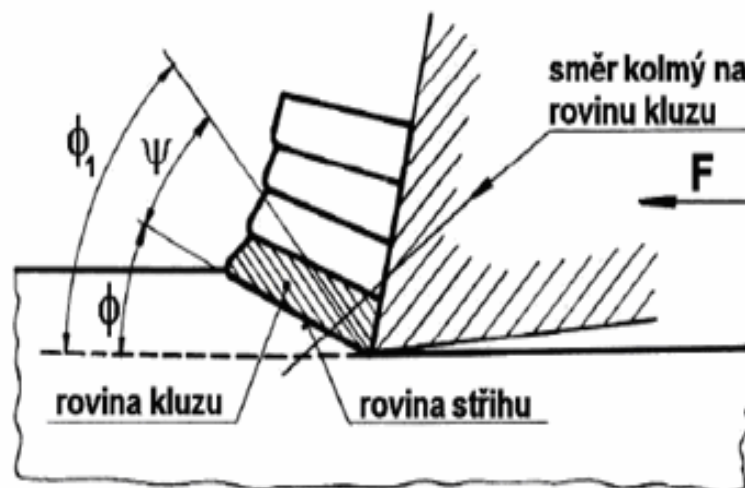
Při ortogonálním řezání je ostří kolmé na směr řezného pohybu a daná problematika se řeší v rovině (zapichování, frézování nástrojem s přímými zuby, protahování). Při obecném řezání je třeba danou problematiku řešit v prostoru (podélné soustružení, vrtání, frézování nástrojem se zuby ve šroubovici).

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. [1]

4.2 Plastická deformace při ortogonálním řezání

Když vniká řezný klín nástroje do povrchu obrobku, dochází v oblasti tvoření třísky k pružným a následně k plastickým deformacím. Břit nástroje je tlačěn do obrobku silou F . Pružné deformace jsou rozloženy do celého obrobku, plastické deformace zahrnují jen zónu řezání. O rozložení napětí v zóně řezání je možné usuzovat z dostupných fotoelasticimetrických, případně jiných metod.

Smyková napětí rostou až na takovou hranici, než dojde k plastické deformaci materiálu obrobku před břitem nástroje (posuv vrstev v kluzných rovinách pod úhlem Φ_1). Pohyb nástroje pokračuje, roste plastická deformace a dochází k pěchování a posunu vrstev materiálu ve směru kolmém ke kluzným rovinám. Oddělováním třísky se v podstatě ukončuje proces plastická deformace. Plastický lom nastává působením kluzné síly, zatímco křehký lom působením síly normálové. [5]

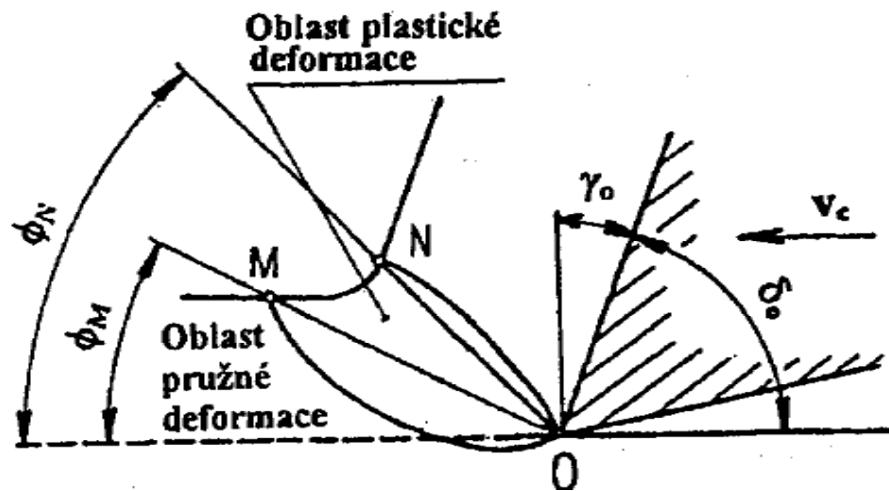


Obr. 20. Vznik třísky [5]

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. [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 δ_0 a nástrojovém ortogonálním úhlu čela γ_0 . [2]



Obr. 21. Oblast plastických deformací v odřezávané vrstvě [2]

MO- počátek plastických deformací

NO- konec plastických deformací

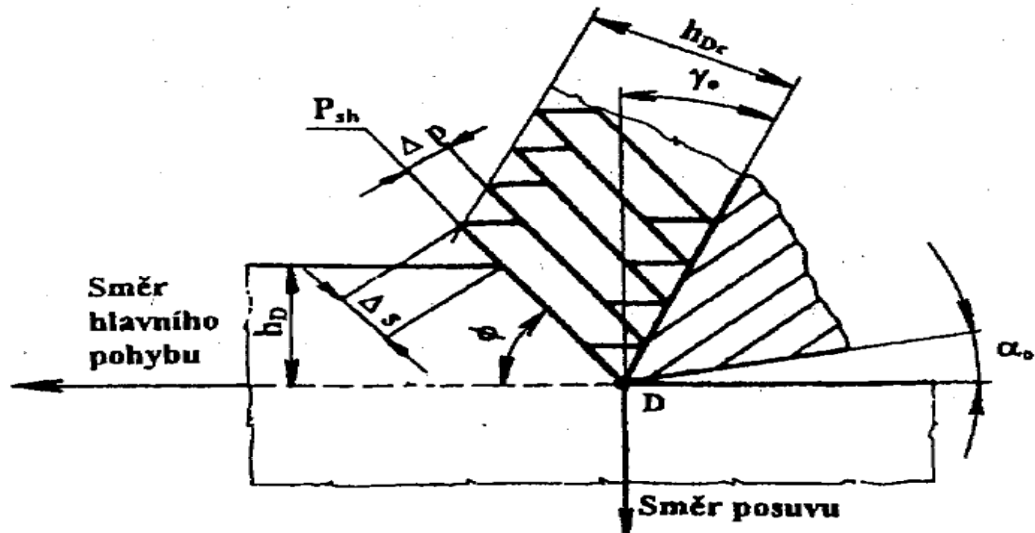
delta_0- nástrojový ortogonální úhel řezu

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. 21 [2]

Při zvýšení řezné rychlosti se deformační oblast zužuje a to tak, že úhly Φ_M a Φ_N rostou (Φ_M rychleji než Φ_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 Φ . Úhel Φ se definuje jako úhel mezi směrem hlavního pohybu a průsečnicí roviny stříhu P_{sh} s pracovní boční rovinou P_{fe} . Úhel roviny stříhu Φ 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. 22 [2]



Obr. 22. Zjednodušený model tvorby elementů třísky při ortogonálním řezání [2]

-pohled na pracovní rovinu P_{fc} v hlavním bodě ostří D

h_D - jmenovitá tloušťka řezu

h_{Dc} - tloušťka třísky

P_{sh} - rovina stříhu

Φ - úhel roviny stříhu

Δ_p - tloušťka elementu třísky

Δ_s - tloušťka elementu třísky

4.3 Kvantifikace úhlu roviny stříhu

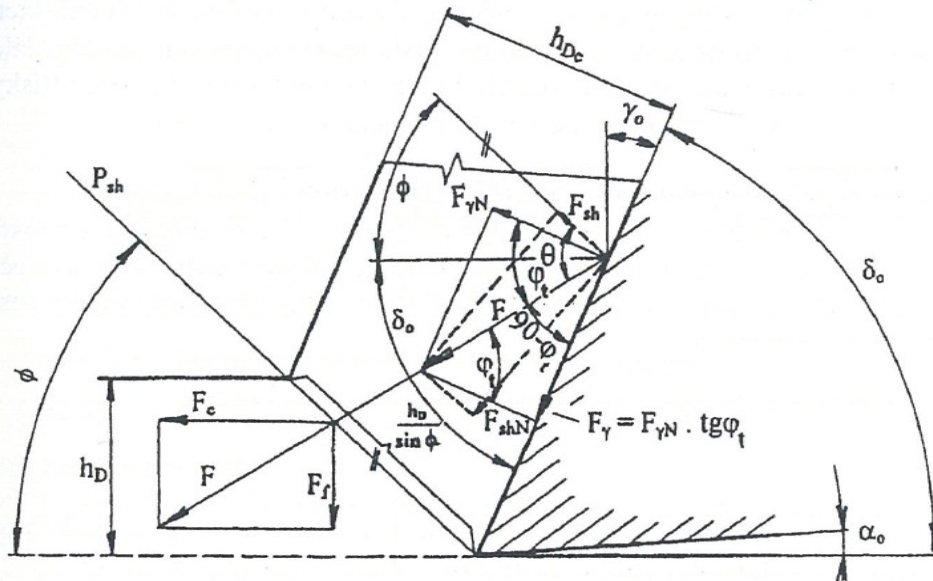
Velikost úhlu Φ je možné určit na základě teorie minimální vynaložené práce, kdy nástroj působí na odřezávanou vrstvu minimální silou. Při této úvaze se vychází z dynamických poměrů pro ortogonální řezání obr. 23

Tangenciální síla F_{sh} v rovině stříhu P_{sh} je dána vztahem: [2]

$$F_{sh} = \frac{T_k}{S_D} = F \cdot \cos \theta \quad (36)$$

τ_K - střední hodnota kritického smykového napětí ve střižné rovině

S_D - jmenovitá plocha třísky



Obr. 23. Dynamické poměry při ortogonálním řezání a kvantifikace

úhlu roviny stříhu Φ [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_γ - tangenciální síla působící na čele nástroje; $F_{\gamma N}$ - normálová síla čela nástroje

φ_t - třecí úhel mezi odcházející třískou a čelem nástroje

Úhel mezi celkovou silou F a tangenciální silou v rovině stříhu F_{sh} :

$$\theta = \delta_0 + \Phi - (90^\circ - \varphi_t) \quad (37)$$

Jmenovitá plocha třísky:

$$S_D = b_D \cdot \frac{h_D}{\sin \Phi} \quad (38)$$

Úhel roviny stříhu Φ se pak stanoví jako minimum funkce. Pro další řešení se pro zjednodušení zavádí konstanta $K = \tau_K \cdot b_D \cdot h_D$

$$F = \frac{K}{\sin \Phi \cdot \cos(\varphi_t + \delta_0 + \Phi - 90^\circ)} \quad (39)$$

Pro nalezení minimální hodnoty síly F platí:

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

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

Podmínka $\frac{dF}{d\Phi} = 0$ bude splněna, když:

$$\cos(2\Phi + \varphi_t + \delta_o - 90^\circ) = 0$$

tedy:

$$\Phi = 90^\circ - \frac{\varphi_t + \delta_o}{2} \quad (40)$$

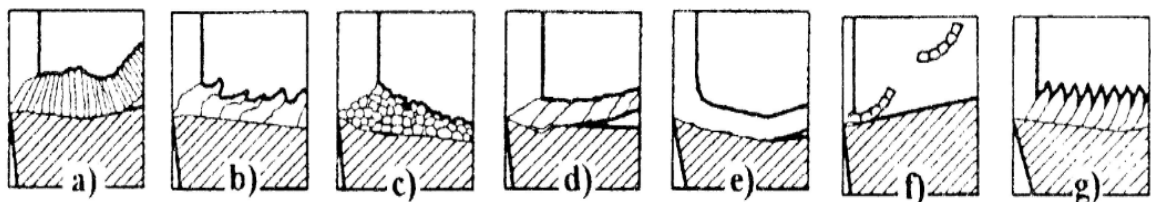
Úhel Φ závisí na ortogonálním úhlu řezu δ_o a třecím úhlu φ_t mezi odcházející třískou a čelem nástroje. Protože úhel φ_t se vyjadřuje středním součinitelem tření, který obsahuje tření mezi třískou a čelem, bude úhel Φ ovlivněn všemi řeznými podmínkami, které mají vliv na velikost úhlu φ_t . Hned po 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 φ_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. 24)



Obr. 24. Základní druhy tvářených třísek při obrábění kovů [2]

a - plynulá článkovitá soudržná tříška, vznikající u většiny ocelí; b - plynulá soudržná lamelová tříška, vznikající u většiny korozivzdorných ocelí; c - tvářená elementární tříška, vznikající u většiny litin; d - nepravidelné článkovitá plynulá tříška, vznikající u většiny vysoce legovaných materiálů; e - tvářená plynulá soudržná tříška, vznikající při malých řezných silách, např. při obrábění hliníku; f - dělená segmentová tříška, vznikající při velkých řezných silách a vysokých teplotách řezání, např. při obrábění tvrdých materiálů; g - plynulá segmentová tříška, vznikající při obrábění titanu. [2]

4.4.2 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]

$$A_{Dc} \cdot v_c = A_D \cdot v_t \quad (41)$$

A_D - jmenovitá plocha řezu

A_{Dc} - plocha průřezu třísky

v_t - rychlost třísky

v_c - řezná rychlost

Součinitel přechování třísky k_s se vyjádří na základě úpravy vztahu (41)

$$k_s = \frac{A_{Dc}}{A_D} = \frac{v_c}{v_t} \geq 1 \quad (42)$$

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

$$A_D = h_D \cdot b_D ; A_{Dc} = h_{Dc} \cdot b_{Dc} \quad (43)$$

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 platí:

$$k_s = \frac{h_{Dc}}{h_D} \quad (44)$$

V tomto případě se velikost h_{Dc} odměří na realizované třísce např. mikrometrem a pro danou hodnotu h_D se vypočítá součinitel pěchování. Součinitel pěchování je možné rovněž vyjádřit na základě délky relativní dráhy nástroje vzhledem k obrobku Δl a korespondující délky třísky Δl_c : [2]

$$k_s = \frac{\Delta l}{\Delta l_c} \quad (45)$$

Při stanovení hodnoty k_s je možné vycházet z parametrů odřezané třísky a použije se vztah:

$$k_s = \frac{10^3 \cdot m_t}{l_c \cdot \rho_t \cdot A_D} \quad (46)$$

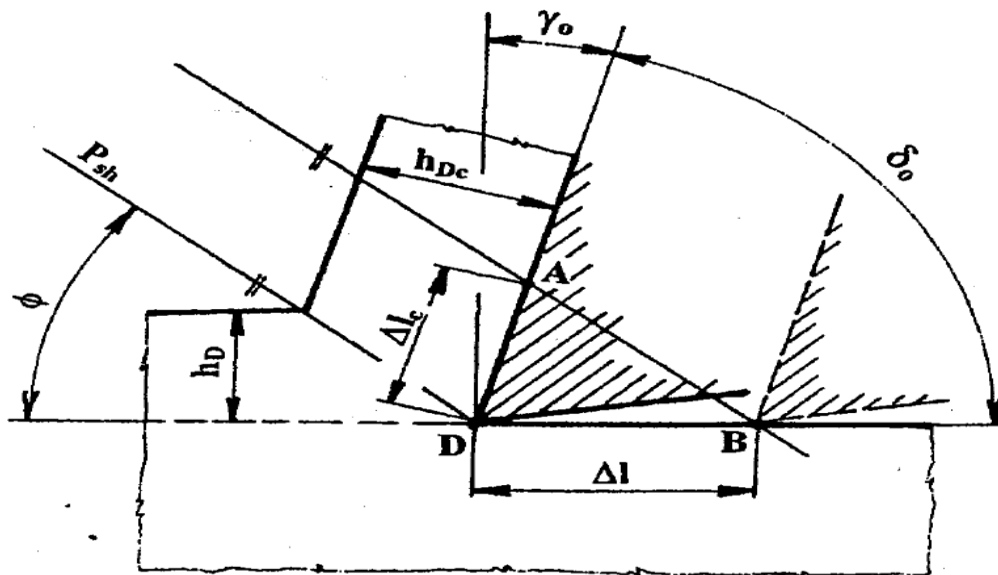
m_t - hmotnost třísky [g]

l_c - délka třísky [mm]

ρ_t - hustota materiálu třísky [$\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$]

A_D - jmenovitá plocha řezu [mm^2]

Pro známou hodnotu k_s a γ_0 lze rovněž vyjádřit velikost uhlu střižné roviny Φ , přičemž se vychází z geometrických souvislostí naznačených na obr. 25 [2]



Obr. 25. Model geometrických souvislostí při pěchování třísky

- ortogonální řezání [2]

Δl - element relativní dráhy nástroje vzhledem k obrobku

Δl_c - element délky odřezané třísky korespondující s Δl

Dle dříve uvedené definice a relací obecného trojúhelníka ABC platí:

$$k_s = \frac{\cos \gamma}{\operatorname{tg} \Phi} + \sin \gamma \quad (47)$$

příp.

$$k_s = \frac{\sin(180-\Phi-\delta)}{\sin \Phi} = \frac{\sin(\Phi-\delta)}{\sin \Phi} \quad (48)$$

Úhel střižné roviny je možné vypočítat dle uvedeného vztahu:

$$\Phi = \arctg \left[\frac{\cos(\gamma_0)}{k_s - \sin(\gamma_0)} \right] \quad (49)$$

4.4.3 Objemový součinitel třísek








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

Objemový součinitel třísek W umožňuje kvantifikovat stupeň plnění obecných požadavků na tvar třísek a lze ho vyjádřit vztahem:

$$W = \frac{V_t}{V_m} \quad (50)$$

V_t - objem volně ložených třísek

V_m - objem odebraného materiálu korespondující s V_t

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

Obr. 26. Hodnoty objemového součinitele třísek W pro vybrané typy třísek [2]

5 VÝZNAM CHLAZENÍ PŘI OBRÁBĚNÍ, CHARAKTERISTIKA POUŽÍVANÝCH CHLADÍCÍCH MÉDIÍ

Hlavní funkcí řezné kapaliny je účinný odvod tepla z místa řezání, ať už dokonalým chlazením nebo mazáním, kdy přívodem řezné kapaliny dochází ke zmenšení jak vnitřního, tak i vnějšího tření. [2]

Jak dlouho kapalina v chladicím systému vydrží, závisí na třech skupinách vlivů: kvalitě vody, ze které je kapalina připravena, složení koncentráту maziva a na péči o kapalinu.[18]

5.1 Charakteristiky a vlastnosti řezných kapalin

Řezné kapaliny se dají rozdělit do dvou hlavních skupin podle účinku na proces řezání, tj. kapaliny s převažujícím chladicím účinkem a kapaliny s převažujícím mazacím účinkem.

Z hlediska technologického a provozního je třeba uvést další požadavky na tyto kapaliny. Jedná se o tyto požadavky:

- mazací účinek
- chladicí účinek
- čistící účinek
- provozní stálost
- ochranný účinek
- zdravotní nezávadnost
- přiměřené náklady

Mazací účinek je schopnost kapaliny vytvořit na povrchu kovu 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 řezná kapalina 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 řezné kapaliny se proto vyžaduje u dokončovacích operací obrábění a při provádění náročných operací, jako je protahování, výroba závitů, nebo výroba ozubení. [2]

Mazací schopnost řezné kapaliny je závislá na její viskozitě a na pevnosti vytvořené mezní vrstvy. S rostoucí viskozitou se zhoršuje pronikání kapaliny mezi třecí plochy, její proudění a také odvod tepla. Viskóznější kapaliny ulpívají také více na třískách a tím dochází ke značným ztrátám. [2]

Přísady dodávané do řezných kapalin mají za úkol zvyšovat pevnost mazacího filmu, a to nejen za nízkých, ale i za vysokých teplot. Mezi tyto přísady patří některé radikály a uhlovodíky - C_nH_{2n} , C_nH_{2n+2} . Jinou skupinu přísad tvoří sloučeniny fosforu, síry, chloru. [2]

Chladicím účinkem se rozumí schopnost řezné kapaliny odvádět teplo z místa řezu. Tuto schopnost má každá kapalina, která smáčí povrch kovu a pokud existuje tepelný spád mezi povrchem a kapalinou. Tento účinek nastává při obrábění vždycky. Odvod tepla vzniklého při řezání se uskutečňuje tím, že proud řezné kapaliny oplachuje nástroj, třísky i obrobek a přejímá vzniklé teplo. [2]

Chladicí účinek řezných kapalin bude záviset na jejich smáčecí schopnosti, na výparném teple, na rychlosti vypařování za určitých teplot, na tepelné vodivosti a na měrném teple. Čím budou tyto veličiny větší, bude i větší chladicí účinek řezné kapaliny. Stejně důležité je i průtokové množství. Výparné teplo zvětšuje chladicí účinek kapaliny, ale přílišné odpařování kapaliny není žádoucí. Aby byla řezná kapalina využita hospodárně z hlediska čistoty a zdraví, je nutné vznikající páry odsávat. [2]

Provozní stálost je možné hodnotit dobou výměny řezné kapaliny. Dlouhodobost výměny řezné kapaliny je podmíněna zárukou, že se její vlastnosti nebudou po tuto dobu měnit. Stárnutí řezné kapaliny olejového typu se projevuje tvořením pryskyřičnatých usazenin, které mohou způsobit i poruchu stroje. Produkty stárnutí mají vliv i na zhoršování funkčních vlastností řezné kapaliny, její rozklad, zmenšení mazacího účinku, ztrátě ochranných schopností, korozi a hnilobný rozklad. Provozní stálost řezné kapaliny závisí na jejích fyzikálních a chemických vlastnostech a na teplotě. [2]

Ochranný účinek řezné kapaliny 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 korozi. Pro vytvoření dokonalého antikorozního účinku jsou do řezné kapaliny přidávány přísady, které pasivují kovy proti nežádoucím účinkům. Dalším důležitým požadavkem je to, aby řezná kapalina nerozpouštěla nátěry obráběcích strojů a nebyla agresivní vůči gumovým těsněním. [2]

Zdravotní nezávadnost řezné kapaliny vychází z toho, že při práci na obráběcích strojích obsluha přichází do styku s řeznou kapalinou. Proto řezná kapalina nesmí být zdraví škodlivá, nesmí obsahovat látky dráždivé sliznici a pokožku a nesmí být jedovaté. Kapaliny také nesmí zamořovat ovzduší nepříjemným zápachem. [2]

Zdravotní nezávadnost řezných kapalin závisí také na jejich 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. [2]

Přiměřené náklady souvisí především se spotřebou řezné kapaliny. Při rozboru nákladů na řezné kapaliny 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 řezné kapaliny s ohledem na její provozní stálost, spotřebu a výměnu. Je třeba zvážit i náklady na likvidaci řezné kapaliny. [2]

5.2 Rozdělení řezných kapalin

Řezné kapaliny se dělí do dvou následujících skupin:

- *chladicí kapaliny* - s převažujícím chladicím účinkem
- *řezné oleje* - s převažujícím mazacím účinkem

Toto rozdělení již přesně nevystihuje sortiment řezných kapalin, které jsou na trhu. Stále se totiž projevuje snaha zvyšovat mazací účinky i u řezných kapalin s převažujícím chladicím účinkem. Výroba ale potřebuje řezné kapaliny s oběma účinky. Moderní druhy řezných kapalin tento požadavek již plní a tak je stírán rozdíl mezi oběma skupinami.

Do skupiny řezných kapalin s převažujícím chladicím účinkem patří kapaliny na vodní bázi a do skupiny řezných kapalin s převažujícím mazacím účinkem patří kapaliny na bázi oleje. [2]

Řezné kapaliny se dají proto rozdělit do těchto skupin:

- vodné roztoky
- emulzní kapaliny
- mastné oleje
- zušlechtěné řezné oleje
- syntetické kapaliny

Vodní roztoky jsou nejjednodušší řezné kapaliny, ale nejsou příliš výhodné z hlediska aplikace. Voda, jako jejich základ, vyžaduje řadu úprav, např. změkčování, přidávání přísad proti korozi, pro zlepšení smáčivosti a proti pěnivosti. Vodní roztok musí být vždy alkalický. U těchto kapalin vzniká nebezpečí rozmnožování anaerobních bakterií, které způsobují tvorbu kalů a nepříjemný zápach. [2]

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 mezi povrchové 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. [1]

Mastné oleje a tuky jsou látky živočišného a rostlinného původu a mají prakticky stejné vlastnosti jako olej minerální. Mají ale menší povrchové napětí a tím i lepší smáčivost, což přispívá k účinnějšímu odvodu tepla.

Velkou nevýhodou těchto mastných látek je značný sklon ke stárnutí, tj. zvyšuje se jejich kyselost a tvoří se pryskyřičné látky. Mezi mastné látky užívané při obrábění patří řepkový olej, ricinový olej, lněný olej a další. [2]

Minerální oleje jsou výrobky z ropy, s dobrými mazacími vlastnostmi, ale horším chladicím účinkem. Mají ale dobrý ochranný účinek a dobrou odolnost proti stárnutí.

Minerální oleje mají velmi dobré provozní vlastnosti, a proto se využívají jako základ pro oleje řezné. [2]

Řezné oleje jsou zušlechťené minerální oleje. Přísady, které se používají, mají vyšší tlakovou únosnost a také lepší mazací vlastnosti.

Přísady, které zlepšují mazací schopnosti řezných olejů jsou:

- mastné látky
- organické sloučeniny
- pevná maziva

Do první skupiny patří zmýdelnitelné mastné oleje, mastné kapaliny, nebo syntetické estery. Tyto přísady zvětšují přilnavost oleje ke kovu a zlepšují mazací schopnosti, ale ne za extrémních tlaků.

Do druhé skupiny patří organické 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 chlórem zmenšují tření, ale jeho účinnost klesá při teplotách nad 400°C. Sloučeniny s fosforem jsou proto ještě účinnější. Jako nejúčinnější se projevily kombinace sloučenin S, Cl, P. [2]

Přísady musí být vybírány velmi pozorně, nesmí být korozivní, a nesmí být zdravotně závadné. 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 kapaliny se vyznačují velkou provozní stálostí, ale jejich mazací a chladicí účinky nejsou lepší než u minerálních olejů. Kapaliny tohoto druhu jsou většinou rozpustné ve vodě a mají dobrý chladicí i mazací účinek, stejně jako účinek ochranný. [2]

5.2.1 Přívod řezné kapaliny do místa řezu

Praktické zkušenosti ukazují, že způsob přívodu řezné kapaliny do místa řezu významně ovlivňuje jak trvanlivost nástroje, tak i jakost obrobenej plochy. [2]

V posledních letech se objevuje na trhu mnoho nových způsobů přívodu řezné kapaliny. Jedná se především o tlakové chlazení, podchlazování řezné kapaliny, chlazení mlhou, chlazení vzduchem, chlazení kysličníkem uhličitým, vnitřní chlazení, chlazení dvěma kapalinami při broušení apod. Podstatou všech těchto metod je zvětšení chladicího a mazacího účinku řezné kapaliny.

Zavádění nových způsobů chlazení a jejich využívání dává možnosti zvyšovat výkon obrábění i jeho hospodárnost. Při ekonomickém hodnocení nových způsobů chlazení je třeba mít na mysli to, že tyto způsoby by měly být využívány hlavně tam, kde přívod řezné kapaliny běžným způsobem nezabezpečuje požadovanou trvanlivost nástroje, nebo tam, kde se běžný způsob chlazení nedá použít. U většiny způsobů obrábění se řezná kapalina přivádí do míst řezání ze strany povrchu obrobku. [2]

5.2.2 Volba řezné kapaliny podle druhu práce

Při hrubování má řezná kapalina především prodloužit trvanlivost nástroje a zmenšit i příkon stroje snížením řezných sil. Příkon stroje snižují nejvíce řezné oleje, ale mají zase malý vliv na trvanlivost nástroje.

Běžné emulze při těchto operacích nemají výrazný vliv na snížení řezných sil. Pokud by se měl projevit jejich vliv na snížení řezných sil, musela by být jejich koncentrace 10 až 15%. Z hlediska trvanlivosti se ale vystačí s koncentrací až 5 %. Daleko významnější je funkce řezné kapaliny při dokončovacích operacích, kdy ani nejde tak o dodržení trvanlivosti nástroje, ale především o dosažení vysoké jakosti obrobeneé plochy.

Při malých řezných rychlostech je výhodné použít řezný olej, nebo vysoce aditivované emulze. Při vyšších řezných rychlostech je výhodnější použít emulze v koncentraci 3 až 5 %. Při volbě řezné kapaliny z hlediska materiálu platí následující pravidla. Zvětšuje-li se pevnost obráběného materiálu, dochází k většímu namáhání břitu nástroje a je proto nutné volit takovou řeznou kapalinu, která má vyšší koncentraci nebo přísady, které zaručují vyšší pevnost mazací vrstvy. U materiálů s horší tepelnou vodivostí je třeba volit řeznou kapalinu, která zaručuje pevnost mazací vrstvy i za vyšších teplot. [2]

6 EKONOMICKÉ A ENVIROMENTÁLNÍ HODNOCENÍ HSC TECHNOLOGIÍ

Základním prostředkem k hodnocení technologických procesů z hlediska jejich vlivu na životní prostředí jsou faktory, kterými se vyjadřuje působení výroby na prostředí. Jsou stanoveny na základě analýzy procesu jako technologického systému a zpravidla se dělí do čtyř základních skupin: [2]

1. Technologické faktory – technické, fyzikální a chemické faktory, které slouží k popisu technologického postupu (úroveň výroby, efektivnost a složitost výrobního procesu, zlepšení struktury výroby, úroveň řezných parametrů, vyšší přesnost a přizpůsobivost výroby, spotřeba materiálu a energie, úroveň automatizace, množství škodlivin a odpadů). [2]

2. Ekonomické faktory – zahrnují podstatné investiční a provozní náklady hlavních a pomocných procesů a další ekonomické a organizační hlediska (produktivita, využitelnost materiálu, výnosy hlavního procesu, použitelnost druhotných surovin, zisk z procesů ochrany životního prostředí). [2]

3. Ekologické faktory – obsahují vybrané vlivy hodnocených environmentálních technologií (prevence vzniku exhalací a toxických odpadů, podíl využitelných odpadů, emise hluku a jeho vlivu na životní prostředí, vliv na flóru a faunu, likvidace odpadů, atd.).[2]

4. Sociální faktory – sociální účinky technologického procesu (personální skladba pracovníků, zvýšení úrovně řídicí činnosti, kultura pracovních podmínek, zvýšení technologické kázně, poškození zdraví pracovníků, kvalifikace a vzdělání). [2]

Tab. 6. Vybrané faktory hodnocení technologických procesů na životní prostředí [2]

Číslo faktoru	Název faktoru	Kvantifikace faktoru	Jednotky
1	Doba využitelnosti	<u>Skutečná (reálná) doba využití 100</u> Normální doba využívání	[%]
2	Využitelnost materiálu	<u>Hmotnost finálního produktu 100</u> Hmotnost polotovaru	[%]
3	Náklady a opravy	<u>Náklady na opravy během normativní doby využívání [Kč]</u> Normativní doba využívání [kg]	[Kč/měs.]
4	Vznikající druhotné suroviny	<u>Druhotná surovina 100 [kg]</u> Finální product [kg]	[%]
5	Ukazatel ekonomické přesnosti výrobního stroje	<u>Provozní nepřesnosti 4σ</u> Toleranční pole vyráběného rozměru	-
6	Provozní náklady	<u>Provozní náklady na čas výroby produktu [Kč]</u> Finální produkt [kg]	[Kč/kg]
7	Produkce odpadu	<u>Množství odpadu 100[kg]</u> Finální produkt [kg]	[%]
8	Environmentální vlivy	Emise hluku, znečištění ovzduší a vody, energetická bilance, atd.	Podle kritéria
9	Podmínky pracoviště	Klima monotónnost práce, osvětlení, teplota, koncentrace škodlivin (výpary řezných olejů), atd.	Podle kritéria
10	Sociální vlivy	Nemocnost, choroby z povolání, vytvoření pracovních příležitostí, požadavky na kvalifikaci a vzdělání, atd.	Podle kritéria

6.1 Ekologické aspekty rychlostního obrábění

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 (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. [15]

6.2 Ekologické procesní kapaliny pro obrábění

Ekologické procesní kapalina pro obrábění kovů je taková kapalina, která nezpůsobuje zdravotní problémy lidem, kteří s ní přijdou do kontaktu. Kapalina, která svojí výrobou, transportem k zákazníkovi, skladováním a likvidací nezavdává ke vzniku rizik ohrožujících životní prostředí. Koncentráty vodou mísitelných procesních kapalin se skládají minimálně z desítky složek. Mezi hlavní složky patří především složky podporující schopnost maziva mazat, tedy různé oleje či mazivostní přísady, jejichž podíl je vysoký. Neméně významné jsou pak korozní inhibitory bránící vzniku koroze ve vodném prostředí kapaliny. V podstatě všechny typy korozních inhibitorů mají alkalický charakter a jejich nadměrné zastoupení není vhodné minimálně kvůli možné kožní dráždivosti. Jako klíčová je u olejových emulzí hodnocena volba emulgačního systému skládajícího se z různých tenzidů. Ty jsou totiž zodpovědné velkou měrou za odolnost kapaliny vůči stárnutí a zlepšení oplachové schopnosti. Jejich nadměrné množství může

vést ke zlepšení těchto vlastností, nicméně i k výraznému nárůstu kožní dráždivosti výrobku a pěnivosti kapaliny. [18]

6.2.1 Biocidní přísady

Významnou složkou jsou biocidní přísady. Ty chrání samotnou kapalinu před biologickým napadením bakteriemi či plísněmi a následně pak i její uživatele před spórami a endotoxiny, které by jinak tyto volně žijící organismy tvořily. Samotné biocidní přípravky jsou obvykle klasifikovány jako významně nebezpečné složky. Jejich zvýšený podíl ve formulaci tedy může vést ke zlepšení životnosti náplně, ale také až ke vzniku alergických reakcí u osob, které jsou kapalině vystavovány. Zároveň mohou mít vliv i na ekotoxicitu koncentrátu. Ačkoli existují výrobky, které deklarují absenci biocidních složek, jeví se použití tohoto přístupu jako poněkud nečestné. Je to především z důvodu, že požadované ochrany proti biologickému napadení kapaliny je pak dosahováno použitím složek, které nebyly pro tento typ použití schváleny podle příslušné legislativy. [18]

6.3 Výměna a čištění řezných kapalin

K výměně řezné emulze zpravidla dochází v kratších intervalech než u řezných olejů. I při optimální péči o emulzi je po určité době nutná její výměna z důvodu vysokých nákladů, nestability, znečištění, snížení podílu přísad, napadení bakteriemi, kvasinkami a plísněmi. Výměna emulze je nutná i v případech, kdy ani po provedených nápravných opatřeních nedociluje požadovaných hodnot.

Pro zajištění dlouhé životnosti další náplně emulze je velmi důležité důkladné vyčištění oběhového systému (potrubí, nádrží, trysek a podobně). Proto se obvykle do použité emulze před vypuštěním přidává tzv. systémový čisticí prostředek, který zneškodní bakterie, kvasinky a plísně a rozpustí usazené nečistoty (zvláště v potrubním systému). Pro docílení optimálních účinků je účelné používat emulzi s přísadou tohoto prostředku po dobu 8 až 24 hodin (podle stupně znečištění).

Po vypuštění náplně musí být ověřena čistota systému a provedena jeho případná dodatečná dezinfekce. Jen tak lze zajistit, že nová náplň nebude kontaminována starými mikroorganismy a nečistotami.

Vypuštěná náplň by měla být odborně likvidována (rozrážením, ultrafiltrací, spalováním apod.) nebo předána firmě, která má oprávnění k nakládání s nebezpečnými odpady. [19]

6.4 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 oxidací, 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. [15]

6.5 Kontrola řezných kapalin

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 zestárlé a znečištěné kapaliny. Nejkritičtějšími známkami jsou skvrny rzi na plochách stroje. Kontrola se provádí indikačními papírky, které kontrolují pH faktor řezného média, 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. [15]

6.6 Recyklace řezných kapalin

Recyklace - je souhrn technologických procesů, které umožní návrat oleje (jinak odpadu) do stávající nebo nové aplikace. Recyklace nemusí znamenat obnovení plné životnosti oleje, kapaliny. Recyklace zahrnuje v sobě jak regeneraci, tak i ošetřování oleje nebo kapaliny. [16]

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. [16]

Regenerace - je ucelený technologický proces. Upotřebené motorové a průmyslové oleje se jako základová surovina zpracovávají v rafinerii. 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. [16]

Recyklace se provádí po dvou 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. [16]

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. [16]

Technologie, 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.

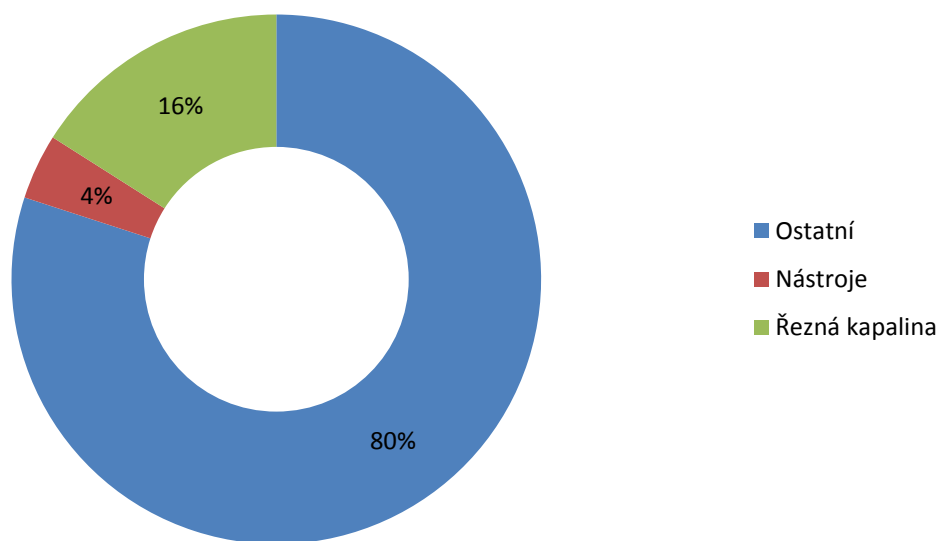
Při odstraňování mechanických nečistot nebo jiných kontaminantů v oleji se zpravidla volí mezi mikrofiltrací, různými druhy filtrů s různou účinností, odstředivkou, elektrostatickým čištěním, aplikací vhodných sorbentů nebo se kapalina nechává jen sedimentovat. Výběr vhodné metody i pracovní postup je 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.

Zařízení na elektrostatické čištění olejů. Zatím se tyto značky v Čechách neprodávají. Ekonomika provozu i pořizovací ceny jsou ale velmi zajímavé. [16]

6.7 Současná ekonomika procesních kapalin

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 eur. 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 %. [16] V běžných provozech se náklady na řezné kapaliny obvykle nepřekračují 5 %. 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. [15]



Obr. 27. Náklady řezné kapaliny a nástroje při výrobě

6.8 Suché obrábění

Cílem suchého obrábění je vyloučení nebo minimalizace použitého množství řezných kapalin a tím snížení nákladů na jejich obstarání, údržbu a likvidaci. Z důvodu technických, ale i ekonomických není často možné úplně se zříct použití řezných kapalin, a proto se používá tzv. „kvazi-suché“ obrábění, které ponechává určité zredukované množství řezných kapalin pro mazání kontaktní plochy a tím pro snížení třecích sil mezi třískou a nástrojem, pro zabránění vzniku nárůstku apod. Chlazení a tříska odplavující efekty se sice ztratí, ale dochází k radikálnímu snížení potřeby řezné kapaliny. K růstu použití suchého obrábění napomáhá potřeba ochrany životního prostředí a ochrana zdraví pracovníků. Mnohé z řezných kapalin obsahují látky poškozující životní prostředí, resp. Zdraví pracovníků. V případě, že úplné vyloučení řezných kapalin není možné, ekologické a zdravotní důvody vedou k potřebě používání neškodných řezných kapalin. [17]

6.8.1 Obrábění (soustružení) ocelí bez řezných kapalin

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_2O_3 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). 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 %. Při posuzování ekonomické výhodnosti obrábění za sucha je proto nutné posuzovat celý případ vždy komplexně. [15]

6.9 Náhrada broušení HSC obráběním

Náhrada broušení nástrojem s definovanou geometrií břitu, zejména frézováním, je umožněno aplikací super tvrdých řezných materiálů a to především polykrystalického kubického nitridu bóru. Tento řezný materiál si udržuje svou stabilní tvrdost až do 2000°C, má výbornou odolnost proti teplotním šokům a vysokou odolnost proti mechanickému opotřebení. Uvedené vlastnosti způsobují, že si udržuje výrazně vyšší tvrdost oproti obráběnému materiálu při dané teplotě řezání a proces obrábění může probíhat efektivně.

Jeho další předností je vysoká řezivost, dovolující řeznou rychlost např. při frézování kalené oceli a litiny 200–400m/min a šedé litiny kolem 2000m/min při posuvech 1000–2000mm/min. Při frézování kalených vodících ploch obráběcích strojů se dosahuje rovinnosti 0,01/1000mm a drsnosti povrchu $R_a=0,6-0,8\mu\text{m}$. Vyšší řezivost znamená i vyšší trvanlivost podle kritéria rozměrové a tvarové přesnosti a drsnosti obráběného povrchu. Tato skutečnost je zvláště významná u CNC strojů, kde náklady na jednu hodinu práce stroje jsou vysoké. Nevýhodou aplikace PKNB při frézování jsou vyšší požadavky na tuhost a dynamickou přesnost frézovacích hlav. Požadavek na axiální a radiální házení je podle velikosti frézovací hlavy 2–5 μm .

Z hlediska ekonomického je frézování kubickým nitridem bóru velice efektivní a lze jim nahradit v řadě případů operace broušení. Lze přitom očekávat i značné energetické úspory, protože spotřeba výkonu na odebrání stejného množství materiálu broušením je průměrně čtyřikrát větší než frézováním. [2]

ZÁVĚR

Rozšíření této nové HSC technologie do široké praxe je otázkou její ekonomické rentability, kde prioritní roli hrají samozřejmě náklady na její zavedení a provoz versus úspory, kterých lze její aplikací dosáhnout. Tato technologie je specifická tím, že prvky do vytvářející vlastní proces obrábění, které se výrazně podílejí na vedlejších časech. V porovnání s konvenčním způsobem obrábění je HSC víc závislé na periferních zařízeních typu: Systémy pro výměnu nástrojů nebo odstraňování třísek atd. Podstata HSC obrábění spočívá v použití vysokých řezných rychlostí, které zajišťují velmi vysoké hodnoty úběru materiálu, a proto je její hlavní výhodou snížení času na obrábění, vedle dalších kvalitativních výhod, které přináší. Pokud strojní čas tvoří podstatnou část celkového operačního času, pokud opotřebením břitu při vysoké řezné rychlosti není významné, potom zvýšení řezné rychlosti je významným faktorem pro snížení strojních časů, ale také pro snížením mzdových a režijních nákladů

V dnešní době metoda vysokorychlostního obrábění soustružením nebo frézováním se zavádí především při obrábění hliníku a jeho slitin, kde při obrábění přinesla podstatné snížení strojních i vedlejších časů. Vedle speciálních obráběcích strojů, nutných k realizaci HSC, jsou velmi důležité náklady na nástroj, respektive dosahovaná trvanlivost břitu v porovnání s její cenou. Pro obrábění hliníku se většinou používá břitů ze SK nebo PKD, které jsou již běžným nástrojovým materiálem za dostupné ceny. Jinak tomu je v případě obrábění ocelí a litin. Zde je nutno pro dosažení odpovídající trvanlivosti břitu použít nástroje s břity PCBN nebo řezné keramiky pro soustružení. Při této variantě se ovšem musí provést důkladná ekonomická rozvaha, při které se berou v úvahu vysoké ceny těchto řezných materiálů.

Obrábění bez chladicího media přináší zdravější a čistější prostředí bez množení se bakterií a zápachu chladicího media, což má velmi příjemný dopad pro obsluhu a životní prostředí. Budeme-li obrábět za sucha bez použití chladicího media, výrazně se sníží náklady na výrobek a odpadnou tím všechny problémy způsobené s likvidací řezných kapalin a bezpečností při skladování.

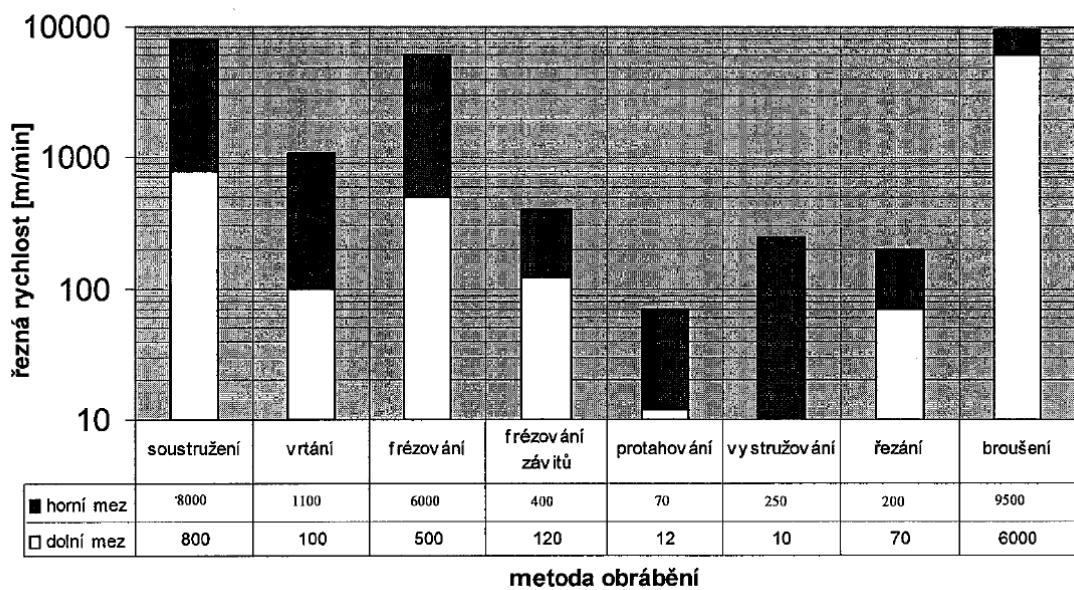
Přednosti HSC obrábění

- důsledkem vysoké hodnoty úběru ($\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$) se získá větší objem odebraného materiálu resp. třísek za jednotku času. Množství odebraného materiálu je zhruba o 30% větší než při konvenčním obrábění
- se zvyšujícími se otáčkami vřetene je umožněna vyšší rychlost posuvu při stejné tloušťce odebírané vrstvy jako při konvenčním obrábění. Proto je dosaženo významného snížení strojních časů
- HSC umožňuje také obrábění velmi tenkých obrobků
- snížení řezných sil a silových deformací soustavy S-N-O
- zvýšení podílu tepla odváděného třískou – vlivem řezné rychlosti dochází ke změně rozložení odvodu tepla (v režimu HFC: 75% třískou, 10% břitem nástroje, 10% okolním prostředím, 5% obrobkem)
- snížení podílu tepla odváděného obrobkem dochází k eliminaci jeho tepelných deformací
- zvýšení rozměrové přesnosti obrobku
- zlepšení kvality obrobeného povrchu, které vede k minimalizaci dokončovacích operací

Některé z nevýhody

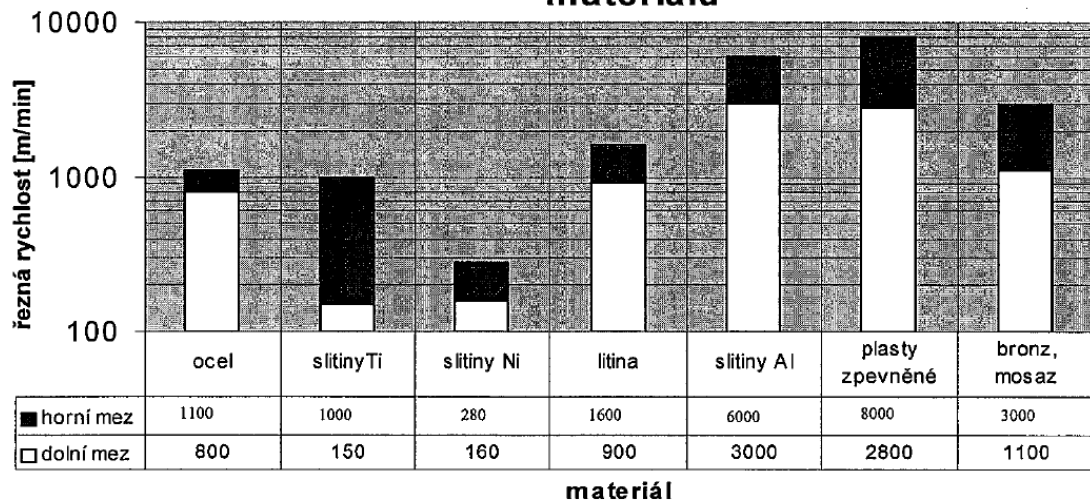
- vyšší zrychlení a zpomalení, rozběh a zastavení vřetena způsobují relativně vyšší opotřebení vodítek, kuličkových šroubů a ložisek vřetena, což často vede k vyšším nákladům na údržbu
- vysokorychlostní obrábění vyžaduje znalost procesu, programovací vybavení a rozhraní pro rychlý přenos dat, zkušení pracovníci se hledají obtížně
- speciální nástroje a řezné materiály, které jsou drahé
- nákladné strojní vybavení
- speciální upínání obrobku
- speciální přesné upínání řezných nástrojů
- odstraňování velkého objemu třísek za jednotku času
- zvýšení intenzity otupení obrobku

Oblasti HSC pro různé metody obrábění



Obr. 28. Oblasti HSC obrábění dle metody obrábění [2]

Oblasti HSC obrábění pro jednotlivé druhy materiálů



Obr. 29. Oblasti HSC obrábění pro vybrané druhy materiálu [2]

Současné řezné materiály zabezpečují aplikaci HSC obrábění zejména při obrábění oceli povlakovanými slinutými karbidy a cermety, neželezných kovů s nižší tavnou teplotou a nekovových materiálů polykrystalickým diamantem, litiny, keramikou, kalených ocelí a litin polykrystalickým kubickým nitridem bóru. Oblasti HSC obrábění jsou pro vybrané materiály uvedeny v obr. 29, pro různé druhy obrábění v obr. 28. [2]

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOCMAN, K.; PROKOP, J. *Technologie obrábění*, 2nd ed.; Akademické nakladatelství CERM s.r.o.: Brno, 2005. ISBN 80-214-1996-2.
- [2] KOCMAN, K. *Technologické procesy obrábění*. 1st ed. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [3] KOCMAN, K. *Speciální technologie obrábění*, 3rd ed.; Akademické nakladatelství CERM s.r.o.: Brno, 2004. ISBN 80-214-2562-8.
- [4] HOUDEK, J.: Rychlostní obrábění výhody a limity jeho použití ve strojírenské technologii, 2001, s. 10
- [5] BRYCHTA, J. *Aspekty a efekty vysokorychlostního obrábění nepravidelných tvarů*. Vysoká škola báňská – TU Ostrava. Ostrava: 2001. ISBN 978-80-248-1879-5.
- [6] AB SANDVIK, Sandviken, Sveden. Understanding cemented carbide – Grain size [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.hardmaterials.sandvik.com>
- [7] *Nástrojové materiály 2013 1* [online]. [cit. 2014-02-10]. Dostupné z: http://u12134.fsid.cvut.cz/podklady/ON/2013_1_Nastrojove_materialy.pdf
- [8] PROF.ING.POPOV,DRCS., Alexey. Řezné nástroje. *TUL-FS,Katedra obrábění a montáže* [online]. 2012 [cit. 2012-18-10]. Dostupné z: http://www.technomat.cz/data/katedry/kom/KOM_RN_PR_04_CZE_Popop_Nastrojove_materialy,_nastrojove_oceli.pdf
- [9] SKOPEČEK, T.; VODIČKA, J. *Základy vysokorychlostního obrábění-HSC-Plzeň*: Vydavatelství Západočeské univerzity v Plzni, 2005. s. ISBN 80-7043-344-2.
- [10] ZELENÝ, J. *Technologie vysokorychlostního obrábění: MM Průmyslové spektrum Speciál*. Praha, 2000. č.6, s.10-13. ISBN 1212-2572.
- [11] ERDEL, BERT, P. *High-speed machining*. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineering, 2003. ISBN 0-87263-649-6.
- [12] LEOPOLD, J. *Werkzeuge für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung*. Carl Hanser Verlag München Wien: 1999. ISBN 3-446-21072-5.
- [13] BRYCHTA, J. *Výrobní stroje obráběcí*. Ostrava: Vysoká škola báňská - TU Ostrava, 2003. ISBN 80-248-0237-6.
- [14] BRYCHTA, Josef. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007, 1 CD-R. ISBN 978-80-248-1505-3.

- [15] KAPITÁNOVÁ, Michaela. *Enviromentální a technologické aspekty HSC obrábění*. Zlín, 2005. Diplomová práce (Ing.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická. Vedoucí práce prof. Ing. Karel Kocman, DrSc.
- [16] KORN, R. *Recyklace - ekologie i ekonomika: MM Průmyslové spektrum*. Praha, 2004. č.4, s.16-17. ISBN 1212-2572.
- [17] JANÁČ, A. a B. BÁTORA. *Technológia obrábania*. STU Bratislava, 2004. ISBN 80-2031-3
- [18] NĚMEC, Pavel a Luboš KREJČÍK. *Šetrné procesní kapaliny pro obrábění kovů: MM Průmyslové spektrum*. Praha, 2004. č.10, s.72. ISBN 1212-2572.
- [19] DOBEŠ, Petr. *Současné trendy v oblasti kapalin pro obrábění: MM Průmyslové spektrum*. Praha, 2007, č.5, s.54. ISSN 1212-2572.
- [20] LÁNÍK, Martin. *Energetické a ekologické aspekty HSC obrábění*. Zlín, 2011. Diplomová práce (Ing.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická. Vedoucí práce prof. Ing. Karel Kocman, DrSc.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A_D	Jmenovitý průřez třísky	[mm ²]
A_{DC}	Plocha průřezu třísky	[mm ²]
Al_2O_3	Oxid hlinitý	[-]
A_T	Plocha průřezu jednoho úběru	[mm ²]
b_D	Jmenovitá šířka třísky	[mm]
b_{Dc}	Šířka třísky	[mm]
CBN	Kubický nitrid bóru	[-]
CNC	(Computer Numerical Control) číslicové řízení pomocí počítače	[-]
e_c	Měrná práce řezání	[J . cm ⁻³]
E_c	Práce řezání	[J]
E_e	Práce řezného procesu	[J]
E_f	Práce posuvu	[J]
f	Posuv	[mm]
F	Celková řezná síla	[N]
F_c	Řezná síla	[N]
F_e	Pracovní síla	[N]
F_f	Posuvová síla	[N]
F_s	Tangenciální síla	[N]
F_{sh}	Tangenciální síla v rovině stříhu	[N]
F_{shN}	Normálová síla v rovině stříhu	[N]
f_z	Posuv na zub	[mm.z ⁻¹]
F_γ	Tečná síla	[N]
$F_{\gamma N}$	Normálná síly	[N]
h_D	Jmenovitá tloušťka třísky	[mm]
h_{Dc}	Tloušťka třísky	[mm]

h_{ch}	Tloušťka odcházející třísky	[mm]
HSC	High speed machining	[-]
k_c	Měrná řezná síla	[MPa]
l_c	Délka třísky	[mm]
MO	Počátek plastických deformací	[-]
m_t	Hmotnost třísky	[g]
n	Otáčky	[min^{-1}]
NiC	Karbid niobu	[-]
NiC	Karbid niobu	[-]
NO	Konec plastických deformací	[-]
P_c	Řezný výkon	[W]
p_c	Měrná řezný výkon	[$\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$]
P_D	Rovina řezu	[-]
P_e	Pracovní výkon	[W]
P_{fe}	Pracovní rovina	[-]
PKD	Polyakryalický diamant	[-]
P_{sh}	Rovina stříhu	[-]
Q	Výkonnost obrábění	[$\text{cm}^3\cdot\text{min}^{-1}$]
Q_c	Celkové množství tepla vzniklé při odřezávání třísky	[J]
Q_e	Teplo řezného procesu	[J]
Q_n	Teplo odvedené nástrojem	[J]
Q_o	Teplo odvedené obrobkem	[J]
Q_{pd}	Teplo vzniklé v oblasti plastických deformací při tvoření třísky	[J]
Q_{pr}	Teplo odvedené řezným prostředím	[J]
Q_t	Teplo odvedené třískou	[J]
Q_α	Teplo vzniklé v oblasti tření hřbetu nástroje po přechodové ploše obrobku	[J]

Q_γ	Teplo vzniklé v oblasti tření třísky po čele nástroje	[J]
RO	Rychlořezné oceli	[-]
S_D	Jmenovitá plocha třísky	[mm ²]
SK	Slinuté karbidy	[-]
TaC	Karbid tantalu	[-]
TaC	Karbid tantalu	[-]
TiC	Karbid titanu	[-]
v_c	Řezná rychlost	[m. min ⁻¹]
v_e	Rychlost řezného procesu	[m. min ⁻¹]
v_f	Posuvová rychlost	[m.min ⁻¹]
v_t	Rychlost třísky	[m. min ⁻¹]
WC	Karbid wolframu	[-]
z	Počet zubů nástroje	[-]
γ_0	Nástrojový ortogonální úhel čela	[rad]
δ_0	Nástrojový ortogonální úhel řezu	[rad]
Δl	Element relativní dráhy nástroje vzhledem k obrobku	[mm]
Δl_c	Element délky odřezané třísky korespondující s Δl	[mm]
Δ_p	Tloušťka elementu třísky	[mm]
Δ_s	Tloušťka elementu třísky	[mm]
ρ_t	Hustota materiálu třísky	[kg.dm ⁻³]
τ_K	Střední hodnota kritického smykového napětí ve střižné rovině	[MPa]
Φ	Úhel smykové roviny	[rad]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Závislost řezné rychlosti na střední teplotě řezání</i>	12
<i>Obr. 2. Porovnání konvenčního a vysokorychlostního obrábění</i>	13
<i>Obr. 3. Zpevňování při klasické obrábění</i>	15
<i>Obr. 4. Tvorba třísky u konvenční a HSC technologii</i>	16
<i>Obr. 5. Příčiny opotřebení v závislosti na teplotě v místě řezu</i>	19
<i>Obr. 6. Závislost tvrdosti HRC a pevnosti</i>	25
<i>Obr. 7. Třívrstvý povlak břitu</i>	28
<i>Obr. 8. Oblasti základních řezných podmínek při soustružení</i>	30
<i>Obr. 9. Břítová destička syntetického diamantu</i>	33
<i>Obr. 10. Břítová destička kubického nitridu bóru</i>	34
<i>Obr. 11. Porovnání vlastností nástrojových materiálů</i>	34
<i>Obr. 12. Geometrické veličiny vztažené k ostří nástroje</i>	37
<i>Obr. 13. Jmenovitý průřez třísky pro</i>	38
<i>Obr. 14. Rozklad celkové řezné síly při podélném soustružení válcové plochy</i>	39
<i>Obr. 15. Rozklad celkové řezné síly F v pracovní boční rovině P_{fe}</i>	40
<i>Obr. 16. Závislost $k_c = f(h_D)$ pro různé řezné procesy</i>	42
<i>Obr. 17. Obecné rozdělení odváděného tepla při realizaci řezného procesu</i>	46
<i>Obr. 18. Teplotní pole obrobku, třísky a nástroje při ortogonálním řezání</i>	46
<i>Obr. 19. Ortogonální a obecné řezání</i>	48
<i>Obr. 20. Vznik třísky</i>	49
<i>Obr. 21. Oblast plastických deformací v odřezávané vrstvě</i>	50
<i>Obr. 22. Zjednodušený model tvorby elementů třísky při ortogonálním řezání</i>	51
<i>Obr. 23. Dynamické poměry při ortogonálním řezání a kvantifikace</i>	52
<i>Obr. 24. Základní druhy tvářených třísek při obrábění kovů</i>	53
<i>Obr. 25. Model geometrických souvislostí při pěchování třísky</i>	55
<i>Obr. 26. Hodnoty objemového součinitele třísek W pro vybrané typy třísek</i>	56
<i>Obr. 27. Náklady řezné kapaliny a nástroje při výrobě</i>	70
<i>Obr. 28. Oblasti HSC obrábění dle metody obrábění</i>	74
<i>Obr. 29. Oblasti HSC obrábění pro vybrané druhy materiálů</i>	74

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Srovnání řezných parametrů u konvenčního a HSC obrábění</i>	14
<i>Tab. 2. Přehled vybraných druhů rychlořezných ocelí</i>	23
<i>Tab. 3. Rozdělení slinutých karbidů do skupin a jejich barevné označení</i>	26
<i>Tab. 4. Doporučené použití slinutých karbidů bez povlaku.....</i>	27
<i>Tab. 5. Doporučené použití povlakovaných slinutých karbidů.....</i>	29
<i>Tab. 6. Vybrané faktory hodnocení technologických procesů na životní prostředí.....</i>	64